

# Un benchmark expérimental pour évaluer les performances des algorithmes d'inversion des données de tomographie de résistivité électrique dans le domaine des Essais Non Destructifs (END)

Wael Karam

Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

**RESUME** La Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) est une méthode non-destructive utilisée en génie civil pour caractériser les matériaux et évaluer l'état de santé des structures. Au cours des dernières décennies, de multiples stratégies de paramétrage et d'inversion ont été développées, permettant d'obtenir la distribution spatiale de la résistivité dans le milieu sondé. Ces algorithmes sont souvent validés sur des cas tests numériques, car il n'existe pas d'expérience de référence permettant d'évaluer leurs performances sur des données réelles. Cette étude vise à fournir un protocole expérimental de création de modèles physiques composés de blocs de gélatine et d'eau, où leur géométrie, ainsi que les conditions aux limites et les résistivités de référence, sont parfaitement maîtrisées. Ce protocole, démontré comme reproductible, de coût minimal et d'impact environnemental faible, permet une évaluation objective, sur des données expérimentales, des méthodes et des dispositifs de mesure de TRE. De plus, il permet de préserver les capteurs, qui peuvent être réutilisés une fois l'étape de qualification effectuée. Un algorithme d'inversion existant a été appliqué aux données obtenues pour illustrer la pertinence des données générées.

**Mots-clés** Benchmark expérimental, résistivité électrique, tomographie 2D, END

## I. INTRODUCTION

La Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) est une méthode d'investigation non destructive utilisée depuis plusieurs décennies dans le domaine du génie civil [Jeon et al.,2024]. Elle est principalement appliquée à des éléments en béton ou en béton armé de dimensions finies, afin d'analyser la distribution spatiale de la résistivité et d'évaluer leur état physique. La résistivité constitue un indicateur pertinent des propriétés de durabilité du béton [Smyl, D.,2020], telles que sa teneur en eau [Lopez et al.,1993] sa porosité, sa perméabilité [Eid et al.,2025], sa résistance à la compression [Piro et al.,2023] et la présence de fissures [Lataste et al.,2003]. En outre, il est possible, en calibrant la mesure de résistivité, d'évaluer la concentration des chlorures dans un béton donné [El Achrafi et al.,2024]. Ce résultat a une importance particulière dans le cadre du suivi de l'état de santé des structures en milieu maritime, où la corrosion des armatures en acier constitue la principale cause de détérioration du béton armé. De nombreuses études ont été réalisées sur le béton à l'aide de dispositifs multi-électrodes, intégrés [Lecieux et al., 2015] ou placés en surface [Du Plooy et al.,2013, Fares et al.,2018]. Ces recherches se sont concentrées soit sur la résistivité apparente [Sabbağ et al.,2018], soit sur la résistivité réelle obtenue après inversion des données

[Achrafi et al.,2023]. Pour assurer la fiabilité des résultats d'inversion, plusieurs étapes de validation sont nécessaires :

**1) Validation de l'algorithme sur des données synthétiques :**

Dans cette phase, les contacts des électrodes, le capteur et les conditions aux limites sont supposés parfaits. Cependant, même avec du bruit ajouté, les données synthétiques ne peuvent pas reproduire entièrement la variabilité, les imperfections et le bruit réels présents dans les données expérimentales.

**2) Tests dans le cadre d'expérience contrôlée avec des matériaux peu aléatoires:**

Cette étape consiste à créer des milieux modèles composés de blocs de résistivité différents, où la géométrie, les valeurs de résistivité et les conditions aux limites sont parfaitement connues. Elle est essentielle pour évaluer les performances du capteur, du système d'acquisition de données et de l'algorithme dans des conditions physiques idéalisées, garantissant ainsi la fiabilité des résultats.

**3) Application au milieu cible (ex.: béton):**

La dernière étape consiste à tester l'algorithme sur des matériaux, tels que le béton, dans des conditions réalistes. Cela permet d'identifier les propriétés spécifiques du matériau, la variabilité spatiale et la corrélation des résultats avec les phénomènes physiques. Cette étape n'est réalisée qu'après validation des deux premières phases.

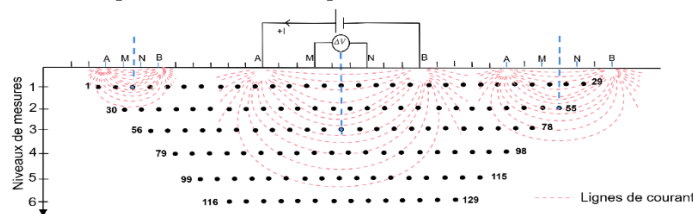
Cette étude se concentre sur la deuxième étape du processus de validation. Malgré les nombreuses applications de la tomographie de résistivité électrique, il existe un manque de données expérimentales en libre accès permettant d'évaluer les performances des algorithmes d'inversion, sur la base d'une expérience entièrement contrôlée. Afin de remédier à ce manque de données, cette étude présente un protocole expérimental pour la création de milieux modèles de test, utilisant un matériau gélatineux plus homogène et plus facile à reproduire que le béton, tout en maintenant les valeurs de résistivité dans une gamme similaire. Un capteur multi-électrodes est utilisé dans un milieu de dimensions comparables à celles du béton d'enrobage des structures marines [Priou et al.,2019]. De plus, le protocole expérimental proposé sert d'expérience préliminaire, permettant aux chercheurs de vérifier tous les composants de leur système d'acquisition et d'assurer la fiabilité des données avant de réaliser des expériences plus complexes et nécessitant davantage de ressources. Cela est particulièrement utile dans les études portant sur des matériaux tels que le béton, où les capteurs peuvent être perdus au cours du processus. En suivant ce protocole, les chercheurs peuvent tester et affiner leurs installations, garantissant ainsi des résultats précis et fiables avant de procéder à leurs expériences finales.

Avant de présenter en détail le dispositif expérimental, la section II résume brièvement les principes fondamentaux de mesure de la résistivité électrique, ainsi que l'algorithme d'inversion dit « smooth », appliqué aux données générées, afin d'illustrer la pertinence des données et du protocole. La section III constitue le cœur de l'étude: elle présente les différents cas tests créés et détaille les étapes nécessaires à leur conception. Une explication détaillée de la manière de déterminer expérimentalement les valeurs de résistivité de référence des différents cas tests créés est également fournie. Enfin, dans la section des résultats, une démonstration de la reproductibilité des résultats et les résultats d'inversion sont présentés.

## II. PRINCIPE DE LA TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

### A. Tomographie électrique, capteur et séquence de mesure

La mesure de résistivité électrique ( $\rho$ ) ( $\Omega.m$ ) consiste à faire circuler un courant électrique dans le milieu sondé à l'aide de deux électrodes d'injection, notées A et B, et à mesurer une différence de potentiel ( $\Delta V$ ) (Volts) entre deux autres électrodes, notées M et N. En connaissant l'intensité du courant électrique injecté  $I$  (A) et la différence de potentiel mesurée ( $\Delta V$ ) (Volts), la résistivité apparente du milieu sondé peut être déterminée ( $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$  où  $K$  est le facteur géométrique [Marescot et al.,2006]). Les dispositifs multi-électrodes, couramment utilisés dans le domaine de l'inspection des matériaux [Lecieux et al., 2015], permettent d'explorer le milieu sondé selon une séquence donnée en utilisant des quadripôles de longueurs croissantes et de positions variées. Cela permet de cartographier la distribution de résistivité dans le volume sondé (Fig.1). Ce principe constitue la base de la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE). Dans cette étude, la configuration Wenner est utilisée ( $AM = MN = NB$ ) (Voir Fig.1) [Loke et al.,2013]. Cette configuration a été choisie pour son rapport signal/bruit élevé et sa forte sensibilité aux variations de résistivité en profondeur [Dahlin et al.,2004].



**FIGURE 1.** Illustration de la tomographie de résistivité électrique et de la séquence de mesures en utilisant le capteur multi-électrodes et la configuration Wenner

La diffusion d'un champ électrique dans un milieu fini est régie par l'équation de Poisson [Priou et al.,2019], donnée par l'équation (1) :

$$\vec{\nabla} \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} V \right) + \delta_A I - \delta_B I = 0 \quad (1)$$

où  $\delta_A I$  et  $\delta_B I$  sont des sources de courant ponctuelles d'intensité  $I$  imposées avec des électrodes placées respectivement aux points A et B. La solution de cette équation prend en compte une condition limite qui impose que le courant électrique ne traverse pas les surfaces extérieures. Par conséquent, ces surfaces peuvent être considérées comme des parois isolantes. Pour garantir l'unicité de la solution, une condition supplémentaire fixe le potentiel électrique  $V$  à zéro en un point spécifique du système. Le problème direct consiste à résoudre ce système d'équations en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) afin de calculer la résistivité apparente du milieu. Dans cette étude le problème direct est résolu dans Matlab.

### B. Problème inverse et cartographie de résistivité vraie

Cartographier la résistivité « vraie » d'un milieu revient à établir une relation entre les données mesurées, représentées par la résistivité apparente, et une distribution spatiale de la résistivité. L'obtention de cette distribution spatiale, constituant un modèle paramétré du milieu sondé, nécessite un ajustement itératif des paramètres de résistivité. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la résistivité apparente calculée (par résolution du problème direct) corresponde à la résistivité

apparente mesurée ou de référence. Ce problème peut être formulé comme une minimisation de l'écart entre les données calculées et mesurées, avec l'ajout d'un terme de régularisation pour stabiliser les résultats. Plusieurs algorithmes d'inversion existent dans la littérature pour traiter ce type de problème [Smyl, D., 2020, Alhajj et al.,2021]. Parmi eux, l'algorithme « smooth » est utilisé dans cet étude [Loke et al.,2003]. Cet algorithme vise à minimiser les variations spatiales locales de la résistivité, en partant de l'hypothèse que les zones voisines dans un environnement sondé présentent des valeurs de résistivité proches. La solution itérative de ce problème est donnée par l'équation (2):

$$\delta P = (J^T J + \lambda W^T W)^{-1} (J^T r^k - \lambda W^T W P^k) \tag{2}$$

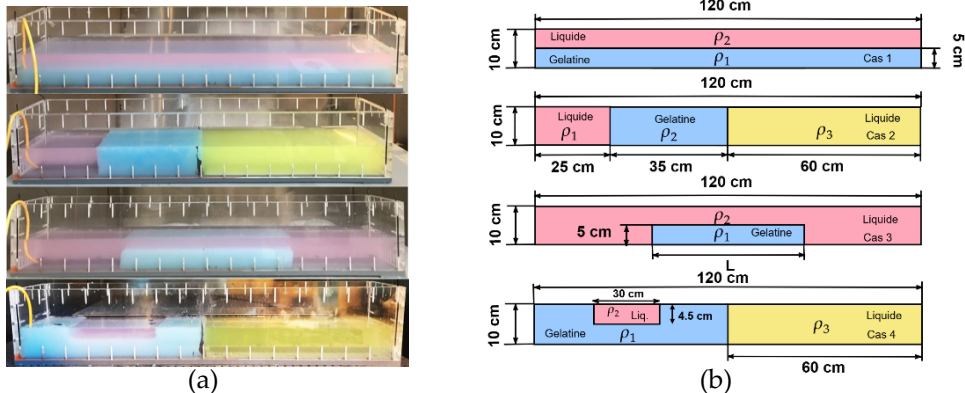
avec  $\delta P = P^{k+1} - P^k$  est le changement des paramètres de résistivité entre l'itération  $k$  et  $k + 1$ ,  $r^k = \tilde{\rho}_a - \rho_a^k$  est le vecteur résidu l'itération  $k$  qui est la différence entre la résistivité apparente de référence  $\tilde{\rho}_a$  et la résistivité apparente calculée par le problème direct  $\rho_a$ .  $\lambda$  est un paramètre de régularisation qui change à chaque itération ( $\lambda$  est divisé par 10 si  $r^{k+1} < r^k$  et multiplié par 10 sinon).  $W$  est la matrice de lissage et  $J = \frac{\partial \rho_a^k}{\partial P^k}$  est la matrice jacobienne .

### III. MATERIEL ET METHODES

#### A. Cas expérimentaux testés

Dans le but de la création d'un benchmark expérimental destiné à évaluer les performances des algorithmes d'inversion et des systèmes d'acquisition, quatre cas tests de complexité croissante ont été développés (Fig. 2), centrés sur la détection des chlorures dans les structures marines :

- **Cas 1:** deux couches superposées de résistivités différentes, simulant une zone contaminée par les chlorures et une zone saine (par exemple, un pont ou un quai s'étendant au-dessus de la mer où la diffusion des chlorures s'effectue dans la direction verticale de la Fig.2).
- **Cas 2:** trois zones adjacentes de résistivités différentes, représentant une contamination latérale (par exemple, dans des structures partiellement immergées où la contamination se produit dans la direction horizontale de la Fig. 2).
- **Cas 3:** inclusion de taille variable dans un milieu de résistivité différente, illustrant une zone de béton mal vibrée sensible à la contamination par les chlorures.
- **Cas 4:** scénario général combinant deux zones adjacentes de résistivités différentes, une des deux contenant une inclusion.



**FIGURE 2.** a) Photo montrant les quatre cas test préparés b) Représentation schématique des quatre cas test préparés, détaillant leurs dimensions correspondantes et les distributions de résistivité.

Ces cas tests permettent d'évaluer des aspects spécifiques des algorithmes: les discontinuités verticales (Cas 1), les discontinuités latérales (Cas 2), l'effet des inclusions (Cas 3), et les combinaisons complexes de plusieurs cas simples (Cas 4). Le Tableau 1 présente un résumé de tous les scénarios testés ainsi que les valeurs de résistivité de référence correspondantes, avec les erreurs de mesures associées. Des explications détaillées sur leur évaluation sont fournies à l'étape 4 de la section III.C. Les expériences ont été réalisées en utilisant deux matériaux. Le premier matériau est un liquide composé d'un mélange d'eau de résistivité variable (eau du robinet et eau déminéralisée) et d'un colorant. L'utilisation combinée de l'eau du robinet et de l'eau déminéralisée permet d'ajuster facilement la résistivité du mélange, offrant ainsi les valeurs et les contrastes de résistivité souhaités. Le second matériau est un solide obtenu à partir d'un mélange d'eau déminéralisée, de colorant et d'une substance gélatineuse: l'agar-agar. Cette substance trouve des applications dans divers domaines, notamment dans la préparation des aliments, les produits pharmaceutiques, ainsi que les domaines biotechnologiques et bactériologiques [Pandya et al.,2022]. Dans nos expériences, l'objectif de l'utilisation de cette substance gélatineuse est de créer des milieux adjacents non miscibles tout en garantissant un bon contact électrique entre eux. Le protocole expérimental et le matériel nécessaire sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

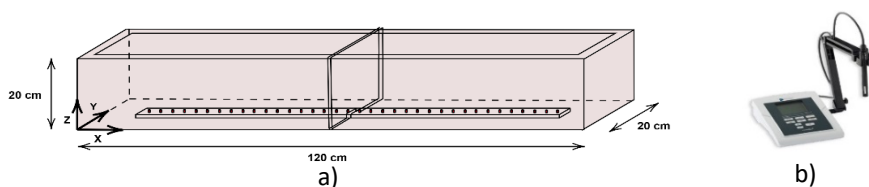
**TABLEAU 1.** Résumé des cas test et des valeurs de résistivités de références

Cas	$\rho_1$		$\rho_2$		$\rho_3$		L (m)
	Moyenne ( $\Omega \cdot m$ )	Erreur de mesure (%)	Moyenne ( $\Omega \cdot m$ )	Erreur de mesure (%)	Moyenne ( $\Omega \cdot m$ )	Erreur de mesure (%)	
1	44.8	$\pm 4.24\%$	80	$\pm 0.5\%^*$	-	-	-
2	21.6	$\pm 0.5\%^*$	43.5	$\pm 5.5\%$	80	$\pm 0.5\%^*$	-
3A	48	$\pm 3.74\%$	119	$\pm 0.5\%^*$	-	-	0.7
3B	48	$\pm 3.74\%$	119	$\pm 0.5\%^*$	-	-	0.56
3C	48	$\pm 3.74\%$	119	$\pm 0.5\%^*$	-	-	0.42
3D	48	$\pm 3.74\%$	119	$\pm 0.5\%^*$	-	-	0.28
3E	48	$\pm 3.74\%$	119	$\pm 0.5\%^*$	-	-	0.14
4	47.4	$\pm 4.86\%$	121	$\pm 0.5\%^*$	84	$\pm 0.5\%^*$	-

\* Précisions fournies par le fabricant de la sonde de résistivité utilisée pour mesurer les solutions liquides

### B. Matériel et équipement

**1- Moule en plexiglass:** un moule en plexiglas, de dimensions 1200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  200 mm (longueur sur l'axe x, largeur sur l'axe y, hauteur sur l'axe z), est utilisé. De plus, une pièce rectangulaire en plexiglas, comportant une rainure, a été conçue pour diviser le moule en deux zones distinctes. Par ailleurs, le fond du coffrage a été percé et taraudé afin de permettre la fixation du capteur de résistivité à la base, comme illustré dans la Fig. 3.a.



**FIGURE 3.** a) Moule en plexiglass contenant le capteur et b) la sonde Phenomenal CO 3000 L

**2- Capteur de résistivité multiélectrodes et résistivimètre:** le capteur multi-électrodes utilisé dans cette étude comprend plusieurs électrodes en acier inoxydable (32 comme illustré dans la Fig. 3.a), chacune mesurant 5 mm de longueur et espacées à des intervalles de 35 mm. Ces électrodes sont fixées sur une barre en PVC mesurant 1,135 m de longueur, 34 mm de largeur et 15 mm de hauteur [Lecieux et al., 2015]. Ce capteur de résistivité est associé à un résistivimètre (résistivimètre ABEM LS-2), qui gère l'injection du courant électrique et la mesure des différences de potentiel selon une séquence de mesure préprogrammée.

**3- Sonde de conductivité:** pour évaluer la résistivité électrique des solutions liquides, une sonde de conductivité du type "Phenomenal CO 3000 L" est utilisée (Fig. 3.b). Cette sonde permet également de mesurer la température de la solution.

**4- Outils de laboratoire:** pour préparer une solution de gélatine, une spatule, des béchers et une balance de précision sont utilisés pour mesurer, mélanger et peser l'agar-agar avec précision. Une marmite en acier inoxydable et une plaque chauffante ont également été utilisées pour préparer les solutions.

**5- Ingrédients des solutions préparées:**

- eau déminéralisée de conductivité  $2,2 \mu S/cm$
- eau du robinet de conductivité  $321 \mu S/cm$
- poudre d'agar-agar
- colorant gouache, utilisé pour différencier les blocs adjacents.

*C. Protocole expérimental*

**Etape 1: Préparation des solutions gélatineuses**

Pour assurer la reproductibilité du processus expérimental, notamment la résistivité du bloc de gélatine, les solutions ont été préparées avec de l'eau déminéralisée ayant une conductivité fixe de  $2,2 \mu S/cm$ . De plus, l'expérience a été menée dans une chambre climatisée à une température de  $15 \pm 1$  °C. Dans la marmite, la quantité souhaitée d'eau déminéralisée est remplie après vérification de sa résistivité. À l'aide d'une balance de précision, une quantité de poudre d'agar-agar est pesée de manière à obtenir une solution avec une concentration de 10 g/L. Cette concentration garantit un bloc de gélatine suffisamment rigide qui tient lors du retrait de la plaque séparatrice. Pour distinguer les différentes zones créées, quelques gouttes de colorant sont ajoutées à la solution, qui est ensuite chauffée jusqu'à atteindre son point d'ébullition.

**Etape 2: Préparations de deux solutions de différentes valeurs de résistivités**

Comme présenté dans la section III.A, l'un des blocs est formé de la gélatine, et les autres zones sont remplies par un mélange d'eau déminéralisée, d'eau du robinet et d'un colorant. Ce mélange permet de préparer une solution de n'importe quelle résistivité souhaitée pour assurer le contraste de résistivité désiré. Dans cette étude, deux solutions différentes ont été préparées, avec une résistivité contrastée deux et trois fois par rapport à la gélatine. La préparation est simple: elle consiste à ajouter à l'eau déminéralisée le colorant, puis à incorporer l'eau du robinet goutte à goutte, en malaxant et en mesurant la résistivité avec la sonde jusqu'à atteindre la résistivité électrique souhaitée. Les solutions préparées sont stockées dans la chambre climatisée à 15 °C.

### Etape 3: Coulage des solutions

Une fois que la solution gélatineuse atteint son point d'ébullition, elle est coulée de manière différente selon les cas:

- **Cas 1 - Deux couches superposées:** la solution bouillante de gélatine est coulée directement dans le moule, de façon à obtenir une couche d'une épaisseur de 5 cm. Cette couche est laissée à refroidir pendant 24 heures à 15 °C pour assurer la solidification. Une fois refroidie, la solution d'eau préparée (Étape 2) est coulée au-dessus de la couche gélatineuse pour former deux couches superposées d'une épaisseur totale de 10 cm.
- **Cas 2 - Trois couches adjacentes:** la première étape consiste à fixer une plaque séparatrice dans le moule, à la position souhaitée (par exemple, au milieu). Ensuite, une solution d'une épaisseur de 10 cm est coulée. Une fois cette solution refroidie pendant 24 heures à 15 °C, la plaque séparatrice est retirée, puis une partie du bloc de gélatine est découpée (zone de gauche) et retirée afin d'obtenir un bloc aux dimensions souhaitées. Ce bloc est ensuite entouré de part et d'autre par des solutions de résistivités différentes.
- **Cas 3 - Inclusion:** la même procédure que pour le Cas 1 est utilisée pour couler la gélatine. Une fois la gélatine solidifiée, les parties non désirées sont découpées et retirées afin d'obtenir un bloc de gélatine aux dimensions souhaitées. Ce bloc est ensuite entouré par une solution de résistivité différente.
- **Cas 4 - Milieu à trois zones de résistivités différentes:** la procédure de préparation est identique à celle du Cas 2 dans un premier temps. Ensuite, une fois la gélatine solidifiée, une partie du bloc est découpée pour créer une inclusion. Des solutions de résistivités différentes sont ensuite coulées dans l'inclusion et à côté du bloc de gélatine, obtenant ainsi un milieu comportant trois zones de résistivités différentes.

### Etape 4: Détermination des valeurs des résistivités de référence

Comme présenté précédemment, les milieux sont principalement constitués de deux types de zones: des zones liquides et des zones de gélatine. Pour chaque matériau, la valeur de résistivité de référence est déterminée d'une manière différente: pour les solutions liquides, la détermination de la valeur de résistivité de référence se fait directement en immergeant la sonde de résistivité dans la solution. L'erreur de mesure correspondante, indiquée dans le Tableau (1), est la précision de l'appareil fournie par le fabricant du conductimètre. Pour les blocs de gélatine, comme la résistivité apparente est une bonne approximation de la résistivité vraie dans des milieux homogènes, la détermination de la résistivité de référence consiste à effectuer des mesures de résistivité à l'aide du capteur multi-électrodes, après la solidification de la gélatine et avant la mise en place des autres solutions. Par exemple, pour le Cas 1, la résistivité de référence est obtenue en réalisant des mesures selon la même séquence présentée dans la section II.A (Fig.1), sur un bloc de gélatine d'épaisseur 5 cm, avant la mise en place de la deuxième solution. L'erreur de mesure présentée dans le Tableau (1) pour la partie gélatine est une combinaison d'erreurs aléatoires (précision) et systématiques (justesse): L'erreur de précision reflète la dispersion des points de mesure et est calculée comme étant  $\pm 1,96$  fois l'écart type de la distribution des mesures. L'erreur de justesse rend compte de la déviation de la valeur moyenne, causée par les imprécisions dans la modélisation du milieu à l'aide

du modèle d'éléments finis. Cette erreur est quantifiée en considérant l'impact d'une erreur de mesure de  $\pm 1$  mm dans la hauteur du milieu sur le facteur géométrique. Ainsi, l'effet combiné de ces deux types d'erreurs est exprimé en pourcentage de la valeur moyenne et présenté dans le Tableau (1).

#### D. Précautions expérimentales

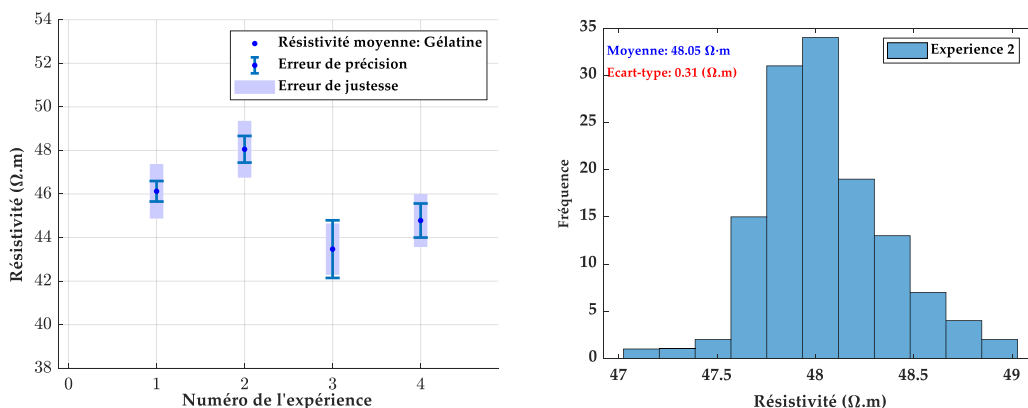
Afin de limiter les effets osmotiques susceptibles d'altérer la résistivité électrique aux interfaces entre le bloc de gélatine et les blocs de liquide adjacents, il est conseillé de réaliser les mesures de résistivité immédiatement après la mise en place des solutions liquides. Dans les expériences présentées, chaque acquisition dure environ 12 minutes, ce qui réduit considérablement le temps d'exposition aux phénomènes de diffusion. Par ailleurs, les liquides ont été colorés afin de détecter d'éventuels transferts entre compartiments ; aucun mélange de couleur n'a été observé durant cette période, ce qui suggère une bonne stabilité des interfaces à court terme.

Une attention particulière doit également être portée à l'utilisation de la gélatine chaude, car le coulage successif de compartiments adjacents peut entraîner la dissolution des interfaces déjà formées. Pour limiter ce risque, il est recommandé de refroidir le premier compartiment, puis d'attendre que la solution suivante atteigne une température légèrement supérieure à celle de gélification (généralement comprise entre 30 °C et 50 °C) avant de remplir le compartiment voisin.

## IV. RESULTATS

### A. Vérification de la reproductibilité de l'expérience et de l'homogénéité des blocs de gélatine

Pour évaluer la reproductibilité des expériences, des mesures de résistivité électrique ont été réalisées lors de quatre acquisitions indépendantes, effectuées dans des conditions de préparation similaires. Fig. 4.a illustre les valeurs de résistivité apparente obtenues conformément à l'étape 4 de la procédure expérimentale, dans un bloc de gélatine pure à une concentration de 10 g/L, au cours de plusieurs expériences indépendantes répétées (chacune impliquant la fabrication d'un nouveau milieu d'essai).



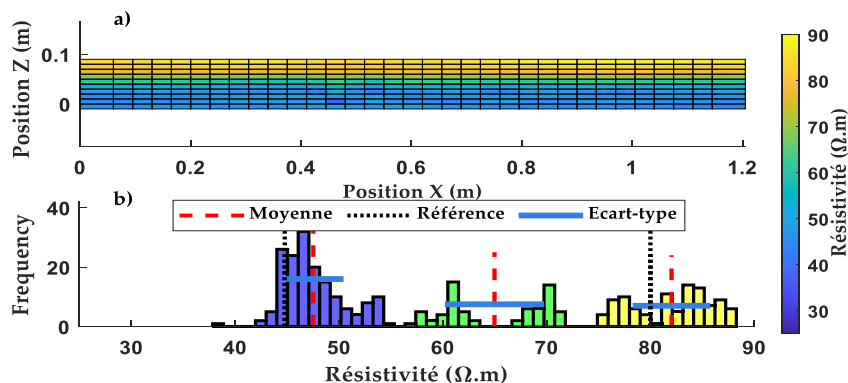
**FIGURE 4.** a) Graphe montrant la résistivité moyenne du milieu gélatineux avec les marges d'erreur pour différentes expériences indépendantes. b) Histogramme montrant la dispersion des valeurs de résistivité pour l'expérience 2

On observe que les valeurs de résistivité pour toutes les expériences se situent dans la même plage, avec une moyenne de  $45,6 \Omega.m$ . Par ailleurs, l'erreur de précision représentée sur la Fig. 4.a reflète la dispersion spatiale de la résistivité dans le moule: pour toutes les expériences, les erreurs de précision sont faibles, ce qui témoigne de l'homogénéité de la couche de gélatine. Enfin, l'histogramme présenté dans la Fig. 4.b, qui illustre les données de résistivité mesurées lors de l'expérience 2, donne un aperçu plus précis de la dispersion. Celle-ci est caractérisée par un écart type de  $0,3 \Omega.m$  et une valeur moyenne de  $48 \Omega.m$ , correspondant à un coefficient de variation de  $0,8 \%$ .

### B. Résultats d'inversion avec l'algorithme « smooth »

#### Cas 1 - Deux couches superposées:

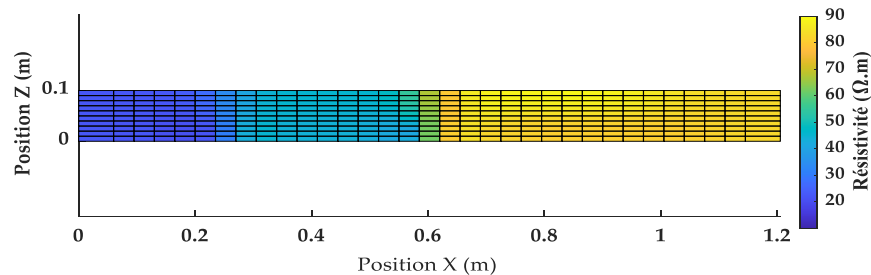
Le premier cas test (Cas 1) représente un milieu bicouche (Fig. 2): une couche inférieure composée de gélatine, avec une concentration de  $10 \text{ g/L}$  d'agar-agar et une épaisseur de  $5 \text{ cm}$ , surmontée d'une couche d'eau colorée d'une épaisseur identique ( $5 \text{ cm}$ ). La résistivité de référence de la couche inférieure est donnée dans le Tableau 1 de la section III.A (résistivité moyenne :  $44,8 \Omega.m$ ). Pour la couche supérieure, de l'eau avec une résistivité de  $80 \Omega.m$  (Cas 1) a été utilisée. Une contrainte de lissage horizontal prédominante a été appliquée, en utilisant un coefficient de pondération de lissage plus élevé dans la direction  $x$  que dans la direction  $z$ . Le paramètre de régularisation  $\lambda$  a été initialement fixé à  $10^{-1}$ . La Fig. 5.a montre clairement que l'algorithme d'inversion « smooth » permet d'identifier efficacement deux zones contrastées correspondant aux deux couches du milieu. Pour une analyse plus quantitative, la distribution des résistivités identifiées est représentée sous forme d'histogramme (Fig. 5.b). Ces histogrammes mettent en évidence trois zones distinctes: deux zones contrastées éloignées de l'interface (histogrammes bleu et jaune) et une zone de transition proche de l'interface (histogramme vert). Cette classification est obtenue par la méthode de clustering k-means, avec le nombre de clusters fixé à trois. Les valeurs initiales des centroïdes sont définies comme suit : le premier centroïde correspond à la résistivité de référence du domaine liquide, le deuxième à celle du bloc de gélatine, et le troisième est calculé comme la moyenne des deux premiers centroïdes. Après analyse, on constate que la résistivité moyenne identifiée pour la couche supérieure (représentée par la ligne pointillée rouge) dépasse la valeur de référence ( $80 \Omega.m \pm 0.5\%$ ) de  $2.5\%$ . Pour la couche inférieure, les résistivités identifiées tendent à surestimer la valeur de référence ( $44,8 \Omega.m \pm 4.24\%$ ) de  $6\%$ .



**FIGURE 5.** a) Cartographie des résistivités vraies obtenue par l'algorithme d'inversion « smooth » pour le cas 1, b) histogrammes montrant la dispersion des résistivités identifiées

### Cas 2 – Trois couches adjacentes :

En utilisant le protocole expérimental décrit dans la section III.C, un cas test a été créé, composés de trois zones adjacentes présentant des résistivités différentes (voir cas 2 dans la Fig. 2). Les valeurs de référence des résistivités sont indiquées dans le Tableau 1. La Fig. 6 présente le résultat d'inversion pour le cas 2, obtenu à l'aide de l'algorithme "smooth".

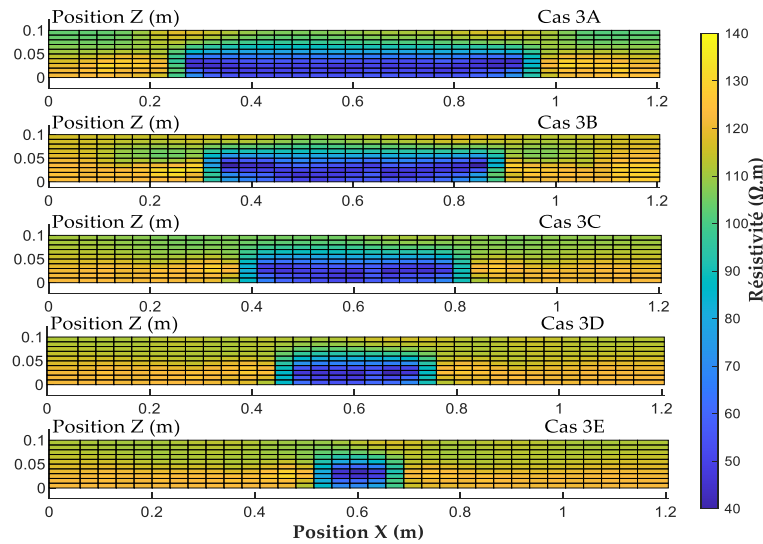


**FIGURE 6.** Cartographie des résistivités vraies obtenue par l'algorithme d'inversion « smooth » pour le cas 2

Une contrainte de lissage horizontal prédominante a été appliquée, en utilisant un coefficient de pondération de lissage plus élevé dans la direction  $x$  que dans la direction  $z$ . Le paramètre de régularisation  $\lambda$  a été initialement fixé à  $10^{-1}$ . Il est remarquable que les différentes zones sont correctement identifiées et que les moyennes des valeurs obtenues dans les différentes zones correspondent bien aux valeurs de référence (erreur max = 0.2%). Cela peut être attribué au contact direct entre le capteur et les zones à identifier, ce qui permet une initialisation du problème inverse proche des valeurs réelles de résistivité du milieu sondé, facilitant ainsi la convergence vers la solution correcte.

### Cas 3 – Inclusion de taille variable

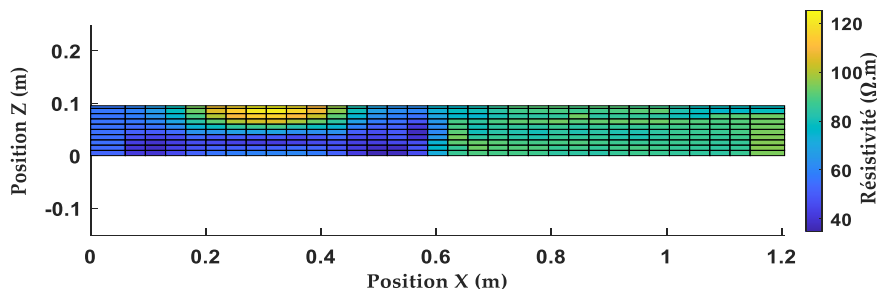
Le cas test proposé (cas 3) comprend un prisme de gélatine entouré d'une solution d'eau de résistivité différente, comme illustré dans la Fig. 2. Des mesures successives ont été réalisées sur des prismes positionnés au centre du moule, avec des dimensions décroissantes de  $L$  le long de l'axe des  $x$  (voir Fig.2), tout en maintenant une hauteur constante ( $Lz = 5\text{cm}$ ) le long de l'axe des  $z$ , comme détaillé dans le Tableau 1 de la section III.A. Ce cas test permet d'évaluer l'efficacité des algorithmes d'inversion pour discerner des inclusions de différentes tailles et d'analyser comment les dimensions du prisme affectent les résultats d'inversion. Dans la Fig. 7, les résultats de l'inversion «smooth» pour le cas 3 sont représentés. Un lissage égal dans les deux directions a été appliqué. En ce qui concerne le paramètre de régularisation  $\lambda$ , la valeur initiale est fixée à 0,2. Il est à noter que l'algorithme «smooth» a pu déterminer avec précision, pour le contraste de résistivité donné, l'emplacement du prisme de gélatine pour toutes les dimensions de prisme. Une observation générale est que la valeur moyenne des résistivités identifiées de la zone d'eau sous-estime les valeurs de référence dans tous les cas, tandis que, pour le bloc de gélatine, les valeurs identifiées dépassent les valeurs de références.



**FIGURE 7.** Cartographies des résistivités vraies obtenues par l'algorithme d'inversion « smooth » pour les cas 3A, 3B, 3C, 3D et 3E

#### Cas 4 – Cas général présentant différents types de discontinuités de résistivité

Les cas précédents représentent diverses distributions de résistivité, chacune conçue pour évaluer les performances de l'algorithme d'inversion en fonction de critères spécifiques. Pour tester les capacités de l'algorithme avec une distribution de résistivité plus complexe, le cas 4 a été introduit. Ce cas se compose de trois zones distinctes: (1) un bloc de gélatine avec une résistivité de  $47,4 \Omega \cdot m \pm 4,86\%$ , (2) une inclusion dans la gélatine avec une résistivité de  $121 \Omega \cdot m \pm 0,5\%$ , et (3) un bloc d'eau adjacent avec une résistivité de  $84 \Omega \cdot m \pm 0,5\%$  (Fig. 2). Contrairement aux cas 2 et 3, l'inclusion du cas 4 est intégrée dans la gélatine et n'est pas en contact direct avec le capteur. Cette configuration présente plus de difficultés pour l'algorithme d'inversion pour distinguer les différentes zones. Elle démontre également la flexibilité et l'adaptabilité du protocole expérimental proposé pour créer des géométries complexes.



**FIGURE 8.** Cartographie des résistivités vraies obtenue par l'algorithme d'inversion « smooth » pour le cas 4

L'algorithme d'inversion "smooth" a identifié avec succès la zone située sur le côté droit du milieu (Fig. 8), là où la discontinuité latérale de résistivité est en contact direct avec le capteur. Il a également correctement estimé la position en profondeur de l'inclusion dans la gélatine.

Cependant, la limite latérale de l'inclusion n'a pas été déterminée avec la même précision que dans le cas 3. La zone de transition dans le cas 4 est plus étendue que dans le cas 3. Il est possible que le choix de la configuration d'électrodes (Wenner) ne soit pas optimal pour cette étude. De futurs travaux pourraient explorer les performances d'autres configurations d'électrodes (ex. Dipole-Dipole) sur des données expérimentales. Pour fournir des résultats plus quantitatifs, les valeurs moyennes de résistivité identifiées ont été résumées comme suit :  $51.5 \Omega.m$  pour la gélatine (8,6 % plus élevé que la valeur de référence),  $109.31 \Omega.m$  pour l'inclusion (9,6 % plus faible) et  $86.5 \Omega.m$  pour le bloc d'eau (2,9 % plus élevé).

#### **Commentaire général sur les résultats d'inversion des quatre cas testés :**

L'analyse des résultats d'inversion obtenus pour les quatre cas testés met en évidence plusieurs écarts notables entre les résistivités reconstruites et les valeurs réelles, en particulier au niveau des interfaces. Ces écarts peuvent être attribués à plusieurs facteurs. L'algorithme d'inversion utilisé, basé sur un filtre de lissage, a tendance à atténuer les contrastes aux interfaces nettes, ce qui peut affecter la précision des résultats. En outre, la configuration des électrodes (ici Wenner) pourrait ne pas être optimale pour toutes les géométries. D'autres configurations, telles que le dipôle-dipôle ou le Wenner-Schlumberger, pourraient offrir des résultats complémentaires grâce à leur sensibilité différente aux structures verticales ou horizontales [Reichling et al.2015]. Cette question constitue une piste pour de futurs travaux comparatifs. Par ailleurs, le paramétrage isogéométrique utilisé dans la modélisation ne coïncide pas toujours précisément avec les interfaces physiques, ce qui peut générer des imprécisions dans les résultats inversés. Enfin, certaines aléas expérimentaux — notamment celles liées au moule, au positionnement ou à la géométrie des capteurs — peuvent introduire un bruit de mesure non négligeable. Ces incertitudes, difficiles à quantifier *a priori*, rendent leur prise en compte complexe dans les simulations numériques. Cela renforce l'intérêt du benchmark expérimental proposé, qui permet d'évaluer les algorithmes d'inversion et les systèmes d'acquisition dans des conditions réalistes, en complément des données synthétiques idéalisées.

#### **IV. Conclusion**

L'objectif de cet article est d'introduire un dispositif expérimental et une méthodologie pour établir des domaines de référence permettant d'évaluer les performances du système d'acquisition de résistivité et du traitement des données (inversion). Le principal matériau utilisé est la poudre d'agar-agar mélangée à de l'eau déminéralisée, donnant une substance gélatineuse aux propriétés électriques représentatives de celles du béton. Ce matériau gélatineux est facile à préparer, permettant la création de plusieurs blocs avec différents niveaux de résistivité. De plus, l'utilisation de ce matériau évite l'endommagement du capteur et peut être utilisé pour qualifier le capteur avant sa mise en œuvre sur site. Divers cas de test ont été préparés pour simuler différents scénarios d'exposition des structures aux chlorures, en particulier dans les environnements marins. Par la suite, un algorithme d'inversion existant nommé « smooth », a été appliqué aux données mesurées. Cet algorithme a efficacement identifié des zones contrastées avec une localisation spatiale précise. Cependant, dans certains cas, les valeurs de résistivité dépassent les valeurs de référence, tandis que dans d'autres, elles sont inférieures, ce qui s'explique par la contrainte de lissage imposée et l'erreur de modélisation. En conclusion, l'aspect novateur de cette étude réside dans le protocole expérimental reproductible décrit, qui peut être reproduit dans d'autres laboratoires avec un équipement simple, peu coûteux et ayant un impact environnemental minimal.

## REFERENCES

- Jeon, D. and Yoon, S., 2024. Electrical Resistance Tomography (ERT) for Concrete Structure Applications: A Review. *Buildings*, 14(9), p.2654.
- Lopez, W. and Gonzalez, J.A., 1993. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. *Cement and concrete research*, 23(2), pp.368-376.
- Smyl, D., 2020. Electrical tomography for characterizing transport properties in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 244, p.118299.
- Eid, M.A., Reuge, N., Villain, G., Bonnet, S. and Lopes, S.P., 2025. Monitoring of drying and imbibition of concrete using embedded resistivity sensors for the estimation of permeability. *Cement and Concrete Composites*, 157, p.105900.
- Piro, N.S., Mohammed, A.S. and Hamad, S.M., 2023. Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: a comprehensive review. *Materials Today Communications*, p.106573.
- Lataste, J.F., Sirieix, C., Breysse, D. and Frappa, M., 2003. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *Ndt & E International*, 36(6), pp.383-394.
- El Achrafi, M.K., Villain, G. and Bonnet, S., 2024. Surface calibration of electromagnetic properties to simultaneously consider water and chloride contents in concrete both with and without slag. *Construction and Building Materials*, 417, p.135176.
- Lecieux, Y., Schoefs, F., Bonnet, S., Lecieux, T. and Lopes, S.P., 2015. Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device: detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 30(3), pp.216-232.
- Du Plooy, R., Lopes, S.P., Villain, G. and Derobert, X., 2013. Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, pp.27-36.
- Fares, M., Villain, G., Bonnet, S., Lopes, S.P., Thauvin, B. and Thierry, M., 2018. Determining chloride content profiles in concrete using an electrical resistivity tomography device. *Cement and concrete composites*, 94, pp.315-326.
- Sabbağ, N. and Uyanık, O., 2018. Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 155, pp.13-25.
- Achrafi, M.K.E., Bonnet, S. and Villain, G., 2023. Electrical resistivity tomography results analyzed with two inversion methods to determine chloride profiles on BFS concrete having very high electrical resistivity. *Construction and Building Materials*, 407, p.133361.
- Priou, J., Lecieux, Y., Chevreuril, M., Gaillard, V., Lupi, C., Leduc, D., Rozière, E., Guyard, R. and Schoefs, F., 2019. *In situ* DC electrical resistivity mapping performed in a reinforced concrete wharf using embedded sensors. *Construction and Building Materials*, 211, pp.244-260.
- Marescot, L., Rigobert, S., Lopes, S.P., Lagabrielle, R. and Chapellier, D., 2006. A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of applied geophysics*, 60(1), pp.55-67.
- Pandya, Y.H., Bakshi, M., Sharma, A., Pandya, H. and Pandya, H., 2022. Agar-agar extraction, structural properties and applications: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 6, pp.1151-1157.
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. and Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of applied geophysics*, 95, pp.135-156.

Dahlin, T. and Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), pp.379-398.

Alhajj, M.A., Bourguignon, S., Palma-Lopes, S. and Villain, G., 2021. Joint inversion of electromagnetic measurements for the determination of water saturation profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 147, p.106500.

Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration geophysics*, 34(3), pp.182-187.

Reichling, K., Raupach, M. and Klitzsch, N., 2015. Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography. *Materials and Corrosion*, 66(8), pp.763-771.