

Instrumentation et Méthodes pour le contrôle non destructif

Illustration au contrôle des conduites de précontrainte des ouvrages d'art



*Intervenant : Thierry Bore
Dominique Placko – Frédéric Taillade*

séminaire Centre d'Alembert - 21 avril 2010

- Généralités sur le Contrôle Non Destructif (CND)
- Précontrainte extérieure : présentation, défauts rencontrés et procédure d'auscultation
- Sonde capacitive: fonctionnement et performances
- Modélisation par DPSM
- Application de la technique à notre problème et modélisation de plans d'expérience

Le CND c'est quoi ?

Les **Contrôles Non Destructifs** sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, **sans les dégrader**

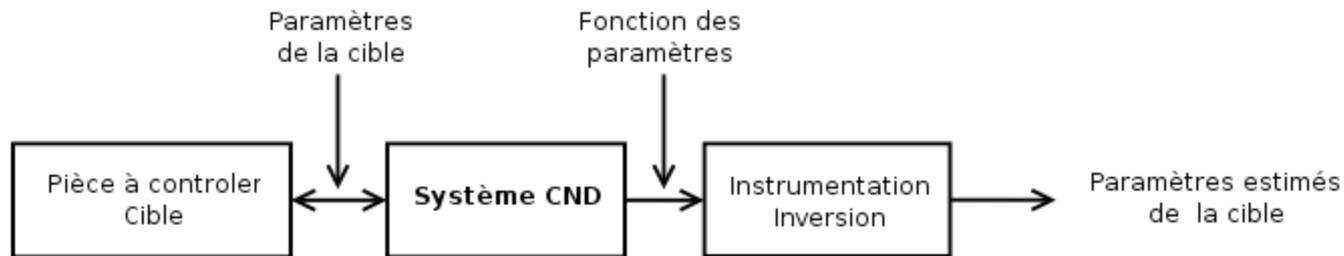
Ils peuvent être appliqués pratiquement à tous les stades de vie d'un élément:

- production
- utilisation
- étude de vieillissement
- rétrofit
- maintenance
- étude de vieillissement

Il existe de **nombreuses techniques**:

endoscopie, ressuage, ultrasons, radiographie, tomographie rayons X, courant de foucault, magnétoscopie, thermographie, shearographie ...

Quelle que soit la méthode adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique suivant :



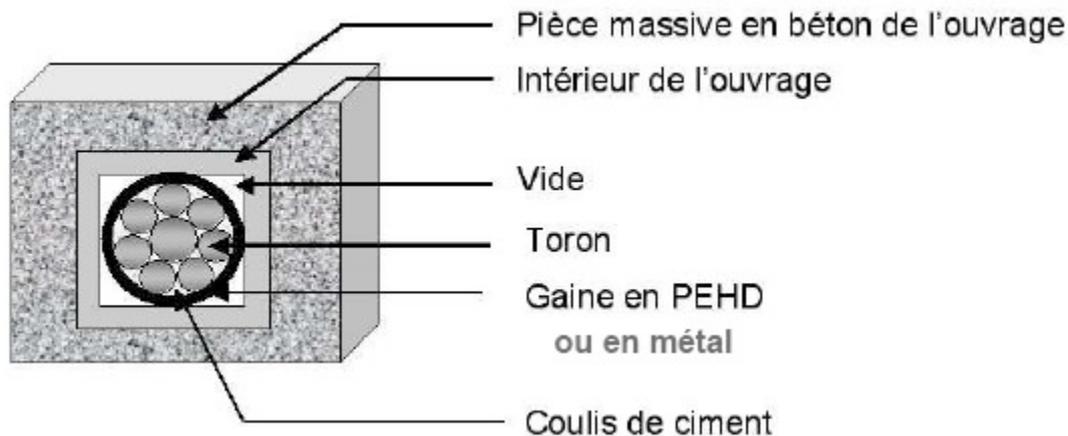
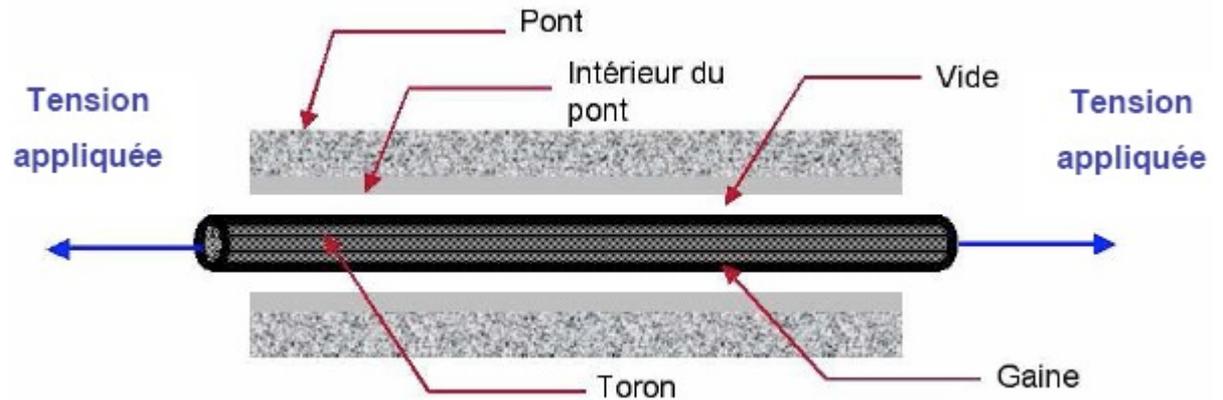
La cible se caractérise par un **ensemble de paramètres** que l'on va chercher à **estimer** afin de former un **diagnostic d'intégrité**

La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre **de signaux** qui sont **fonction des paramètres recherchés**

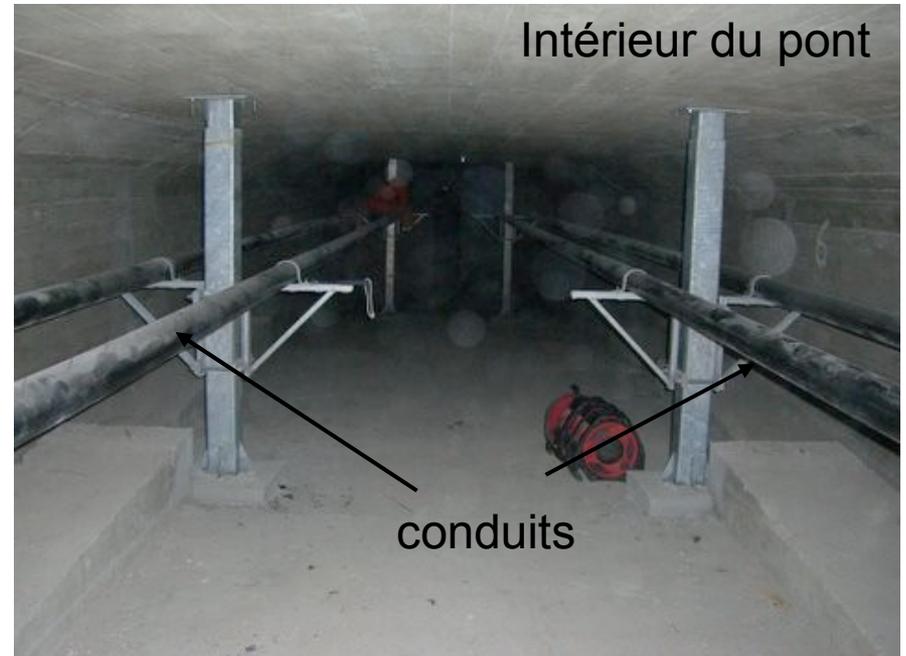
Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce

Précontrainte extérieure ?

De nombreux ouvrages utilisent la précontrainte externe, que ce soit dès leur construction ou comme procédé de renforcement de la structure

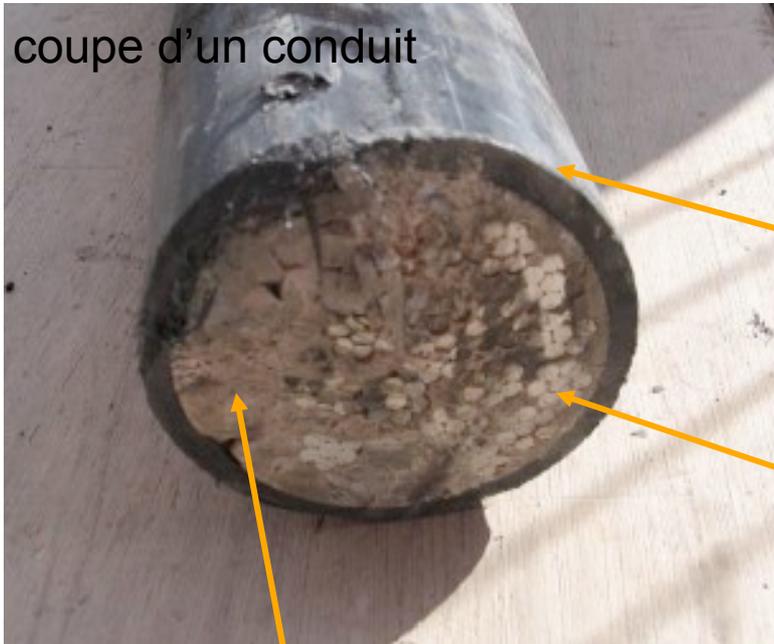


Précontrainte extérieure ?



➔ Conduit accessible donc contrôlable !

Conduit de précontrainte extérieure



coupe d'un conduit

Conduit: PEHD (diamètre ext: 90mm)

Câbles d'acier

Coulis de ciment



- Saint Cloud 1998
 - **un câble de renforcement mis en place en 1981 est trouvé rompu par un agent de la Subdivision Entretien de l'A13**
- Pont-A-Mousson 2005
 - **Localisation : zone inclinée proche d'un déviateur en point haut du câblage**
 - **Corrosion avec réduction de section pouvant atteindre 50% de la section initiale**
 - **Absence de coulis dans la gaine, pâte blanche**
 - **Analyse du coulis d'injection**
 - Forte teneur en fer
 - Apparition du manganèse et du chrome (éléments d'alliage de l'acier)



Viaduc de Pont-A-Mousson 2005



➔ **Corrosion des aciers**



Présence de vides

Processus de corrosion « normaux » par condensation d'eau sur l'acier par exemple

Présence de ségrégation/ressuage

Création d'une pile électrochimique acier dans coulis sain / acier dans phase ségrégée/ressuée

Sensibilité de l'acier vis-à-vis de certains paramètres

pH		(aux pH considérés 12,5 – 14)
Concentration en NaOH		(aux pH considérés 12,5 – 14)
Sulfates		(aux pH considérés 12,5 – 14)
O ₂		
Température		(si supérieure à 40°C)

Formulations

Eau – ciment – adjuvant Chryso GT

E/C = 0,65 (sans l'eau de l'adjuvant)

Extrait sec du chryso GT: 30%

➔ pH de la pâte blanche mesurée sur le terrain 13,9 !

Procédures d'auscultation **inappropriées**:

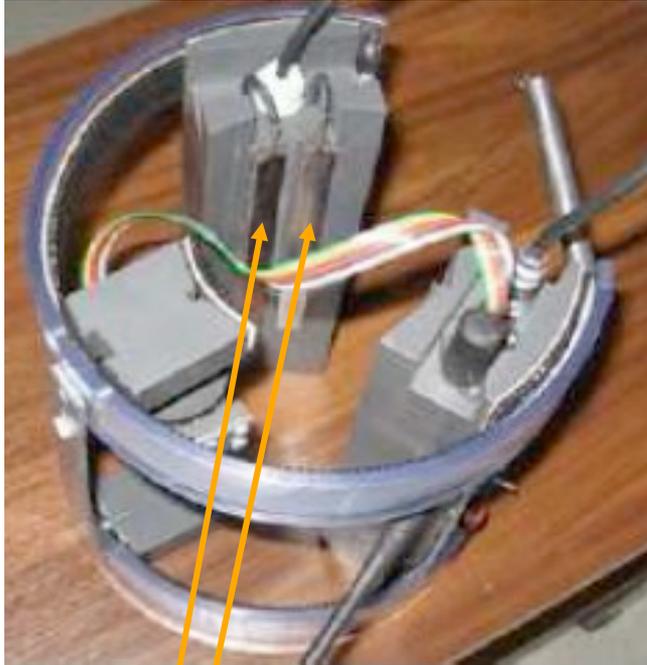
- **destructives** : ouverture de la gaine et caméra endoscopique
- **coûteuses** et peu **commodes** : rayon gamma
- extrêmement **qualitative** : sondage au marteau



Méthode de référence !

➔ Nécessité de développer de nouveaux outils d'investigation **automatisables** et délivrant des **informations quantitatives**

Sonde Capacitive

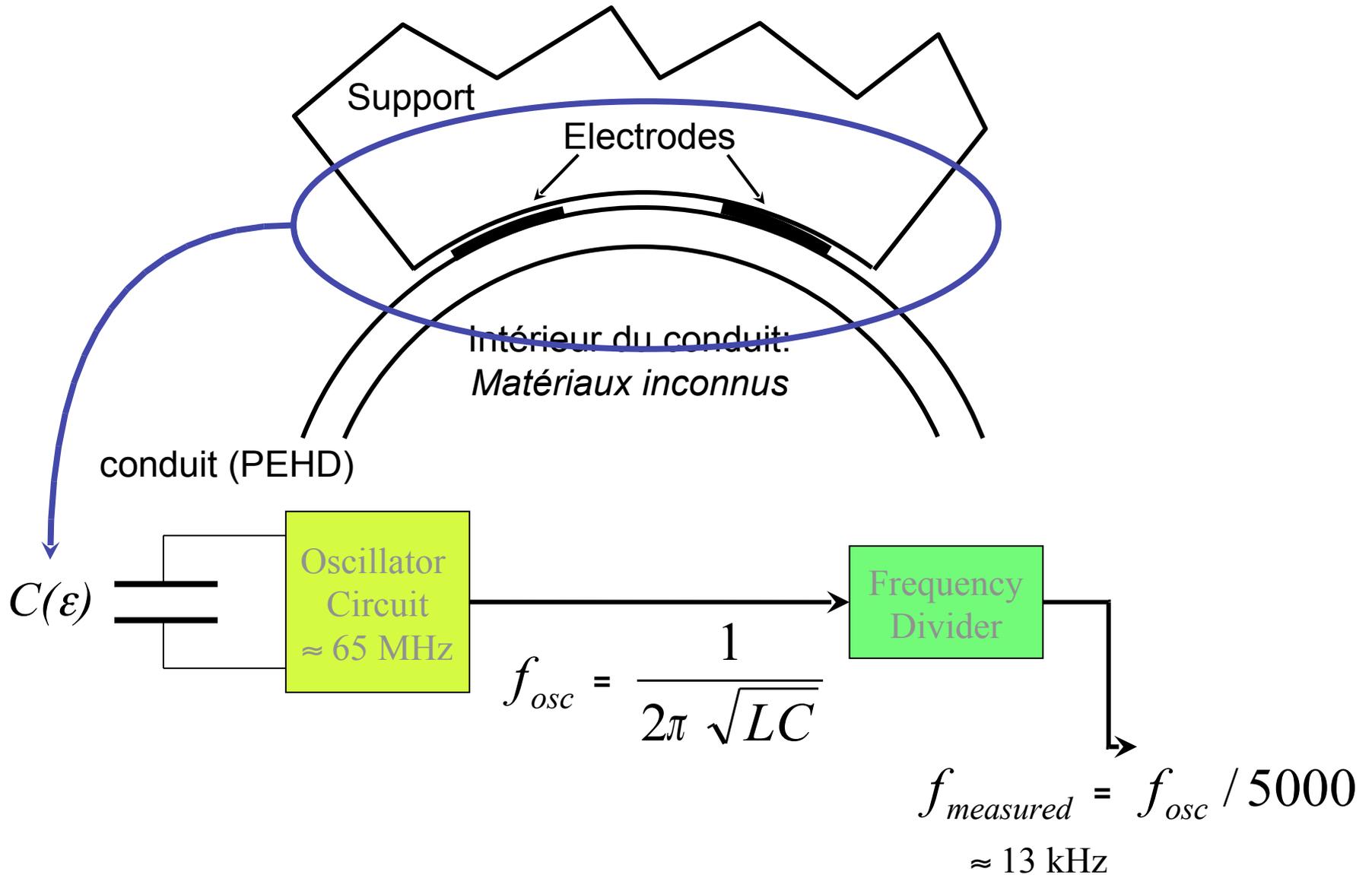


électrodes

sonde de 3eme génération



Fonctionnement de la sonde



Mesure sur le terrain:

SETRA-RST :
Campagne d'auscultation des
ouvrages en béton précontraint



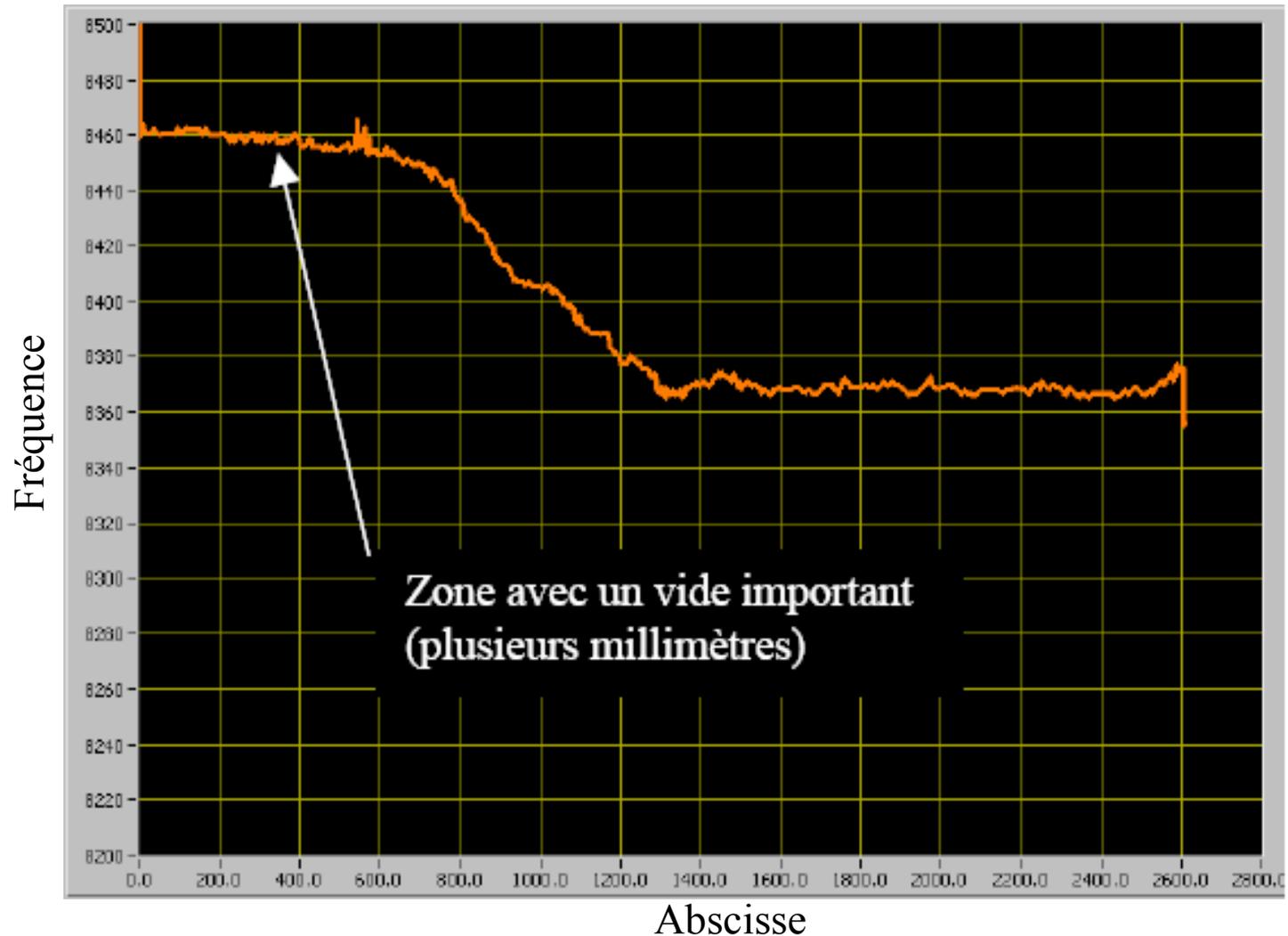
Pont de Labéraudie à Cahors



Mesures réalisées avec le LR Autun

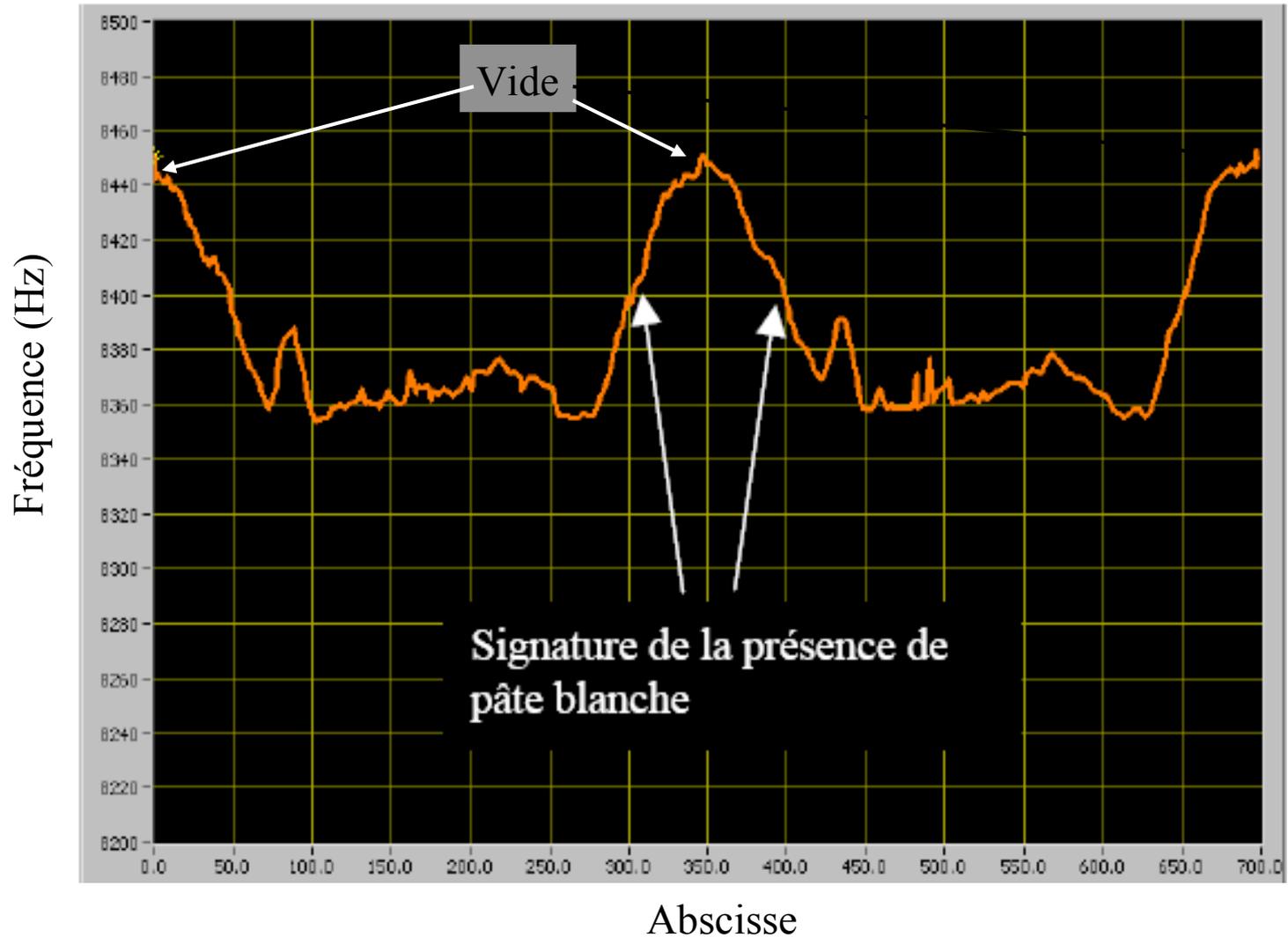
Mesure sur la génératrice supérieure

Travée centrale câble A trajet longitudinal départ pile RD vers pile RG

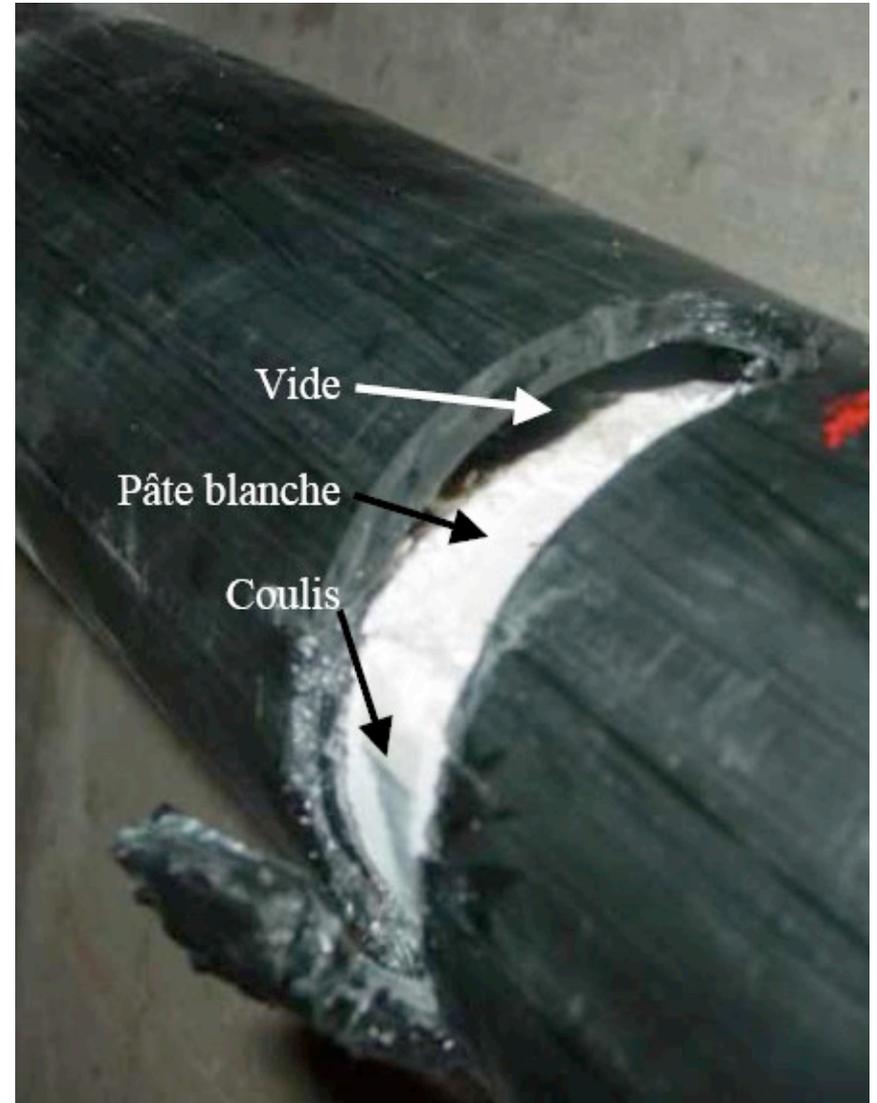


Mesure circulaire:

Travée centrale câble A trajet circulaire (2 tours) à 1 m de la pile RD



Ouverture du conduit à posteriori:



Performance de la sonde actuelle:

Permet la détection de défauts:

- vide
- pâte blanche
- distingue un retrait d'un remplissage partiel

Limitations de la sensibilité:

- en fonction de la permittivité: **pas sensible à la présence d'eau**
- spatiale: **limitée au voisinage immédiat** des électrodes donc fortement sensible à la nature et la géométrie du conduit (variation d'épaisseur de la gaine)



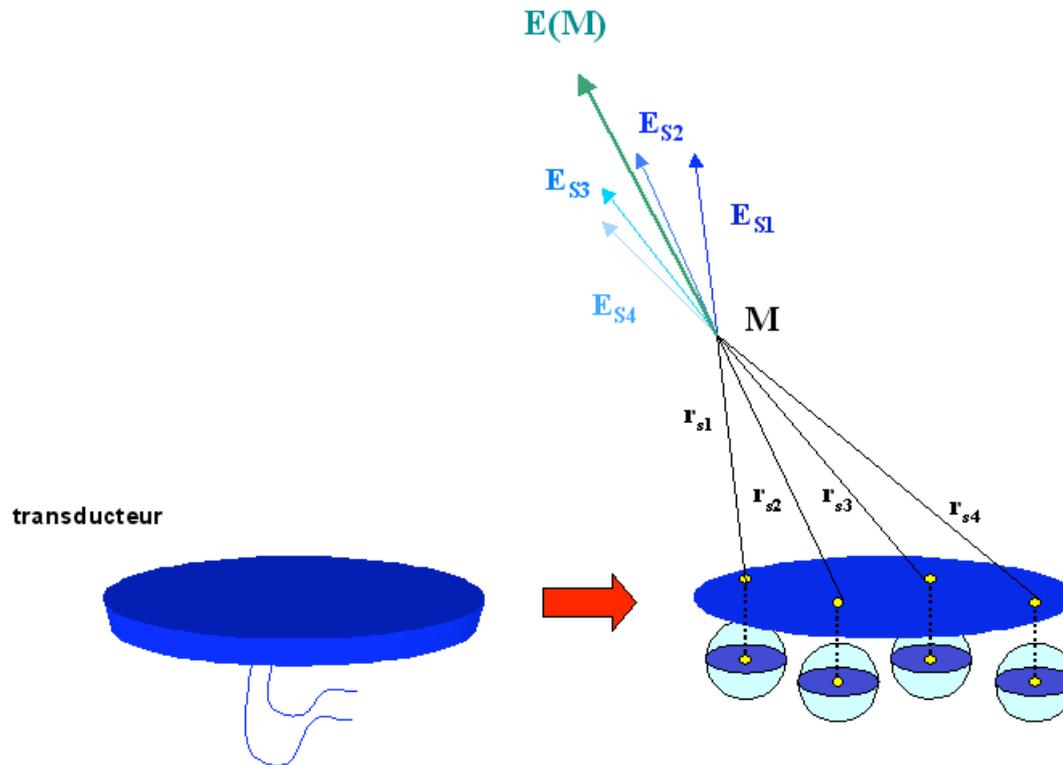
Besoin d'un modèle complet pour:

- prendre en compte la **géométrie du conduit** et l'existence de plusieurs milieux à l'intérieur du conduit, développer une modélisation 3D
- **interpréter les signaux** donnés par notre capteur
- **élaborer des stratégies d'inversion** qui permettront d'extraire, à partir des données, des renseignements précis et attendus par les gestionnaires des ouvrages sur l'état des conduits de précontraintes

Nous avons choisi d'utiliser un modèle semi analytique, le modèle DPSM

DPSM = *Distributed Point Sources Method*

Principe général de la méthode DPSM



- ➔ **Les surfaces actives** (surfaces de transducteurs par exemple) sont représentées par un ensemble de sources ponctuelles situées **hors de la surface** et dont **l'amplitude et le diagramme de rayonnement** sont calculés pour satisfaire les conditions aux limites du problème

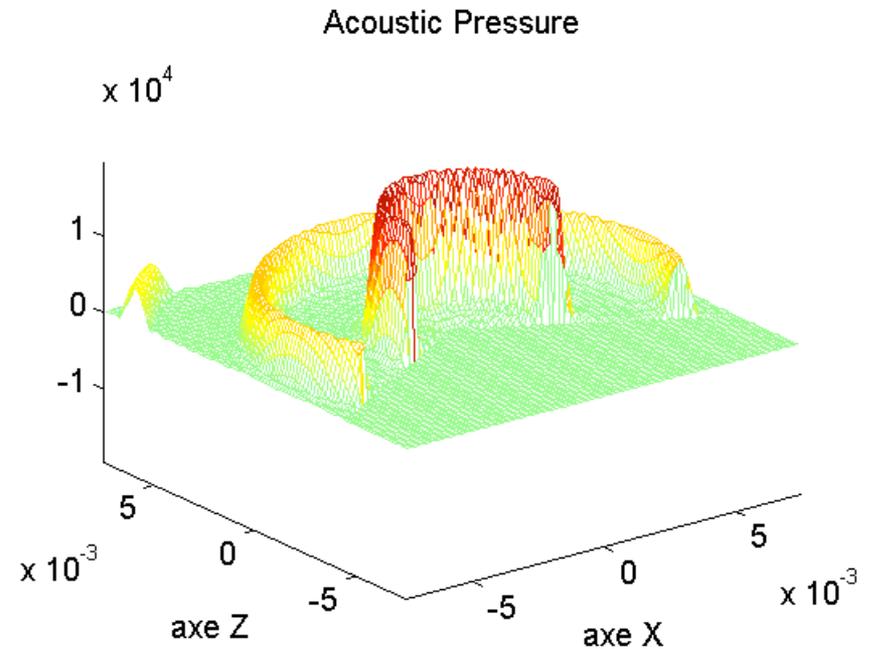
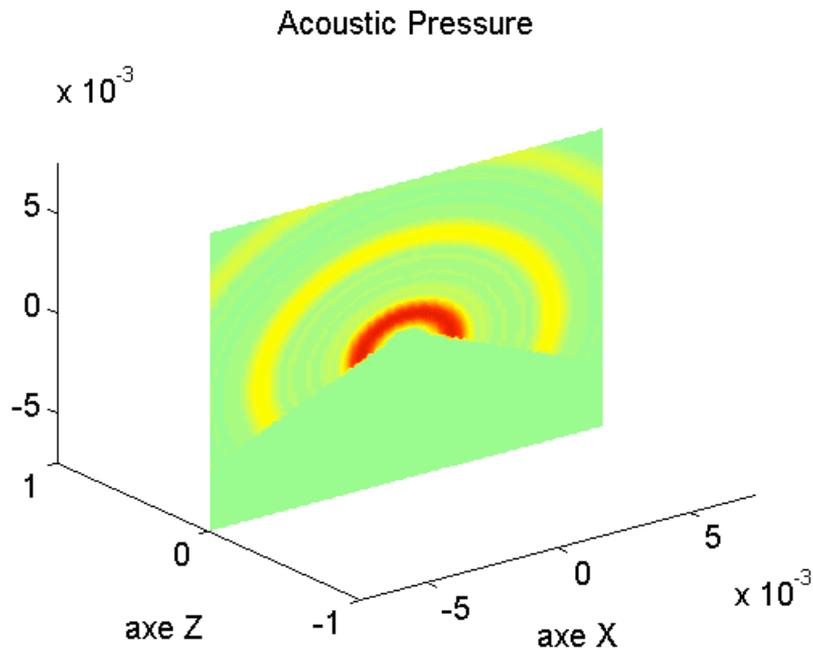
Exemple de source DPSM ultrasonore isochrone



Cliquer sur la figure pour voir
l'animation

- ➔ Une source ponctuelle sinusoïdale de fréquence $f=1\text{MHz}$, vitesse radiale 1 m/s , dans un milieu de densité 1 et de célérité 1490m/s et rayonnant selon un diagramme de rayonnement de 240°

Exemple de source DPSM ultrasonore impulsionnelle

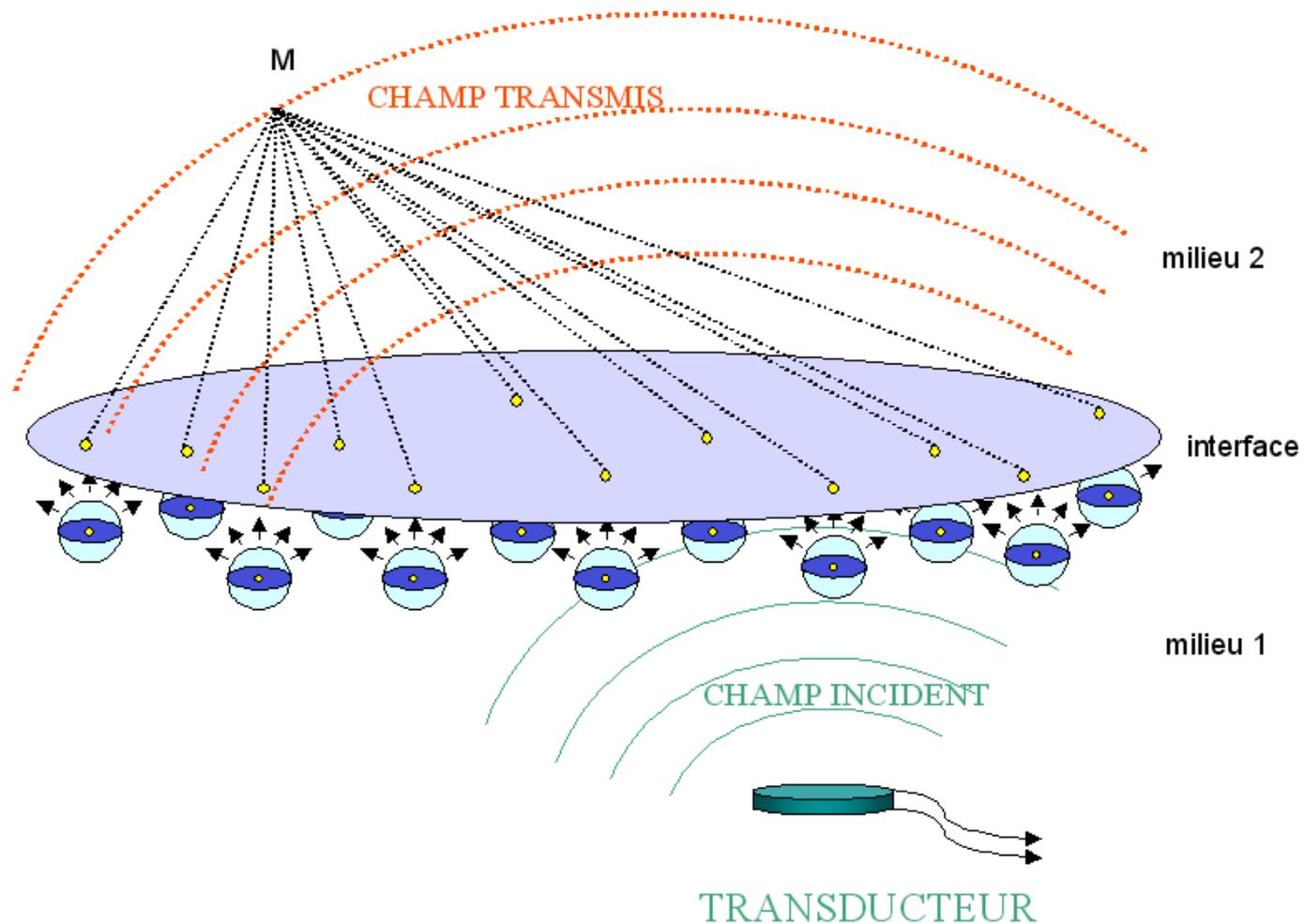


- ➔ Une source ponctuelle impulsionnelle de fréquence $f=1\text{MHz}$, vitesse radiale 1 m/s , dans un milieu de densité 1 et de célérité 1490m/s et rayonnant selon un diagramme de rayonnement de 240°

Qu'est-ce que la méthode DPSM ?

- ➔ Il s'agit d'une méthode générique de modélisation 3D des interactions capteur/cible, applicable au cas où les équations de comportement sont connues dans les différents milieux
- ➔ Cette méthode se fonde sur une distribution spatiale de sources ponctuelles, qui 'synthétisent' les grandeurs physiques (champs électriques, magnétiques, etc) dans les différents milieux
- ➔ Développée à l'origine pour des problèmes de CND de nature électromagnétique et ultrasonore, son utilisation devient peu à peu générique

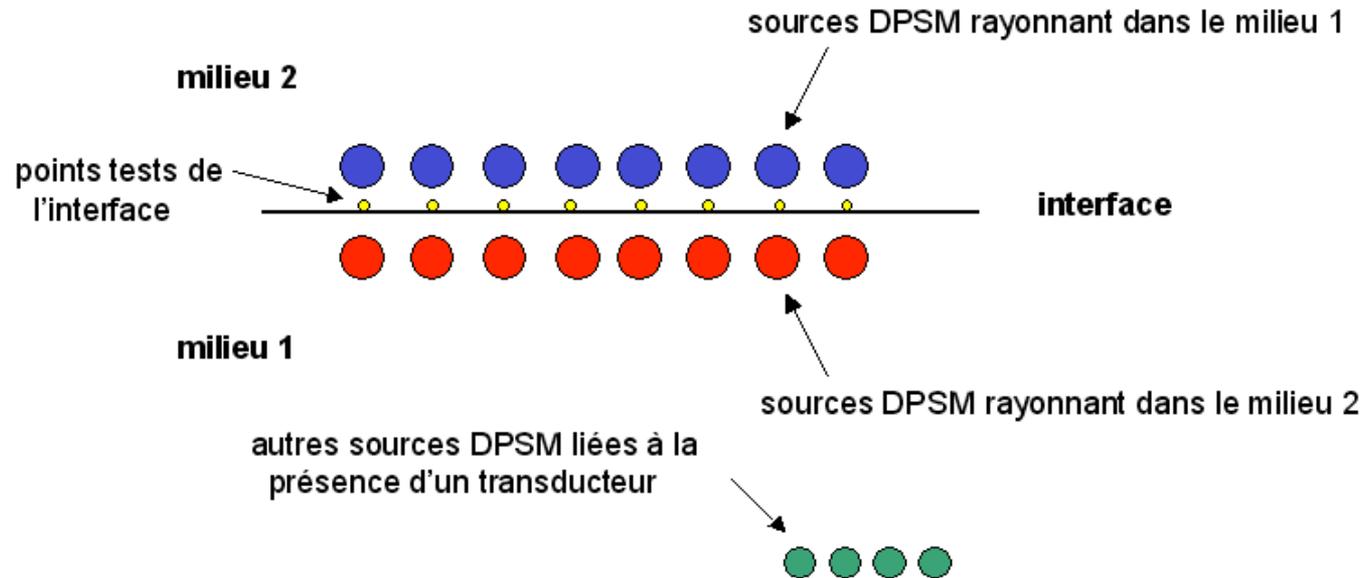
Influence des interfaces: illustration



- ➔ Synthèse par superposition d'un ensemble de sources DPSM d'un champ de pression acoustique transmis à la traversée d'une interface

Modélisation d'une interface

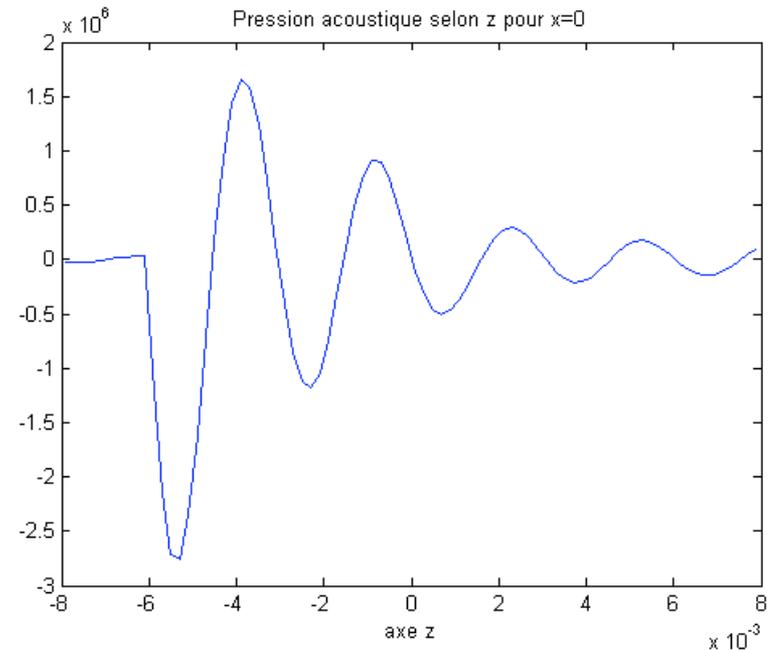
- ➔ La **synthèse** des grandeurs **réfléchies et transmises** au niveau de l'interface est assurée par des couches de sources situées de part et d'autre, et calculées pour satisfaire les conditions aux limites sur un ensemble de points tests, du problème pris dans son ensemble.



- ➔ Chaque 'bulle' contient une ou plusieurs sources ponctuelles: charges électrostatiques, éléments de courants i_x , i_y , i_z , etc..

Illustration du rôle des interfaces

Illustration avec deux milieux séparés par une interface:
Une configuration particulière avec deux milieux identiques permet de tester les capacités des sources virtuelles à synthétiser les grandeurs de part et d'autre de l'interface.



Quelles grandeurs raccorder aux interfaces ?

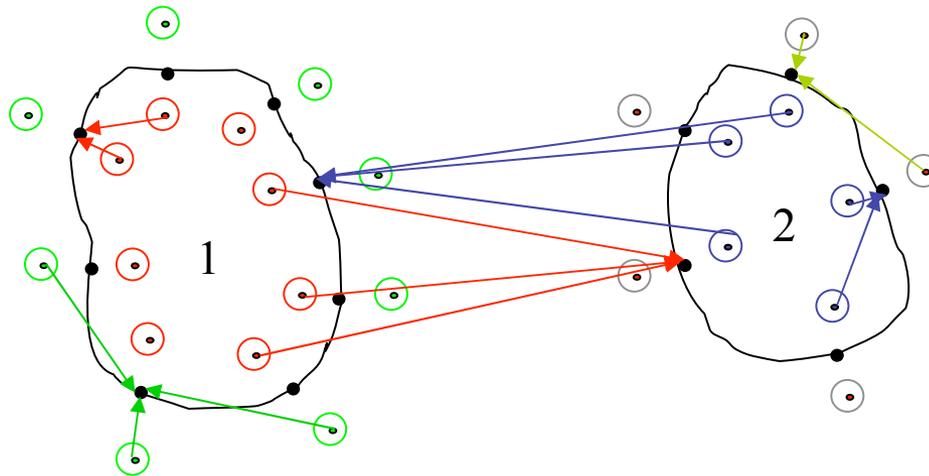
Pour développer le caractère **générique** de la méthode, on cherche à raccorder les grandeurs adaptables à tous les problèmes (US, EM, électrostatique, magnétostatique...): **le potentiel et sa dérivée**, qu'il soit scalaire ou vectoriel conviennent parfaitement...

électrostatique	$V \text{ et } \vec{D}_n = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}_n$
ultrasons	$P \text{ et } \rho \vec{v}_n$
électromagnétisme	$\vec{A} \text{ et } \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}}$

Construction de la matrice de résolution (1/2)

Une fois cette étape franchie, on peut faire apparaître **les matrices de couplage** entre les différents éléments qui constituent le problème

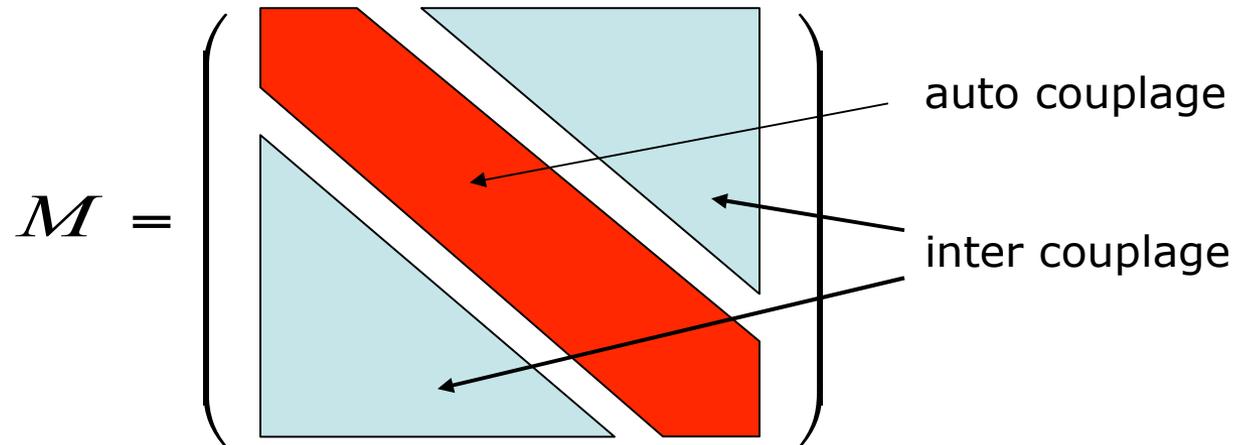
- ➔ Les matrices **d'auto couplage**: les sources d'un objet rayonnant sur les points tests de cet objet
- ➔ Les matrices **d'inter couplage**: les sources d'un objet rayonnant sur les points tests d'un autre objet



Construction de la matrice de résolution (2/2)

Le problème initial, complexe, est réduit à un **ensemble de matrices élémentaires** décrivant les relations entre les différents objets et permettant d'évaluer les grandeurs que l'on souhaitera raccorder

Ensuite, on agence l'ensemble de ces matrices pour former une matrice globale de résolution M



La matrice M relie le vecteur contenant l'ensemble des valeurs des sources DPSM J (inconnues à ce stade), à un vecteur de conditions aux limites C , intrinsèques ou imposées par l'utilisateur:

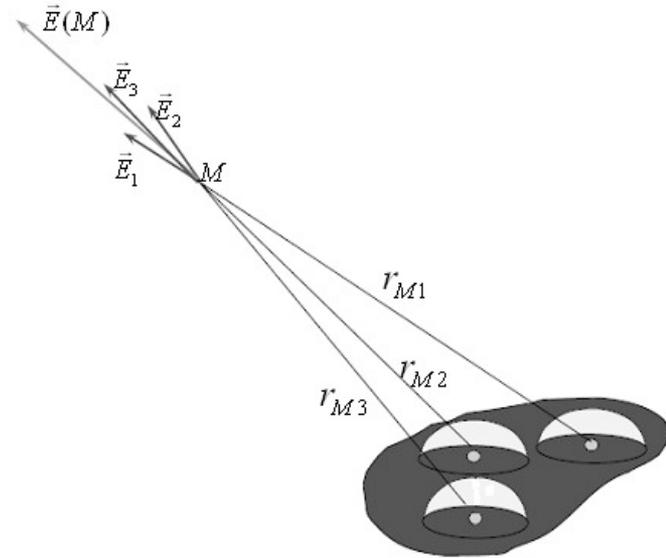
$$C = M * J$$

Formalisme DPSM en électrostatique

Pour un point cible et N_s sources:

$$V(M) = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{a_i}{r_{M_i}}$$

$$E_z(M) = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{(z_M - z_i) a_i}{r_{M_i}^3}$$



Pour N_p points cibles et N_s sources:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{N_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1N_s} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{N_p 1} & \cdots & M_{N_p N_s} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{N_s} \end{pmatrix}$$

$$M_{i,j} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_{i,j}}$$

→ matrice de couplage pour le potentiel

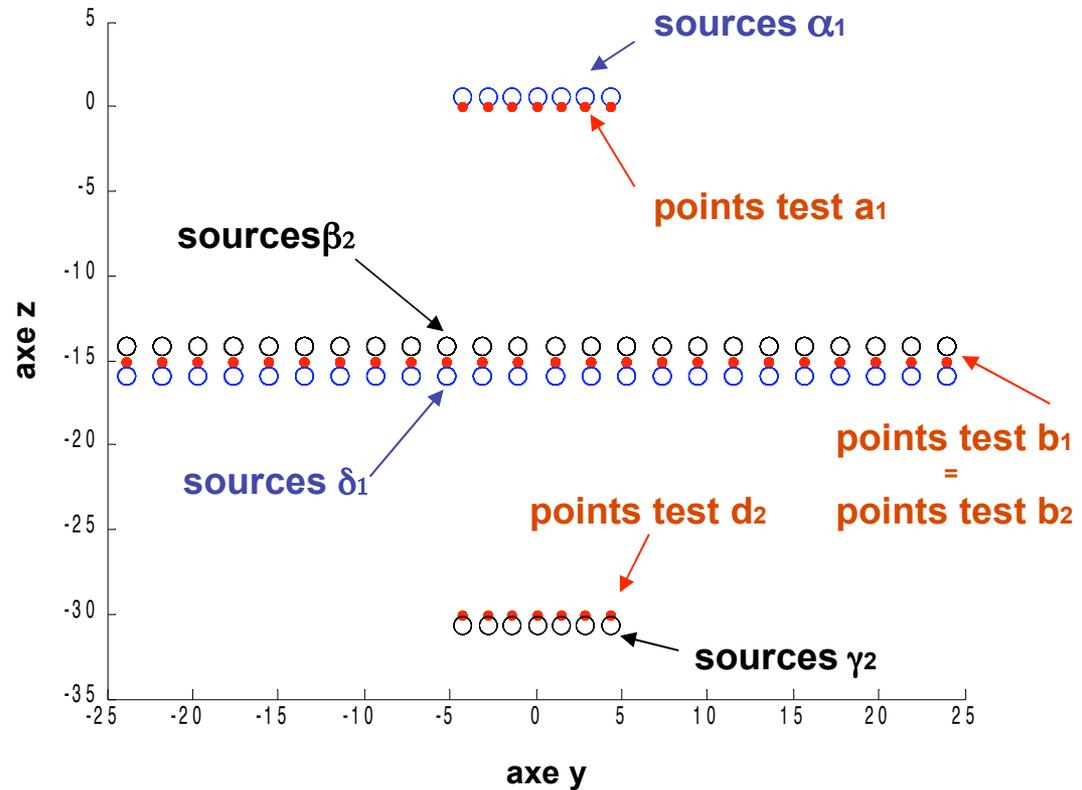
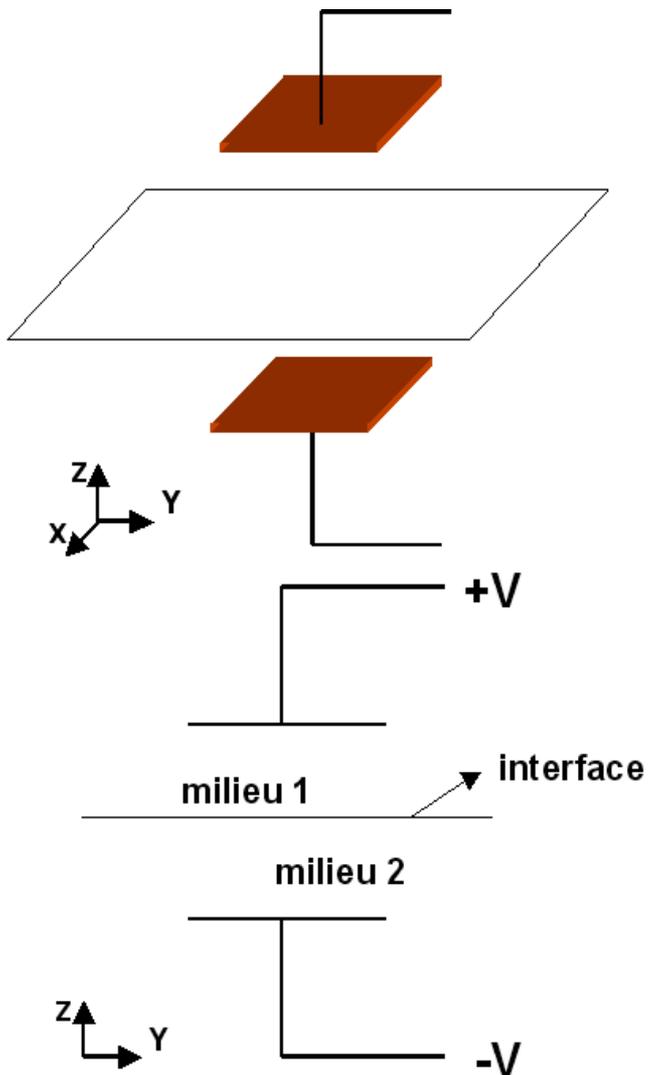
$$\begin{pmatrix} E_{z_1} \\ \vdots \\ E_{z_{N_p}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{z11} & \cdots & Q_{z1N_s} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{zN_p 1} & \cdots & Q_{zN_p N_s} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{N_s} \end{pmatrix}$$

$$Q_{i,j} = \frac{z_i - z_j}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_{i,j}^3}$$

→ matrice de couplage pour la composante selon z du champ

Electrostatique: exemple de géométrie avec Interfaces

Condensateur plan dans lequel est inséré deux diélectriques::



Electrostatique: calcul de la Matrice globale

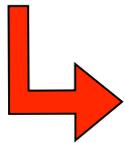
Surfaces actives: Expressions des conditions limites 'utilisateurs'

fixé par l'utilisateur

$$\begin{cases} V_{a_1} = M_{a_1\alpha_1} \cdot \alpha_1 + M_{a_1\delta_1} \cdot \delta_1 \\ V_{d_2} = M_{d_2\gamma_2} \cdot \gamma_2 + M_{d_2\beta_2} \cdot \beta_2 \end{cases}$$

Interfaces: Expressions des conditions limites 'intrinsèques':

$$\begin{cases} V_1 = V_2 & \Rightarrow \text{Continuité du potentiel V} \\ \varepsilon_{r_1} E_{n_1} = \varepsilon_{r_2} E_{n_2} & \Rightarrow \text{Continuité de la composante normale de D} \end{cases}$$

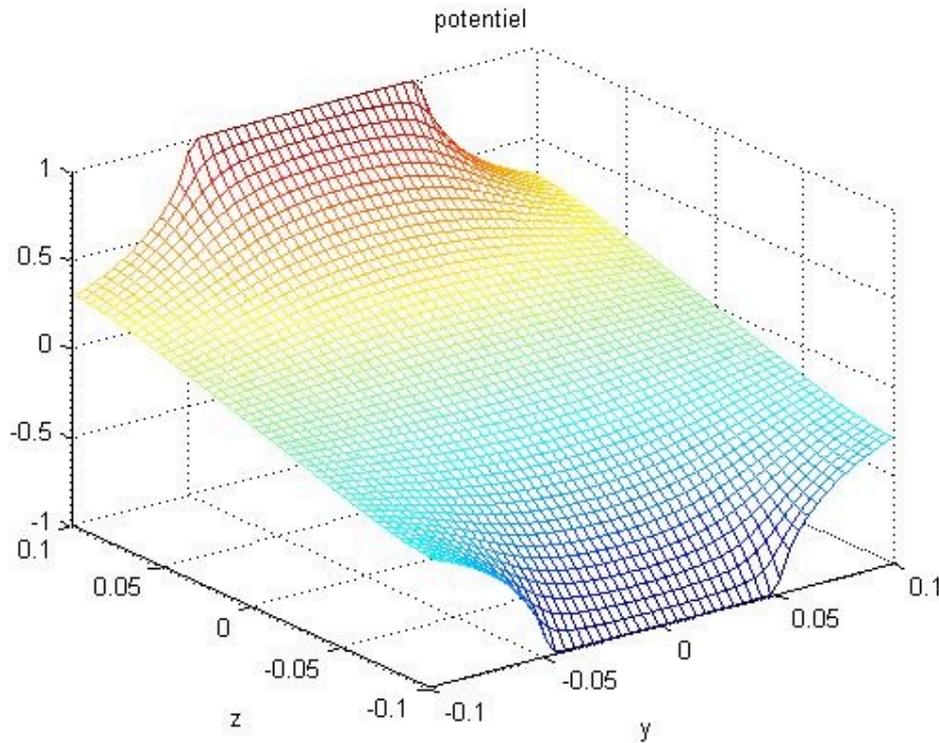


$$\begin{cases} M_{b_1\alpha_1} \cdot \alpha_1 + M_{b_1\delta_1} \cdot \delta_1 = M_{b_2\gamma_2} \cdot \gamma_2 + M_{b_2\beta_2} \cdot \beta_2 \\ \varepsilon_{r_1} (Q_{b_1\alpha_{1z}} \cdot \alpha_1 + Q_{b_1\delta_{1z}} \cdot \delta_1) = \varepsilon_{r_2} (Q_{b_2\gamma_{2z}} \cdot \gamma_2 + Q_{b_2\beta_{2z}} \cdot \beta_2) \end{cases}$$

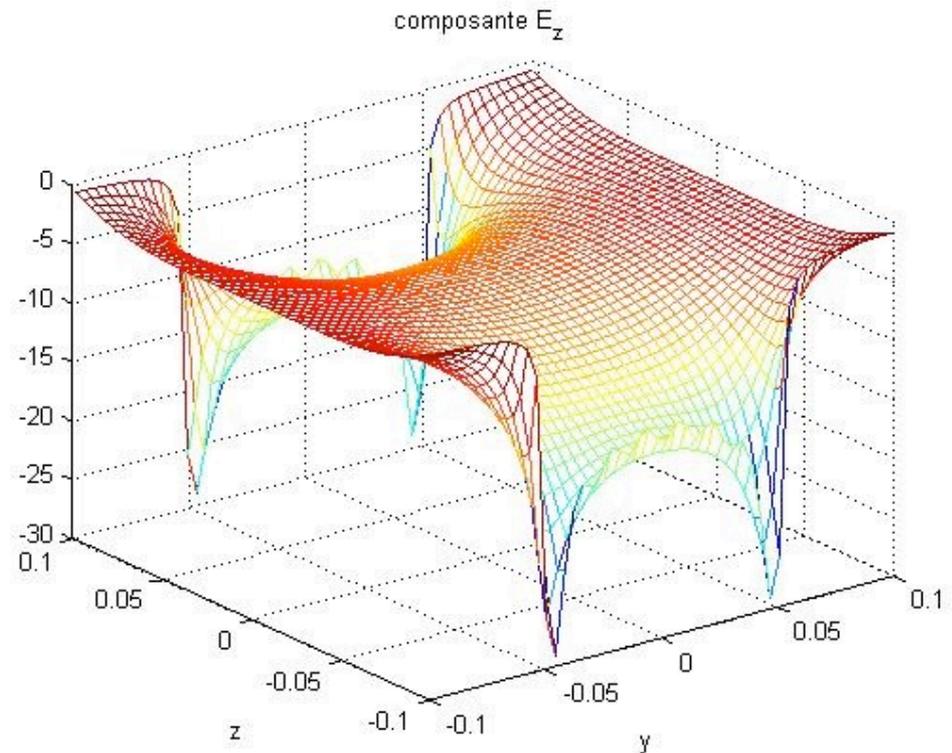
Formulation matricielle du problème:

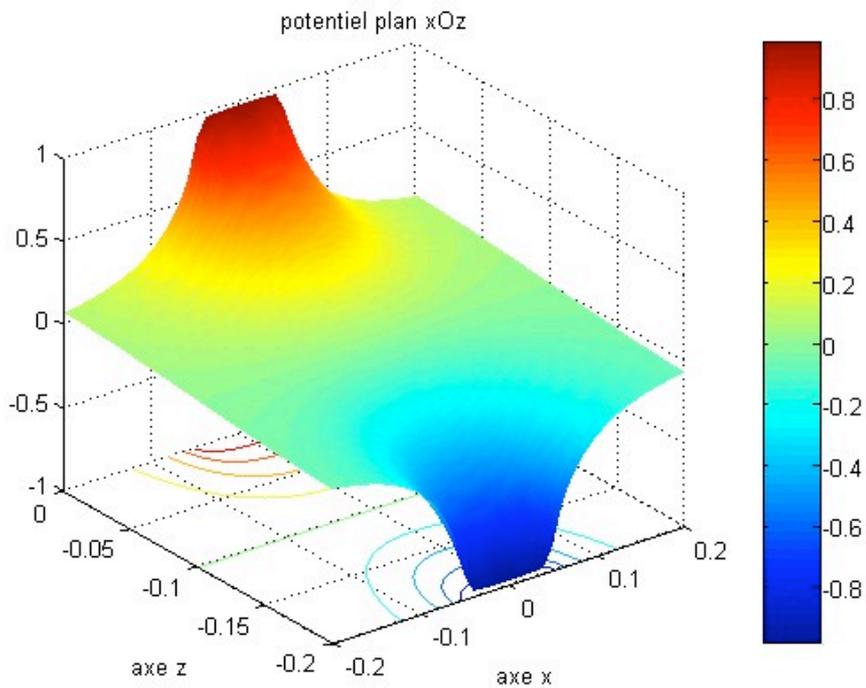
$$\begin{pmatrix} V_{a_1} \\ V_{d_2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{a_1\alpha_1} & 0 & M_{a_1\delta_1} & 0 \\ 0 & M_{d_2\gamma_2} & 0 & M_{d_2\beta_2} \\ M_{b_1\alpha_1} & -M_{b_2\gamma_2} & M_{b_1\delta_1} & -M_{b_2\beta_2} \\ \varepsilon_{r_1} Q_{b_1\alpha_{1z}} & -\varepsilon_{r_2} Q_{b_2\gamma_{2z}} & \varepsilon_{r_1} Q_{b_1\delta_{1z}} & -\varepsilon_{r_2} Q_{b_2\beta_{2z}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \gamma_2 \\ \delta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$$

INCONNUES DU PROBLEME

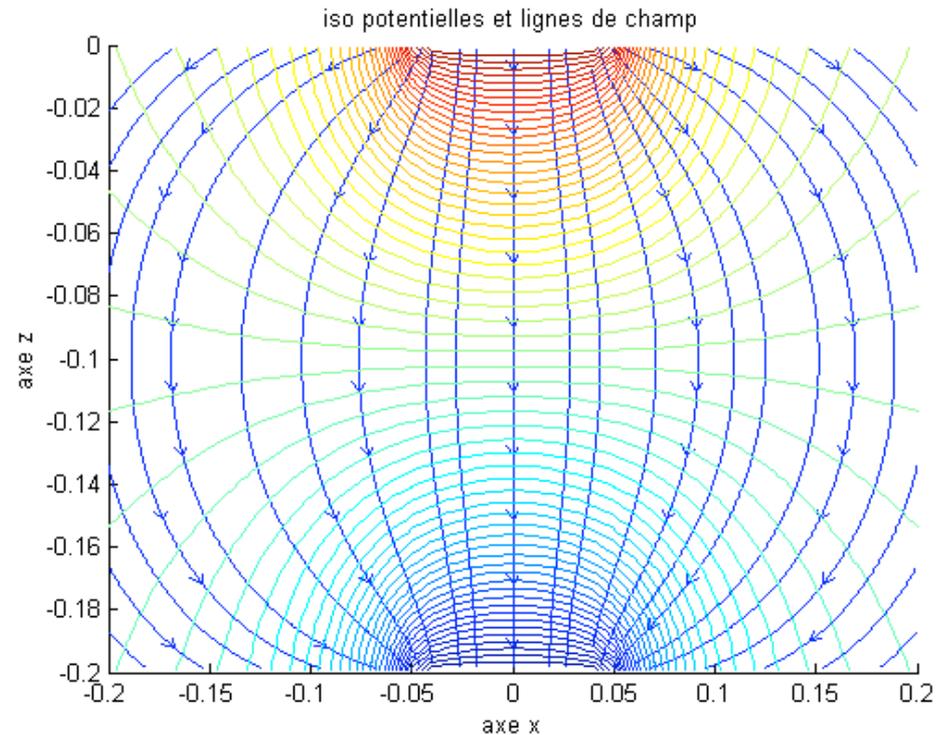


potentiel et composante E_z
calculés dans le plan $y0z$





potentiel et lignes de champ
calculés dans le plan y0z



Quels sont les atouts de la méthode DPSM ?

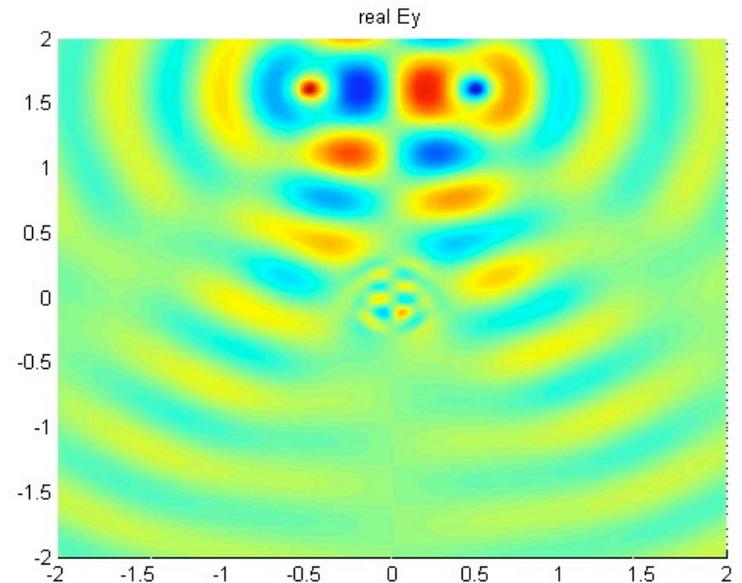
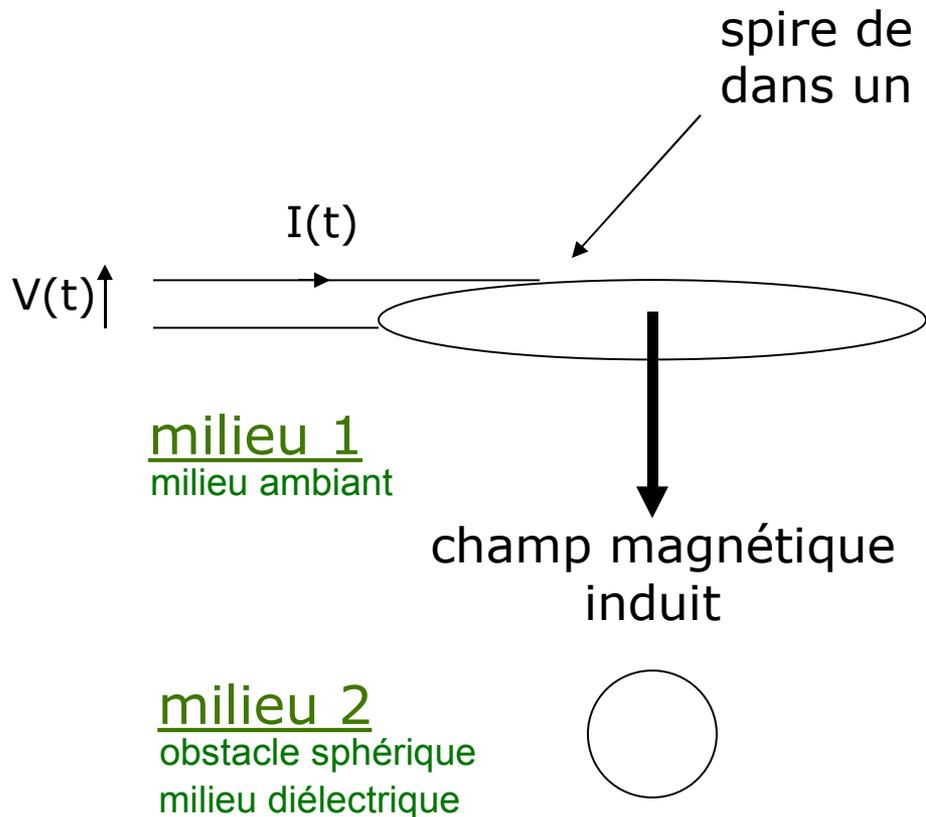
- ➔ Rester proche de la physique du problème et obtenir un modèle semi analytique sous forme matricielle
- ➔ Absence de maillage volumique (3D) , donc...
- ➔ Temps de calcul court: possibilité de réaliser des calculs paramétrés (animations, temps quasi réel, modélisation de plans d'expériences)
- ➔ Possibilité de séparer les effets des sources liées aux différents objets (extinction des sources du capteur inducteur par exemple)
- ➔ Simulation multiphysique simultanée et impulsionnelle possible

Exemple modélisation DPSPM (1/3)

Exemple électromagnétisme (1/2)

Air – sphère diélectrique ($\epsilon_r = 15$), $f = 500$ MHz

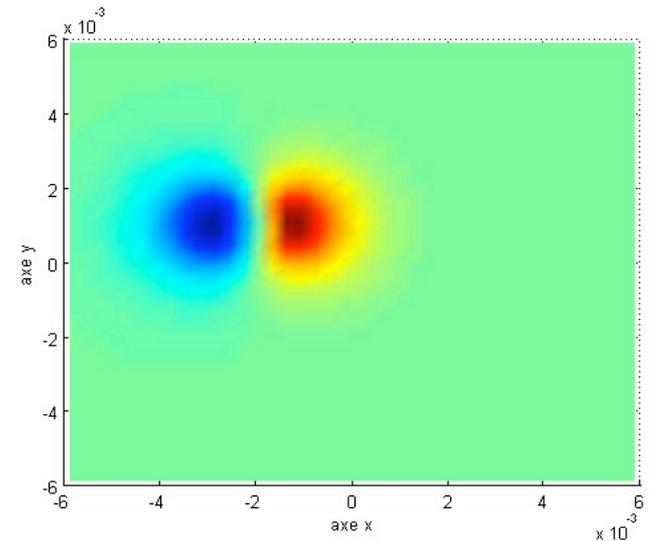
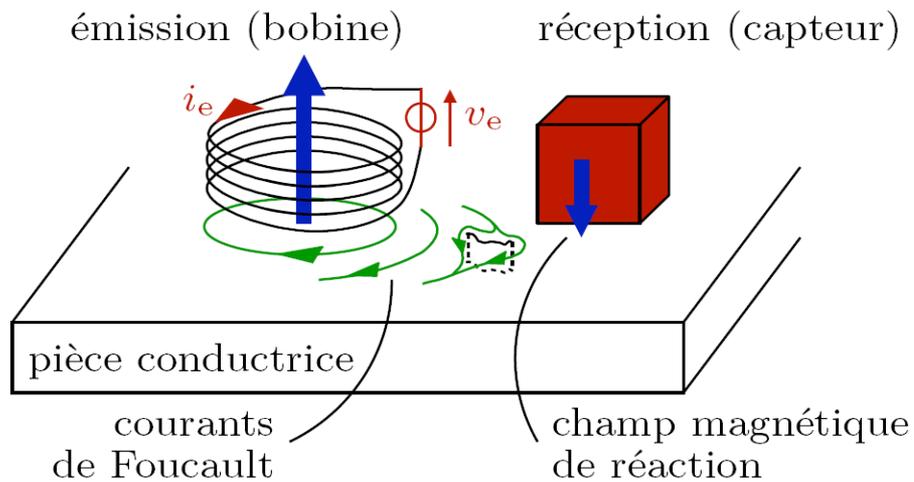
Mode isochrone



Exemple modélisation DPSP (2/3)

Exemple électromagnétisme (2/2) CND par Courant de Foucault

Inclusion sphérique dans un matériau conducteur
 $f=4.5 \text{ kHz}$



Exemple en acoustique

Interface air – eau, $f=200$ kHz
Mode impulsionnel

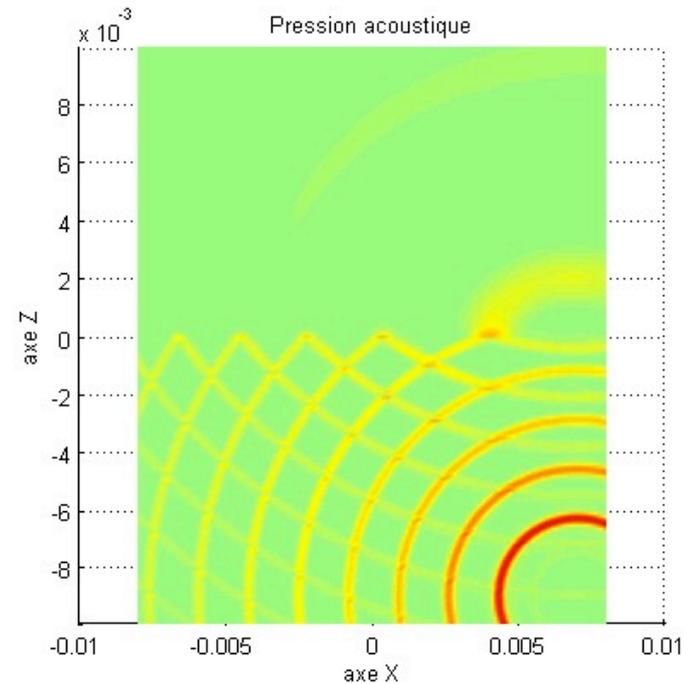
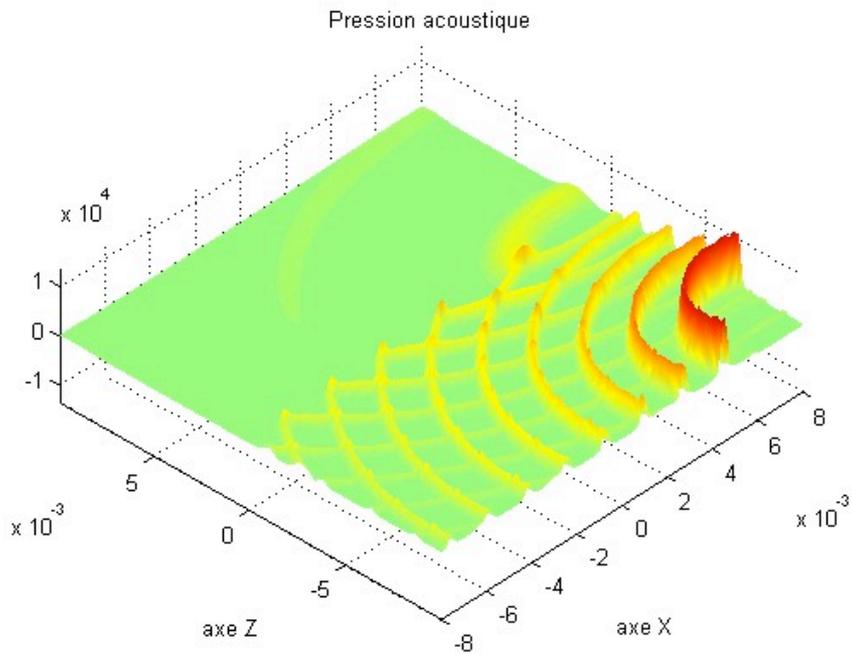
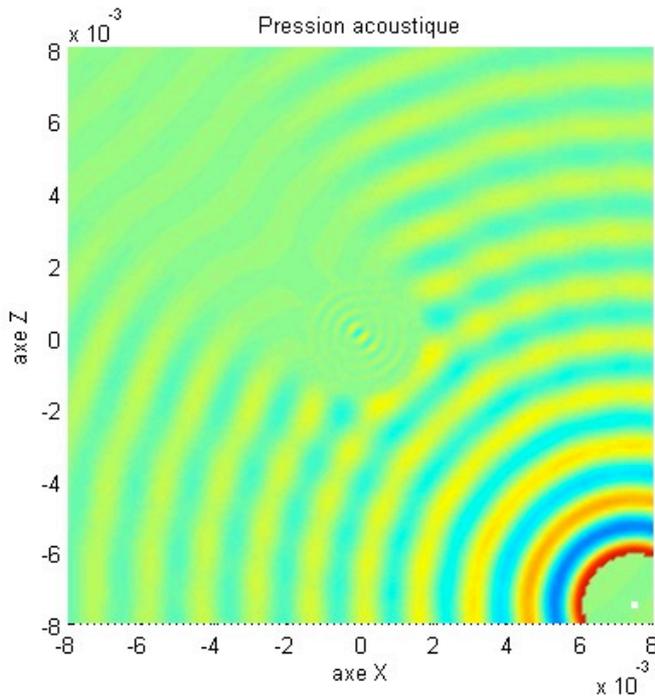


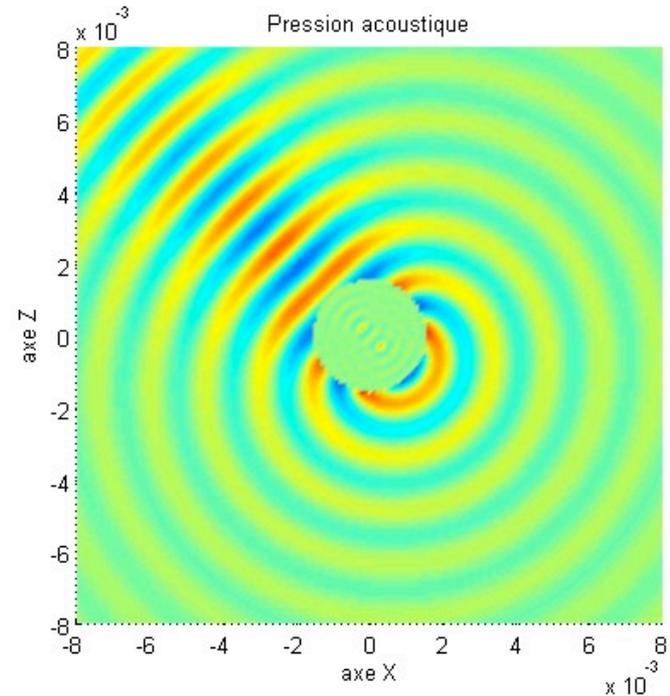
Illustration de la 'séparation des effets'

Eau - bulle d'air, $f=1$ MHz

Visualisation pression 'totale''

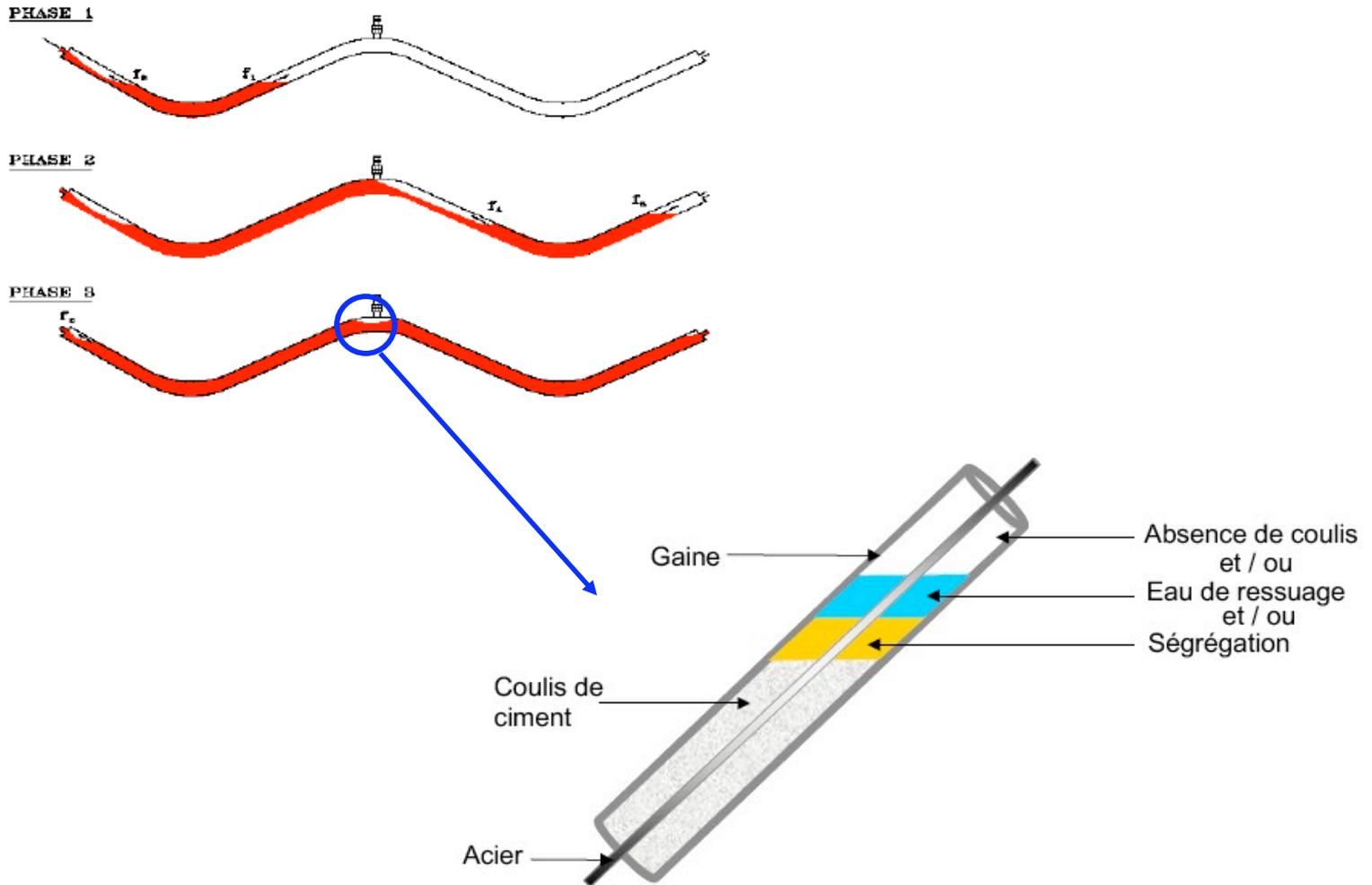


Visualisation onde rétro diffusée et onde à l'intérieur de la bulle



Quelle géométrie modéliser ?

Problème rencontré lors de l'injection:

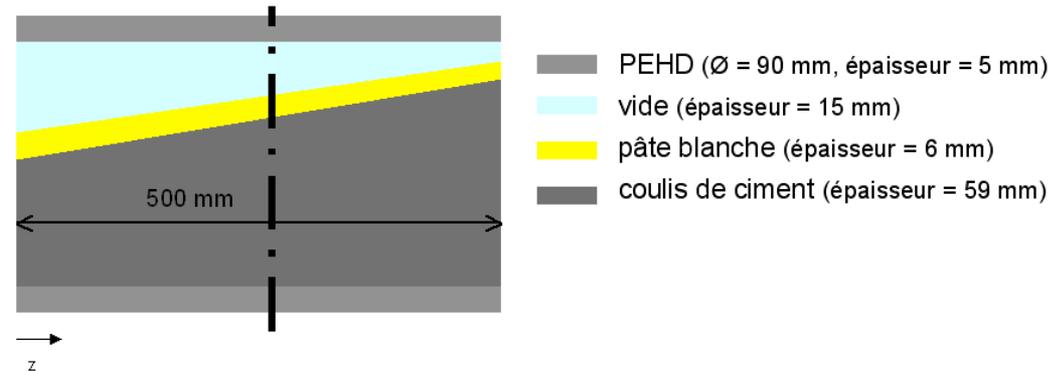


Application de la technique DPSM à notre problème

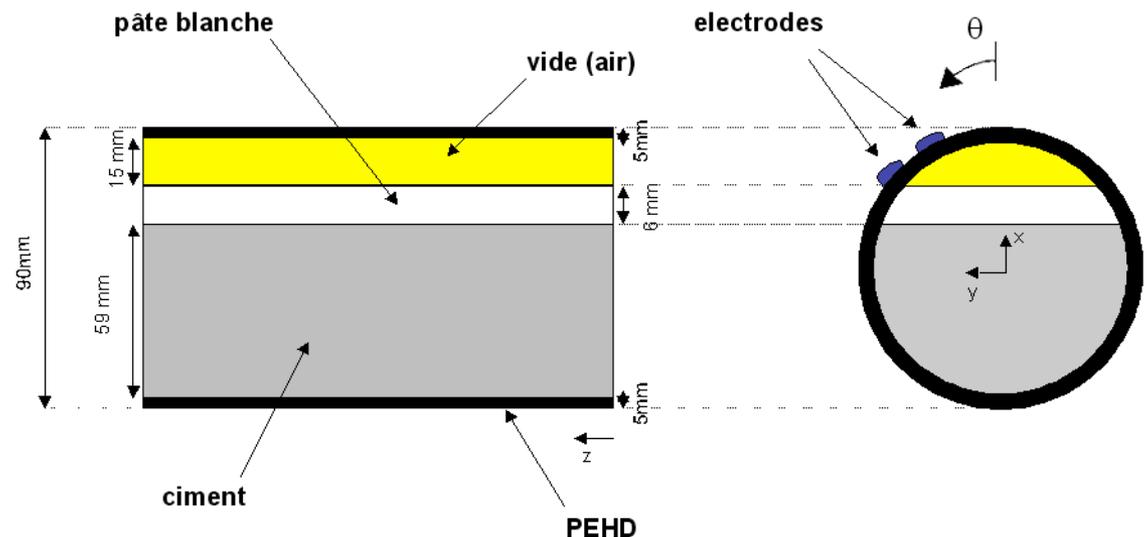
Le laboratoire dispose de corps d'épreuve à défaut maîtrisés:

Conduit sans toron métallique:
l'objectif est pour l'instant de
détecter la présence de pâte
Blanche et de vide

Un étalonnage permet d'obtenir
la capacité en fonction
de la fréquence mesurée

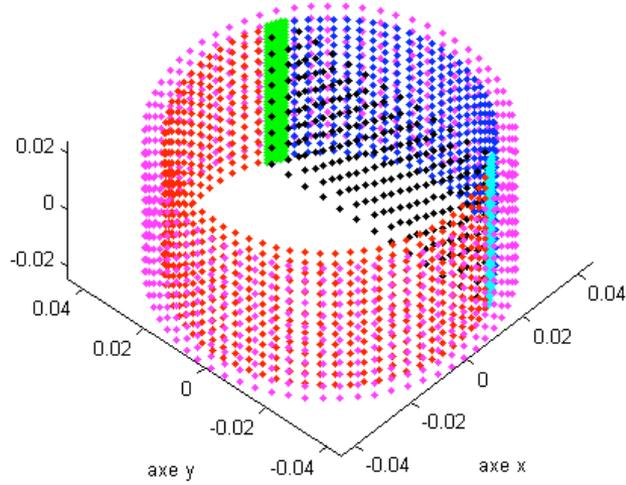


Conduit auquel on applique la méthode:

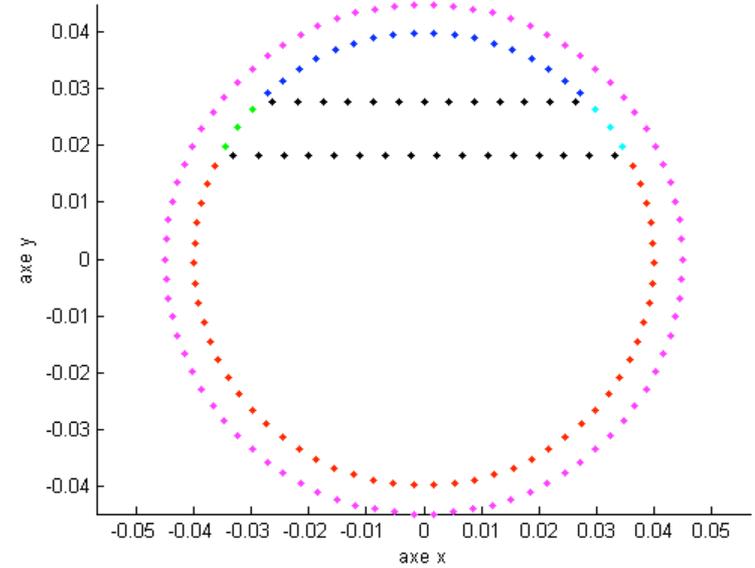


Maillage DPSPM du conduit

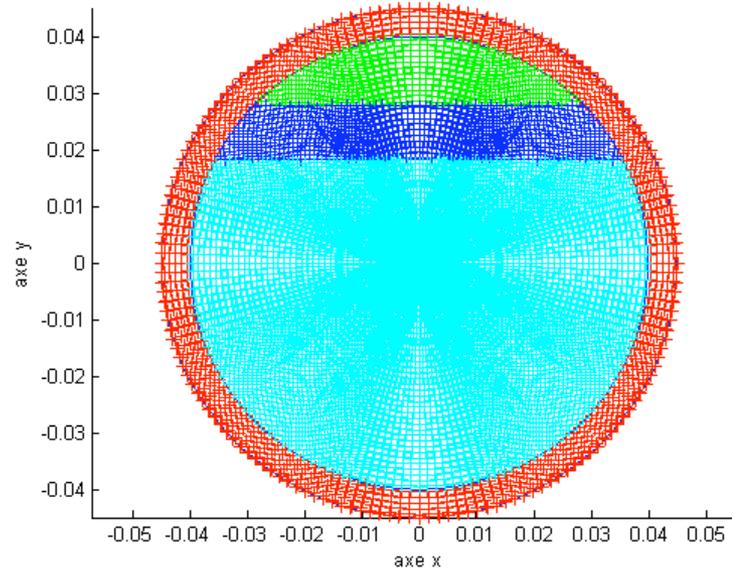
disposition des points tests



disposition points tests, coupe plan XoY



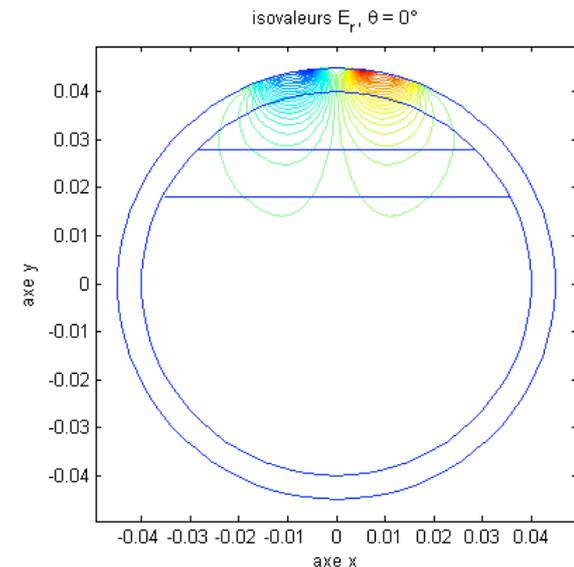
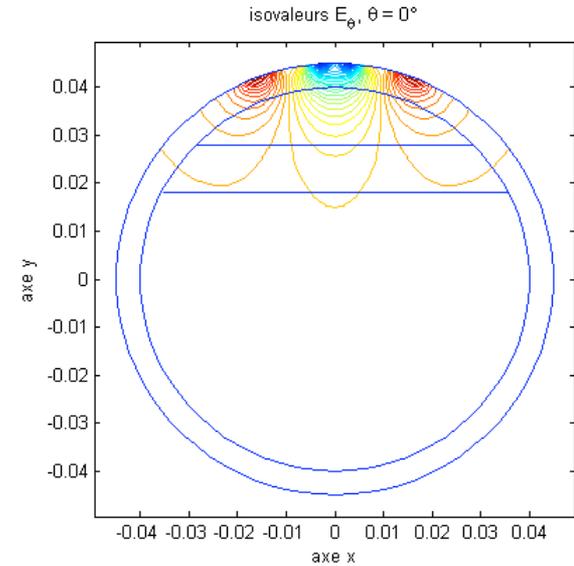
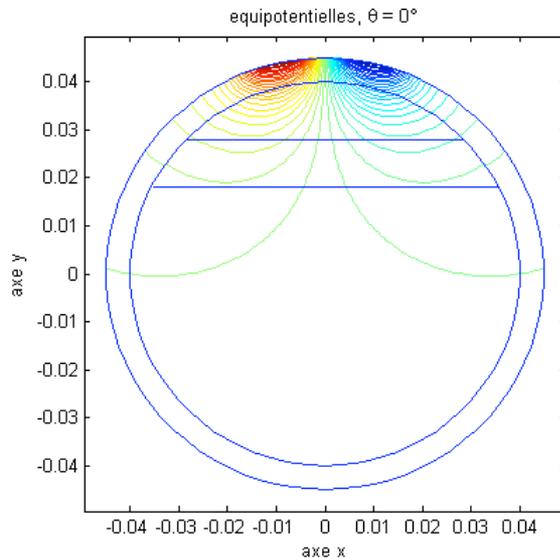
maillage cible dans le plan XoY



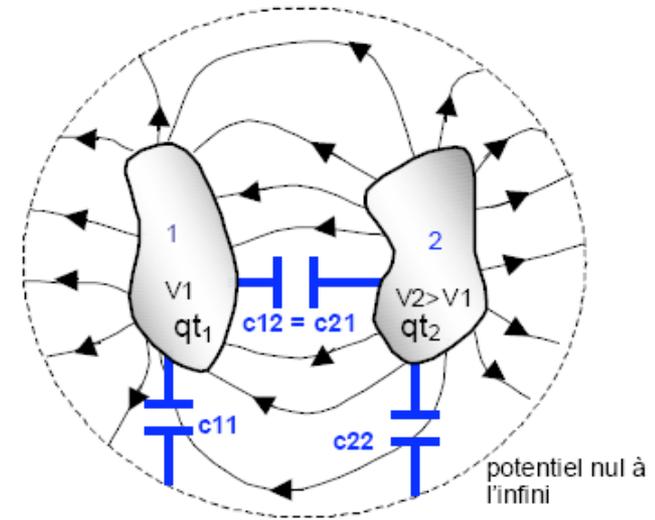
Représentation des grandeurs

Représentation des grandeurs dans un plan transverse

Les propriétés des milieux étant identiques: permet d'illustrer la continuité aux interfaces



Soient deux conducteurs en influence:



L'équilibre de deux conducteurs en influence est défini par:

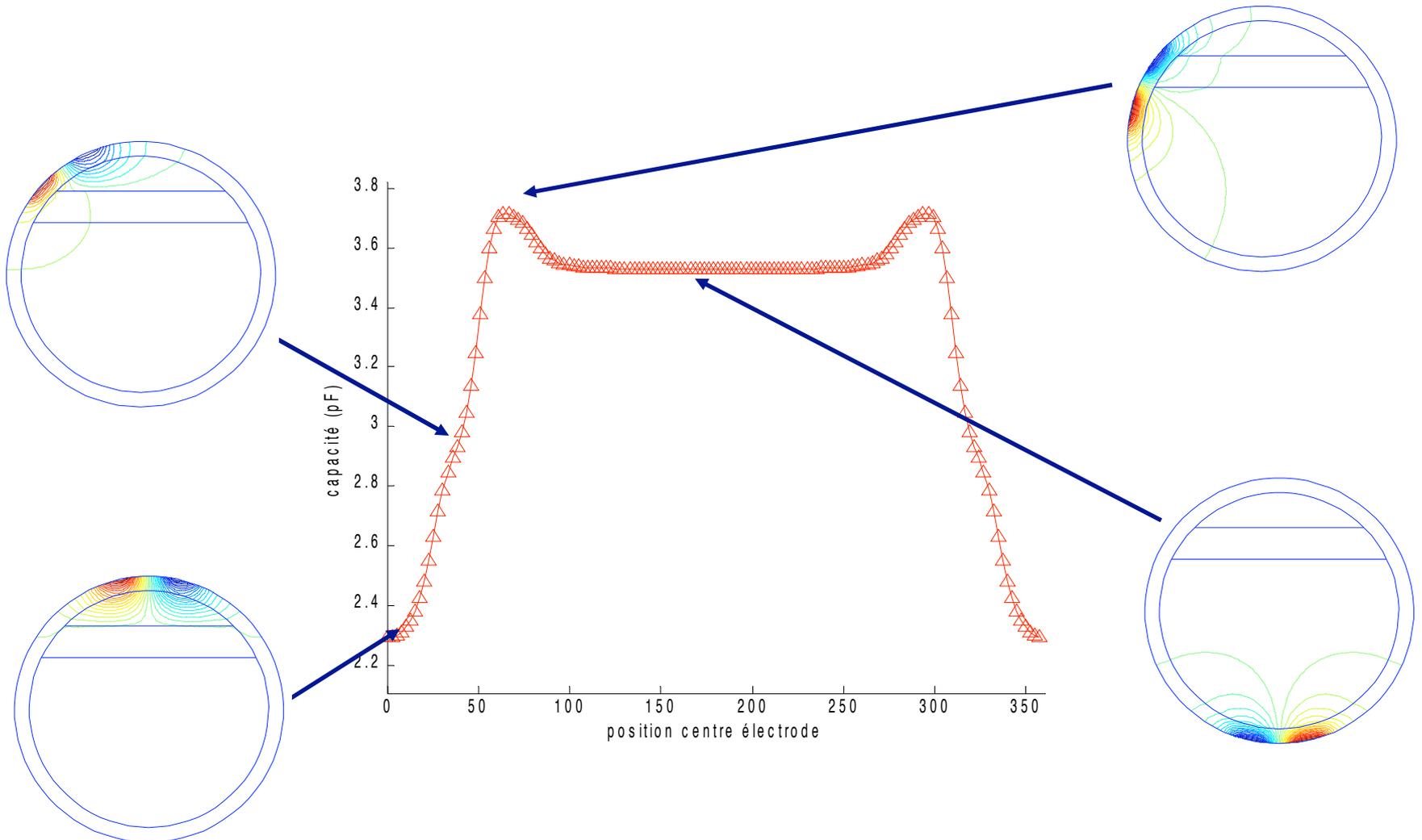
$$\begin{cases} qt_1 = c_{11} \cdot V_1 + c_{12} \cdot V_2 \\ qt_2 = c_{21} \cdot V_1 + c_{22} \cdot V_2 \end{cases} \quad \rightarrow \quad \text{Capa} = \frac{c_{11} \cdot c_{22} - c_{12} \cdot c_{21}}{c_{11} + c_{22} + c_{12} + c_{21}}$$

les c_{ij} sont des coefficients ne dépendant que de la configuration géométrique du problème: en utilisant des excitations différentes on peut calculer les 4 coefficients et donc la capacité

Capacité en fonction de la position

Calculs de capacité réalisés en rotation

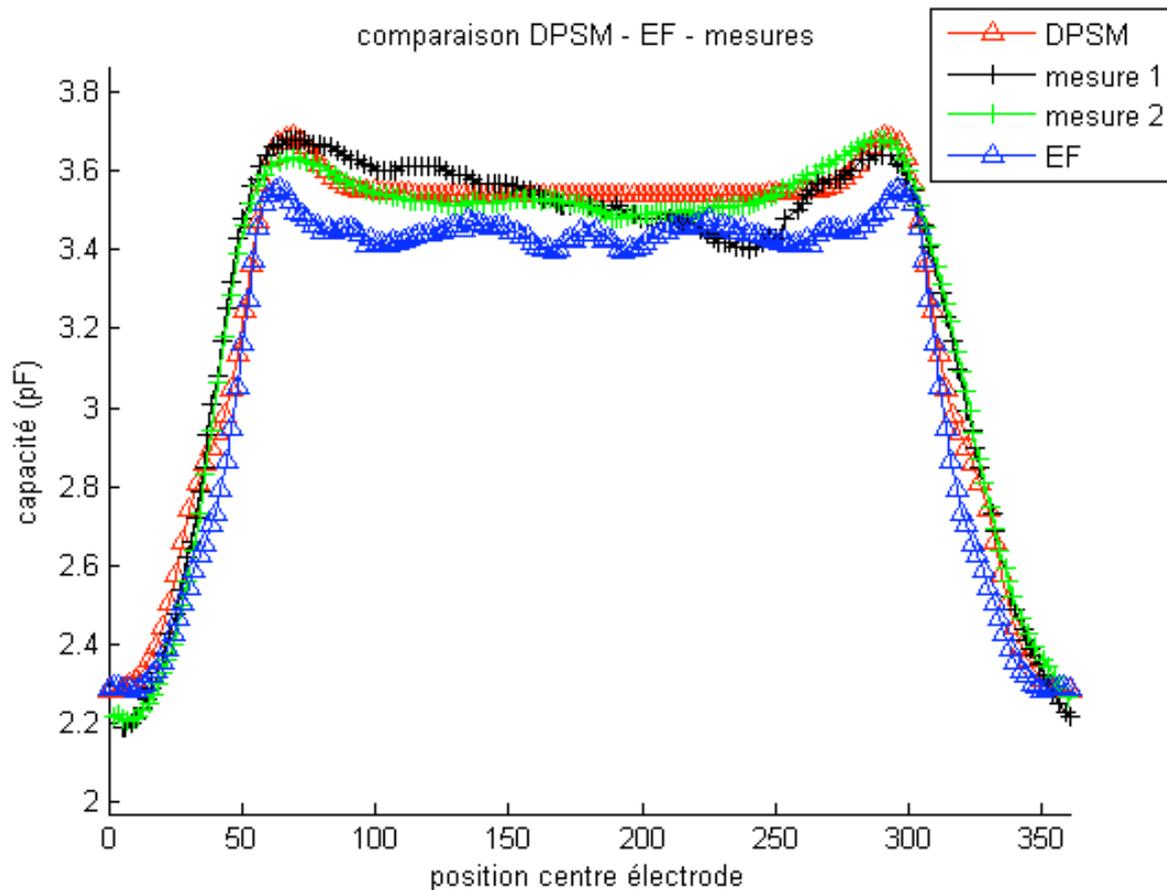
Allure des courbes obtenues : signature des milieux



Comparaison mesures/simulations

Mesures réalisées sur le conduit d'essai à $z = 500$ mm

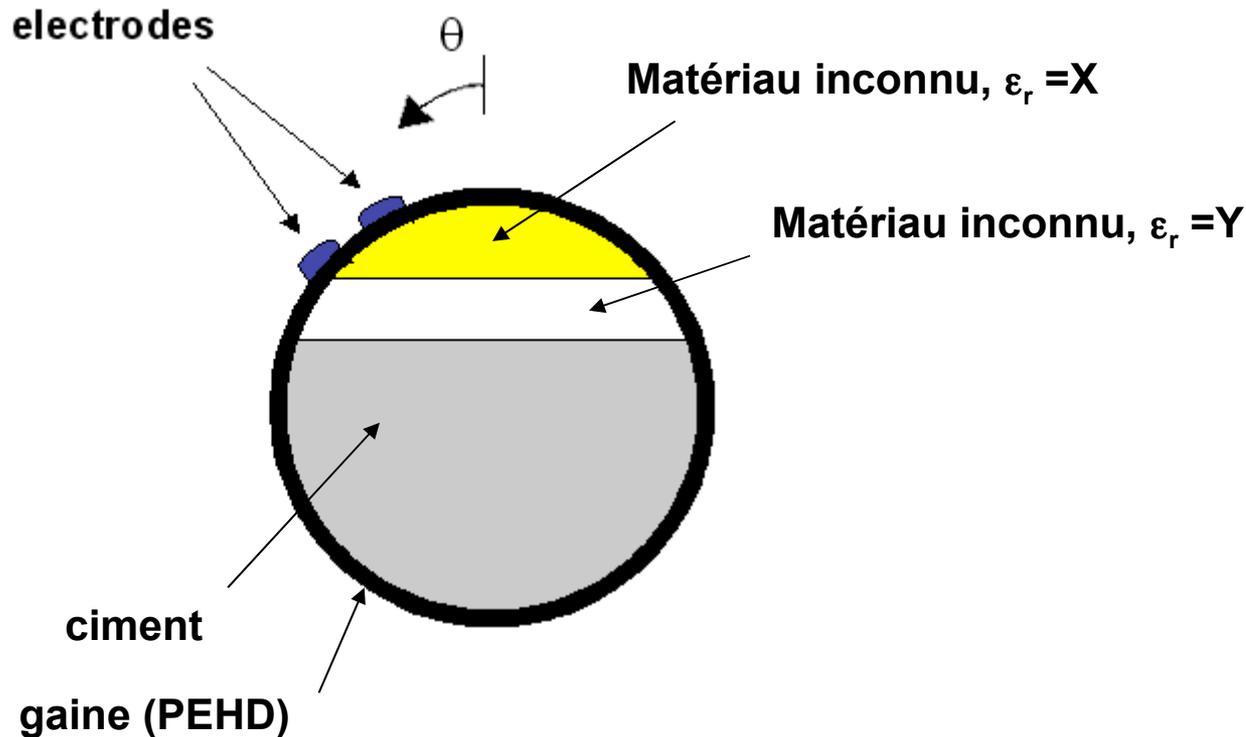
Modélisation aux EF (réalisées avec un logiciel commercial) : modélisation 2D



Utilisation du modèle dans un plan d'expérience

Réalisation d'une étude paramétrique

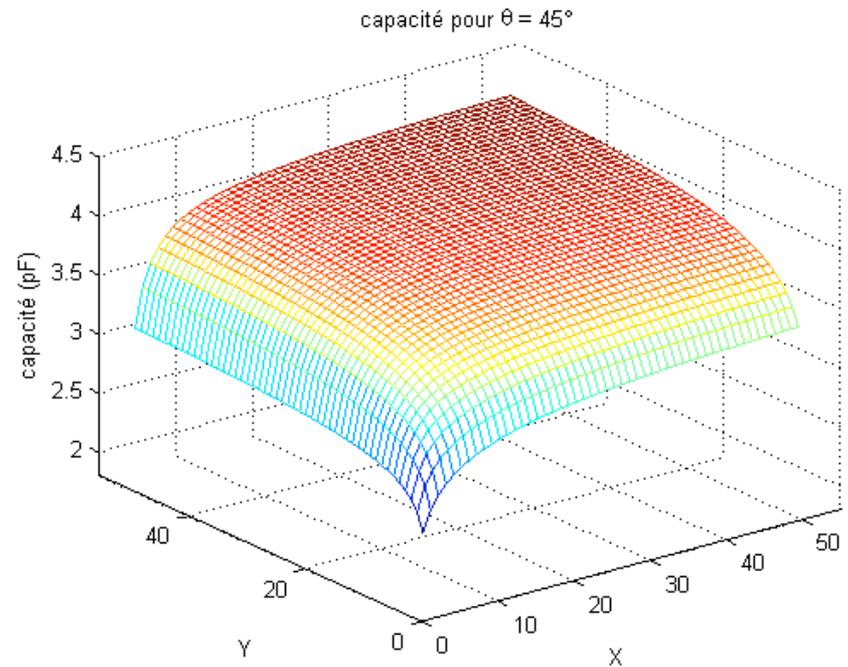
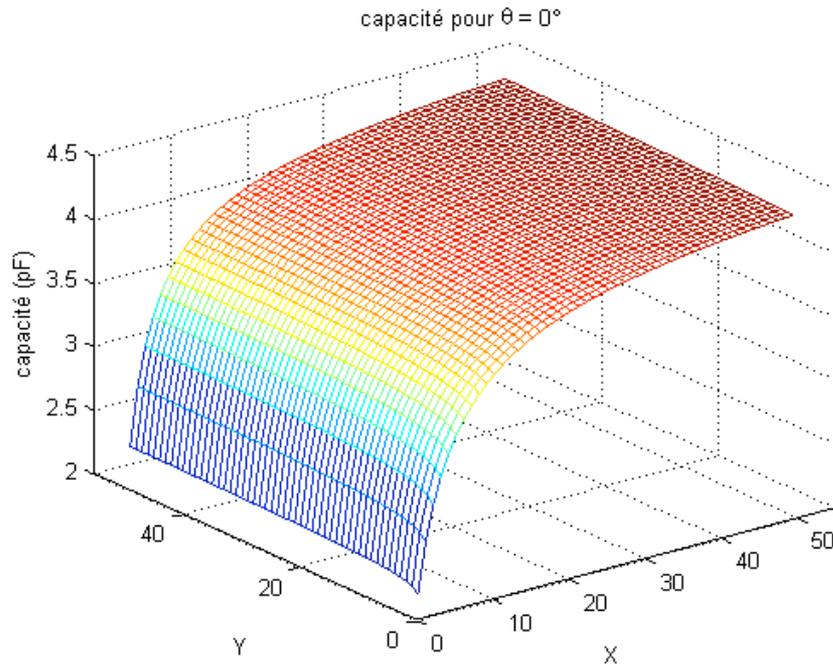
OBJECTIF : comprendre l'influence de la nature des matériaux à l'intérieur du conduit sur la capacité



On réalise une série de calculs en faisant varier la valeur de X et Y

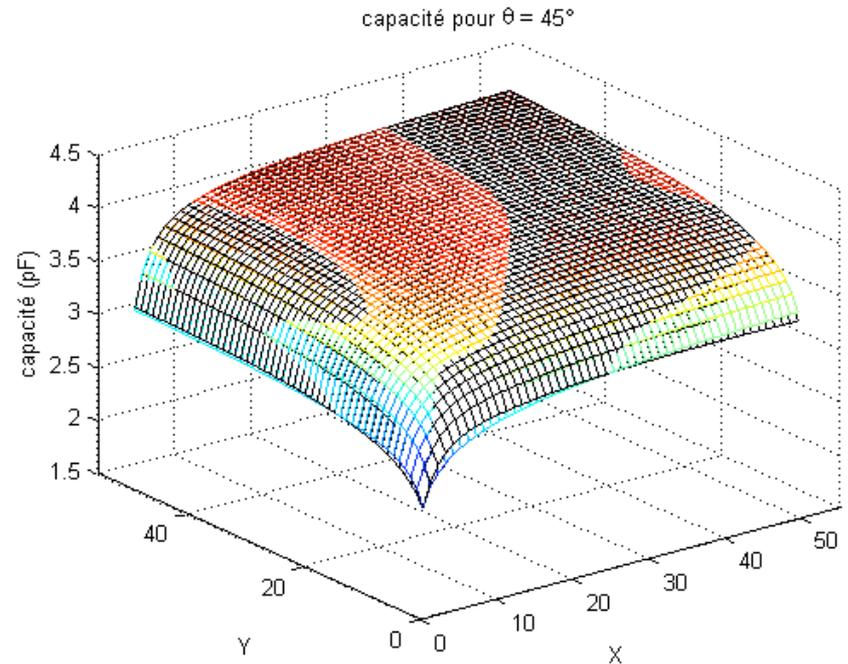
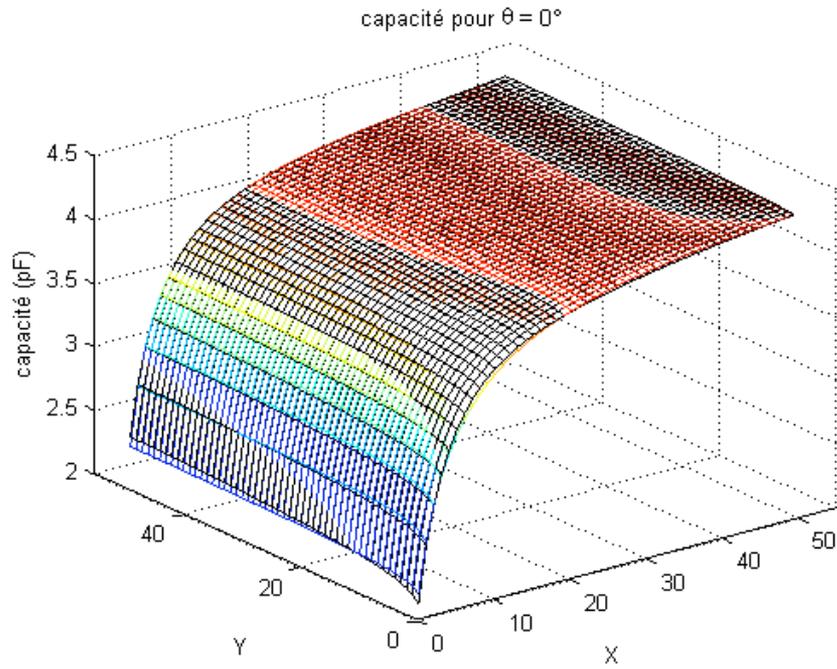
Sensibilité aux permittivités (1/2)

Représentation de la capacité pour une position en fonction de X et Y:



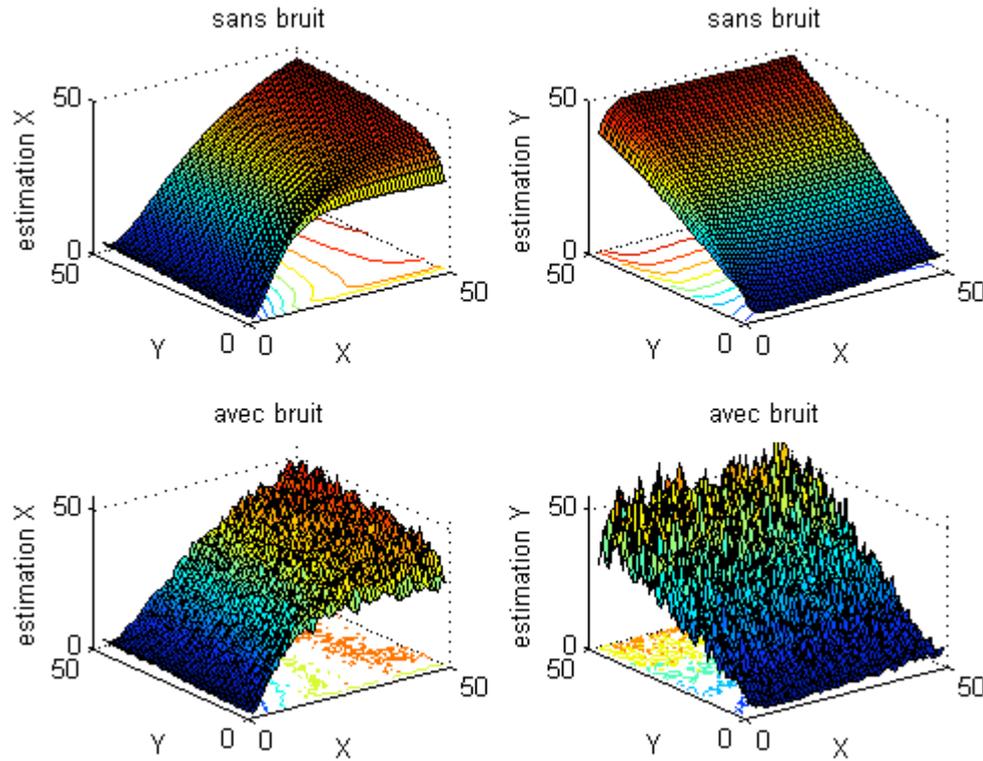
➔ Permet de retrouver des résultats sur la sensibilité de la sonde:
pas ou peu sensible à l'eau ($\epsilon_r = 80$ pour l'eau pure)

Réalisation d'un 'fit' des courbes



Les paramètres de notre 'fit' constituent les nouveaux paramètres de notre problème direct: on pourra tenter de l'inverser

Estimation des permittivités

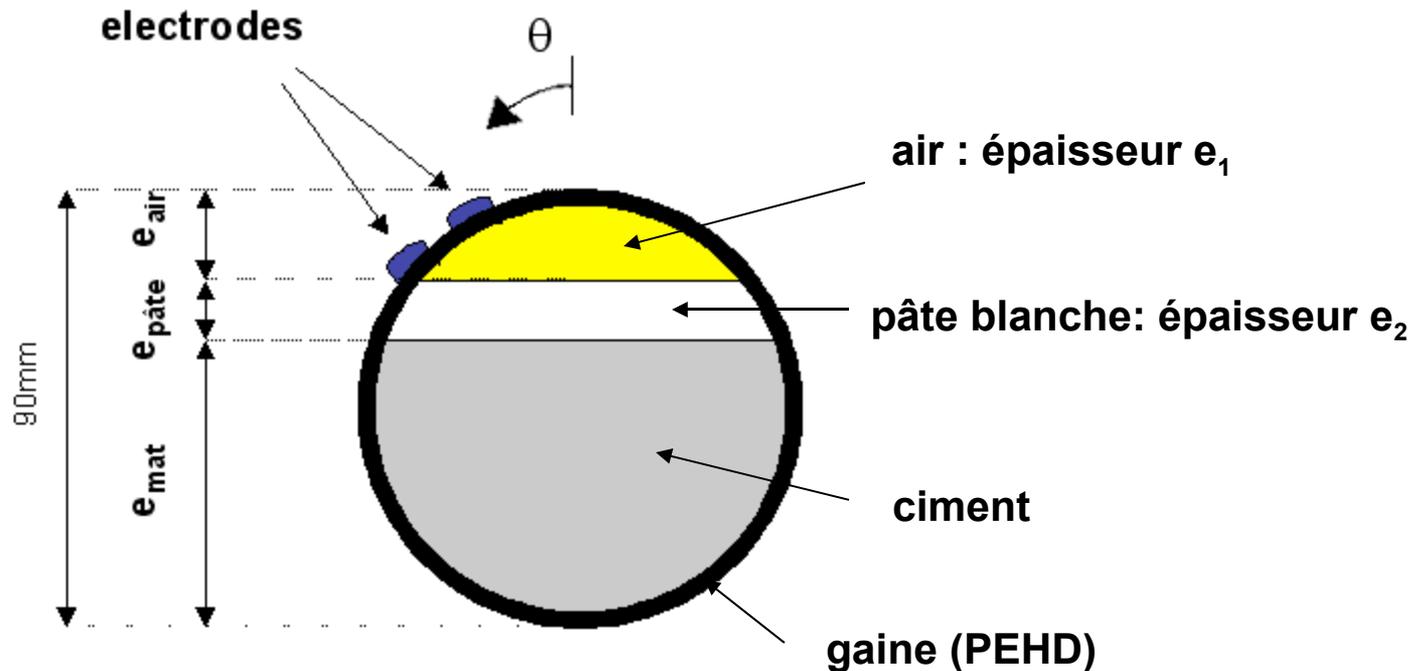


- ➔ Bonne décorrélation des estimations selon X et Y
- ➔ Robustesse vis-à-vis du bruit additif gaussien
- ➔ Néanmoins, erreur pour les faibles valeurs de Y

Utilisation du modèle dans un plan d'expérience

Réalisation d'une étude paramétrique

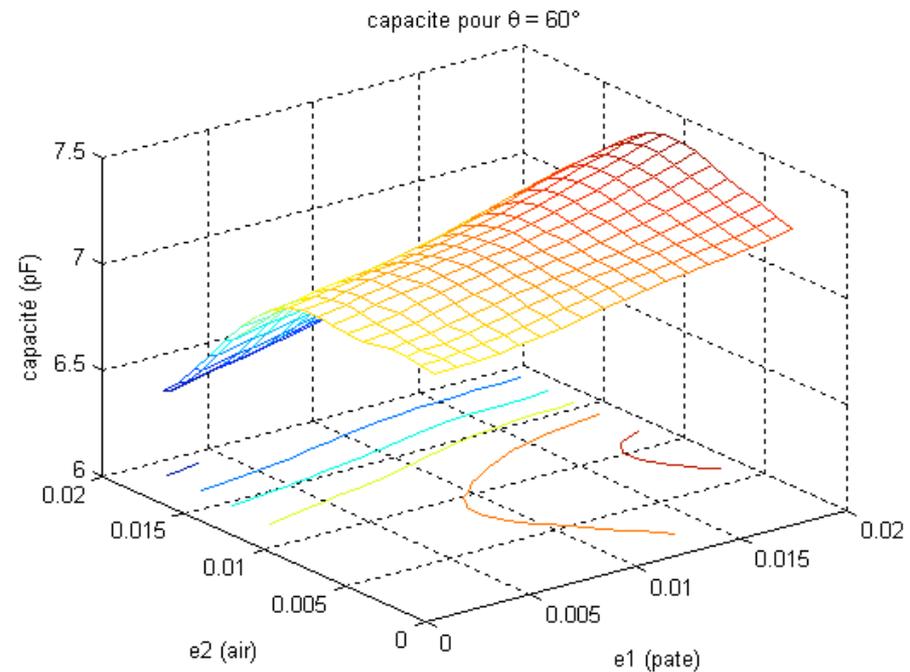
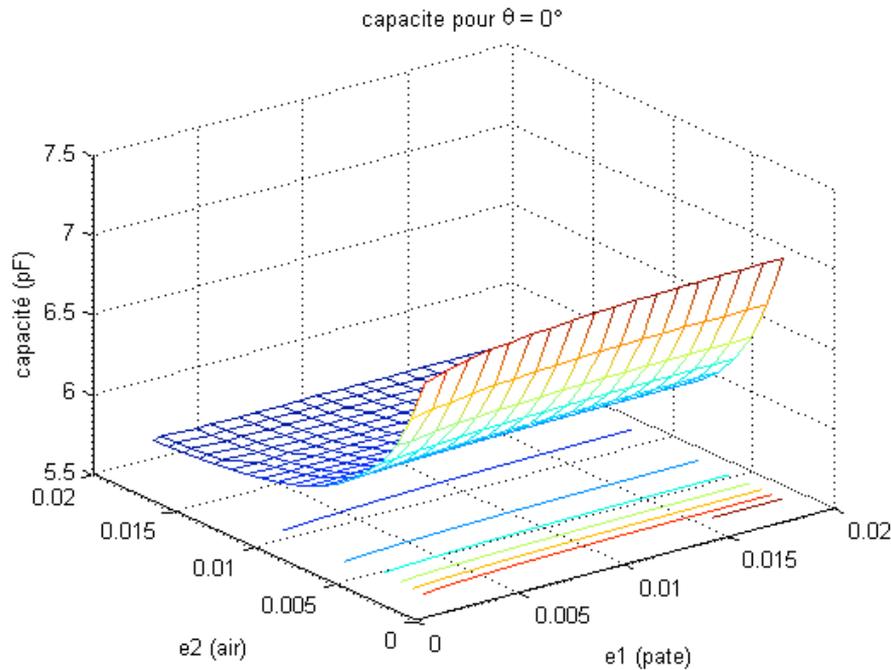
OBJECTIF : comprendre l'influence de l'épaisseur du menisque d'air et de la couche de pâte



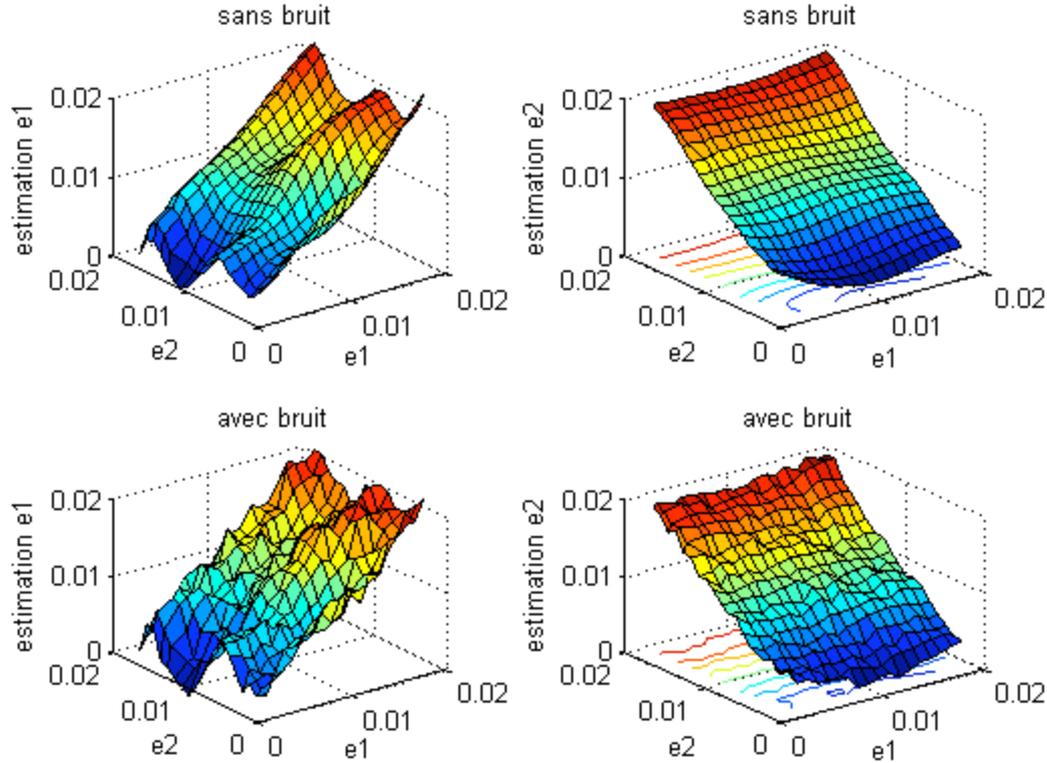
On réalise une série de calculs en faisant varier la valeur de e_1 et e_2

Sensibilité aux épaisseurs

Représentation de la capacité pour une position en fonction de e_1 et e_2 :



Estimation des épaisseurs



- ➔ Bonne décorrélation des estimations selon e_1 et e_2
- ➔ Robustesse vis-à-vis du bruit additif gaussien
- ➔ Estimation de e_1 (épaisseur de pâte) de moins bonne qualité

Pour la partie instrumentation

- ➔ Identification des phénomènes de corrosion dans les conduits de précontrainte extérieure
- ➔ Développement d'une sonde capacitive pour inspecter les conduits
- ➔ La sonde capacitive nous permet d'identifier la présence d'un vide ou la présence de pâte blanche
- ➔ L'efficacité de la sonde capacitive a été démontrée sur le terrain: utilisée par les équipes d'inspection

Pour la partie modélisation

- ➔ Bonne adéquation entre la modélisation et les mesures
- ➔ Possibilité de simuler des plans d'expérience

Pour la partie information & traitement du signal

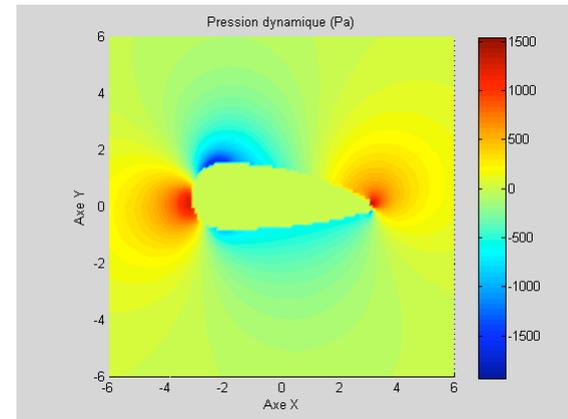
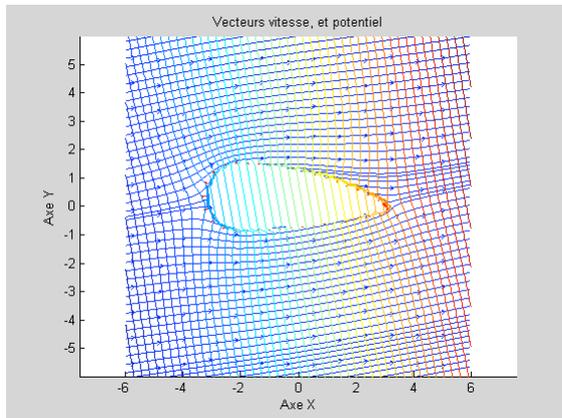
- ➔ Estimation des données internes de la gaine via une mesure de capacité possible & robuste

Prochaines étapes

- ➔ Estimation des données internes de la gaine à partir de données obtenues en laboratoire ou sur le terrain
- ➔ **Enrichir l'information** délivrée par la sonde pour estimer plus de paramètres
 - ➔ -Sonde multi électrode ?
 - ➔ -Mesures multi fréquence ?
 - ➔ -Multi physique ?

Perspective d'évolution de la méthode DPSM:

➔ Application de la méthode en mécanique des fluides



➔ Développer la méthode en thermique pour des applications dans le domaine du bâtiment

➔ Coupler la méthode avec des "maillages" de type Industriel (CATIA par exemple)

Merci de votre attention

- **D. PLACKO, Ecole Normale Supérieure, Cachan, France, T.KUNDU, University of Arizona, USA:**

"DPSM - Distributed Point Source Method for Modeling Engineering Problems"

372 pages, juin 2007, éditeur John Wiley & Sons

- **D. PLACKO, Ecole Normale Supérieure, Cachan, France, T. KUNDU, University of Arizona, USA:**

"Modeling of Ultrasonic Field by Distributed Point Source Method"

Chapitre 2 de l'ouvrage: *"Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization"*, pp 143-202

Coordonateur: T.KUNDU, éditeur: CRC press, USA, janvier 2004

- **R.AHMAD, T. KUNDU, University of Arizona, USA, D.PLACKO, Ecole Normale Supérieure, Cachan, France:**

"Modeling of the Ultrasonic Field of Two Transducers Immersed in a Homogeneous Fluid using Distributed Point Source Method"

Chapitre 5 de l'ouvrage: *"Advanced Ultrasonic Methods for Material and Structure Inspection"*, pp 159-187.

Coordonateur: T.KUNDU, éditeur Hermes Science Publishing, UK, janvier 2007

-**D.PLACKO, N.LIEBEAUX, T.KUNDU:**

"Procédé pour évaluer une grandeur physique representative d'une interaction entre une onde et un obstacle".

Dépôt de Brevet N° 02 14108 ENS Cachan/CNRS/Université d'Arizona (novembre 2002). Extension PCT (novembre 2003).

D.PLACKO, T.KUNDU, N.LIEBEAUX, A.CRUAU:

"Procédé universel de modélisation des interactions entre au moins une onde et au moins un objet, la surface de chaque objet définissant une interface entre au moins deux milieux".

Dépôt de Brevet français N° 05/13219 (décembre 2005) et extension PCT N° 63831 ENS Cachan/CNRS/Université d'Arizona, (décembre 2006). Extension Canada et Etats-Unis en cours (janvier 2009).