



Caractérisation Électromagnétique des Matériaux Traités du Génie Civil dans la Bande de Fréquences 50 MHz – 13 GHz

Mourad ADOUS

Soutenance de thèse - 05 Octobre 2006

Directeurs de thèse : Patrick QUEFFELEC

Xavier DEROBERT

Intervenants :

Vincent BALTAZART

Laurent LAGUERRE



Plan de la présentation

1. Contexte de l'étude
2. État de l'art - Choix des techniques
3. Conception et mise en oeuvre des dispositifs de mesures
4. Caractérisation EM de mélanges de bétons
5. Conclusion & Perspectives

Introduction

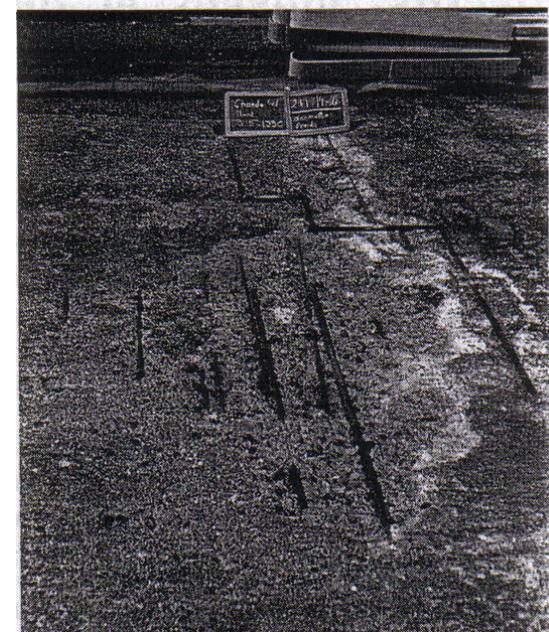
Structures du génie civil



- les barrages
- les enceintes de confinement
- les aéroréfrigérants
- les chaussées
- Les ponts

Vieillesse de ces structures : Détection de défauts – États des bétons

- Teneur en eau
- Carbonatation,
- Attaque par les chlorures,
- ...



Techniques de contrôle : GPR

Techniques d'inspections :

- Destructives,
- Semi destructives,
- Non destructives

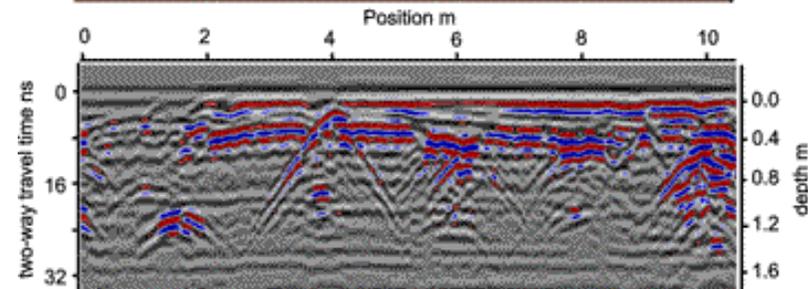
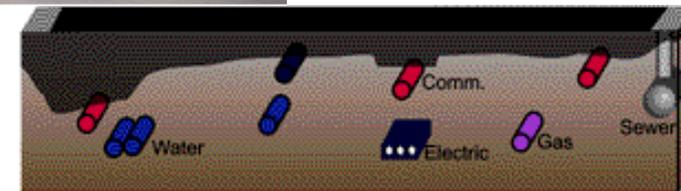
Avantages GPR:

- non destructif
- rapide
- simple d'utilisation

Principe :

Émission/réception d'une impulsion EM

Temps d'arrivée = $f(\epsilon)$



Radar impulsionnels :
50 MHz – 2(3) GHz

Radar à sauts de fréquences :
4 – 10 (12) GHz

Objectif

Modélisation EM des signaux radar
nécessite la connaissance des propriétés diélectriques
du milieu ausculté

→ Problématique →

ϵ du béton (mat. Hétérogène)
mal connue
+
Phénomène de diffusion



Mise au point de techniques de
caractérisation EM adaptées aux
bétons dans la bande
50 MHz - 13 GHz

Plan de la présentation

- Introduction : contexte
- **Pré-sélection de techniques de mesures**
- Mise au point des dispositifs de mesure
- Caractérisation EM de mélanges de béton
- Conclusion & Perspectives

Techniques de mesures : *État de l'art*

Critères du choix

1. Très large bande (> 10 GHz)
2. Critère du VER

Méthodes sélectionnées :

- Cellule en ligne coaxiale
- Sonde en ligne coaxiale
- Sonde en guide d'onde rectangulaire

Outil de simulation & matériau synthétique

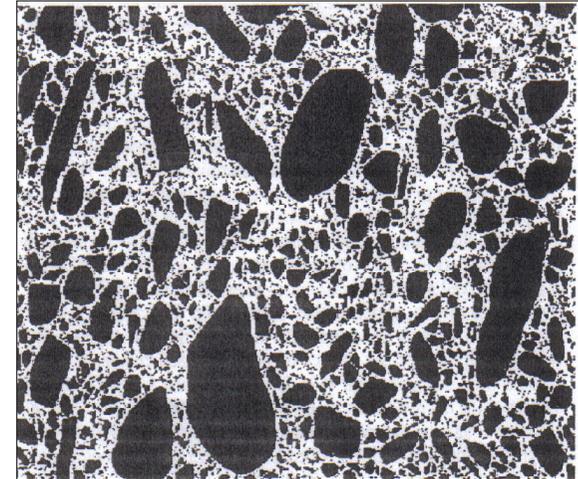
Outil de simulation : HFSS (3D, fréquentiel)

Béton : liant+granulats(nano au cm)+air

☞ Milieu fortement hétérogène



Maillage adaptée à la géométrie et à la taille des granulats



Béton typique 3 phases : ($\epsilon_{\text{moy}}=5,5$): $\lambda=1,3$ cm à 10 GHz

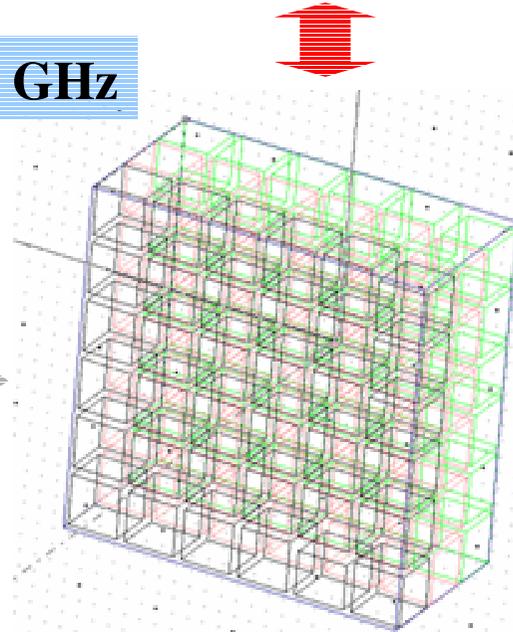
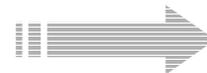
☞ 2 phases :

- la matrice : 30% - $\epsilon_{\text{moy}}=4,45$ (théorie du champ moyen)

bitume + pores + granulats $_{\ll 1 \text{ mm}}$

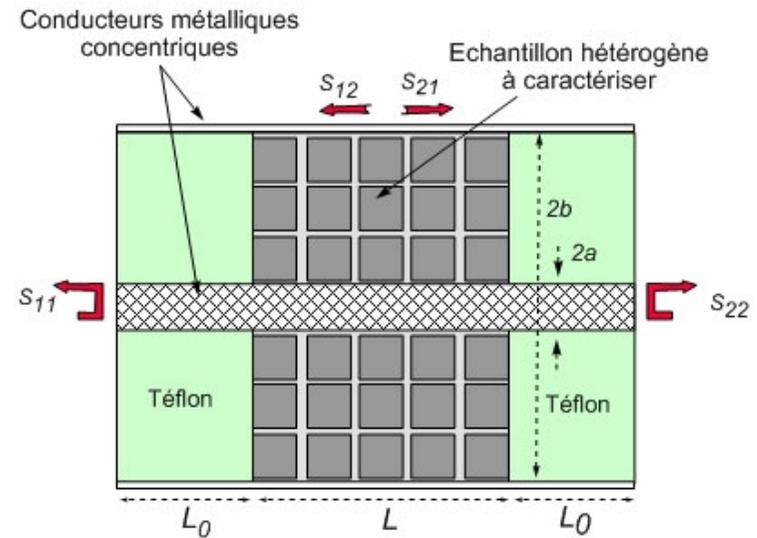
- les hétérogénéités

granulats $_{\gg 1 \text{ mm}}$ (70% - $\epsilon=6,7$)



Ligne coaxiale : *Principe / Calcul du VER*

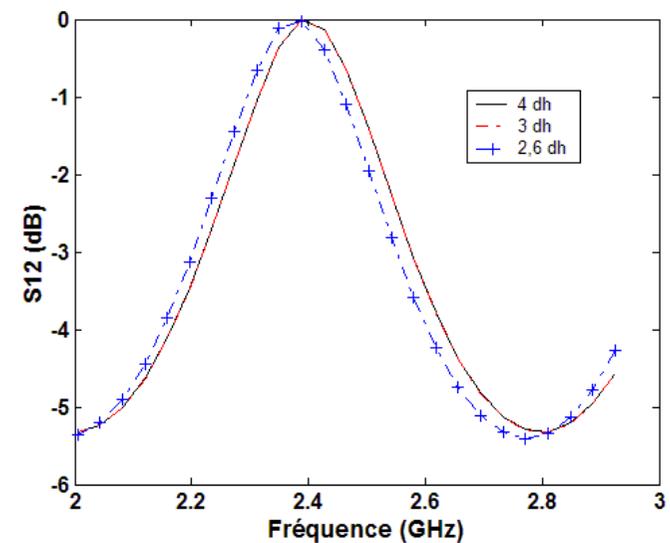
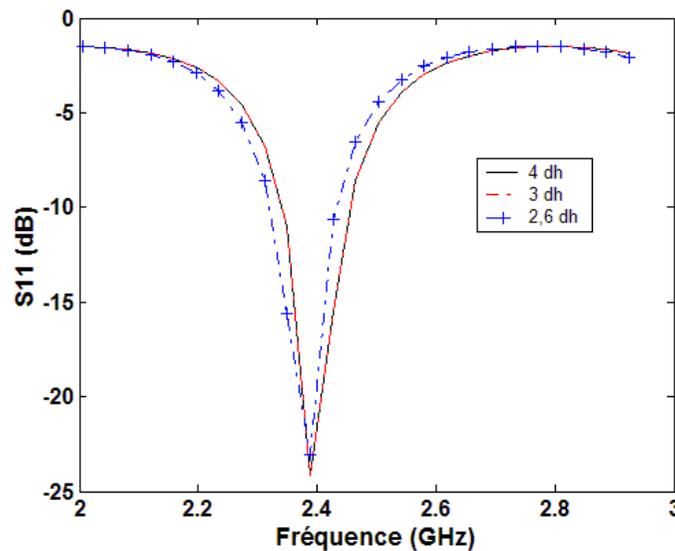
- ☺ Large bande
- ☺ Fréquence de coupure nulle
- ☺ Analyse EM (TEM) simple
- ☹ Échantillon torique



Calcul du *Volume Élémentaire Représentatif*

$$VER = 3 d_h$$

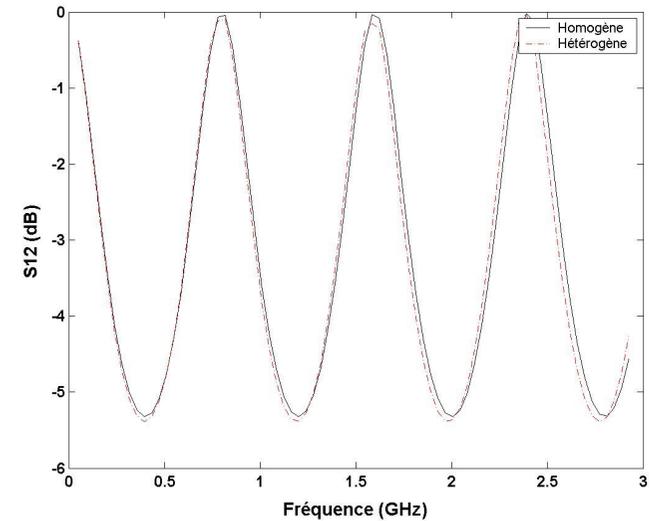
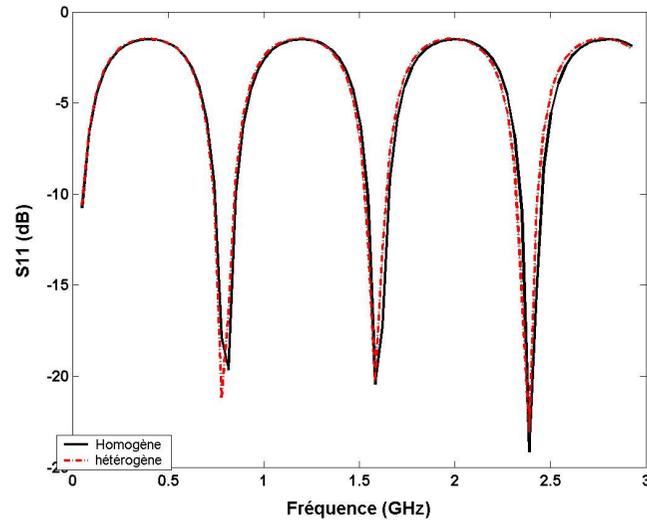
d_h : taille Maxi
des granulats
($d_h=2$ cm)



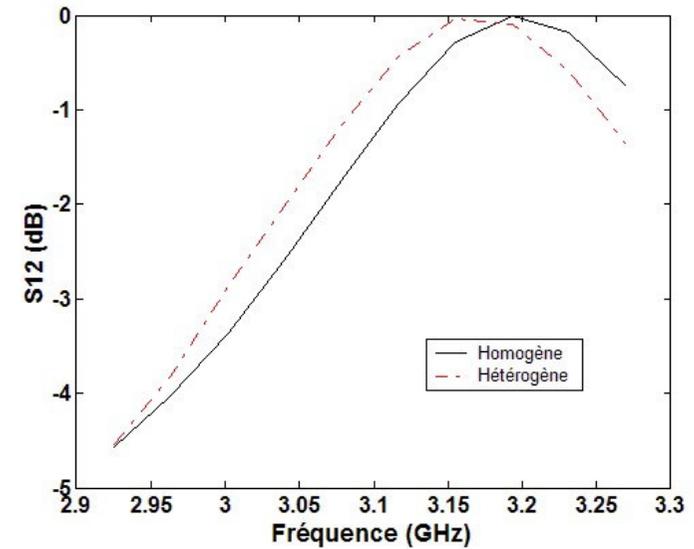
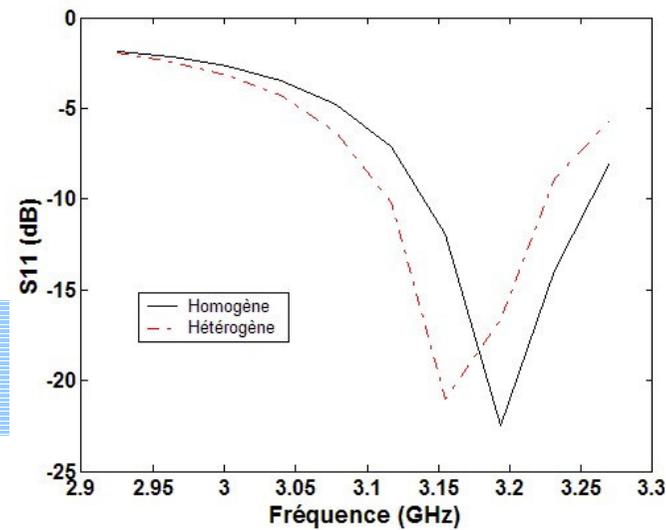
Ligne coaxiale : *Homogénéisation - diffusion*

👉 Comparaison milieu hétérogène/milieu homogénéisé

Convergence
jusqu'à 3 GHz



Divergence
au-delà de 3 GHz



Cellule Ligne Coaxiale/guide cylindrique (BF)

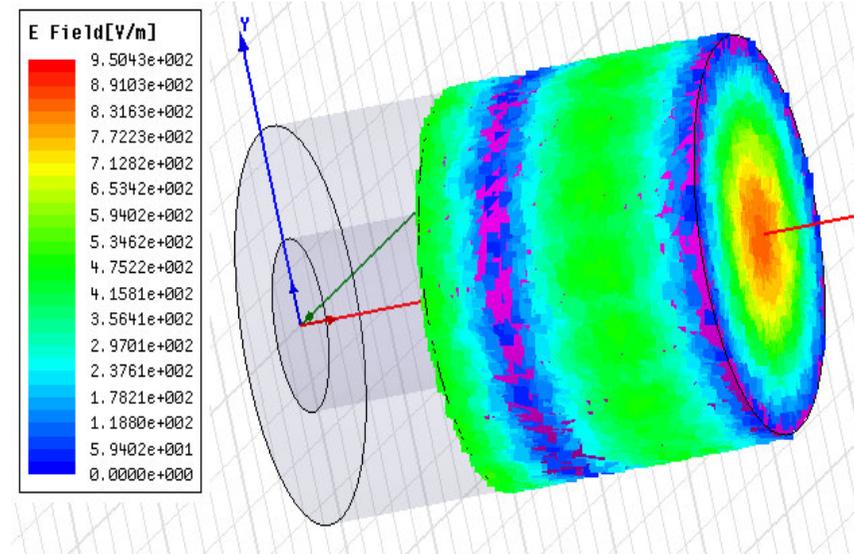
Cellule en ligne coaxiale

- 😊 Large bande (50 MHz - 1 GHz)
- 😊 Analyse électromagnétique simple
- 😞 Difficile à mettre en œuvre
- 😞 Usinage torique des échantillons
- 😞 moins précise

Lame de 1 mm implique des erreurs Supérieures à 30 % sur la permittivité mesurée

Cellule Coaxiale/cylindrique

- 😊 Large bande
- 😊 moins destructive
- 😊 plus pratique,
- 😊 plus précise
- 😞 Analyse EM complexe



Carte du champ électrique

Résumé : VER = 6 cm → Fc = 2.2 GHz
Bande du radar impulsions

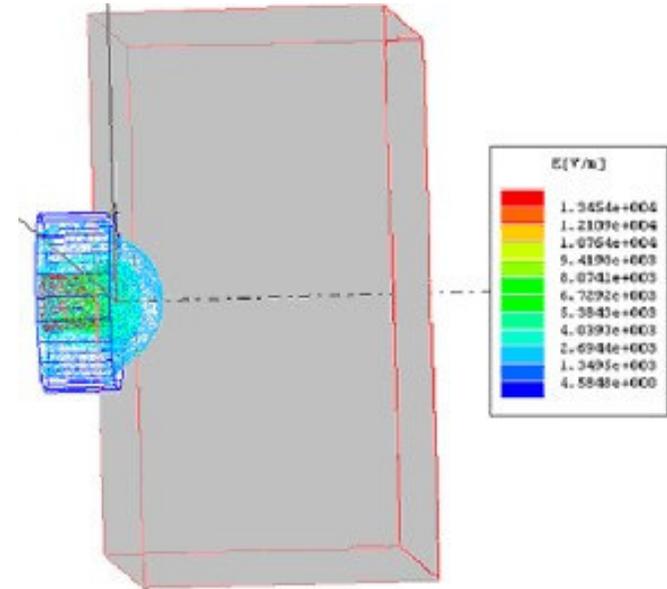
Pré - sélection des sondes HF

- **Sonde en ligne coaxiale**
- **Sonde en guide rectangulaire**

Sonde coaxiale : **Faible Profondeur de pénétration**

- 😊 Large bande 50 MHz – 20 GHz
- 😊 Fréquence de coupure nulle
- 😊 Nondestructive
- ☹ Analyse EM complexe

👉 **Données :** $b = 8 \text{ mm}$, $a = 3.61 \text{ mm}$
 $d = 6 \text{ cm}$
 $f_c = 8.31 \text{ GHz}$
 $Z_c = 50 \Omega$

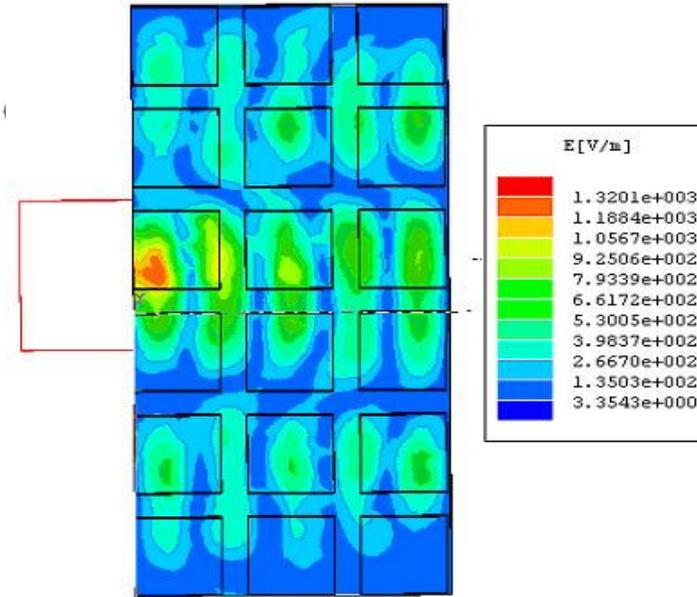


- ☹ **Ne respect pas le critère du VER**
- ☹ **Mesures non représentatives de la permittivité des bétons**

Sonde rectangulaire : *Étude de sensibilité*

- 😊 Large bande (jusqu'à 13GHz)
- 😊 Nondestructive
- ☹ Analyse EM complexe
- ☹ Bande 2 – 13 GHz ⇨ 3 sondes

👉 **Données :** Bande X (7 – 13 GHz)
a = 22 mm, b=10 mm
d = 6 cm



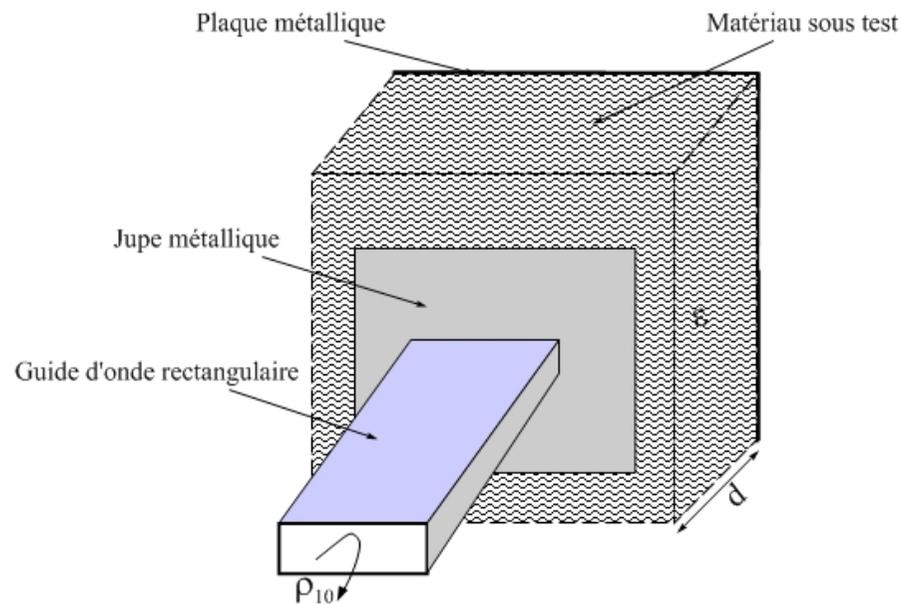
- 😊 Critère du VER satisfait
- 😊 Mesures représentatives de la permittivité des bétons

Plan de la présentation

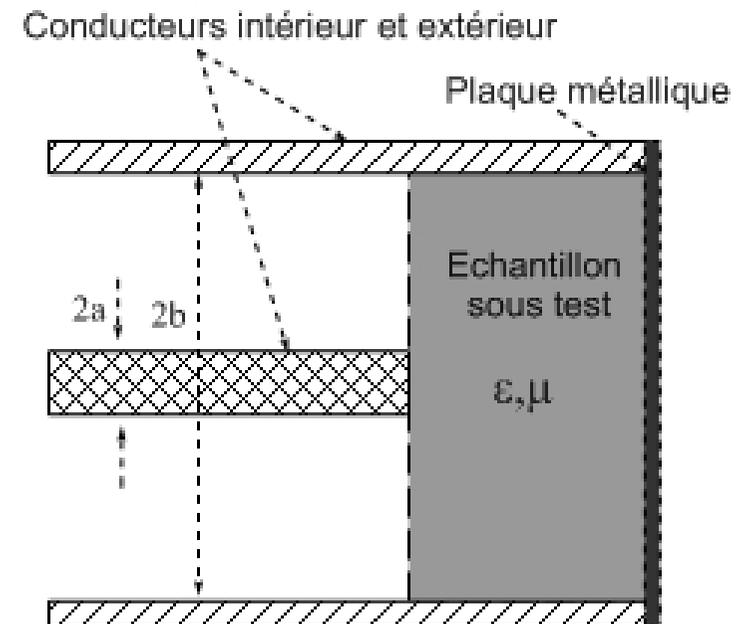
- Introduction : contexte
- Choix des techniques de mesure
- **Mise au point des dispositifs de mesure**
- Caractérisation EM de mélanges de béton
- Conclusion & Perspectives

Dispositifs mis en œuvre :

**2 Sondes guide d'onde rectangulaire :
Bandes C (4 – 7 GHz) et X (7 – 13 GHz)**



**Cellule ligne coaxiale/guide
cylindrique (BF) : 50 MHz – 1.2 GHz**



Démarche suivie :

1. Problème direct : *analyse modale*

2. Problème inverse : *Méthode itérative*

3. Étalonnage : *SSS (HF) / SOL (BF)*

4. Validation : *mesures sur étalons*

5. Protocole de mesures (HF)

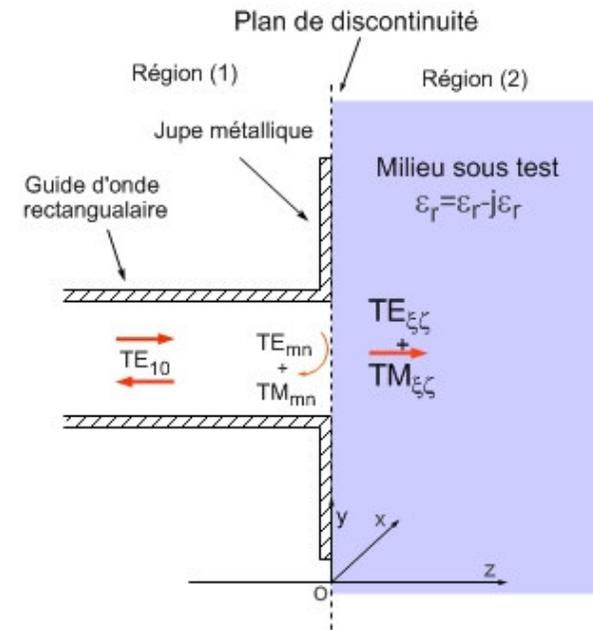
Sonde rectangulaire (HF) : *Problème Direct*

Problème direct : $\rho_{10} = f(\epsilon_r^*, \text{géométries})$

Méthode du raccordement modal

1. Configurations des champs EM
2. Conditions aux limites

$$\begin{aligned}
 (1) \quad \vec{E}_{10} \cdot (1 + \rho_{10}) + \sum \sum \rho_{mn}^{te} \vec{E}_{mn}^{te} + \sum \sum \rho_{mn}^{tm} \vec{E}_{mn}^{tm} \\
 = \iint (q^{te}(\xi, \zeta) \vec{E}_{\xi\xi}^{te} + q^{tm}(\xi, \zeta) \vec{E}_{\xi\xi}^{tm}) d\xi d\zeta \\
 (2) \quad \vec{H}_{10} \cdot (1 - \rho_{10}) - \sum \sum \rho_{mn}^{te} \vec{H}_{mn}^{te} - \sum \sum \rho_{mn}^{tm} \vec{H}_{mn}^{tm} \\
 = \iint (q^{te}(\xi, \zeta) \vec{H}_{\xi\xi}^{te} + q^{tm}(\xi, \zeta) \vec{H}_{\xi\xi}^{tm}) d\xi d\zeta
 \end{aligned}$$



3. Conditions d'orthogonalité des modes

Région 1

$$P_{mn} = \frac{1}{2} \iint_{S_1} \vec{H}_{mn}^* \times \vec{E}_{mn} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{2} \langle \vec{H}_{mn}^* / \vec{E}_{mn} \rangle \delta_{mn} \delta_{nn}$$

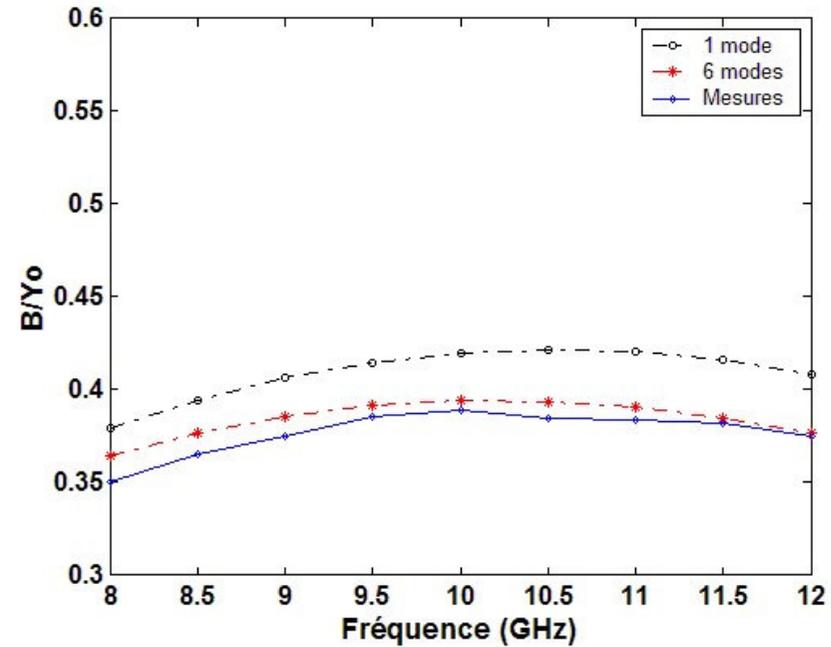
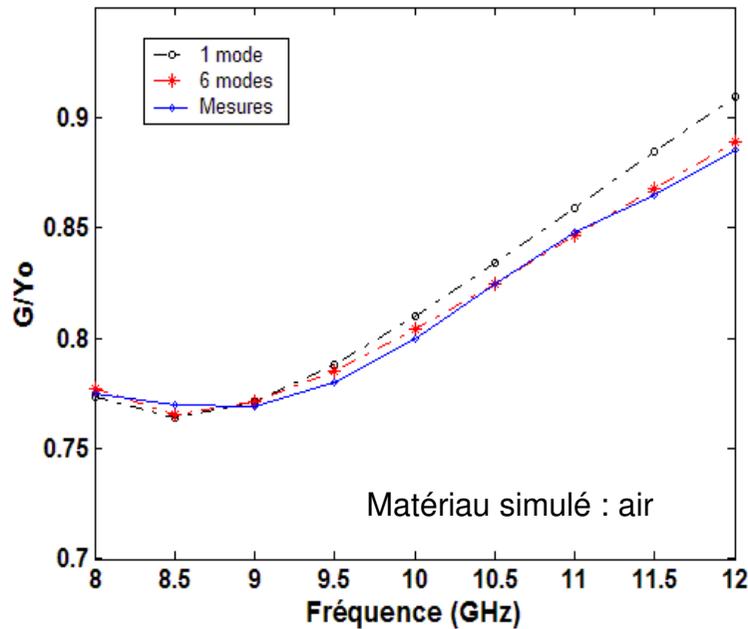
Région 2

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \iint_{S_2} \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{s} \\
 &= \frac{1}{2} \langle \vec{H}(\xi, \zeta') | \vec{E}(\xi, \zeta) \rangle \delta(\xi, \xi') \delta(\zeta, \zeta')
 \end{aligned}$$

Sonde rectangulaire : *Validation Problème Direct*

➤ Comparaison : Théorie-Mesures

$$y = g + jb = \frac{1 - \rho_{10}}{1 + \rho_{10}}$$



Prise en compte de 6 modes

Problème inverse : *Méthode itérative*

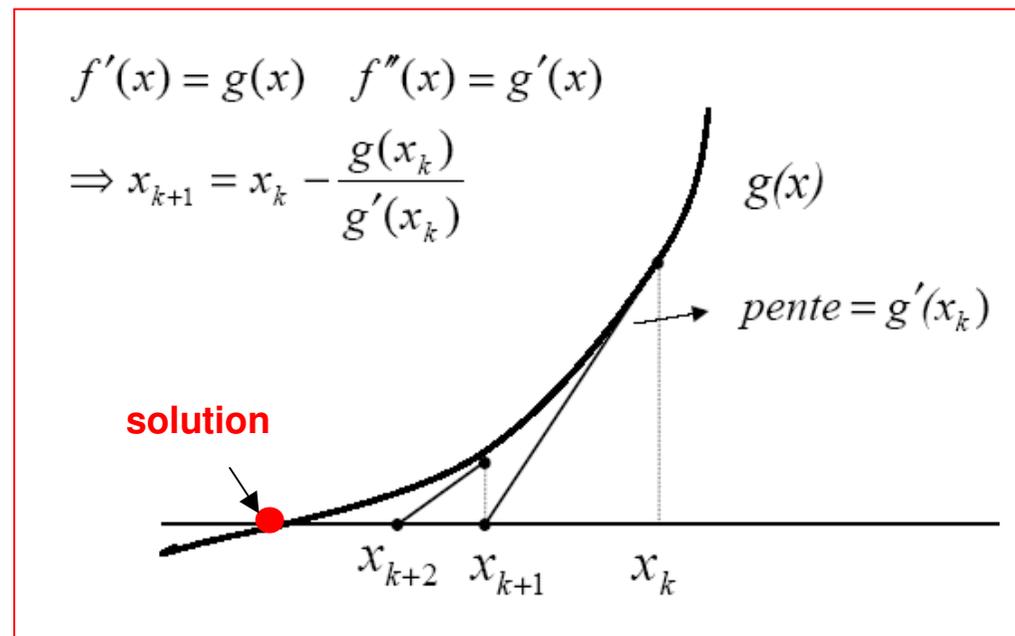
$$\rho_{10} = f(\varepsilon_r', \varepsilon_r'') : \text{Relation non explicite}$$



Minimisation par *approche itérative* de la fonction erreur :

$$E(X) = \rho_{\text{mesuré}} - \rho_{\text{theo}}(\varepsilon_r', \varepsilon_r'')$$

Illustration graphique
(*Newton – Raphson*)



Procédure d'Étalonnage : SSS

Étalonnage : Grandeur réelle = f(grandeur mesurée)

Erreurs de mesure :

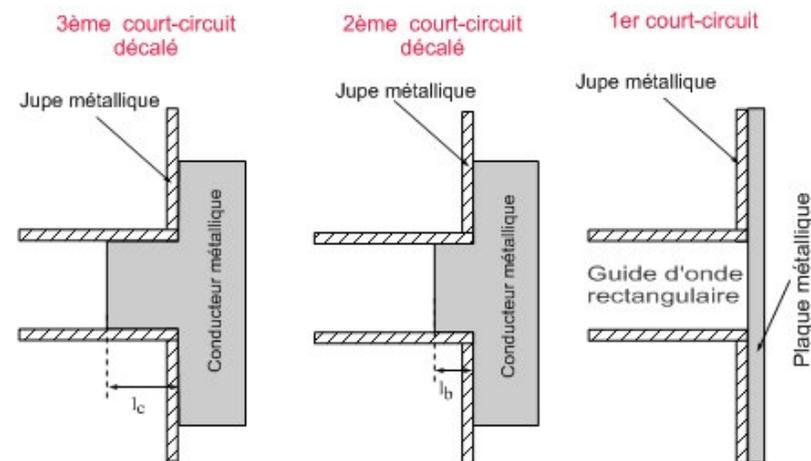
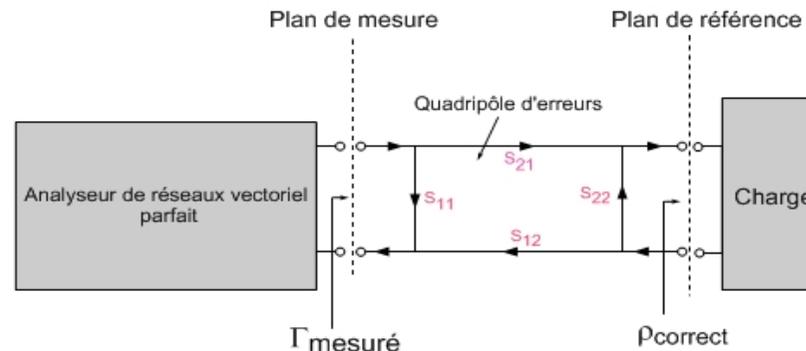
- Erreurs systématiques
- Erreurs aléatoires
- Erreurs de dérive

$$\rho_{corr} = \frac{\Gamma_{mes} - S_{11}}{(S_{22} - S_{11}\Gamma_{mes}) + S_{12}S_{21}}$$

Étalonnage : Trois courts-circuits décalés

$$\rho_{theo}^{\alpha} = e^{j(\pi + 2\beta l_{\alpha})}$$

Modèle du quadripôle d'erreurs

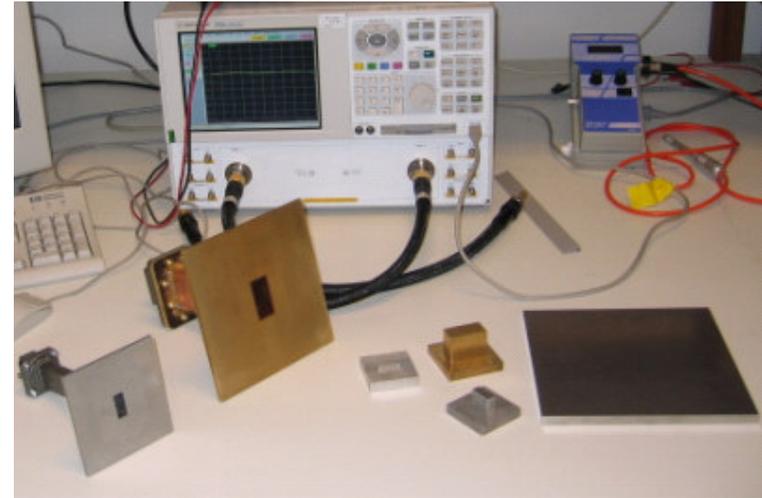


Procédure d'étalonnage SSS

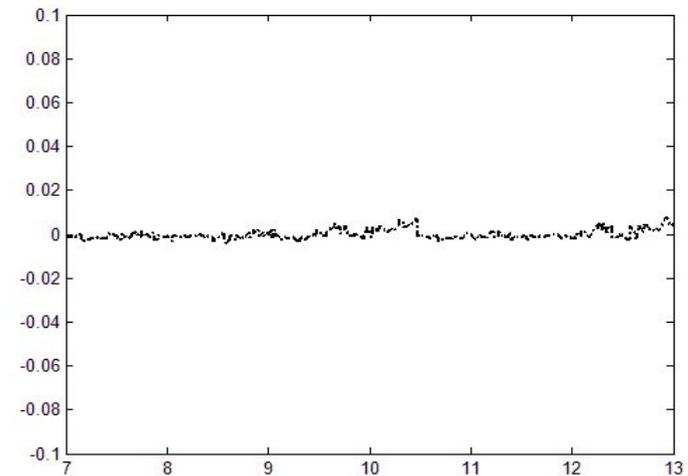
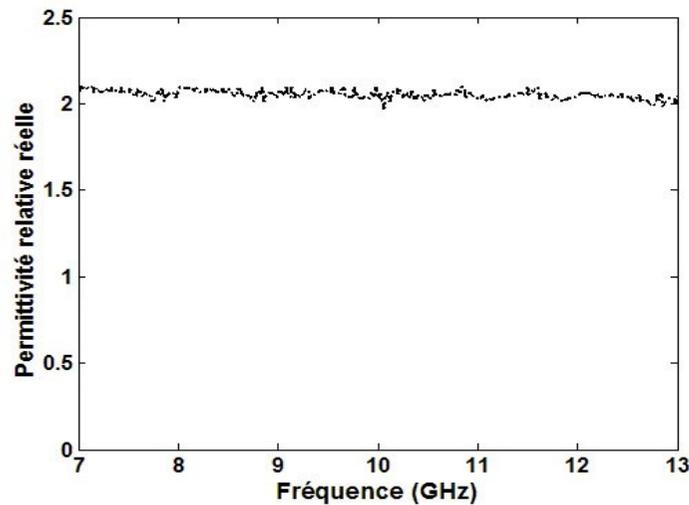
Sonde rectangulaire : *Validation sur matériau étalon*

Sondes retenues :

Bande C (4 – 7 GHz)
Bande X (7 – 13 GHz)



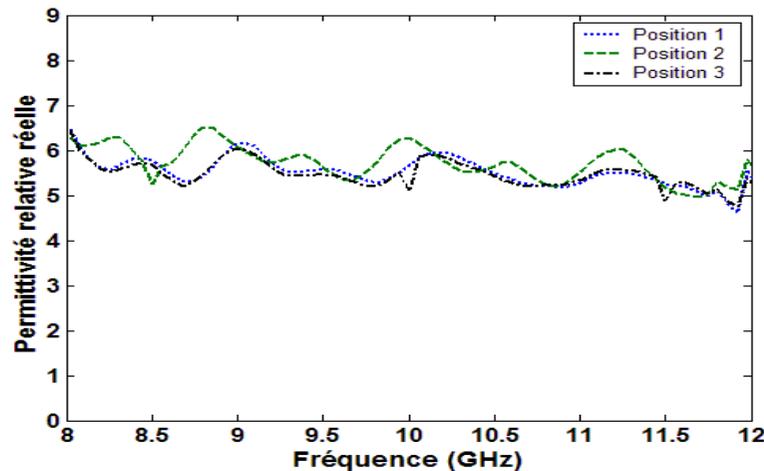
Résultats de mesure : Téflon $\epsilon_r=2.1$



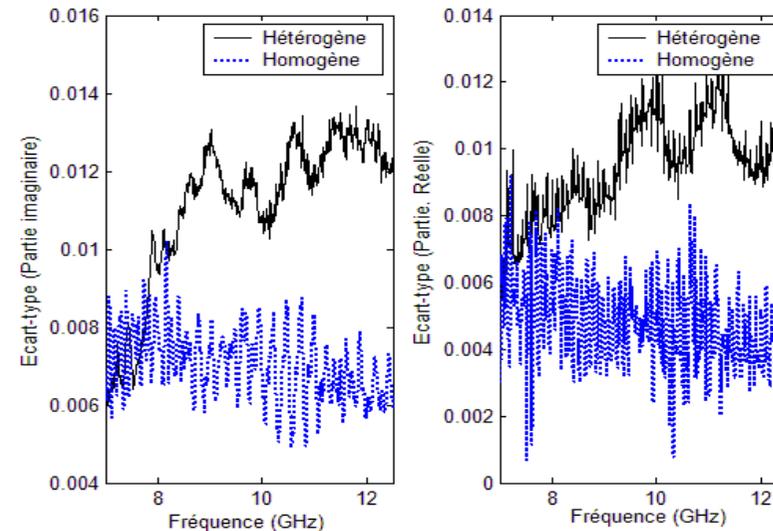
Sonde Rectangulaire (HF) : *Protocole de mesures*

Application sur matériau hétérogène

Ex. Mesures sur un béton



Ecart-type (N mes): Milieu homogène Milieu hétérogène



Protocole de mesure : approche statistique

Calcul de la moyenne et de l'écart-type

1. Calcul de la **longueur de corrélation**
2. Détermination du **nombre de points**

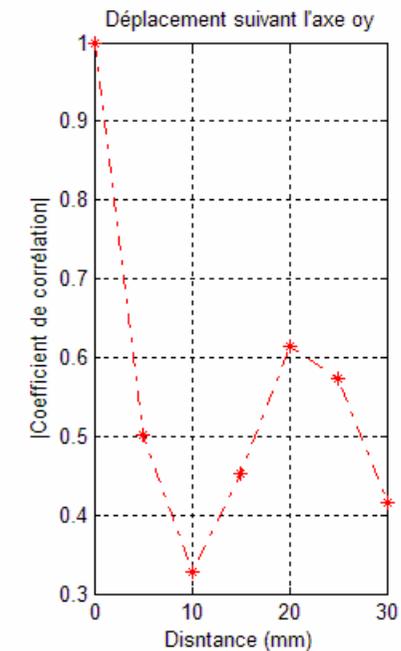
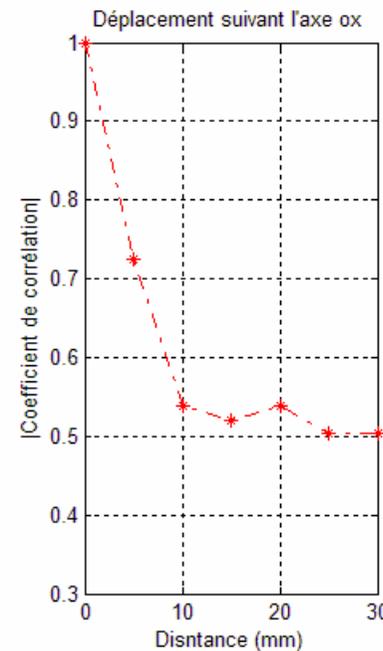
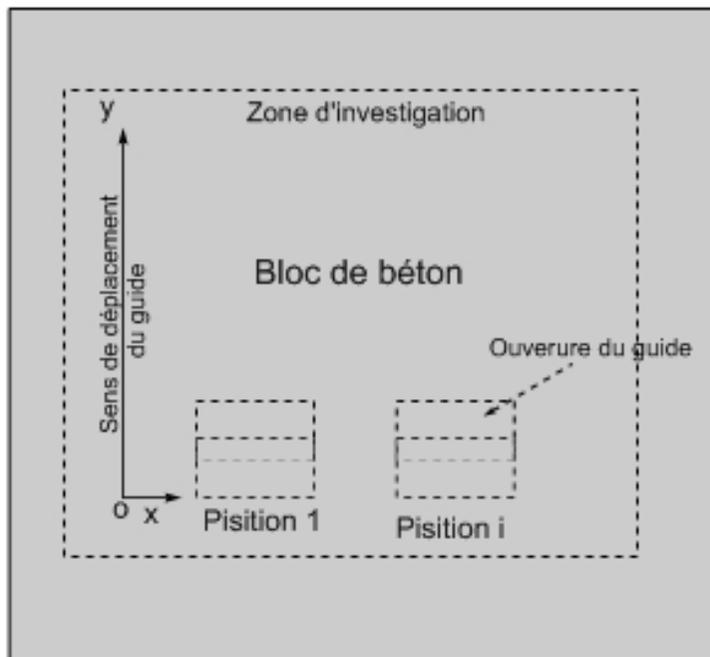
Sonde rectangulaire : *Longueur de corrélation*

coefficient de corrélation spatiale

$$\Gamma (\Delta x) = \frac{\text{cov}(X_0, X_{\Delta x})}{\sigma_{X_0} \sigma_{X_{\Delta x}}}$$

$$0 < |\Gamma| < 1$$

Coefficient de corrélation

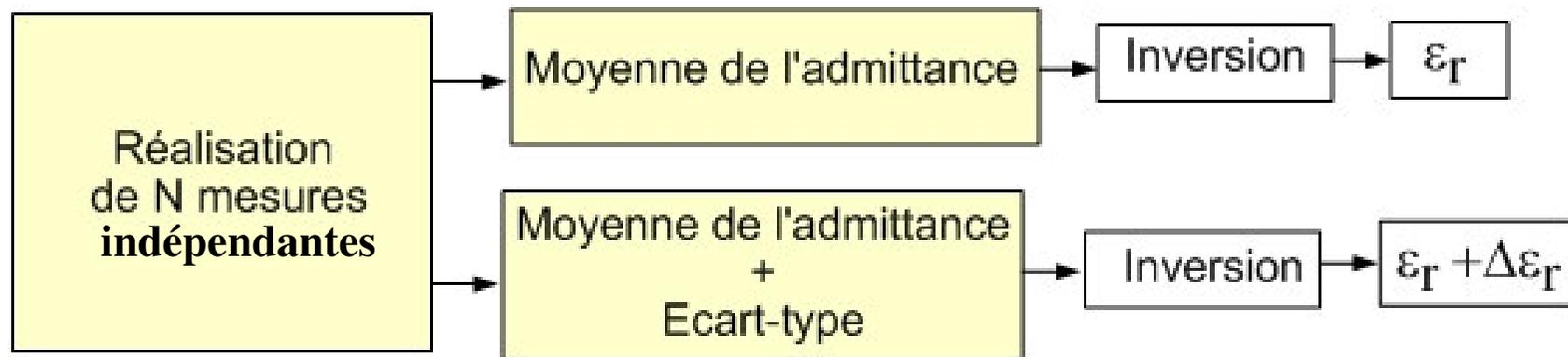


Longueur de corrélation = 10 mm

Nombre de mesure minimal : 30 retenus pour les bétons bitumineux

Sonde Rectangulaire :

Protocole de mesures Milieu hétérogène

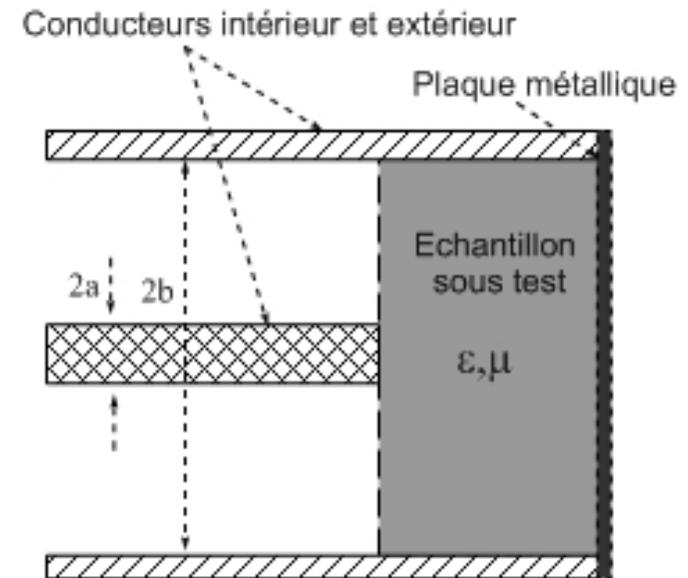


$\Delta\epsilon_r$: Nouveau Paramètre
(Diffusion)

Cellule BF : *Ligne Coaxiale/Guide cylindrique*

Démarche suivie

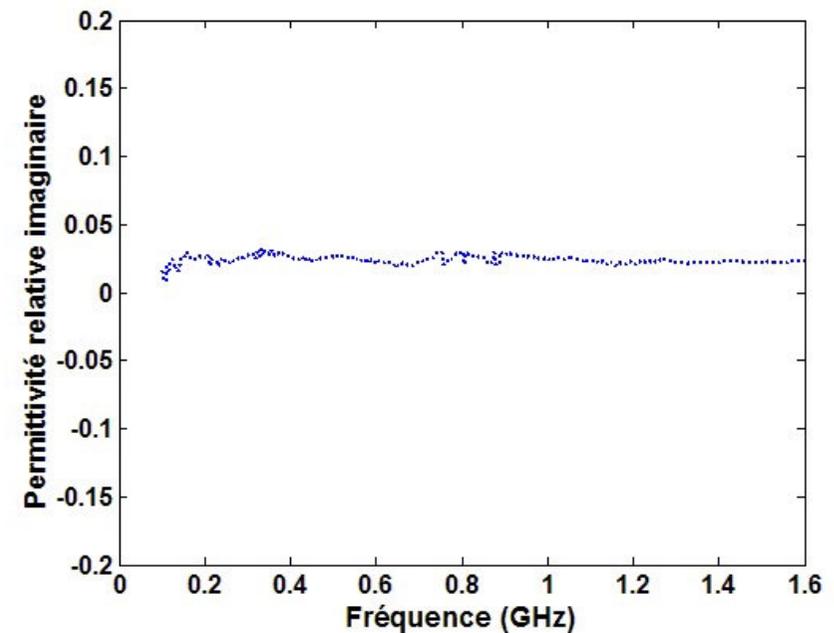
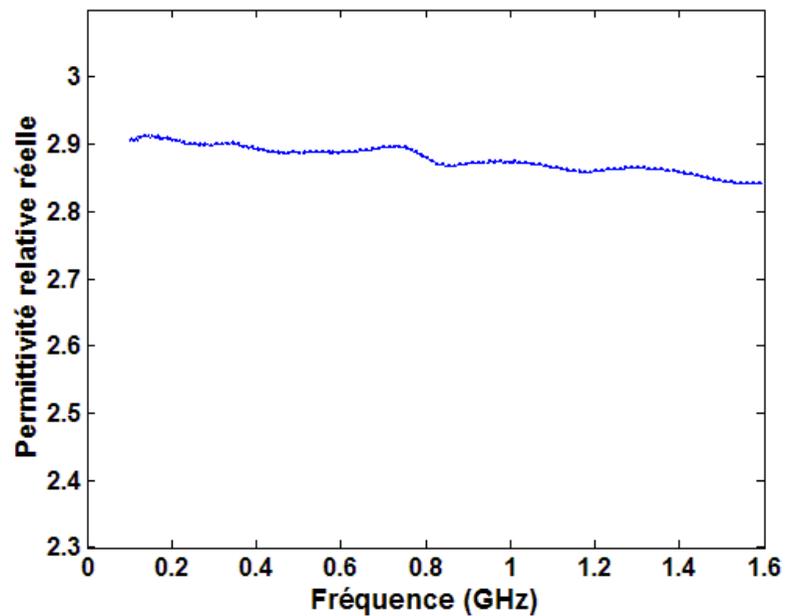
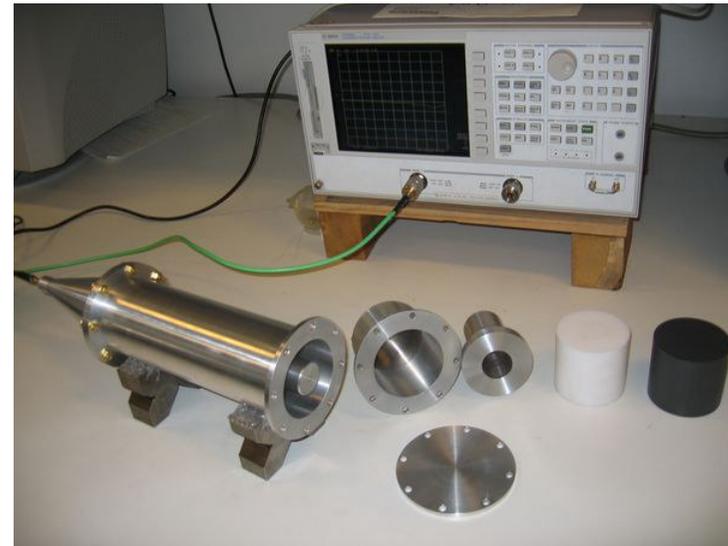
1. Problème direct
2. Problème inverse
3. Étalonnage (SSS/SOL)
4. Validation



Cellule BF : *Validation sur matériau étalon*

Dispositif de mesure

Mesures sur PVC ($\epsilon_r = 2.9$)



Plan de la présentation

- Introduction : contexte
- Choix des techniques de mesure
- Mise au point des dispositifs de mesure
- **Caractérisation EM de mélanges de béton**
- Conclusion & Perspectives

Plan d'expérience :

Plan d'expérience (réseau LPC) : Optimisation du nombre d'échantillons

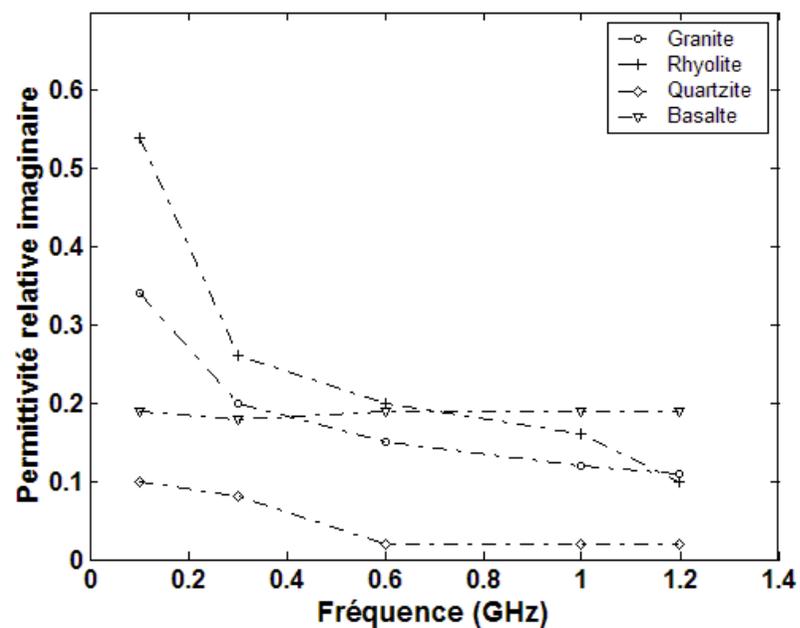
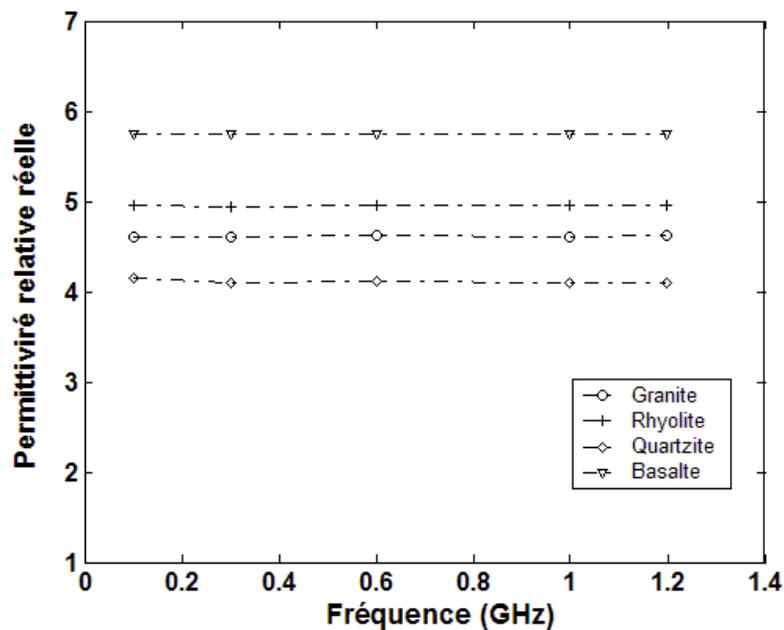
Paramètres retenus :

1. Nature de granulats (Granite, basalte, rhyolite, quartzite),
2. Taille des granulats (10 – 14 mm),
3. Fractions granulaires (continue – discontinue),
4. Compacité (fort, faible),
5. Teneur en liant (5 – 10 % en poids)



Effet de la nature des granulats

Échantillons A1, B1, C1 et D2

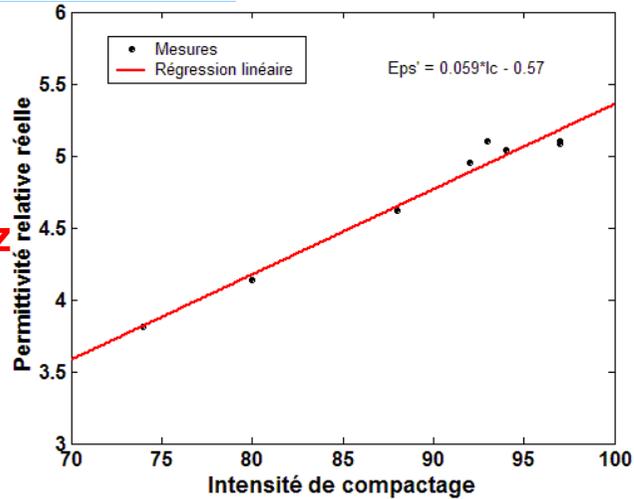


$$\Delta \varepsilon'_{r\text{granulats}} = 17\% \Rightarrow \Delta \varepsilon'_{r\text{mélange}} = 12\%$$

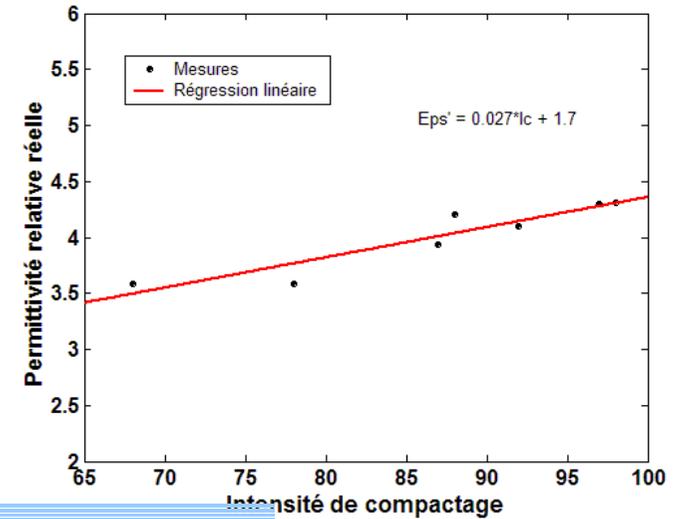
Effet de la compacité (BF)

Mélanges de granite

F=1.2GHz

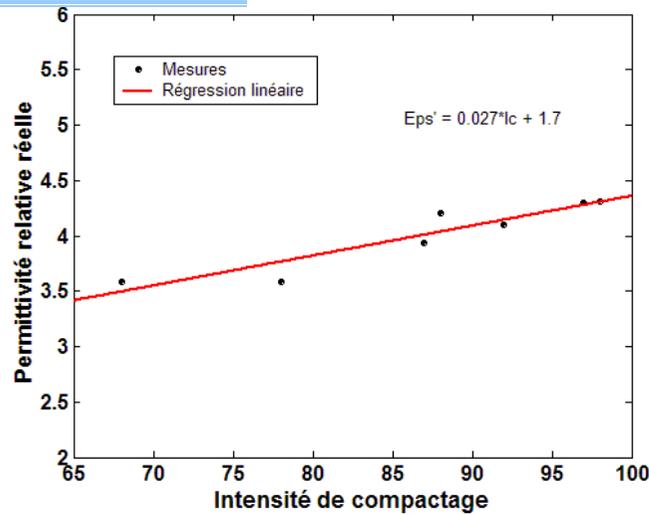


Mélanges de Rhyolite

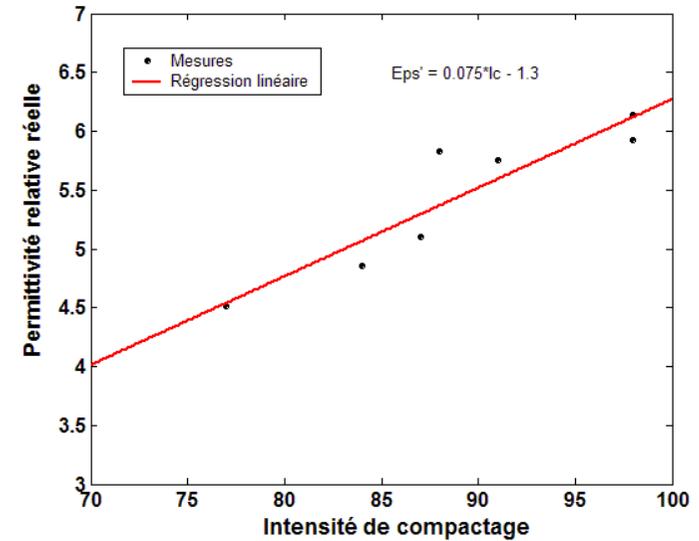


Mélanges de quartzite

F=1.2GHz



Mélanges de basalte

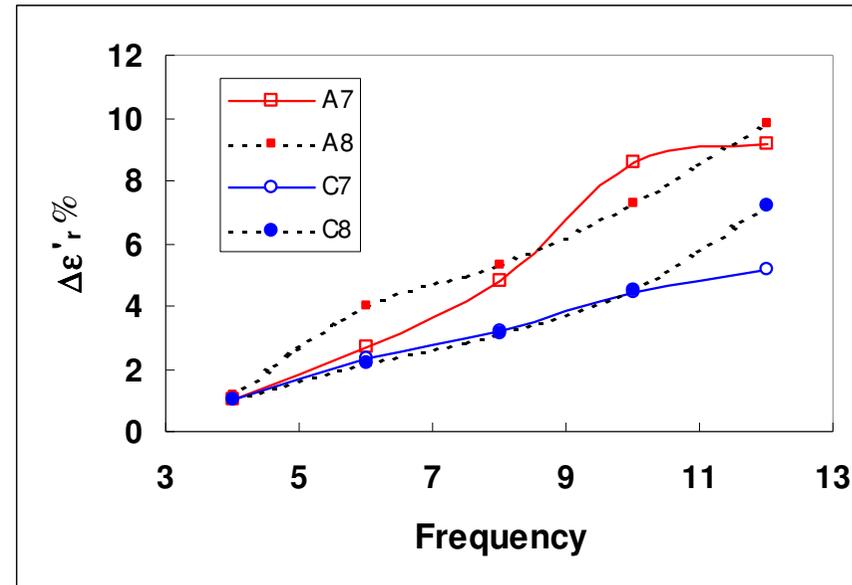
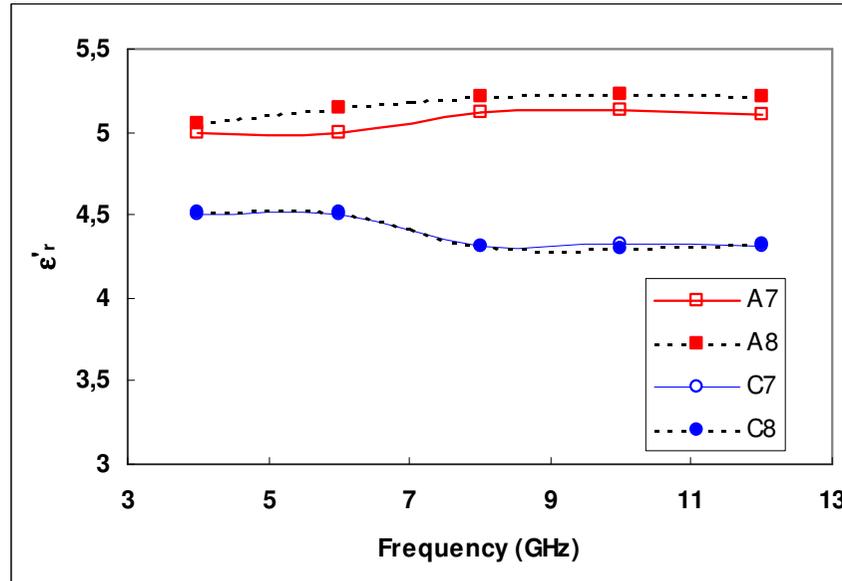


Effet taille des granulats : *Phénomène de diffusion*

Granite : A7 ($\phi=10\text{mm}$), A8 ($\phi=14\text{mm}$)

Échantillons :

Quartzite : C7 ($\phi=10\text{mm}$), et C8 ($\phi=14\text{mm}$)



ϵ'_{moy} : quasi constante

$\Delta\epsilon'_r$: augmente en fonction de la fréquence

$\Delta\epsilon'_r (\phi=10\text{mm}) < \Delta\epsilon'_r (\phi=14\text{mm})$!

Conclusion

- Mise au point de deux techniques de mesures : **Sonde en guide rectangulaire** (4 – ~13 GHz), **ligne/guide cylindrique** (50 MHz – ~ 1,2 GHz)
- $VER = 3 \times$ taille maximale des hétérogénéités
- Théorie du champ moyen valable jusqu'à 3 GHz. Phénomène de diffusion au delà
- Protocole de mesures HF
- Mesures sur échantillons de bétons bitumineux :
 - Nature des granulats
 - Compacité
 - Taille maximale des granulats

Perspectives

Amélioration des techniques de mesures

- Protocole de mesures HF à valider rigoureusement
- Calcul du VER d'un point de vue expérimental
- Domaine de validité
- Effet de lame d'air
- Mesures in situ ?

Recouvrement de la bande de fréquences [1,5 GHz – 4 GHz]

- Sonde rectangulaire remplie d'un diélectrique
- Sonde rectangulaire à nervure
- ...

Poursuite de la caractérisation EM des bétons

- Étude paramétrique sur bétons hydrauliques
- Prise en compte des phénomènes de diffusion dans modèles de ϵ

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet «**Epsilon**», financé par **EDF** et le **LCPC**, et auquel collaborent les laboratoires **LEST** (Brest), **AD2M** (Toulouse), l'**IETR** (Rennes), les laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées de Lille et d'Angers et le **LMSGC** (Marne-la-Vallée).

Nous remercions la région **Pays-de-la-Loire** pour le cofinancement de cette thèse

Nous remercions MM. :

- | | |
|-----------------|---|
| - J-L. Chazelas | Ingénieur TPE – LCPC de Nantes |
| - J-L. Mattei | HDR – Maître de conférences – LEST de Brest |
| - D. Rozuel | Techniciens – LEST de Brest |
| - R. Linder | Ingénieur – LCPC de Paris |
| - Ph. Tijou | Ingénieur – LRPC d'Angers |
| - G. Kittel | Ingénieur – LRPC de Lille |