



IFSTTAR



# Inversion conjointe de mesures non destructives dans des structures en béton

Journée scientifique de l'ECND – PdL  
29 mars 2019 ESTACA – Laval

Séminaire Deuxième Année ED – SPI

**Marie Antoinette ALHAJJ**

Encadrement :

Géraldine VILLAIN (Directrice – IFSTTAR – MAST – LAMES)

Sébastien BOURGUIGNON (Co-encadrant – ECN– LS2N)

Sergio PALMA-LOPES (Co-encadrant – IFSTTAR – GERS – GeoEND)



# Plan de la présentation

1. Contexte Général
2. Problématique : Évaluation de la Durabilité du Béton
3. Etude Bibliographique : Inversion des observables
4. Méthode d'Inversion
5. Validation des modèles couplés
6. Bilan Actuel et Perspectives
7. Production Scientifique



# 1. Contexte Général

- Titre de la these :

Inversion conjointe de mesures non destructives pour découpler des gradients multiples dans le béton d'enrobage de structures en béton armé

- Laboratoire d'accueil :

IFSTTAR Nantes – Département MAST – Laboratoire LAMES

- Financement :

50 % IFSTTAR + 50 % Région Pays de La Loire



# 1. Contexte

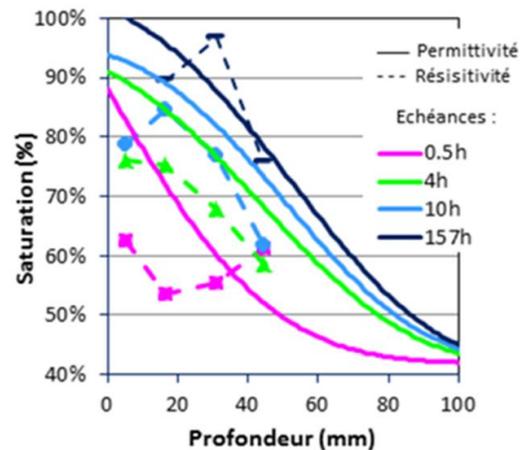
Carbonatation  
Attaque par les Ions  
Chlorure  
Gel/dégel  
Alcali-Réaction

Agents  
Agressifs /  
Pathologies



Béton:  
Matériau de  
Construction  
Durable

Choix des  
Indicateurs



Résultats Attendus:  
Paramètres de Suivi  
des Dégradations

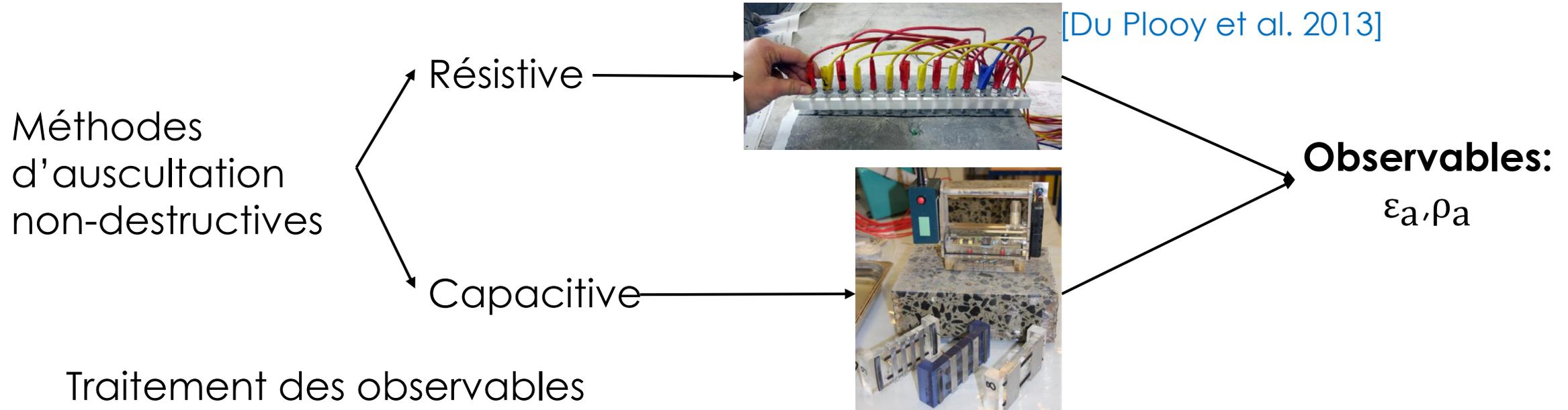
Réalisation des  
Mesures

Traitement des  
Mesures

Méthodes ND et  
observables



# 2. Problématique : Évaluation de la Durabilité du Béton



$$\rho_a \xrightarrow{\text{Inversion}} \rho(z) \xrightarrow{\text{Calibration}} S(z)$$

$$\epsilon_a \xrightarrow{\text{Inversion}} \epsilon(z) \xrightarrow{\text{Calibration}} S(z)$$



## 2. Problématique : Couplage des Phénomènes



Pénétration de l'eau :  
Profil du degré de saturation

Pénétration des ions chlorure :  
Profil de la concentration en  
ions chlorure

- Couplage des Phénomènes → Insuffisance d'une seule méthode ND
- Couplage des méthodes ND → Enrichir l'information
- Découpler les gradients multiples dans le béton

# 3. Etude Bibliographique

## Inversion des observables

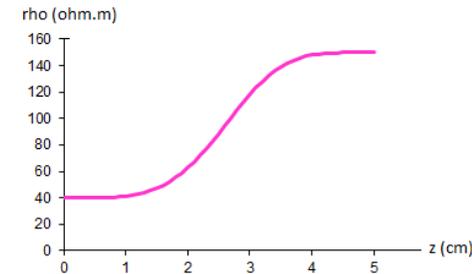


1- Inversion des Résistivités Apparentes :

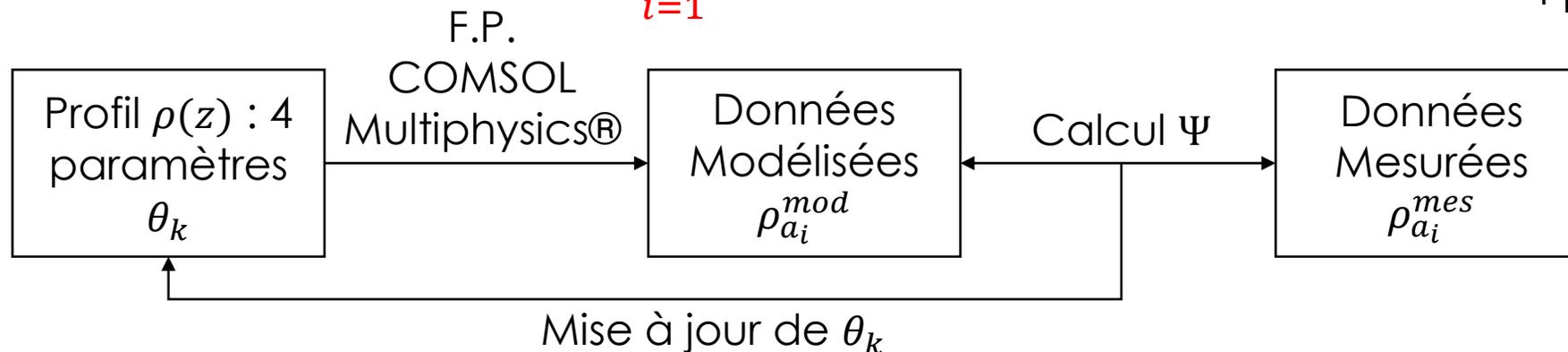
- en Géophysique avec paramétrisation discrète [Loke 1996, Fargier 2011]
- puis sur le béton avec paramétrisation continue [Fargier 2018]

→ Minimisation du critère des moindres carrés :

$$\Psi = \sum_{i=1}^N (\rho_{a_i}^{mes} - \rho_{a_i}^{mod})^2$$



Courbe Weibull à 4 paramètres  $\theta_k$





# 3. Etude Bibliographique

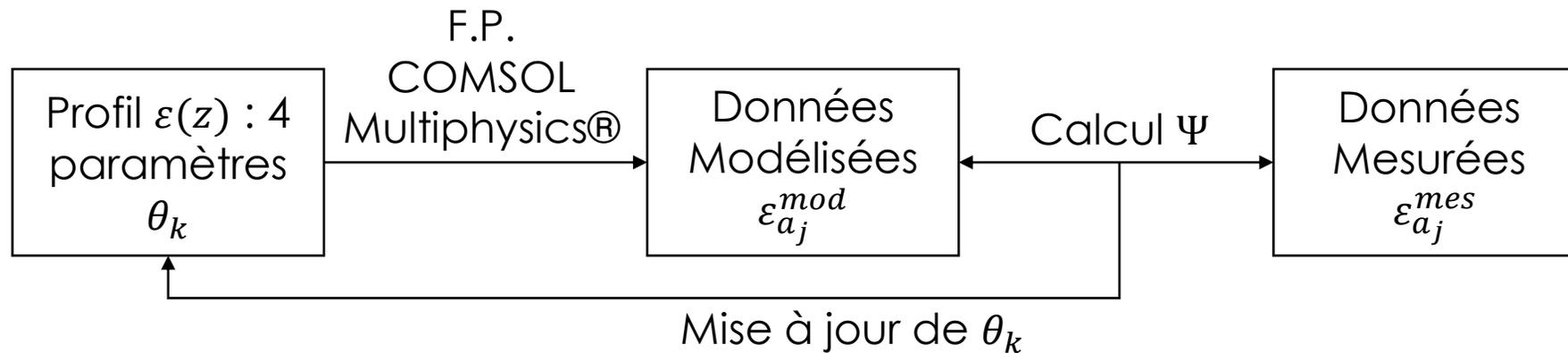
## Inversion des observables

2- Inversion des Permittivités Apparentes : [Fares 2015]

→ Minimisation du critère des moindres carrés :

$$\Psi = \sum_{j=1}^M (\epsilon_{a_j}^{mes} - \epsilon_{a_j}^{mod})^2$$

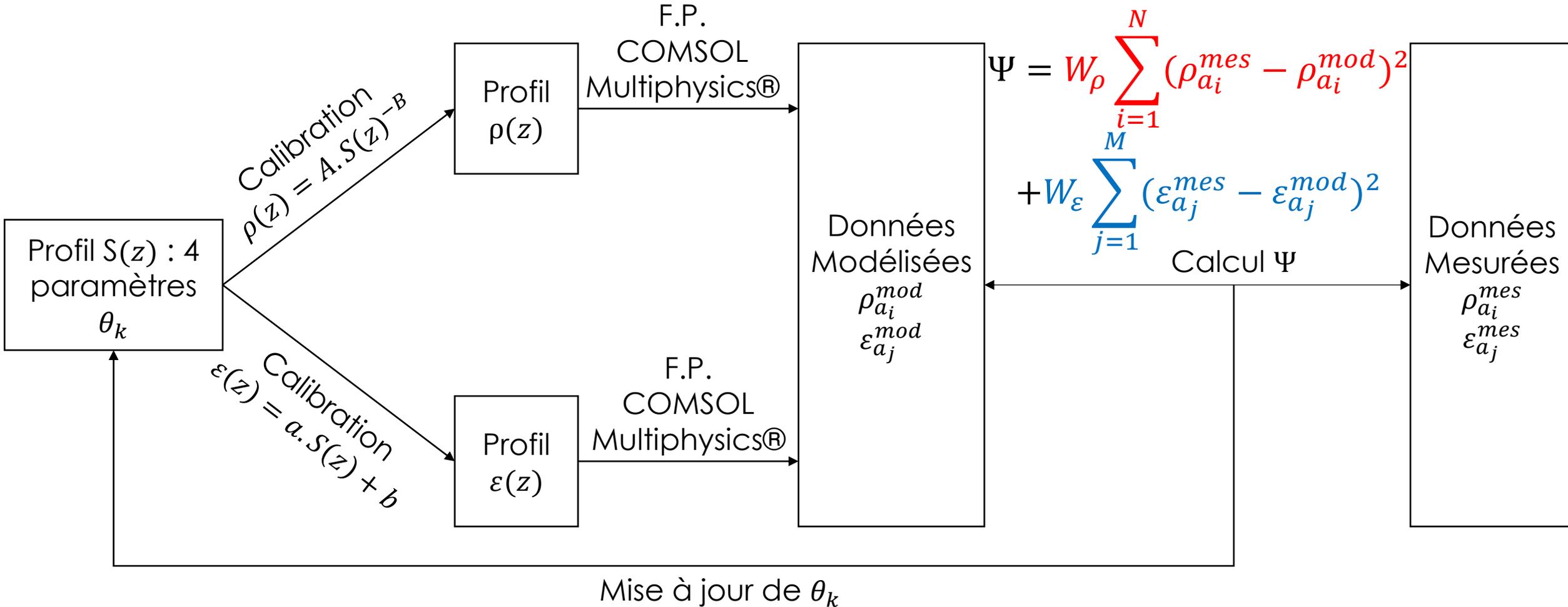
Courbe Weibull à 4 paramètres  $\theta_k$



Algorithme de Levenberg-Marquardt pour la minimisation du critère



# 4. Méthode d'Inversion





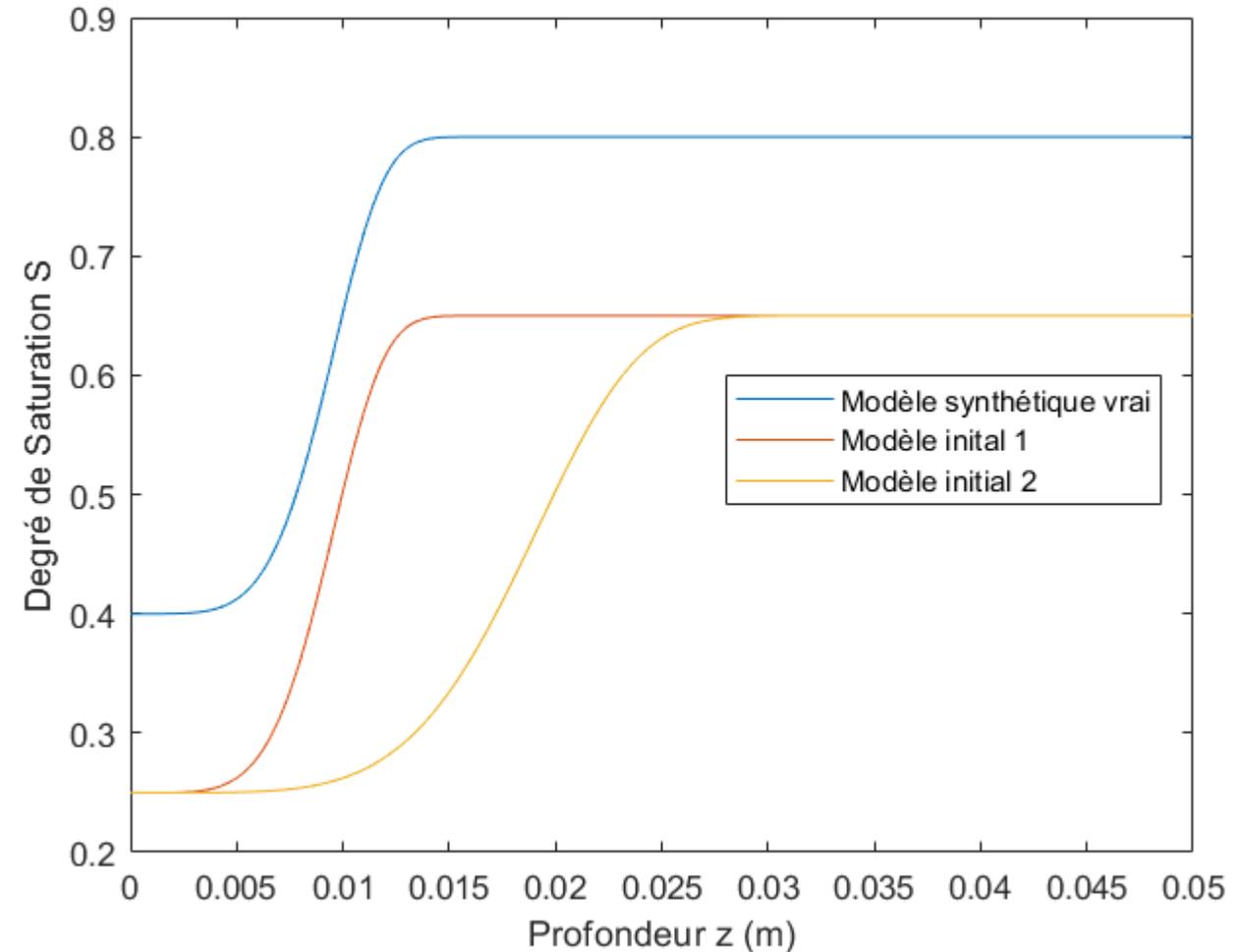
# 5. Validation des modèles couplés

## Etude Paramétrique

Modèle Synthétique Vrai :  $\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.8 \\ 0.01 \\ 5 \end{bmatrix}$

Modèle Initial 1 :  $\begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.65 \\ 0.01 \\ 5 \end{bmatrix}$

Modèle Initial 2 :  $\begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.65 \\ 0.02 \\ 5 \end{bmatrix}$



# 5. Validation des modèles couplés

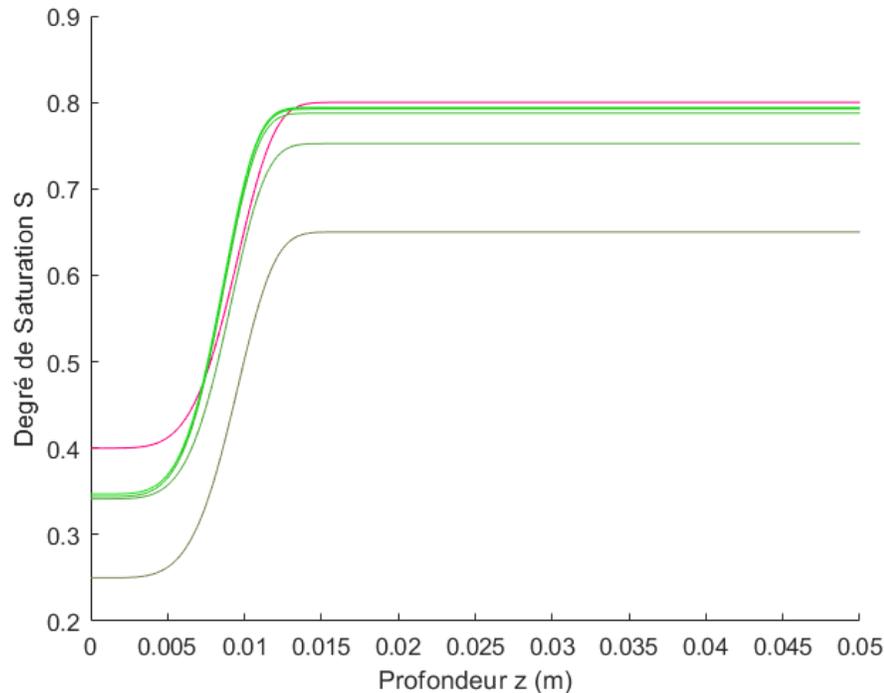


IFSTAR



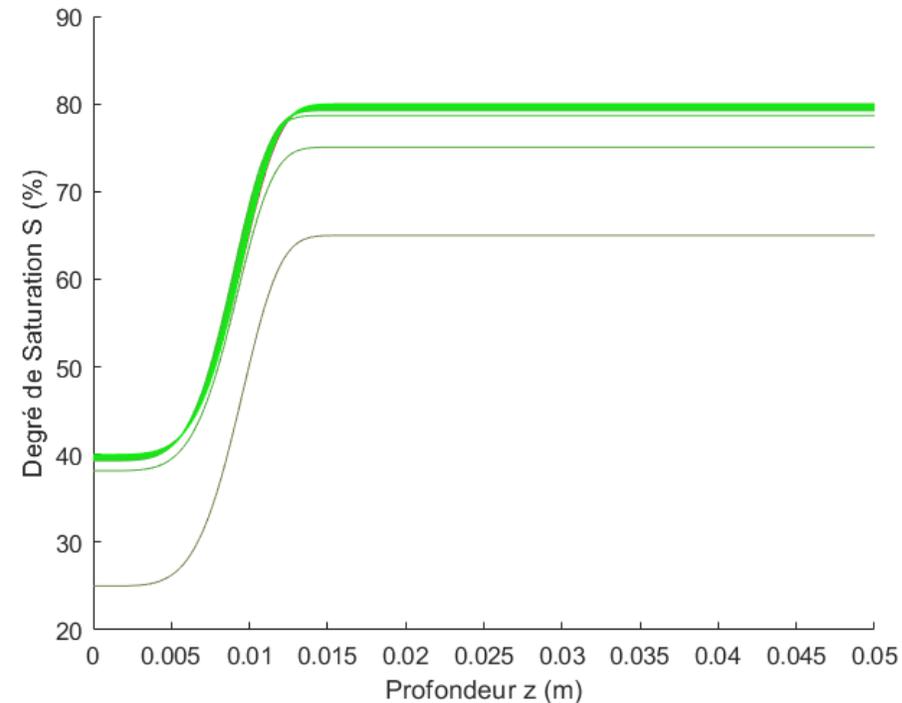
## Modèle Initial 1

Inversion Séparée en Utilisant les Données de Résistivité Apparente Uniquement



RMSE =  $8.96 \times 10^{-3}$   
Nombre d'itérations = 8

Inversion Conjointe en Utilisant les Données de Résistivité Apparente et de Permittivité Apparente



RMSE =  $7.80 \times 10^{-5}$   
Nombre d'itérations = 19

# 5. Validation des modèles couplés

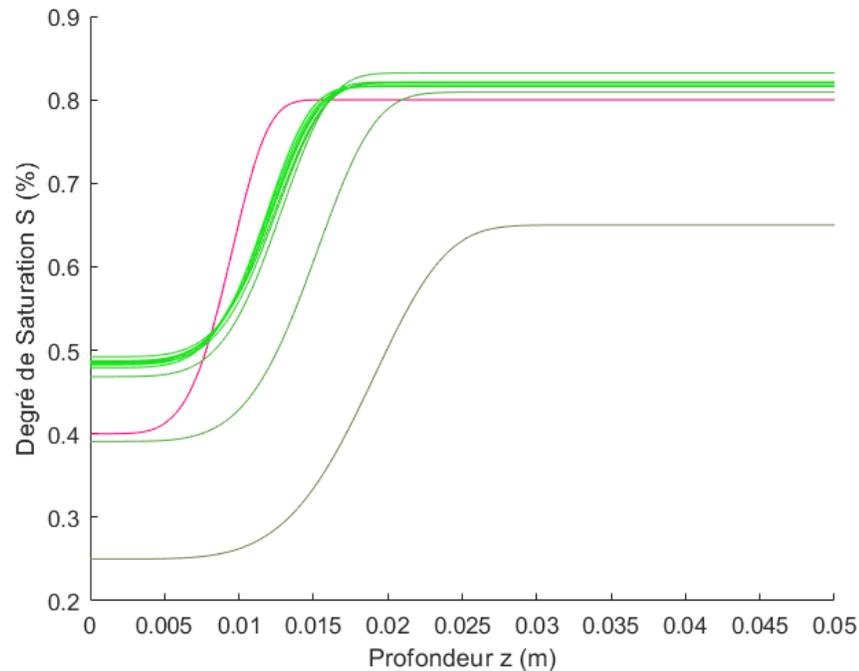


IFSTAR



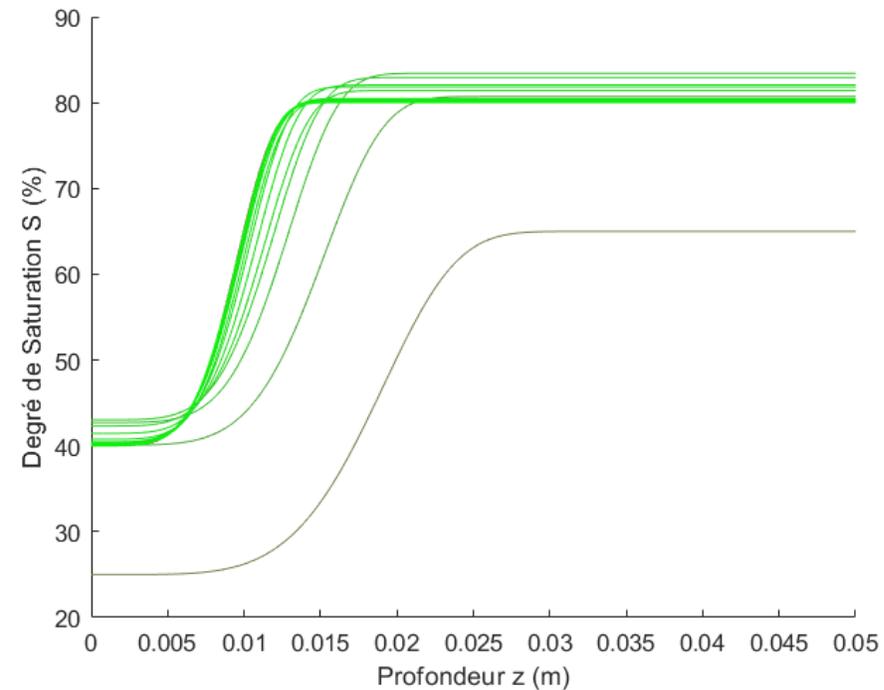
## Modèle Initial 2

Inversion Séparée en Utilisant les Données de Résistivité Apparente Uniquement



RMSE =  $2.29 \times 10^{-2}$   
Nombre d'itérations = 13

Inversion Conjointe en Utilisant les Données de Résistivité Apparente et de Permittivité Apparente



RMSE =  $9.63 \times 10^{-5}$   
Nombre d'itérations = 24



# 6. Bilan et Perspectives

## Etude Paramétrique de la Qualité de la Solution :

- Etude de Convergence en Fonction de **Différents Modèles Initiaux**

(ex : écart de 0 à 10% du modèle vrai)

- Etude de **Sensibilité des Paramètres** à Optimiser  
(ex : allure du critère en fonction de chacun des paramètres)

- Etude de la Version **Levenberg/Marquardt** de l'Algorithme d'Inversion

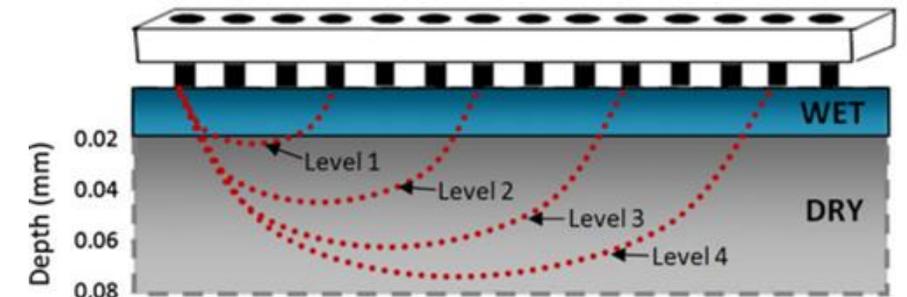
- Etude du **Bruit** sur les Données



# 6. Bilan et Perspectives

## Campagne Expérimentale

- Mesures pour différentes échéances temporelles
- Validation du code couplé d'inversion sur des données expérimentales
- Nouveau protocole d'interrogation des sondes (Wenner-Schlumberger)
- Nouvelle campagne : séchage petite dalle et imbibition grande dalle



Ancien protocole :  
Mesure Wenner

[Du Plooy et al. 2013]



# 7. Production Scientifique

- Article soumis à la revue Construction and Building Materials

Titre: **Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey**

Marie-Antoinette Alhadj, Sérgio Palma-Lopes, Géraldine Villain

- 40th IABSE Symposium Nantes 2018 « Tomorrow's Megastructures » 19-21 Septembre 2018

Titre: **Effect of steel reinforcement on electrical measurements on concrete**

Marie Antoinette Alhadj, Géraldine Villain, Sérgio Palma-Lopes

- Article de revue sur l'inversion – Alhadj, Ma. Bourguignon, S. Palma Lopes, S. Villain, G. (automne 2019)
- Congrès International



IFSTTAR



# Merci Pour Votre Attention