



HAL
open science

Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre

Yannick Fargier

► **To cite this version:**

Yannick Fargier. Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Sciences de la Terre. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011. Français. NNT: . tel-00921457

HAL Id: tel-00921457

<https://theses.hal.science/tel-00921457>

Submitted on 20 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR GÉOSCIENCE ARCHITECTURE

Année 2011

N° B.U. : _____

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par

Yannick FARGIER

Le 12 Décembre 2011

*à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports
de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Nantes*

Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre

Jury

Président :	Denis	JONGMANS	Professeur, ISTerre, Grenoble
Rapporteurs :	Roger	GUÉRIN	Professeur, Université Paris 6
	Jean-François	GIRARD	Ingénieur, BRGM, Orléans
Examineurs :	Jean-Jacques	FRY	Ingénieur, EDF-CIH, Le Bourget
	Philippe	CÔTE	DR, IFSTTAR, Nantes
	Christophe	DANO	MCF, École Centrale Nantes
Invités :	Paul	ROYET	IPEF, IRSTEA, Aix en Provence
	Sérgio	PALMA LOPES	ITPE, IFSTTAR, Nantes
	Cyrille	FAUCHARD	CR, CETE Normandie Centre, Rouen
	Daniel	FRANÇOIS	Ingénieur, EDF-R&D, Chatou

Directeur de thèse : Philippe CÔTE

Laboratoire : IFSTTAR, Nantes

Co-encadrants : Sérgio PALMA LOPES Cyrille FAUCHARD

Laboratoires : IFSTTAR, Nantes CETE Normandie Centre, Rouen Daniel FRANÇOIS
EDF-R&D, Chatou

N° E.D. : 498-207

Remerciements

Les remerciements, passage incontournable d'une thèse, sont les dernières lignes écrites et pourtant ce sont souvent les premières lues et avec le plus d'assiduité. Ces lignes permettront (je l'espère) de corriger le fait qu'un seul auteur apparaît sur la couverture de ce document. En effet, cette thèse a été le fruit d'un travail collaboratif. C'est pourquoi, afin de n'oublier personne, je voudrais dire à tous : merci !

Ces premières lignes je te les dédie Sérgio, sache que je ne te serai jamais assez reconnaissant pour tout ce que tu as fait et apporté. Merci d'avoir été là pour moi, de m'avoir épaulé, soutenu, encouragé et parfois corrigé ;) dans mes divagations géophysico-magiciennes.

Daniel tu as apporté à chaque étape de ma thèse (et aujourd'hui encore) beaucoup plus qu'un point de vue industriel. Merci pour ta confiance et ta bienveillance, surtout pour cet "après thèse" que je n'ai pas pu honorer.

Cyrille, merci de m'avoir accueilli chez toi dans ton antre, et de m'avoir initié au monde fabuleux de l'EM. Merci pour ton humour et ta bonne humeur, j'espère réellement que l'on pourra retravailler ensemble dans le futur.

Philippe, merci pour ta confiance et pour m'avoir fait partager ton goût pour la qualité en géophysique appliquée (pas de pub ici svp). Tu as su me faire garder le cap à des moments clés de cette thèse. Encore merci.

Je voudrais personnellement remercier M. Jean-François Girard et M. Roger Guérin pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse et pour l'engouement qu'ils ont témoigné. Je joins ces remerciements à M. Denis Jongmans qui a accepté d'être le président du jury et à M. Christophe Dano qui a examiné mon travail. Je voudrais remercier M. Jean-Jacques Fry pour avoir suivi de près mes travaux de thèse, pour son investissement dans mon après thèse et enfin pour sa participation en tant qu'examineur dans mon jury. Enfin, je dois spécialement et triplement remercier M. Paul Royet, pour sa participation dans mon suivi de thèse, pour sa présence dans ce jury et aussi pour tout le reste.

Ce travail a nécessité l'intervention d'une dizaine de spécialistes lors du comité de suivi semi-annuel que je dois remercier. Je pense naturellement à Maryse, à Yves-Laurent, à M. Monnet, à M. Plotto et à tous les autres.

Pour m'avoir supporté pendant presque 1 an, pour leur sympathie, leur compétence et leur aide, je voudrais remercier l'équipe du LRPC de Rouen : Bruno, Vincent, Cyril, Rodolphe, Bo, Idris,

Evelyne, Huishian et Frédéric.

La digue expérimentale étudiée dans la thèse est née de fructueuses conversations avec le Cemagref (IRSTEA) et le CER de Rouen. Sans celles-ci cet ouvrage n'aurait jamais vu le jour. Je remercie donc pour leur investissement dans le projet : M. Royet, M. Mériaux, Mme benahmed (IRSTEA), ainsi que toute l'équipe du CER de Rouen et plus particulièrement et personnellement Delphine et Karim.

Je voudrais remercier les équipes P1E et P1B (EDF-R&D) de m'avoir accueilli à maintes reprises, pour l'expérience que cela m'a apporté et pour leur disponibilité sur mon projet.

La possibilité d'une confrontation des développements sur ouvrage réel est née d'une volonté et d'un financement apportés par EDF-CIH. Je voudrais sincèrement remercier Jean-Robert Courivaud, Jean-Paul Blais (EDF-TEGG) et Julien Cintract pour leur investissement et leur confiance dans ce projet.

Pour leur soutien financier, sans lequel tout ceci ne serait pas possible, je ne dois pas oublier de citer les opérations de recherche SOLEM et DOFEAS, ainsi que le PN ERINOH et les projets INTREPHYD et PAREOT. De la même manière, je désire remercier EDF-DTG, EDF-R&D et le bureau d'études Géophi*Consult* pour le prêt de matériel ainsi que pour le coup de main technique.

Et puis parce qu'en dehors de la thèse il y a aussi autre chose, je voudrais remercier tous ceux qui ont fait que ces trois années se sont si vite écoulées.

Je pense à toute l'équipe RMS : Géraldine (& Xavier), Jean Louis, Xavier, Anaëlle (& Fred), Vincent, Donatienne, Olivier, Fabien, Laurent, Odile, Jacques, Odile, Nathalie, François, Khalid, Raelize, Raphaël, Yuxiang. Au même étage je ne dois pas oublier toute l'équipe CDOT ainsi que Lolo chez Darcy. Merci, pour toutes nos conversations scientifiques (mais surtout pour les autres) et pour tous les moments passés à l'intérieur et à l'extérieur des murs du LCPC.

Remerciement spécial pour Amine (& petite famille), je ne détaille pas ce serait trop long ;p, Guillaume, les Tsing (c'est quand la prochaine) et la famille Ginot au complet.

Bien sur ceux qu'il m'est impossible de remercier étant donné combien je leur dois, mes frères, mes grands-mères, mes parents.

Amandine, jamais aucun mot n'exprimera la gratitude et l'amour que je te porte. Je te confie ces dernières lignes, elles clôturent trois années passées auprès de toi et durant lesquelles tu es devenue ma femme. Tout ce que j'ai accompli jusque là, cette thèse et tout le reste, c'est grâce à toi. Je te dédie cette thèse, tu en es le cœur, la source et l'âme.

Title: Development of the DC-Electrical Resistivity Imaging method for the assessment and monitoring of hydraulic earthworks

Abstract: In France, EDF (Électricité De France) is in charge of managing the large hydraulic structure stock dedicated to producing hydroelectricity. This responsibility is associated with high economical and safety issues. On the other hand, the flood protection dikes and levees cover a distance of over 7500 km protecting up to 15000 km² of flood areas hosting a population of 2 million people. An average of at least one breach per year has been recorded among flood protection structures and the "Comité Français des Grands Barrages" has recorded over 70 incidents in a period of 25 years. Internal erosion and overflow are the main causes of failure in levees, dikes and dams in France and worldwide.

The DC-Electrical Resistivity Imaging (ERI) method is very sensitive to soil state parameters such as soil nature and clay content, moisture content and water salinity, compaction level and temperature. Therefore, it is widely accepted as one of the most relevant geophysical methods for the survey and the monitoring of hydraulic earth structures. Since ERI techniques provide local images of a dike body and its foundation, they complement faster methods (e.g. low frequency electromagnetic profiling) for the rapid assessment of a dike condition over its full length. Although the ERI method is not directly sensitive to seepage in porous media (which Self-Potential and temperature based methods are), it is well suited for imaging property changes with time in the dike body, and thus for detecting water infiltration processes that can be combined with internal erosion.

However, using ERI in a conventional manner is likely to yield image artifacts. This is due to the lack of information in the measured data and the fact that the full complexity of the problem and available a priori information are usually not accounted for. Therefore, new approaches of data acquisition and inversion have been developed. This development aims at filling the gap between more classical 2D and purely 3D approaches, by optimising a compromise between acquisition cost and model reliability. The research work has implied developing a finite element approach for the forward problem and a Gauss-Newton algorithm for the 3D inverse problem. Finally, experimental campaigns were conducted on both a semi-controlled and a real hydraulic earth embankment in order to test and validate the developments in more realistic conditions. Outcomes indicate that interpretation capability and quality can be significantly enhanced by using these news approaches.

Keywords: Applied Geophysics, DC-Electrical Resistivity Imaging, Hydraulic Earth Structures, Condition Assessment, Reliability, Optimisation.

Discipline: Civil Engineering

Titre : Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la Reconnaissance et la Surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre

Résumé : En France, EDF gère un important parc d'ouvrages hydrauliques en terre dédié à la production hydroélectrique, avec des enjeux économiques et sécuritaires conséquents. D'autres ouvrages à charge permanente sont présents sur le territoire, par exemple le grand linéaire de voies navigables (transport, tourisme). Du côté des digues «sèches» (digues de protection contre les inondations), 7500 km de digues protégeant plus de 15000 km^2 de zones inondables où vivent 2 millions d'habitants sont recensés. Pour ces ouvrages particuliers, il n'y a pratiquement pas d'année sans rupture et plus de 70 incidents ont été recensés en 25 ans par le Comité Français des Grands Barrages. L'érosion interne et la surverse sont les principales causes de ruptures et d'incidents de levées, digues et barrages en France et dans le Monde.

L'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE) est une méthode d'imagerie très sensible aux paramètres d'état d'un sol : la nature du sol et son contenu argileux, sa teneur en eau et la salinité de l'eau, son état de compacité et sa température. Elle fait donc partie des méthodes pertinentes pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Ainsi, elle est complémentaire de méthodes de reconnaissance à grand rendement (ex : Profilage par méthodes électromagnétique à basses fréquences) en offrant localement des images du corps de digue et de sa fondation. En surveillance, alors que les méthodes basées sur les Potentiels Spontanés ou les mesures de température par Fibre Optique sont particulièrement sensibles aux écoulements d'eau (donc aux fuites à travers le corps de digue), l'IRE peut contribuer à imager les variations des propriétés d'état dans le temps de la structure interne de l'ouvrage (phénomène évolutif d'infiltration combiné ou non à de l'érosion interne).

Cependant, dans l'utilisation conventionnelle de l'IRE, le manque d'information provenant des mesures, ainsi que la mauvaise prise en charge de ces mesures et de l'information a priori, entraînent la formation d'artéfacts dans les résultats d'imagerie. Dans ce sens, de nouvelles démarches d'acquisition et d'inversion sont développées, intermédiaires entre les techniques plus classiques $2D$ et $3D$. Ces nouvelles approches, dont le but est de tirer le meilleur compromis entre coût d'acquisition et robustesse (fiabilité) du modèle final sont le fruit du développement d'un problème direct par éléments finis et d'un algorithme d'inversion $3D$ de type Gauss-Newton. Enfin, des campagnes d'auscultations sur ouvrage semi-contrôlé et sur ouvrage réel ont été réalisées afin de confronter ces développements à la complexité de cas réelles. Ces études révèlent que la qualité de la reconstruction et la capacité d'interprétation peuvent être considérablement améliorées par l'utilisation des approches développées.

Mots-clés : Géophysique appliquée, Imagerie de Résistivité Électrique, Ouvrage Hydraulique en Terre, Auscultation, Fiabilité, Optimisation.

Discipline : Génie Civil

Table des matières

Notations	xxvii
Introduction	1
1 Contexte des ouvrages hydrauliques en terre et auscultation	5
1.1 Les ouvrages hydrauliques	6
1.1.1 Détail des ouvrages hydrauliques et réglementation	6
1.1.2 Gestion des OHT et réglementation	8
1.2 Les phénomènes à l'origine de la rupture	10
1.2.1 Le glissement de talus	10
1.2.2 La surverse	10
1.2.3 L'érosion interne	11
1.2.4 Synthèse et application	13
1.3 Méthodologies et techniques d'auscultation des OHT	14
1.3.1 Les études de reconnaissance et de surveillance traditionnelles	15
1.3.2 Les méthodes géotechniques	19
1.3.3 Les méthodes géophysiques	20
1.3.4 Place de l'IRE dans une démarche globale d'auscultation	29
1.4 Conclusion	29
2 Imagerie de Résistivité Électrique	33
2.1 Théorie, principes et mise en œuvre de la méthode IRE	34
2.1.1 Historique de la méthode IRE	34
2.1.2 Les équations de Maxwell et les équations fondamentales	35
2.1.3 Principe général de la prospection électrique à courant continu	36
2.1.4 Erreur sur la mesure	40
2.1.5 Physique des sols et des roches	42
2.1.6 Les principales stratégies de prospection	46
2.2 Le problème direct	53
2.2.1 La résolution du problème direct	53
2.2.2 Discrétisation du problème direct et potentiel secondaire	56
2.2.3 Essai numérique	58
2.2.4 Démarche de construction du problème direct - InGEOHT	60
2.2.5 Problématique des ouvrages 3D	61
2.2.6 Conclusion	66
2.3 Le problème inverse	67
2.3.1 Introduction	67

2.3.2	La quête de l'information	68
2.3.3	Discrétisation du modèle inverse	70
2.3.4	L'utilisation des normes	71
2.3.5	Les principaux algorithmes d'inversion	73
2.3.6	Le calcul des dérivées de Fréchet	76
2.3.7	Régularisation du problème inverse	81
2.3.8	Non-linéarité et ajustement	86
2.3.9	Le cas particulier du monitoring	87
2.3.10	Tests numériques	88
2.4	Conclusion	92
3	Optimisation et Robustesse	95
3.1	Robustesse des méthodes inverses	96
3.1.1	Critère d'erreur sur la mesure et expérience	96
3.1.2	La méthode de la « Region Of Investigation (<i>ROI</i>) »	97
3.1.3	La matrice de résolution du modèle	99
3.2	Réécriture du problème inverse	101
3.2.1	Les différentes stratégies de discrétisation	102
3.2.2	Les bases d'un nouveau code - InGEOHT	105
3.2.3	Stratégie $2D^+$	106
3.2.4	Stratégie $3D^-$	113
3.3	Optimisation de l'acquisition	118
3.3.1	Optimisation des protocoles d'acquisition	120
3.3.2	Optimisation du placement des électrodes	124
3.4	Conclusion	133
4	Étude expérimentale semi-contrôlée : DiguExp'E.R.T.	135
4.1	Introduction	136
4.1.1	Rappel du contexte	136
4.1.2	Le besoin d'un ouvrage contrôlé	137
4.1.3	Le choix d'un critère d'étude	137
4.1.4	Étude préalable	138
4.2	Le dispositif expérimental	141
4.2.1	Géométrie et structure de l'ouvrage	141
4.2.2	Le système hydraulique d'injection	143
4.2.3	Étude des propriétés de l'ouvrage avant infiltration	143
4.3	Les essais d'infiltration	147
4.3.1	Déroulement des essais	147
4.3.2	Suivi de la teneur en eau du sol en place	149
4.3.3	Suivi de la température du sol en place	149
4.3.4	Suivi des volumes d'eau injectés dans le sol	151
4.4	Étude d'auscultation	151
4.4.1	Campagne d'étude 1 (MG-32-S)	152
4.4.2	Campagne d'étude 2 (MG-25-E)	159
4.4.3	Campagne d'étude 3 (MG-3D-S)	165
4.4.4	Campagne d'étude 4 (PDP-Opt-E)	169

4.5	Conclusion des études réalisées sur l'ouvrage DiguExpERT	179
5	Expérimentation sur ouvrage réel : Cas d'étude	181
5.1	Caractérisation conventionnelle de l'ouvrage	182
5.1.1	Présentation de l'ouvrage ausculté	182
5.1.2	Contexte géologique	183
5.1.3	L'inspection visuelle	184
5.1.4	La topographie de l'ouvrage	184
5.1.5	Conclusion des études préalables	184
5.2	Démarche de création d'un modèle $2D^+$	185
5.2.1	Évaluation de l'information <i>a priori</i> nécessaire	185
5.2.2	Intégration de l'information <i>a priori</i>	188
5.3	Campagne de reconnaissance longitudinale	195
5.3.1	Présentation des données	195
5.3.2	Traitement conventionnel	197
5.3.3	Approche par normalisation	198
5.3.4	Application de l'approche $2D^+$	201
5.4	Application de l'approche $3D^-$ à une auscultation locale	204
5.4.1	Illustration numérique de l'approche $3D^-$	205
5.4.2	Application de l'approche $3D^-$ au cas d'étude	208
5.4.3	Résultats, discussion et conclusion	208
5.5	Conclusion	212
	Conclusion et perspectives	215
	Bibliography	235
	A Les protocoles d'acquisition en IRE	237
	B La technique de normalisation	239
	C DiguExpERT	241
C.1	Étude préalable au CER de Rouen	241
C.2	Plan de la DiguExpERT avec position des mesures lors de la mise en œuvre	242

Table des figures

1.1	Illustration de douze typologies d'ouvrages hydrauliques en terre. d'après Foster <i>et al.</i> [2000a].	7
1.2	Illustration de deux typologies d'érosion interne (l'érosion régressive et la fuite concentrée) menant à la formation d'un renard hydraulique se produisant par le biais de trois modes généraux de rupture (à travers le remblai, à travers la fondation, depuis le remblai jusqu'à la fondation), d'après Foster & Fell [1999b].	12
1.3	Méthodologie générale d'auscultation des ouvrages hydrauliques en terre proposée en 2007 par le Projet National CriTerre [Fauchard & Mériaux, 2007].	16
1.4	Exemple d'archive historique d'une levée de la Loire (France). D'après Fauchard & Mériaux [2007] modifié depuis Dion [1961].	17
1.5	Classification de l'érodabilité des sols en fonction de critères granulométriques, d'après Foster [1999a].	20
1.6	Méthodologie de reconnaissance et de surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Le sigle « F.O » correspond à la méthode de thermométrie par Fibre Optique.	22
1.7	Organigramme présentant les interactions engendrées par le phénomène d'érosion interne sur plusieurs paramètres d'état d'un matériau. D'après Johansson [1997].	24
1.8	Illustration de la sensibilité de plusieurs paramètres physiques à la variation de porosité d'un sol. Cette étude concerne l'effet sur la température, la conductivité hydraulique, la densité, la résistivité et la permittivité diélectrique. D'après Johansson [1997].	25
1.9	Schématisation d'une méthodologie d'auscultation des OHT par imagerie de résistivité électrique. Les prospections « grand rendement » sont réalisées à partir de lignes longitudinales positionnées en crête, en pente ou en pied de digue. Ensuite, des inspections plus locales peuvent intervenir avec des lignes placées transversalement.	26
1.10	Illustration de deux coupes transversales à l'ouvrage et d'une reconstruction longitudinale à l'ouvrage. La position des lignes est précisée par les flèches rouges en pointillés. Les couleurs correspondent à des iso-résistivités.	26
2.1	Illustration du principe de réciprocité pour un quadripôle de mesure.	38
2.2	Lignes de courant et équipotentiels pour deux électrodes d'injection C_1 et C_2 au dessus d'un demi-espace homogène. a) vue en plan, b) vue en coupe, c) voltage le long de l'axe recoupant C_1 et C_2 . D'après Chouteau & Giroux [2006].	38
2.3	Illustration du principe de similitude d'après Chouteau & Giroux [2006].	40

2.4	Classification de différents sols, roches et liquides du point de vue de leur résistivité. La couleur turquoise est réservée aux matériaux entrant couramment dans la composition des digues. Modifiée d'après Palacky [1987].	43
2.5	Influence de la température sur la résistivité électrique de deux géo-matériaux ($20 \Omega.m$ et $200 \Omega.m$ à $18^\circ C$) pour deux valeurs extrêmes du coefficient de température α (0.02 et $0.035^\circ C^{-1}$). modifié d'après Sjö Dahl <i>et al.</i> [2006].	47
2.6	Illustration des lignes de courant issues d'un faible espacement d'électrodes et d'un plus fort espacement d'électrodes. Les lignes de courant sont plus fortement perturbées par la présence d'un substratum (ρ_2) dans le cas de forts espacements. D'après Chouteau & Giroux [2006].	48
2.7	Résultat de plusieurs profils électriques donnant (a) la résistivité apparente mesurée suivant plusieurs espacements d'électrodes ($n = 1$ à 4) et (b) sa représentation en pseudo profondeur, d'après Chouteau & Giroux [2006].	49
2.8	Illustration de la perturbation du champ de potentiel électrique induite par la présence d'un gisement conducteur comparé à un milieu homogène. L'effet de cette perturbation sur le champ de potentiel en surface illustre la stratégie de mise à la masse. d'après Chouteau & Giroux [2006].	49
2.9	Schématisation des différences entre un modèle réel 2.9(a) et un milieu « identique » modélisé numériquement 2.9(b).	55
2.10	Maillages en éléments finis composés 2.10(a) de 400 mailles rectangulaires et 2.10(b) de 210 mailles triangulaires pour la résolution du problème direct géo-électrique.	56
2.11	Illustration du principe du calcul du problème direct par la création de trois grilles [Günther <i>et al.</i> , 2006]. La première grille est utilisée afin de définir les paramètres du modèle inversé, la seconde grille permet le calcul de la partie régulière du potentiel et la dernière grille (la plus fine) permet la résolution de la partie singulière du potentiel électrique.	58
2.12	Analyse de la précision du code d'éléments finis par comparaison avec des résultats analytiques. La figure 2.12(a) présente les résultats analytiques avec un tracé plein, et numériques avec les symboles « \times », obtenus à partir d'un milieu schématisé à la figure 2.12(b). Les couleurs rouge, noir et bleu correspondent respectivement aux données Wenner α , β et γ	59
2.13	Représentation du maillage 3D en éléments finis 2.13(a) avant application d'une déformation du maillage et 2.13(b) après déformation du maillage.	61
2.14	Illustration de l'effet de milieux 3D perturbateurs sur la distribution radiale de la norme de la densité de courant électrique (a). Les coupes sont simulées à 50 m de l'électrode de courant. Les effets (b) de la topographie, (c) du réservoir, (d) d'un parement en béton et (e) d'un noyau argileux sont illustrés.	62
2.15	Schématisation de la démarche d'étude employée pour tester l'effet de l'éloignement « d » d'un quadripôle Wenner d'un réservoir d'eau. La résistivité de l'eau est de $100 \Omega.m$ tandis que la résistivité du remblai est de $1000 \Omega.m$. « a » représente la distance inter-électrodes.	63
2.16	Étude numérique de l'effet de l'écartement d'un quadripôle Wenner et de son éloignement à une digue sur sa mesure. Les valeurs de résistivité apparente sont calculées à partir d'un facteur géométrique « conventionnel ($2\pi a$) ».	64

2.17 Étude numérique de l'effet de l'éloignement d'une ligne d'électrodes longitudinale à une digue sur la mesure de résistivité apparente. Les valeurs de résistivité apparente sont calculées à partir d'un facteur géométrique « généralisé » obtenu par normalisation.	64
2.18 Comparaison des résultats présentés à la figure 2.16 et 2.17 sous forme de variation relative. Cette figure indique les « protocoles » d'acquisition sensibles à l'effet de la topographie (résultats s'éloignant de 0).	65
2.19 Étude numérique de l'effet d'un doublement du contraste de résistivité entre le remblai et le réservoir. Cette figure présente la variation relative entre des résistivités apparentes obtenues à partir du schéma 2.15 et des résistivités apparentes obtenues sur un modèle similaire mais présentant un contraste de résistivité électrique deux fois supérieur. Les résistivités apparentes utilisées sont obtenues par une technique de normalisation.	65
2.20 Schéma illustrant la paramétrisation d'un milieu pour résoudre le problème inverse. La figure de gauche illustre le milieu réel d'auscultation présentant des variations complexes. La figure centrale présente un exemple continu de paramétrisation avec quatre paramètres à ajuster (a, b, c et d). La dernière figure illustre une paramétrisation discrète, en deux dimensions, nécessitant l'optimisation d'un nombre de paramètres égal au nombre de cellules discrétisées ($\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$).	67
2.21 Schéma illustrant le déroulement de la résolution d'un problème inverse.	68
2.22 Inversion 1D de données de sondage électrique illustrant le problème d'équivalence des solutions, d'après Chouteau & Giroux [2006].	69
2.23 Schématisation des limitations liées aux méthodes inverses en IRE. Les cases et flèches vertes mettent en avant les conséquences aggravantes du contexte d'auscultation des OHT.	71
2.24 Illustration de l'effet d'un point aberrant sur l'ajustement d'un modèle linéaire suivant les normes L_1 , L_2 et L_∞ , d'après Menke [1984].	72
2.25 Sensibilité d'une mesure Wenner α à une perturbation de la résistivité électrique de différents volumes du sous-sol. Chaque cellule représente un volume du sous-sol vu en coupe. Les électrodes sont positionnées en surface aux quatre niveaux de rupture de la sensibilité, symbolisés par les lettres A, B, M et N. Les échelles des ordonnées et des abscisses sont indiquées en fonction de la distance « a » séparant les électrodes.	80
2.26 Sensibilité d'une mesure Wenner β à une perturbation de la résistivité électrique de différents volumes du sous-sol. Chaque cellule représente un volume du sous-sol vu en coupe. Les électrodes sont positionnées en surface aux quatre niveaux de rupture de la sensibilité, symbolisées par les lettres A, B, M et N. L'échelle des ordonnées et des abscisses sont indiquées en fonction de la distance « a » séparant les électrodes.	80
2.27 Courbe en L obtenue par GSVD avec amortissement, l'abscisse présente la norme sur les données, et l'ordonnée la semi-norme sur le modèle.	82
2.28 Schéma illustrant 2.28(a) une discrétisation 1D régulière selon la profondeur avec six couches et 2.28(b) une matrice de lissage permettant de mesurer la rugosité du milieu 2.28(a).	84

2.29	Schéma illustrant 2.29(a) une discrétisation $2D$ régulière suivant x et z composée de 3 fois 3 couches et 2.29(b) une matrice de lissage permettant de mesurer la rugosité du milieu 2.29(a).	84
2.30	Exemple de deux discrétisations différentes d'un milieu, impliquant 2.30(a) une discrétisation régulière et 2.30(b) une discrétisation irrégulière. Les deux modèles correspondent à une discrétisation d'inversion pouvant être utilisées pour une prospection avec 16 électrodes et comprenant 2.30(a) 180 cellules et 2.30(b) 81 cellules. modifié d'après Günther <i>et al.</i> [2006].	85
2.31	Comparaison de trois résultats obtenus après inversion (Res2Dinv®) de données simulées (Comsol Multiphysics®) sur le milieu schématisé à la figure 2.31(a) avec un protocole gradient multiple. La tomographie est réalisée à partir de 48 électrodes placées au centre de la crête d'un ouvrage en charge. Six anomalies de $100 \Omega.m$, de différentes tailles et à différentes profondeurs sont présentes dans le remblai. La résistivité électrique du réservoir et du remblai sont respectivement de $80 \Omega.m$ et de $1000 \Omega.m$. Les reconstructions sont respectivement obtenues 2.31(b) sans correction, 2.31(c) avec normalisation de l'effet de topographie et 2.31(d) avec une normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir.	90
2.32	Résultats d'inversion simulés à partir du modèle figure 2.32(a). L'étude est identique à l'étude présentée à la figure 2.31. Le milieu est composé, à gauche d'un bloc résistant de $2000 \Omega.m$ (en rose sur la première figure) et, à droite, d'un bloc de $1000 \Omega.m$. Les résultats d'inversion illustrent les effets respectifs 2.32(b) d'aucune normalisation, 2.32(c) d'une normalisation de l'effet de la topographie et d'une normalisation prenant un contraste de résistivité entre le réservoir et le remblai de 2.32(d) 5, 2.32(e) 12.5 et 2.32(g) 25.	91
2.33	Comparaison de deux résultats obtenus après inversion de données simulées sur le milieu schématisé à la figure 2.33(a) avec un protocole de type gradient multiple. Les figures 2.33(b) et 2.33(c) présentent respectivement les résultats d'inversion 2.33(b) sans correction des données, 2.33(c) avec normalisation de l'effet du réservoir.	93
3.1	Représentation en iso-contours du critère ROI sur la coupe de résistivité inversée correspondante, d'après Marescot <i>et al.</i> [2003]	97
3.2	Représentation de la topographie de l'espace des solutions composée d'un paramètre « m » avec deux scenarii mettant en défaut l'interprétation du critère de fiabilité ROI . La figure 3.2(a) illustre le cas de deux modèles initiaux proches mais placés à une grande distance du minimum global. La figure 3.2(b) présente le cas de deux modèles initiaux choisis à distance élevée l'un de l'autre dont un à proximité d'un minimum global et le second d'un minimum local.	98
3.3	Illustration des différences méthodologiques de discrétisation présentes entre trois travaux 3.3(a) [Günther <i>et al.</i> , 2006], 3.3(b) [Blome <i>et al.</i> , 2009] et 3.3(c) [Fargier <i>et al.</i> , 2011b]. Les figures de gauche (tracé rouge) représentent les discrétisations d'inversion, les figures centrales les maillages permettant la résolution du problème direct et enfin les figures de droite la superposition de la discrétisation d'inversion et le maillage du problème direct.	104

3.4	Schématisation d'une discrétisation $2D$ (en fonction des électrodes) représentée sur un modèle $3D$. Deux coupes peuvent être extraites de ce bloc $3D$, avec une coupe longitudinale présente dans le coin haut droit, et une coupe transversale (par rapport à la ligne d'électrode) présente dans le coin bas gauche.	106
3.5	Schématisation d'une discrétisation $2D$ conventionnelle (figure 3.5(a)) appliquée à un modèle de digue en charge (figure 3.5(b)).	107
3.6	Schématisation d'une discrétisation $2D^+$ appliquée à un modèle de digue en charge (figure 3.6(a)). La distance finie des blocs dans le sens transversal permet une prise en compte de la topographie et du réservoir. La figure 3.6(b) présente une coupe transversale du bloc $3D$ illustré à la figure 3.6(a)	108
3.7	Schématisation de deux possibilités de discrétisation verticale (stratégie $2D^+$ pour une prospection longitudinale d'un ouvrage hydraulique).	108
3.8	Illustration numérique de la stratégie $2D^+$. Les figures 3.8(a) et 3.8(c) présentent respectivement le modèle « vrai » utilisé, vu en volume et vu de face. Ce modèle simule une digue en charge (réservoir en bleu) de 6 m de hauteur avec deux hétérogénéités présentes dans le corps. La ligne rouge de la figure (a) symbolise la position de la ligne d'électrodes et les triangles noirs de la figure (c) la position des 36 électrodes. La figure présente le résultat inversé 3.8(b) vu en volume et 3.8(d) vu de face à la troisième itération. L'échelle des couleurs est en logarithme de résistivité électrique. La figure 3.8(e) présente le résultat obtenu avec le progiciel Res2Dinv®.	110
3.9	Diminution du critère d'erreur sur les données (eq. 3.2) en fonction des itérations d'inversion. L'échelle des ordonnées est présentée en logarithme.	111
3.10	Illustration <i>via</i> la L-curve du paramètre « optimal » d'amortissement. Le paramètre de Marquardt optimal est localisé sur la courbe à l'intersection des tracés rouges en pointillés. L'axe des abscisses correspond à la fonction objectif sur les données et l'axe des ordonnées la fonction objectif sur le modèle.	112
3.11	Schématisation de deux possibilités de discrétisation verticale et transversale pour une prospection longitudinale d'un ouvrage hydraulique faisant intervenir une stratégie $3D^-$	113
3.12	Illustration d'une discrétisation $3D^+$ optimisée pour l'introduction d' <i>a priori</i> dans l'inversion. Le milieu peut être découpé en trois ensembles : le remblai (partie sur-discrétisée), le noyau (en bleu) et la fondation (en vert).	114
3.13	Représentation d'un modèle numérique simulant l'évolution d'une fuite au sein d'un ouvrage (symbolisée par les hétérogénéités vertes). Sept instants simulant l'évolution sont représentés, avec 3.13(a) la première évolution, puis 3.13(b) le second développement de la pathologie. La figure 3.13(h) représente, pour les six premières évolutions, l'effet de telles perturbations sur la norme de l'erreur sur les données. Le modèle initial utilisé pour calculer les données « mesurées » correspond au même milieu sans infiltration.	115
3.14	Illustration de deux inversions $3D^-$ avec 3.14(b) et 3.14(d) respectivement les résultats d'inversion obtenus à partir de données simulées sur les modèles illustrés aux figures 3.14(a) et 3.14(c). Les résultats d'inversion sont présentés à la troisième itération d'inversion et possèdent une erreur RMS d'environ 3.1 %.	117

3.15	Schématisation d'un principe de traitement en variation temporelle avec contraintes imposées sur le modèle de référence. En abscisse sont présentés les différents instants de mesures. L'axe des ordonnées illustre les différentes itérations d'inversion.	118
3.16	Représentation de l'inversion en variation temporelle (a) entre les modèles 3.13(b) et 3.13(c), (b) entre le modèle 3.13(c) et 3.13(d) et enfin (c) entre le modèle 3.13(d) et 3.13(e). L'échelle de couleur est en variation relative de résistivité électrique.	119
3.17	Courbe illustrant le nombre total (exhaustif) de mesures réalisables à partir de dispositifs de 2 à 6 électrodes d'acquisition en fonction du nombre de d'électrodes disponibles.	121
3.18	Illustration du nombre de mesures réalisables pour des jeux exhaustif et complet de quadripôles, et un jeu exhaustif de bipôles, en fonction du nombre d'électrodes disponibles.	122
3.19	Schématisation de deux options pour l'optimisation du placement des électrodes. Les figures 3.19(a) et (b) illustrent l'option 3 de la démarche d'optimisation impliquant une réduction du nombre initial d'électrodes (figure 3.19(b)). La figure 3.19(c) présente l'option 2 d'optimisation illustrant le principe de sélection des électrodes les plus pertinentes en fonction d'une zone d'intérêt.	126
3.20	Schéma de l'ouvrage expérimental DiguExpERT vu en plan en coupes transversale et longitudinale. La partie jaune correspond à la partie sablo-limoneuse, siège de l'infiltration. Une grille régulière d'électrodes, schématisée en noir sur la figure en plan et en croix bleues sur le bloc 3D est disposée sur la zone d'infiltration.	131
3.21	Illustration du résultat d'optimisation du placement des électrodes. La matrice d'importance des électrodes est superposée sur la zone d'investigation de l'ouvrage expérimental. Une interprétation en termes de positionnement optimisé est donnée sur la figure en perspective.	132
3.22	La figure du bas présente le gain en bleu, et la perte en rouge de la capacité de résolution apportés par l'optimisation du placement des électrodes. Ce résultat correspond à la variation relative entre la résolution du modèle obtenue avec un positionnement optimisé des électrodes (figure centrale) et une position plus conventionnelle de l'acquisition (figure du haut) [Fargier <i>et al.</i> , 2010].	132
4.1	Modélisation numérique 2D réalisée à partir du progiciel Hydrus 2D montrant l'évolution d'une infiltration au sein d'une partie sablo-limoneuse d'un ouvrage hydraulique. Le maillage en éléments finis ainsi que les conditions aux limites sont illustrées à la figure 4.1(a). Les figures 4.1(b) à 4.1(d) permettent de visualiser l'évolution théorique de la teneur en eau dans le remblai après 4.1(b) 2 h, 4.1(c) 10 h et après 4.1(d) 5 jours d'infiltration. L'échelle des couleurs représente la teneur en eau volumique (%).	139
4.2	Schéma de la digue expérimentale vue en plan avec dimensions et zones d'expérimentation. En jaune la partie sableuse, en marron clair les parties limoneuses, et en marron grisé les rampes d'accès. Les tuyaux d'injection à travers le remblai limoneux et le système d'injection (cuves) sont également représentés. d'après Jacqueline <i>et al.</i> [2010].	142

4.3	Schéma de la digue expérimentale vue en coupe transversale avec dimensions et zones d'expérimentation. En jaune la partie sableuse, en marron clair les parties limoneuses. Les surfaces hachurées correspondent aux volumes de matériel supprimés pour obtenir la géométrie finale. Un tuyau d'injection traversant le limon positionné à mi-hauteur du remblai est également représenté.	143
4.4	Illustration du taux de compactage au niveau de quatre profils verticaux réalisés à partir d'un GDS200 sur quatre forages dans l'ouvrage « DiguExpERT » au CER de Rouen. Les tracés en pointillés rouges correspondent aux moyennes des séparations entre couche obtenues par nivellement.	145
4.5	Schéma décrivant la position et la numérotation des sondes TDR et PT100 présentes dans la digue expérimentale au niveau des <i>Zones</i> 1, 2 et 3.	146
4.6	Schématisation de la section transversale de la partie sableuse de la digue au centre de la <i>Zone</i> 1 avec position des sondes de mesure PT100 et TDR. Les sections transversales des câbles de mesure IRE sont également présentées.	146
4.7	Vue des deux types de sondes présentes dans le remblai et espacées de 50 cm. La mesure de température est réalisée par une sonde PT100 (à gauche) alors que la sonde TDR (à droite) permet la mesure de la teneur en eau massique.	147
4.8	Évolution de la teneur en eau massique (%) au cours de l'infiltration en <i>Zone</i> 2 mesurée à partir de différentes TDR présentes dans le remblai en <i>Zone</i> 1, 2 et 3. Seules les sondes TDR présentant une évolution au cours de l'infiltration sont représentées. Le trait vertical marron illustre le début de l'injection d'eau et le trait vertical bleu symbolise le début de l'injection de saumure.	150
4.9	Évolution de la température au cours de l'infiltration en <i>Zone</i> 2 mesurée à partir de différentes sondes PT100 présentes dans le remblai et à l'extérieur du remblai. Le trait vertical marron illustre le début de l'injection d'eau et le trait bleu vertical symbolise le début de l'injection de saumure.	151
4.10	Volume cumulé injecté dans l'ouvrage en fonction du temps en <i>Zone</i> 2 entre le 5 avril et le 19 avril.	152
4.11	Schéma d'implantation des électrodes pour le protocole d'acquisition à 32 électrodes en surface 4.11(a) et maillage d'éléments finis utilisé pour la technique de normalisation de l'effet de la topographie 4.11(b).	153
4.12	Réponse des sondes TDR à l'évolution de l'infiltration au cours de l'essai en <i>Zone</i> 2. Les traits verts verticaux représentent les différentes séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle.	154
4.13	Représentation de l'évolution de l'infiltration en fonction des réponses enregistrées par les sondes TDR positionnées dans le remblai. Deux instants correspondant aux séquences temporelles de mesures (« T1 » et « T6 ») sont mis en avant. La surface bleutée représente le bulbe d'infiltration hypothétique et les flèches bleues illustrent des chemins d'écoulement probables. Les sondes TDR répondant au passage de l'infiltration sont représentées en rouge tandis que les sondes ne présentant pas de variations importantes sont colorées en noir.	155
4.14	Suite séquentielle de résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® en absolu. La première figure schématise les limites des <i>Zones</i> 1, 2 et 3 ainsi que la position de la source d'injection en <i>Zone</i> 2. Les résultats correspondent aux inversions de mesures provenant de six séquences temporelles (T0, T1, T2, T3, T5, T6) différentes. Les erreurs RMS démarrent à 0.56% et montent jusqu'à 0.63%.	156

4.15	Suite temporelle de résultats d'inversion en variation temporelle obtenus avec le progiciel Res2Dinv®. La première figure schématise les limites des <i>Zones</i> 1, 2 et 3 ainsi que la position de la source d'injection en <i>Zone</i> 2. Ensuite, cinq résultats d'inversion en variation temporelle TL1, TL2, TL3, TL5, TL6 sont présentés. Le corps dont la résistivité augmente (au fond, au centre, <i>TL6</i>) peut être interprété comme un artéfact ou un départ de fines.	157
4.16	Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-32-S. Les résultats sont obtenus à partir du progiciel Res2Dinv®. La figure présente 4.16(a) le résultat d'inversion sans normalisation et 4.16(b) le résultat d'inversion avec normalisation de l'effet de la topographie à l'instant T_0 . L'erreur RMS sur les deux résultats est de 0.37 % et de 0.53 %.	158
4.17	Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-32-S. Les résultats (Res2Dinv®) présentent les variations temporelles entre les instants T_0 et T_2 (<i>TL2</i>) avec contraintes, 4.17(a) sans normalisation et 4.17(b) avec normalisation de l'effet de la topographie sur les données <i>TL2</i> . L'erreur RMS sur les deux résultats est de 0.37 % et de 0.53 %.	159
4.18	Schémas de la digue expérimentale 4.18(a) vue en perspective avec dimensions et zones d'expérimentation (<i>Zone</i> 1, <i>Zone</i> Morte, <i>Zone</i> 2 et <i>Zone</i> 3) et implantation des 25 électrodes et 4.18(b) vue en coupe illustrant la zone de passage de la ligne d'électrodes (cercle rouge).	160
4.19	Réponse des sondes TDR au cours de l'infiltration en <i>Zone</i> 2. Les traits verts verticaux représentent les différentes séquences de mesures retenues pour l'étude en variation temporelle.	160
4.20	Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-25-E à l'instant T_1 . Les résultats sont obtenus à partir du progiciel Res2Dinv®. Le résultat de l'inversion sans normalisation est présenté à la figure 4.20(a) et l'inversion avec normalisation de l'effet de la topographie est présenté à la figure 4.20(b). L'erreur RMS sur les deux résultats est de 1.34 % et de 0.55 %.	161
4.21	Suite temporelle de plusieurs résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® en « absolu ». La première figure schématise les limites des <i>Zones</i> 1, 2 et 3 ainsi que la position du tuyau d'injection (point blanc). Les résultats correspondent aux inversion de mesures provenant de six séquences temporelles différentes (T3, T6, T7, T8, T10, T12). L'erreur RMS augmente continuellement de 0.5 à 0.75%.	162
4.22	Séquence temporelle de plusieurs résultats d'inversion en variation temporelle obtenus avec le progiciel Res2Dinv® après suppression de l'effet de la topographie. La première figure schématise l'évolution entre l'instant T_1 et T_3 avec les limites des <i>zones</i> 1, 2 et 3 ainsi que la position du tuyau d'injection (cercles noirs). Ensuite, cinq résultats d'inversion en variation temporelle <i>TL6</i> , <i>TL7</i> , <i>TL8</i> , <i>TL10</i> , <i>TL12</i> sont présentés. Les erreurs RMS augmentent continuellement depuis le premier résultat de 0.56 à 1.13 %.	163

4.23	Comparaison des résultats d'inversion en variation temporelle obtenus à partir d'un protocole multi-gradient avec 25 électrodes. La séquence temporelle utilisée correspond à l'évolution entre le temps $T1$ et l'instant $T5$ (figure 4.19). Le résultat 4.23(a) est réalisé sans normalisation à la différence du résultat 4.23(b). La position de la source en <i>Zone 2</i> est indiquée par le rond noir.	164
4.24	Illustration de l'apport de la technique de normalisation sur des données issues d'un protocole 4.24(a) MG-32-S et 4.24(b) MG-25-E. Les résultats sont inversés à partir du progiciel Res2Dinv® en variation temporelle avec contrainte. Les erreurs RMS issues des deux reconstructions sont 0.56 et 1.13 %.	165
4.25	Schéma de la digue expérimentale vue en perspective avec détail des trois zones d'expérimentation et position des lignes d'électrodes de la campagne MG-3D-S. Ce schéma permet d'illustrer (sans détailler) la position théorique des coupes d'inversion issues d'une inversion 3D. La coupe (a) correspond à la zone en pied de talus, (b) au centre de la partie sableuse et (c) en direction du noyau limoneux.	166
4.26	Réponse des sondes TDR au cours de l'essai d'infiltration en <i>Zone 2</i> . Les traits bleus verticaux représentent les instants des séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle.	166
4.27	Résultat d'inversion avec le progiciel Res3Dinv® sur des données provenant de la campagne MG-3D-S. Seule la coupe centrale (b) (cf. figure 4.25) est présentée afin de présenter les similitudes en terme de variation spatiales de résistivité en comparaison des campagnes précédentes.	167
4.28	Variations temporelles relatives (%) de résistivité inversées 3D obtenus entre l'instant $T0$ (instant de référence) et les instants $T1$ à $T6$. Les colonnes à gauche, au centre, et à droite représentent respectivement les coupes (a), (b) et (c) de la figure 4.25.	168
4.29	Illustration de deux résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res3Dinv® sur des données provenant de la campagne MG-3D-S au cours de l'injection de saumure. Les reconstructions sont présentées (a) en « absolu » et (b) en variation relative (%) à l'instant $T10$	169
4.30	Maillage du problème direct (traits fins) raffinant la discrétisation du problème inverse (traits épais) de la digue expérimentale. La résolution du problème direct implique plus de 150 000 degrés de liberté alors que seulement 6000 paramètres du modèle doivent permettre de décrire la distribution de résistivité électrique du milieu.	170
4.31	Illustration d'une discrétisation 3D ⁻ optimisée pour l'introduction d' <i>a priori</i> dans l'inversion. Le milieu peut être découpé en trois ensembles : le remblai (partie sur-discrétisée), le noyau (en bleu) et la fondation (en vert). Les deux surfaces roses illustrent les limites de variation franche de la résistivité électrique.	171
4.32	Schématisme de la matrice de lissage utilisée pour inclure un maximum d' <i>a priori</i> dans l'inversion. Chaque grand ensemble est représenté par une sous-matrice permettant d'imposer des variations lisses à l'intérieur d'un sous-domaine et de permettre des variations élevées entre les sous-domaines.	171

4.33	Schéma de la partie sableuse de la digue expérimentale vue en plan avec position (X,Y) des électrodes enfouies. Les 29 électrodes utilisées dans le cadre de l'étude sont figurées en carrés roses pour les électrodes de type « pôle » et en triangles verts pour les électrodes de type « pôle-dipôle ». Les positions du tuyau et des zones d'expérimentation sont aussi présentées.	172
4.34	Réponse des sondes TDR à l'évolution de l'infiltration au cours de l'essai d'infiltration en <i>Zone 2</i> . Les traits verts verticaux représentent les instants des différentes séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle de la campagne « PDP-Opt-E ».	173
4.35	Résultat d'inversion 3D vu en volume du protocole PDP-Opt-E à l'instant T_0	173
4.36	Extraction de la coupe centrale présentée à la figure 4.35. Cette représentation sous forme de coupe permet de faire ressortir les ressemblances en termes de distribution de résistivité avec les résultats 2D précédents (figure 4.14(c)).	174
4.37	Succession temporelle de résultats d'inversion présentant respectivement les variations relatives $TL1$, $TL2$, $TL3$ et $TL4$. La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité du milieu. L'erreur RMS augmente quasi continuellement de 1.2 à 1.7 %.	175
4.38	Suite des séquences temporelles de résultats d'inversion présentant respectivement les variations relatives $TL6$, $TL7$, $TL8$ et $TL9$. La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité du milieu. L'erreur RMS varie entre 1.7 à 2.3 %.	176
4.39	Séquences temporelles d'inversion présentant respectivement la variation relative entre l'instant T_0 de référence depuis l'instant 4.39(a) T_1 jusqu'à l'instant 4.39(e) T_5 . La couleur bleue indique une variation négative du logarithme de la résistivité électrique du milieu. La position du tuyau d'injection est représentée en rouge sur la première figure avec la délimitation des <i>Zones 1, 2 et 3</i>	177
4.40	Suite des séquences temporelles de résultats d'inversion présentant respectivement la variation relative entre l'instant T_0 de référence depuis l'instant T_6 (figure 4.40(a)) jusqu'à l'instant T_9 (figure 4.40(d)). La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité électrique du milieu. L'échelle des couleurs représente la variation relative des logarithmiques de résistivité (%). La position du tuyau d'injection est représentée en rouge sur la figure 4.40(a) avec la délimitation des <i>Zones 1, 2 et 3</i> . L'erreur RMS varie faiblement sur cette séquence temporelle entre 1.5 et 2.0 %.	178
5.1	Illustrations 5.1(a) d'une coupe schématique de la composition de l'ouvrage au niveau d'une section en remblai et 5.1(b) des bajoyers au niveau d'un BMC.	183
5.2	Illustration 5.2(a) d'un extrait de la légende de la carte géologique (BRGM) et 5.2(b) du matériau composant le corps de l'ouvrage.	183
5.3	Vue en plan du géoréférencement des points de mesure topographique, des électrodes d'IRE (d'une campagne longitudinale) et du piézomètre en coordonnées Lambert III (mètres).	184
5.4	Coupe 2D de résistivité inversée à partir d'une ligne d'électrodes disposée transversalement à la digue. Les données mesurées sont issues d'un protocole Wenner-Schlumberger de 24 électrodes espacées de 1 m. Trois interprétations sont données : (a) sous forme de 3 sous domaines, (b) sous forme de six couches horizontales (hypothèse 2D) et (c) sous forme de six couches reproduisant la topographie de l'ouvrage en profondeur.	188

5.5	Démarche schématisée de déformation de maillage sur un remblai (couleur blanche) et un réservoir (couleur bleue) appliquant une fonction de déformation verticale en fonction de l'axe transversal (a). Les figures suivantes présentent (b) une déformation de maillage s'appliquant seulement au remblai et générant une discontinuité (cercle rouge), (c) une déformation de maillage du réservoir et du remblai mais sans anticipation de la déformation générant une mauvaise géométrie (cercle rouge), (d) une déformation du remblai et du réservoir avec anticipation de la déformation du réservoir, (e) une déformation de maillage d'un milieu ne comprenant pas de réservoir mais un remblai discrétisé verticalement ne permettant pas la séparation du réservoir du remblai et (f) identique à (d) mais avec un remblai discrétisé verticalement.	190
5.6	Illustration 3D d'un exemple de modèle avant déformation de maillage. Le bloc bleu représente le réservoir d'eau, et chaque cellule discrétisée représente une cellule d'inversion. Une cellule est colorée en rouge afin de faire ressortir sa forme.	191
5.7	Vue en coupe longitudinale de la discrétisation d'inversion $2D^+$ présentée à la figure 5.6. Le sous-domaine bleu représente le réservoir d'eau, les sous-domaines blancs les paramètres du milieu et enfin le sous-domaine rouge une cellule particulière du milieu.	191
5.8	Coupe longitudinale présentant une discrétisation d'inversion générée à partir du progiciel Res2Dinv® en fonction d'un protocole de mesure gradient multiple pour 96 électrodes. Le modèle est composé d'environ 2000 mailles.	191
5.9	Représentation du maillage d'inversion présenté à la figure 5.7 utilisant la stratégie $2D^+$, vu en coupe transversale. La surface bleue symbolise le réservoir avant déformation de maillage. La surface rouge présente une cellule d'inversion placée en proche surface vue de côté.	192
5.10	Modèle de la digue vue en perspective utilisant un discrétisation de type $2D^+$ avant déformation de maillage. Les positions des électrodes correspondent aux points impliquant une forte densité de mailles.	192
5.11	Modèle de la digue vue en perspective utilisant un discrétisation de type $2D^+$ après déformation de maillage. Les électrodes peuvent être identifiées au niveau des zones de maillage dense au centre de la crête de la digue modélisée.	193
5.12	Maillage d'inversion (tracés pleins et gras) et maillage du problème direct (en tracé fin) suivant la stratégie $2D^+$ obtenus après déformation de maillage.	194
5.13	Simplification des contraintes de lissage apposées aux limites des sous-domaines permettant d'intégrer explicitement l' <i>a priori</i> connu sur le milieu. Le tracé en gras, rouge, indique une forte discontinuité représentant la limite entre le réservoir d'eau conducteur et le corps de la digue résistant.	194
5.14	Pseudo-section de résistivité apparente représentant chaque mesure (rond bleu) en pseudo profondeur à l'aplomb du centre du quadripôle. Les mesures sont réalisées à partir d'un jeu de 96 électrodes réalisant un protocole de type Wenner-Schlumberger. Les pseudo-profondeurs sont issues des travaux de Edwards [1977]. L'échelle des couleurs est en résistivité apparente (ρ_a). Les coordonnées sont normalisées par l'espacement entre électrodes	197

5.15	Représentation de mesures réalisées en pseudo profondeur à partir du progiciel Res2Dinv® permettant de supprimer les données aberrantes et visualiser la qualité des données. Chaque courbe regroupe toutes les mesures correspondent à un même « niveau d'acquisition » et fait ressortir les variations relatives des mesures par rapport à leur moyenne.	197
5.16	Comparaison de différences de potentiel (en bleu) mesurées à partir d'un protocole de type WS et (en rouge) reconstruites à partir d'un protocole de type « complet ».	198
5.17	Coupes longitudinales d'inversion obtenus sur un profil 2D de 96 électrodes avec un protocole Wenner-Schlumberger à la quatrième itération d'inversion, 5.17(a) sans normalisation, 5.17(b) avec normalisation de l'effet de la topographie, 5.17(c) avec normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir. Les cercles noirs symbolisent les hétérogénéités conductrices, les cercles bleus les hétérogénéités résistantes et enfin les traits noirs des délimitations de grandes structures du milieu. La figure 5.17(c) présente un trait horizontal bleu à 6 m de profondeur symbolisant la position théorique du substratum. Les erreurs RMS sont de 0.6, 0.55 et 0.65%.	199
5.18	Coupes longitudinales 2D inversées obtenues 5.18(a) sans normalisation, 5.18(b) avec normalisation de l'effet de la topographie, 5.18(c) avec normalisation de l'effet cumulé de la topographie et du réservoir et 5.18(d) avec le traitement 2D ⁺ . Les traits noirs délimitent les grandes structures interprétés des coupes, le trait bleu (c) la profondeur de la fondation, les cercles noirs des hétérogénéités conductrices et les cercles bleus des hétérogénéités résistantes.	202
5.19	Illustration de la convergence de la norme sur les données à partir du code InGEOHT - 2D ⁺ par la représentation des ρ_a mesurées (en bleu) et calculées à différentes inversions.	203
5.20	Schéma illustrant la démarche de l'étude numérique 3D ⁻ . Deux lignes d'électrodes sont disposées perpendiculairement de manière longitudinale et transversale à l'ouvrage. L'ouvrage de 6 m de hauteur possède un réservoir d'eau 20 fois moins résistant que le corps de digue. Une anomalie 10 fois plus conductrice que l'encaissant de 1 m de rayon est positionnée à l'intérieur de l'ouvrage.	205
5.21	Coupes 2D d'inversion (Res2Dinv®) obtenues à partir de données issues (a) d'un profil longitudinal et (b) d'un profil transversal à une digue illustrés à la figure 5.20.	206
5.22	Reconstruction issue de l'approche d'inversion (InGEOHT - 3D ⁻) à partir de données provenant de deux lignes d'électrodes placées transversalement et longitudinalement à la digue. La figure 5.22(a) présente une vue en perspective du résultat d'inversion à la troisième itération et les figures 5.22(b) et 5.22(c) deux coupes particulières extraites du bloc 3D. Ces deux coupes correspondent aux positions respectives des deux lignes d'électrodes (A1-A2 et B1-B2).	207
5.23	Reconstructions issues de l'approche d'inversion InGEOHT - 3D ⁻ , à partir de données provenant de deux lignes d'électrodes placées transversalement et longitudinalement à la digue. La figure 5.23(a) présente une vue en perspective du résultat d'inversion à la troisième itération et la figure 5.23(b) illustre le logarithme de la matrice de résolution du modèle normalisé par sa plus forte valeur.	209

5.24	Comparaison de coupes transversales de résistivité électrique inversées avec le progiciel Res2Dinv® (figure du haut) et avec le code InGEOHT - $3D^-$ (figure du bas). Le premier résultat est obtenu à la cinquième itération d'inversion avec une erreur RMS de 2.1%. Le second résultat est présenté à la troisième itération d'inversion avec une erreur RMS de 2.8%.	210
5.25	Analyse de la coupe transversale issue du bloc 3D inversé à partir de la démarche $3D^-$. Le corps de digue peut être interprété sous forme de 7 zones différentes. L'analyse de ce résultat peut être rapproché des typologies de digue 2 et 6 [Foster <i>et al.</i> , 2000a], dont les compositions sont illustrées en bas de la figure.	211
5.26	Organigramme présentant les étapes nécessaires à la résolution d'un problème inverse utilisant la démarche $2D^+$ ou $3D^-$. Ce schéma détaille les étapes durant lesquelles est insérée l'information <i>a priori</i> . Seule une infime partie de l'information <i>a priori</i> (encadrés oranges) est présentée à titre illustratif.	213
A.1	Schématisme de trois « familles » de dispositifs classés suivant le nombre d'électrodes positionnées à une distance « infini » de la zone d'investigation.	237
A.2	Schématisme du processus de réalisation d'un protocole Wenner à partir de 16 électrodes équidistantes avec a la plus faible distance entre les électrodes. La réalisation de tous les quadripôles pour chaque valeur d'espacement (a , $2a$, $3a$, $4a$, $5a$) implique $(13+10+7+4+1)$ 35 mesures différentes. Modifié d'après [Marescot, 2004].	238
A.3	Schématisme de deux configurations d'électrodes appelées Wenner Schlumberger et Dipôle-dipôle avec respectivement a et an la plus faible et la plus forte distance entre les électrodes voisines. La lettre L symbolise la distance maximale entre les électrodes sélectionnées.	238
B.1	Schéma d'un modèle numérique utilisé pour calculer la résistance de transfert R_K simulée à partir d'un quadripôle sur un ouvrage de type remblai homogène de résistivité K	240
B.2	Schéma d'un modèle numérique utilisé pour le calcul de la résistance de transfert simulée à partir d'un quadripôle sur un ouvrage de type digue homogène de résistivité K avec un réservoir d'eau placé parallèlement à la digue de résistivité 25 fois moins élevée que la résistivité du remblai.	240
C.1	Schéma d'expérimentation sur planches réalisées au CER de Rouen. Les flèches rouges et bleue représentent respectivement les allers et retours du chargeur à chenille et du compacteur double cylindre. Trois portions sont étudiées et confrontées chacune à une modalité différente de compactage. La légende présente les figurés utilisés pour les mesures d'infiltrométrie et de densité. D'après [Jacqueline <i>et al.</i> , 2010].	241
C.2	Schéma de la digue expérimentale vue en plan avec position des forages GDS200, des points de prélèvements, des positions de nivellement et des mesures GPV 30. D'après [Jacqueline <i>et al.</i> , 2010].	242

Liste des tableaux

1.1	Classification des digues (et barrages de retenue et des digues de canaux) selon l'article R214-112.	8
1.2	Liste d'actions et d'obligations liées aux différentes classifications de digues, d'après MISE [2009].	9
1.3	Nombre d'accidents (A) et de ruptures (R) répertoriés en fonction de l'instant d'apparition de l'érosion à travers le remblai, à travers la fondation et depuis le remblai jusqu'à la fondation (adapté d'après Foster <i>et al.</i> [1998, 2000a].	13
1.4	Synthèse des différents modes d'application de la méthode d'IRE appliquée à l'auscultation des OHT présentant leurs objectifs, principes et limitations. ¹ Les méthodes capacitives permettent de s'affranchir du contact galvanique des électrodes. ² Le « roll-along » est une technique applicable à l'IRE permettant d'augmenter la rapidité de reconnaissance de la méthode. La technique de traçage à la saumure n'est pas incluse dans cette synthèse.	27
1.5	Synthèse d'informations <i>a priori</i> extraites des phases d'auscultation et apport de ces informations pour l'acquisition et le traitement des campagnes d'IRE de reconnaissance.	30
3.1	Synthèse des critères recherchés, accomplis ou non par quatre codes.	101
3.2	Synthèse de spécifications visées pour la création d'un nouveau code.	105
4.1	Synthèse des résultats obtenus sur des planches de matériaux	141
4.2	Synthèse des mesures de teneur en eau pondérale, de masse volumique sèche et humide et de taux de compactage réalisées lors du montage des couches de l'ouvrage au CER de Rouen. Le positionnement des mesures est illustré à la figure C.2 à l'Annexe C.	144
4.3	Caractéristiques des campagnes d'acquisition réalisées lors de l'infiltration en Zone 2 (nombre d'électrodes, code d'inversion, ...) et des méthodes d'inversion utilisées.	152
5.1	Synthèse des caractéristiques des mesures réalisées.	195
5.2	Synthèse des avantages et limitations des différentes stratégies d'imagerie en fonction de la robustesse et du coût appliqué à l'auscultation des OHT. ¹ Technique de normalisation des effets perturbateurs.	214

Notations

Au cours de ce travail de thèse un système de notations spécifique est utilisé. La liste suivante présente les notations et acronymes les plus couramment employés.

Notations Mathématiques

a : scalaire

\vec{a} : vecteur

A : champ scalaire

\mathbf{A} : champ vectoriel

\mathcal{A} : opérateur non-linéaire

$(\cdot)^T$: opérateur transposé

\mathbf{I} : matrice identité

$\|\cdot\|_2$: norme euclidienne d'un vecteur

$\frac{\partial}{\partial x}$: opérateur dérivée par rapport à x

∇A : gradient de A

$\nabla \cdot A$: divergent de A

$\nabla \times A$: rotationnel de A

Symboles Grecs et Latins

Électromagnétisme

B	Induction magnétique	T ou Wb.m^{-2}
D	Déplacement électrique	C.m^{-2}
E	Champ électrique	V.m^{-1}
H	Champ Magnétique	A.m^{-1}
J	Densité de courant électrique	A.m^{-2}
I	Intensité du courant électrique	A
V	Champ de potentiel	V
ρ	Résistivité électrique	$\Omega.\text{m}$
σ	Conductivité électrique	S.m
R	Résistance électrique	Ω
ρ	Densité volumique de charge électrique	C.m^{-3}
ε	Permittivité diélectrique	F.m^{-1}
ε_0	Permittivité diélectrique du vide	$\simeq 8.8510^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
δ	Distribution de dirac	m^{-3}

Méthode géo-électrique et Physique des sols

Φ	Porosité	%
A	Électrode d'injection de courant	
B	Électrode de puits de courant	
M	Électrode de mesure de potentiel électrique	
N	Électrode de mesure de potentiel électrique	
S_w	Saturation en eau	%
T	Température	$^{\circ}\text{C}$
ρ_a	Résistivité apparente	
ρ_d	Masse volumique sèche	kg.m^{-3}
ρ_w	Résistivité de l'électrolyte	$\Omega.\text{m}$
ω	Teneur en eau massique	%
θ	Teneur en eau volumique	%
k	Facteur géométrique	m.V^{-1}

Modélisation numérique

Ω	Domaine spatial étudié
Γ	Frontière du domaine Ω
Π	Fonctionnelle de la formulation variationnelle

Problème inverse

\mathcal{F}	Opérateur du problème direct	
\mathcal{F}^{-1}	Opérateur du problème inverse	
\mathcal{G}	Gradient de la fonction objectif	
\mathcal{H}	Hessien de la fonction objectif	
Ψ	Fonction objectif	
G ou S	Matrice des dérivées de Fréchet	$\frac{V}{\Omega.m}$
W	Matrice de pondération	
M	Nombre de paramètre du modèle	
N	Nombre de données	
C et L	Matrice de lissage du modèle	
m	paramètre du modèle	$\Omega.m$
d	données	V

Liste des acronymes et abréviations

nD : Nombre de dimensions (ex : $2D =$ deux dimensions)

BMC : Bassin de Mise en Charge

EI : Érosion Interne

EM-BF ou HF (méthodes) : ÉlectroMagnétiques - Basses Fréquences ou Hautes Fréquences

FP : Fonction de perte

GF : Goodness Function

InGEOHT : Inversion de campagnes Géo-Électriques réalisées sur les Ouvrages Hydrauliques en Terre

IRE : Imagerie de Résistivité Électrique

OHT : Ouvrages Hydrauliques en Terre

OPN : Optimum Proctor Normalisé

R_M : Matrice de résolution du modèle

ROI : Region Of Investigation

TDS : Total Dissolved Solids (Teneur en ions dissous)

Introduction

Contexte et Motivations

Les Ouvrages Hydrauliques en Terre (OHT) tels que les barrages en terre, les digues et les levées sont des infrastructures essentielles pour l'économie d'une nation. Source d'énergie, de transport et d'approvisionnement en eau, ces ouvrages participent aussi à la prévention d'aléas naturels tels que les inondations. Or, ces ouvrages sont victimes, chaque année dans le monde, de pathologies pouvant entraîner leur rupture. Le principal phénomène à l'origine de ces ruptures est l'érosion hydrique. En effet, l'eau associée à ces ouvrages exerce, ponctuellement lors d'épisodes de crues ou continuellement dans le cadre des barrages, une action érosive pouvant diminuer les caractéristiques mécaniques d'un ouvrage.

En France, 300 canaux d'amenée, couvrant un linéaire de plus de 500 km, sont exploités pour la production d'électricité. De plus, 7500 km de digues de protection protégeant plus de 15000 km² de zones inondables où vivent 2 millions d'habitants sont recensés. Pour ces ouvrages particuliers, il ne se passe quasiment pas une année sans rupture et plus de 70 incidents ont été recensés en 25 ans par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

Face à ces multiples enjeux, l'État ainsi que les responsables d'ouvrages doivent garantir la sûreté de leurs installations. Cette garantie passe par l'emploi d'une méthodologie de diagnostic impliquant des outils de reconnaissance et de surveillance des OHT. Dans le but d'améliorer continuellement le niveau de surveillance et de contrôle de santé de ses installations, la branche R&D (Recherche & Développement) de EDF (Electricité de France) développe actuellement des méthodes géophysiques permettant de détecter le phénomène d'érosion interne. En conséquence, afin de fournir une méthodologie complémentaire de reconnaissance et de surveillance des OHT, une méthode géophysique, l'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE), est évaluée dans le cadre de cette thèse. Cette méthode est sélectionnée pour sa sensibilité potentielle à l'érosion interne ainsi que pour ses capacités d'imagerie des sols et des ouvrages en terre. De plus, l'IRE offre l'opportunité d'intervenir de manière complémentaire de méthodes à grand rendement telles que les méthodes électromagnétiques permettant la reconnaissance exhaustive du parc existant. Elle permet aussi d'intervenir de manière complémentaire de méthodes plus fines permettant la surveillance de portions ciblées d'ouvrages telles que la méthode de thermométrie par fibre optique. Ainsi, le travail de thèse s'inscrit dans un contexte d'auscultation des ouvrages hydrauliques en terre par IRE.

L'IRE, dans son utilisation la plus conventionnelle, permet d'obtenir l'imagerie d'un fort linéaire d'ouvrage en employant des techniques *2D* d'acquisition et d'interprétation. Cet emploi nécessite de disposer une ligne d'électrodes espacées régulièrement en crête, sur la pente (amont ou aval)

ou en pied de talus. Afin d'obtenir une reconstruction à partir de données mesurées indirectement (en surface), le processus nécessite la résolution du « problème inverse ». La réalisation de campagnes « 2D » d'imagerie permet à la fois de limiter le coût d'intervention et d'inversion des mesures mais aussi d'améliorer la sous-détermination du problème inverse. En effet, une campagne d'auscultation conventionnelle 3D ne peut être jugée économiquement viable que pour l'auscultation de portions très ciblées d'ouvrages. De plus, l'inversion géo-électrique 3D entraîne une augmentation du nombre de degrés de liberté de l'inversion ne pouvant être compensée que par une acquisition « 3D » de données.

Les traitements conventionnels 2D émettent l'hypothèse que le milieu ne varie pas dans le sens transversal à l'ouvrage. Ainsi, l'application conventionnelle des méthodes d'imagerie géo-électriques à l'auscultation des OHT ne permet pas de prendre en compte des effets 3D perturbateurs qu'ils soient internes à l'ouvrage (présence d'un noyau étanche) ou externes (présence d'un réservoir d'eau) à l'ouvrage. Dans le cadre de l'auscultation des OHT, cette hypothèse est naturellement fautive générant ainsi des artefacts (structures présentes dans le résultat d'imagerie mais absente dans le sous-sol). Ce défaut soulève des questions quant à la fiabilité des reconstructions obtenues et donc sur la qualité des interprétations réalisées. Ce contexte mène à la problématique de la thèse :

Comment fiabiliser et améliorer l'utilisation de l'IRE pour l'intégrer dans une méthodologie pertinente d'auscultation des OHT ?

En conséquence, l'objectif de ce travail ne réside pas dans l'augmentation de la finesse du résultat d'IRE mais dans une réécriture du problème permettant d'augmenter la fiabilité des reconstructions. Afin de répondre à cette problématique, plusieurs hypothèses de travail doivent être formulées.

Hypothèses de recherche

Afin de répondre à la problématique de la thèse, trois hypothèses de travail sont formulées. Le travail de thèse doit vérifier ces hypothèses en les validant ou en les invalidant :

- hypothèse I. la méthode IRE-2D dans son utilisation conventionnelle permet de répondre de manière pertinente à l'objectif d'auscultation des OHT ;
- hypothèse II. la fiabilité d'une reconstruction peut être augmentée en améliorant/adaptant des outils de traitement de l'information ;
- hypothèse III. la méthodologie d'acquisition peut être modifiée afin d'apporter une réponse plus pertinente à l'objectif de sûreté des ouvrages hydrauliques en terre.

Démarche de recherche

La démarche intellectuelle visant à répondre aux hypothèses de recherche peut être résumée sous forme de quatre jalons à valider :

- Démarche I. déterminer la problématique spécifique à l'auscultation des OHT par méthode géo-électrique et plus particulièrement les paramètres de biais intervenant dans le traitement de l'information ;

- Démarche II. réaliser un outil d'inversion robuste permettant de répondre à la problématique et d'intégrer explicitement les biais et l'information *a priori* disponible ;
- Démarche III. façonner des outils expérimentaux de confrontation et de validation des développements méthodologiques ;
- Démarche IV. tester les méthodologies développées au cours de la thèse sur des ouvrages semi-contrôlés et sur des ouvrages réels ;

Cette démarche de recherche doit permettre d'améliorer la réponse actuellement donnée pour l'auscultation des ouvrages hydrauliques en terre par imagerie de résistivité électrique. Dans le cadre de ce travail de thèse, cette démarche est abordée au travers de cinq chapitres.

Structure du manuscrit chapitre par chapitre

Le travail de thèse est présenté en cinq chapitres :

- le chapitre 1 définit tout d'abord la notion d'ouvrage hydraulique, la problématique sociétale associée et les différentes pathologies pouvant affecter les OHT. Ensuite, les méthodologies d'auscultation existantes et plus spécifiquement les méthodes d'auscultation géophysiques sont détaillées. Enfin, le choix de la méthode d'IRE dans cette méthodologie est argumenté.
- le chapitre 2 a pour vocation de présenter l'IRE ainsi que les bases techniques utilisées pour la conception d'un nouveau code d'inversion nommé InGEOHT (**I**nversion de mesures **G**éo-**E**lectrique provenant d'**O**uvrages **H**ydrauliques en **T**erre). Tout d'abord, les principes théoriques et pratiques liés à l'utilisation de la méthode géo-électrique sont présentés. Ensuite, une section est dédiée aux méthodes permettant la résolution du problème direct ainsi qu'aux choix d'implémentation réalisés durant la thèse. Enfin, un aperçu des méthodes permettant la résolution des problèmes inverses est présenté. Au travers de chacune de ces sections, des parties plus synthétiques seront dédiées à la problématique de l'auscultation des OHT.
- l'objectif du chapitre 3 est de présenter plusieurs travaux, développés et implémentés au cours de la thèse, pouvant améliorer la méthodologie d'auscultation des OHT par IRE. Ces développements ont pour objectif de fournir une méthodologie plus pertinente et plus fiable d'auscultation en améliorant : (i) l'acquisition (optimisation du placement des électrodes), (ii) le traitement de l'information (création de stratégies entre $2D$ et $3D$) et (iii) l'interprétation des reconstructions (application de techniques existantes $2D$ à des modèles $3D$).
- le chapitre 4 présente les résultats d'une étude sur un ouvrage expérimental semi-contrôlé réalisé au cours de la thèse. Cet ouvrage a pour premier objectif de permettre la validation de l'utilisation de l'IRE pour la détection d'infiltration progressive dans son utilisation conventionnelle. Le second objectif est de tester l'utilisation et l'apport des stratégies d'inversion présentées au cours du chapitre 3.

- l'étude présentée au niveau du chapitre 5 a pour objectif de dépasser le défaut de représentativité lié à l'expérimentation précédente. En effet, une expérimentation réalisée sur un ouvrage semi-contrôlé ne peut être complètement représentative de la complexité réelle d'un ouvrage hydraulique et des complications liées à l'acquisition. C'est pourquoi, plusieurs des développements réalisés au cours de la thèse sont appliqués à l'auscultation d'un ouvrage réel afin de tester et valider l'utilisation de stratégies entre $2D$ et $3D$.

La conclusion de ce travail vise à présenter un bilan des travaux réalisés, une synthèse des travaux en cours et enfin des suggestions pour les travaux futurs.

Chapitre 1

Contexte des ouvrages hydrauliques en terre et auscultation

Contents

1.1	Les ouvrages hydrauliques	6
1.1.1	Détail des ouvrages hydrauliques et réglementation	6
1.1.2	Gestion des OHT et réglementation	8
1.2	Les phénomènes à l'origine de la rupture	10
1.2.1	Le glissement de talus	10
1.2.2	La surverse	10
1.2.3	L'érosion interne	11
1.2.4	Synthèse et application	13
1.3	Méthodologies et techniques d'auscultation des OHT	14
1.3.1	Les études de reconnaissance et de surveillance traditionnelles	15
1.3.1.a	Les outils de reconnaissance traditionnels	15
1.3.1.b	Les outils de surveillance traditionnels	18
1.3.2	Les méthodes géotechniques	19
1.3.2.a	Les méthodes in situ	19
1.3.2.b	La caractérisation en laboratoire	19
1.3.3	Les méthodes géophysiques	20
1.3.3.a	Place de la géophysique dans la méthodologie globale d'auscultation	21
1.3.3.b	Sensibilité des méthodes géophysiques à l'érosion interne	23
1.3.3.c	L'Imagerie de Résistivité Électrique	25
1.3.3.d	Synthèse des méthodes géophysiques et apports pour l'IRE	28
1.3.4	Place de l'IRE dans une démarche globale d'auscultation	29
1.4	Conclusion	29

Introduction

L'eau est pour l'homme un élément fondamental, ressource vitale, vecteur de transport, et risque naturel. Face à cette multitude d'enjeux, l'Homme, de tout temps et de toute civilisation, a essayé de domestiquer l'eau pour la conserver, l'utiliser ou s'en protéger en période de crue. Les digues et les barrages font partie des ouvrages hydrauliques réalisés par l'Homme afin de gérer les

ressources en eau et d'en tirer les plus grands bénéfices. Pour exemple, le stockage d'un grand volume d'eau, nommé capacité, par des ouvrages hydrauliques artificiels coupant un cours d'eau peut être utilisé pour :

- l'irrigation des cultures : de nos jours l'irrigation concerne environ 270 millions d'hectares, soit un cinquième de la surface cultivée totale, nécessitant la construction de barrages [Cfbr, n.d.] ;
- l'alimentation en eau des villes ;
- la production de l'électricité : l'énergie hydroélectrique, avec une production de 2100 Twh, représente 20 % de la production électrique totale et 7 % environ de l'énergie consommée dans le monde [Cfbr, n.d.] ;
- la navigation : un barrage peut permettre le détournement d'une partie du débit d'un cours d'eau pour alimenter un canal constituant un moyen de transport particulièrement économe en dépense énergétique ;
- la régulation des cours d'eau : pour éviter les inondations en aval, un barrage emmagasine la partie des eaux la plus dommageable en période de crue afin de la restituer en période plus favorable ;
- le tourisme et les loisirs.

En France, EDF gère un important parc d'ouvrages hydrauliques en terre dédié à la production hydroélectrique, avec des enjeux économiques et sécuritaires conséquents. Parmi ces ouvrages, plus de 300 canaux représentant un linéaire de plus de 500 km sont répertoriés [Perez, n.d.]. Concernant les ouvrages de protection contre les inondations, 7 500 km de digues protégeant plus de 15 000 km² de zones inondables où vivent 2 millions d'habitants sont recensés. Pour ces ouvrages particuliers, il n'y a pratiquement pas d'année sans rupture et plus de 70 incidents ont été recensés en 25 ans par le CFBR [Cfbr, n.d.].

1.1 Les ouvrages hydrauliques

La complexité et la variété du parc d'ouvrages hydrauliques français, du fait des risques sociétaux importants, nécessite une gestion rigoureuse et pertinente. Cette gestion implique un recensement et une compréhension précise des ouvrages. C'est pourquoi avant de détailler la problématique spécifique de la thèse, un rappel du contexte, des définitions et un état des lieux des ouvrages sont réalisés.

1.1.1 Détail des ouvrages hydrauliques et réglementation

Les ouvrages hydrauliques peuvent être classés en deux catégories. La première catégorie comprend les ouvrages en maçonnerie. L'objet de la thèse ne porte pas sur cette catégorie d'ouvrages, mais sur la seconde catégorie comprenant les ouvrages hydrauliques en terre (OHT), construits avec des matériaux meubles.

Aujourd'hui le nombre d'OHT de plus de 15 m de haut en service dans le monde est de plus de 30 000 contre seulement un millier avant 1900 [Cfbr, n.d.]. Afin d'assurer leur sécurité, trois exigences fondamentales doivent être respectées par de tels ouvrages [Cfbr, n.d.] :

- ils ne doivent pas être submergés par une crue ;
- les infiltrations ne doivent pas provoquer d'érosion interne ;

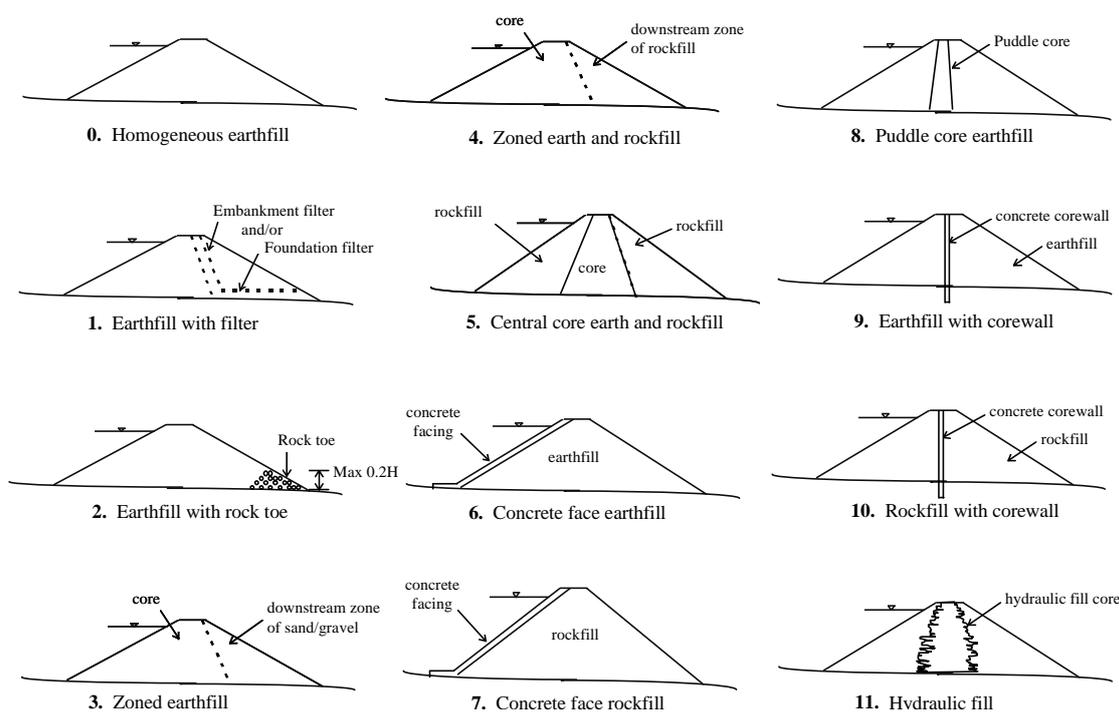


FIGURE 1.1 – Illustration de douze typologies d'ouvrages hydrauliques en terre. d'après Foster et al. [2000a].

- les talus doivent respecter une pente telle qu'ils ne glissent pas.

Suite à l'application de ces trois principes, plusieurs catégories d'OHT peuvent être distinguées. À cet effet la figure 1.1 illustre douze catégories d'OHT. Ainsi, les ouvrages de type homogène sont différenciés des ouvrages zonés de conception plus moderne où les fonctions principales sont assurées par des matériaux distincts. Pour les ouvrages homogènes (catégorie 0, figure 1.1), le matériau utilisé permet d'assurer l'étanchéité. Lorsque cette condition n'est pas satisfaite un revêtement imperméable peut être ajouté afin d'assurer l'étanchéité (catégorie 6 et 7). Dans le cadre des ouvrages zonés, l'étanchéité est assurée soit par une zone centrale constituée d'argile appelée noyau (catégorie 5), soit par une couverture nommée masque posée sur le parement. La stabilité est assurée par des massifs de recharge constitués de matériaux plus perméables que le noyau (graviers, terre grossière, enrochement). La filtration, évitant l'érosion interne est assurée par des filtres.

« En France, le régime général qui s'applique aux barrages et aux digues est celui de la police de l'eau et des milieux aquatiques qui repose sur le loi 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau et codifiée au Code de l'environnement, notamment aux articles L214-1 et suivant. Cela concerne tous les ouvrages hydrauliques autres que ceux concédés au titre de la loi du 16 octobre 1919 relative aux barrages liés à des aménagements hydroélectriques de puissance supérieure à 4500 kW » [Royet, 2006]. Le décret du 11 décembre 2007 et la circulaire du 8 juillet 2008 codifiés aux articles R214-12 à R214-17 du Code de l'environnement définissent spécifiquement les digues et les barrages :

- les digues sont des ouvrages de protection contre les inondations fluviales, des digues de protection contre les submersions marines, des digues de rivières canalisées et des digues

de protection sur les cônes de déjection des torrents.

- « Sont considérés comme barrages de retenue [...], les ouvrages suivants qu'ils soient ou non sur un cours d'eau, sous réserve que leur hauteur soit supérieure ou égale à 2 m et qu'ils retiennent l'eau, de façon permanente ou non permanente » [Royet, 2006] :
 - les barrages pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation, les loisirs, la gestion des crues ou des étiages ;
 - les barrages écrêteurs de crues ;
 - les ouvrages de ralentissement dynamique stockant l'eau pendant les crues ;
 - les barrages en terre ;
 - les retenues collinaires ;
 - les digues de canaux ;
 - les barrages au fil de l'eau, dits de navigation et les écluses.

1.1.2 Gestion des OHT et réglementation

Le retour d'expérience au niveau international des accidents est assuré par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB). Au niveau mondial, sur un ensemble de 17 500 barrages construits avant 1986, 105 ruptures sont relevées [Barthelemy *et al.*, 2004]. Pour les digues de protection contre les inondations, les problèmes rencontrés sont principalement liés aux conditions de construction des digues. Les difficultés résident dans l'ancienneté des ouvrages et des rehaussements successifs. Les digues les plus anciennes ont pour la plupart été construites avec des matériaux trouvés sur place et sans moyen de compactage efficace. Il en résulte une grande hétérogénéité des ouvrages [CERTU, 2004].

L'article R214-112 du code de l'environnement définit une classification des digues (et des barrages de retenue et digues de canaux) selon leurs caractéristiques géométriques. Les classes de digues de protection contre les inondations, présentées dans le tableau 1.1, sont définies selon :

- la hauteur de l'ouvrage « H » (en mètre) définie la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel du côté de la zone protégée à l'aplomb de ce sommet ;
- la population protégée « P » exprimée en nombre d'habitants résidant dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières.

TABLE 1.1 – Classification des digues (et barrages de retenue et des digues de canaux) selon l'article R214-112.

Classe de l'ouvrage	Caractéristiques de l'ouvrage et populations protégées
A	Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $P \geq 50000$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H \geq 1$ et $1000 \leq P < 50000$
C	Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1000$
D	Ouvrage pour lequel soit $H < 1$, soit $P < 10$

Cette classification est utilisée afin d'établir un suivi des ouvrages. La table 1.2 illustre un exemple des recommandations imposées aux propriétaires en fonction de la classification précédente.

Ainsi, la nouvelle réglementation, considérant la possible dangerosité des digues, se base sur la population résidant dans la zone protégée pour classer les digues et distinguer le niveau des

TABLE 1.2 – Liste d'actions et d'obligations liées aux différentes classifications de digues, d'après MISE [2009].

	A	B	C	D
Examen du CTPBOH du projet ou de la modification	oui Obligatoire pour les avant-projets, projets, les modifications, l'étude de dangers et les révisions spéciales	non	non	non
Étude de dangers par un organisme agréé	oui 31/12/2012 10 ans	oui 31/12/2014 10 ans	oui 31/12/2014 10 ans	non
Actualisation				
Revue de sûreté	oui 5 ans après mise en eau 10 ans	oui 5 ans après mise en eau 10 ans	non	non
Fréquence				
Dossier de l'ouvrage	oui	oui	oui	oui
Registre de l'ouvrage	non	non	non	non
Surveillance et entretien	oui	oui	oui	oui
Rapport de surveillance	oui 1 an	oui 5 ans	oui 5 ans	/
Fréquence				
Dispositif d'auscultation	/	/	/	/
Visite Technique Approfondie	oui 1 an	oui 1 an	oui 2 ans	oui 5 ans Pas de transmission au Préfet
Fréquence				
Déclaration au Préfet de tout évènement pouvant mettre en cause la sécurité publique	oui	oui	oui	oui
Diagnostic de sûreté dit Révision spéciale	Possible	Possible	Possible	Possible
Soumis au CTPBOH	Obligatoire	Possible	Possible	Possible

obligations d'entretien et de surveillance [Doligé, 2010].

1.2 Les phénomènes à l'origine de la rupture

Au cours de la vie d'un ouvrage, de nombreuses pathologies peuvent en modifier le comportement mécanique et mener à terme à sa rupture. La compréhension des différentes pathologies fragilisant les OHT, présentée dans ce travail de thèse, s'est essentiellement basée sur les travaux de Cyrille Fauchard et Patrice Mériaux et de Mark Foster, Robin Fell *et al.* [Foster, 1999a; Foster & Fell, 1999b; Foster *et al.*, 2000a; Fell *et al.*, 2003; Fauchard & Mériaux, 2004; Fell *et al.*, 2004; Fell & Fry, 2007]. Dans le cadre de leurs travaux Foster *et al.* [1998, 2000b] présentent une étude statistique complète réalisée sur plus de 10 000 barrages. Parmi ces barrages, 136 ruptures sont enregistrées comprenant 128 ruptures dont l'origine est identifiée. Ces 128 cas identifiés peuvent être différenciés selon les pathologies à l'origine des ruptures [Foster *et al.*, 1998, 2000a] :

- i). la surverse représentant 48 % des ruptures identifiées ;
- ii). l'érosion interne représentant 46.5 % des ruptures identifiées ;
- iii). le glissement de talus représentant 6 % des ruptures identifiées ;
- iv). le tremblement de terre représentant 1.5 % des ruptures identifiées.

Une rupture pouvant être la conséquence de plusieurs pathologies, le total des statistiques dépasse 100 % [Foster *et al.*, 1998, 2000a]. En conséquence, dans le cadre des barrages et d'un point de vue statistique, les phénomènes de surverse et d'érosion interne se produisent majoritairement (≈ 95 % des cas identifiés). Afin de mieux identifier la cause des ruptures d'ouvrages, une légère synthèse des différentes pathologies est présentée.

1.2.1 Le glissement de talus

D'après Fauchard & Mériaux [2004] : « le risque de glissement du talus côté val apparaît lorsque la digue est saturée (crue suffisamment longue) ». De plus Fauchard & Mériaux [2004] indique quatre facteurs pouvant favoriser l'apparition du phénomène : le dimensionnement des pentes de talus (supérieures à 2/3), l'absence de drainage, la présence de couches hétérogènes et la faible compacité des matériaux de remblai. Dans certain cas, ce phénomène peut être rapproché du phénomène d'affouillement [Mériaux *et al.*, 2004] : « une érosion du pied est provoquée par les effets des courants hydrauliques conduisant à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques du corps de remblai et un raidissement de la pente du talus ».

1.2.2 La surverse

Le phénomène de surverse se produit lorsque le niveau du fleuve ou du réservoir déborde la crête de l'ouvrage et entraîne une inondation du val. Ce débordement conduit généralement à une érosion du parement et des matériaux en pied de digue contribuant à l'imprégnation du corps de la digue et menant rapidement à la rupture de l'ouvrage. La force du courant crée une fosse d'érosion coté val et la brèche s'élargit en érodant la digue de part et d'autre [Mériaux *et al.*, 2004]. Dans le cadre des ouvrages à charge permanente, l'origine de la surverse provient d'un mauvais dimensionnement de la capacité des ouvrages (75 % des cas) ou d'un dysfonctionnement de l'ouvrage (25 % des cas) [Foster *et al.*, 2000a]. Dans le cadre des ouvrages hydrauliques de type levée, le phénomène de surverse provient d'un mauvais dimensionnement de la hauteur de

l'ouvrage face à un épisode de crue [Fauchard & Mériaux, 2004]. En conséquence, la surverse est liée à des phénomènes très ponctuels menant presque irrémédiablement à la rupture de l'ouvrage. Ces caractéristiques ne permettent pas une détection de ce phénomène, c'est pourquoi cette pathologie ne sera pas étudiée dans le cadre de cette thèse.

1.2.3 L'érosion interne

Statistiquement, l'érosion interne représente une des causes majeures de rupture d'ouvrage [Fell & Fry, 2007]. L'érosion est définie par la complétion de deux critères : l'arrachement et le transport d'une particule ou d'un amas de particules. Dans le cadre de l'érosion interne, ce procédé nécessite un écoulement dont la vitesse est suffisante pour détacher les particules du sol. En conséquence, la nature du sol détermine sa vulnérabilité à l'érosion [Fell & Fry, 2007]. D'après Fell & Fry [2007] les sols peuvent être divisés sous forme de trois classes : les sols cohésifs, les sols non-cohésifs et les sols dispersifs. Le processus d'érosion interne quant à lui peut être séparé en quatre phases [Fell & Fry, 2007] illustrées à la figure 1.2 :

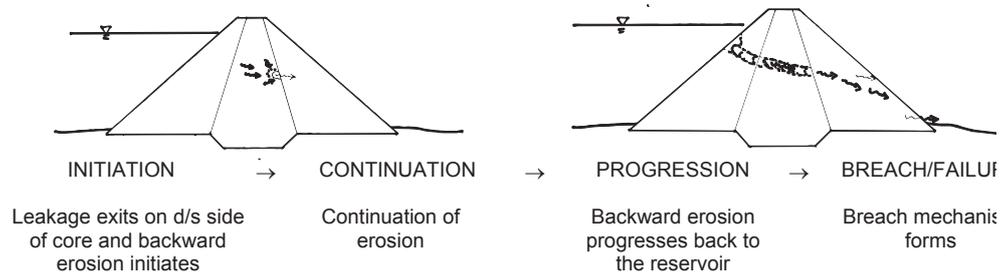
- L'initiation : Cette phase se manifeste quand un phénomène de détachement de particules apparaît. Quatre mécanismes sont à l'origine de cette phase, souvent appelés typologies d'érosion interne :
 - la fuite concentrée (figure 1.2(b)) ;
 - l'érosion régressive (figure 1.2(a), 1.2(c) et 1.2(d)) ;
 - l'érosion de contact ;
 - la suffusion¹ ou suffosion ;
- La continuité de l'érosion : Cette phase dépend de la présence dans le barrage de filtres et de zones de drainage construits en respectant les critères de construction des filtres. en l'absence de ces filtres ou de caractéristiques d'autofiltration, la continuité mène au troisième stade du phénomène.
- La progression : Cette phase conduit à la formation d'un renard² par fuite concentrée ou érosion régressive. D'un point de vue temporel, cette phase si elle se maintient mène rapidement à la dernière phase du processus.
- La rupture : C'est la phase finale du processus d'érosion interne pouvant induire la rupture quasi-totale de l'ouvrage hydraulique.

D'un point de vue « auscultation », il est intéressant de pouvoir connaître à la fois la position de la pathologie et l'effet du phénomène sur les propriétés d'états de l'ouvrage. Cette connaissance pouvant ainsi former une « signature » de la pathologie, apportant des critères de détectabilité. D'après Fell & Fry [2007], les accidents et les ruptures par érosion interne peuvent être catégorisés en trois modes généraux, illustrés à la figure 1.2 :

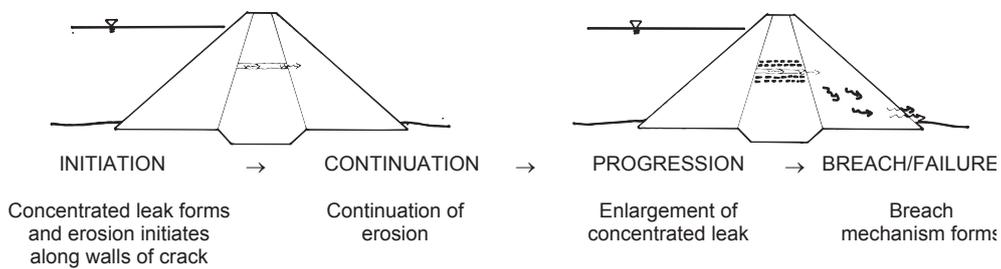
- Érosion interne à travers le remblai (figure 1.2(a) et 1.2(b)) ;
- Érosion interne à travers la fondation (figure 1.2(c)) ;
- Érosion interne depuis le remblai jusqu'à la fondation (figure 1.2(d)) ;

1. phénomène d'érosion des particules fines d'un matériau lié à la circulation d'un fluide dans l'espace poral.

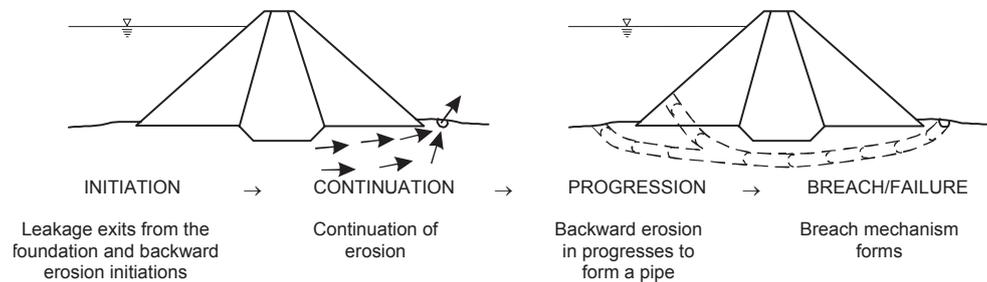
2. conduit de forme cylindrique ou approchant reliant le réservoir d'eau amont et la partie aval de la digue.



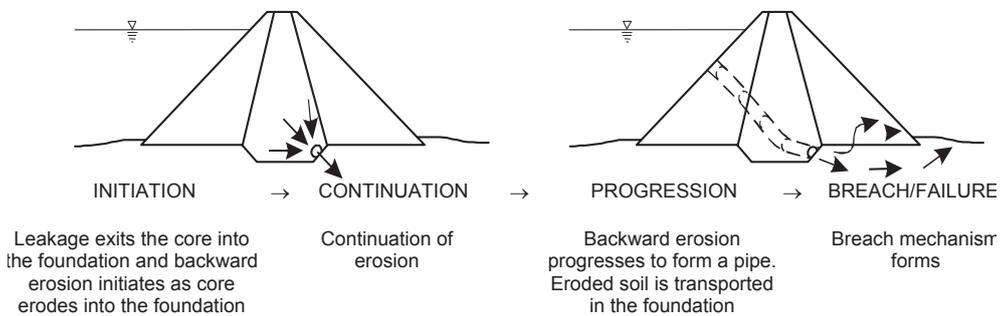
(a) Érosion interne à travers le remblai initiée par une érosion régressive



(b) Érosion interne à travers le remblai initiée par une fuite concentrée



(c) Érosion interne dans la fondation initiée par une érosion régressive



(d) Érosion interne depuis le remblai jusqu'à la fondation initiée par une érosion régressive

FIGURE 1.2 – Illustration de deux typologies d'érosion interne (l'érosion régressive et la fuite concentrée) menant à la formation d'un renard hydraulique se produisant par le biais de trois modes généraux de rupture (à travers le remblai, à travers la fondation, depuis le remblai jusqu'à la fondation), d'après Foster & Fell [1996].

Partant de cette classification en trois modes, la table 1.3 présente une synthèse de différentes statistiques d'occurrence du phénomène d'érosion interne en fonction de la localisation de celle-ci et du moment de l'incident.

TABLE 1.3 – Nombre d'accidents (*A*) et de ruptures (*R*) répertoriés en fonction de l'instant d'apparition de l'érosion à travers le remblai, à travers la fondation et depuis le remblai jusqu'à la fondation (adapté d'après Foster et al. [1998, 2000a]).

Instant de l'incident	À travers le remblai				À travers la fondation				Depuis le remblai jusqu'à la fondation			
	No. de cas		% de cas		No. de cas		% de cas		No. de cas		% de cas	
	R	A	R	A	R	A	R	A	R	A	R	A
À la construction	1	0	2	0	1	0	5	0	0	0	0	0
Au 1 ^{er} remplissage	24	26	48	26	4	23	20	30	2	6	50	20
Durant 5 ans	7	13	14	13	10	19	50	24	2	8	50	27
Après 5 ans	18	60	36	61	5	36	25	46	0	16	0	53
Inconnu	1	3	-	-	1	7	-	-	0	1	-	-
Total	51	102			21	85			4	31		

Les statistiques les plus importantes sont mises en avant en gras. Ainsi, la majorité des phénomènes se produisent à travers le remblai (67 % des ruptures et 47 % des accidents) puis à travers la fondation (28 % des ruptures et 39 % des accidents) et enfin depuis le remblai jusqu'à la fondation (5 % des ruptures et 14 % des accidents). Le risque principal est : la rupture au premier remplissage de la retenue. Ce risque est notamment important pour les barrages en remblai où la première mise en eau est une phase particulièrement critique.

La présence de ce phénomène ne provient pas d'un mauvais dimensionnement des ouvrages (cas de la surverse) mais d'une érosion liée à la ressource hydrique qu'elle exploite. L'érosion interne, est la résultante d'un processus long modifiant graduellement les propriétés mécaniques de l'ouvrage. C'est pourquoi, du point de vue de la reconnaissance et de la surveillance des OHT, il est pertinent de se concentrer sur ce phénomène. En conséquence, dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons à la détection de l'érosion interne ainsi qu'aux phénomènes associés.

1.2.4 Synthèse et application

L'érosion interne est une pathologie complexe dont les indices et traces de son action sont effacés par son passage. Cependant, plusieurs études indiquent, d'un point de vue statistique, que certaines pathologies se produisent préférentiellement à d'autres (surverse et érosion interne). Ce type d'indice est particulièrement important car informe sur les profondeurs d'investigation à atteindre ainsi que sur la position des éventuelles pathologies. Ces statistiques montrent notamment l'importance de caractériser l'interface entre le remblai et la fondation (pouvant être un siège préférentiel de l'érosion). En conséquence, les méthodes d'auscultation doivent permettre une reconnaissance *a minima* de tout le corps de remblai ainsi que d'une partie de la fondation.

Chacune de ces typologies d'érosion se présente préférentiellement dans une à deux des trois

classes de sols présentées précédemment. Ainsi, en émettant l'hypothèse qu'un sol cohésif puisse être différencié (d'un point de vue géophysique) d'un sol non cohésif (principe de la signature), une prospection géophysique doit permettre de déterminer des tronçons (ou volumes) d'ouvrages à risque par rapport à une typologie d'érosion interne.

1.3 Méthodologies et techniques d'auscultation des OHT

De manière générale, tout ouvrage présente un risque lié à son utilisation. En conséquence, les responsables d'ouvrages doivent réaliser un certain nombre d'études afin de garantir leur sécurité. Ainsi, établir une méthodologie complète de diagnostic de sureté est un point crucial permettant de coordonner les auscultations afin d'optimiser l'acquisition d'informations. À cet effet, les travaux de [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) ont montré que cette démarche pouvait être séparée en quatre étapes. Dans le cadre plus précis des ouvrages en charge, [Fell & Fry \[2007\]](#) définissent un cadre de travail en huit étapes permettant d'évaluer le risque d'érosion interne.

Cependant, avant de reprendre plus en détail une méthodologie d'auscultation, il est important de se poser les questions suivantes :

- *Quelles grandeurs physiques faut-il mesurer pour le diagnostic des OHT ?*
- *Quelles méthodes d'auscultation permettent d'atteindre ces grandeurs ?*
- *Quels sont la fiabilité et le rendement de ces méthodes ?*

Il n'existe pas de réponse exacte, unique et générale à ces questions. C'est pourquoi, à travers la présentation des grandes familles d'auscultation, ces points seront abordés avec une application plus particulière pour les méthodes géophysiques.

Il existe un large panel d'outils permettant d'apporter des informations sur les caractéristiques d'un ouvrage. Cependant, il est important de réaliser la distinction entre :

- le besoin de méthodes pouvant couvrir rapidement un linéaire important d'ouvrage afin de réaliser un état des lieux du parc d'OHT ;
- le besoin de méthodes fines pour l'inspection de portions ciblées d'ouvrages.

Ces deux catégories peuvent être scindées en deux modes d'application :

- la reconnaissance : impliquant un aperçu des caractéristiques physiques et mécaniques à un instant donné³ ;
- la surveillance : impliquant l'étude en variation temporelle de l'évolution de l'ouvrage.

Les techniques d'auscultation permettent d'apporter un certain nombre d'indices concernant la sureté des ouvrages. De plus, le caractère complémentaire de certaines méthodes permet d'obtenir des informations supplémentaires. En conséquence, des démarches globales d'auscultation doivent être employées afin d'optimiser la collecte d'information. La méthodologie étudiée dans le cadre de ce travail de thèse est issue des travaux de [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#). Elle est sélectionnée du fait de la place importante attribuée aux techniques d'auscultation et implique quatre phases d'études hiérarchisées (figure 1.3) :

3. Dans le cadre de ce travail de thèse, le terme « en absolu » est aussi employé pour désigner ce mode d'application.

- i). les études de reconnaissance et de surveillance traditionnelles ;
- ii). les reconnaissances géophysiques ;
- iii). les reconnaissances géotechniques ;
- iv). le diagnostic de sécurité.

Cette méthodologie est optimisée pour le diagnostic des ouvrages de protection contre les crues. La problématique liée à cette auscultation implique la reconnaissance de grands linéaires d'ouvrages. En effet, du fait à la fois de l'importance de ce linéaire (supérieur à 7000 km en France) et de l'état inégal de ces ouvrages, seules les méthodes de reconnaissances géophysiques et géotechniques (à la différence des méthodes de surveillance) sont incluses dans cette méthodologie.

Le travail de cette section consiste à décrire la place des différentes méthodes et leur apport dans la méthodologie globale d'auscultation. Ainsi, ce travail de thèse ne s'attarde pas sur la description des techniques d'auscultation, mais cherche à identifier pour chaque méthode son étape d'intervention et sa contribution à la démarche globale d'auscultation. Plus spécifiquement, il s'agit d'identifier comment ces méthodes d'auscultation peuvent contribuer à améliorer l'utilisation de la méthode d'IRE. En effet, la problématique de thèse portant sur l'amélioration de la méthode IRE, il est nécessaire d'identifier comment l'insérer « au mieux » dans une méthodologie générale d'auscultation.

1.3.1 Les études de reconnaissance et de surveillance traditionnelles

D'après [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) et [Royet \[2006\]](#), cette première phase, extrêmement importante, consiste à : « recueillir le plus d'information possible concernant l'histoire de la digue, ses caractéristiques extérieures (topographie) et le système dans lequel elle s'intègre (géologie locale et dynamique du cours d'eau) ». Or, les méthodes géophysiques d'auscultation ont besoin de ces informations. Cette phase est donc la condition initiale nécessaire aux études géophysiques et géotechniques des phases suivantes [[Fauchard & Mériaux, 2004](#)]. Les indices issus de cette phase peuvent être séparés en (i) une sous-phase de reconnaissance et (ii) une sous-phase de surveillance.

1.3.1.a Les outils de reconnaissance traditionnels

Les travaux réalisés par [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) illustrent que cette phase préalable de récolte d'information peut être scindée en au moins trois groupes d'indices :

- la recherche d'archives et de registres ;
- la réalisation d'une campagne topographique ;
- l'étude géologique.

La recherche d'archives et de registres permet de :

- i). déterminer la position des accidents historiques ou récents documentés ;
- ii). recenser et localiser les repères de crues historiques ;
- iii). localiser les zones de prélèvement de matériaux utilisés pour la construction de l'ouvrage ;
- iv). situer les zones de prélèvement de matériaux utilisés pour le comblement des brèches ;
- v). récupérer des documents utilisables pour le positionnement des inspections futures ;

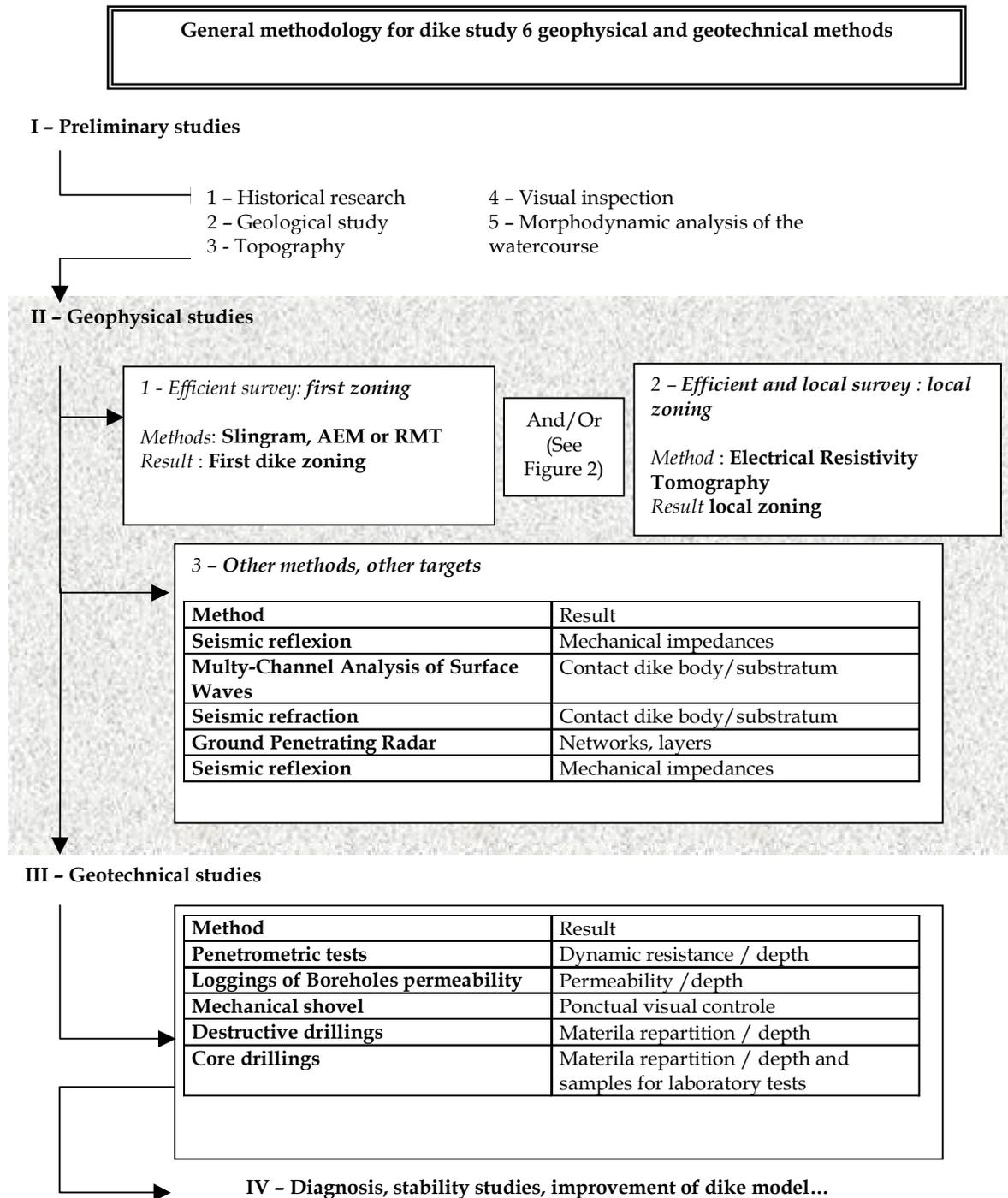


FIGURE 1.3 – Méthodologie générale d’auscultation des ouvrages hydrauliques en terre proposée en 2007 par le Projet National CriTerre [Fauchard & Mériaux, 2007].

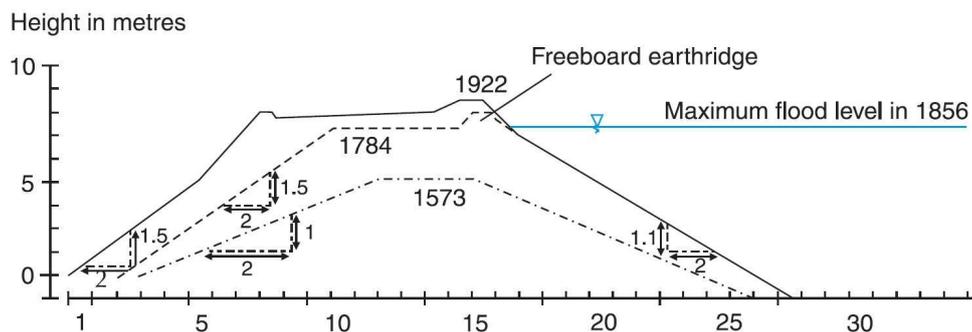


FIGURE 1.4 – Exemple d'archive historique d'une levée de la Loire (France). D'après [Fauchard & Mériaux \[2007\]](#) modifié depuis [Dion \[1961\]](#).

- vi). obtenir des plans de conception des ouvrages hydrauliques en charge.

Contribution à l'IRE : cette étude fournit un certain nombre d'indices permettant de détecter les zones de faiblesse et ainsi de cibler plus précisément les futures auscultations. Pour le cas plus spécifique des OHT en charge, les registres de construction et d'entretien sont généralement disponibles (plans topographiques et localisation des pathologies passées) et permettent l'implantation des auscultations. De plus, les technologies récentes d'auscultation [[Bolève, 2009](#); [Fargier et al., 2011b](#)] nécessitent d'intégrer dans le traitement des mesures, des informations sur la géométrie des OHT ainsi que sur leur constitution. La figure 1.4 schématise le type d'information que l'on peut récolter par le biais de la recherche d'archives. Ce type d'information (géométrie, épaisseur des couches de matériaux) permet ainsi d'améliorer l'acquisition, le traitement et l'interprétation de la méthode d'IRE.

La réalisation d'une campagne topographique a pour objectifs [[Fauchard & Mériaux, 2004](#)] :

- i). d'établir le profil en long de la crête de digue afin d'évaluer et localiser les risques de surverse en période crue ;
- ii). de préciser les profils en long et en travers de la digue pour faciliter à la fois le report d'informations des inspections visuelles et l'implantation des auscultations géotechniques et géophysiques ;
- iii). de fournir un outil de gestion et de maintenance de la digue (support de l'inspection visuelle, repérage des sondages géotechniques).

Contribution à l'IRE : en plus de faciliter une implantation rigoureuse des études d'IRE, cette étude peut être utilisée « directement » par les outils récents d'auscultation pour créer des modèles 2D ou 3D des OHT. En effet, l'intégration de la topographie permet d'améliorer considérablement le traitement des mesures [[Fox et al., 1980](#); [Tong & Yang, 1990](#); [Loke, 2011](#)] et/ou l'interprétation des résultats.

Enfin **l'étude géologique** doit permettre :

- i). d'identifier les matériaux avec ou sur lesquelles l'OHT est construit ;
- ii). de déterminer la profondeur du substratum et/ou de la fondation ;

iii). de définir les éventuelles variations de faciès du substratum.

Contribution à l'IRE : Cette information est particulièrement intéressante lorsque les logiciels de traitement de l'information permettent d'imposer une plage de variation de résistivité aux milieux reconstruits [Günther *et al.*, 2006; Loke, 2011]. La possibilité d'imposer cette contrainte permet ainsi d'améliorer considérablement le résultat. Enfin, la mise à disposition d'un extrait de carte géologique renseigné doit permettre d'améliorer considérablement l'interprétation des résultats d'IRE.

1.3.1.b Les outils de surveillance traditionnels

L'inspection visuelle est la première méthode de diagnostic des OHT [Lino *et al.*, 2000]. Son utilisation est réglementée et nécessite d'être intégrée dans un programme de surveillance systématique [Royet, 2006]. Royet [2006] différencie et détaille dans ses travaux : (i) l'inspection visuelle de routine, (ii) l'inspection à l'occasion de crues et (iii) après un séisme et enfin (iv) les visites techniques approfondies. Cette analyse permet de :

- noter systématiquement les pathologies rencontrées (flaches, terriers, ...) ainsi que leur position sur le plan d'implantation fourni par la campagne topographique ;
- qualifier l'évolution de ces pathologies (évolution de la végétation, de fuites, ...) ;
- lister et positionner les ouvrages traversants et les réseaux ;
- positionner les auscultations futures.

Contribution à l'IRE : l'inspection visuelle est un outil indispensable pour la surveillance des OHT. Elle est la base de référence des auscultations futures. En plus des retombées directes de ce travail, la mise à disposition d'un référencement de tous les ouvrages et conduites traversants favorise l'interprétation des auscultations géophysiques futures. De plus, cette étude permet de focaliser les efforts d'auscultation sur des zones suspectes, augmentant considérablement l'apport des méthodes de reconnaissance. En conséquence, cette étape est indispensable pour améliorer la pertinence de la méthode IRE.

Le suivi topographique, comprenant les mesures de déplacement, est un outil important pour la surveillance des OHT. En effet, son application permet de localiser des zones de tassement, de glissement, voire d'effondrement de l'ouvrage. Elle permet ainsi de focaliser l'intervention des méthodes géophysiques sur des zones précises d'ouvrages.

La mesure de la piézométrie avec le relevé de la hauteur de la nappe d'eau dans les piézomètres, ou de la pression interstitielle, permet de qualifier l'étanchéité et le comportement hydromécanique d'un ouvrage. D'après Royet [2006], cette phase est essentielle pour la surveillance des OHT. Couplé à un traceur (chimique ou radioactif) ou par des essais de pompages, ces méthodes permettent de déterminer la cinétique des infiltrations en place. Le phénomène d'érosion interne ne se produit que lorsque l'énergie d'écoulement permet un arrachement des particules et leur transport. En conséquence, ces études sont primordiales mais nécessitent la mise à disposition d'un réseau de piézomètres.

Contribution à l'IRE : les applications en termes géophysiques sont nombreuses du fait de la sensibilité de la méthode IRE à la présence d'une nappe d'eau. Ainsi, l'introduction sous forme

d'information *a priori* de la position du toit de la nappe permet d'améliorer considérablement la reconstruction globale du milieu ausculté [Günther *et al.*, 2006; Loke, 2011].

1.3.2 Les méthodes géotechniques

Une description exhaustive des méthodes géotechniques est fournie par Philipponnat & Hubert [1997] et appliquée à l'auscultation des OHT par Lino *et al.* [2000]; Fauchard & Mériaux [2004]. La méthodologie d'auscultation globale proposée par Fauchard & Mériaux [2004] stipule que la phase d'auscultation par méthodes géotechniques intervient au troisième niveau, après les investigations géophysiques (figure 1.3). Cette place dans la démarche provient du coût des méthodes géotechniques, du caractère « destructif » des essais, mais aussi de la fiabilité d'un résultat géotechnique. En effet, le caractère indirect des mesures géophysiques entraîne une part d'indétermination dans un résultat d'imagerie. C'est pourquoi, lorsqu'une hétérogénéité (identifiée dans un résultat d'imagerie) est jugée suffisamment « anormale », une validation géotechnique est toujours réalisée. Les méthodes géotechniques (ou géomécaniques) peuvent être scindées en deux classes : les méthodes de caractérisation (i) *in situ* et (ii) en laboratoire.

1.3.2.a Les méthodes *in situ*

Les travaux de Lino *et al.* [2000] fournissent une méthodologie détaillée et hiérarchisée de l'emploi des méthodes de reconnaissance géotechniques. Ainsi, les méthodes pénétrométriques de type SPT (Standard Penetration Test) ou CPT (Cone Penetration Test) interviennent en premier pour informer sur la densité et l'épaisseur des couches de sols. Ensuite, des méthodes de perméabilité *in situ* peuvent être réalisées, renseignant sur les caractéristiques hydrogéologiques des sols en place. Des essais au phicomètre peuvent ensuite informer sur la résistance des matériaux à la contrainte de cisaillement [Fauchard & Mériaux, 2004]. Enfin, des forages destructifs peuvent être employés afin de caractériser la pédologie par extraction des débris de forage ou des carottes. Il peut être noté le développement en cours d'un nouvel appareil de mesure, le géomécamètre [Monnet, 2011], dont l'objectif est de pouvoir mesurer *in-situ* l'érodabilité d'un sol à différentes profondeurs.

Contribution à l'IRE : ces méthodes permettent d'informer « directement » sur les propriétés mécaniques des sols en place. Ainsi, l'épaisseur des couches et leurs caractéristiques mécaniques sont autant d'informations intégrables (de manière avisée) dans un processus d'inversion [Günther *et al.*, 2006; Loke, 2011].

1.3.2.b La caractérisation en laboratoire

À la suite d'une campagne de reconnaissance géotechnique *in situ*, des tests complémentaires peuvent être réalisés en laboratoire. Ces tests ont pour objectifs de caractériser les propriétés mécaniques des sols prélevés, en étudiant la réponse de ces sols à différentes contraintes. Ces méthodes sont notamment utilisées afin de caractériser la perméabilité hydraulique et l'érodabilité des matériaux. Cependant, les mécanismes responsables de l'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être couplés [Bendahmane, 2005]. C'est pourquoi différents critères (exemple du critère de Li ou de Lafleur [Lafleur *et al.*, 1989]) sont souvent sélectionnés afin de fournir une classification des sols. À titre indicatif, la définition, la description et l'objectif de ces critères sont détaillés par Fell *et al.* [2004]; Fell & Fry [2007]. La

figure 1.5 présente un exemple de classification de l'érodabilité des sols en fonction d'un critère granulométrique [Foster, 1999a]. D'un point de vue général, ces travaux ont pour objectifs :

- de mieux comprendre les phénomènes entraînant la rupture des ouvrages ;
- de caractériser la capacité de sols prélevés sur des ouvrages à assurer leur fonction ;
- d'améliorer la conception de futurs OHT pour prévenir le risque de rupture.

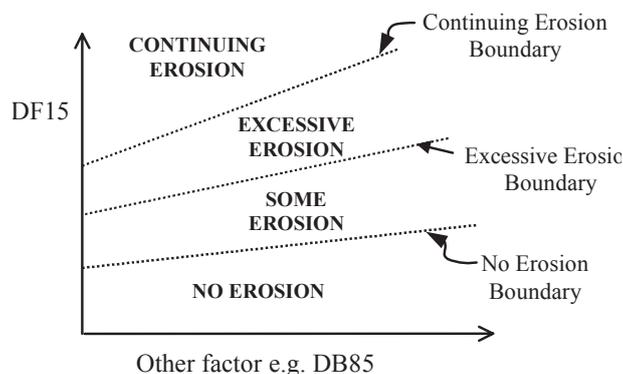


FIGURE 1.5 – Classification de l'érodabilité des sols en fonction de critères granulométriques, d'après Foster [1999a].

Contribution à l'IRE : cette démarche intervient au dernier stade de la méthodologie d'auscultation présentée par Fauchard & Mériaux [2004]. C'est pourquoi, il est difficile de cerner l'apport que peut avoir cette phase sur la méthode d'IRE. Cependant, une base de données référençant l'érodabilité des matériaux prélevés ponctuellement sur des OHT peut être réalisée. Cette base de données interprétée conjointement à une étude d'IRE doit permettre d'améliorer l'interprétation en termes de risque d'érosion. En effet, cette étude doit permettre de faire correspondre à chaque classe d'érodabilité des sols une réponse (signature) géo-électrique pour un site d'étude donné.

1.3.3 Les méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques permettent de déduire les caractéristiques internes des milieux auscultés en étudiant les variations d'un champ physique mesuré à partir de la surface (indirect). Ces méthodes permettent ainsi d'imager les caractéristiques internes aux ouvrages ainsi que leurs évolutions. L'application générale des méthodes géophysiques au domaine de l'auscultation est présentée de manière pertinente par [Snieder *et al.*, 2007]. L'application plus particulière à l'auscultation des OHT est présentée par [Butler *et al.* [1989, 1990]; Fauchard & Mériaux [2004]; Bièvre & Norgeot [2005].

À la différence des méthodes géotechniques in situ qui impliquent des reconnaissances ponctuelles, les méthodes géophysiques permettent de caractériser de manière « quasi-continue » des linéaires importants d'ouvrages. De plus, le caractère « non-destructif » ou « peu-intrusif » des méthodes géophysiques est un avantage indéniable favorisant leur utilisation pour l'auscultation des OHT.

Il existe un nombre important de méthodes géophysiques impliquant un nombre non négligeable d'observables permettant de caractériser les OHT. En conséquence, il est important de déterminer de manière pertinente la place de chacune des techniques dans la méthodologie globale

d'auscultation.

1.3.3.a Place de la géophysique dans la méthodologie globale d'auscultation

À la différence des méthodes géotechniques, les méthodes géophysiques reconstruisent les propriétés d'un milieu à partir de données obtenues de manière indirecte. Ainsi, afin de quantifier les propriétés des matériaux en place, la majorité des méthodes géophysiques utilise les « problèmes inverses » ou présente des variations « apparentes » d'observables. La résolution du problème inverse (inversion) caractérise l'action de trouver un modèle expliquant au mieux les données mesurées. Cette démarche sera présentée plus en détail au Chapitre 2. Le processus d'inversion ne peut garantir une reconstruction parfaite du sous-sol entraînant un certain niveau d'indétermination. C'est pourquoi, les méthodes géophysiques sont parfois utilisées après des méthodes géotechniques, afin de décrire la variation spatiale « continue » entre deux forages.

La méthodologie présentée par [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) a été réalisée, à l'origine, pour répondre à la problématique d'auscultation des ouvrages de protection contre les crues. Cependant, la problématique d'auscultation des OHT en charge permet d'intégrer des méthodes géophysiques de surveillance. C'est pourquoi, une nouvelle méthodologie très fortement inspirée des travaux de [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) est présentée (figure 1.6) dans le cadre de ce travail de thèse.

Cette proposition méthodologique (figure 1.6) n'a pas pour objectif de supplanter l'utilisation d'autres méthodologies d'auscultation. L'objectif est plutôt de permettre un détail des interactions existantes entre les méthodes géophysiques. Globalement, cette méthodologie est construite en quatre étapes, correspondant à quatre niveaux de sécurité, semblables aux étapes présentées par [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#). Une légende explicative est présentée sur les bords gauche et inférieur de la méthodologie. Les losanges bleus correspondent aux réflexions menées et aux décisions prises après la réalisation des actions symbolisées par les rectangles à fond blanc. Les décisions (sortie des losanges) sont symbolisées par des flèches creuses :

- vertes, lorsque le diagnostic de sécurité est vérifié ;
- bleues, lorsque des études complémentaires sont nécessaires (études du même niveau de sécurité ou inférieur) ;
- rouges, lorsque des études supplémentaires sont nécessaires (études d'un niveau de sécurité supérieur) ou lorsque le diagnostic de sécurité est engagé et qu'une évacuation et/ou une réparation immédiate est demandée.

Cet organigramme détaille les interactions possibles entre les différentes utilisations des méthodes géophysiques :

- les méthodes de reconnaissance dites « grand rendement »⁴ ;
- les méthodes de reconnaissance dites « haute résolution »⁵ ;
- les méthodes de surveillance⁶ à « haute résolution ».

4. méthodes permettant l'auscultation d'un linéaire important d'ouvrage de manière rapide mais avec une résolution faible de la caractérisation.

5. méthodes permettant une auscultation minutieuse de portions ciblées d'ouvrages.

6. L'emploi du terme de surveillance sous-entend souvent l'utilisation d'outils dont l'implantation est pérenne dans l'ouvrage. Dans cette thèse, la surveillance est définie lorsqu'une mesure est répétée dans le temps, même si l'installation du matériel n'est pas définitive.

1.x – Décision de stratégie
provenant de l’analyse
conventionnelle

- 1.1 – étude géo-mécanique et morpho-dynamique.
- 1.2 – étude géotechnique.
- 1.3 – étude géophysique haut rendement – zonage.
- 1.4 – étude géophysique haute résolution locale.
- 1.5 – monitoring géophysique local.

2.x – Décisions relatives aux
interprétation des résultats
géophysiques

- 2a.1 – amélioration de la résolution de l’imagerie ou modification de la cible d’auscultation.
- 2b.1 – modification de la cible d’auscultation – changement de méthode.
- 2c.1 – Imagerie complémentaire d’une zone sous surveillance ayant indiqué un risque.
- 2c.2 – Répétition de la surveillance.
- 2c.3 – Danger, réparation.
- 2.1 – Réalisation d’une étude géotechnique.
- 2.2 – Danger, réparation.

3.x et 4.x – Décisions
relatives aux essais
géotechniques,
géomécaniques et de
modélisation morpho-
dynamique

- 3.1 et 4.1 - Utilisation de méthodes de monitoring.
- 3.2 – Réalisation d’une étude géomécanique et/ou morpho-dynamique.
- 3.3 – Danger, réparation
- 4.2 – Décision de réparations.

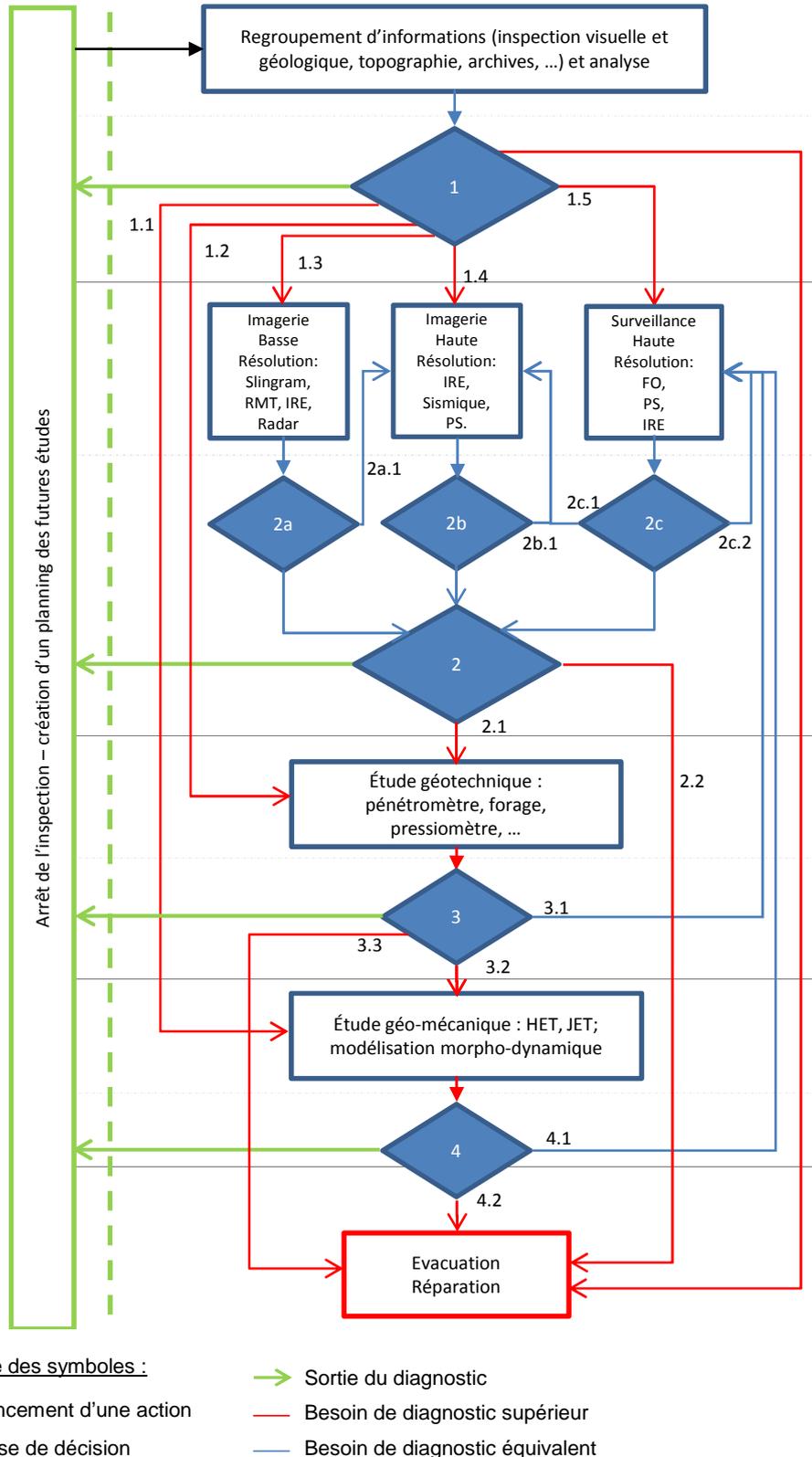


FIGURE 1.6 – Méthodologie de reconnaissance et de surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Le sigle « F.O » correspond à la méthode de thermométrie par Fibre Optique.

À la différence de la méthodologie présentée par [Fauchard & Mériaux \[2004\]](#) et du point de vue du déroulement des opérations, la reconnaissance à « grand rendement » n'intervient pas forcément en amont de la méthodologie. En effet, le choix du mode d'application des méthodes géophysiques (grand rendement ou haute résolution) dépend des conclusions réalisées à partir des indices de 1^{er} niveau (phase préalable). Ainsi, le responsable d'ouvrage peut décider d'employer directement des méthodes ponctuelles (géophysiques ou géotechniques) en fonction des indices obtenus à l'étape 1.

Cependant, même si les modes d'utilisation des méthodes géophysiques sont placés sur un même niveau (figure 1.6), il peut être noté un lien de causalité entre ces modes. En effet, une auscultation localisée ne débouche « jamais » sur une auscultation grand rendement. Ainsi, les méthodes « haute résolution » prennent une place « particulières » car elles permettent :

- de détailler des portions jugées suspectes par les méthodes « grand rendement » (2a.1) ;
- de renseigner sur la composition d'un ouvrage à un instant donné, à partir du moment où une anomalie est détectée par les méthodes de surveillance (2c.1).

Globalement, lorsqu'aucune anomalie n'est détectée (Phase 2) et qu'aucun indice de défaillance n'est avancé (Phase 1), une sortie du système est autorisée (dépassement des pointillés verts, figure 1.6). Cependant, lorsqu'un doute s'installe à la suite des auscultations géophysiques, le gestionnaire d'ouvrage peut décider de faire intervenir une étape supérieure d'évaluation de la sécurité (Phase 3 - les méthodes géotechniques).

1.3.3.b Sensibilité des méthodes géophysiques à l'érosion interne

Avant de s'intéresser aux méthodes utilisées pour la prospection et la surveillance des OHT, il est intéressant de comprendre l'effet de l'érosion interne sur les paramètres d'état d'un sol. À cet effet, la figure 1.7 présente un organigramme des effets liés à l'action de l'érosion interne [[Johansson, 1997](#)]. Ce schéma illustre, en premier lieu, que l'érosion interne, par le biais de l'arrachement des particules, entraîne une augmentation de la porosité du milieu et de sa perméabilité hydraulique. Cette modification engendre une augmentation de l'écoulement, une modification de la distribution granulométrique et une augmentation de la teneur en eau. Ensuite, ces modifications entraînent une modification de plusieurs paramètres d'état physiques (la température, la résistivité et la permittivité) et d'un paramètre chimique (la teneur en ions dissous).

Cependant, l'érosion interne n'est effective que lorsque l'énergie d'écoulement est suffisante pour arracher et transporter les particules. La sélection de ce critère permet de différencier les méthodes selon (i) si elles sont directement sensibles (d'après ce critère) à l'érosion interne ou (ii) si elles sont sensibles à une conséquence de l'érosion interne. En conséquence, seule la méthode géophysique du Potentiel Spontané (PS) peut être considérée comme potentiellement sensible à l'érosion interne. Cependant, ce critère ne permet pas d'afficher la prévalence d'une méthode pour détecter de l'érosion interne. Un exemple marquant est la méthode de thermométrie en surveillance (exemple de la fibre optique) qui n'est pas directement sensible au flux d'écoulement mais à une variation de température liée à un flux d'écoulement. Or, cette méthode est en passe actuellement de devenir un outil standard pour la surveillance des OHT du fait de sa grande sensibilité à la variation de température dans les OHT.

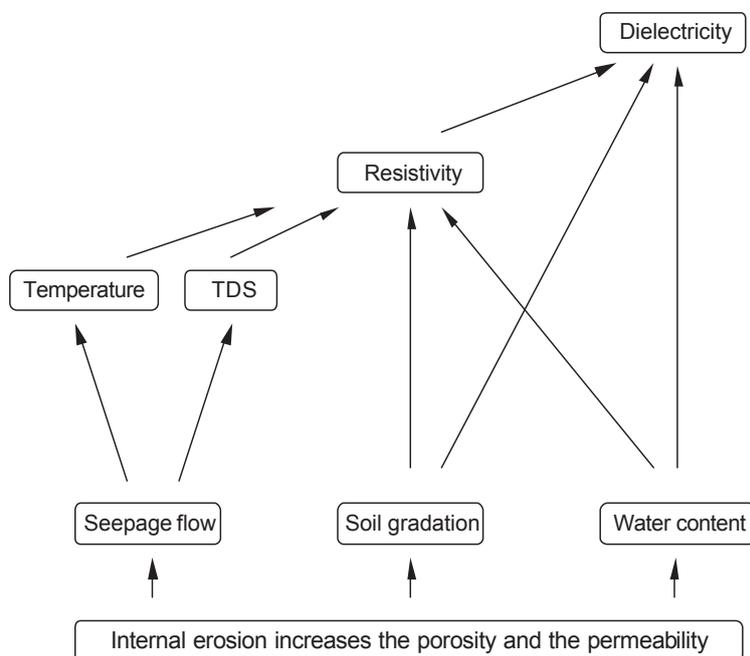


FIGURE 1.7 – Organigramme présentant les interactions engendrées par le phénomène d'érosion interne sur plusieurs paramètres d'état d'un matériau. D'après Johansson [1997].

Comme précité dans cette section, afin de définir des méthodes pertinentes de détection de l'érosion interne, il est nécessaire de distinguer les « bonnes » observables géophysiques [Fauchard & Mériaux, 2004]. À cet effet, une importante étude, réalisée par Johansson [1997] illustre l'effet d'une variation de la porosité sur plusieurs grandeurs physiques (figure 1.8). Cette figure permet d'illustrer la sensibilité de différentes observables géophysiques à la détection d'un critère (ici l'évolution de la porosité). D'après cette étude, les méthodes utilisant comme observable la résistivité électrique sont les plus aptes à suivre l'évolution de la porosité d'un matériau. Les méthodes donnant accès à la résistivité électrique sont ensuite suivies par les méthodes mesurant la densité et la permittivité diélectrique. Enfin, la porosité possède un effet important mais complexe (non-monotone) sur la température limitant l'intérêt de cette observable d'après cette étude. En conséquence, cette étude montre l'importance du choix du critère. En effet, un critère portant sur la sensibilité à un flux hydrique ou sur le départ de fines n'aurait pas abouti au même résultat. La capacité d'analyse de ces résultats est cependant limitée car un seul matériau est utilisé pour cette étude. De plus, ce sont des lois empiriques qui définissent la plupart des résultats. Bien que « discutable », ce critère est choisi par Johansson [1997] car il représente une conséquence directe du phénomène d'érosion interne. C'est pourquoi, en fonction de ces résultats, la méthode IRE peut être considérée comme sensible à une conséquence de l'érosion interne. Cette sensibilité dépendant bien sûr du contraste, du volume et de la profondeur, (en résumé de la détectabilité) du phénomène. Enfin, cette étude ne présente pas les effets couplés sur les observables. En effet, l'augmentation de résistivité électrique entraînée par une perte de fine peut être compensée par l'augmentation de la teneur en eau du milieu, limitant ainsi sa détectabilité.

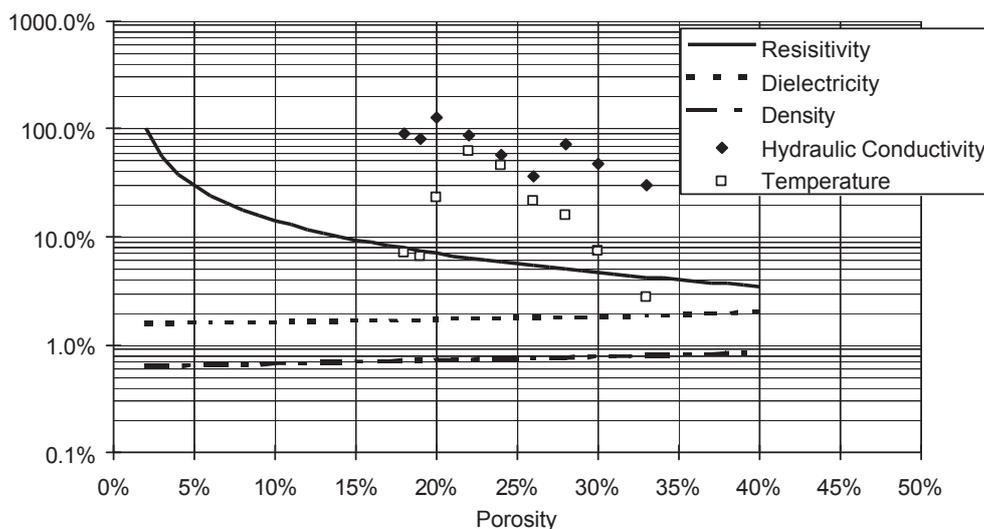


FIGURE 1.8 – Illustration de la sensibilité de plusieurs paramètres physiques à la variation de porosité d'un sol. Cette étude concerne l'effet sur la température, la conductivité hydraulique, la densité, la résistivité et la permittivité diélectrique. D'après Johansson [1997].

1.3.3.c L'Imagerie de Résistivité Électrique

Le principe de l'IRE consiste à déduire la distribution de résistivité électrique du sous-sol à partir de différentes séries de protocoles d'acquisition (cf. Annexe A) réalisés en surface ou en profondeur. Dans le cadre de l'auscultation des OHT, une campagne d'IRE « classique » consiste à disposer une ligne d'électrodes suivant un axe qu'il soit longitudinal⁷ ou transversal⁸ à l'ouvrage (figure 1.9). De plus, l'IRE peut intervenir par le biais des trois modes d'utilisation distingués précédemment (grand rendement, haute résolution, et surveillance). Elle permet ainsi d'améliorer la comparaison des résultats des phases successives en étudiant toujours la même observable (la variation de résistivité électrique).

En émettant l'hypothèse qu'il n'existe pas (ou peu) de variations spatiales de la résistivité électrique de manière transversale à la ligne d'électrodes, des méthodes $2D$ peuvent être employées. Plus techniquement, ce sont des techniques dites $2.5D$ ⁹ qui sont « presque toujours » employées afin de tenir compte du caractère $3D$ de la source de courant (hypothèse point source). L'utilisation des techniques $2D$ permet ainsi d'afficher sous forme d'une coupe la distribution de résistivité électrique du milieu ausculté. En reprenant le principe du schéma 1.9, la figure 1.10 illustre comment sont conceptualisés les résultats $2D$ d'une auscultation IRE- $2D$ sur un ouvrage $3D$.

La profondeur d'investigation en IRE dépend de la couverture spatiale de la ligne d'électrodes et de la quantité d'information fournie par les mesures. Lorsque les auscultations sont réalisées de manière transversale à l'ouvrage, la profondeur d'investigation atteinte ne permet pas d'imager l'ensemble de l'ouvrage et la fondation ne peut pas être caractérisée (cf. figure 1.10). Cette profondeur d'investigation peut être améliorée en augmentant la couverture spatiale de la

7. Sauf mention contraire, la direction longitudinale correspond toujours à l'axe longitudinal de la digue.

8. Sauf mention contraire, la direction transversale est perpendiculaire au linéaire de digue

9. Par souci de clarté, le terme $2D$ est utilisé préférentiellement au terme $2.5D$.

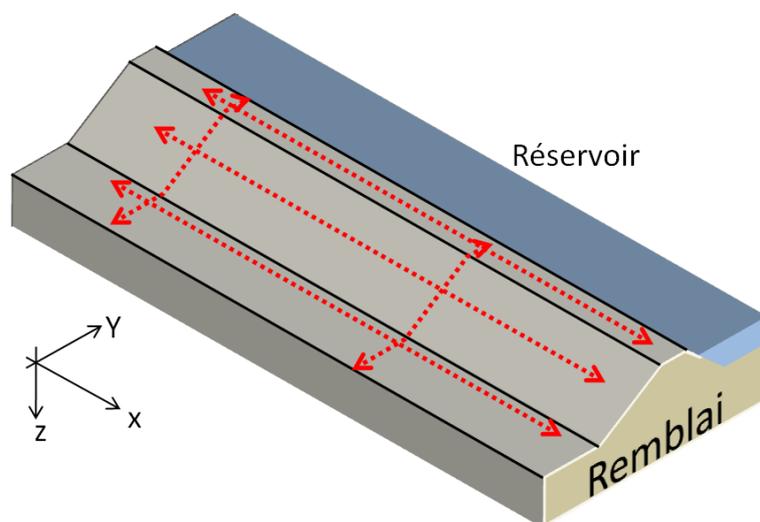


FIGURE 1.9 – Schématisation d'une méthodologie d'auscultation des OHT par imagerie de résistivité électrique. Les prospections « grand rendement » sont réalisées à partir de lignes longitudinales positionnées en crête, en pente ou en pied de digue. Ensuite, des inspections plus locales peuvent intervenir avec des lignes placées transversalement.

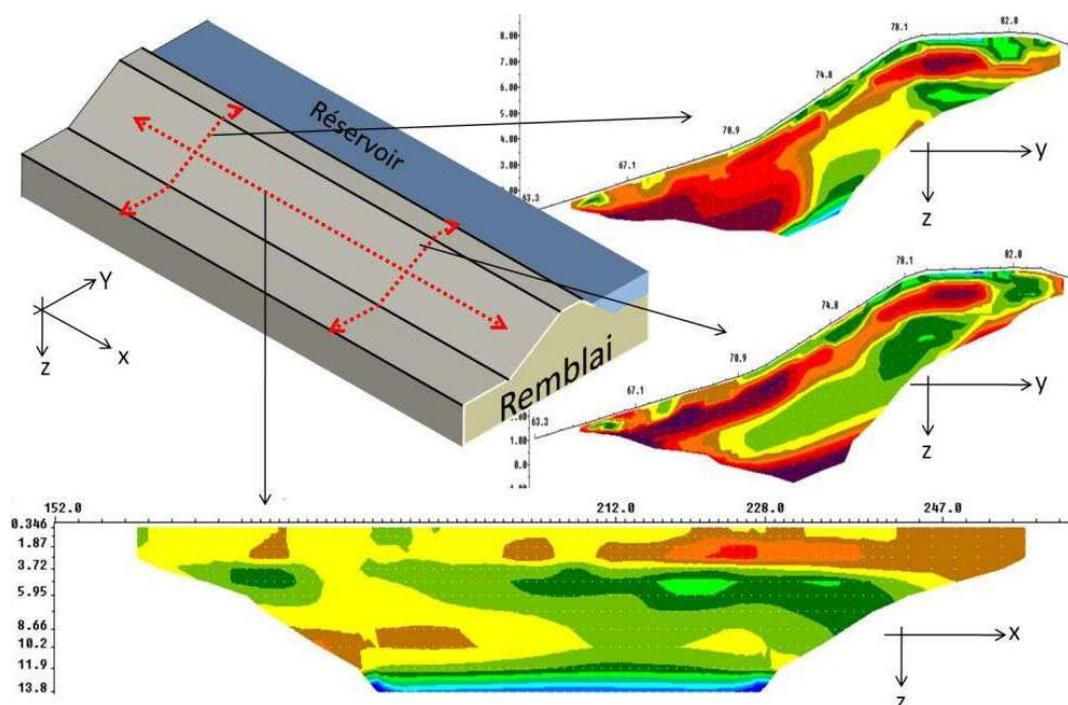


FIGURE 1.10 – Illustration de deux coupes transversales à l'ouvrage et d'une reconstruction longitudinale à l'ouvrage. La position des lignes est précisée par les flèches rouges en pointillés. Les couleurs correspondent à des iso-résistivités.

ligne d'électrodes dans le réservoir. Cependant, cette méthode complique grandement l'emploi de technique d'imagerie.

À l'inverse, l'utilisation de campagnes longitudinales permet d'obtenir une profondeur d'investigation suffisante pour caractériser le remblai et sa fondation (figure 1.10). Cependant, dans

TABLE 1.4 – Synthèse des différents modes d'application de la méthode d'IRE appliquée à l'auscultation des OHT présentant leurs objectifs, principes et limitations. ¹Les méthodes capacitives permettent de s'affranchir du contact galvanique des électrodes. ²Le « roll-along » est une technique applicable à l'IRE permettant d'augmenter la rapidité de reconnaissance de la méthode. La technique de traçage à la saumure n'est pas incluse dans cette synthèse.

Mode d'utilisation	Résolution	Objectif de l'auscultation	Méthodes & Techniques	Limitations
Reconnaissance	Faible	Variation grossière de tronçons d'OHT	Capacitives ¹	Faible profondeur
			IRE 2D longitudinale (Roll-along) ²	Nécessite un contact galvanique sensible aux effets 3D
	Elevée	Variations fines de la composition interne d'un OHT	IRE 2D transversale	Profondeur d'investigation limitée
			IRE 3D	Coût important & Difficulté d'acquisition
Surveillance	Faible	Variation temporelle de grands linéaires d'OHT	IRE 2D installation non pérenne	Faible Reproductibilité des mesures
	Elevée	Détection de variations localisées voire d'infiltrations	IRE 2D ou 3D installée à demeure	Implantation lors de travaux coût important de l'installation

ce cadre précis (inspection longitudinale d'OHT), l'hypothèse 2D du milieu n'est pas vérifiée ce qui peut entraîner la formation d'artéfacts dans le résultat d'inversion. Un artéfact peut être défini comme une structure présente dans un résultat d'inversion mais n'existant pas au sein du milieu ausculté. Du fait de ces artéfacts, les reconstructions sont généralement étudiées en relatif (on étudie la variation le long de la coupe) afin de s'affranchir des artéfacts récurrents. En conséquence, il est difficile voire impossible d'interpréter en termes de « danger » un résultat issu d'une inversion 2D longitudinale. C'est pourquoi, cet emploi de la méthode d'IRE est souvent utilisé en premier lieu afin de délimiter les zones « à risque » dans l'objectif de faire intervenir des méthodes à plus haute résolution.

La méthode d'IRE peut être utilisée afin d'imager les variations temporelles de résistivité électrique d'un milieu. Lorsque ce mode d'utilisation est employé, une majeure partie des perturbations liées à la topographie s'estompent [Sjödahl *et al.*, 2008]. En conséquence, de nombreuses études ont permis de montrer la pertinence de la méthode pour la détection d'infiltrations sur des ouvrages réels [Jackson *et al.*, 2002; Sjödahl *et al.*, 2010] présentant une topographie prononcée. La méthode de traçage à la saumure est un exemple d'application bénéficiant de l'observation précédente. En conclusion, le principe de la méthode IRE peut être utilisé de multiples manières dans une méthodologie d'auscultation des OHT. À cet effet, une synthèse des différents modes d'application, de leur principe et objectifs est présentée dans la table 1.4.

1.3.3.d Synthèse des méthodes géophysiques et apports pour l'IRE

Les méthodes de thermométrie permettent de mesurer ou imager (cas des caméras thermiques) les variations de température d'un ouvrage. La mesure par fibre optique, installée à demeure dans l'ouvrage, permet de lier les variations de température à un débit de fuite. Sa faisabilité et son application ont été étudiées par [Armbruster *et al.* \[1992\]](#); [Dornstadter \[1997\]](#); [Johansson \[1997\]](#) et plus récemment par [Guidoux \[2007\]](#); [Khan *et al.* \[2010\]](#). Afin d'assurer la quantification d'un débit de fuite, cette méthode nécessite de modéliser le comportement thermique d'un ouvrage. Or, ce comportement possède une influence non négligeable sur l'IRE. En conséquence une interprétation jointe des deux modèles doit permettre d'améliorer l'interprétation d'une imagerie que ce soit en « absolu » ou en variation temporelle.

La méthode du Potentiel Spontané (PS) est la seule méthode géophysique directement sensible au débit d'un écoulement [[Sheffer & Oldenburg, 2007](#); [Bolève, 2009](#); [Bolève *et al.*, 2009b](#)]. À partir de techniques récentes de modélisation intégrant la géométrie des ouvrages, la méthode du PS permet de quantifier le débit d'un écoulement dans un OHT [[Bolève *et al.*, 2009b](#)]. Cependant, cette méthode nécessite une connaissance de la distribution de résistivité électrique du milieu. Une étude employant parallèlement les méthodes du PS et de l'IRE doit permettre de comparer la détection d'une infiltration (méthode PS) de caractéristiques physiques des milieux (zone conductrice électriquement = infiltration). Cette interprétation conjointe permettant ainsi d'améliorer l'interprétation d'un résultat d'IRE.

Les méthodes sismiques, bien que majoritaires (en termes de chiffre d'affaires) en géophysique, sont peu utilisées pour l'auscultation des OHT. Un très bon aperçu des possibilités offertes par la méthode sismique réflexion haute résolution appliquée aux OHT est donné par [Zantout \[2005\]](#). L'étude réalisée par [Chen *et al.* \[2006\]](#) illustre l'apport de ces méthodes pour l'auscultation des OHT mais montre cependant la difficulté d'employer cette méthode sur de forts linéaires. Les méthodes sismiques permettent de caractériser la vitesse des ondes de compression (méthode sismique réfraction), la vitesse des ondes de cisaillement (méthode MASW) et enfin de définir l'épaisseur des différentes couches de sol composant un milieu. L'épaisseur des différentes couches du sous-sol est un paramètre important pouvant être intégré par les logiciels d'inversion [[Saunders *et al.*, 2005](#); [Loke, 2011](#)]. De plus, des traitements conjoints des données sismiques et électriques par logique floue peuvent être réalisés afin d'améliorer les résultats d'imagerie [[Grandjean *et al.*, 2006](#)].

La méthode Airborne Laser Scanning (ALS) ou LiDAR (Light Detection And Ranging) est une méthode active d'auscultation des ouvrages du génie civil [[Mériaux *et al.*, 2006](#); [Bretar *et al.*, 2009](#)]. Cette technique mesure le temps de vol d'une impulsion laser et permet ainsi de mesurer la distance entre la source du laser et la surface. Ces distances sont ensuite transformées dans un système géo-référencé de points 3D décrivant la topographie de la surface. Une description détaillée de la chaîne de traitement de l'information peut être trouvée dans [Mallet & Bretar \[2009\]](#); [Mallet *et al.* \[2011\]](#); [Shan & Toth \[2009\]](#). Les méthodes d'inversion récentes d'IRE [[Günther *et al.*, 2006](#); [Loke, 2011](#); [Fargier *et al.*, 2011a](#)] nécessitent une topographie précise. Ainsi, la technique LiDAR peut s'avérer très intéressante pour la méthodologie d'auscultation par IRE. De plus, en surveillance (déformations, tassements) aussi bien qu'en reconnaissance (accidents de la topographie) la méthode doit permettre de focaliser l'implantation des IRE.

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence (EM-BF), telles que la RMT (Radio Magnéto Tellurique) ou les appareillages slingram de type EM31 et EM34 (Geonics limited) sont sensibles à la résistivité électrique des matériaux. Le principal avantage de ces méthodes est le caractère « très grand rendement » permettant de couvrir un linéaire très important d'OHT. Cependant, l'objectif d'exploiter ce caractère grand rendement se fait au détriment de la résolution de la méthode, cantonnant son utilisation au pré-zonage des OHT. Ces méthodes sont sensibles à l'hétérogénéité du sol, permettant ainsi de distinguer les grandes structures (ou corps) conductrices des structures résistantes à des profondeurs variant en fonction de la fréquence de mesure (RMT) et de l'espacement entre les bobines (EM31-EM34). Ces méthodes étant sensibles au même paramètre que l'IRE, leur interprétation jointe (IRE et EM-BF) est facilitée.

Les méthodes électromagnétiques haute fréquence (EM-HF), comprenant la méthode géo-radar, permettent de caractériser le contraste de permittivité et de conductivité électrique du sol. Ces méthodes sont indiquées pour la caractérisation de l'état hydrique des structures [Ihamouten *et al.*, 2011]. Appliquée à l'auscultation des OHT, cette méthode permet de détecter des anomalies pouvant correspondre à des conséquences de l'érosion interne [Carlsten *et al.*, 1995]. Son utilisation est inadaptée pour l'auscultation des milieux électriquement conducteurs (atténuation des ondes EM), ce qui est le cas de nombreuses digues en charge, notamment les digues avec un noyau argileux. La méthode géo-radar peut également renseigner sur la position relative des couches du sous-sol, ce qui est une information *a priori* utilisable pour l'inversion d'IRE.

1.3.4 Place de l'IRE dans une démarche globale d'auscultation

De la même manière que les méthodes de thermométrie et du potentiel spontané, l'IRE est une méthode reconnue pertinente pour l'auscultation des OHT [Johansson, 1997]. En effet, celle-ci possède de nombreux avantages permettant d'améliorer le diagnostic d'un OHT qu'il soit en charge ou non. Une importante bibliographie témoigne de la pertinence de cette méthode pour la reconnaissance 1D [Aina *et al.*, 1996] ou 2D [Panthulu *et al.*, 2001; Fauchard & Mériaux, 2004; Hennig *et al.*, 2005; Mainali, 2006; Sjö Dahl *et al.*, 2006; Cho & Yeom, 2007] et pour la surveillance des OHT [Johansson, 1997; Jackson *et al.*, 2002; Sjö Dahl *et al.*, 2008; Kuras *et al.*, 2009; Sjö Dahl *et al.*, 2010]. Ces auteurs présentent un retour d'expérience concluant quant à l'utilisation de l'IRE dans la méthodologie globale d'auscultation [Jackson *et al.*, 2002; Fauchard & Mériaux, 2004; Sjö Dahl *et al.*, 2008, 2010]. En effet, en plus d'une grande sensibilité aux conséquences de l'érosion interne cette méthode peut s'inscrire très simplement dans une démarche de diagnostic de sûreté d'un ouvrage. De plus, l'IRE est une méthode pouvant tirer parti des différentes phases d'auscultation. Le tableau 1.5 synthétise les informations *a priori* pouvant être utilisées par la méthode IRE afin d'améliorer son utilisation.

1.4 Conclusion

La France comprend un grand linéaire d'OHT, dont l'exploitation est vitale pour la société. Ces ouvrages sont complexes, parfois très anciens et sont sujets à différentes formes d'agression pouvant mener à leur rupture. L'érosion interne et la surverse sont les principaux phénomènes à l'origine de la rupture des ouvrages. À la différence de la surverse, le phénomène d'érosion

TABLE 1.5 – Synthèse d'informations a priori extraites des phases d'auscultation et apport de ces informations pour l'acquisition et le traitement des campagnes d'IRE de reconnaissance.

Démarches d'auscultation	Amélioration appliquée à l'acquisition	Amélioration de la discrétisation du modèle inverse	Application de contraintes durant l'inversion
Phase 1			
Étude Topographie	-	Géométrie du modèle	-
Étude géologique	-	Profondeur du substratum	Plage de variation de la résistivité
Étude hydrogéologique	-	Toit de la nappe d'eau	Variation franche de la résistivité
Inspection visuelle	Campagne focalisée	-	-
Document descriptif de l'ouvrage	-	Position des couches et de la fondation	Variation lisse dans une couche et forte entre les couches
Archives historiques	Campagne focalisée	-	-
Phase 2			
Études in-situ géotechniques	Campagne focalisée	Épaisseur des couches et position du substratum	-
Études géotechniques en laboratoire	-	-	-
Phase 3			
Méthodes EM-BF	Campagne focalisée	-	Plage de variation de la résistivité
Méthodes Sismiques	Campagne focalisée	Épaisseur des couches et position du substratum	-
Méthodes Thermiques	Campagne focalisée	-	Modèle de température
Méthode PS	Campagne focalisée	-	-

interne modifie peu à peu la composition interne d'un ouvrage jusqu'à mener à sa rupture.

Face à ces enjeux à la fois économiques, sociétaux et environnementaux, une méthodologie pertinente de diagnostic de sûreté doit être mise en place. Du fait de leur capacité d'imagerie et du faible niveau d'« intrusivité », plusieurs méthodes géophysiques sont sélectionnées dans la démarche de diagnostic de sûreté. Afin de tirer le meilleur parti de ces méthodes (et donc de leur complémentarité), une méthodologie globale d'auscultation doit être mise en place.

La méthode d'IRE, du fait de sa grande sensibilité à l'initiation et aux conséquences de l'érosion interne (départ de fines, augmentation de la teneur en eau, température), est sélectionnée dans la méthodologie d'auscultation. La finalité de cette méthode est de reconstruire la distribution spatiale de la résistivité électrique du sous-sol ou sa variation temporelle. Ainsi, lorsqu'un contact galvanique est permis, l'IRE peut être utilisée à la fois pour la reconnaissance d'un linéaire important d'ouvrage ainsi que pour la caractérisation haute résolution de portions ciblées d'ouvrages. De plus, la qualité d'une acquisition d'IRE, de son traitement et de son interprétation peuvent être largement améliorés par l'ajout d'informations *a priori*. Ces informations peuvent être extraites des résultats des différentes étapes de la méthodologie globale d'auscultation.

Cependant, la méthode d'IRE possède plusieurs limitations quant à son utilisation. En effet, l'approche classique *2D* est sensible à la présence de milieux placés transversalement à la ligne d'électrodes. Ces effets « *3D* » sont nuisibles au processus d'inversion qui reconstruit des artéfacts dans le résultat. En conséquence, la fiabilité des modèles reconstruits et donc leur interprétation ne peut être complètement garantie, limitant fortement l'utilité et les capacités de cette méthode.

Chapitre 2

Imagerie de Résistivité Électrique

Contents

2.1	Théorie, principes et mise en œuvre de la méthode IRE	34
2.1.1	Historique de la méthode IRE	34
2.1.2	Les équations de Maxwell et les équations fondamentales	35
2.1.3	Principe général de la prospection électrique à courant continu	36
2.1.4	Erreur sur la mesure	40
2.1.4.a	Erreur sur le facteur géométrique	40
2.1.4.b	Couplage électromagnétique	41
2.1.4.c	Polarisation des électrodes, contact et erreur matérielle	41
2.1.5	Physique des sols et des roches	42
2.1.5.a	Propriétés électriques	42
2.1.5.b	Les différents modes de conduction électrique	43
2.1.5.c	Facteurs d'influence de la résistivité électrique	44
2.1.5.d	Propriétés hydrauliques et résistivité	44
2.1.5.e	Propriétés thermiques et résistivité	46
2.1.6	Les principales stratégies de prospection	46
2.1.6.a	Le sondage électrique	47
2.1.6.b	Le profilage électrique (trainé électrique)	48
2.1.6.c	La Mise À la Masse (MAM)	49
2.1.6.d	L'Imagerie de Résistivité électrique 2D (IRE-2D)	50
2.1.6.e	L'Imagerie de Résistivité électrique 3D (IRE-3D)	51
2.1.6.f	L'imagerie d'évolutions temporelles (IRE-4D)	51
2.1.6.g	Conclusion et perspectives de nouvelles stratégies	52
2.2	Le problème direct	53
2.2.1	La résolution du problème direct	53
2.2.1.a	La méthode des différences finies	53
2.2.1.b	La méthode des éléments de frontière	54
2.2.1.c	La méthode des éléments finis	54
2.2.2	Discretisation du problème direct et potentiel secondaire	56
2.2.3	Essai numérique	58
2.2.4	Démarche de construction du problème direct - InGEOHT	60
2.2.5	Problématique des ouvrages 3D	61
2.2.5.a	Identification des effets perturbateurs prépondérants	61

2.2.5.b	Effet de milieux 3D sur la configuration d'acquisition	63
2.2.6	Conclusion	66
2.3	Le problème inverse	67
2.3.1	Introduction	67
2.3.2	La quête de l'information	68
2.3.3	Discrétisation du modèle inverse	70
2.3.4	L'utilisation des normes	71
2.3.5	Les principaux algorithmes d'inversion	73
2.3.5.a	Full Newton & Gauss-Newton	74
2.3.5.b	Quasi Newton	75
2.3.5.c	Gradient conjugué	75
2.3.6	Le calcul des dérivées de Fréchet	76
2.3.6.a	Approche par perturbation	76
2.3.6.b	Approche des équations de sensibilité	77
2.3.6.c	Approche de l'état adjoint	77
2.3.7	Régularisation du problème inverse	81
2.3.7.a	Régularisation explicite et implicite	81
2.3.7.b	Matrice de lissage	83
2.3.8	Non-linéarité et ajustement	86
2.3.9	Le cas particulier du monitoring	87
2.3.10	Tests numériques	88
2.4	Conclusion	92

Introduction

Les OHT s'exposent, chaque année dans le monde, à l'action de plusieurs pathologies pouvant entraîner leur rupture, à savoir les phénomènes de surverse et d'Érosion Interne (E.I.). La sécurité des ouvrages face à ces pathologies nécessite le développement de méthodes de diagnostic et de surveillance impliquant des outils d'imagerie. Afin de répondre à cette problématique, la méthode d'IRE est sélectionnée (Cf. Chapitre 1) pour sa sensibilité à l'initiation du phénomène d'érosion interne ainsi que pour ses capacités d'imagerie. Ce chapitre a pour vocation de présenter, en parallèle d'un état de l'art de la méthode, la base d'un nouveau code de modélisation et d'inversion appelé InGEOHT (Inversion de données Géo-électriques provenant d'Ouvrages Hydrauliques en Terre). Ces travaux sont regroupés en trois sections concernant :

- i). la méthode d'Imagerie de Résistivité électrique et son état de l'art ;
- ii). la résolution du problème direct « géo-électrique » ;
- iii). la résolution du problème inverse en Imagerie de Résistivité Électrique.

2.1 Théorie, principes et mise en œuvre de la méthode IRE

2.1.1 Historique de la méthode IRE

L'étude de la distribution de résistivité électrique d'un sol par mesure géo-électrique figure parmi les plus anciennes techniques géophysiques, fruit de nombreux et innovants défis scientifiques et techniques.

Les premières recherches ayant mené à la compréhension des lois régissant l'électromagnétisme remontent aux travaux de Georg Simon Ohm (1787-1854), d'André Marie Ampère (1775-1836), et de Michael Faraday (1791-1867). Ces travaux, qui ont permis la formulation de plusieurs lois, furent par la suite regroupés en une théorie unifiée de l'électromagnétisme par James Clerk Maxwell (1831-1879). Ces auteurs qui ont permis d'apporter les bases physiques de la méthode IRE, sont aujourd'hui considérés comme les pères de l'électromagnétisme.

Il faudra toutefois attendre le début du XX^{ème} siècle pour que l'application plus pragmatique de cette théorie soit utilisée par Conrad Schlumberger (1876-1936) pour l'exploration du sous-sol en France et par Wells, Dafts, Williams et Wenner outre-Atlantique. À la suite de ces travaux, l'amélioration de la compréhension physique de la méthode fut permise par les travaux de Saba Stefanescu (1902-1994). Enfin, Andrei Nikolaevich Tikhonov (1906-1993) proposa une solution aux problèmes inverses mal-posés [Tikhonov & Arsenin, 1976] afin de soumettre une méthode de traitement de mesures de sondage électrique.

2.1.2 Les équations de Maxwell et les équations fondamentales

La méthode d'Imagerie de Résistivité électrique (IRE) tire parti des capacités de diffusion d'un champ électrique basse fréquence généré par la circulation d'un courant électrique afin de déterminer la distribution de la résistivité électrique du sous-sol. La résistivité électrique est la capacité des matériaux à s'opposer au passage d'un courant électrique. Le comportement d'un champ électromagnétique a été décrit par J.C. Maxwell et réuni sous la forme de quatre équations fondamentales de l'électromagnétisme appelées équations de Maxwell-Lorentz. Ces équations permettent de lier les comportements du champ électrique \mathbf{E} ($V.m^{-1}$), du champ magnétique \mathbf{H} ($A.m^{-1}$), du champ de déplacement \mathbf{D} ($C.m^{-2}$), du champ d'induction magnétique \mathbf{B} ($Wb.m^{-2}$) et de la densité de courant \mathbf{J} ($A.m^{-2}$) :

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad \text{Loi d'induction de Faraday} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad \text{Loi d'Ampère-Maxwell} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{Loi de Gauss-Maxwell} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Loi de divergence de l'induction magnétique} \quad (2.4)$$

Avec $\rho(\vec{r}, t)$ la densité volumique de charge électrique au point \vec{r} à l'instant t et ε_0 la permittivité diélectrique du vide. En fonction du symbole le succédant, ∇ est un opérateur linéaire donnant le gradient (∇), la divergence ($\nabla \cdot$) ou le rotationnel ($\nabla \times$). Les équations 2.1 et 2.2 montrent respectivement que le passage d'un flux magnétique dans un milieu entraîne la formation d'un champ électrique et que le passage d'un courant électrique génère la formation d'un champ magnétique. Dans le cadre de l'utilisation de la méthode IRE les propriétés magnétiques sont généralement ignorées. Dans la majorité des cas, les méthodes électriques n'emploient pas un courant continu mais alternatif à basse fréquence. Cependant, les fréquences d'utilisation de la méthode IRE étant très faibles, les signaux sont supposés stationnaires simplifiant considérablement l'équation 2.1 en :

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.5)$$

De plus, la divergence du rotationnel étant nulle ($\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = 0$) permet de simplifier l'équation 2.2 :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.6)$$

Le champ \mathbf{E} peut être défini par la dérivée d'un champ de potentiel scalaire V :

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.7)$$

Lorsque des ondes électromagnétiques se propagent dans la matière, plusieurs relations constitutives (lois de comportement) décrivant les propriétés électromagnétiques d'un matériau doivent être utilisées. La loi d'Ohm (eq. 2.8) exprime la relation entre la densité de courant, la conductivité électrique σ ($S.m^{-1}$) et le champ électrique. Conventionnellement, l'interprétation des données géo-électriques entraîne l'utilisation de la grandeur inverse de la conductivité électrique, soit la résistivité électrique ρ ($\Omega.m$). Ces grandeurs sont mises en relation par l'équation suivante :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} \quad (2.8)$$

La combinaison de l'expression 2.6 et de la loi d'Ohm (eq. 2.8) permet de formuler l'équation de Poisson suivante :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.9)$$

En présence d'une source ponctuelle de courant d'intensité I en \vec{r}_s l'équation devient :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -I_s \delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \quad (2.10)$$

Le symbole δ représente une distribution de Dirac à trois dimensions et \vec{r} la position quelconque d'un point dans l'espace. Cette formulation représente ainsi l'équation à résoudre dans le but de décrire la forme du champ de potentiel (V) généré par une ou plusieurs sources de courant (I_s) dans un milieu de conductivité $\sigma(x, y, z)$.

2.1.3 Principe général de la prospection électrique à courant continu

L'emploi de la méthode IRE nécessite généralement un contact galvanique entre les électrodes et le milieu investigué. Ce type de contact implique d'enfoncer les électrodes dans le milieu. Conventionnellement, l'enfoncement doit être négligeable en comparaison de la distance entre les électrodes (Enfoncement/Distance < 0.1) afin d'approximer de manière cohérente l'hypothèse « source ponctuelle ». La diffusion d'un champ électrique généré à partir de plusieurs sources de courant est théoriquement décrite par la formulation suivante (principe de superposition) :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(x, y, z)} \nabla V(x, y, z) \right) = - \sum_s I_s \delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \quad (2.11)$$

Le symbole Σ représente la somme des différentes sources I_s . Il est donc important de noter que cette équation permet l'additivité des sources de courant aussi appelée principe de superposition [Lagabrielle, 1996].

Dans plusieurs cas, relativement simples, le calcul du problème direct peut être réalisé analytiquement. La littérature indique les cas : du milieu homogène, du demi-espace homogène, de la

faïlle verticale, du milieu stratifié et du cylindre enfoui [Stefanescu *et al.*, 1930; Van Nostrand, 1953; Large, 1971; Wait, 1982].

Dans un espace infini, homogène et isotrope les surfaces équipotentielles sont sphériques lorsque la source est ponctuelle et placée en surface. En supposant que le potentiel électrique à l'infini est égal à 0, la distribution radiale du potentiel électrique peut être exprimée par :

$$V(r) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (2.12)$$

Cette équation permet de calculer la distribution du champ de potentiel électrique lorsque des mesures sont réalisées en forage. Le cas d'un demi-espace infini homogène et isotrope permet de ramener l'équation précédente à :

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.13)$$

Lors de prospections électriques classiques, les mesures sont généralement réalisées en surface. L'équation précédente permet alors une détermination exacte de la diminution du potentiel électrique à partir d'un point source dans un demi-espace homogène et isotrope [Wait, 1982]. Dans le cadre d'une source positionnée sur l'arête d'un quart-espace homogène et isotrope l'équation 2.13 est ramenée à :

$$V(r) = \frac{I\rho}{\pi r} \quad (2.14)$$

Cette expression est présentée car elle fournit une expression analytique valide en présence d'une topographie de type falaise. De manière pratique, une plus grande stabilité est observée lorsque deux électrodes sont utilisées afin de générer un champ électrique. La première électrode (conventionnellement notée A) crée une source de courant tandis que la seconde (notée B) génère un puits de courant. Mathématiquement, il est possible de calculer le potentiel en un point précis (cf. éq. 2.13). Concrètement un potentiel ne peut pas être mesuré seul. Une mesure réelle correspond toujours à une différence de potentiel entre deux points (notés M et N). En conséquence, l'équation 2.15 permet de déterminer la différence de potentiel entre deux points, générée par deux sources de courant à la surface d'un demi-espace homogène et isotrope de résistivité ρ .

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.15)$$

ΔV_{MN} représentant la différence de potentiel mesurée entre les électrodes M et N . « I » l'intensité du courant injecté entre les électrodes A et B . Les grandeurs AM , BM , AN , BN représentent respectivement la distance entre les électrodes A et M , B et M , A et N et enfin B et N . Un point très important ressortant de cette équation est la réciprocité des couples source-récepteur illustrée à la figure 2.1.

La figure 2.2 illustre la distribution d'un champ de potentiel électrique généré par un couple d'électrodes d'injection vue 2.2(a) en plan et 2.2(b) en coupe. La figure 2.2(c) illustre de manière évidente le caractère divergent du potentiel électrique à proximité des électrodes. Cette propriété a un lourd impact sur la méthode d'un point du vue pratique et théorique. Elle implique une déformation considérable du champ de potentiel électrique par la présence d'une anomalie résistante ou conductrice à proximité de la source de courant. Cette propriété porte le

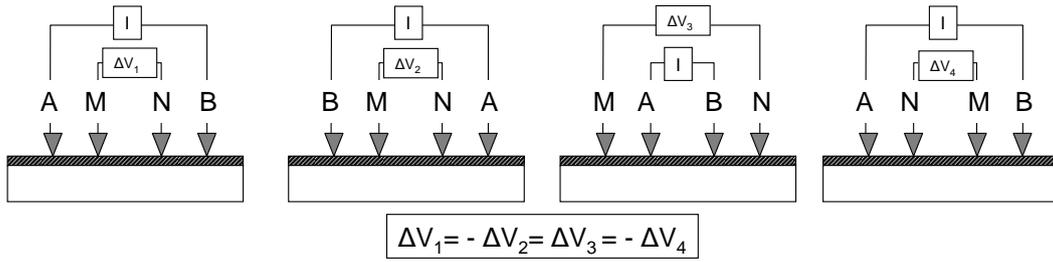


FIGURE 2.1 – Illustration du principe de réciprocité pour un quadripôle de mesure.

nom d'à-coup de prise et rend ces mesures difficilement interprétables.

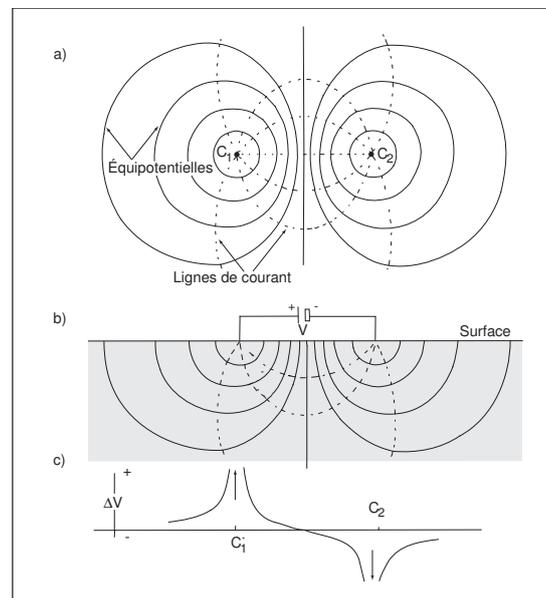


FIGURE 2.2 – Lignes de courant et équipotentiels pour deux électrodes d'injection C_1 et C_2 au dessus d'un demi-espace homogène. a) vue en plan, b) vue en coupe, c) voltage le long de l'axe recoupant C_1 et C_2 . D'après [Chouteau & Giroux \[2006\]](#).

D'un point de vue plus théorique et afin de limiter cette divergence numérique, [Lowry et al. \[1989\]](#) ont montré que la modélisation du champ électrique pouvait être découpée en un champ primaire et un champ secondaire, permettant ainsi de mieux prendre en compte la singularité du problème. Cette problématique sera approfondie dans la section 2.2.

D'un point de vue pratique (éq. 2.15), un facteur k nommé facteur géométrique est utilisé afin de regrouper les termes impliquant la position et la géométrie du milieu ausculté. En conséquence, cette variable peut être calculée simplement à partir de la géométrie du dispositif d'acquisition et du milieu ausculté. Dans le cas d'un demi-espace homogène et isotrope, et lorsque les électrodes sont placées en surface, le facteur géométrique vaut :

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (2.16)$$

Lorsque les électrodes sont placées à l'intérieur du demi-espace, l'expression précédente peut être généralisée grâce à la méthode des images [[Lagabrielle, 1996](#)] afin de déterminer la valeur

du facteur géométrique :

$$k = 4\pi \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N}} \right) \quad (2.17)$$

A' et B' étant les images de A et B par rapport à la surface du sol [Marescot *et al.*, 2006]. De manière complémentaire, [Kunetz, 1966] ont montré que le facteur géométrique peut être généralisé en réalisant le calcul suivant :

$$k = \frac{I_0}{\Delta V_0} \rho_0 = \frac{1}{R_0} \rho_0 \quad (2.18)$$

Où V_0 représente le potentiel électrique généré par une injection de courant I_0 dans un milieu de résistivité ρ_0 ($\Omega.m$) et $R_0 = I_{\rho_0}/\Delta V_{\rho_0}$ la résistance de transfert équivalente. Pour des raisons de simplicité la résistivité du milieu ρ_0 est généralement fixée à l'unité afin de supprimer sa présence dans l'équation 2.18. Il existe une relation linéaire liant la quantité de courant injectée et la distribution du potentiel électrique (éq. 2.13). En conséquence, il est plus aisé de travailler avec la résistance de transfert $R(\Omega)$ plutôt qu'avec la grandeur ΔV .

Le calcul de l'expression 2.13 n'est valide qu'à la condition que le milieu soit homogène et isotrope. Dans ce cadre, à partir de la connaissance de la résistance de transfert mesurée et du facteur géométrique, il est possible de déterminer la résistivité du milieu [Stefanescu *et al.*, 1930; Kunetz, 1966; Marescot *et al.*, 2006]. Lorsque la résistivité du milieu est hétérogène, le potentiel ne peut être déduit par l'équation 2.13 et inversement la résistivité du milieu ne peut être calculée directement. À cet effet, une variable de dimension sensiblement égale à la résistivité du milieu est créée. Cette variable résultant du produit entre le facteur géométrique et la résistance de transfert mesurée est appelée résistivité apparente :

$$\rho_a = \frac{\rho_0 \Delta V_{mes} I_0}{I_{mes} \Delta V_0} = \frac{\rho_0 R_{mes}}{R_0} \quad (2.19)$$

Avec R_{mes} la résistance de transfert mesurée et R_0 la résistance de transfert simulée sur un milieu homogène de résistivité ρ_0 . Cette normalisation de la mesure, par le facteur géométrique, permet de s'affranchir de l'effet de variation de ce dernier afin de ne travailler qu'avec des mesures sensiblement identiques.

Définition : Dans une de ses définitions les plus générales [Kunetz, 1966], la résistivité apparente représente le rapport (ou « normalisation » Annexe B) entre la différence de potentiel électrique mesurée sur le milieu ausculté et celle qui serait obtenue dans les mêmes conditions (même géométrie du dispositif, même intensité du courant) sur un terrain homogène et isotrope de résistivité $1 \Omega.m$. La résistivité apparente correspond alors à la résistivité qu'aurait le milieu si celui-ci était homogène.

Le théorème de réciprocité s'applique en méthode électrique et montre qu'une mesure en MN pour une injection en AB est égale à une mesure en AB pour une injection en MN . Ce principe peut notamment être utilisé afin de calculer la réciprocité (*rec*) d'une mesure [Friedel, 2003; LaBrecque & Daily, 2008] et ainsi de contrôler la qualité de l'acquisition :

$$rec = 2 \frac{f_{direct} - f_{reciproque}}{f_{direct} + f_{reciproque}} \quad (2.20)$$

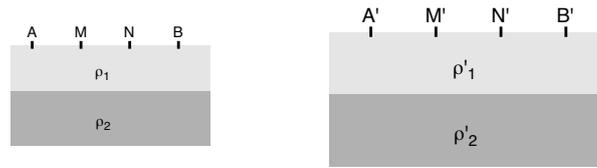


FIGURE 2.3 – Illustration du principe de similitude d’après *Chouteau & Giroux [2006]*.

où f_{direct} et $f_{reciproque}$ représentent respectivement la résistance de transfert d’une mesure directe (électrodes de courant à l’extérieur) et sa réciproque (électrodes de courant à l’intérieur du dispositif). Le 1^{er} principe de similitude, aussi appelé principe d’homothétie, indique qu’une modification proportionnelle de tous les paramètres d’un milieu engendrera la même mesure si le dispositif opère lui aussi un changement dans le même rapport homothétique (figure 2.3). Ce principe est particulièrement exploité dans le cas de la réalisation de modèles réduits (Cf. Chapitre 4 : DiguExp’ERT).

Synthèse et application : La résolution du problème direct, du problème inverse et de son optimisation nécessite une compréhension des phénomènes précédemment cités. En effet, le caractère de réciprocité et de distributivité des sources montre qu’il est plus intéressant de reconstruire des mesures de quadripôles à partir de mesures « pôle-pôle » que de générer une à une les mesures de quadripôle. De plus, à la différence des méthodes électromagnétiques basse fréquence (EM-BF) dépendant des fréquences d’acquisition, les caractéristiques « statiques » des méthodes électriques permettent de n’avoir qu’un facteur d’échelle à gérer afin de travailler sur des milieux d’échelle plus faible.

2.1.4 Erreur sur la mesure

Une des principales difficultés de l’inversion est de reconstruire un modèle unique et « parfait » alors que les données mesurées pour l’obtenir ne le sont pas. En effet, du fait du caractère non-linéaire de l’inversion et de la difficulté d’estimer le bruit qui impacte la mesure, le bruit se propage lors de l’inversion et conduit nécessairement à la formation d’artéfacts dans le résultat. À cet effet, l’erreur sur la mesure (ρ_a), peut être découpée en trois parties [Günther, 2004] :

$$\frac{\delta\rho_a}{\rho_a} = \frac{\delta k}{k} + \frac{\delta V}{V} + \frac{\delta I}{I} \quad (2.21)$$

L’intensité du courant injecté peut être mesurée facilement et avec une grande précision, c’est pourquoi l’erreur sur cette mesure ne sera pas investiguée. Les deux autres types d’erreur dépendent cependant de plusieurs facteurs qu’il est important de discuter.

2.1.4.a Erreur sur le facteur géométrique

Une part de l’erreur globale peut être attribuée à notre incapacité à représenter l’acquisition de manière réaliste. Or, le facteur géométrique regroupe à la fois les termes impliquant la géométrie de l’acquisition et du milieu ausculté (éq. 2.18). En effet, selon la dextérité de l’opérateur et en fonction de la géométrie du quadripôle de mesure, une mesure peut être plus ou moins affectée par l’erreur de positionnement des électrodes. Lorsque des mesures sont réalisées en ligne (tomographie 2D), les travaux de Zhou & Dahlin [2003] illustrent les effets des erreurs « in-line »

(erreur sur l'espacement entre les électrodes sur la ligne) et « off-line » (électrodes positionnées à l'extérieur transversalement). Dans le cadre d'un demi-espace homogène et isotrope, cette étude indique que l'erreur sur le facteur géométrique peut être calculée par :

$$dk = \frac{k^2}{2\pi} \left[\left(\frac{dr_{BN}}{r_{BN}^2} - \frac{dr_{BM}}{r_{BN}^2} \right) - \left(\frac{dr_{AN}}{r_{AN}^2} - \frac{dr_{AM}}{r_{AM}^2} \right) \right] \quad (2.22)$$

Avec r la distance séparant deux points placés en indice, dr l'erreur sur cette distance et enfin dk l'erreur sur le facteur géométrique. Cette étude montre que l'erreur sur le positionnement possède un effet plus élevé dans le cadre d'une erreur en ligne et dépend de la géométrie du quadripôle d'acquisition. En conséquence, une erreur de 10 % sur le positionnement peut entraîner une erreur de 20 % sur le facteur géométrique [Zhou & Dahlin, 2003].

De plus, la géométrie du milieu ausculté possède un effet important sur la mesure. À cet effet, les expressions 2.13 et 2.14 démontrent que l'erreur sur le facteur géométrique peut être de 200 % si l'on ne prend pas en compte la topographie de l'ouvrage et que le quadripôle de mesure est placé sur l'arête d'un quart-espace homogène et isotrope.

2.1.4.b Couplage électromagnétique

Lorsque des campagnes d'IRE sont réalisées, même avec des électrodes impolarisables, on observe une différence de potentiel non négligeable [Lagabrielle, 1996] présente entre les électrodes d'acquisition sans avoir à injecter de courant. Les courants telluriques sont à l'origine de ce phénomène. Cependant, l'effet de ces courants ne devient important que lorsque les distances entre électrodes sont élevées (supérieures à 100 m) pour des prospections à grande profondeur. Une autre forme de couplage peut être induite par des champs électromagnétiques d'origine industrielle [Lagabrielle, 1996]. Enfin, un dernier type de couplage peut exister entre le passage d'un câble d'injection et un câble de mesure, en fonction de la qualité d'isolation des câbles d'acquisition.

2.1.4.c Polarisation des électrodes, contact et erreur matérielle

Du fait du contact avec le sol mais aussi de l'injection de courant, les électrodes de mesures peuvent comporter un certain niveau de polarisation pouvant jouer un rôle important sur la mesure [Dahlin, 2000]. Cette polarisation étant complexe à intégrer dans la résolution du problème direct, dans le cadre de la thèse, cet effet sera considéré comme un bruit devant être diminué ou filtré. Techniquement, les systèmes de mesure actuels utilisent des critères d'injection complexes permettant de limiter fortement ce type d'erreur. Ainsi la forme du créneau d'injection, la répétition de la mesure mais aussi le fait de ne pas utiliser comme électrode de mesure une électrode venant juste d'injecter, permettent de limiter la formation de ce type de bruit.

Plus la surface de contact électrode-sol est faible et moins l'injection de courant est facilitée. Dans le cadre de sols secs, endurcis, souvent résistants électriquement (cas des calcaires francs et propres) ce phénomène peut induire une forte erreur sur la mesure. Ce contact peut être amélioré artificiellement par l'ajout de bentonite ou d'eau sur les électrodes à mauvais contact. Les stations d'acquisition récentes permettent de mesurer de manière in-situ cette résistance de prise afin d'améliorer le contact électrode/sol.

Plus « simplement », une part de l'erreur peut être attribuée à l'appareillage matériel. Ce type d'erreur est surtout présent lorsque le niveau de différence de potentiel mesuré est très faible (souvent lorsque le facteur géométrique est très élevé). Or, les matériels de mesure actuels permettent d'imposer une différence de potentiel mesurée minimum en augmentant le courant injecté. Une seconde erreur matérielle peut être assimilée à la résolution minimum, en fonction du convertisseur analogique, de l'appareil de mesure. Cette dernière erreur sera considérée négligeable en comparaison des autres erreurs de mesure.

Synthèse et application : Dans le cadre de l'auscultation des OHT, la profondeur d'investigation recherchée va de 0 à 20 m (OHT en général). Dans ce cadre, l'hypothèse de courants telluriques ayant un impact significatif sur la mesure a été écartée [Lagabrielle, 1996]. Cependant, les OHT en charge permanente, se trouvent souvent à proximité d'une centrale de production d'hydroélectricité. Ainsi, la présence de l'usine et de stations de transformation à proximité peut générer des champs électromagnétiques perturbant la mesure. Cependant, l'influence de ce type d'erreur ne peut être traité qu'au cas par cas.

La prise en compte de la topographie doit être totale afin que le calcul du facteur géométrique soit précis. Or, la topographie des OHT, souvent complexe, peut induire des erreurs importantes sur le facteur géométrique. En fonction de la géométrie de l'acquisition, certaines mesures sont plus sensibles que d'autres aux variations topographiques. Ainsi, plus une mesure est sensible à la variation d'une surface topographique et plus celle-ci doit être reproduite avec précision. Un quadripôle de mesure étant préférentiellement sensible à proximité des électrodes, ce sont les zones proches des électrodes qu'il est important de reproduire avec précision. En conséquence, une erreur, même faible, sur la position des électrodes, ajoutée à l'action de la topographie, peut engendrer des valeurs erronées du facteur géométrique.

2.1.5 Physique des sols et des roches

La diffusion d'un champ électrique à courant continu dans un milieu est fonction d'une seule propriété physique caractérisant le matériau. Ce paramètre physique dont la variation peut être spatiale et temporelle est la résistivité électrique. La résistivité électrique est une grandeur complexe elle-même fonction de propriétés internes aux sols et aux roches. En conséquence, cette sous-section a pour objectif de présenter ces principaux facteurs ainsi que leur impact sur la valeur de la résistivité électrique.

2.1.5.a Propriétés électriques

Les méthodes électromagnétiques à basses-fréquences (EM-BF), comprenant entre autres les méthodes géo-électriques, ont pour but la reconstruction d'un modèle décrivant la distribution de résistivité électrique du sous-sol. Les « géo-matériaux » varient sur une plage de résistivité de plus de 5 ordres de grandeur (cf. figure 2.4). Cet aspect est un atout majeur pour la caractérisation des géomatériaux.

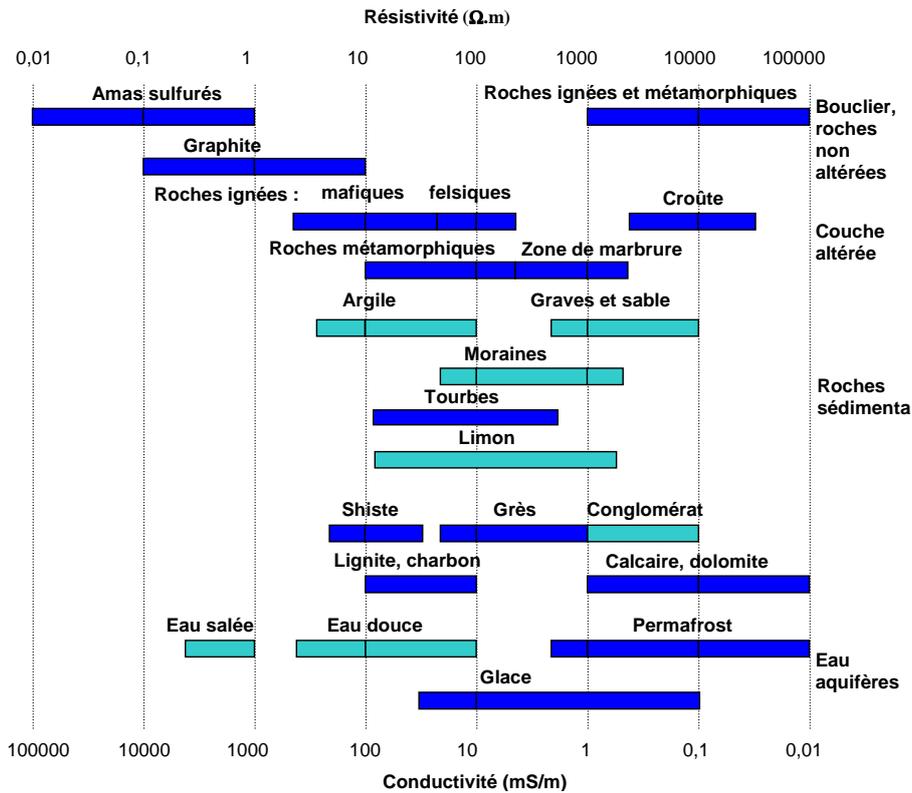


FIGURE 2.4 – Classification de différents sols, roches et liquides du point de vue de leur résistivité. La couleur turquoise est réservée aux matériaux entrant couramment dans la composition des digues. Modifiée d'après Palacky [1987].

Synthèse et application : Les géomatériaux communs constituant les ouvrages hydrauliques en terre sont de type alluvial fin homogène (argile, limon, loess) à grossier hétérogène (conglomérat). La résistivité attendue (hors substratum rocheux) est de l'ordre de $5 \Omega.m$ (argiles) à $5\,000 \Omega.m$ (sables et graves propres). L'eau présente dans le réservoir peut présenter une variation de résistivité de $2 \Omega.m$ pour une eau fortement chargée à $300 \Omega.m$ pour une eau « pure » provenant des montagnes (figure 2.4). Dans le cadre d'expérimentations de type traçage, la résistivité de la saumure utilisée peut descendre à $0.2 \Omega.m$.

2.1.5.b Les différents modes de conduction électrique

La circulation d'un courant électrique peut être réalisée à travers différents modes de conduction [Waxman & Smits, 1968; Telford *et al.*, 1990; Michot *et al.*, 2003; Cosenza & Tabbagh, 2004]. À savoir, les conductions sont de type :

- électronique (dans le cas des matériaux métalliques) ;
- électrolytique (*via* un fluide parcourant les pores d'un matériau [Ward, 1990]) ;
- surfacique (mouvement des cations dans l'électrolyte à la surface des particules argileuses [Ward, 1990; Revil & Glover, 1998]).

Dans le cadre de l'étude des géo-matériaux du génie civil, la conduction électrique est assurée majoritairement de manière électrolytique et en partie de manière surfacique lorsque le milieu contient des argiles [Revil & Glover, 1998].

2.1.5.c Facteurs d'influence de la résistivité électrique

Il est couramment admis que la résistivité électrique (ρ) des géomatériaux est fonction de plusieurs paramètres :

$$\rho(\Phi, S_w, T_a, TypeA, T, \rho_d, P, TDS), \quad (2.23)$$

où Φ représente la porosité du milieu, S_w le degré de saturation en eau du milieu, T_a la teneur en argiles, $TypeA$ les types d'argiles, T la température du milieu, ρ_d la masse volumique sèche, P la pression et TDS (Total Dissolved Solids) la teneur en ions dissous de l'eau interstitielle. Ces acteurs vont jouer un rôle, complexe et interdépendant, plus ou moins important sur la résistivité du milieu et entraînant des propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques spécifiques à chaque sol.

Quantifier l'augmentation de conductivité d'un matériau en fonction d'une augmentation d'argile et en fonction du type d'argile ne peut être fait de manière empirique. En effet, même s'il existe des modèles pour certains sols, les lois reliant ces paramètres sont trop complexes pour générer une loi générale à ce comportement.

Synthèse et application : La méthode IRE est sélectionnée par [Johansson, 1997] pour sa forte sensibilité au phénomène d'érosion interne (Chapitre 1). En effet, la résistivité électrique est extrêmement sensible à la distribution des particules, à la proportion en fines et à la teneur en eau d'un matériau. La « perte » en fines peut être reliée directement au phénomène de suffusion, elle entraîne temporellement une modification majeure de la résistivité électrique pouvant être théoriquement suivie en monitoring électrique.

2.1.5.d Propriétés hydrauliques et résistivité

La diffusion électrolytique étant assurée majoritairement par l'électrolyte parcourant l'espace poral, trois paramètres principaux entrent en compte :

- la quantité de liquide présent dans les pores [McCarter, 1984];
- la résistivité électrique des fluides [Archie, 1942];
- les caractéristiques de l'espace poral.

La résistivité électrique du liquide occupant l'espace poral dépend principalement de sa teneur en ions dissous (TDS) et de la température du liquide (Cf. paragraphe 2.1.5.e). Ces paramètres permettent ainsi d'obtenir la résistivité électrique du liquide par une loi de mélange [Rhoades *et al.*, 1976; Beck, 2008].

L'espace poral représente les interstices (vides) d'un matériau pouvant contenir un fluide (gazeux ou liquide). Suivant les applications (hydrogéologiques, pétrolières) il est commun de rencontrer les termes de porosité : occluse, libre, piégée (fonction du diamètre d'accès aux pores), utile, résiduelle, totale, et efficace pour caractériser la porosité d'un milieu. D'un point de vue électrique ce comportement poral, à savoir occlus ou libre, va avoir un rôle important sur la mesure.

Depuis le début des années 1940, de nombreuses relations empiriques ont été proposées pour établir un lien entre les paramètres précités et la résistivité électrique. Les travaux les plus

communément cités concernent la relation découverte par Archie [1942] concernant les matériaux « propres » saturés en eau [Archie, 1942; Ward, 1990] :

$$\rho = \rho_w F = \rho_w a \Phi^{-m} \quad (2.24)$$

où ρ_w symbolise la résistivité électrique de l'eau interstitielle, a et m (cimentation) sont des coefficients sans dimension. Φ représente la porosité et F le facteur de formation. Cette loi fait l'hypothèse que la matrice agit comme un isolant électrique et que toute la conduction est assurée par le fluide interstitiel. Depuis ces travaux, ce sujet est le fruit de nombreuses discussions et applications dans la littérature afin de généraliser cette loi et son utilisation [Ward, 1990; Glover *et al.*, 2000; Friedman, 2005; Hayley *et al.*, 2011]. À cet effet, Keller & Frischknecht [1966] définissent une loi permettant d'intégrer empiriquement le degré de saturation en étendant l'équation 2.24 à :

$$\rho = \rho_w F = \rho_w a \Phi^{-m} S_w^{-n} \quad (2.25)$$

où S_w représente le degré de saturation en eau du milieu et n une constante empirique reflétant les propriétés de l'eau et le fait que la relation entre résistivité et saturation en eau n'est pas linéaire [Friedman, 2005]. Lorsque la conductivité seule du liquide interstitiel ne permet plus d'expliquer la résistivité d'un milieu, lorsque la matrice ne peut plus être considérée comme un isolant électrique, il est possible d'utiliser avec prudence et dans certaines conditions la formulation suivante [Ward, 1990; Revil & Glover, 1998] :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Phi^m}{\rho_w} + \frac{m(1-\Phi)^m}{\rho_m a t} \quad (2.26)$$

Cette formulation permet ainsi de séparer l'apport de la matrice m et du fluide interstitiel w , avec $\rho_m a t$ la résistivité de la matrice. En présence de milieux argileux et partiellement saturés Simandoux dans Ward [1990] propose l'expression suivante :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V_{cl}}{\rho_{cl}} S_w + \frac{\Phi^m}{a \rho_w} S_w^2 \quad (2.27)$$

où V_{cl} représente le volume d'argile, ρ_{cl} la résistivité de l'argile, permettant ainsi une prise en compte de l'effet de l'argile.

Synthèse et application : Dans le cadre de la surveillance des ouvrages hydrauliques, imager le degré de saturation en eau est primordial. En effet, la teneur en eau d'un matériau et son évolution peuvent être directement rapprochées des phénomènes d'infiltration pouvant entraîner de l'érosion interne. Cependant, caractériser fidèlement et directement la distribution du degré de saturation d'un ouvrage nécessite des études complémentaires au cas par cas. Ce type d'étude dépasse l'utilisation simple des précédentes lois de comportement [Beck, 2008]. Cependant, en émettant l'hypothèse que seule varie la teneur en eau d'un ouvrage, une étude en variation temporelle peut permettre le suivi de l'évolution du degré de saturation en eau. Suivant ces hypothèses, et en fonction du paramètre n , cette capacité est permise grâce à la simplification de l'équation 2.25 en :

$$\frac{\rho_{t1}}{\rho_{t2}} = \frac{S_{w_{t1}}^{-n}}{S_{w_{t2}}^{-n}} \quad (2.28)$$

Avec, respectivement ρ_{t1} et ρ_{t2} , la distribution de résistivité aux instants $t1$ et $t2$ d'auscultation. S_{wt1}^{-n} et S_{wt2}^{-n} représentent respectivement la distribution de saturation du milieu aux instants $t1$ et $t2$ d'auscultation. En faisant l'hypothèse que la variable n est une constante pour la totalité de l'ouvrage et que celle-ci est connue, une étude en variation temporelle doit permettre d'imager la variation du degré de saturation en eau et donc de l'infiltration. Lorsque le régime d'une fuite est déjà établi, l'ajout d'un traceur (saumure) peut être utilisé, pouvant ainsi améliorer considérablement l'étude. Cette plus-value peut être confortée par la connaissance de la vitesse de déplacement du front « salé » ainsi que par la connaissance de la résistivité de la saumure injectée.

2.1.5.e Propriétés thermiques et résistivité

La résistivité électrique d'un matériau est fonction de sa température. En effet, une augmentation de la température abaissant la viscosité du fluide, elle permet une augmentation de la mobilité ionique et de la conduction électrolytique [Keller & Frischknecht, 1966; Hayley *et al.*, 2007]. Dans ce sens de nombreuses lois décrivant le comportement électrique d'un matériau en fonction de sa température ont été proposées. Parmi ces lois, Keller & Frischknecht [1966] ont proposé la loi empirique suivante :

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18)} \quad (2.29)$$

Cette loi permet de modifier la résistivité de tout matériau depuis une température de référence (18 °C dans le cas précis) vers une température désirée (T). Où T représente la température recherchée, ρ_T la résistivité électrique à cette température, ρ_{18} la résistivité électrique du milieu à 18 °C. Le coefficient α (°C⁻¹) permet de corriger la température [Keller & Frischknecht, 1966; Besson *et al.*, 2008]. Globalement, d'après ces auteurs, ce coefficient varie entre 0.02 et 0.03 °C⁻¹. Dans le cas de sols argileux, une seconde loi plus spécifique peut être utilisée [Abu-Hassanein *et al.*, 1996]. La figure 2.5 illustre l'évolution de la résistivité de deux géo-matériaux en fonction de leur température pour deux paramètres α .

Synthèse et application : En France, les sols connaissent des variations de température au cours de l'année pouvant aller de 0 et 30 °C. L'amplitude de la variation thermique diminue avec la profondeur. D'après ces éléments la résistivité d'un matériau (à faible profondeur ou à proximité d'une infiltration) peut donc doubler sa valeur suivant la période de l'année où est réalisée la mesure. C'est pourquoi afin de pouvoir comparer des résultats (de proche surface), ceux-ci doivent être réalisés sur des périodes temporelles communes. Une méthode plus pertinente serait de posséder la connaissance de la distribution de température du remblai aux deux instants afin de réaliser une correction, ou une intégration dans le problème inverse des effets de la température.

2.1.6 Les principales stratégies de prospection

Définition : Une stratégie peut être définie comme l'art de coordonner des actions permettant de répondre à une problématique. En conséquence, une stratégie d'auscultation géophysique consiste

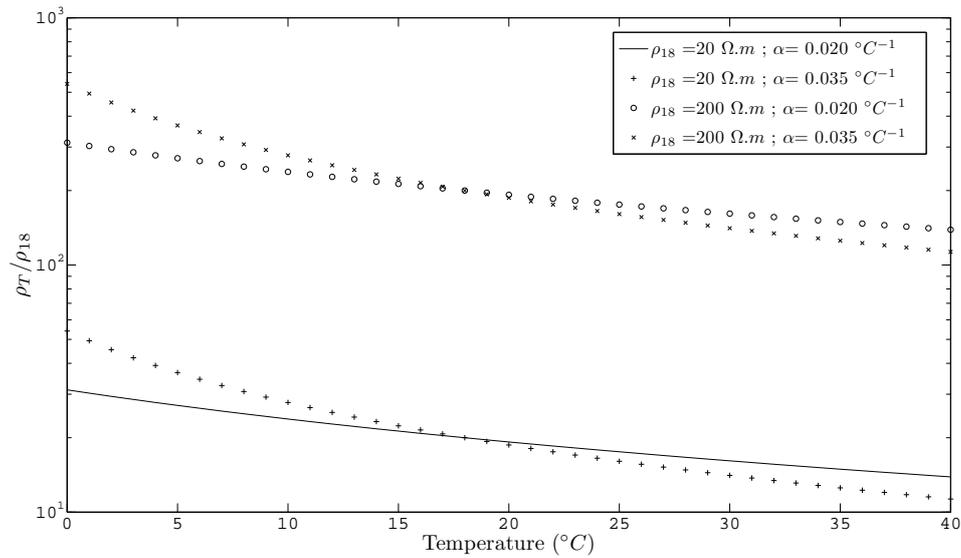


FIGURE 2.5 – Influence de la température sur la résistivité électrique de deux géo-matériaux ($20 \Omega.m$ et $200 \Omega.m$ à $18 \text{ } ^\circ\text{C}$) pour deux valeurs extrêmes du coefficient de température α (0.02 et $0.035 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). modifié d'après Sjödaahl et al. [2006].

à « attaquer » le problème sous différents angles afin de trouver la solution la plus adaptée.

Une mesure électrique est principalement sensible à la distribution de résistivité électrique à proximité des électrodes. Afin de pouvoir détecter des variations spatiales de résistivité, une campagne d'imagerie nécessite la réalisation de plusieurs mesures de résistivité en différents points. Lorsque la méthode IRE est sélectionnée pour une reconnaissance, le principal travail d'un opérateur est de trouver la stratégie d'acquisition et d'interprétation la plus adaptée à l'objet de l'étude. En effet, une démarche de prospection peut être optimisée en fonction du milieu ausculté et de la problématique d'auscultation. Ainsi, la stratégie ne sera pas la même si le terrain présente des variations $1D$ ou $3D$ et si l'objectif est de détecter une faille verticale ou des marnières. Ainsi, à travers ce sous-chapitre, une liste non exhaustive des stratégies de prospection en courant continu, de leurs avantages ainsi que de leurs limites est présentée.

2.1.6.a Le sondage électrique

Le sondage électrique est une des premières stratégies opérée dans le but de la prospection par méthode électrique à courant continu [Stefanescu et al., 1930]. Concrètement, cette stratégie s'applique en réalisant des mesures tout en augmentant la distance entre les électrodes (figure 2.6). Cette stratégie a pour objectif de détecter des variations résistivité perpendiculaires à la surface. Ainsi en répétant plusieurs mesures avec un espacement inter-électrode supérieur, il est possible d'obtenir une information sur la résistivité apparente en fonction de la profondeur. Historiquement, l'interprétation de cette stratégie est basée sur l'utilisation d'abaques permettant la reconstruction d'un modèle stratifié horizontalement. Cette stratégie pose comme hypothèse que le milieu ausculté ne présente de variation de la résistivité électrique que dans le sens vertical. Ce type de milieu est noté « $1D$ », car il ne permet une variation que dans une seule dimension. Cette stratégie pose un *a priori* élevé sur le modèle, permettant ainsi de simplifier fortement sa

reconstruction et d'augmenter la précision du résultat.

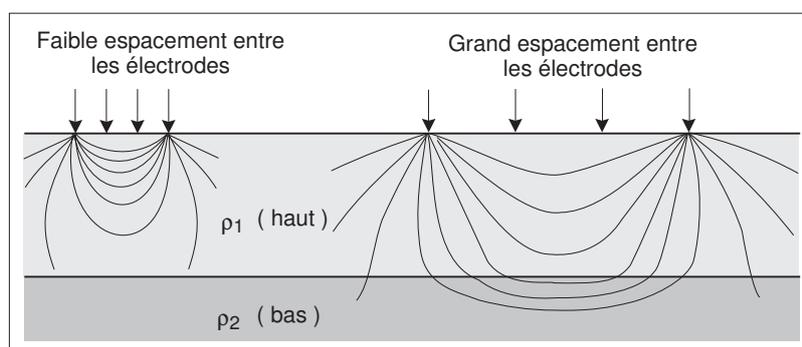


FIGURE 2.6 – Illustration des lignes de courant issues d'un faible espacement d'électrodes et d'un plus fort espacement d'électrodes. Les lignes de courant sont plus fortement perturbées par la présence d'un substratum (ρ_2) dans le cas de forts espacements. D'après Chouteau & Giroux [2006].

Synthèse et application : Une stratégie de type "sondage électrique" permet de diminuer considérablement le coût d'acquisition et d'augmenter la détermination du modèle ausculté. Cependant, les OHT, en fonction de leur typologie, présentent des variations à la fois verticales, longitudinales et transversales. Or, ce comportement va à l'encontre du principe de sondage électrique et peut mener à la reconstruction d'artéfacts plus ou moins élevés limitant considérablement l'interprétation du résultat.

2.1.6.b Le profilage électrique (trainé électrique)

Cette stratégie est historiquement appliquée pour la détection de variations de résistivité le long de l'axe de prospection. Lorsque le contraste de résistivité entre les matériaux est suffisant, cette stratégie permet de détecter par exemple une faille verticale. Une campagne classique de profilage électrique nécessite la réalisation d'une ou plusieurs mesures suivant une configuration géométrique d'électrodes unique. Cette série de mesures est ensuite reproduite à l'identique le long du profil désiré (figure 2.7).

L'appellation de profilage électrique est aujourd'hui réservée aux appareillages permettant de réaliser des prospections à « haut rendement » et permettant ainsi de couvrir des linéaires importants. Hormis la méthode de trainé électrique aquatique et les dispositifs à roues dentées, cette stratégie nécessite généralement l'emploi d'électrodes capacitives permettant de s'affranchir de contacts galvaniques. L'objectif de cette stratégie est de fournir un profil (ou plusieurs profils, figure 2.7) de la résistivité apparente du sous-sol. À la différence du sondage électrique, le milieu ne peut présenter des variations de résistivité électrique que le long de l'axe de prospection. Aucune variation verticale ni transversale de résistivité n'est supposée lors de l'utilisation de ce type de dispositif.

Synthèse et application : Cette stratégie d'auscultation est conventionnellement réalisée lors d'étude « grand-rendement » et de manière longitudinale à l'ouvrage permettant de qualifier de longs linéaires d'OHT (principe de zonage). Cependant, plus l'objet de l'auscultation possède un comportement 3D, plus le résultat est

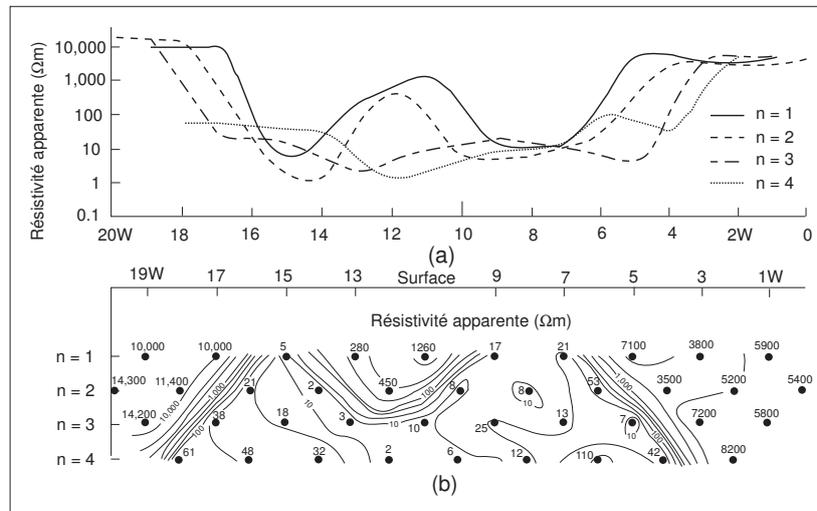


FIGURE 2.7 – Résultat de plusieurs profils électriques donnant (a) la résistivité apparente mesurée suivant plusieurs espacements d'électrodes ($n = 1$ à 4) et (b) sa représentation en pseudo profondeur, d'après Chouteau & Giroux [2006].

impacté par des effets liés à ce comportement 3D.

2.1.6.c La Mise À la Masse (MAM)

La technique de mise à la masse est née dans les années 1920 en prospection minière, permettant de cartographier l'extension géographique de corps conducteurs. Le principe de la méthode consiste à injecter, *via* une électrode placée dans un forage dans le corps conducteur (minerai), un courant électrique et de réaliser un puits de courant en surface à l'infini. Ensuite, une paire d'électrodes mesure une différence de potentiel sur une grille afin de cartographier le potentiel généré.

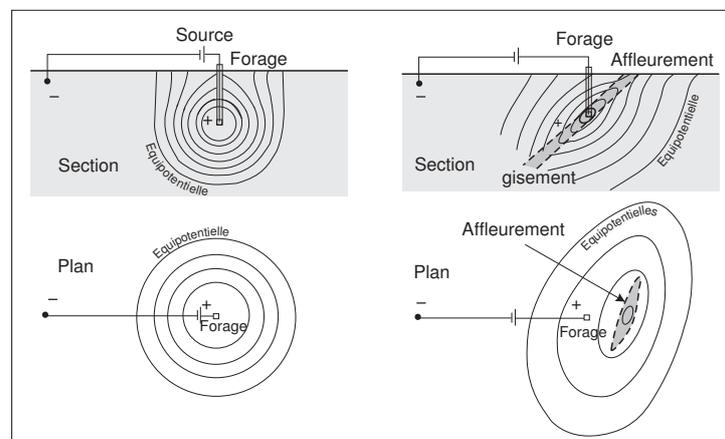


FIGURE 2.8 – Illustration de la perturbation du champ de potentiel électrique induite par la présence d'un gisement conducteur comparé à un milieu homogène. L'effet de cette perturbation sur le champ de potentiel en surface illustre la stratégie de mise à la masse, d'après Chouteau & Giroux [2006].

Synthèse et application : Dans le cadre de la détection d'infiltrations dans les ouvrages hydrauliques en terre, cette méthode est remise en avant pour ses capacités de description de corps conducteurs. En effet, l'infiltration (si présente dans le corps de digue) peut se comporter comme le minerai conducteur d'une prospection minière. De plus, l'accès à celle-ci (positionnement de l'électrode de courant) est facilité par la continuité existant entre le réservoir de la digue et la fuite elle-même. Ce caractère particulier a mené récemment à la réalisation de nouveaux matériels optimisés pour la détection d'infiltrations (méthode Aquatrack®, [Kofeed, 2009]).

2.1.6.d L'Imagerie de Résistivité électrique 2D (IRE-2D)

L'IRE 2D est une méthode née dans les années 1980 permettant de lier les avantages des méthodes du sondage et du profilage électrique. Cette méthode s'est développée grâce à l'évolution du matériel de prospection et des capacités de traitement informatique.

De manière conventionnelle, la première étape d'une auscultation « 2D » sur le terrain consiste à positionner des électrodes espacées régulièrement le long d'un axe. La seconde étape nécessite la réalisation de mesures suivant différents arrangements d'électrodes appelés protocoles (cf. Annexe A). La principale finalité de cette méthode est de restituer une coupe donnant la distribution spatiale de résistivité selon un plan vertical. Cette stratégie pose comme *a priori* que le milieu ausculté ne présente pas de variation dans le sens perpendiculaire à ce plan.

Dans la littérature, cette méthode est souvent notée « 2.5D » [Coggon, 1971; Dey & Morrison, 1979; Xu *et al.*, 2000]. Cette appellation provient du caractère 3D de la source (hypothèse source ponctuelle) et du caractère 2D du milieu modélisé. Numériquement, ce caractère ne peut être modélisé directement, car une source ponctuelle en 2D correspond à une source linéique. Or, le comportement d'une source ponctuelle et linéique est différent. À cet effet, la méthode 2.5D permet de résoudre le problème en domaine de Fourier en acceptant la prise en compte du caractère 3D de la source.

Synthèse et application : La stratégie IRE-2D permet de posséder un aspect imagerie grand rendement (grâce à des techniques de type « roll-along ») tout en gardant une résolution élevée.

Lorsqu'un OHT ne présente peu ou pas de variations dans le sens longitudinal, celui-ci peut être considéré comme un milieu 2D. En conséquence, une étude de reconnaissance 2D transversale peut théoriquement être réalisée sans faire intervenir d'artéfacts dans le résultat d'inversion. Cependant, la profondeur d'investigation lors de reconnaissances transversales aux OHT est souvent faible en conséquence de la couverture limitée de la tomographie.

A contrario, lorsque la prospection est réalisée de manière longitudinale, la longueur du linéaire ausculté offre une couverture d'électrodes pouvant impliquer une profondeur d'investigation suffisante (>20 m). Cependant, suivant l'axe perpendiculaire à cette prospection le milieu ne peut être considéré 2D car il présente des variations (variation de la topographie, présence d'un réservoir d'eau) entraînant la

formation d'artéfacts.

Enfin, il peut être noté l'utilisation très originale et pertinente de la méthode IRE-2D par Cho & Yeom [2007]. Le principe consiste à disposer deux lignes d'électrodes longitudinales à l'ouvrage et de générer des protocoles de mesure entre les lignes. L'objectif de cette étude est la détection de chemins préférentiels d'écoulement induis par une discontinuité dans le noyau. Cependant, cette étude est aussi réalisée avec une hypothèse 2.5D du milieu.

2.1.6.e L'Imagerie de Résistivité électrique 3D (IRE-3D)

La majorité des milieux auscultés (domaines : médecine, géologie, hydrogéologie, environnement, génie civil, ...) présentent une variation spatiale de la résistivité dans les trois dimensions. En conséquence, il est nécessaire de disposer d'outils de modélisation et d'inversion 3D afin de reconstruire de tels milieux. Lorsque les précédentes stratégies sont opérées sur un milieu 3D des artéfacts apparaissent sur le résultat du fait de la mauvaise prise en compte du milieu [Sjödahl *et al.*, 2006; Hennig *et al.*, 2005; Marescot *et al.*, 2006; Loke, 2011].

Cependant, le nombre de degrés de liberté augmentant considérablement lors d'une reconnaissance 3D, il est nécessaire d'obtenir plus d'information provenant des mesures afin de reconstruire un modèle réaliste. Pour satisfaire ce point, conventionnellement, les électrodes sont disposées selon une grille régulièrement espacée en surface et/ou en forage.

Synthèse et application : La stratégie IRE-3D permet une prise en compte pertinente de la problématique d'auscultation des OHT. Cependant, les progiciels d'inversion actuels ne permettent pas l'intégration de l'*a priori* que l'opérateur possède sur les ouvrages. Ainsi, la possibilité d'intégrer la topographie dans une inversion 3D n'est réalisable que depuis récemment (Res3Dinv_x64®) mais ne permet pas l'ajout de milieux placés en dehors de la zone couverte par les électrodes. Or ces milieux, tel que le réservoir d'eau, ont un fort impact sur les mesures de résistivité électrique. Enfin, le coût de campagnes d'imagerie 3D sur un ouvrage est particulièrement élevé concernant l'acquisition et le traitement des données, restreignant leur utilisation à la reconnaissance ou surveillance de faibles portions d'ouvrages.

2.1.6.f L'imagerie d'évolutions temporelles (IRE-4D)

À la différence des stratégies précédentes, le « monitoring » s'intéresse à la variation temporelle de la résistivité électrique [Daily *et al.*, 1992; Ramirez *et al.*, 1993; Guérin *et al.*, 2004; Chambers *et al.*, 2004; French & Binley, 2004; Hayley *et al.*, 2011]. Cette stratégie a pour objectif d'imager l'évolution d'un milieu dans le temps et non plus le milieu lui-même. L'un des avantages de la méthode est de permettre de s'affranchir en partie des effets 2D ou 3D du milieu investigué. Cependant, l'affranchissement ne pouvant être total, les limitations posées aux stratégies précédentes restent identiques. Ainsi, un ouvrage suivi en laps de temps par IRE-2D possédera toujours en partie des artéfacts 3D d'inversion.

Synthèse et application : Dans le cadre de la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre, cette méthode est particulièrement pertinente car l'érosion interne est

une pathologie engendrant une modification des paramètres internes de l'ouvrage en fonction du temps. De plus, la résistivité électrique est très sensible aux modifications occasionnées par l'érosion interne. C'est pourquoi, une partie du travail de thèse s'intéresse particulièrement à la démarche d'auscultation en variation temporelle car elle permet une réelle plus-value pour la surveillance des OHT.

2.1.6.g Conclusion et perspectives de nouvelles stratégies

Les techniques d'inversion conventionnelles 2D impliquent la résolution du problème direct *via* une formulation dans l'espace de Fourier. Cette technique bien qu'efficace d'un point de vue calculatoire ne permet aucune variation de la résistivité dans le sens perpendiculaire à la prospection. Ainsi, la prise en compte d'une forte variation topographique et d'un réservoir d'eau ne peut être réalisée lors de prospections longitudinales aux OHT. D'un autre côté, les méthodes 3D disponibles sont à la fois trop lourdes d'un point de vue calculatoire et trop chères du fait de l'acquisition sur le terrain. C'est pourquoi, de nouvelles stratégies d'inversion plus pertinentes doivent être envisagées pour permettre de répondre de manière plus robuste à l'auscultation des OHT. Les chapitres suivants ont ainsi pour objectif de présenter les développements nécessaires à la création de nouvelles approches (Chapitre 2 et Chapitre 3) et leur mise en application (Chapitre 4 et 5).

Plusieurs méthodes peuvent être distinguées parmi les techniques conventionnelles. Ainsi, les méthodes « en laps de temps » et la méthode de mise-à-la-masse possèdent un fort potentiel concernant la problématique de surveillance des OHT. En effet, ces stratégies permettent de s'affranchir en partie de la complexité de l'ouvrage, permettant ainsi de se focaliser sur l'imagerie des infiltrations ou de leur évolution. De plus, ces stratégies peuvent être utilisées de manière conjointe, offrant une perspective intéressante pour la détection et la quantification de fuites, en particulier si ces méthodes sont couplées à des modèles inverses thermo-hydrauliques.

2.2 Le problème direct

Définition : Le problème direct correspond au processus permettant le calcul du champ de potentiel électrique généré par une ou plusieurs sources de courant en tout point d'un modèle de résistivité $\rho(x, y, z)$.

Le problème inverse permet de reconstruire un modèle décrivant la variation de résistivité électrique du sous-sol à partir de données mesurées indirectement. Or, le problème direct est un passage nécessaire pour résoudre le problème inverse. De plus, la résolution du problème inverse nécessite de répéter un certain nombre de fois le calcul du problème direct. En conséquence, la résolution du problème direct est un point clé nécessitant une attention particulière.

Les logiciels d'inversion commerciaux d'IRE, appliqués à la reconnaissance des OHT, ne permettent pas une prise en compte totale du problème. C'est pourquoi, une partie de ce travail de thèse a pour objectif de montrer les limitations de ces logiciels et de présenter de nouvelles stratégies d'acquisition permettant de mieux répondre à la problématique.

Le développement de ces stratégies nécessite la réécriture du problème direct ainsi que du problème inverse. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un nouveau code, nommé InGEOHT (Inversion des mesures Géo-Électriques provenant des Ouvrages Hydrauliques en Terre). En conséquence, ce sous-chapitre présente le problème direct développé au cours de la thèse oscillant entre références bibliographiques (utilisées pour le code InGEOHT), travaux d'implémentation, tests numériques et enfin développements personnels.

2.2.1 La résolution du problème direct

La résolution du problème direct ne peut être accomplie analytiquement que dans de rares cas simples. Ces cas sont généralement éloignés d'une réalité plus complexe nécessitant l'utilisation de méthodes numériques. L'inversion de données géo-électriques nécessite la répétition du calcul du problème direct un nombre souvent élevé de fois. En conséquence, un problème direct précis et économe (en mémoire et en temps) doit être mis en place afin de satisfaire les critères précédents.

Les méthodes numériques les plus répandues pour la résolution du problème direct sont :

- la méthode des différences finies ;
- la méthode des éléments finis ;
- la méthodes des moments ;
- la méthode des éléments de frontière.

2.2.1.a La méthode des différences finies

La méthode des différences finies est une des premières méthodes numériques historiquement utilisées pour la résolution du problème géo-électrique [Mufti, 1977; Dey & Morrison, 1979; Spitzer, 1995]. Elle est aussi une des méthodes les plus répandues du fait de son implémentation simple et de son faible coût calculatoire [Lowry *et al.*, 1989]. Son principe consiste à discrétiser le milieu étudié en segments (milieu 1D), rectangles (milieu 2D) ou blocs (milieu 3D), et à approcher par différences finies l'équation différentielle 2.11 sur ce domaine.

Cependant, cette méthode ne possède pas une grande souplesse pour la discrétisation du milieu, impliquant une mauvaise prise en compte des irrégularités du domaine (topographie, anomalies internes), et ne permettant donc pas, dans les cas à topographie complexe, une bonne estimation du problème direct. Ce point peut être limité en augmentant fortement le nombre de mailles. Cependant, dans ces circonstances, les bénéfices de cette méthode diminuent.

2.2.1.b La méthode des éléments de frontière

Du fait de sa difficulté d'implémentation, et de ses limitations quant à la modélisation d'objets complexes internes à une structure, la méthode des éléments de frontière n'a pas connu un véritable essor concernant la modélisation du problème géo-électrique [Okabe, 1981; Lesur *et al.*, 1999a,b]. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en régions à l'intérieur desquelles les propriétés physiques sont constantes. Dans ces régions, des solutions analytiques sont exprimées afin de transformer l'équation différentielle principale en plusieurs équations intégrales équivalentes.

Les principaux avantages et inconvénients de la méthode proviennent respectivement du faible coût calculatoire et de la difficulté de générer des anomalies complexes. Récemment, la méthode connaît un regain d'intérêt provenant de l'apport d'une résolution du potentiel primaire (partie singulière) par la méthode des éléments de frontière [Blome *et al.*, 2009]. Ce point sera approfondi dans la sous-section 2.2.2.

2.2.1.c La méthode des éléments finis

Actuellement, la méthode des éléments finis (Finite Element Method, FEM) est la méthode connaissant le plus grand intérêt de la part de la communauté géo-électrique [Coggon, 1971; Pridmore *et al.*, 1981; Holcombe & Jiracek, 1984; Queralt *et al.*, 1991; Sasaki, 1994; Rucker *et al.*, 2006; Günther *et al.*, 2006; Blome *et al.*, 2009]. Cette méthode permet de déterminer la forme du champ de potentiel électrique V , généré par une injection de courant I , en tout nœud du maillage d'un domaine noté Ω . Ainsi, la majorité des progiciels et codes libres permettant l'inversion de données géo-électriques est basée sur un code d'éléments finis [Silvester & Ferrari, 1990; Günther *et al.*, 2006; Loke, 2011].

Le principal avantage de cette méthode est, contrairement aux précédentes méthodes, de pouvoir modéliser « fidèlement » et avec une certaine facilité des milieux à géométrie et composition interne complexes. Cet avantage paie cependant le prix d'une implémentation plus complexe que la méthode des différences finies et d'un coût calculatoire plus élevé que la méthode des éléments de frontière (lorsque la composition interne du milieu ausculté est complexe).

Le principe de la méthode repose sur la discrétisation du modèle étudié en sous-domaines de formes géométriques simples, appelés éléments finis. Ces éléments peuvent prendre la forme de segments (1D), de triangles et/ou rectangles (2D), tétraèdres et/ou hexaèdres (3D).

La résolution du problème direct implique l'implémentation de conditions de frontières sensiblement identiques aux conditions réelles. Ainsi, en considérant un modèle fini, il n'existe pas de continuité en profondeur. Dans ce cas précis l'implémentation des conditions de Dirichlet permettent de simuler la continuité du potentiel en cette frontière. Lorsque la source de courant

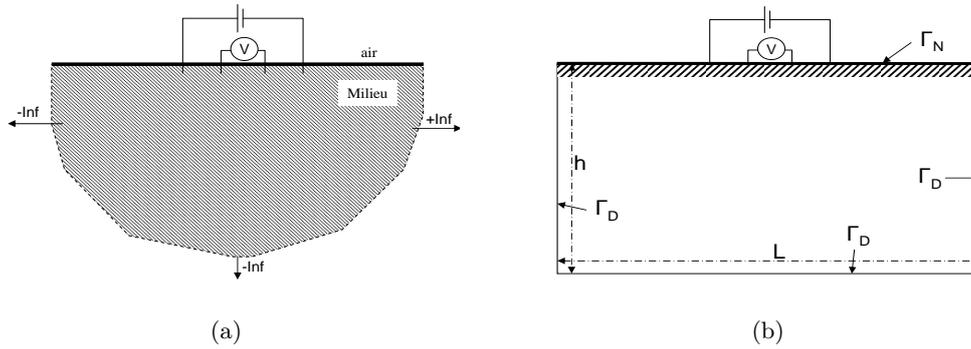


FIGURE 2.9 – Schématisation des différences entre un modèle réel 2.9(a) et un milieu « identique » modélisé numériquement 2.9(b).

électrique est à une distance « élevée » de cette frontière, et lorsque le milieu est « suffisamment » conducteur, le potentiel est extrêmement faible et peut donc être approximé comme nul (figure 2.9).

$$V = V_0 \quad \text{et} \quad \delta V = 0 \quad \text{sur } \Gamma_D, \text{ la frontière de Dirichlet} \quad (2.30)$$

Une meilleure approximation nécessite l'emploi d'un potentiel déterminé à partir d'une fonction analytique en fonction de la position des électrodes (équation 2.13) ou de manière numérique [Blome *et al.*, 2009]. La condition imposée par l'équation 2.30 implique un milieu « suffisamment » grand afin de pouvoir justifier cette condition de frontière. Cependant, accroître la taille du milieu entraîne une augmentation du nombre de mailles. Afin de trouver un compromis, une condition de potentiel flottant peut être utilisée permettant de ne pas fixer le potentiel aux frontières de Dirichlet.

Les électrodes étant généralement implantées en surface, le modèle comprend une interface entre le milieu étudié et l'air. L'air étant un matériau très fortement résistant, nous le considérerons comme parfaitement isolant. Ainsi un champ électrique statique ne peut pas se diffuser dans l'air. Ce comportement peut être mathématiquement simulé par l'utilisation de frontières de Neumann. Cette condition implique que la composante normale du flux de courant est nulle sur cette frontière, et donc qu'il n'y a pas de courant qui traverse cette frontière.

$$n \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_N, \text{ la frontière de Neumann} \quad (2.31)$$

À l'intérieur du domaine et entre les sous-domaines, il est important de spécifier les conditions de continuité, impliquant que la composante normale de la densité de courant électrique est conservée à la frontière entre les deux domaines :

$$n \cdot (J_1 - J_2) = 0 \quad \text{Condition de continuité sur les frontières internes} \quad (2.32)$$

La résolution du problème direct en éléments finis nécessite la génération d'une formulation intégrale (ou variationnelle, ou faible) regroupant l'équation locale (équation de Poisson) et les conditions de Neumann sous la même intégrale :

$$\Pi = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \sigma \nabla V \cdot \nabla V + qV \right) d\Omega + \int_{\partial\Gamma_N} IV d\Gamma_N \quad (2.33)$$

Le potentiel V solution minimise la fonctionnelle (eq. 2.33) en vérifiant les conditions aux limites de Dirichlet [Marescot, 2004; Günther, 2004; Multiphysics, 2008].

$$\delta\Pi = \int_{\Omega} (\sigma \nabla V \cdot \nabla \delta V + q \delta V) d\Omega + \int_{\Gamma_N} J \delta V d\Gamma_N = 0 \quad \forall \delta V \quad (2.34)$$

Cette formulation faible (variationnelle) regroupant l'équation locale et une partie des conditions aux limites permet une variation de la conductivité dans chaque sous domaine discrétisé. Cette formulation implique alors de discrétiser le milieu afin de permettre une variation adéquate de la résistivité dans le milieu.

2.2.2 Discrétisation du problème direct et potentiel secondaire

La résolution du problème direct implique la discrétisation du milieu étudié en sous-domaines appelés « mailles ». Le calcul de minimisation de la fonctionnelle (cf. eq. 2.34) est réalisé sur les nœuds composant le modèle.

La minimisation de la fonctionnelle 2.34 impliquant le calcul du gradient du potentiel électrique, il est nécessaire de posséder un nombre élevé de mailles à proximité des zones à fort gradient. La figure (2.2) montre clairement que le potentiel est fortement divergent à proximité des électrodes. Ainsi, il est nécessaire de réaliser un maillage fin à proximité des électrodes. *A contrario*, un gradient du potentiel électrique faible, à distance élevée de la source de courant, autorise un maillage plus grossier de la zone.

Pour des raisons d'efficacité, le modèle doit permettre une reconstruction précise du champ de potentiel électrique en un délai raisonnable. Pour permettre ce compromis, un minimum de mailles doivent être situées sur le milieu tout en permettant un calcul avec un maximum de précision. La figure 2.10 montre deux types de maillages en éléments finis pouvant être utilisés pour résoudre l'équation 2.34. Le premier maillage utilise des mailles rectangulaires tandis que le second utilise des mailles triangulaires. Cette figure illustre aisément l'apport d'une discrétisation sous forme de triangles car les zones à fort gradient présentent un maillage fin et les zones à faible gradient un maillage plus grossier. Cette évolution du maillage permet ainsi d'améliorer la précision du résultat pour un nombre inférieur d'éléments finis.

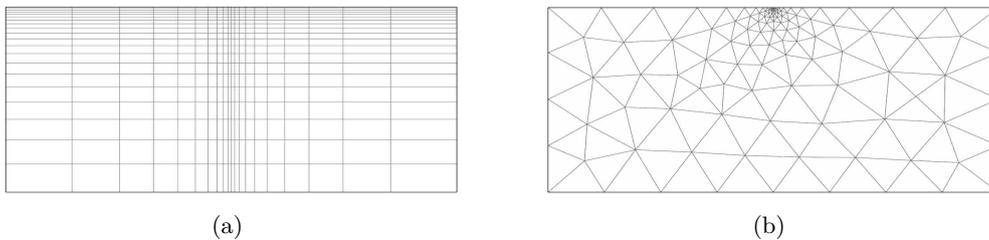


FIGURE 2.10 – Maillages en éléments finis composés 2.10(a) de 400 mailles rectangulaires et 2.10(b) de 210 mailles triangulaires pour la résolution du problème direct géo-électrique.

Afin de trouver le meilleur compromis entre précision et coût calculatoire, des algorithmes de maillage adaptatif peuvent être utilisés [Ren & Tang, 2010; Multiphysics, 2008]. En fonction du problème posé, le maillage est raffiné itérativement à chaque minimisation de la fonctionnelle et

permet ainsi une meilleure reconstruction dans les zones à fort gradient.

Lorsque la source, ou le puits de courant sont situés à proximité d'une singularité (anomalie résistante), la non-linéarité du problème direct est accrue générant ainsi une erreur sur la mesure de potentiel pouvant aller jusqu'à 10 % [Lowry *et al.*, 1989]. Afin de diminuer cette erreur, une sur-discrétisation de la partie proche des électrodes (figure 2.10(b)) peut être utilisée.

Enfin, une méthode alternative, rapide et précise a été développée par Lowry *et al.* [1989]. Cette technique nécessite de décomposer le potentiel total en un potentiel primaire (singulier) provenant de la singularité de la source et d'un potentiel secondaire (régulier) fonction des hétérogénéités placées dans le milieu [Lowry *et al.*, 1989; Zhao & Yedlin, 1996; Günther *et al.*, 2006].

$$V(x, y, z) = V_r(x, y, z) + V_s(x, y, z) \quad (2.35)$$

La partie singulière du champ électrique V_s peut être calculée en résolvant l'équation de Poisson pour une distribution simple de résistivité (ρ_0) :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla V_s \right) = -I_s \delta(r - r_s) \quad (2.36)$$

Le milieu ρ_0 sélectionné peut être homogène [Lowry *et al.*, 1989] ou plus complexe avec l'exemple d'un milieu stratifié verticalement [Zhao & Yedlin, 1996] ou présentant un contact vertical [Li & Spitzer, 2002]. Plus le modèle utilisé pour calculer la partie singulière est complexe et plus la partie régulière peut être résolue avec précision. En conséquence, le modèle reconstruit à l'itération précédente peut être utilisé (les données issues de ce modèle étant déjà calculées) afin de minimiser les perturbations. La distribution de résistivité du milieu ausculté peut être symbolisée par ρ ($\Omega.m$) et permet ainsi de développer l'équation 2.35 et 2.36 en :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla (V_r + V_s) \right) = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla (V_r) \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla (V_s) \right) \quad (2.37)$$

Enfin, afin d'obtenir l'expression permettant la résolution du potentiel régulier il est nécessaire de soustraire l'équation 2.36 avec l'équation 2.37 :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V_r \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V_s \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla V_s \right) = 0 \quad (2.38)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V_r \right) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \nabla V_s \right) \quad (2.39)$$

La résolution de l'équation 2.39 permet d'obtenir la distribution du potentiel électrique « régulier » et de résoudre l'équation 2.35. L'utilisation de la méthode « singularity removal » [Lowry *et al.*, 1989] permet à la fois d'améliorer la précision du résultat mais aussi d'améliorer sa convergence et donc sa rapidité. Même si l'implémentation de cette technique est simple à mettre en place, les moyens pour l'optimiser sont multiples. Blome *et al.* [2009] ainsi que Lesur *et al.* [1999a,b] ont montré que la méthode des éléments de frontière est particulièrement adaptée au calcul du potentiel singulier, du fait de ses particularités. Rucker *et al.* [2006] ainsi que Günther *et al.* [2006] ont montré que l'utilisation d'une triple grille (figure 2.11) permettait d'améliorer la rapidité du calcul du problème direct.

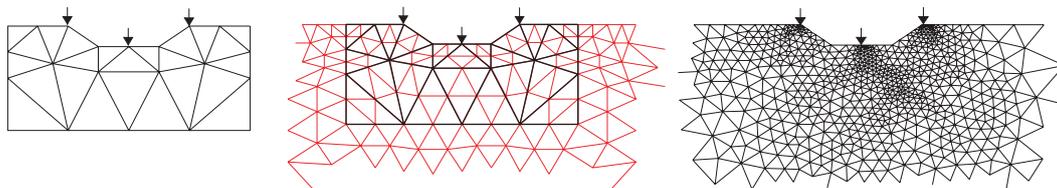


FIGURE 2.11 – Illustration du principe du calcul du problème direct par la création de trois grilles [Günther et al., 2006]. La première grille est utilisée afin de définir les paramètres du modèle inversé, la seconde grille permet le calcul de la partie régulière du potentiel et la dernière grille (la plus fine) permet la résolution de la partie singulière du potentiel électrique.

La première grille (figure 2.11) est utilisée afin de définir les paramètres du modèle (distribution de résistivité électrique). Ensuite, une seconde grille, moins grossière, est utilisée afin de calculer le potentiel « régulier ». Enfin, la partie singulière du potentiel est calculée sur une troisième grille d'éléments fins possédant un maillage plus fin et particulièrement fin à proximité des électrodes. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir implémenter le calcul quelle que soit la géométrie du milieu ausculté. À noter que le potentiel singulier ne nécessite qu'un seul calcul, et ce quel que soit le nombre d'itérations. Ainsi une attention particulière peut-être mise pour le calcul du potentiel singulier.

2.2.3 Essai numérique

Afin d'illustrer la justesse du calcul du Problème Direct utilisé, une comparaison entre des résultats analytiques et numériques est réalisée pour un cas simple [Dahlin, 1993]. La figure 2.12(b) présente le principe du test de modélisation en illustrant le déplacement d'un quadripôle de mesure à la surface d'un milieu composé de deux ensembles séparés par une « faille » verticale nette. Le contraste de résistivité entre les deux ensembles est de 10. D'un point de vue numérique, le résultat est obtenu *via* une résolution par le progiciel Comsol Multiphysics® sur un milieu de forme cubique (longueur = 500 m; largeur = 500 m; hauteur = 500 m). Un plan vertical positionné au centre de la longueur sépare un sous domaine de résistivité de $10 \Omega.m$ d'un second sous-domaine de résistivité $100 \Omega.m$. La figure 2.12 supérieure présente les résistivités apparentes simulées analytiquement (tracé plein) ou numériquement (symbole « x »). Le quadripôle est déplacé par dessus la faille verticale, tout en gardant constant l'espacement entre électrodes, et simule des mesures suivant un protocole (cf. Annexe A) Wenner α (en rouge), Wenner β (en bleu) et Wenner γ (en noir). La seconde figure placée au centre de la planche (2.12) indique la variation relative existant entre les résultats du modèle analytique et ceux du modèle numérique. La variation relative maximale enregistrée est de 0.03 % avec une moyenne de 0.007 %. La qualité de ces résultats provient en partie de l'utilisation de techniques de maillages adaptatifs. Dans le cadre de discrétisations « conventionnelles » la variation relative moyenne sur les données tend vers 0.05 % de la résistivité apparente modélisée.

Synthèse et application : Afin de pouvoir simuler numériquement les réponses électriques d'un milieu, des méthodes de modélisation précises doivent intervenir. En suivant des critères précis sur la discrétisation du problème direct, l'erreur résultant de la modélisation numérique peut être considérée comme faible en comparaison des erreurs de mesure.

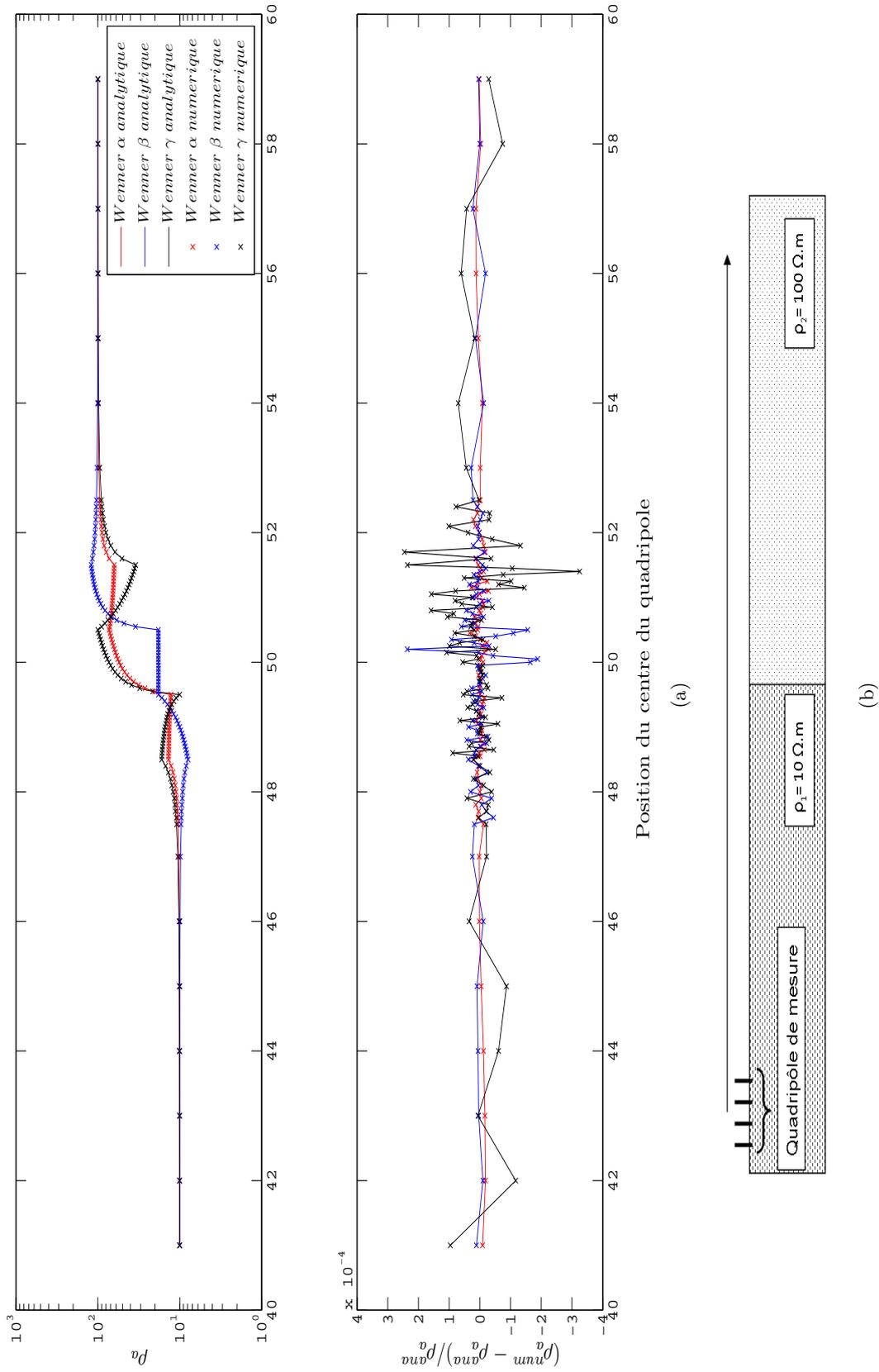


FIGURE 2.12 – Analyse de la précision du code d'éléments finis par comparaison avec des résultats analytiques. La figure 2.12(a) présente les résultats analytiques avec un tracé plein, et numériques avec les symboles « x », obtenus à partir d'un milieu schématisé à la figure 2.12(b). Les couleurs rouge, noir et bleu correspondent respectivement aux données Wenner α , β et γ .

En conséquence, même si ce test ne présente qu'un cas relativement simple, la qualité du résultat indique que le problème direct utilisé est valide si les critères d'utilisation précités sont suivis.

2.2.4 Démarche de construction du problème direct - InGEOHT

La résolution du problème direct, pour notre problématique, doit permettre de simuler la diffusion d'un champ électrique dans un milieu complexe du point de vue de sa structure externe et interne. La plus faible unité de volume, nommée volume élémentaire, au sein du problème direct 3D est la maille (tétraèdre, hexaèdre) des éléments finis. Au sein de ce volume élémentaire, les propriétés électriques du matériau ne varient pas. Ainsi, afin de pouvoir reproduire de manière précise une hétérogénéité dans le sous-sol, il est nécessaire que celle-ci soit représentée par une ou plusieurs mailles.

Plus un maillage est fin et plus il est capable de reproduire avec précision la distribution de résistivité réelle du sous-sol. D'un point de vue plus pratique, deux facteurs permettent d'estimer le niveau de discrétisation nécessaire ;

- la finesse du modèle direct désirée,
- la justesse du résultat.

Le premier point implique une discrétisation *a minima* équivalente à la finesse du milieu modélisé. Ainsi, si l'on désire mesurer l'effet d'une conduite métallique située à 5 m de profondeur, il est nécessaire que cette structure soit représentée par une ou plusieurs mailles. Le second point implique que si le contraste électrique entre la structure et le milieu environnant est élevé, alors plusieurs mailles à la frontière des deux matériaux sont nécessaires afin de permettre un calcul plus précis.

Le point précédent provient de la difficulté à modéliser des forts gradients du champ électrique. Ce point est donc particulièrement important à proximité des sources de courant. À l'inverse, lorsque la distance aux sources augmente, la nécessité de discrétiser finement le milieu diminue. Ainsi, l'une des principales tâches du modélisateur est de trouver un compromis entre la justesse du résultat, la représentativité du modèle et le coût de calcul.

La technique de déformation du maillage permet de calculer le problème direct sur une grille projetée sur un repère non cartésien en déformant légèrement les mailles du modèle. Cette méthode, largement utilisée dans la recherche pour des modèles impliquant une déformation des matériaux (dilatation thermique, déformation élastique), permet de s'affranchir d'une reconstruction complexe et coûteuse en termes de calcul. En IRE, cette technique est utilisée afin de simuler la topographie réelle d'un milieu 2D [Loke, 2011] ou 3D [Blome *et al.*, 2009]. La figure 2.13 illustre l'utilisation d'une technique de déformation de maillage permettant la formation d'une digue à section triangulaire (avec un angle de 90°). Ce modèle de résistivité homogène de $1 \Omega.m$ est ainsi créé afin de tester les calculs de déformation de maillage. Pour ce faire, des électrodes sont placées sur l'arête du quart plan déformé suivant un protocole wenner α . Pour les plus faibles espacements d'électrodes la résistance de transfert mesurée doit ainsi tendre vers l'inverse du facteur géométrique analytique, soit pour une mesure de type Wenner α vers $1/\pi a$. Les résultats synthétiques obtenus affichent une erreur inférieure à 0.1 % permettant d'assurer

que le calcul de déformation de maillage est bien pris en compte.

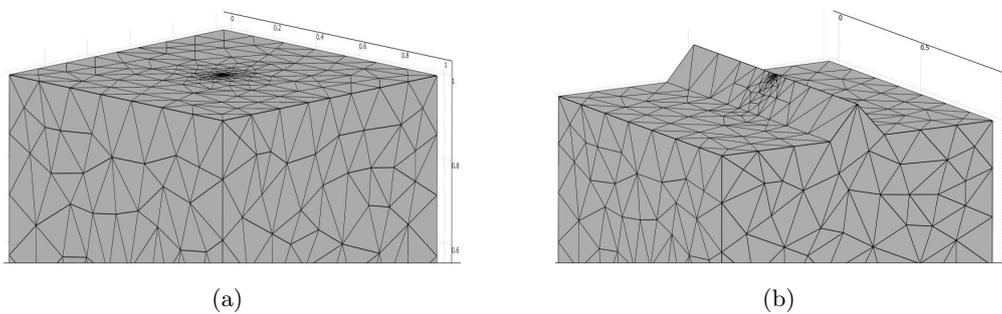


FIGURE 2.13 – Représentation du maillage 3D en éléments finis 2.13(a) avant application d'une déformation du maillage et 2.13(b) après déformation du maillage.

Synthèse et application : Actuellement, la majorité des codes en éléments finis propose une possibilité de création d'objets complexes 3D permettant de générer un modèle représentatif de la réalité sans avoir recours à la déformation de maillage. Cette représentation explicite de l'ouvrage implique la résolution d'un objet complexe car nécessite de mailler chaque face du modèle 3D. Lorsque plusieurs centaines de points sont utilisés afin de générer par interpolation une topographie, le maillage doit nécessairement expliquer chacun de ces points, générant ainsi un maillage pouvant être très complexe. Cependant, l'utilisation d'une déformation de maillage et/ou d'une modélisation explicite ne peut être choisie qu'au cas par cas, en fonction de la typologie de l'ouvrage étudié, de la position des électrodes de mesure et de la technique d'inversion désirée.

2.2.5 Problématique des ouvrages 3D

Du fait du caractère hautement 3D des OHT, lorsque les mesures sont traitées de manière conventionnelle (1D, 2D), les reconstructions peuvent présenter des artéfacts. Afin de déterminer les limitations liées à l'utilisation de l'IRE une étude numérique est réalisée. Cette étude se focalise plus particulièrement sur les effets liés à la topographie, au réservoir d'eau et à la composition interne de l'ouvrage.

2.2.5.a Identification des effets perturbateurs prépondérants

La figure 2.14 illustre le cas de cinq milieux dont la géométrie et la composition interne évoluent. Les coupes affichent la distribution de la norme de la densité de courant à une distance de 50 m du pôle d'injection (positionné au centre de la crête de la digue). En conséquence, plus la diffusion du courant s'écarte d'une distribution « hémisphérique » et plus le modèle s'éloigne d'une hypothèse 2D longitudinale d'auscultation.

En l'absence de topographie, il est aisé de voir que la distribution de l'énergie du signal décroît de manière radiale depuis le point source. En présence de topographie et lorsque le milieu n'est plus homogène, cette distribution est perturbée. En conséquence, cette étude illustre efficacement certains effets « perturbateurs » et démontre qu'une digue ne peut être considérée comme un objet

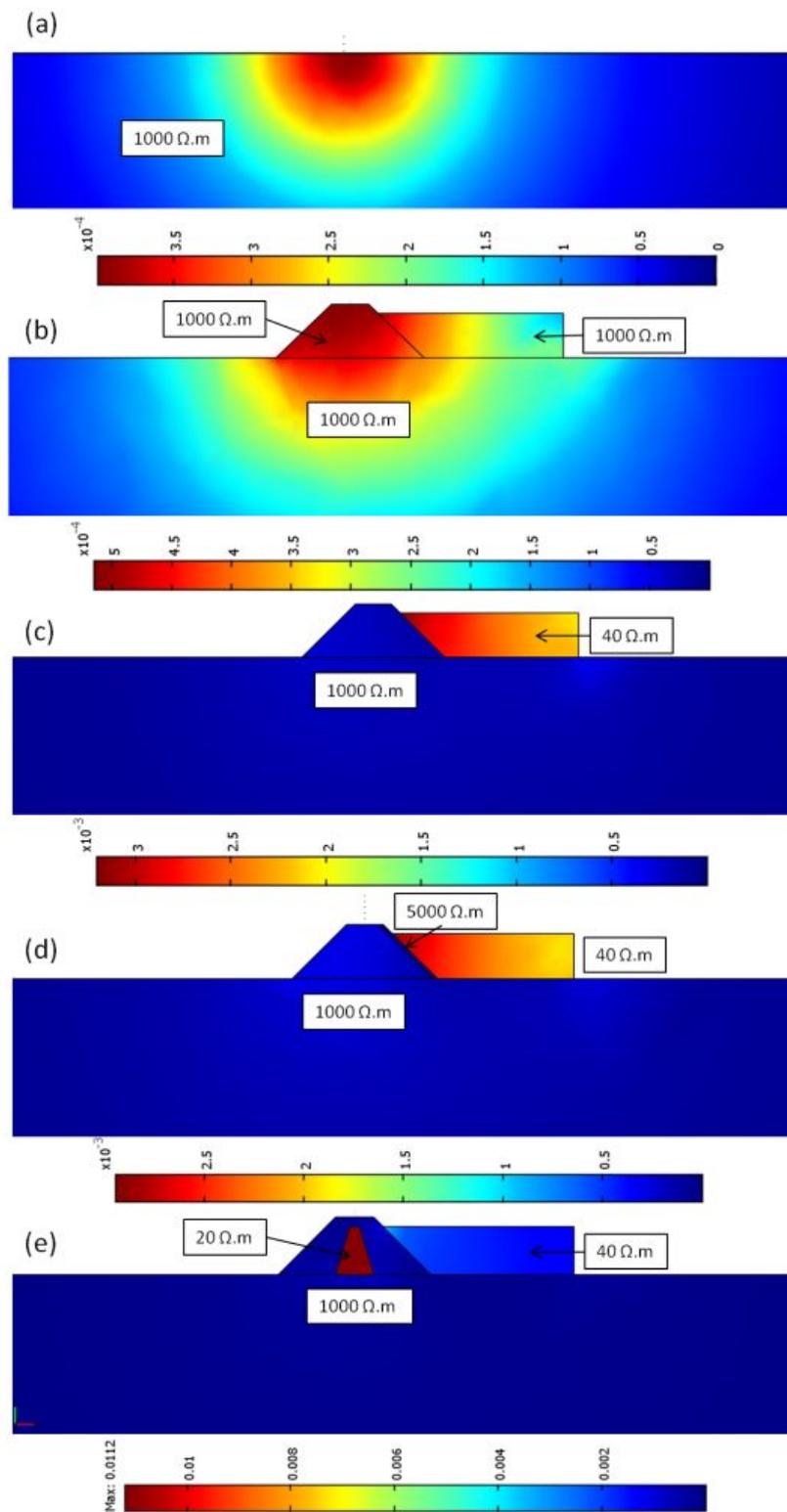


FIGURE 2.14 – Illustration de l'effet de milieux 3D perturbateurs sur la distribution radiale de la norme de la densité de courant électrique (a). Les coupes sont simulées à 50 m de l'électrode de courant. Les effets (b) de la topographie, (c) du réservoir, (d) d'un parement en béton et (e) d'un noyau argileux sont illustrés.

2D. De plus, cette étude met en avant l'effet prépondérant de milieux tels que le réservoir d'eau ou la présence d'un noyau argileux sur la mesure. Cependant, ces résultats ne sont représentatifs que des modèles numériques utilisés. En effet, ni la position des électrodes, ni l'espacement des électrodes, ni le choix des protocoles d'acquisition ne sont étudiés.

2.2.5.b Effet de milieux 3D sur la configuration d'acquisition

Afin de pousser la démonstration précédente une seconde étude numérique est réalisée. La démarche de cette étude est résumée à la figure 2.15. Il s'agit de tester l'effet de l'éloignement « d » d'une ligne d'électrodes du réservoir. Cette ligne étant placée longitudinalement à la digue (symbolisée par quatre électrodes en forme de losange). De plus, l'impact de l'espacement inter-électrodes « a » est aussi étudié.

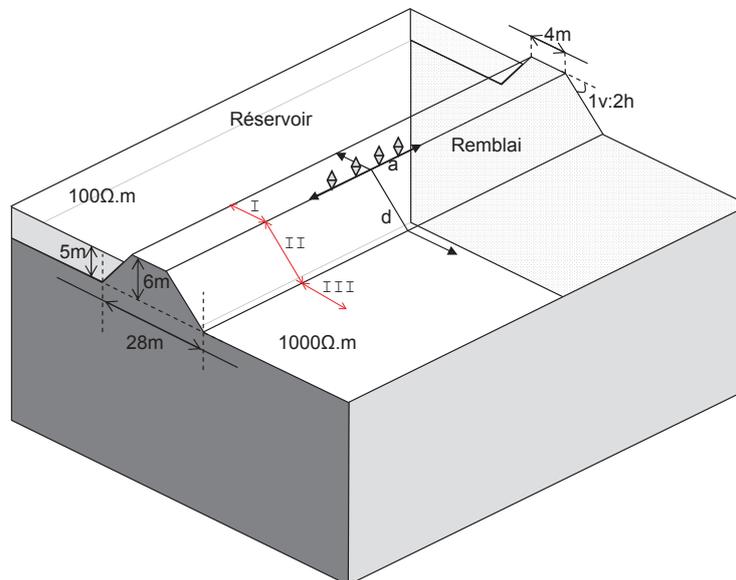


FIGURE 2.15 – Schématisation de la démarche d'étude employée pour tester l'effet de l'éloignement « d » d'un quadripôle Wenner d'un réservoir d'eau. La résistivité de l'eau est de $100 \Omega.m$ tandis que la résistivité du remblai est de $1000 \Omega.m$. « a » représente la distance inter-électrodes.

Les résultats de cette étude sont illustrés aux figures 2.16, 2.17, 2.18 et 2.19. Ces figures présentent les résistivités apparentes simulées (ou leur variation) en fonction de l'espacement a (axe des ordonnées) et de la distance au réservoir d (axe des abscisses). Les résistivités apparentes présentées sur la figure 2.16 sont obtenues à partir d'un facteur géométrique simple ($2\pi a$). Cette figure indique sans ambiguïté l'impact à la fois de la topographie et du réservoir d'eau sur la mesure. En effet, une mesure de résistivité apparente sans effets 3D (ou avec des effets multiples s'auto-annulant) doit indiquer une résistivité de $1000 \Omega.m$ (la résistivité du remblai). Plusieurs zones ressortent en fonction de la distance au réservoir, marquant les effets combinés de la topographie et du réservoir.

Afin de séparer les effets combinés, les résistivités apparentes sont corrigées de l'effet de la topographie à partir de la technique de normalisation (figure 2.17). La technique de normalisation (cf. Annexe B) impose une résistivité électrique du milieu complet (remblai et réservoir d'eau) égale à $1 \Omega.m$, sans en modifier la géométrie. Cette figure illustre clairement que le réservoir

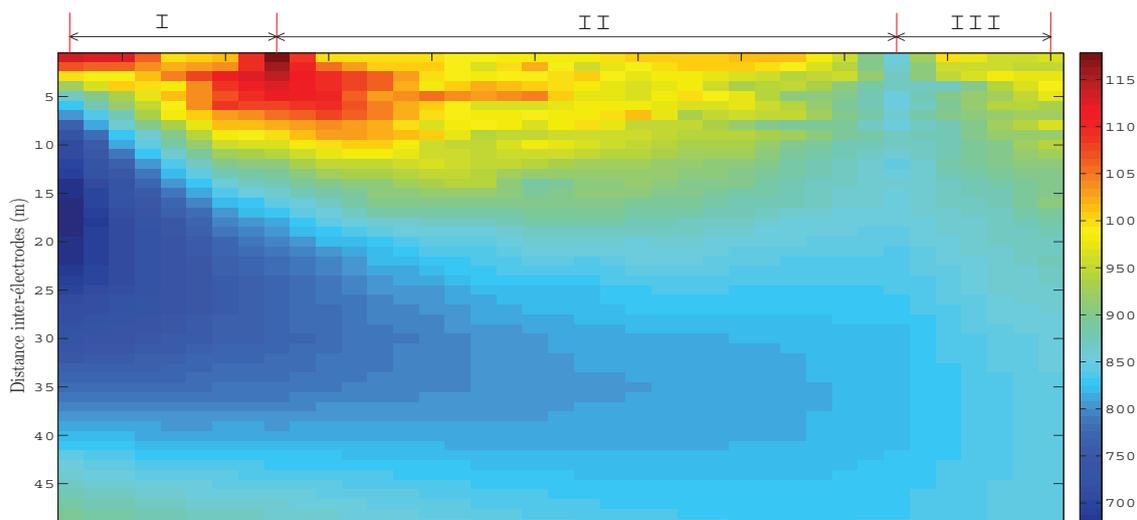


FIGURE 2.16 – Étude numérique de l'effet de l'écartement d'un quadripôle Wenner et de son éloignement à une digue sur sa mesure. Les valeurs de résistivité apparente sont calculées à partir d'un facteur géométrique « conventionnel ($2\pi a$) ».

abaisse les mesures de résistivité apparente. De plus, l'effet maximum du réservoir sur la mesure se présente pour un espacement d'électrodes de 15 à 20 m. Enfin, plus la mesure est effectuée à proximité du réservoir (distance « d » faible) et plus les mesures sont sensibles à l'effet du réservoir.

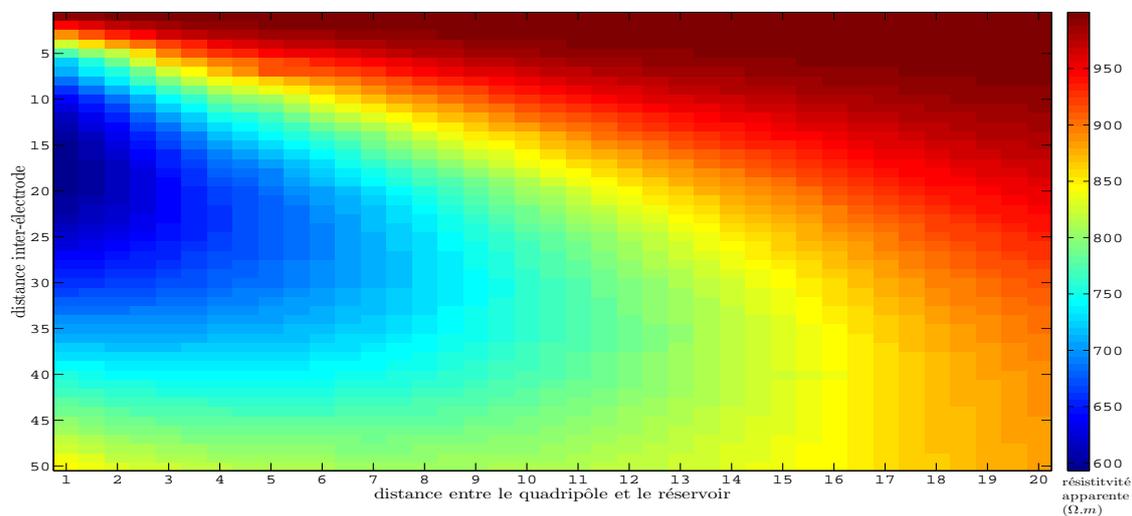


FIGURE 2.17 – Étude numérique de l'effet de l'éloignement d'une ligne d'électrodes longitudinale à une digue sur la mesure de résistivité apparente. Les valeurs de résistivité apparente sont calculées à partir d'un facteur géométrique « généralisé » obtenu par normalisation.

La figure 2.18 illustre la variation relative entre les figures 2.16 et 2.17. En conséquence, cette figure a pour objectif de faire ressortir les acquisitions les plus impactées par l'effet de la topographie. En se référant à la figure 2.15, il est possible de noter que les acquisitions les plus impactées par l'effet de la topographie sont situées au niveau des ruptures de pente du modèle.

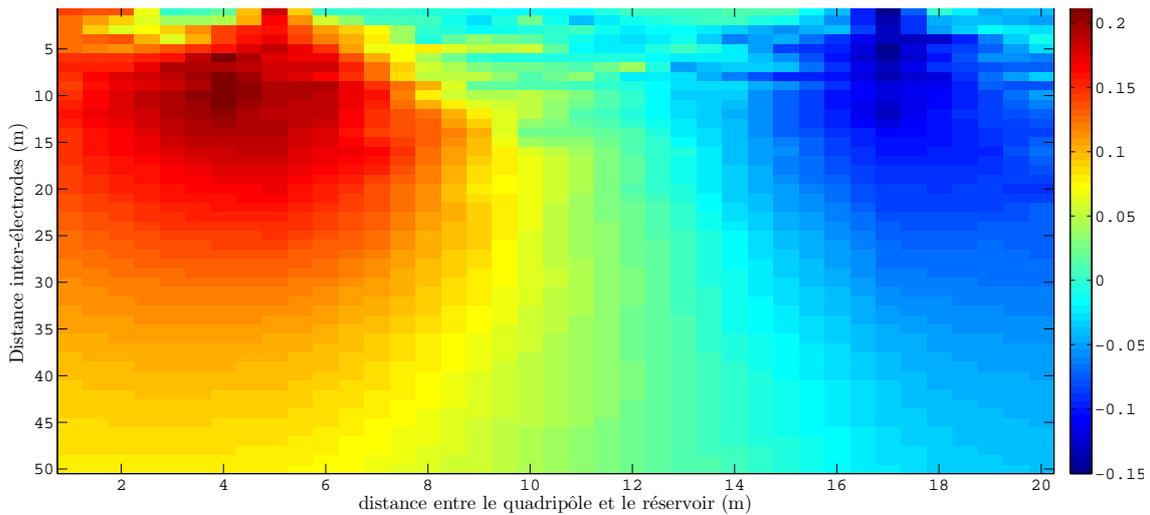


FIGURE 2.18 – Comparaison des résultats présentés à la figure 2.16 et 2.17 sous forme de variation relative. Cette figure indique les « protocoles » d’acquisition sensibles à l’effet de la topographie (résultats s’éloignant de 0).

La figure 2.19 illustre une modification du contraste entre le réservoir et le remblai appliquée à l’étude précédente. En conséquence, le fait d’augmenter le contraste de résistivité possède un impact dont l’intensité augmente lorsque l’espacement inter-électrode est de 15 à 20 m (pour les distances les plus faibles au réservoir). Ce résultat expose une limitation quant à l’utilisation conventionnelle de la méthode de traçage à la saumure. En effet, lors d’une étude de ce type, il est important de s’assurer que la mesure n’est pas sensible à l’augmentation de conductivité de l’eau du réservoir, ou que cette augmentation est prise en compte.

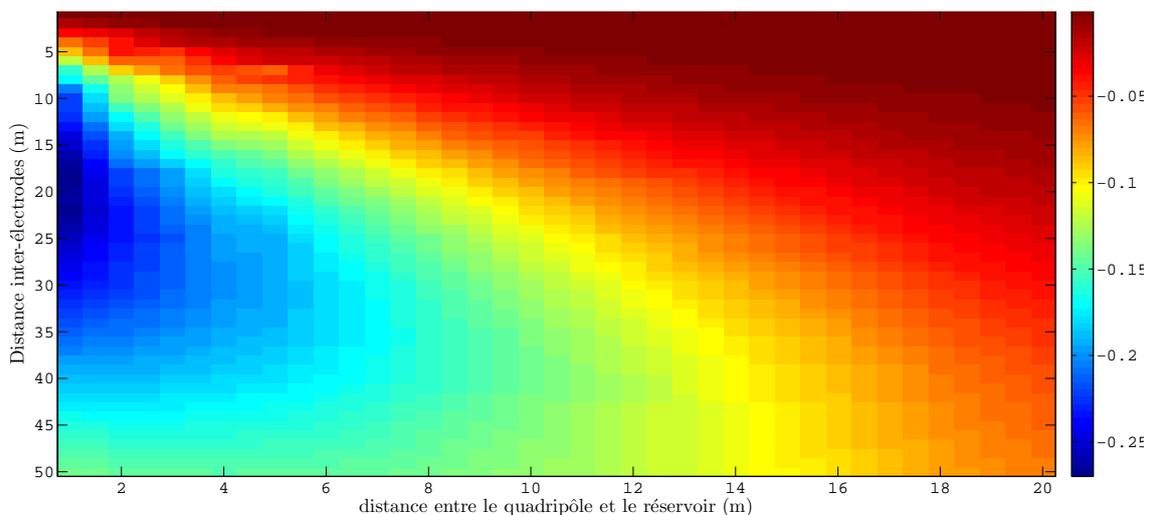


FIGURE 2.19 – Étude numérique de l’effet d’un doublement du contraste de résistivité entre le remblai et le réservoir. Cette figure présente la variation relative entre des résistivités apparentes obtenues à partir du schéma 2.15 et des résistivités apparentes obtenues sur un modèle similaire mais présentant un contraste de résistivité électrique deux fois supérieur. Les résistivités apparentes utilisées sont obtenues par une technique de normalisation.

En conclusion, le caractère $3D$ d'un ouvrage possède un impact plus ou moins prépondérant sur la mesure de résistance de transfert. Une solution pourrait être de ne sélectionner que les protocoles d'acquisition ne présentant aucun effet perturbateur [Sjödahl *et al.*, 2006; Hennig *et al.*, 2005]. Cependant, cette solution présente plusieurs faiblesses :

- les configurations d'acquisition présentant le moins d'effets « $3D$ » doivent être réalisées à une distance élevée du réservoir, remettant en question la pertinence des mesures ;
- cette étude numérique, bien que convaincante, ne peut être jugée complètement représentative de la complexité d'une auscultation sur un ouvrage réel.

Enfin, si la topographie de la digue et la présence du réservoir peuvent être intégrées dans le problème inverse, les considérations précédentes n'ont plus lieu d'être. Cette prise en compte permet alors de s'affranchir des effets perturbateurs et de positionner « au mieux » les prospections (là où elles renseigneront le plus la problématique).

2.2.6 Conclusion

La résolution du problème direct est une étape incontournable afin de reconstruire la distribution de résistivité électrique du milieu ausculté. De plus, dans l'objectif de résoudre un problème inverse, le calcul du problème direct doit être répété un grand nombre de fois. En conséquence, sa résolution doit être rapide et ne pas exiger trop d'espace mémoire.

La méthode des éléments finis est sélectionnée en raison de la complexité (topographie et composition interne) des OHT à modéliser. De nombreuses précautions doivent être intégrées au processus afin que les singularités, liées à la sources de courant, soient prises en compte de manière efficace. Dans le cadre de ce travail de thèse, le progiciel Comsol Multiphysics® est utilisé afin de résoudre le problème direct. En conséquence, un important travail d'adaptation des codes a été nécessaire afin que ce progiciel fournisse les qualités demandées à un « bon » problème direct (dans le cadre de l'inversion).

L'auscultation des OHT par méthode IRE implique de pouvoir modéliser le caractère $3D$ de ces ouvrages. À cet effet, une technique de déformation de maillage est testée afin de vérifier sa précision. Cette technique permet de limiter fortement le nombre de mailles du problème direct car elle n'impose pas une géométrie complexe. Cependant, lorsque le milieu ausculté possède une géométrie suffisamment simple, celle-ci peut être modélisée explicitement afin d'empêcher les calculs liés à la déformation de maillage.

Le « problème direct » permet de réaliser des études numériques visant à tester les biais de la méthode (effet de la topographie, de parements en béton, ...). À cet effet, deux études numériques sont présentées illustrant les effets prépondérants sur la mesure de la topographie et d'un réservoir d'eau. Ces effets dépendent de la configuration d'acquisition de la mesure, de la position de la mesure, de la composition interne de l'ouvrage, de sa topographie et enfin du contraste entre le remblai et le réservoir d'eau. Enfin, la mesure étant impactée par ces milieux, il est nécessaire que ces milieux soient intégrés explicitement dans un problème inverse.

2.3 Le problème inverse

Définition : les méthodes inverses sont une science permettant de **reconstruire un modèle** qui explique « **au mieux** » des données recueillies.

2.3.1 Introduction

Dès lors que la réflexion et l'outil informatique essaient de donner une interprétation physique à une ou plusieurs informations, ceux-ci empruntent la voie des problèmes inverses. Bien que cette approche puisse se rapprocher de toute démarche cognitive, les méthodes inverses se sont particulièrement développées dans tous les secteurs où la mesure physique est centrale, et plus particulièrement, dans tous les domaines où seule la mesure indirecte peut informer sur les propriétés du milieu ausculté. Parmi ces domaines, il nous est possible de citer entre autres l'astrophysique, la géophysique, le contrôle non destructif et l'imagerie médicale. Ainsi pour reprendre mathématiquement la terminologie précédente, notons la reconstruction d'un modèle \vec{m} par l'opérateur \mathcal{F}^{-1} à partir de données \vec{d} :

$$\mathcal{F}\vec{m} = \vec{d} \quad \text{ou} \quad \vec{m} = \mathcal{F}^{-1}\vec{d} \quad (2.40)$$

Le problème inverse en géophysique appliquée repose sur l'auscultation d'un milieu pour lequel on ne dispose que d'informations indirectes. Selon l'objet de l'évaluation, la détection d'une cavité par exemple, plusieurs méthodes géophysiques peuvent être employées (actives ou passives), générant plusieurs types de données, et permettant de réaliser une estimation des paramètres du milieu. En effet, afin de reconstruire un milieu, celui-ci est simplifié sous la forme d'une distribution continue ou discrétisée (figure 2.20). Ces distributions sont fonction d'un certain nombre de paramètres permettant d'expliquer les données mesurées.

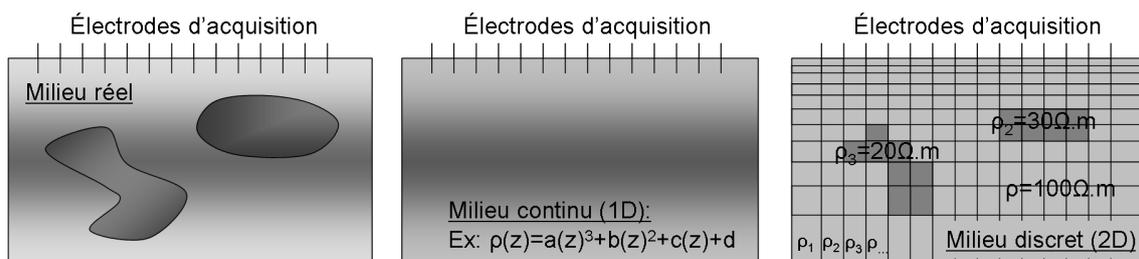


FIGURE 2.20 – Schéma illustrant la paramétrisation d'un milieu pour résoudre le problème inverse. La figure de gauche illustre le milieu réel d'auscultation présentant des variations complexes. La figure centrale présente un exemple continu de paramétrisation avec quatre paramètres à ajuster (a , b , c et d). La dernière figure illustre une paramétrisation discrète, en deux dimensions, nécessitant l'optimisation d'un nombre de paramètres égal au nombre de cellules discrétisées (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ...).

La figure 2.21 présente les étapes nécessaires à la résolution d'un problème inverse. À savoir, le milieu ausculté émet des réponses suite à une sollicitation (mesure active) ou non (mesure passive). Ensuite, suivant l'objet de l'étude, les mesures ainsi que l'*a priori* collecté sont transformés en information et permettent la reconstruction d'un modèle (inversion).

Les problèmes inverses en géophysique sont difficiles à résoudre car ils sont dits « mal-posés ». Le terme « mal-posé » provient des travaux de Hadamard [1902] et caractérise un problème inverse lorsqu'il remplit une des conditions suivantes :

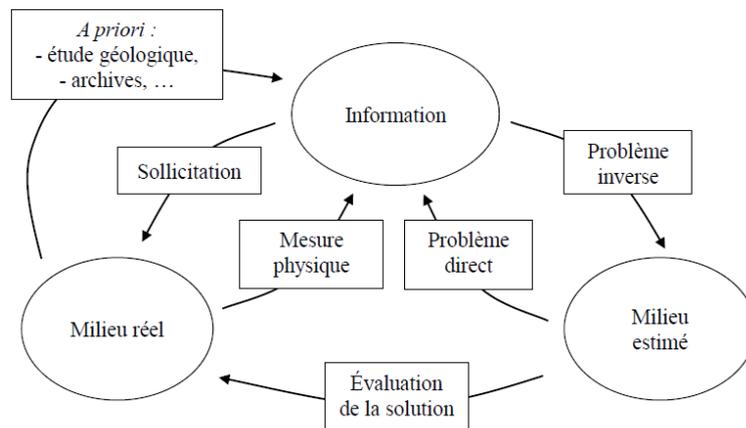


FIGURE 2.21 – Schéma illustrant le déroulement de la résolution d'un problème inverse.

- la solution est non-unique ; \mathcal{F}^{-1} possède plusieurs solutions, $\mathcal{F}_1 \vec{m}_1 = \mathcal{F}_2 \vec{m}_2 = \vec{d}$;
- la relation entre le modèle et les données est non linéaire ; $\mathcal{F} \vec{m} \neq G \vec{m}$;
- il n'existe pas de solution exacte au problème ; \mathcal{F}^{-1} n'existe pas.

Synthèse et application : Le problème inverse en reconnaissance électrique est considéré comme « très mal-posé » car il remplit les trois conditions posées par Hadamar. Cependant, à la différence des cas de reconnaissance pure, l'auscultation des OHT fournit une certaine quantité d'information *a priori* permettant d'améliorer la résolution du problème inverse (tableau 1.5).

2.3.2 La quête de l'information

Lors de la publication de leurs travaux, Tarantola & Valette [1982a] symbolisaient l'inversion comme une quête de l'information. Selon les principes de la théorie de l'information [Gibert & Lopes, 2010], l'information doit être perçue comme une donnée permettant de quantifier notre capacité à résoudre un problème de manière unique. Ainsi, une mesure contient une certaine quantité d'information dépendant du milieu ausculté, de la problématique d'auscultation mais aussi de sa complémentarité avec d'autres mesures.

On peut comprendre que la quantité d'information dépend de la problématique de l'étude, car une campagne de mesures de sismique réfraction révélera certainement moins d'information sur la position d'une cavité souterraine qu'une campagne de micro-gravimétrie. Dans ce sens, l'information peut être perçue au travers de la sensibilité d'une mesure sur l'objet de la recherche. Afin d'illustrer ces propos, prenons le cas d'une prospection électrique sur terrain homogène et isotrope. En émettant l'hypothèse que la mesure n'est entachée d'aucune erreur, la probabilité de reconstruire ce milieu de manière exacte est de 100 % (si on discrétise le milieu entier avec une seule cellule d'inversion). L'information rattachée à cette mesure est ainsi de 1.

La complexité du problème inverse en IRE provient de la non unicité de la solution dans les conditions réelles de mesure. Cette non-unicité implique que plusieurs modèles du sous-sol peuvent générer des mesures très comparables. La figure 2.22 montre deux modèles (I et II) représentant une couche conductrice positionnée entre deux couches résistantes. Les données générées avec ces deux modèles sont quasi-identiques. À partir de telles données et sans information *a priori*

supplémentaire, le problème inverse ne peut distinguer le modèle I du modèle II. Dans le cas présent, seuls cinq paramètres d'inversion interviennent, permettant une « assez bonne » détermination du problème inverse. Cependant, on comprend aisément que le nombre de solutions équivalentes augmente proportionnellement avec le nombre de paramètres inversés, réduisant ainsi la détermination du problème.

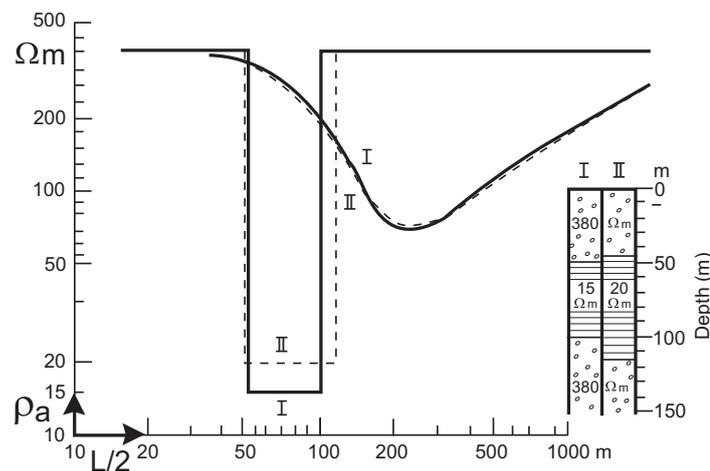


FIGURE 2.22 – Inversion 1D de données de sondage électrique illustrant le problème d'équivalence des solutions, d'après Chouteau & Giroux [2006].

Cependant, l'unicité de la solution du problème inverse est démontrée pour des milieux 1D par Langer [1933] et pour des milieux 2D et 3D par Kohn & Vogelius [1987] et Sylvester & Uhlmann [1987]. Cette unicité ne peut être atteinte que lorsque la mesure possède une précision infinie et lorsque le champ de potentiel est connu de manière continue sur la totalité des frontières du milieu.

Ces travaux, même s'ils ne sont pas réalisables concrètement, montrent que la robustesse de l'inversion peut être accrue lorsque l'on augmente l'information sur le milieu investigué. Ce principe relatif à la quête de l'information sera discuté lors du chapitre 3 et mis en pratique lors des cas d'étude. La robustesse d'une inversion caractérise la fiabilité et la solidité d'une reconstruction. La résolution d'un problème inverse dépend de l'information rassemblée pour résoudre celui-ci. Dans ce sens, lorsque l'information est insuffisante, plusieurs solutions se posent à l'opérateur :

- réécrire la problématique, pour que celle-ci puisse être mieux résolue ;
- apporter plus d'informations au système ;
- ne rien changer au problème inverse mais prendre des précautions quant à l'interprétation.

L'information utilisée dans un problème inverse provient naturellement des données mais aussi de l'*a priori* dont nous disposons du milieu ausculté. Cet *a priori* peut être injecté dans le problème inverse de plusieurs manières, *via* :

- le choix de la norme d'inversion des données ;
- l'ajout de normes portant sur le modèle ;
- une re-discrétisation du modèle inverse ;
- une amélioration de l'acquisition.

Au cours de la sous-section 2.1.6, nous indiquions que la discrétisation du modèle inverse était étroitement liée à l'information dont nous disposons. Ainsi, une discrétisation grossière 1D d'un milieu a pour conséquence d'augmenter la quantité d'information contenue dans les données en comparaison d'une discrétisation plus fine (car augmente le nombre de degrés de liberté). C'est pourquoi, il nous semble que, dans le but d'améliorer la robustesse de l'inversion, de nouvelles stratégies basées sur de nouvelles discrétisations sont nécessaires.

Synthèse et application : La quête de l'information est un enjeu primordial pour l'inversion. La connaissance de la géométrie des pathologies recherchées et leur position (ex : interface fondation/remblai) sont autant d'informations complémentaires aux données mesurées permettant une amélioration de la robustesse de l'inversion.

2.3.3 Discrétisation du modèle inverse

Afin de « mieux » poser le problème, la discrétisation du modèle inverse doit nécessairement être fonction de :

- la capacité de résolution de la méthode ;
- la véritable variation des propriétés internes du milieu ausculté.

Ainsi, plus une mesure est sensible à un volume du sous-sol, plus la discrétisation de cette zone doit permettre de reproduire la distribution de résistivité réelle du milieu ausculté. En conséquence, si une tomographie possède « énormément » d'information provenant des mesures, il est nécessaire que la discrétisation s'adapte afin de ne pas générer d'artéfacts. Lorsque cette discrétisation n'est pas adaptée, plus l'information est importante, plus les artéfacts sont élevés. À cet effet, les logiciels d'inversion tels que Res2Dinv® [Loke, 2011] permettent de doubler le nombre de cellules en surface lorsque de grandes variations de résistivités γ sont attendues.

Une solution à ce problème pourrait être de discrétiser de manière très fine tout le modèle. Cependant, la détermination du problème inverse diminue avec l'augmentation du nombre de paramètres du modèle. En conséquence, il est nécessaire de trouver un compromis entre la représentativité du modèle et la capacité de résolution de la méthode.

Les méthodes discrètes d'inversion ne permettant qu'une reconstruction « morcelée » du milieu ausculté, le résultat ne peut être considéré « exact ». Cette affirmation vient du fait que la nature dans sa plus grande complexité, ne se limite pas à une variation discrétisée de ses propriétés. De plus, le modèle inverse ne prend pas en compte la géométrie des électrodes, leur polarisation ainsi que les différentes erreurs précitées à la sous-section 2.1.4. En conséquence, l'inversion tente de trouver les paramètres qui expliquent au mieux cette discrétisation de l'espace et génère automatiquement des artéfacts. Lorsque l'erreur de paramétrisation du milieu inverse est élevée, par exemple lorsque le milieu est considéré 1D alors que celui-ci est fortement 3D, les artéfacts deviennent conséquents et ne permettent pas une interprétation fiable du résultat.

Définition d'un artéfact : Les artéfacts sont des structures présentes dans le modèle inversé mais absentes dans le sous-sol « vrai ». Les artéfacts proviennent du fait que le modèle reconstruit n'est pas représentatif du milieu réel et que les données ne contraignent pas suffisamment l'in-

version pour que la solution soit unique.

La figure 2.23 schématise les liens unissant les caractéristiques du problème inverse en IRE et la robustesse du résultat d'inversion. Ainsi, le caractère hautement mal posé du problème et le manque d'information disponible génèrent automatiquement des artéfacts. L'absence de solution provient du fait que l'inversion est discrète et qu'elle tente d'expliquer un milieu continu complexe (ce qui est impossible). Il est à noter qu'une évaluation de la « qualité » peut empêcher l'interprétation de ces artéfacts et permettre une interprétation plus robuste. Cependant, ces techniques ne sont aujourd'hui représentées que par des indices de fiabilité et leur résultat peut être remis en question (cf. Chapitre 3, Optimisation et Robustesse).

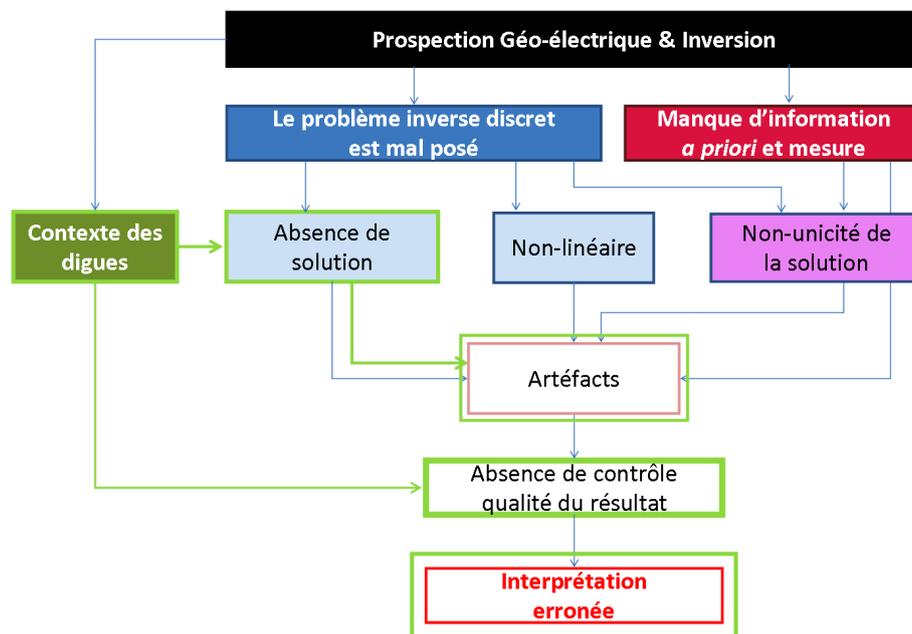


FIGURE 2.23 – Schématisation des limitations liées aux méthodes inverses en IRE. Les cases et flèches vertes mettent en avant les conséquences aggravantes du contexte d'auscultation des OHT.

Synthèse et application : lorsque des stratégies 1D ou 2D sont employées sur des ouvrages « hautement 3D » (figure 2.23), l'erreur de justesse liée à la discrétisation ne permet pas à l'inversion de trouver un modèle expliquant exactement les données. Ce comportement génère en conséquence de forts artéfacts. De plus, dans le cadre de la reconnaissance des OHT, les possibilités de quantifier la fiabilité d'une reconstruction sont difficiles à réaliser et ne permettent pas d'assurer une interprétation « fiable » du résultat.

2.3.4 L'utilisation des normes

La reconstruction d'un modèle par méthode locale nécessite de mesurer une « distance » séparant les données mesurées des données simulées sur un modèle reconstruit. L'opérateur permettant de calculer cette distance, noté $\|\cdot\|$, est choisi en fonction d'un *a priori* que nous portons sur la mesure ainsi que sur le milieu étudié. L'équation 2.41 formule mathématiquement l'écriture de cette norme.

$$L_{norm}^n : ||e||^n = \left[\sum_{i=1}^N (|e_i|)^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.41)$$

Plus n augmente et plus la distance devient sensible aux grands écarts entre les données mesurées et les données prédites [Menke, 1984; Al-Chalabi, 1992]. C'est pourquoi les méthodes de type L_1 sont dites plus robustes lorsque les mesures sont bruitées [Claerbout & Muir, 1973]. La figure 2.24 illustre cette théorie avec l'effet d'un point « aberrant » sur l'optimisation provenant de normes supérieures à 1.

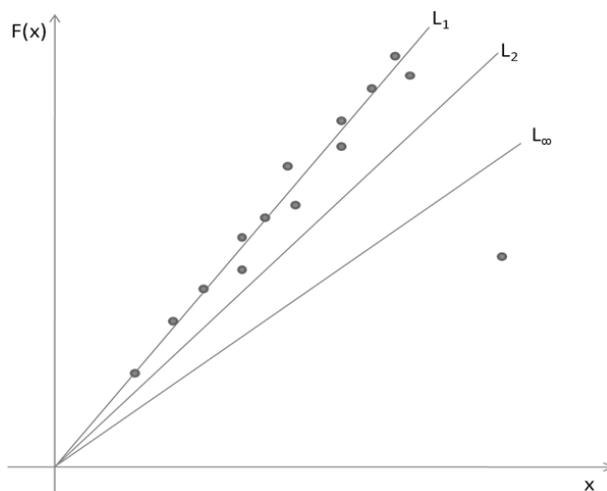


FIGURE 2.24 – Illustration de l'effet d'un point aberrant sur l'ajustement d'un modèle linéaire suivant les normes L_1 , L_2 et L_∞ , d'après Menke [1984].

La représentation des différentes normes sous forme de potentiels convexes montre que l'utilisation de la norme L_2 suppose un *a priori* gaussien de l'erreur sur les données, favorisant un lissage local et pénalisant de fortes discontinuités [Al-Chalabi, 1992]. Il peut donc être important d'éliminer, dans certains cas, les données s'éloignant trop de la distribution (Cf. figure 2.24) afin de rendre le problème compatible avec le critère des moindres carrés et d'améliorer, par la même occasion, la variance de la solution. Cependant, lorsque l'erreur sur les données peut être intégrée, la « sur-interprétation » de ces points aberrants peut être fortement limitée.

À l'inverse la norme L_1 représente un *a priori* laplacien de l'erreur sur les données. Cet *a priori* permet de mieux préserver les grandes discontinuités dans le modèle. D'autres normes plus complexes peuvent être utilisées pour réaliser la minimisation. Parmi les fonctions convexes connues dans la littérature nous pouvons également citer les fonctions de type Gauss-Markov généralisé et la fonction de Huber [Bouman & Sauer, 1993].

Synthèse et application : Le résultat de l'inversion dépend de manière importante du choix de la norme sélectionnée. Ce choix doit être fonction des données mesurées, du type d'erreur sur ces données mais aussi de l'*a priori* que l'on pose sur le modèle (présence de fortes discontinuités dans le milieu).

Dans le cadre de prospections sur des digues sèches et en charge, l'*a priori* que nous

avons sur les milieux est limité. Cependant, dans des conditions de bruit faible et gaussien, pour des prospections réalisées de manière longitudinale, et pour la détection d'infiltrations, l'utilisation de la norme L_2 est préférée pour l'inversion. En effet, les évolutions temporelles dans le remblai sont supposées diffuses car d'origine thermique et/ou hydraulique (infiltrations diffuses), limitant la présence de fortes discontinuités. Dans le cadre de prospections transversales, lorsque l'OHT possède un noyau argileux, une norme de type L_1 peut être préférée, afin de pouvoir reconstruire de plus fortes discontinuités. Enfin, lorsqu'un bruit important entache les données une norme de type L_1 peut être préférée.

2.3.5 Les principaux algorithmes d'inversion

Afin de reconstruire un modèle expliquant au mieux des données mesurées, différents algorithmes peuvent être exploités [Backus & Gilbert, 1968; Tarantola & Valette, 1982b; Lines & Treitel, 1984]. Avant d'entrer dans le détail de ces algorithmes, il semble nécessaire de définir les termes utilisés. Ainsi, il est possible de définir et différencier le milieu d'investigation noté m^{vrai} et un milieu « imaginaire » noté « \vec{m} » discrétisé en sous volumes appelés paramètres du modèle suivant l'expression suivante :

$$\vec{m} = [m_1, m_2, \dots, m_{M-1}, m_M]. \quad (2.42)$$

Avec M le nombre de paramètres du modèle \vec{m} . N correspond au nombre de données mesurées ou simulées à partir de N_e électrodes. Différencions maintenant les données provenant des mesures réalisées sur le milieu :

$$\vec{d}^{mes} = [d_1^{mes}, d_2^{mes}, \dots, d_{N-1}^{mes}, d_N^{mes}], \quad (2.43)$$

et les données obtenues par simulation sur un modèle synthétique :

$$\vec{d}^{calc} = [d_1^{calc}, d_2^{calc}, \dots, d_{N-1}^{calc}, d_N^{calc}]. \quad (2.44)$$

La réalisation de mesures sur un milieu \vec{m}^{vrai} peut être symbolisée par l'opérateur \mathcal{F} dans l'équation 2.45 :

$$\mathcal{F}(\vec{m}^{vrai}) = \vec{d}^{mes} + \vec{b} = \vec{d}_b^{mes} \quad ; \quad \mathcal{F}(\vec{m}^k) = \vec{d}^{calc}. \quad (2.45)$$

Avec \vec{b} le bruit sur les données et \vec{d}_b^{mes} les données mesurées comprenant un bruit. Lorsque le problème est linéaire et que les données dépendent de manière linéaire à l'opérateur, il est possible de noter cet opérateur :

$$\mathcal{F}(\vec{m}) = \mathcal{F}\vec{m}. \quad (2.46)$$

La majorité des problèmes géophysiques n'étant pas linéaires, un développement de Taylor du premier ordre permet d'approcher le comportement non-linéaire de l'opérateur \mathcal{F} :

$$\mathcal{F}(\vec{m}^{k+1}) = \mathcal{F}(\vec{m}^k + \partial\vec{m}^k) \quad (2.47)$$

$$\approx \mathcal{F}(\vec{m}^k) + \frac{\partial\mathcal{F}(\vec{m}^k)}{\partial\vec{m}}\Delta\vec{m} + \frac{\Delta\vec{m}^2}{2} \frac{\partial^2\mathcal{F}(\vec{m})}{\partial\vec{m}^2} \quad (2.48)$$

où \vec{m}_{k+1} représente le modèle reconstruit à l'itération $k + 1$ après l'ajout de la perturbation $\partial\vec{m}^k$ au modèle \vec{m}^k à l'itération précédente k . Ce développement permet de faire ressortir trois points : tout d'abord cette relation implique une résolution itérative du problème *via* un ajustement par le vecteur perturbation du modèle $\Delta\vec{m}$. De plus, cette méthode exige la connaissance d'un modèle *a priori* de départ. Enfin, cette méthode nécessite la connaissance de la matrice des dérivées de Fréchet $G[N \times M]$, aussi appelée matrice Jacobienne ou matrice de sensibilité :

$$G_{i,j} = \frac{\partial\mathcal{F}(\vec{m})}{\partial\vec{m}} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial m_1} & \frac{\partial d_1}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial d_1}{\partial m_M} \\ \frac{\partial d_2}{\partial m_1} & \frac{\partial d_2}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial d_2}{\partial m_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial d_N}{\partial m_1} & \frac{\partial d_N}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial d_N}{\partial m_M} \end{bmatrix} \text{ avec } i = [1 : N] \text{ et } j = [1 : M]. \quad (2.49)$$

Ainsi, nous obtenons la principale équation d'inversion :

$$G\Delta\vec{m} = \vec{d} - \mathcal{F}(\vec{m}) = \vec{r} \quad (2.50)$$

Le principe étant de minimiser le vecteur résidu \vec{r} :

$$\min[\vec{r}] = \min[\vec{d} - \mathcal{F}(\vec{m})] \quad (2.51)$$

Comme expliqué au paragraphe précédent, il peut être intéressant de ne pas minimiser l'écart entre les données mesurées et simulées, mais plutôt la norme p de cet écart (éq. 2.41). Cette utilisation permet la création d'une nouvelle expression, nommée fonction objectif, indiquant la quantité que l'on désire minimiser. Lorsque la norme L_2 est sélectionnée, cette expression prend la forme :

$$\Psi_d(m) = \left(\sum_{i=1}^{Nd} \left(\frac{\vec{d} - \mathcal{F}(\vec{m})}{\vec{\sigma}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \|D(\vec{d} - \mathcal{F}(\vec{m}))\|_2^2, \quad (2.52)$$

où le vecteur $\vec{\sigma}$ représente l'incertitude sur les mesures pouvant être écrit sous la forme d'une matrice diagonale D . Dériver l'expression 2.52 par rapport aux paramètres du modèle conduit à l'écriture de l'équation normale d'inversion [Lines & Treitel, 1984] :

$$(G^T G)\Delta\vec{m} = G^T \vec{r} \quad (2.53)$$

2.3.5.a Full Newton & Gauss-Newton

L'utilisation de l'algorithme de Newton (Full Newton) nécessite l'emploi de la dérivée seconde de la fonction objectif. D'un point de vue théorique cette matrice « Hessienne » peut être obtenue par un développement au second ordre de la fonction objectif [Günther, 2004]. Lorsque la matrice Hessienne est principalement diagonale alors il peut être démontré que les méthodes de type Newton sont convergentes. Les méthodes de résolution de l'équation normale d'inversion 2.53 inversant directement le terme Hessien placé à gauche de l'équation sont nommées méthodes de Newton :

$$\vec{m}^{k+1} = \vec{m}^k - \mathcal{H}^{-1}\mathcal{G} \quad (2.54)$$

Où \mathcal{G} représente le gradient de la fonction objectif et \mathcal{H} sa matrice Hessienne. Avec \mathcal{G} :

$$\mathcal{G} = 2 \sum_{i=1}^m \mathcal{F}(\vec{m}) \frac{\partial \mathcal{F}(\vec{m})}{\partial \vec{m}} \quad (2.55)$$

D'un point de vue rigoureux, la matrice Hessienne peut être définie par [Günther, 2004] :

$$\mathcal{H} = \nabla_m \nabla_m^T \Psi_d \quad (2.56)$$

$$= \nabla_m \left(2G^T D^T D(\vec{r}) \right) \quad (2.57)$$

$$= 2G^T D^T D G + 2(\nabla_m^T G^T) D^T D(\vec{r}) \quad (2.58)$$

Avec ∇_m le gradient de la fonction objectif. Le terme du côté droit de l'équation 2.58 est difficile à calculer et peut être négligé suivant le degré de non-linéarité [Günther *et al.*, 2006]. Ainsi, les méthodes se limitant à la forme incomplète sont appelées Gauss-Newton et ne permettent donc pas une prise en compte totale de la non-linéarité du problème. Plus la non-linéarité du problème augmente et plus le terme de droite (avec les dérivées secondes) peut devenir prépondérant par rapport au terme de gauche.

2.3.5.b Quasi Newton

Le calcul de la matrice des dérivées de Fréchet entraîne un coût important d'un point de vue temporel et calculatoire durant un processus d'inversion [McGillivray & Oldenburg, 1990; Park & Van, 1991; Zhang *et al.*, 1995; Marescot *et al.*, 2008b]. C'est pourquoi certains algorithmes de type quasi-Newton se sont développés afin de n'avoir à réaliser qu'une « mise à jour » de la matrice Hessienne, afin d'accélérer le processus d'inversion [Loke & Dahlin, 2002]. Cependant, cette reconstruction ne formant qu'une approximation de la matrice Hessienne, le taux de convergence est diminué.

2.3.5.c Gradient conjugué

Pour les modèles où le nombre de paramètres est suffisamment faible (<10000), l'équation normale d'inversion 2.53 peut être résolue directement en utilisant des méthodes adaptées (décomposition QR). Lorsque le nombre de paramètres du milieu dépasse un seuil fixé, des algorithmes précis et rapides tels que les méthodes des gradients conjugués [Zhang *et al.*, 1995; Marescot *et al.*, 2008b] sont utilisés afin de limiter les demandes en ressource mémoire. En effet, cette ressource peut être mieux exploitée du fait que la matrice Hessienne n'est jamais assemblée dans sa globalité. L'inconvénient de tels algorithmes porte sur la diminution de la vitesse de convergence impliquant un plus grand nombre d'itérations et donc un plus grand nombre de résolutions du problème direct. La résolution du problème direct impliquant une part importante du temps de résolution d'un problème inverse, le choix d'un algorithme de type gradient conjugué plutôt que Gauss-Newton doit être réalisé avec soin.

Synthèse et application : L'inversion de données géo-électriques issues de l'auscultation des OHT nécessite selon l'objet de la recherche (reconnaissance 2D, 3D et surveillance), l'utilisation d'algorithmes souples et adaptés. Cependant, l'objectif de la thèse est de fournir une méthodologie robuste d'auscultation des OHT, passant par une optimisation de la stratégie d'auscultation. Les méthodes d'optimisation

actuelles nécessitent l'étude de la matrice des dérivées de Fréchet. Or, cette matrice est calculée dans le cadre de l'utilisation de l'algorithme de Gauss-Newton. En conséquence, seul le développement de l'algorithme Gauss-Newton a été réalisé au cours de la thèse afin de proposer les stratégies présentées au cours du Chapitre 3. Cependant, en fonction de l'objet de l'étude, une perspective intéressante serait d'implémenter de nouveaux algorithmes d'inversion au code existant afin de tester leur pertinence suivant les stratégies d'auscultation.

2.3.6 Le calcul des dérivées de Fréchet

Illustrés par l'équation 2.53, les principaux algorithmes d'inversion reposent sur l'utilisation d'une matrice quantifiant l'effet sur une mesure de la modification d'un paramètre du modèle. Cette matrice, appelée matrice de sensibilité, matrice Jacobienne, ou matrice des dérivées de Fréchet contient les dérivées de toutes les mesures de différence de potentiel $\Delta V(V.m^{-1})$ par rapport à tous les paramètres du modèle $\rho_j(\Omega.m)$.

$$S_{i,j} = \frac{\delta \Delta V_i}{\delta \rho_j} \quad \text{avec } i = [1 : N] \text{ et } j = [1 : M]. \quad (2.59)$$

Les travaux de Geselowitz [1971]; McGillivray & Oldenburg [1990], ainsi que Park & Van [1991], ont montré que plusieurs approches pouvaient s'opérer afin de calculer cette matrice. Les notations de Park & Van [1991] et de Loke [2011] sont utilisées ci-dessous afin de présenter ces différentes approches. Lorsque le milieu est un demi-espace homogène et isotrope le calcul de la matrice des dérivées de Fréchet peut être obtenu de manière analytique, simplifiant considérablement le coût calculatoire associé [Loke, 2011]. Soit G_{3D} la matrice de sensibilité en trois dimensions :

$$G_{3D}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} \quad (2.60)$$

et G_{2D} la matrice des sensibilités en deux dimensions.

$$G_{2D}(x, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [x-a^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} \right) dy \quad (2.61)$$

Cette intégrale possède une solution analytique pouvant être exprimée en termes d'intégrale elliptique [Loke & Barker, 1995; Loke, 2011]. Cependant, ces expressions ne sont valides que pour des milieux in-homogènes, nécessitant alors le développement de techniques complémentaires.

2.3.6.a Approche par perturbation

La première stratégie historiquement utilisée implique une série d'essais de perturbation du milieu et de quantification de l'effet de cette perturbation sur la mesure. Si cette approche est la plus simple à comprendre et à implémenter, elle est aussi la plus lourde d'un point de vue calculatoire. Cette méthode implique la répétition du calcul du problème direct pour chaque mesure en équivalent pôle-pôle [McGillivray & Oldenburg, 1990] :

$$S_{i,j} = \delta F_j(m) / \delta m^k = [F_j(m + \Delta m^k) - F_j(m)] / \Delta m^k \quad (2.62)$$

Le coût du calcul de la matrice des dérivées de Fréchet est donc relatif à la taille de la matrice $[N \times M]$. Outre le coût calculatoire, cette approche nécessite de générer une perturbation suffisamment faible afin d'approximer une solution valide. Cependant, ce point implique la génération des perturbations numériques pouvant induire une moindre qualité du résultat.

2.3.6.b Approche des équations de sensibilité

Cette approche requiert la résolution d'un second problème direct dont la solution est la matrice de sensibilité. Cette approche largement utilisée en géophysique permet une estimation bien plus précise de la matrice de sensibilité ainsi qu'un coût calculatoire bien plus faible comparée à la méthode précédente [McGillivray & Oldenburg, 1990].

2.3.6.c Approche de l'état adjoint

Cette approche fut décrite initialement par [Geselowitz, 1971] suite à une idée émise par O. H. Schmitt lors d'une conversation personnelle. O. H. Schmitt émettait l'hypothèse que le concept de transfert d'impédance utilisé en électrocardiographie pouvait être appliqué en Imagerie d'Impédance Électrique (IIE). La méthode IIE étant une généralisation de la méthode IRE, le principe fut repris par Smith & Vozoff [1984]; McGillivray & Oldenburg [1990] et Park & Van [1991] et appliqué à la méthode IRE. Physiquement, le principe de l'état adjoint peut être perçu comme un champ « rétropropagé » depuis un récepteur sismique [Tarantola, 2005], ou électrique [Geselowitz, 1971]. La matrice de sensibilité résulte de l'application du principe de réciprocité et d'une analyse par perturbation d'un système d'équations adjointes [Park & Van, 1991]. La démonstration suivante reprend une grande partie du formalisme utilisé par Park & Van [1991] :

$$\rho \mathbf{J} + \nabla V = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = I_s. \quad (2.63)$$

Ces deux expressions illustrent les équations fondamentales de diffusion électrique, où V représente le potentiel électrique, \mathbf{J} la densité de courant électrique, ρ la distribution de résistivité et I_s l'intensité de la source. Une perturbation réalisée sur 2.63 donne la formulation pour le champ secondaire :

$$\rho \delta \mathbf{J} + \nabla \delta V = -\delta \rho \mathbf{J} \quad ; \quad \nabla \cdot \delta \mathbf{J} = 0 \quad (2.64)$$

Les équations 2.63 et 2.64 peuvent être représentées sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & \nabla \\ \nabla \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & \nabla \\ \nabla \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{J} \\ \delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta \rho \mathbf{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

La démonstration utilise le principe de réciprocité en appliquant l'identité bilinéaire aux équations 2.65 et 2.66. L'application de l'identité bilinéaire engendre les expressions suivantes Lanczos [1997] (p182-183) :

$$\int_{\tau} [u^T (\mathbf{D} \delta v) - \{ \delta v^* (\tilde{\mathbf{D}} u) \}^*] d\tau \equiv 0 \quad (2.67)$$

$$= \int_s \text{Termes de frontière } ds \quad (2.68)$$

Où u est solution du problème adjoint, \mathbf{D} est l'opérateur normal, $\tilde{\mathbf{D}}$ est l'opérateur adjoint, δv est la solution et s la surface entourant le volume τ [Lanczos, 1997]. En conséquence, la difficulté consiste à trouver la formulation appropriée de u et de $\tilde{\mathbf{D}}$. L'objectif est de transformer la partie intégrée en une divergence afin de réduire l'intégrale volumique en une intégrale de surface (théorème de Green-Ostrogradski). À cet effet Lanczos [1997] (p198-199) indique que l'opérateur adjoint de ∇ est $-\nabla \cdot$ et que l'opérateur adjoint de $\nabla \cdot$ est $-\nabla$, soit :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & \nabla \\ \nabla \cdot & 0 \end{bmatrix}, \quad \delta v = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{J} \\ \delta V \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & -\nabla \\ -\nabla \cdot & 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} -\mathbf{J}' \\ V' \end{bmatrix}, \quad (2.69)$$

L'équation 2.69 devient :

$$\begin{aligned} & \int_{\tau} [u^T (\mathbf{D} \delta v) - \delta v^T (\tilde{\mathbf{D}} u)'] d\tau \\ &= \int_{\tau} \left[\begin{bmatrix} -\mathbf{J}' & V' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & \nabla \\ \nabla \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{J} \\ \delta V \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta \mathbf{J} & \delta V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & -\nabla \\ -\nabla \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{J}' \\ V' \end{bmatrix} \right] d\tau \\ &= \int_{\tau} [-\mathbf{J}' \rho \delta \mathbf{J} - \mathbf{J}' \nabla \delta V + V' (\nabla \cdot \delta \mathbf{J}) + \delta \mathbf{J} \rho \mathbf{J}' + \delta \mathbf{J} \nabla V' - \delta V (\nabla \cdot \mathbf{J}')] d\tau \end{aligned} \quad (2.70)$$

En supprimant de l'expression 2.70 les termes s'annulant ($\mathbf{J}' \cdot \rho \delta \mathbf{J}$), l'équation devient :

$$\int_{\tau} [u^T (\mathbf{D} \delta v) - \delta v^T (\tilde{\mathbf{D}} u)'] d\tau = \int_{\tau} [V' (\nabla \cdot \delta \mathbf{J}) + (\delta \mathbf{J} \cdot \nabla V') - (\mathbf{J}' \cdot \nabla \delta V) - \delta V (\nabla \cdot \mathbf{J}')] d\tau \quad (2.71)$$

En appliquant l'identité : $\nabla \cdot (\Phi \mathbf{J}) = \mathbf{J} \cdot \nabla \Phi + \Phi \nabla \cdot \mathbf{J}$, plusieurs éléments de l'équation 2.71 se retrouvent simplifiés :

$$(\mathbf{J}' \cdot \nabla \delta V) - (\delta V (\nabla \cdot \mathbf{J}')) = -\nabla \cdot (\delta V \mathbf{J}') \quad (2.72)$$

$$(V' (\nabla \cdot \delta \mathbf{J}) + (\delta \mathbf{J} \cdot \nabla V')) = \nabla \cdot (V' \delta \mathbf{J}) \quad (2.73)$$

permettant de formuler l'équation 2.71 sous la forme :

$$\int_{\tau} \nabla \cdot (V' \delta \mathbf{J} - \delta V \mathbf{J}') d\tau \quad (2.74)$$

Le théorème de la divergence permet en conséquence de réécrire l'équation 2.74 :

$$\int_{\tau} \nabla \cdot (V' \delta \mathbf{J} - \delta V \mathbf{J}') d\tau = \int_s (V' \delta \mathbf{J} - \delta V \mathbf{J}') \cdot \partial s \quad (2.75)$$

Permettant ainsi de vérifier l'expression 2.67. Le problème adjoint de ce système est :

$$\begin{bmatrix} \rho \mathbf{I} & -\nabla \\ -\nabla \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{J}' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I'_s \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Où le terme de droite représente un terme source pour le problème adjoint. En développant l'équation 2.76 on retrouve la forme couplée initiale pour le problème adjoint :

$$\rho \mathbf{J}' + \nabla V' = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot \mathbf{J}' = I'_s \quad (2.77)$$

Le problème direct et adjoint sont donc identiques dans leur forme et la résolution du problème adjoint peut être réalisée à partir du même algorithme et sur le même maillage que le problème « normal » [Park & Van, 1991]. Ces équations peuvent alors être simplifiées pour montrer :

$$\int_{\tau} \left(\begin{bmatrix} -\mathbf{J}' & V' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\delta\mathbf{J} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta\mathbf{J} & \delta V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I'_s \end{bmatrix} \right) d\tau = \int_{\tau} (V'\delta\mathbf{J} - \delta V\mathbf{J}') ds \quad (2.78)$$

Or, le terme de frontière des surfaces délimitant le volume τ disparaît car ces surfaces sont choisies suffisamment éloignées de la structure perturbée pour que le champ secondaire soit nul [Park & Van, 1991]. De plus, \mathbf{J}' et $\delta\mathbf{J}$ étant parallèles à la surface de la terre cette intégrale à cette surface disparaît. En conséquence, le terme de frontière à l'équation 2.78 est nul. Cette équation peut ainsi être réécrite [Park & Van, 1991] :

$$\int_{\tau} (\delta\rho\mathbf{J}\cdot\mathbf{J}') d\tau = \int_{\tau} I'_s \delta V d\tau \quad (2.79)$$

Lorsque le terme I'_s est placé à la position d'un récepteur (x_r, y_r, z_r) alors \mathbf{J}' est la densité de courant provenant d'un point source à la position d'un récepteur. Simplifiant l'équation 2.79 :

$$\frac{\delta V(x_r, y_r, z_r)}{\delta\rho} = \int_{\tau} \mathbf{J}\cdot\mathbf{J}' d\tau \quad (2.80)$$

où le terme de gauche représente un élément de la matrice des dérivées de Fréchet. Cette expression n'est valide que dans une hypothèse pôle-pôle (c'est à dire une source de courant et une mesure de potentiel). Cette sensibilité « pôle-pôle » est fonction de la position du point source et du récepteur, de la quantité de courant injecté, de la distribution de résistivité électrique du milieu et enfin du volume d'intégration τ . En conséquence, la sensibilité d'une mesure pôle-pôle nécessite de simuler une injection de courant *via* l'électrode de mesure (rappelant le principe de réciprocité). Cependant, les mesures de résistivité électrique étant toujours réalisées avec deux sources et deux récepteurs (au minimum), il est nécessaire de reconstruire la sensibilité d'une mesure en quadripôle de la manière suivante :

$$\frac{\delta V_{ABMN}}{\delta\rho} = \int_{\tau} \mathbf{J}_A\cdot\mathbf{J}_M d\tau - \int_{\tau} \mathbf{J}_A\cdot\mathbf{J}_N d\tau - \int_{\tau} \mathbf{J}_B\cdot\mathbf{J}_M d\tau + \int_{\tau} \mathbf{J}_B\cdot\mathbf{J}_N d\tau \quad (2.81)$$

Cette équation indique que la totalité du terme de droite peut être placée sous la même intégrale. Cependant, dans le cadre de mesures géo-électriques, découper la sensibilité d'une mesure en quadripôle sous forme d'une somme de sensibilité pôle-pôle permet d'économiser un temps important de calcul. La figure 2.25 présente la sensibilité d'une mesure provenant d'un dispositif Wenner α à la perturbation de paramètres du milieu. Cette matrice de sensibilité est calculée à partir de la méthode de l'état adjoint (éq. 2.80 et 2.81). À cet effet, le milieu est discrétisé en volumes finis de manière beaucoup plus précise que pour une discrétisation d'inversion avec neuf cellules séparant chaque électrode. Enfin, il est nécessaire de comprendre que chaque cellule correspond à une résolution de l'équation 2.81. La figure 2.26 illustre (de manière identique à la figure 2.25) la sensibilité d'une mesure Wenner β à différentes perturbations de la résistivité de sous-volumes d'un demi-espace homogène.

Les résultats obtenus ont ainsi pu être comparés avec des résultats émanant de travaux similaires [Günther, 2004]. De plus, un test d'inversion linéaire (terrain homogène) a été réalisé et a permis de valider la précision du calcul de la matrice de sensibilité. Enfin, l'utilisation de la méthode de

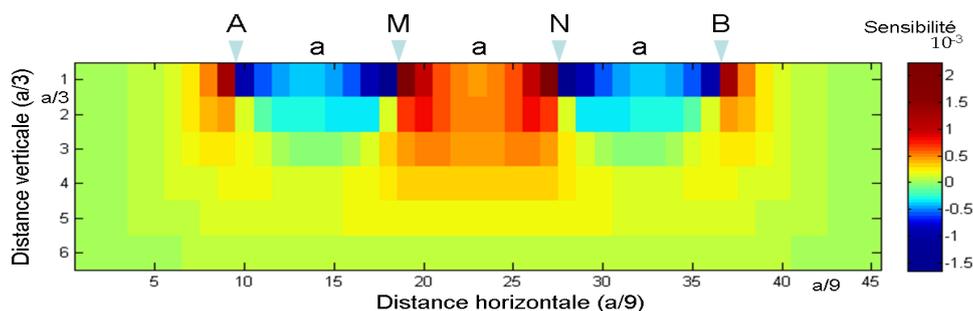


FIGURE 2.25 – Sensibilité d’une mesure Wenner α à une perturbation de la résistivité électrique de différents volumes du sous-sol. Chaque cellule représente un volume du sous-sol vu en coupe. Les électrodes sont positionnées en surface aux quatre niveaux de rupture de la sensibilité, symbolisés par les lettres A, B, M et N. Les échelles des ordonnées et des abscisses sont indiquées en fonction de la distance « a » séparant les électrodes.

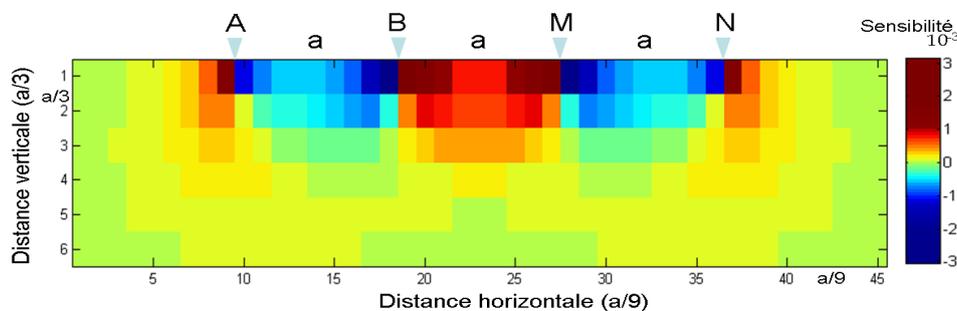


FIGURE 2.26 – Sensibilité d’une mesure Wenner β à une perturbation de la résistivité électrique de différents volumes du sous-sol. Chaque cellule représente un volume du sous-sol vu en coupe. Les électrodes sont positionnées en surface aux quatre niveaux de rupture de la sensibilité, symbolisées par les lettres A, B, M et N. L’échelle des ordonnées et des abscisses sont indiquées en fonction de la distance « a » séparant les électrodes.

l’état adjoint a été testée (et sélectionnée) pour plusieurs tests d’inversion en partie présentés au Chapitre 3.

En conséquence, à la différence de l’approche par perturbation qui nécessite $[N_e \times M]$ problèmes directs, et à la différence de l’approche par les équations de sensibilité imposant $[N_e \times 2]$ problèmes directs, la méthode de l’état adjoint permet une reconstruction précise à partir de seulement $[N_e]$ problèmes directs, avec N_e le nombre d’électrodes utilisées. De plus, le calcul de ces problèmes directs est déjà imposé par le calcul des différences de potentiel. Ainsi, aucun calcul du problème direct supplémentaire au calcul initial n’est requis.

Synthèse et application : La connaissance des dérivées de Fréchet est un paramètre indispensable pour résoudre le problème inverse. De plus, la matrice des dérivées de Fréchet permet un certain nombre de traitements *a posteriori* dont l’objectif peut être d’améliorer le contrôle de la fiabilité du résultat (Cf. Chapitre 3).

Dans le cadre de la thèse, la stratégie de calcul de cette matrice est l’état adjoint du fait de son faible coût de calcul et de sa haute précision (par rapport à l’approche par perturbation). Certaines études [Günther *et al.*, 2006] montrent que la matrice

de sensibilité peut être calculée avec une plus faible précision sans que cela ne nuise significativement au résultat [Farquharson, 2005]. Cependant, les codes développés dans le cadre de la thèse ont pour vocation d'assurer une pleine précision lors de ce calcul afin de réaliser des études *a posteriori* d'optimisation.

L'utilisation des algorithmes de Newton ou de Gauss-Newton nécessite de pouvoir inverser la matrice des dérivées de Fréchet de manière stable. Cependant, l'inversion de cette matrice *via* l'équation 2.53 est délicate et nécessite une régularisation.

2.3.7 Régularisation du problème inverse

La majorité des méthodes d'inversion utilisées en géophysique est connue pour être « mal-posée », non-linéaire et fortement sous-déterminée, c'est à dire que l'inversion dispose de moins de données qu'elle n'a de paramètres du modèle. Ce problème entraîne une mauvaise résolution de certaines zones du modèle ainsi qu'une ambiguïté sur l'existence de solutions non-unique. De plus, du fait du caractère hautement « mal-posé » du problème inverse en IRE, l'inversion de la matrice Hessienne requiert une régularisation. Ce procédé a pour effet de rendre la matrice mieux conditionnée et de réduire l'instabilité du processus.

2.3.7.a Régularisation explicite et implicite

Afin de pouvoir améliorer l'inversion, deux familles de régularisation sont utilisées : les méthodes implicites et explicites. Les méthodes implicites requièrent la résolution de l'équation normale d'inversion par des méthodes de projection. Cette méthode est souvent employée avec les algorithmes de type « gradients conjugués » [Rodi & Mackie, 2001; Günther *et al.*, 2006]. Une méthode alternative, la régularisation explicite, consiste à fixer une fonction objectif supplémentaire portant sur le modèle ou sur son évolution [Tikhonov & Arsenin, 1976; Constable *et al.*, 1987; Günther, 2004; Zhou, 2007]. Ce terme de régularisation permet l'inversion de la matrice Hessienne jusque là difficilement inversible parce que proche d'être singulière. Ainsi, la fonction objectif portant simplement sur les données est modifiée en :

$$\Psi = \Psi_d + \lambda \Psi_m = \frac{1}{2} \|\vec{d} - \mathcal{F}(\vec{m})\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} \|I(\vec{m} - \vec{m}_0)\|_2^2 \quad (2.82)$$

Où Ψ_d représente la fonction objectif sur les données et Ψ_m la fonction objectif sur le modèle. I correspond à une matrice identité de taille $[M \times M]$ et m_{ref} symbolise un milieu de référence. Lorsque la régularisation du Hessien est assurée par une matrice identité, cette approche de régularisation est nommée correction de Marquardt ou régularisation de Tikhonov [Marquardt, 1963]. L'équation 2.82 est alors nommée équation de Levenberg-Marquardt faisant intervenir un paramètre λ permettant de pondérer l'action de la régularisation (paramètre de Marquardt). En dérivant cette fonction objectif en fonction des paramètres du modèle, on obtient l'équation normale d'inversion :

$$\left(G^T W_d^T W_d G + \lambda I \right) \delta \vec{m}^k = G^T W_d^T W_d (\vec{r}) \left\{ -\lambda \left(I(\vec{m}^k - \vec{m}^{ref}) \right) \right\} \quad (2.83)$$

Afin de régulariser un problème inverse, il est nécessaire de pouvoir déterminer le coefficient d'amortissement (paramètre de Marquardt) λ . D'un point de vue assez simpliste ce paramètre peut être perçu comme un compromis entre l'optimisation des paramètres du modèle et le fait

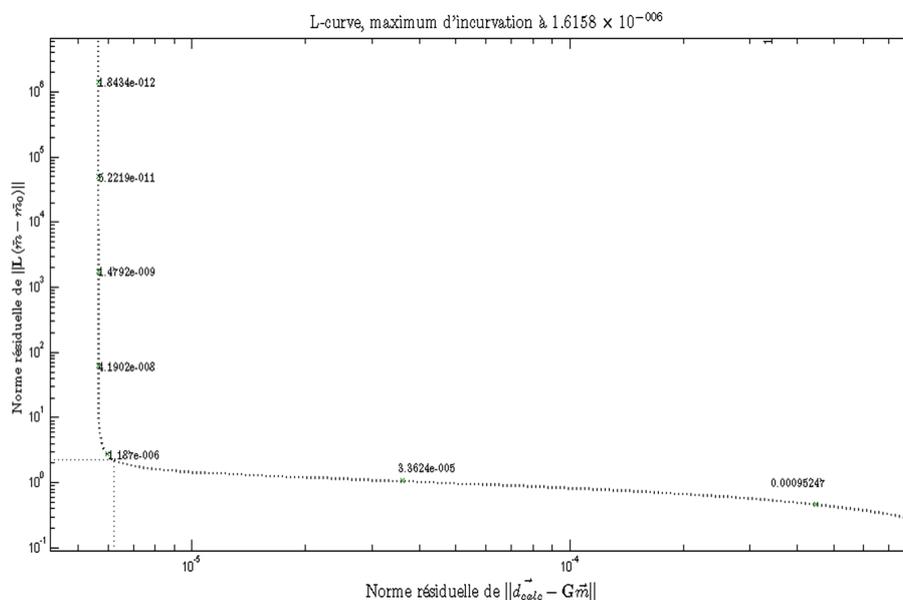


FIGURE 2.27 – Courbe en L obtenue par GSVD avec amortissement, l’abscisse présente la norme sur les données, et l’ordonnée la semi-norme sur le modèle.

de garder ce modèle à proximité d’un modèle *a priori* et/ou initial.

Une méthode prisée par la communauté géophysique consiste à déterminer de manière empirique le paramètre lors de l’inversion [Loke & Barker, 1996a]. De manière conventionnelle ce paramètre est tout d’abord fixé suivant un critère suffisamment haut pour la première itération afin de ne pas trop diverger. En effet, lorsque le modèle initial est situé à une distance « trop » élevée du modèle vrai, la marge haute imposée au paramètre λ permet de ne pas donner trop de poids à la norme portant sur les données. Une confiance trop élevée des données pouvant entraîner une sur-estimation du vecteur perturbation des paramètres et donc diverger de la solution.

La « courbe en L » [Hansen, 1992a] est une méthode partiellement graphique permettant de déterminer le coefficient d’amortissement λ . Le terme « courbe en L » (L-curve en anglais) provient de l’allure caractéristique de la courbe (tracée sur une échelle log-log) en forme de L. Cette méthode présente ainsi l’évolution de la norme sur les données et de la semi-norme sur le modèle pour différentes valeurs du paramètre de Marquardt (figure 2.27).

Comme peut l’indiquer la figure 2.27, le paramètre d’amortissement peut être compris comme un compromis entre la volonté de minimiser l’erreur sur les données et celle de minimiser la distance entre le nouveau modèle et un modèle *a priori*. Cependant, il me semble nécessaire de faire la distinction entre le « compromis » que l’on peut obtenir en calculant la réponse des normes pour différentes valeurs de λ et la L-curve. En effet, la courbe en L est réalisée à partir de méthodes basées sur une décomposition en valeurs singulières de la matrice des dérivées de Fréchet Hansen [1992a]. Ensuite, l’incurvation maximale de la courbe est calculée afin de déterminer le coefficient λ optimal. Dans le cadre de la thèse, la méthode utilisée est la GSVD (Généralisation de la Décomposition en Valeurs Singulières) permettant l’intégration d’une matrice de lissage à la place de la simple matrice identité [Hansen, 1992b].

La partie verticale de la courbe correspond aux solutions pour lesquelles $\|L(m - m_0)\|$ est très sensible aux variations du paramètre de régularisation parce que les erreurs de perturbation sont prédominantes dans la solution. La partie horizontale correspond aux solutions pour lesquelles la norme résiduelle $\|F(m) - d\|$ est très sensible au paramètre de régularisation parce que la solution est dominée par l'erreur de régularisation. Le paramètre devient donc un compromis entre l'erreur de perturbation et l'erreur de régularisation.

La méthode L-curve n'est pas l'unique méthode numérique permettant le calcul du coefficient λ . Ainsi la littérature indique l'utilisation de la méthode de validation croisée généralisée (GCV, [Vogel, 2002]) comme méthode de choix pour le calcul du paramètre de régularisation. Vogel [2002] précise dans ses travaux la supériorité de la méthode lorsque le problème est non-linéaire, du fait de la possible divergence de la L-curve dans ces cas. Ainsi, dans le cadre de la thèse, l'utilisation d'une méthode préférentiellement à une autre (empirique ou numérique) a été réalisée au cas par cas, en testant la plupart du temps les trois méthodes, afin de déterminer la plus pertinente.

2.3.7.b Matrice de lissage

Le principe de régularisation le plus largement utilisé suit le principe d'Occam [Constable *et al.*, 1987; deGroot Hedlin & Constable, 2004; Loke, 2011]. Le principe d'Occam ou rasoir d'Occam est basé sur un raisonnement engagé par le philosophe Guillaume d'Ockham (1285-1347), dont le principe littéral est :

« Pluralitas non est ponenda sine necessitate »

Une formulation plus moderne de cette philosophie peut être comprise comme : « Les hypothèses les plus simples sont les plus vraisemblables ». Le rasoir (d'Occam) symbolise alors la méthode permettant de « raser » toutes les hypothèses trop complexes. Dans ce sens, les sciences de la Terre montrent que dans de nombreux cas, suivant l'échelle spatiale sélectionnée, le comportement géologique des milieux suit ce principe. Ainsi, un modèle représentant le sous-sol de façon suffisamment lisse est considéré plus réaliste qu'un modèle décrivant un comportement très aléatoire et brusque. Cependant, cet *a priori* se révèle faux lorsque l'on se trouve en présence d'un milieu à fort contraste tel que les marnières, catiches, failles à fort rejet, ou tout simplement les milieux avec substratum rocheux sain et contrasté. D'un point de vue plus pratique, la matrice de lissage, dans un problème de minimisation s'écrit comme un opérateur voulant déterminer la rugosité d'un milieu, afin de diminuer celle-ci. Mathématiquement, on réalise cette opération en minimisant une fonction objectif portée sur le modèle (pour une norme L_2 dans le cadre de paramètres discrets) :

$$\Psi_m = \alpha_s \|W_s(m - m^{ref})\|^2 + \alpha_m \|C_{xyz}(m - m^{ref})\|^2 \quad (2.84)$$

$$= \|W_m(m - m^{ref})\|^2 \quad (2.85)$$

où les symboles W_s et C_{xyz} représentent respectivement des matrices de pondération sur l'amortissement et sur le lissage du modèle. La matrice de pondération « totale » du modèle W_m intervient par la combinaison $L = W_m^T W_m = \alpha_s W_s^T W_s + \alpha_m C^T C$. Donnant la formulation :

$$\left(G^T W_d^T W_d G + \lambda L\right) \delta \vec{m}^k = G^T W_d^T W_d(\vec{r}) \left\{ -\lambda \left(L(m^k - m^{ref}) \right) \right\} \quad (2.86)$$

Cette expression est nommée au cours de la thèse équation normale d'inversion de type Occam. C'est cette expression qui sera le plus largement utilisée pour la résolution des problèmes inverses. Pour un milieu 1D composé de six couches de même épaisseur, la matrice de lissage s'écrit assez simplement (figure 2.28).

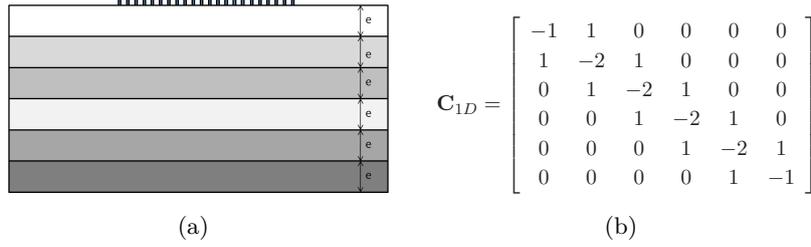


FIGURE 2.28 – Schéma illustrant 2.28(a) une discrétisation 1D régulière selon la profondeur avec six couches et 2.28(b) une matrice de lissage permettant de mesurer la rugosité du milieu 2.28(a).

Lorsque l'épaisseur des couches du milieu varie cette matrice peut être calculée par un développement de Taylor au second degré, permettant de pondérer le lissage en fonction de la distance entre les cellules. Dans le cadre où le milieu étudié est considéré 2D (figure 2.29), et que la longueur et la hauteur des cellules ne varient pas, la composante horizontale de la matrice de lissage est alors composée, pour neuf cellules, de la manière suivante :

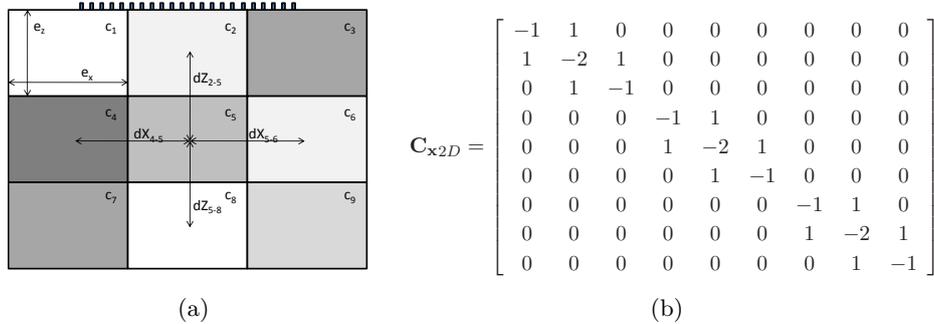


FIGURE 2.29 – Schéma illustrant 2.29(a) une discrétisation 2D régulière suivant x et z composée de 3 fois 3 couches et 2.29(b) une matrice de lissage permettant de mesurer la rugosité du milieu 2.29(a).

Où C_{x2D} représente l'opérateur mesurant la variation de résistivité électrique entre les cellules placées horizontalement à gauche et à droite de la cellule d'inversion (cellules voisines horizontalement). Lorsque l'on dispose d'un *a priori* sur la tabularité du modèle, des paramètres de pondération peuvent être utilisés dans l'équation suivante [Loke, 2011] :

$$L = \alpha_s W_s^T W_s + \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_z C_z^T C_z. \quad (2.87)$$

Les paramètres α_x et α_z imposent une pondération lorsque l'on possède un *a priori* de structures verticales ou horizontales. Ainsi plus α_x augmente, et α_z diminue, et plus les structures inversées deviendront horizontales et réciproquement. En prenant du recul sur la matrice L , il est possible de constater que celle-ci est principalement composée d'une diagonale centrée et de quatre autres

diagonales décalées. D'un point de vue plus pratique, on peut définir la matrice de lissage telle que [Blome *et al.*, 2009] :

$$C_{i,j} = \begin{cases} -1 & i=j \\ 0 & [i,j] \notin \Gamma_{voisin} \\ 1/\mathcal{N}_v & [i,j] \in \Gamma_{voisin} \end{cases} \quad (2.88)$$

Avec Γ_{voisin} les cellules voisines à une cellule particulière et \mathcal{N}_v le nombre de cellules voisines. La matrice $C_{i,j}$ étant une matrice à deux dimensions de taille $[M,M]$, il est possible et plus simple de donner la position d'une cellule correspondante par ses indices (i,j) dans la grille. Lorsque la discrétisation 2D permet une variation verticale et horizontale, le calcul de cet opérateur devient réellement plus complexe. À cet effet, le schéma 2.30(b) illustre la différence entre un maillage conforme (à variation régulière) et non-conforme (les cellules voisines ne possèdent pas de frontières complètes communes). Ainsi, pour un maillage régulier (figure 2.30(a)) le nombre de cellules voisines reste constant alors que pour un maillage non conforme le nombre de cellules voisines peut évoluer de cinq à sept, nécessitant l'opérateur présenté à l'équation 2.88. Cependant, il est nécessaire de noter que les différences de distances entre les cellules dans ce cas de figure empêche l'utilisation de l'opérateur de lissage précédent (figure 2.30(b)).

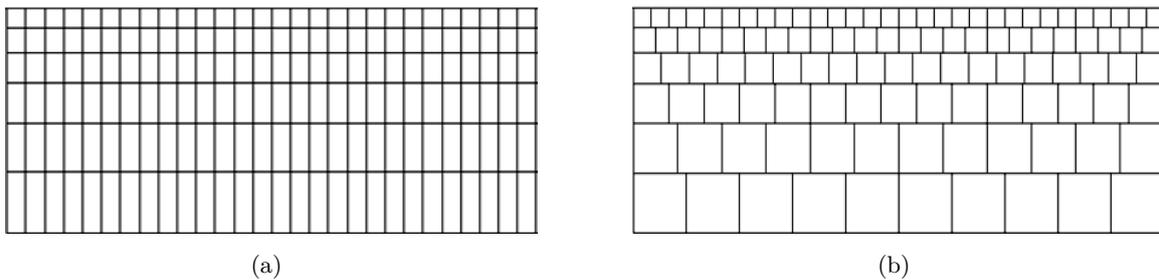


FIGURE 2.30 – Exemple de deux discrétisations différentes d'un milieu, impliquant 2.30(a) une discrétisation régulière et 2.30(b) une discrétisation irrégulière. Les deux modèles correspondent à une discrétisation d'inversion pouvant être utilisées pour une prospection avec 16 électrodes et comprenant 2.30(a) 180 cellules et 2.30(b) 81 cellules. modifié d'après Günther *et al.* [2006].

En conséquence, lorsqu'une paramétrisation de ce type (figure 2.30(b)) est employée [Günther *et al.*, 2006; Blome *et al.*, 2009] un nouvel opérateur de lissage doit être utilisé. Cet opérateur peut être décrit de la manière suivante [Blome *et al.*, 2009] :

$$C_{i,j} = \begin{cases} -1 & i=j \\ 0 & [i,j] \notin \Gamma_{voisin} \\ w_i[f(x)\cos(\alpha x(i)) + f(y)\cos(\alpha y(i))] & [i,j] \in \Gamma_{voisin} \end{cases} \quad (2.89)$$

Avec w_i la longueur du segment mettant en contact deux cellules. Enfin, lorsque la discrétisation du modèle inverse est réalisée dans les trois directions de l'espace, la matrice de lissage doit être réécrite en conséquence. Nous retrouvons ainsi la formulation 2.87 amplifiée :

$$L = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (2.90)$$

Avec α_y la pondération permettant d'augmenter les structures suivant l'axe y . Lorsque le milieu n'est pas discrétisé de manière uniforme, en utilisant notamment des discrétisations non-structurées, la matrice de lissage dans son sens le plus simple, décrit un opérateur laplacien en

hypothèse de maillage uniforme. Cet *a priori* que nous portons sur le modèle est extrêmement important car cela lui permet d'augmenter son unicité. Ainsi, la réduction du domaine de recherche (espace des solutions) dépend de l'*a priori* que l'on possède.

Synthèse et application : Les ouvrages hydrauliques en terre sont fréquemment réalisés avec des matériaux de proximité (ex : alluvions récentes) surplombant un matériau souvent équivalent. Cette information laisse supposer peu de variation entre les matériaux ce qui indiquerait l'utilisation d'une norme L_2 avec lissage spatial du modèle. Dans ce sens, en examinant des archives de construction d'ouvrage, il n'est pas rare de rencontrer des ouvrages conçus par empilement de couches successives d'un même matériau afin de pouvoir compacter ces couches de manière optimale.

Cependant, dans plusieurs cas (cf. Chapitre 1) les ouvrages hydrauliques de type digue en charge sont réalisés avec un noyau fortement conducteur en son sein (en France) ou en enveloppe (Hollande). Or, le contraste électrique entre des matériaux meubles et de l'argile est très élevé et se compare à des ruptures franches entre les matériaux. Dans ces cas précis, il convient de choisir soit une nouvelle norme d'inversion, soit de construire une matrice de lissage complètement adaptée à la reconstruction de rupture franche. Cependant, cette construction nécessite un fort *a priori* sur la position réelle du noyau.

Les codes développés au cours de la thèse, permettant la résolution du problème direct et inverse, sont conçus afin de pouvoir introduire un maximum d'*a priori* dans la solution. À cet effet, le « design » de la matrice de lissage peut être complètement remanié afin de donner le degré de contrainte désiré pour chaque sous-domaine voisin. Ainsi, en prenant l'exemple d'un réservoir d'eau dont on connaît la géométrie, il devient simple d'imposer un lissage très faible pour maintenir de bons contrastes. Enfin, les codes permettent la formation de maillages 2D conformes, et 3D conformes avec l'implémentation des matrices de lissage décrites précédemment.

2.3.8 Non-linéarité et ajustement

Lorsqu'un algorithme de type Gauss-Newton est sélectionné, du fait de la prise en compte partielle de la non-linéarité au second ordre, un paramètre τ doit être introduit afin de définir le pas optimal minimisant le plus la fonction objectif utilisée.

$$m^{k+1} = m^k + \tau \Delta m^k \quad (2.91)$$

Ainsi, plus le problème est non-linéaire et plus l'erreur faite sur l'ajustement est élevée. La convergence étant quadratique, il existe plusieurs méthodes permettant d'optimiser son calcul sans avoir à faire une recherche pas à pas. Günther [2004] présente trois méthodes de recherche linéaires basées sur une convergence quadratique. Ils montrent notamment que le paramètre peut être approché avec le calcul seulement d'un problème direct supplémentaire.

2.3.9 Le cas particulier du monitoring

L'imagerie de la distribution spatiale de résistivité d'un milieu n'est pas la seule utilisation connue de la méthode IRE. En effet, la méthode peut être utilisée pour imager non pas des structures du sous-sol mais l'évolution de celles-ci. Dans les faits, ce type de traitement est réalisé en comparant des mesures obtenues sur un même milieu à deux instants différents.

En plus de permettre la quantification d'un paramètre très important (à savoir l'évolution de la résistivité), plusieurs études indiquent que cette stratégie permet de s'affranchir d'une partie des artéfacts générés durant l'inversion [Loke, 2011; Sjö Dahl *et al.*, 2010]. Cette suppression des artéfacts provient de la méthode d'inversion qui reproduit les mêmes effets sur des données suffisamment similaires. Enfin, si les résultats sont normalisés l'un par rapport à l'autre les artéfacts disparaissent. Cette théorie suppose donc que le problème soit bien posé, qu'il soit suffisamment linéaire et que l'information provenant des données soit suffisante pour que le résultat de l'inversion soit stable. Cependant, les sections précédentes ont montré que lorsque des cellules sont mal contraintes par les données (manque d'information), l'inversion tente d'expliquer ces données en modifiant considérablement le modèle. En conséquence, même pour les cas d'inversion en variation temporelle, le manque d'information engendre théoriquement des artéfacts.

En pratique l'inversion TL (Time-Lapse, en laps de temps) peut être réalisée de quatre manières différentes :

- inversion séparée de deux jeux de données et présentation de la variation normalisée du résultat ($\frac{\rho_2^{inv} - \rho_1^{inv}}{\rho_1^{in}}$);
- utilisation du résultat du premier jeu comme modèle *a priori* pour l'inversion du second jeu;
- inversion de la différence entre les données et non pas des données absolues;
- méthode IP (inversion + perturbation).

La littérature indique de manière assez abondante [Guérin *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2009; Clément *et al.*, 2010; Hayley *et al.*, 2010; Karaoulis *et al.*, 2011; Hayley *et al.*, 2011] les avantages et limites de chacune de ces méthodes. En conséquence, le choix d'une stratégie d'inversion dépend :

- du bruit sur les mesures;
- de la complexité du milieu;
- du degré d'évolution du milieu;
- de la qualité du modèle initial;
- de la capacité du modèle inverse à représenter avec précision le milieu et son évolution.

Synthèse et application : Le développement de méthodes de surveillance des OHT est une thématique à part entière dont l'objectif diffère considérablement des objectifs de reconnaissance des OHT. Or, la méthode d'IRE propose un large panel d'applications permettant de travailler à la fois en reconnaissance et en surveillance. De plus, la méthode d'IRE possède une plus-value importante concernant la surveillance car celle-ci permet d'imager les variations temporelles de résistivités électriques. Dans le cadre de la surveillance des OHT, cette méthode peut donc s'avérer directement sensible à des critères d'érosion tels que l'évolution du degré de saturation, le débit de fuite d'une infiltration (utilisation d'un traceur salin) ou le départ

de fines (phénomène de suffusion). De plus, l'utilisation en variation temporelle permet de limiter dans une certaine mesure les artéfacts liés à la topographie et à la présence du réservoir.

Cependant, certaines variations tendent à limiter les capacités d'imagerie des méthodes de surveillance. En effet, la variation du gradient de température en profondeur peut impacter considérablement la résistivité des couches les plus superficielles et donc limiter les capacités d'interprétation (et de quantification) des résultats. Or, les méthodes de thermométrie (par exemple par fibre optique) de plus en plus utilisées pour la surveillance des OHT, doivent permettre de reconstruire un modèle thermique de l'ouvrage. En conséquence, un problème inverse prenant en compte conjointement ces deux physiques (électrique et thermique) doit permettre d'améliorer la détermination de fuites dans un ouvrage.

2.3.10 Tests numériques

Les mesures de résistivité électrique réalisées pour la reconnaissance des OHT sont fonction des effets de la géométrie de l'ouvrage, de sa composition interne mais aussi de milieux externes à l'ouvrage tels que le réservoir d'eau. Même si ces éléments peuvent avoir un impact majeur sur la mesure la majorité des études réalisées sur des OHT préfèrent émettre l'hypothèse que l'impact de ces milieux est minime sur le résultat final.

Les trois planches suivantes (figures 2.31, 2.32 et 2.33) présentent une étude numérique visant à illustrer l'impact de telles hypothèses sur les résultats d'inversion « conventionnelles ». Pour chaque test un modèle numérique est créé afin de pouvoir simuler des données. Les données modélisées ont pour objectif de simuler des auscultations 2D illustrés figures 2.31 et 2.32 longitudinalement par rapport à un ouvrage et 2.33 de manière transversale à l'ouvrage. Au sein des ouvrages modélisés, plusieurs hétérogénéités sont positionnées afin de valider la capacité des méthodes inverses à localiser ces « anomalies ». De plus, une stratégie d'amélioration du traitement de l'information est présentée au cours de cette étude, utilisant la technique de normalisation (Annexe B).

La figure 2.31 présente plusieurs résultats obtenus avec le progiciel Res2Dinv® à partir de données simulées (Comsol Multiphysics®) sur le milieu illustré à la figure 2.31(a). Ainsi, un protocole gradient multiple est généré à partir de 48 électrodes placées longitudinalement au centre de la crête d'une digue à charge permanente de $1000 \Omega.m$ dont la hauteur varie suivant la longueur. Six anomalies conductrices de $100 \Omega.m$ (pouvant simuler des renards hydrauliques) sont placées à différentes positions en profondeur. Le réservoir d'eau placé en amont de la digue mesure 5 m de hauteur et possède une résistivité de $80 \Omega.m$. Le résultat de la figure 2.31(b) est inversé sans normalisation des données. Une interprétation hors contexte des OHT pourrait indiquer que le milieu est composé de trois couches :

- i). une première couche conductrice en bas de profil symbolisant un substratum composé d'alluvions conductrices ;
- ii). un bloc résistant (800 à $1000 \Omega.m$) entre la surface et 5 m de profondeur sur toute la partie gauche du profil ;

- iii). un bloc encore plus résistant (1000 à 1200 $\Omega.m$) entre la surface et 5 m de profondeur sur toute la partie droite du profile.

Il doit être noté que trois des six anomalies sont clairement définissables. La figure 2.31(c) présente le résultat d'inversion obtenu après normalisation de l'effet de la topographie sur les données. À la différence de la figure précédente, la première couche est homogène sur toute sa longueur. Ce résultat indique que l'augmentation de résistivité de la figure 2.31(b) est en réalité un artéfact généré par une mauvaise prise en compte de la topographie. De plus, la quasi-totalité des anomalies est identifiable sur le résultat d'inversion. Enfin, la figure 2.31(d) présente le résultat d'inversion (Res2Dinv®) obtenu après normalisation de l'effet de la topographie et l'effet du réservoir. Ce dernier résultat ne laisse apparaître que la présence d'une couche résistante d'environ 1000 $\Omega.m$ avec six anomalies conductrices. En conséquence, la couche conductrice présente aux figures 2.31(b) et 2.31(c) représente l'effet du réservoir d'eau sur la mesure, illustrant clairement l'effet de celui-ci sur un résultat d'inversion. Les trois résultats d'inversion sont présentés à la cinquième itération avec une erreur RMS comprise entre 0.23 % et 0.31 %, indiquant une très bonne adéquation entre les données initiales et les données calculées à partir des modèles inversés et illustrant par la même occasion le principe d'équivalence des solutions.

Le test numérique présenté à la planche 2.31 représente un cas idéal pour la démonstration du principe de normalisation. Cependant, l'opérateur désirent réaliser le principe de normalisation n'est pas censé connaître l'exact rapport de résistivité présent entre le corps de digue et l'eau du réservoir. En conséquence, un second test numérique, reprenant le modèle et le principe d'acquisition des données précédentes est réalisé. À la différence de l'étude précédente le corps de digue est séparé longitudinalement en deux tronçons. Le premier (à gauche) et le second tronçons (à droite) possèdent respectivement une résistivité de 2000 $\Omega.m$ et 1000 $\Omega.m$. La position des anomalies (figure 2.32(a)) reste identique à l'étude précédente.

La figure 2.32(b) illustre un résultat d'inversion réalisé sans normalisation du résultat. Trois à quatre structures peuvent se distinguer du résultat symbolisant à la fois l'effet du réservoir (couche conductrice en fond) et l'effet de la variation du corps de digue. Le résultat d'inversion de la figure 2.32(c) est réalisé après normalisation de l'effet de la topographie et modifie la résistivité de la couche résistante en proche surface à droite. Les résultats des figures 2.32(d) à 2.32(f) présentent une normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir avec une variation du rapport entre résistivité du remblai et résistivité du réservoir. Un rapport insuffisant (figure 2.31(b)), soit un rapport inférieur au plus faible rapport possible entre le remblai et le réservoir, ne permet pas de supprimer totalement la présence de la couche conductrice et aide à la détermination des anomalies. Ensuite, le choix du rapport utilisé ne permettant pas une normalisation complète le résultat garde la présence d'une couche soit résistante (cas du rapport égal à 25, figure 2.32(f)) en fond de couche dans la partie conductrice, soit une couche conductrice (cas du rapport égal à 12.5, figure 2.32(e)) en fond de couche dans le tronçon résistant. L'utilisation du principe de normalisation permet ainsi de visualiser dans le résultat d'inversion les deux matériaux avec les six anomalies.

Cependant, à mon sens, ces résultats ne doivent pas être interprétés tels quels. En effet, ce traitement doit permettre de visualiser où sont positionnés les effets des différents corps « perturbateurs » afin de limiter leur interprétation.

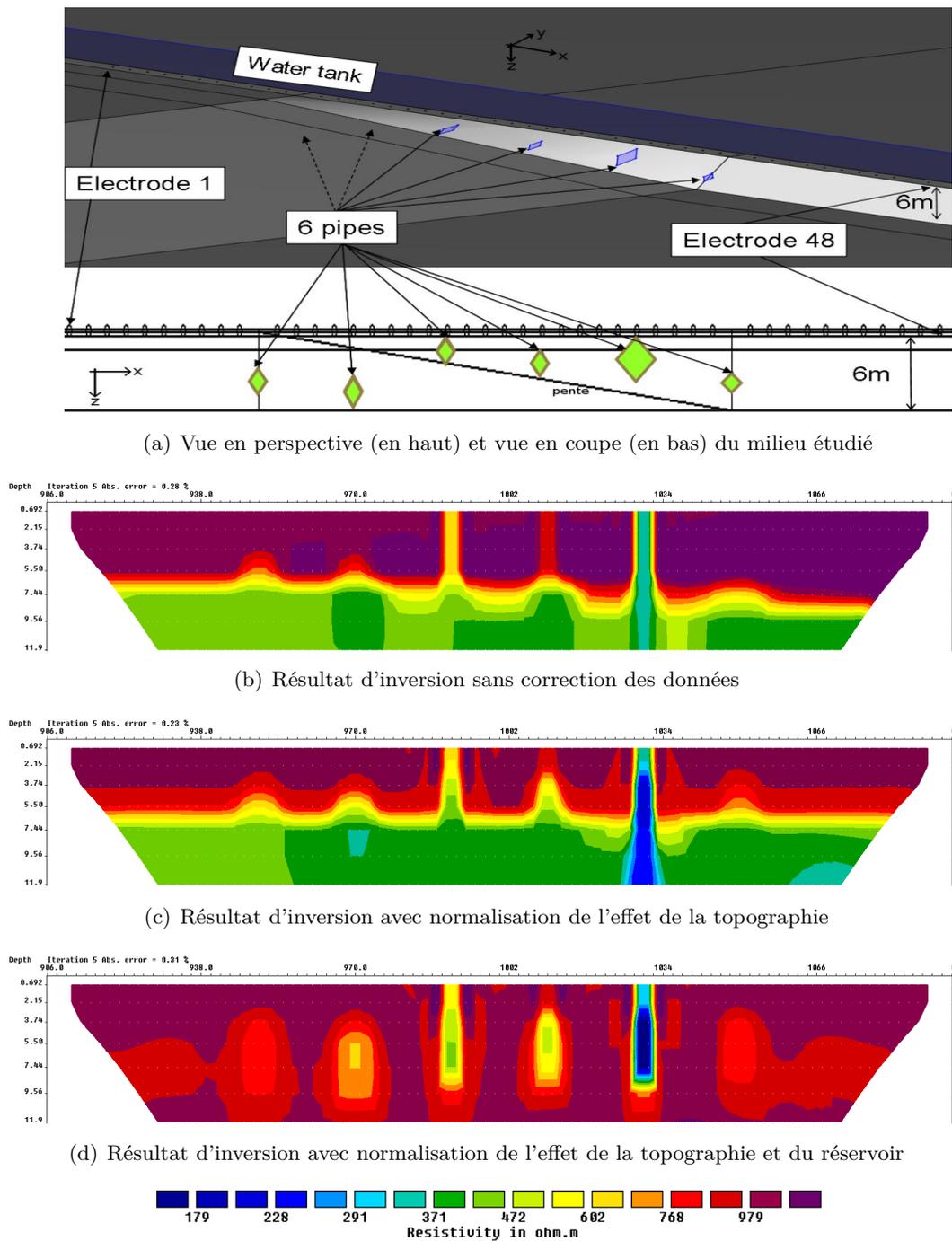


FIGURE 2.31 – Comparaison de trois résultats obtenus après inversion (*Res2Dinv*®) de données simulées (*Comsol Multiphysics*®) sur le milieu schématisé à la figure 2.31(a) avec un protocole gradient multiple. La tomographie est réalisée à partir de 48 électrodes placées au centre de la crête d'un ouvrage en charge. Six anomalies de $100 \Omega.m$, de différentes tailles et à différentes profondeurs sont présentes dans le remblai. La résistivité électrique du réservoir et du remblai sont respectivement de $80 \Omega.m$ et de $1000 \Omega.m$. Les reconstructions sont respectivement obtenues 2.31(b) sans correction, 2.31(c) avec normalisation de l'effet de topographie et 2.31(d) avec une normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir.

Lorsqu'une reconnaissance est réalisée de manière transversale à l'ouvrage, peu d'artéfacts liés à la topographie apparaissent (si celle-ci ne varie pas suivant le sens longitudinal à la digue).

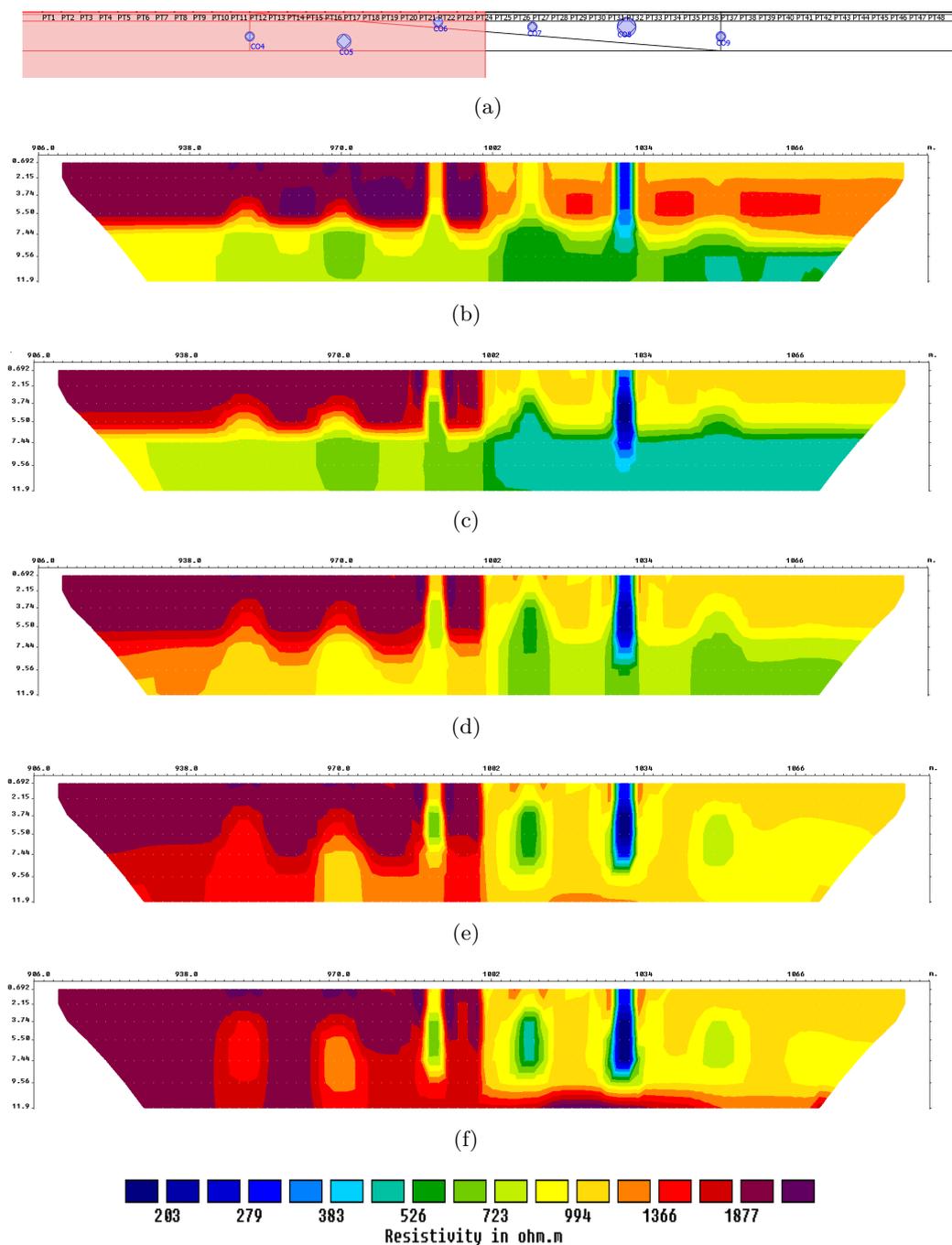


FIGURE 2.32 – Résultats d’inversion simulés à partir du modèle figure 2.32(a). L’étude est identique à l’étude présentée à la figure 2.31. Le milieu est composé, à gauche d’un bloc résistant de $2000 \Omega.m$ (en rose sur la première figure) et, à droite, d’un bloc de $1000 \Omega.m$. Les résultats d’inversion illustrent les effets respectifs 2.32(b) d’aucune normalisation, 2.32(c) d’une normalisation de l’effet de la topographie et d’une normalisation prenant un contraste de résistivité entre le réservoir et le remblai de 2.32(d) 5, 2.32(e) 12.5 et 2.32(g) 25.

Cependant, le progiciel d’inversion Res2Dinv® ne considère ni la topographie ni les milieux présents en dehors de la couverture des électrodes. Or, les travaux de Maurer & Friedel [2006] ont montré que les milieux placés en dehors d’une tomographie ont un impact important sur la mesure. À cet effet, un test numérique simulant l’inversion de mesures réalisées transversalement à

un ouvrage est réalisé à la planche 2.33. Un protocole gradient multiple est généré à partir d'un jeu de 24 électrodes placées à la surface de l'ouvrage (figure 2.33(a)). La figure 2.33(a) donne les détails du modèle utilisé afin de générer les données. Ensuite, la figure 2.33(b) présente le résultat obtenu sans normalisation des données. L'anomalie est reconstruite à la bonne position verticale et horizontale, cependant plusieurs artéfacts sont présents et plus particulièrement en haut à droite où de très fort contrastes de résistivité sont présents afin d'expliquer la présence du réservoir. La figure 2.33(c) présente le résultat après normalisation de l'effet du réservoir sur les données. Cette figure indique un milieu se rapprochant très fortement du modèle de départ et présentant des artéfacts moins sévères à proximité du réservoir.

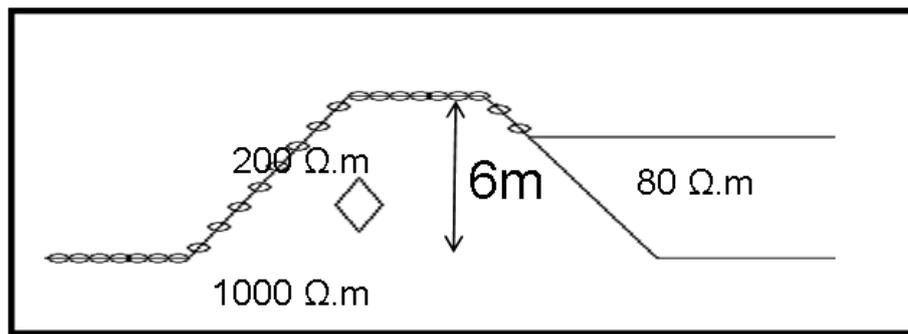
En conséquence, même si ces résultats font ressortir la technique de normalisation comme une méthode « miracle », il est nécessaire de ne pas oublier que cette méthode requiert la connaissance de la géométrie des milieux et de leur composition. Or, la composition réelle des ouvrages ne peut être connue, ou dans ce cas les raisons d'une reconnaissance n'ont plus lieu d'être. Plus cette connaissance diminue et plus le bénéfice de l'opération diminue en même temps. Cependant, la topographie de l'ouvrage, la géométrie du réservoir et sa résistivité sont autant d'éléments pouvant être obtenus dans le cadre d'une méthodologie de surveillance d'OHT. En conséquence, il est nécessaire de séparer toutes les mesures « préalables » pouvant être réalisées sans intrusion du remblai (topographie, résistivité du réservoir d'eau, ...) des mesures issues des campagnes géophysiques.

Synthèse et application : Les résultats précédents illustrent que la topographie et le réservoir d'eau ont un impact important sur la mesure. Cet effet sur la mesure se répercute dans le résultat d'imagerie. Des méthodes simples telles que la technique de normalisation (cf. Annexe B) peuvent alors être utilisées afin de visualiser l'impact de ces milieux perturbateurs sur le résultat d'imagerie et le supprimer. Cependant, cette méthode nécessite un certain niveau de connaissances *a priori* (Ex : cas numériques présentés aux figures 2.31, 2.32 et 2.33) dont le chargé d'étude ne peut disposer durant une reconnaissance. Lorsque l'opérateur ne dispose que d'une partie de cet information *a priori*, des précautions simples doivent être prises afin de ne pas générer d'artéfacts supplémentaires sur le résultat d'imagerie.

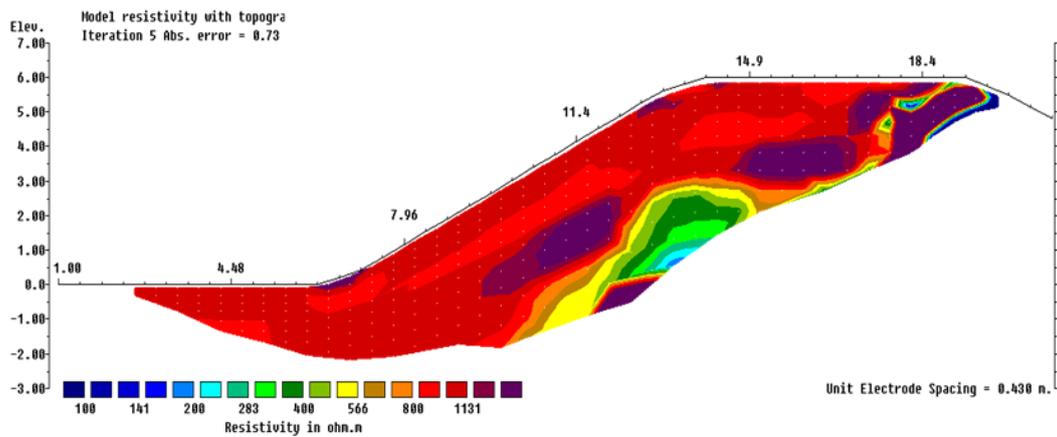
2.4 Conclusion

La reconstruction d'un modèle décrivant la distribution de résistivité électrique du milieu ausculté nécessite la résolution du problème inverse. Les méthodes inverses sont un point clé dans la chaîne de traitement de l'information dont la validation nécessite le passage de plusieurs jalons :

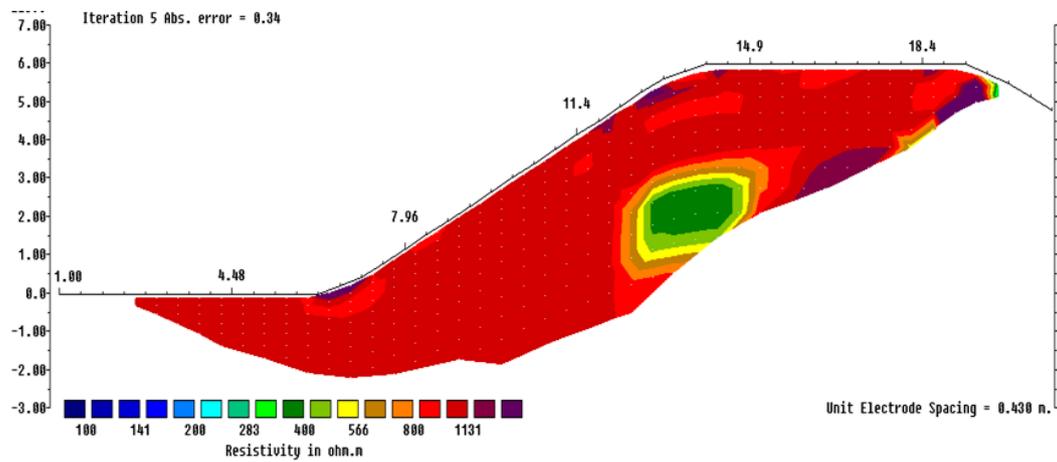
- la compréhension des principes élémentaires liés à la prospection électrique à courant continu ;
- la connaissance des principales sources de bruit sur la mesure ;
- la création d'un problème direct précis et souple permettant de simuler des données mesurées en fonction d'une distribution complexe de résistivité ;
- le calcul de la matrice des dérivées de Fréchet de manière précise et minimisant le nombre de calculs du problème direct nécessaires (ex : méthode de l'état adjoint) ;
- l'utilisation de méthodes adaptées de régularisation du problème inverse ;
- la compréhension des principes nécessaires à la discrétisation du problème direct en fonc-



(a)



(b)



(c)

FIGURE 2.33 – Comparaison de deux résultats obtenus après inversion de données simulées sur le milieu schématisé à la figure 2.33(a) avec un protocole de type gradient multiple. Les figures 2.33(b) et 2.33(c) présentent respectivement les résultats d'inversion 2.33(b) sans correction des données, 2.33(c) avec normalisation de l'effet du réservoir.

tion de la capacité de résolution des mesures (et de l'information en général) et de la représentativité de la discrétisation comparée au milieu réel.

- la sélection d'un algorithme (ex : Gauss-Newton) adapté à la résolution du problème inverse.

Le franchissement de ces jalons par le re-développement d'outils présents dans la bibliographie a permis la réalisation d'un code d'inversion souple et précis. Cependant, dans le cadre de la reconnaissance des OHT, ces développements « conventionnels » ne sont pas suffisants pour fournir un outil d'auscultation robuste (permettant un résultat d'imagerie stable). En conséquence, afin de fournir une méthodologie plus pertinente de reconnaissance et de surveillance, plusieurs développements concernant l'amélioration de la stabilité du résultat doivent être réalisés. Ces développements requièrent, entre autres, la création de stratégies optimisées à l'auscultation des OHT ainsi que l'élaboration d'indices de fiabilité permettant d'améliorer la méthodologie d'interprétation.

Chapitre 3

Optimisation et Robustesse

Contents

3.1	Robustesse des méthodes inverses	96
3.1.1	Critère d'erreur sur la mesure et expérience	96
3.1.2	La méthode de la « Region Of Investigation (<i>ROI</i>) »	97
3.1.3	La matrice de résolution du modèle	99
3.2	Réécriture du problème inverse	101
3.2.1	Les différentes stratégies de discrétisation	102
3.2.1.a	Technique de discrétisation 1 [Günther <i>et al.</i> , 2006]	102
3.2.1.b	Technique de discrétisation 2 [Blome <i>et al.</i> , 2009]	103
3.2.1.c	Technique de discrétisation 3 [Fargier <i>et al.</i> , 2011b]	103
3.2.2	Les bases d'un nouveau code - InGEOHT	105
3.2.3	Stratégie $2D^+$	106
3.2.3.a	Principe de la stratégie $2D^+$	106
3.2.3.b	Test numérique de la stratégie $2D^+$	109
3.2.4	Stratégie $3D^-$	113
3.2.4.a	Principe de la stratégie $3D^-$	113
3.2.4.b	Test numérique de la stratégie $3D^-$	114
3.3	Optimisation de l'acquisition	118
3.3.1	Optimisation des protocoles d'acquisition	120
3.3.1.a	Choix du protocole d'acquisition	120
3.3.1.b	Protocoles non-conventionnels	120
3.3.1.c	Protocoles optimisés	122
3.3.1.d	Protocoles optimisés et mesures sur le terrain	124
3.3.2	Optimisation du placement des électrodes	124
3.3.2.a	Problématique et état de l'art	125
3.3.2.b	Stratégies d'optimisation du positionnement	126
3.3.2.c	Paramètres d'influence de la méthode d'optimisation	127
3.3.2.d	Évaluation numérique de l'optimisation du placement des électrodes	129
3.4	Conclusion	133

Introduction

Dans une de ses conclusions principales concernant l'utilisation des méthodes géo-électriques, le Projet National ERINOH stipule que l'interprétation quantitative et même relative des résultats est extrêmement difficile à réaliser. Cette difficulté d'interprétation provient du manque de fiabilité du résultat d'inversion dans l'utilisation conventionnelle de cette méthode pour l'auscultation des OHT.

La recherche bibliographique initiée sur l'auscultation des OHT (Chapitre 1 et 2) ainsi que les études numériques réalisées au Chapitre 2 indiquent qu'une utilisation conventionnelle de la méthode IRE ne permet pas de répondre de manière optimale à la problématique. Dans certains cas particuliers et suivant les spécifications de la prospection, un traitement conventionnel peut entraîner la reconstruction de modèles inexacts et ainsi mener à de mauvaises interprétations.

L'objectif de ce chapitre est d'exprimer au travers de différents travaux, plusieurs développements de la méthode IRE et d'une méthodologie associée pour l'auscultation et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre. Les chapitres 4 et 5 auront pour vocation d'appliquer cette nouvelle méthodologie sur des cas quasi-réel et réel, afin de proposer des solutions à la problématique.

3.1 Robustesse des méthodes inverses

Théoriquement, les méthodes inverses ne peuvent recréer le milieu ausculté dans son exactitude. Ce défaut de reconstruction provient de trois manquements théoriques et pratiques, à savoir :

- i). les mesures sont entachées d'erreurs ;
- ii). la couverture du milieu par les mesures n'est pas continue ;
- iii). le modèle d'inversion est discret, il ne peut donc pas représenter un milieu continu dans son entière complexité.

Ces trois points posent alors différentes questions :

Quel degré de confiance peut-on attribuer au résultat ?

Comment quantifier la présence d'artéfacts dans le résultat ?

Comment poser le problème afin de limiter le nombre d'artéfacts d'inversion ?

3.1.1 Critère d'erreur sur la mesure et expérience

Face aux problèmes d'artéfacts et d'équivalence des solutions, le chargé d'étude géophysique possède quelques outils de sécurité. Le critère d'erreur des données qui indique la distance normalisée entre les données mesurées sur le terrain et les données simulées fournit cette première solution de contrôle de la fiabilité du résultat. Ce critère peut alors prendre la forme d'une erreur RMS (Root Mean Square) [Loke & Barker, 1996a], ou plus précisément de l'écart quadratique moyen d'une variation relative :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{mes}}{d_i^{mes}} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (3.1)$$

Il est souvent avancé qu'un critère d'erreur compris entre 5 % et 10 % indique une reconstruction moyenne mais acceptable et qu'au-delà de 10 % ce modèle doit être considéré comme difficilement interprétable. Cependant, un critère d'erreur inférieur à 5 % voire 1 %, même s'il indique une bonne adéquation entre le modèle reconstruit et les données mesurées, ne permet pas de conclure à la justesse du modèle reconstruit. L'existence de solutions équivalentes est un exemple simple de limitation quant à l'interprétation de ce critère. Ce critère de fiabilité peut aussi être formulé en reprenant la norme sur les données (équation 3.2) de manière à être plus représentatif du critère de convergence employé lors de la minimisation de la fonction objectif (2.52).

$$\Phi_d = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\log(\rho_{a_i}^{mes}) - \log(\rho_{a_i}^{calc})}{\sigma_i^2} \right)^2} \quad (3.2)$$

Cette formulation permet une prise en compte explicite de l'erreur sur la mesure et pose ainsi un intérêt pratique lorsque les données mesurées sont bruitées. Cependant, il est difficile de bien caractériser le bruit sur les mesures et il peut être risqué de conclure avec une valeur si « absolue ».

3.1.2 La méthode de la « Region Of Investigation (ROI) »

Basée sur les travaux de Oldenburg & Li [1999] et de Marescot *et al.* [2008a], la méthode ROI permet de quantifier un indice de confiance que l'on peut attribuer aux différentes régions (cellules) d'une coupe d'inversion. Cette technique est visuellement réalisée en plaçant cet indice de confiance en transparence ou en iso-contour sur le résultat d'inversion (figure 3.1, d'après Marescot *et al.* [2003]). Les régions d'indice proche de 0, indiquant un degré de confiance élevé, sont généralement situées à proximité des électrodes (figure 3.1). Lorsque l'indice du ROI est faible, cette « confiance » est alors représentée par un degré de transparence nul (la coupe de résistivité est alors visible).

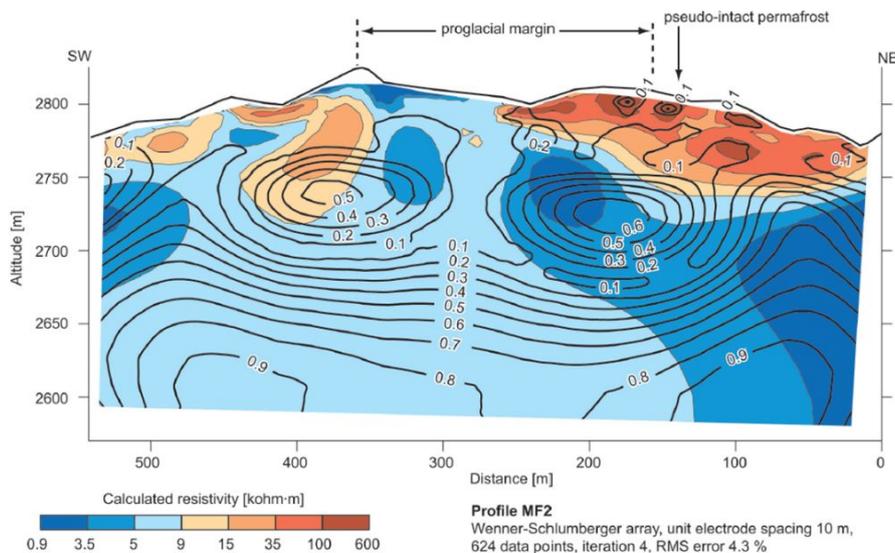


FIGURE 3.1 – Représentation en iso-contours du critère ROI sur la coupe de résistivité inversée correspondante, d'après Marescot *et al.* [2003]

A *contrario* les zones s'éloignant le plus de 0 (proches de 1) sont supposées moins robustes, et l'interprétation est rendue impossible par l'application d'une transparence totale sur ces zones.

La figure 3.1 montre l'apport important pour l'interprétation de données de l'application de la méthode ROI . Mathématiquement, le calcul de l'indice ROI est réalisé suivant l'expression 3.3.

$$ROI(x, y, z) = \left| \frac{m_1^{inv}(x, y, z) - m_2^{inv}(x, y, z)}{ROI_{max} (m_1^{ref}(x, y, z) - m_2^{ref}(x, y, z))} \right| \quad (3.3)$$

où $ROI(x, y, z)$ représente la distribution spatiale du critère des régions d'investigation (ROI) et ROI_{max} sa valeur maximale. $m_1^{inv}(x, y, z)$ et $m_2^{inv}(x, y, z)$ représentent respectivement la distribution spatiale de résistivité du milieu m_1 et m_2 obtenus après inversion. $m_1^{ref}(x, y, z)$ et $m_2^{ref}(x, y, z)$ symbolisent respectivement les modèles initiaux utilisés pour l'inversion des modèles m_1^{inv} et m_2^{inv} . Ces deux résultats d'inversion, réalisés à partir d'un unique jeu de données, diffèrent simplement par le choix du modèle initial utilisé.

Le critère ROI se base sur le principe qu'une variation du modèle initial ne doit pas avoir d'impact significatif sur le résultat si les données contraignent suffisamment l'inversion. Ainsi, si une faible variation du modèle initial (dans une région donnée du modèle) modifie fortement le modèle résultant alors on peut émettre l'hypothèse que les données mesurées contraignent peu l'inversion dans cette même zone. À l'inverse, si une forte variation du modèle initial ne modifie pas le résultat d'inversion alors on peut supposer que les données contraignent efficacement la solution. Ainsi, le choix des modèles initiaux constitue un enjeu important pour la réussite de ce traitement. En effet, les méthodes d'inversion déterministes (basées sur la descente d'un gradient) linéarisées ne permettent qu'une convergence au niveau du minimum local situé à proximité du modèle initial (figure 3.2). La topographie de l'espace des solutions, pour un paramètre du modèle, peut être représentée par une courbe avec pour abscisse la variation du paramètre m et en ordonnée la norme sur l'erreur calculée à partir du paramètre m (figure 3.2). Dans le cadre de méthodes mal-posées, avec non unicité de la solution, plusieurs minimums locaux et global peuvent être représentés sur cette courbe (figure 3.2). En conséquence, la figure 3.2 présente deux scénarii menant à une mauvaise interprétation du critère ROI ,

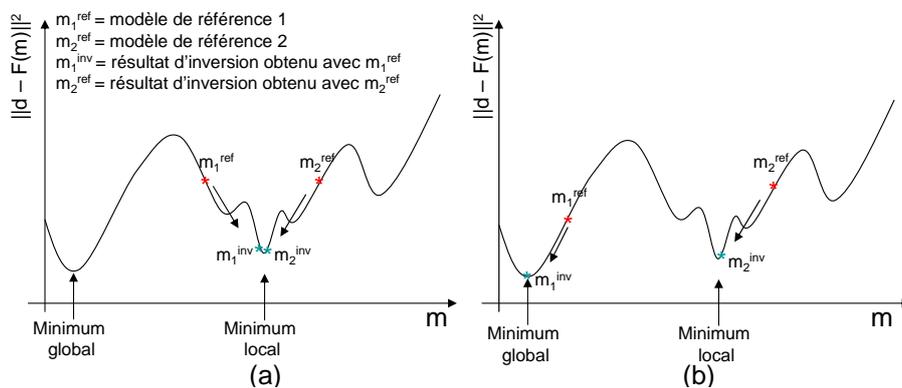


FIGURE 3.2 – Représentation de la topographie de l'espace des solutions composée d'un paramètre « m » avec deux scénarii mettant en défaut l'interprétation du critère de fiabilité ROI . La figure 3.2(a) illustre le cas de deux modèles initiaux proches mais placés à une grande distance du minimum global. La figure 3.2(b) présente le cas de deux modèles initiaux choisis à distance élevée l'un de l'autre dont un à proximité d'un minimum global et le second d'un minimum local.

Le premier scénario doit indiquer un bon critère ROI alors que le minimum global n'est jamais

atteint et le second scénario doit conclure sur un indice ROI mauvais alors que le milieu 1 permet d'atteindre le minimum global.

Synthèse et application : Une limitation supplémentaire peut être ajoutée à l'utilisation du critère ROI . En effet, les cas où le milieu n'est pas correctement pris en compte (milieu $3D$ inversé en $2D$) génèrent des artéfacts systématiques. Appliquée à l'auscultation des OHT, l'absence de prise en compte du réservoir d'eau entraîne quasi-irréremdiablement la reconstruction d'une couche conductrice en profondeur qui n'existe pas en réalité dans le remblai. En conclusion, les artéfacts systématiques ne peuvent pas être reconnus par l'indice ROI en tant que tels si une bonne prise en compte d'éléments tels que la topographie n'est pas réalisée.

3.1.3 La matrice de résolution du modèle

Le principe de matrice de résolution du modèle (R_M) remonte aux travaux de Backus & Gilbert [1967]; Menke [1984]. Ces travaux stipulent que la quantité d'information contenue dans des données, par rapport à un modèle, peut être calculée lors de la chaîne de traitement de l'inversion. D'un point de vue théorique, R_M peut être définie de la manière suivante (équations 3.4 à 3.6) en partant d'un problème inverse quasi-linéaire :

$$\vec{d}^{mes} \approx G\vec{m}^{vrai} \quad (3.4)$$

$$\vec{m}^{est} \approx G^{-g}\vec{d}^{mes} \quad (3.5)$$

$$\vec{m}^{est} = G^{-g}G\vec{m}^{vrai} = R_M\vec{m}^{vrai} \quad (3.6)$$

où \vec{d}^{mes} représente les données mesurées sur un milieu m^{vrai} , m^{est} représente le modèle après inversion, G la matrice des dérivées de Fréchet et G^{-g} l'inverse généralisé de G [Menke, 1984]. Enfin, R_M correspond à la matrice de résolution du modèle. Ainsi, si l'on désire prendre une échelle similaire au ROI , on notera $VR_R = 1 - R_M$ avec VR_R le nouvel indice concernant la matrice de résolution du modèle.

L'écriture de R_M sous cette forme montre clairement la proximité des deux approches (R_M et ROI). D'un point de vue pratique, lorsque R_M s'apparente à une matrice identité alors l'équation 3.6 montre que le modèle inversé tend vers le modèle vrai. La capacité de résolution offerte par les données est alors optimale. À l'inverse, plus les valeurs composant la diagonale tendent vers 0 et moins les données informent l'inversion. Théoriquement la méthode des matrices de résolution n'est réalisée qu'avec une hypothèse de linéarité du problème inverse (eq. 3.4). De plus, réaliser le calcul de l'équation sous-entend la connaissance du milieu vrai (eq. 3.5). Or, nous ne disposons au mieux (lorsque les données sont réalisées sur le terrain) que du modèle après inversion. En pratique, nous supposons ce modèle obtenu après inversion suffisamment proche du modèle vrai pour que l'hypothèse de linéarité soit valide. En reprenant la démarche réalisée par l'inversion au niveau de la section 2.3 et en développant l'équation 3.5 on retrouve une nouvelle formulation de R_M (Stummer, 2004) :

$$R_M = (G^T W_d^T W_d G + \lambda C^T C)^{-1} G^T W_d^T W_d G \quad (3.7)$$

Avec G la matrice des dérivées de Fréchet, W_d une matrice diagonale contenant les erreurs sur les données, λ le paramètre d'amortissement aussi appelé paramètre de Marquardt et C^{-1} la

matrice de covariance sur le modèle. Enfin, le symbole T représente l'opérateur transposé.

La connaissance de la matrice R_M offre plusieurs avantages :

- R_M informe sur la relation liant la robustesse d'une inversion aux données ;
- R_M permet ainsi d'optimiser l'acquisition afin d'obtenir le résultat le plus robuste (dont la solution est la plus stable) ;
- R_M peut être directement calculée sans avoir à réaliser d'inversion lorsque l'on possède suffisamment d'informations décrivant le milieu ausculté.

Cependant, certaines limites se posent à R_M :

- R_M ne tient pas totalement compte de la non-linéarité du problème ;
- R_M suppose que le modèle inversé est proche du modèle vrai.

Conventionnellement, R_M est utilisée en étudiant seulement la diagonale de cette matrice. Certains auteurs préfèrent ne pas utiliser cette seule diagonale, mais calculent par la PSF (Point Spreading Function), i.e. la fonction « d'étalement » correspondant à chaque cellule du maillage [Oldenborger & Routh, 2009], reflétant ainsi la véritable capacité de résolution du Hessien dans un algorithme de type Gauss-Newton.

Chaque scalaire de cette matrice diagonale représente une cellule du modèle d'inversion. Plus la valeur de cette matrice approche 1 et plus la robustesse de l'inversion peut être avancée (équation 3.6). Une partie des auteurs suppose que la grandeur de sortie (valeur des éléments de la diagonale) peut être directement rapprochée de la capacité d'inverser de façon unique chaque cellule d'inversion. Cependant, cela suppose au moins une condition très importante :

La discrétisation du modèle d'inversion doit être l'exacte reproduction de la structure interne du modèle ausculté dans toute sa complexité.

Le début du chapitre évoquait que cette représentativité ne pouvait être atteinte avec un modèle discret. Cette méthode ne peut donc que s'approcher de la capacité de résolution des données. De plus, dans la majorité des cas, la matrice R_M est calculée pour des modèles $2D$ ne prenant pas en compte la topographie transversale à l'auscultation. Or, les mesures IRE étant fortement sensibles à la présence de topographie et à la position des électrodes, un défaut de prise en compte de ces paramètres a pour effet de surestimer largement les valeurs de la matrice R_M . Cette surestimation du critère de robustesse peut ainsi mener à de mauvaises interprétations. C'est pourquoi, il est important de pouvoir intégrer de la manière la plus précise possible, dans le calcul de R_M , tous les paramètres pouvant influencer son résultat (la topographie, les milieux transversaux « perturbateurs », etc.).

Synthèse et application : Un résultat de prospection IRE est nécessairement entaché, à plus ou moins haut degré, d'erreurs de reconstruction. Le contexte d'auscultation des OHT renforce ces erreurs de reconstruction du fait de la mauvaise prise en compte de l'information durant la chaîne de traitement (dans le cas de traitements $2D$ conventionnels). L'utilisation de critères de qualité offre ainsi un moyen de contrôle et d'amélioration de la méthodologie d'interprétation des résultats. Cependant, afin que ces méthodes soient applicables à notre problématique, celles-ci nécessitent d'être implémentées avec des codes permettant une réelle prise

en compte de la complexité des OHT. Ainsi, afin que ces critères soit utilisables, nous avons montré qu'il était nécessaire d'entreprendre un point essentiel : la réécriture du problème inverse afin de permettre une prise en compte de tout l'*a priori* que nous possédons (tel que les aspects à la fois 2D et 3D des ouvrages).

Ce point permettant de mener à la résolution d'un second point non moins intéressant pour la problématique : l'optimisation de l'acquisition de l'information permettant de mieux contraindre le problème et ainsi accroître la robustesse de la méthode.

3.2 Réécriture du problème inverse

Le but du chapitre 2 était double. À savoir, donner un état de l'art de la méthode et présenter certains éléments constitutifs du code InGEOHT (Inversion de mesures Géo-Électriques provenant d'Ouvrages Hydrauliques en Terre). Les deux sous-sections test numérique (2.2.5 et 2.3.10) ont permis d'illustrer qu'une utilisation conventionnelle des méthodes de traitement des mesures électriques 2D longitudinales souffrait d'un manque concret de robustesse.

Ce manque de robustesse provient essentiellement de l'incapacité des codes commerciaux actuels, d'intégrer convenablement l'information *a priori* disponible sur les ouvrages et ainsi permettre d'intégrer les effets 3D. À mon sens, un certain nombre de critères sont nécessaires afin de réaliser le traitement des données provenant de campagnes réalisées sur des OHT. Le tableau 3.1 répertorie quelques unes de ces principales conditions confrontées à quatre codes d'inversion présents dans la littérature. À savoir, Res3dInv® [Loke, 2011], BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography) [Günther *et al.*, 2006], EIDORS (Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software) [Adler & Lionheart, 2006] et Cesar-INVS un module d'inversion réalisé à partir du progiciel de modélisation numérique Cesar-LCPC [Marescot *et al.*, 2008a].

TABLE 3.1 – Synthèse des critères recherchés, accomplis ou non par quatre codes.

Critères	Res3dInv®	BERT(3D)	EIDORS	Cesar-INVS
Utilisation industrielle	Oui	Non	Oui	Oui
Code open source	Non	Oui	Oui	Modéré
Couplage multiphysique	Non	Non	Non	Oui
Création de géométries « full » 3D	Non	Modéré	Oui	Oui
Position arbitraire des électrodes	Oui(x64)	Oui	Oui	Oui
Intégrer l' <i>a priori</i> dans le modèle	Faible	Élevé	Faible	Modéré
Intégrer l' <i>a priori</i> avec flexibilité	Limité	Modéré	Modéré	Faible
Choix de norme L1 ou L2	Non	Oui	Oui	Non
Inversion en variation temporelle	Non	Oui	Oui	Non
Inversion d'un grand jeu de données	Oui	Modéré	Modéré	Oui
Rapidité relative du calcul	Forte	Modérée	Faible	Faible

D'après ce tableau, le code EIDORS [Adler & Lionheart, 2006] figure parmi les plus aptes à pouvoir accomplir les points précédents en fonction de son interface Matlab et du caractère

« open-source » du code. Cependant, ce logiciel réalisé pour le domaine biomédical, nécessite une prise en main et une adaptation sévère pour qu'il puisse satisfaire les spécifications recherchées. D'après ces mêmes critères le code BERT fournit un moyen d'étude pertinent pour l'auscultation des ouvrages hydrauliques.

Dans le cadre de cette thèse, le modèle étudié étant pleinement $3D$ (topographie du milieu et composition), une reconstruction $3D$ semble plus adéquate. Cependant, la reconstruction d'un modèle $3D$ complet requiert une quantité d'information bien supérieure à la quantité d'information nécessitée par une inversion $2D$. En effet, le choix de l'inversion $2D$ impose une contrainte *a priori* très élevée sur le modèle permettant ainsi une meilleure résolution du système avec moins d'information. Cependant, cette amélioration de la résolution ne peut être observée que lorsque la variation spatiale de la résistivité électrique du terrain se rapproche bien d'une structure bidimensionnelle. En conclusion, il est nécessaire, afin de mieux poser le problème, de définir de nouvelles stratégies d'auscultation plus adaptées à l'imagerie des OHT.

3.2.1 Les différentes stratégies de discrétisation

La discrétisation du problème inverse est un point crucial permettant de générer un modèle représentatif de la réalité tout en ne sous-déterminant pas le problème. Au cours du chapitre 2, certaines règles sont présentées quant à la manière de discrétiser un problème inverse afin de trouver un compromis adapté. Cependant, une question alors se pose :

Quelles sont les stratégies possibles pour réaliser cette discrétisation ?

Au cours de la dernière décennie, deux codes de modélisation et d'inversion ont été présentés dans la littérature permettant des capacités de discrétisation jusque-là impossibles. Une partie de ce travail de thèse s'attache à proposer une troisième technique de discrétisation complémentaire. La figure 3.3 détaillée au niveau des paragraphes suivants, illustre une partie des principes de discrétisation avancés par les auteurs.

3.2.1.a Technique de discrétisation 1 [Günther *et al.*, 2006]

Le premier code, nommé BERT [Günther *et al.*, 2006; Rucker *et al.*, 2006], permet de générer des maillages non-structurés sur des géométries suffisamment complexes. L'inversion est réalisée avec un maillage différent d'une discrétisation conventionnelle. Ce dernier correspond à un maillage rectangulaire plus ou moins régulier.

Ce code utilise, pour la résolution du problème direct (figure 3.3(a) centrale), une version sur-discrétisée du problème inverse (figure 3.3(a) de gauche), ce qui correspond à la stratégie conventionnelle [Loke, 2011] mais avec maillage non-structuré. Ce maillage d'inversion est réalisé à partir d'un maillage grossier d'éléments finis composé de tétraèdres ($3D$) ou de triangles ($2D$). Cette stratégie est précise et « peu gourmande » en termes de calcul. De plus, cette discrétisation possède l'avantage d'être facilement implémentée quelles que soient la position des électrodes et la géométrie du terrain. Cependant, cette technique de discrétisation ne permet pas d'insérer explicitement l'information que l'on désire prendre en compte (forme des mailles d'inversion). En effet, la discrétisation du problème inverse est générée à partir d'un maillage d'éléments finis difficilement contrôlable.

3.2.1.b Technique de discrétisation 2 [Blome *et al.*, 2009]

A *contrario* des travaux précédents, l'étude engagée par Blome *et al.* (2009) montre une plus grande flexibilité pour discrétiser un milieu afin d'insérer de l'*a priori* par une méthode de « cluster » [Blome *et al.*, 2009]. Ainsi, le maillage du problème inverse est construit indépendamment du maillage du problème direct, contrairement aux travaux de [Günther *et al.*, 2006]. La figure 3.3(b) de gauche présente ainsi la discrétisation désirée et la figure 3.3(b) centrale le maillage d'éléments finis utilisé pour résoudre le problème direct.

L'utilisateur définit ainsi une discrétisation du problème inverse et sélectionne ensuite tous les nœuds du problème direct présents dans le maillage du problème inverse (méthode des clusters). Cependant, les nœuds du problème direct ne tombant pas toujours exactement dans une maille du problème inverse (figure 3.3(b) de droite), les formes discrétisées sont alors approchées. Cette approximation, « fiable » à proximité des électrodes devient plus « dangereuse » à distance des électrodes et pose ainsi des problèmes de représentativité de la discrétisation du résultat. De plus, une implémentation plus complexe de régularisation doit être réalisée afin de satisfaire cette discrétisation sous forme de cluster [Blome *et al.*, 2009].

3.2.1.c Technique de discrétisation 3 [Fargier *et al.*, 2011b]

Les précédentes méthodes favorisent une discrétisation optimisée du point de vue calculatoire. Elles permettent de travailler avec un nombre très important de paramètres tout en limitant fortement le nombre de mailles du problème direct. Cependant, cette volonté de diminuer le coût calculatoire entraîne une limitation de la capacité d'insérer de l'information *a priori* (en influant sur la géométrie des mailles de la discrétisation de l'inversion). Afin de fournir un outil de travail permettant de garder un maximum de flexibilité sur la discrétisation de l'inversion, une nouvelle stratégie de discrétisation est mise au point. Cette stratégie de discrétisation consiste à réaliser, en amont du problème direct, une grille d'inversion (figure 3.3(c) à gauche) et ensuite de sur-discrétiser cette première grille pour réaliser le calcul du problème direct (figure 3.3(c) centrale). Ainsi, les calculs réalisés respectent précisément la grille d'inversion (contrairement au modèle de Blome *et al.* [2009]). Cependant, afin de respecter scrupuleusement la grille d'inversion, l'outil de maillage impose une discrétisation du problème direct très fine et en conséquence très lourde.

Synthèse et application : Afin d'insérer un maximum d'information *a priori* de manière explicite dans le problème inverse, une flexibilité élevée et précise doit être garantie par le code. Dans le cadre d'auscultations des OHT, des contrastes de résistivité importants sont attendus (limite remblai/réservoir) et nécessitent d'être discrétisés en conséquence. La frontière entre le réservoir et le remblai doit ainsi être représentée par des mailles indiquant explicitement la séparation. De plus, certains milieux dont on ne peut connaître la résistivité par mesure directe avec une assez grande précision (cas du réservoir d'eau) doivent être intégrés au problème inverse avec tout l'*a priori* que nous portons sur ces milieux. Ainsi, si la résistivité du réservoir est supposée homogène, le réservoir doit pouvoir être représenté par une seule maille d'inversion.

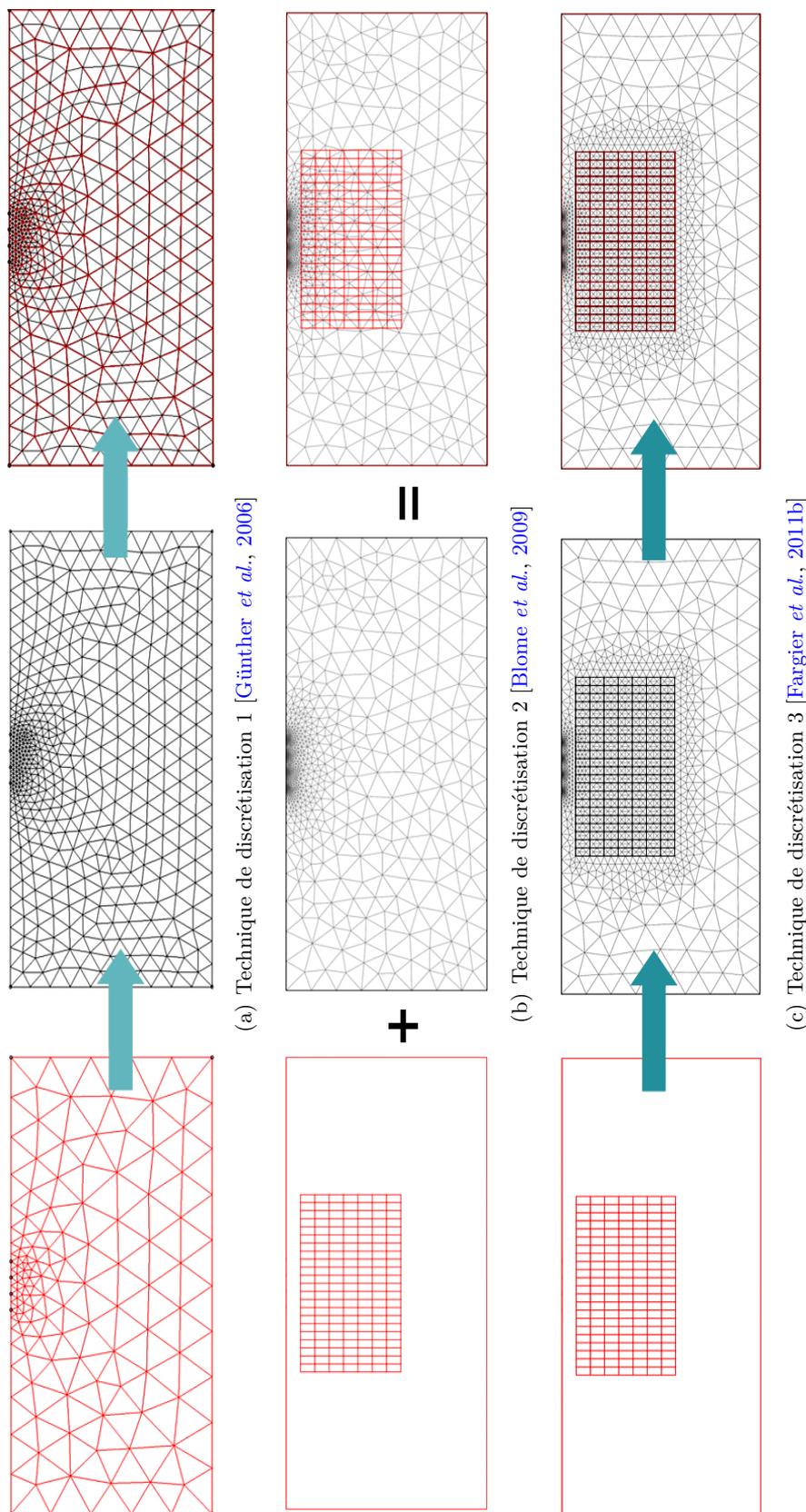


FIGURE 3.3 – Illustration des différences méthodologiques de discrétisation présentes entre trois travaux 3.3(a) [Günther et al., 2006], 3.3(b) [Blome et al., 2009] et 3.3(c) [Fargier et al., 2011b]. Les figures de gauche (tracé rouge) représentent les discrétisations d'inversion, les figures centrales les maillages permettant la résolution du problème direct et enfin les figures de droite la superposition de la discrétisation d'inversion et le maillage du problème direct.

3.2.2 Les bases d'un nouveau code - InGEOHT

Afin de pallier au déficit de représentativité (capacité de la discrétisation du problème inverse à être représentatif du milieu ausculté) tout en gardant un maximum de précision pour le calcul des problèmes direct et inverse, un nouveau code nommé InGEOHT (Inversion de données Géo-Electrique provenant d'Ouvrages Hydrauliques en Terre) a été développé durant la thèse. À la différence des logiciels présentés précédemment, ce code ne possède pas de vocation d'inversion « généraliste ». En effet, InGEOHT a été développé spécialement pour l'auscultation et la surveillance des OHT. L'objectif de recherche a orienté son développement afin de favoriser la réalisation d'études paramétriques 3D, permettre des tests d'optimisation de la méthode IRE et faciliter l'insertion d'autres processus physiques (température, écoulement).

Dans ce sens, des choix peu économes en termes de mémoire et de temps de calcul ont sans doute été réalisés au détriment de la précision du calcul. L'exemple le plus parlant porte sur le calcul de la matrice des dérivées de Fréchet. Dans le cadre d'inversions 3D, avec un nombre élevé de paramètres, des algorithmes de type gradient-conjugué sont parfois préférés afin de ne pas formuler explicitement et inverser le Hessien [Marescot *et al.*, 2008b].

De plus, à la différence des codes précédents dont l'objectif principal portait sur l'inversion des données géo-électriques, mes travaux de recherche se sont axés sur l'optimisation de l'acquisition. De tels travaux nécessitent une analyse de la matrice de sensibilité et donc son calcul avec un maximum de liberté. Opter pour une hypothèse faible de précision aurait entraîné un doute dans la démarche d'optimisation. En contrepartie, favoriser une précision haute des calculs rend ce code moins adapté pour l'inversion 3D que d'autres codes plus opérationnels. Le tableau 3.2 présente à cet effet : l'objectif, la philosophie ainsi que quelques aspects techniques réalisés par le code InGEOHT.

TABLE 3.2 – Synthèse de spécifications visées pour la création d'un nouveau code.

Philosophie générale	Problème direct	Problème inverse	Optimisation
Fournir le résultat le plus robuste possible	Modèle 3D quelconque	Matrice de lissage optimisée	Matrice de résolution du modèle
Intégrer des données spécifiques aux OHT	Position arbitraire des électrodes	Discrétisation complexe optimisée	Region of investigation (ROI)
Intégration d'un maximum d' <i>a priori</i>	Déformation du maillage	État adjoint	Matrice de résolution des données
Générer des jeux de données importants	Maillage adaptatif	Régularisation explicite	Optimisation des protocoles
Couplage multi-physique avancé	Étude paramétrique avancée	Norme L_2	Optimisation du placement des électrodes

Ces nouvelles libertés offertes par le code InGEOHT ont été introduites afin de proposer des stratégies d'auscultation plus adaptées aux OHT. Dans ce sens, deux stratégies nommées $2D^+$ et $3D^-$ sont présentées dans la thèse.

3.2.3 Stratégie $2D^+$

3.2.3.a Principe de la stratégie $2D^+$

Pour des raisons de coût d'acquisition, de facilité d'interprétation et de validité de la méthode pour un large panel d'applications, la méthode IRE est généralement appliquée avec une approche $2D$ pour l'auscultation des OHT, de manière longitudinale (suivant la longueur de l'ouvrage). Ce type de prospection peut ainsi être réalisé soit dans l'axe de la crête, soit sur le talus aval (et amont lorsque c'est possible), soit en pied de digue aval.

Cependant, les tests numériques réalisés au chapitre 2 indiquent qu'une campagne $2D$ longitudinale ne peut être interprétée de manière conventionnelle $2D$ sans mener à la génération d'artéfacts (à plus ou moins haut degré). D'après ces mêmes études numériques, deux éléments « perturbateurs » principaux interviennent dans la mesure, menant à la génération d'artéfacts. Ainsi, suivant les caractéristiques de la campagne d'acquisition et suivant l'ouvrage ausculté, le réservoir d'eau ainsi que la topographie de l'ouvrage entraînent la présence plus ou moins importante d'artéfacts dans le résultat.

Généralement, pour des raisons de coût calculatoire, la discrétisation du problème inverse est quasi-équivalente à la discrétisation du problème direct. Ainsi, les formes des structures de la sub-surface doivent nécessairement correspondre à la discrétisation du problème direct ou à une sous-discrétisation de celui-ci (progiciel Res2Dinv®, [Loke, 2011]; code BERT, [Günther *et al.*, 2006]). Cependant, dans le cadre de mesures $2D$ longitudinales sur les OHT, ce type de discrétisation ne peut être supposé représentatif. À cet effet, la figure 3.4 illustre une discrétisation $2D$ représentée sur un bloc $3D$. L'hypothèse dressée par cette discrétisation est que dans chaque cellule discrétisée en $3D$ (figure 3.4) la résistivité électrique doit être homogène. En conséquence, ce type de discrétisation ne permet pas la présence de topographie dans le sens transversal à la ligne d'électrodes.

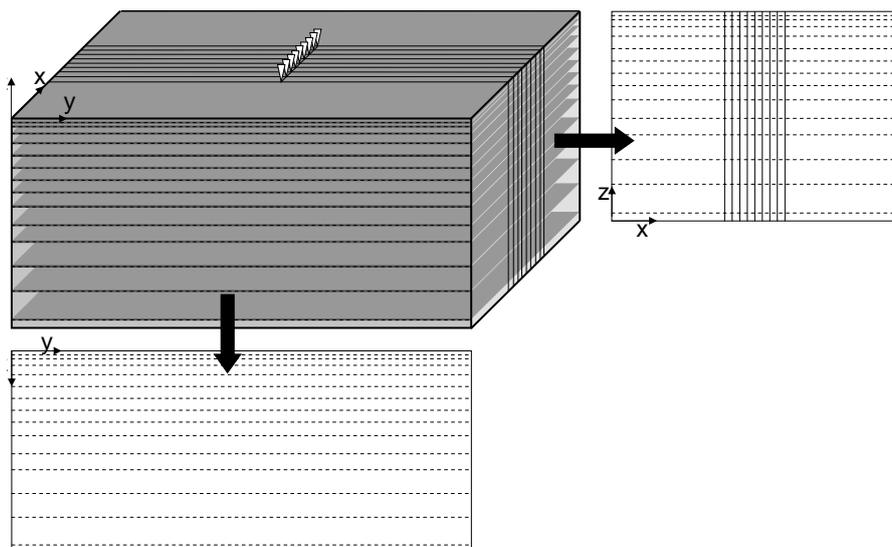


FIGURE 3.4 – Schématisation d'une discrétisation $2D$ (en fonction des électrodes) représentée sur un modèle $3D$. Deux coupes peuvent être extraites de ce bloc $3D$, avec une coupe longitudinale présente dans le coin haut droit, et une coupe transversale (par rapport à la ligne d'électrode) présente dans le coin bas gauche.

En effet, si on applique directement cette discrétisation sur un ouvrage de type digue en charge avec une ligne d'électrodes placée dans le sens longitudinal à l'ouvrage, l'hypothèse précédente n'est plus respectée (figure 3.5). Cette hypothèse est mise en défaut car la résistivité électrique dans chaque cellule discrétisée ne peut rester homogène sur toute la longueur de la cellule.

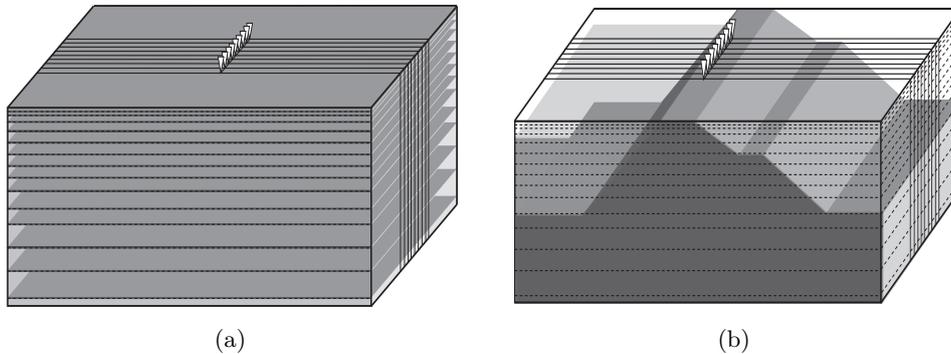


FIGURE 3.5 – Schématisation d'une discrétisation 2D conventionnelle (figure 3.5(a)) appliquée à un modèle de digue en charge (figure 3.5(b)).

En conséquence, lorsqu'une inversion est réalisée à partir de cette discrétisation, celle-ci essaye d'expliquer à la fois une zone conductrice à distance (effet du réservoir sur la mesure), un milieu résistant à faible distance (l'effet de la topographie de la digue sur les mesures) et le remblai lui-même. Afin d'expliquer l'effet des deux milieux perturbateurs (topographie et réservoir), l'inversion génère une ou plusieurs structures appelées artéfacts. Or, cette discrétisation est assimilable à une discrétisation d'inversion 2D (2.5D) utilisée par exemple par le progiciel Res2Dinv®.

Afin de d'affranchir de ces limitations, une stratégie de discrétisation différente de l'approche 2D est réalisée. La figure 3.6(a) illustre une discrétisation fortement semblable à une discrétisation 2D mais dont les « volumes discrétisés » sont de longueur finie. La figure 3.6(b) illustre une coupe transversale issue du bloc 3D (figure 3.6(a)) dont la discrétisation verticale est représentée à l'aide de lignes en pointillés. Cette discrétisation permet une prise en compte de la topographie de l'ouvrage ainsi qu'une prise en compte explicite du réservoir tout en gardant une discrétisation 2D des paramètres internes à la digue, c'est pourquoi nous nommons cette approche : la stratégie 2D⁺.

Principe de la stratégie 2D⁺ : La stratégie 2D⁺ consiste à réaliser un modèle 3D et à le discrétiser de manière quasi 2D (figure 3.6). Cette stratégie permet ainsi de garder les facilités de mesure sur le terrain et de garder un fort a priori 2D sur le milieu afin de limiter la sous-détermination de la solution. Ainsi cette stratégie est similaire à l'approche 2D classique, tout en tenant compte des caractéristiques 3D globales.

La figure 3.7 présente deux autres approches de discrétisation 2D⁺. Suivant la direction de variation de la résistivité électrique dans le milieu, et en fonction de l'information contenue dans les données, une stratégie de discrétisation peut être sélectionnée plutôt qu'une autre.

Ainsi, ces stratégies ne permettent pas une prise en compte de variations transversales (à l'intérieur des mailles d'inversion) significatives dans le corps de digue. Or, les cas d'ouvrages à noyau étanche sont relativement présents en France, et posent ainsi une limitation forte à cette straté-

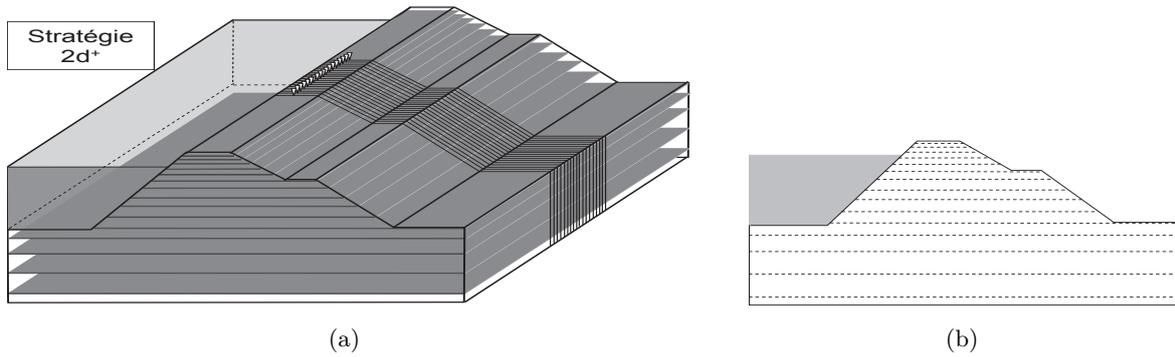


FIGURE 3.6 – Schématisation d’une discrétisation $2D^+$ appliquée à un modèle de digue en charge (figure 3.6(a)). La distance finie des blocs dans le sens transversal permet une prise en compte de la topographie et du réservoir. La figure 3.6(b) présente une coupe transversale du bloc 3D illustré à la figure 3.6(a)

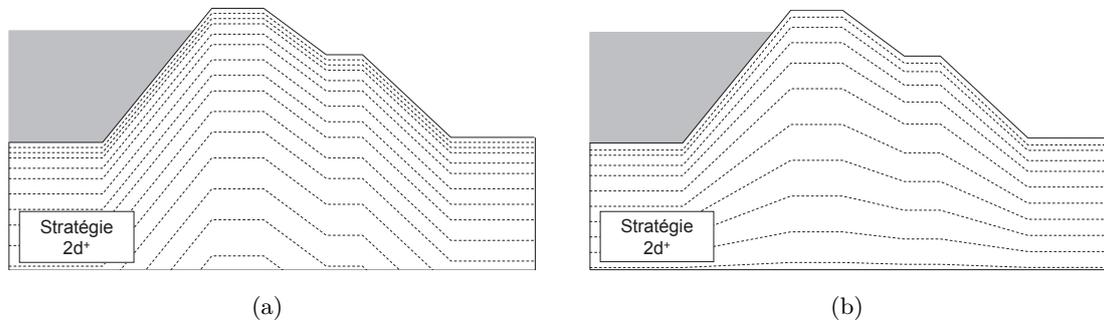


FIGURE 3.7 – Schématisation de deux possibilités de discrétisation verticale (stratégie $2D^+$ pour une prospection longitudinale d’un ouvrage hydraulique).

gie. Il est à noter que même si ces cas d’OHT posent une limitation à la stratégie $2D^+$, celle-ci offre, tout de même, une meilleure prise en compte du milieu qu’une stratégie $2D$ conventionnelle.

D’un point de vue informatique, la réalisation d’un modèle $2D^+$ est bien plus contraignante qu’un modèle $2D$ classique voire qu’un modèle $3D$ conventionnel. Le temps de calcul nécessaire à la construction du modèle et à la résolution du problème direct est en conséquence très élevé.

D’un point de vue pratique, la stratégie $2D^+$ peut être réalisée à partir de deux méthodes différentes :

- par déformation de maillage avec amortissement (figure 3.7(b)) ou non (figure 3.7(a)) ;
- sans déformation de maillage mais avec création explicite de mailles de longueur finie (figure 3.6(b)).

La technique de déformation de maillage facilite la génération d’une discrétisation d’inversion sous forme de parallélépipèdes sur des modèles à topographie complexe. Cependant, ces modèles peuvent tout de même être réalisés sans déformation de maillage en reproduisant la surface topographique à différentes profondeurs afin de simuler les différentes couches du terrain. Cependant, cette méthode nécessite la création d’un nombre élevé de faces (frontières entre les sous-domaines) entraînant la modélisation d’un grand nombre de mailles du problème direct. En conséquence, cette dernière possibilité n’a pas été retenue.

En conclusion, pour les milieux complexes de type digue, même si la déformation de maillage entraîne un calcul supplémentaire pour la résolution du problème direct, son utilisation permet une simplification du problème et améliore ainsi sa résolution. Dans le cas de géométries simples (le plus souvent théoriques ou expérimentales) une discrétisation sans déformation de maillage peut être préférée (cf. figure 3.6(b)) permettant l'absence de calcul de déformation de maillage.

3.2.3.b Test numérique de la stratégie $2D^+$

Afin de tester à la fois le code d'inversion et la stratégie $2D^+$ une étude numérique est réalisée sur un milieu simple de géométrie semblable à la géométrie d'un OHT. La figure 3.8(a) présente ainsi le modèle numérique ayant permis la simulation de données. Les figures 3.8(b) et 3.8(d) présentent respectivement le résultat d'inversion vu en perspective et vu de face. Enfin, la figure 3.8(e) présente l'inversion obtenue avec le progiciel Res2Dinv® à partir de données similaires utilisées pour l'inversion des résultats 3.8(b) et 3.8(d). Les résultats sont présentés au niveau de la troisième itération d'inversion. Les données sont modélisées à partir de 36 électrodes espacées régulièrement de 4 m et positionnées longitudinalement au centre de la crête de l'ouvrage suivant un protocole gradient multiple. Le remblai possède une résistivité de $2000 \Omega.m$, la résistivité de l'eau du réservoir est de $80 \Omega.m$, et deux hétérogénéités respectivement de 100 et de $4000 \Omega.m$ sont positionnées dans le corps de digue. Le modèle utilisé pour l'inversion $2D^+$ (figure 3.8) est composé de 1008 cellules d'inversion (deux cellules d'inversion entre chaque électrode).

Une interprétation rapide du résultat présenté à la figure 3.8(e) (Res2Dinv®) pourrait indiquer la présence de trois couches avec très peu de variations latérales. En proche surface, l'inversion reconstruit une première couche modérément résistante d'environ $2000 \Omega.m$. Cette résistivité correspond bien à la résistivité du remblai. Ensuite, une couche plus en profondeur de 500 à $800 \Omega.m$ semble apparaître de manière très homogène suivant la longueur. Enfin, une couche très résistante se dessine en bas de coupe. On peut noter que les deux « anomalies » locales sont bien reconstruites. Cependant, leur mise en évidence est difficile à réaliser sans connaissance préalable de leur position. En effet, l'anomalie conductrice en profondeur est masquée dans l'effet du réservoir. La capacité de détection de l'anomalie résistante est elle aussi diminuée du fait de l'étirement de l'échelle de couleurs des résistivités allant jusqu'à $40000 \Omega.m$. Afin d'expliquer l'effet du réservoir d'eau conducteur sur les données, l'inversion reconstruit une couche vingt fois plus résistante (environ $40000 \Omega.m$) que le matériau d'origine. De plus, afin de limiter cette divergence lors de la reconstruction, des options de limitation de la résistivité du modèle ont été sélectionnées. Cette limitation est fixée sous forme d'un rapport entre la résistivité inversée maximum et la résistivité apparente moyenne (ou la valeur à la première itération). Un rapport maximum de 5, au lieu de 50, a ainsi permis de diviser par 5 la résistivité de la couche de fond (sans cette limitation la résistivité inversée monte à $200000 \Omega.m$). De plus, tous les résultats sont présentés à la troisième itération d'inversion afin de ne pas créer de modèle trop structuré.

En conséquence, même si ce type de validation représente un « crime inverse », le résultat montre bien l'intérêt de la stratégie. Un « crime inverse » correspond à l'action d'inverser des données issues d'une discrétisation du problème direct identique à la discrétisation du problème inverse. Les figures 3.8(b) et (d) montrent ainsi nettement la finesse de la reconstruction comprenant le positionnement et la résistivité des deux anomalies. Le caractère « lisse » de l'anomalie recons-

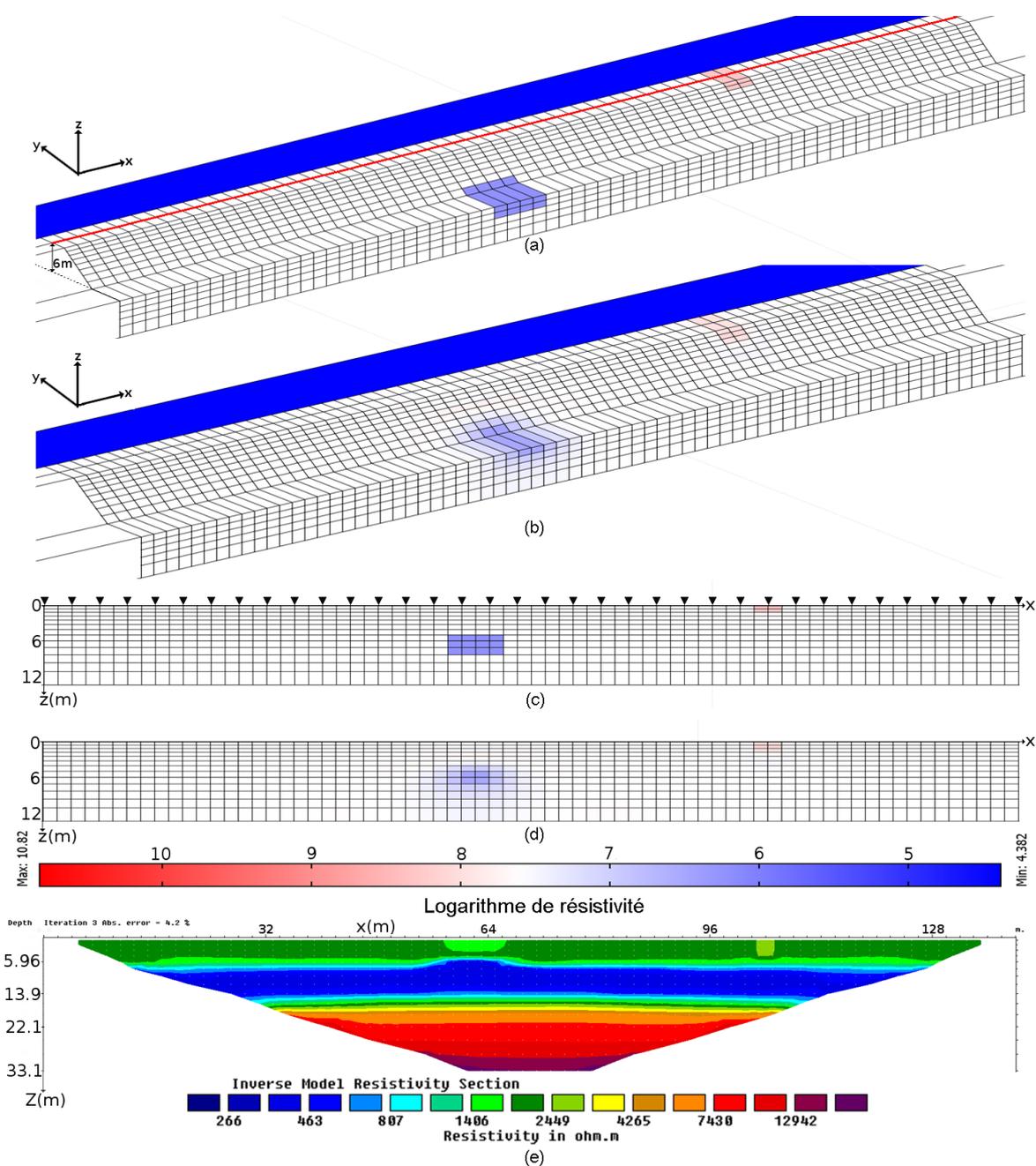


FIGURE 3.8 – Illustration numérique de la stratégie $2D^+$. Les figures 3.8(a) et 3.8(c) présentent respectivement le modèle « vrai » utilisé, vu en volume et vu de face. Ce modèle simule une digue en charge (réservoir en bleu) de 6 m de hauteur avec deux hétérogénéités présentes dans le corps. La ligne rouge de la figure (a) symbolise la position de la ligne d'électrodes et les triangles noirs de la figure (c) la position des 36 électrodes. La figure présente le résultat inversé 3.8(b) vu en volume et 3.8(d) vu de face à la troisième itération. L'échelle des couleurs est en logarithme de résistivité électrique. La figure 3.8(e) présente le résultat obtenu avec le progiciel Res2Dinv®.

truite en profondeur provient des contraintes de lissage imposées par l'inversion. Ce « défaut » d'inversion montre que l'algorithme employé n'est pas optimisé pour la reconstruction de pathologies nettes.

Cependant, dans le cadre des auscultations d'OHT, les pathologies recherchées (infiltration et suffusion) sont supposées engendrer des anomalies de résistivité électrique diffuses. Dans ce cadre précis, même si les données favorisent clairement le code InGEOHT - $2D^+$, celles-ci montrent que le progiciel Res2DInv® ne permet pas une bonne reconstruction des pathologies. De plus, ces résultats permettent d'illustrer conjointement, le principe de non-unicité et la difficulté d'interprétation du critère RMS . En effet, le critère RMS obtenu avec le progiciel Res2DInv® est bon (4.2 %) bien que le résultat inversé soit loin de permettre la détection des anomalies présentes dans le corps de digue. Le modèle reconstruit par le code InGEOHT - $2D^+$ permet une reconstruction avec une erreur RMS inférieure à 1 %. Or la reconstruction diffère à la fois du modèle « vrai » et du modèle inversé par Res2DInv®.

La figure 3.9 illustre la diminution du critère d'erreur au cours de l'inversion itérative avec le code InGEOHT - $2D^+$. Le critère d'erreur sur les données est présenté sur une échelle logarithmique. Ainsi, on peut voir que la norme du terme d'erreur sur les données passe de 50 avec des données simulées à partir du modèle à l'itération 0, à 0.1 au niveau de la quatrième itération d'inversion. De plus, après la dixième itération, le taux de décroissance du critère d'erreur diminue fortement.

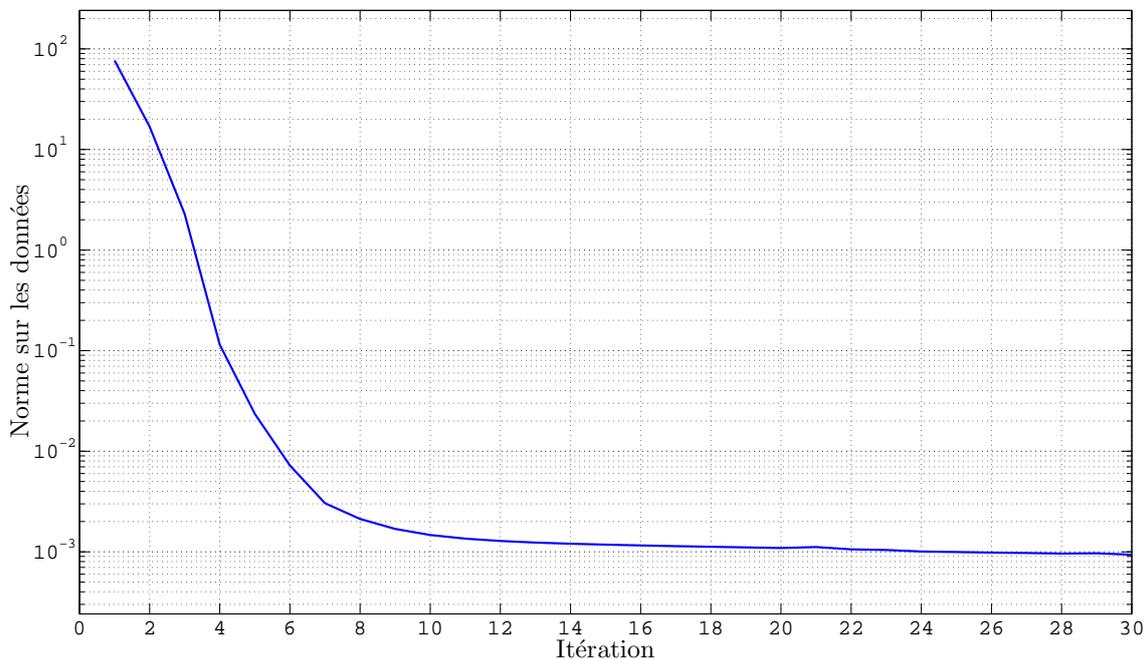


FIGURE 3.9 – Diminution du critère d'erreur sur les données (eq. 3.2) en fonction des itérations d'inversion. L'échelle des ordonnées est présentée en logarithme.

Afin d'augmenter la convergence de la solution, une optimisation du paramètre de Marquardt est réalisée grâce au calcul de la « L-curve ». Pour ce faire, plusieurs valeurs de λ sont testées en fonction de l'erreur de la fonction objectif sur les données et en fonction de l'erreur sur la fonction objectif sur le modèle. La figure 3.10 donne une représentation de cette courbe à la troisième itération ainsi que de la localisation du paramètre d'amortissement optimal.

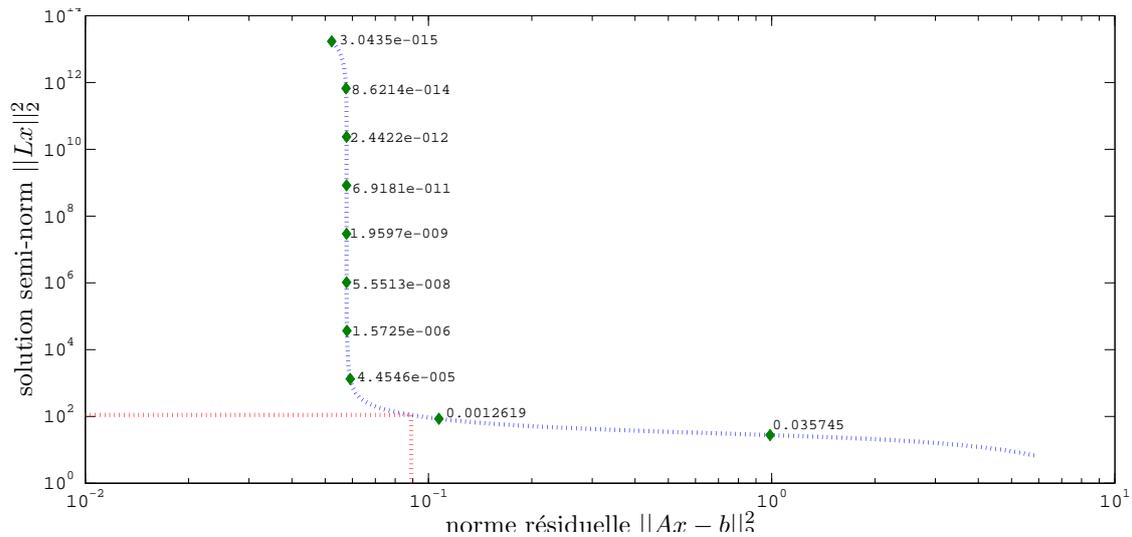


FIGURE 3.10 – Illustration via la *L-curve* du paramètre « optimal » d’amortissement. Le paramètre de Marquardt optimal est localisé sur la courbe à l’intersection des tracés rouges en pointillés. L’axe des abscisses correspond à la fonction objectif sur les données et l’axe des ordonnées la fonction objectif sur le modèle.

Où x représente le vecteur de perturbation du modèle à l’itération k , A représente la matrice des dérivées de Fréchet et L une matrice de lissage. Le vecteur b est composé de la différence entre les données mesurées et les données simulées à l’itération k .

Synthèse et application : Ce paragraphe fait ressortir deux points importants. Le premier point indique qu’une prise en compte explicite d’effets perturbateurs tels que l’effet du réservoir et de la topographie sont nécessaires pour permettre sa reconstruction. Le second point découle du premier et montre que la construction d’un tel modèle nécessite la réalisation de mesures complémentaires (topographie de l’ouvrage, résistivité du réservoir, ...) et la connaissance d’informations *a priori* de l’ouvrage (données de construction, carte géologique, ...). Cette connaissance concernant les différentes typologies d’ouvrages doit permettre d’extraire de l’information *a priori* nécessaire à une bonne discrétisation afin de réaliser une inversion mieux adaptée à la nature du problème.

La stratégie $2D^+$ permet une prise en compte supérieure des caractéristiques de l’ouvrage par rapport à une stratégie d’interprétation $2.5D$ conventionnelle. Cette prise en compte suppose que ces informations soient connues. Ainsi, la géométrie de l’ouvrage et du réservoir doivent être relevées afin d’être intégrées au modèle. Ces mesures engendrent en conséquence un coût supplémentaire. Cependant, dans la majorité des méthodologies de surveillance des ouvrages hydrauliques [Fauchard & Mériaux, 2004], le suivi topographique de l’ouvrage est un des moyens de contrôle le plus couramment employé et donc le plus souvent disponible.

3.2.4 Stratégie $3D^-$

3.2.4.a Principe de la stratégie $3D^-$

La stratégie $2D^+$ possède l'avantage de mieux déterminer le problème inverse en supposant qu'il n'existe pas de variation de résistivité dans chaque cellule d'inversion transversale à l'ouvrage. Cependant, dans le cadre de certains ouvrages à noyau étanche, cette hypothèse ne peut plus être considérée comme réaliste (figure 3.8).

Ainsi, une nouvelle stratégie de discrétisation nommée $3D^-$ est introduite afin de permettre l'intégration d'un niveau d'*a priori* supérieur sur l'ouvrage. Dans ces cas, la topographie de l'ouvrage, la profondeur du substratum et la position de milieu interne à l'ouvrage (présence d'un noyau argileux) peuvent être intégrées afin de générer une discrétisation qui est fonction de cet *a priori*. L'utilisation de cet *a priori* mène à la définition de cette nouvelle stratégie.

Principe de la stratégie $3D^-$: La stratégie $3D^-$ consiste à réaliser un modèle 3D (figures 3.11(a) et 3.11(b)) et à le discrétiser de manière quasi-3D avec un maillage non-structuré ou structuré, fonction de la position des électrodes et de la capacité de résolution des données. Le but d'une telle stratégie est de permettre une reconstruction réellement 3D de l'ouvrage, favorisant une haute résolution des zones d'intérêt et une plus faible résolution des zones possédant peu d'intérêt. De plus, l'inversion est totalement découplée de l'acquisition et permet ainsi des positionnements totalement arbitraires des électrodes, à la différence du progiciel Res3Dinv® [Loke, 2011] qui utilise une discrétisation quasi-régulière sous forme de grille.

Lors de l'utilisation de la stratégie $3D^-$ (par le code InGEOHT - $3D^-$) la discrétisation du problème direct correspond dans tous les cas à un raffinement du maillage du problème inverse (figure 3.3). Lorsque le modèle inverse discrétisé est de type non-structuré, cette stratégie suit globalement les capacités et limitations du code d'inversion BERT [Günther *et al.*, 2006].

Cependant, le caractère plus ouvert du code InGEOHT lui confère la possibilité d'ajouter un maximum d'*a priori* de manière explicite, en travaillant par exemple sur la forme des tétraèdres. Cet *a priori* explicite permet aussi l'ajout d'un ou plusieurs blocs non discrétisés pour modéliser le réservoir ou contraindre la position de la fondation. La figure 3.11 illustre deux possibilités de maillage structurés $3D^-$.

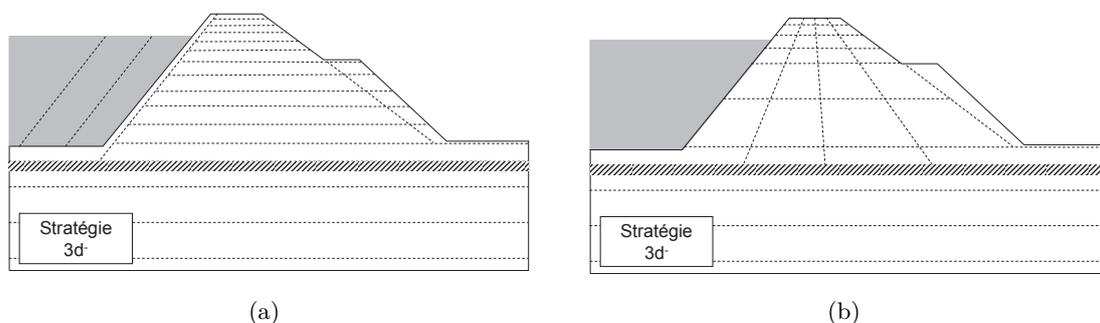


FIGURE 3.11 – Schématisation de deux possibilités de discrétisation verticale et transversale pour une prospection longitudinale d'un ouvrage hydraulique faisant intervenir une stratégie $3D^-$.

Ces deux schémas illustrent comment et dans quel intérêt une discrétisation de type $3D^-$ peut

être mise en place. De plus, le code InGEOHT - $3D^-$ permet d'intégrer implicitement de l'*a priori* par une écriture optimisée de la matrice de lissage. Cette spécificité confère au code la capacité de mieux décrire le milieu ausculté. Enfin, la discrétisation sous forme de tétraèdres permet de diminuer considérablement le nombre de cellules d'inversion et permet ainsi de mieux déterminer l'inversion et de diminuer les besoins en mémoire de celle-ci. L'expression normale d'inversion utilisée pour la reconstruction du problème inverse est donnée à l'équation 2.86 et suit une inversion de type Occam [Constable *et al.*, 1987; deGroot Hedlin & Constable, 2004]. La figure 3.12 illustre une discrétisation disposant d'un très haut niveau d'*a priori*. À savoir, le modèle correspond à un remblai (partie sur-discrétisée) composé de six couches (notées C1 à C6) dont la hauteur est connue. Les surfaces en rose symbolisent un *a priori* sur un contraste très élevé entre le remblai, le noyau (en bleu) et la fondation (en vert). Un *a priori* très élevé est porté sur la fondation et le noyau car ces milieux sont composés d'une seule maille et donc supposés homogènes.

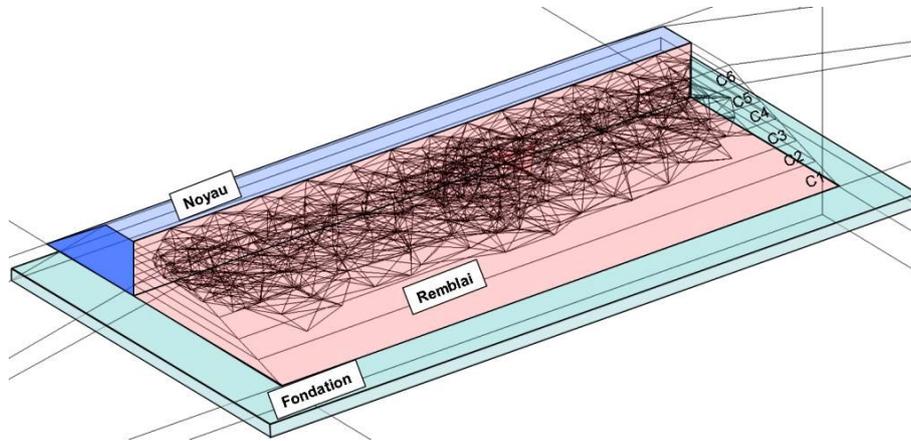


FIGURE 3.12 – Illustration d'une discrétisation $3D^+$ optimisée pour l'introduction d'*a priori* dans l'inversion. Le milieu peut être découpé en trois ensembles : le remblai (partie sur-discrétisée), le noyau (en bleu) et la fondation (en vert).

3.2.4.b Test numérique de la stratégie $3D^-$

Les figures 3.13, 3.14 et 3.16 illustrent une étude numérique visant à tester la pertinence de la stratégie et du code d'inversion InGEOHT - $3D^-$. Cette étude présente une évolution supposée d'une fuite à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en terre entre différents instants. Les figures 3.13(a) à 3.13(g) exposent ainsi l'évolution de cette fuite à sept de ces instants et la figure 3.13(h) illustre l'effet de ces perturbations sur la norme de l'erreur sur les données. Le modèle est inversé à partir d'un jeu d'environ 2900 données simulées à partir de 29 électrodes positionnées dans le remblai. La position des électrodes peut être visualisée à la figure 4.33 du Chapitre 4. Les données sont bruitées avec un bruit gaussien de 3 % d'amplitude. Le modèle inverse est discrétisé avec environ 3000 paramètres. La résistivité électrique du corps de remblai (partie discrétisée) est de $80 \Omega.m$, alors que la résistivité électrique de la zone de fuite est de $25 \Omega.m$. La résistivité électrique du noyau et de la fondation sont de $25 \Omega.m$.

L'objectif de cette étude est de montrer qu'une prise en compte précise de paramètres de l'ouvrage tel que la topographie permet une reconstruction pertinente, même pour des milieux complexes. À cet effet, les figures 3.14(b) et 3.14(d) présentent respectivement les résultats d'in-

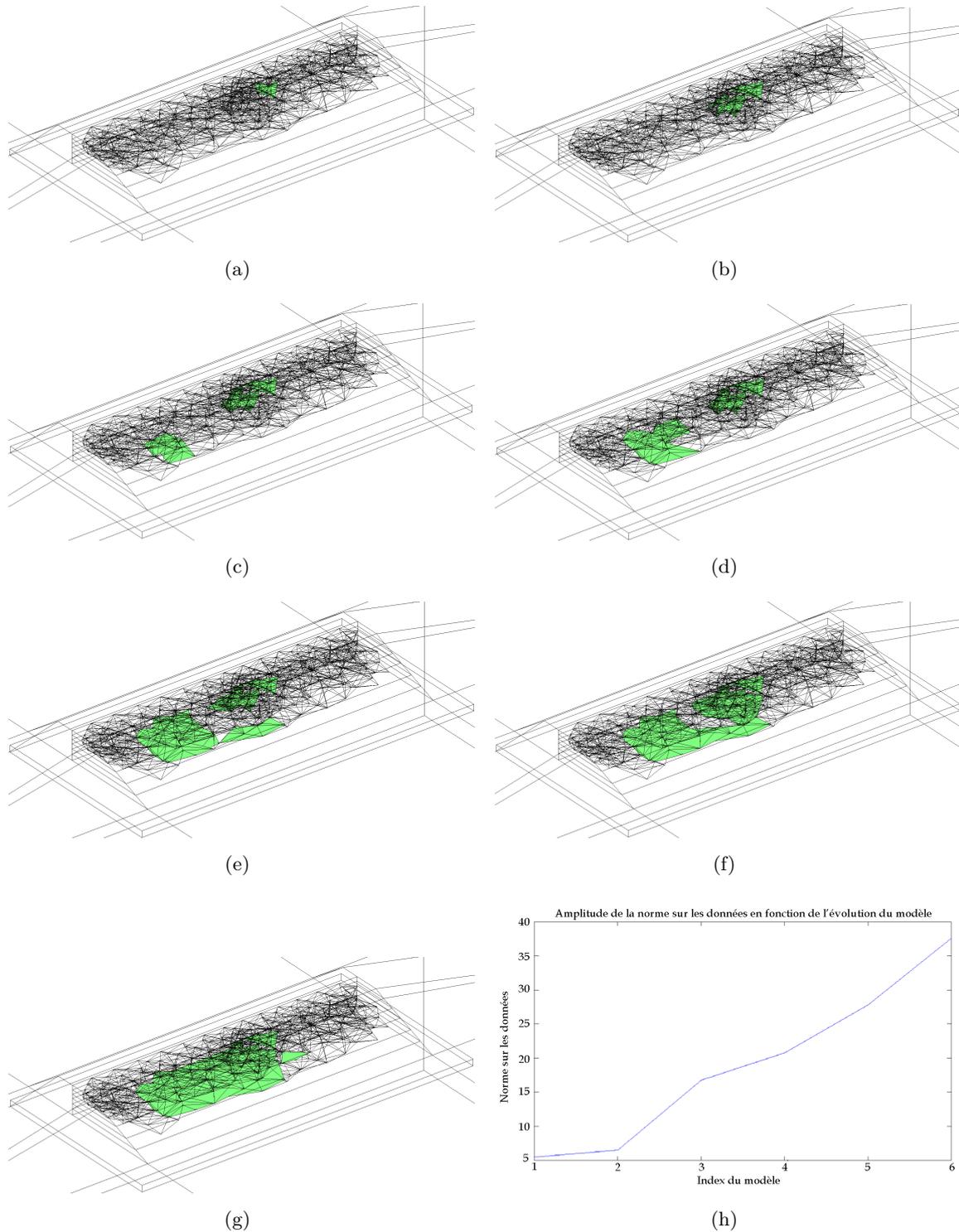


FIGURE 3.13 – Représentation d'un modèle numérique simulant l'évolution d'une fuite au sein d'un ouvrage (symbolisée par les hétérogénéités vertes). Sept instants simulant l'évolution sont représentés, avec 3.13(a) la première évolution, puis 3.13(b) le second développement de la pathologie. La figure 3.13(h) représente, pour les six premières évolutions, l'effet de telles perturbations sur la norme de l'erreur sur les données. Le modèle initial utilisé pour calculer les données « mesurées » correspond au même milieu sans infiltration.

version obtenus à partir de données simulées sur les modèles 3.14(a) et 3.14(c). Tout d'abord, on peut noter que ces résultats valident clairement la détection des « infiltrations » générées dans l'ouvrage. Cependant, d'un point de vue plus quantitatif, la résistivité des zones d'infiltrations n'est pas atteinte. La valeur minimale de la résistivité est de $40 \Omega.m$ au lieu de $25 \Omega.m$. De plus, des artéfacts d'inversion se retrouvent dans le résultat avec des zones de résistivité égales à $90 \Omega.m$ au lieu de $80 \Omega.m$.

Bien que la qualité des résultats numériques précédents fournisse une très bonne perspective de traitement, la démarche utilisée n'intègre qu'une faible partie de l'information *a priori* disponible. En effet, la variation de résistivité électrique observée du milieu correspond à une évolution temporelle du milieu. En conséquence, les données mesurées peuvent être traitées en variation temporelle ce qui constitue un *a priori* très important (cf. sous-section 2.3.9).

Afin de traiter les données en « variation temporelle » un algorithme imposant le modèle de référence est utilisé. Le détail de cet algorithme est illustré au niveau de la figure 3.15. Le principe de cet algorithme est de sélectionner un temps de référence (ici le Temps 0 à l'itération 0) et de se servir de ce modèle comme modèle de référence pour l'inversion des données à tous les temps (y compris le Temps 0) pour la première itération d'inversion. Ensuite, le résultat d'inversion des données du Temps 0 obtenu à l'itération 1 est utilisé comme modèle de référence pour l'inversion (seconde itération) de tous les jeux de mesures. En conséquence, le modèle $m_{inv}^2 T^2$ n'est pas utilisé pour inverser le modèle $m_{inv}^3 T^2$. À la différence des algorithmes proposés par Loke [2011], cet algorithme a pour principe de ne pas générer des variations temporelles issues de modèles provenant d'itérations différentes. En conséquence, l'inversion est réalisée avec un paramètre de Marquardt sensiblement équivalent pour chaque différence temporelle ce qui permet de limiter les différences induites par une surestimation de l'inversion.

Afin de limiter le nombre de calculs d'inversion, cette méthodologie (figure 3.15) est utilisée pour l'inversion contrainte en variation temporelle. La figure 3.16 présente des résultats en variation temporelle contrainte à partir d'un modèle de référence. Le modèle de référence est équivalent au modèle 3.14(a) sans anomalie conductrice présente dans le remblai. Les résultats en variation temporelle permettent de visualiser l'évolution du milieu entre plusieurs instants d'infiltration présentés sur la planche 3.13. Il peut être noté que l'étude en variation temporelle permet de limiter fortement la présence d'artéfacts dans le résultat. De plus, les limites d'évolution de l'infiltration sont plus nettes même si les zones d'infiltration sont peu couvertes par les électrodes.

Ce test représente encore une fois un crime inverse. Cependant, ces résultats montrent qu'une évolution complexe de l'ouvrage peut être suivie temporellement avec la stratégie $3D^-$.

Synthèse et application : Dans un certain nombre de cas, les OHT présentent une plus ou moins forte variation transversale de leur composition interne. Lorsque cette variation devient élevée (cas des OHT avec noyau interne ou en enveloppe) le milieu ne peut plus être supposé $2D$ ou $2D^+$. L'utilisation d'une stratégie d'inversion supplémentaire devient alors nécessaire afin de réaliser une reconstruction $3D$ de l'ouvrage. Dans ce but, une stratégie $3D^-$ (code InGEOHT - $3D^-$) est conçue afin de réaliser une reconnaissance fine de portions limitées permettant d'intégrer un maximum d'*a priori* sur l'ouvrage.

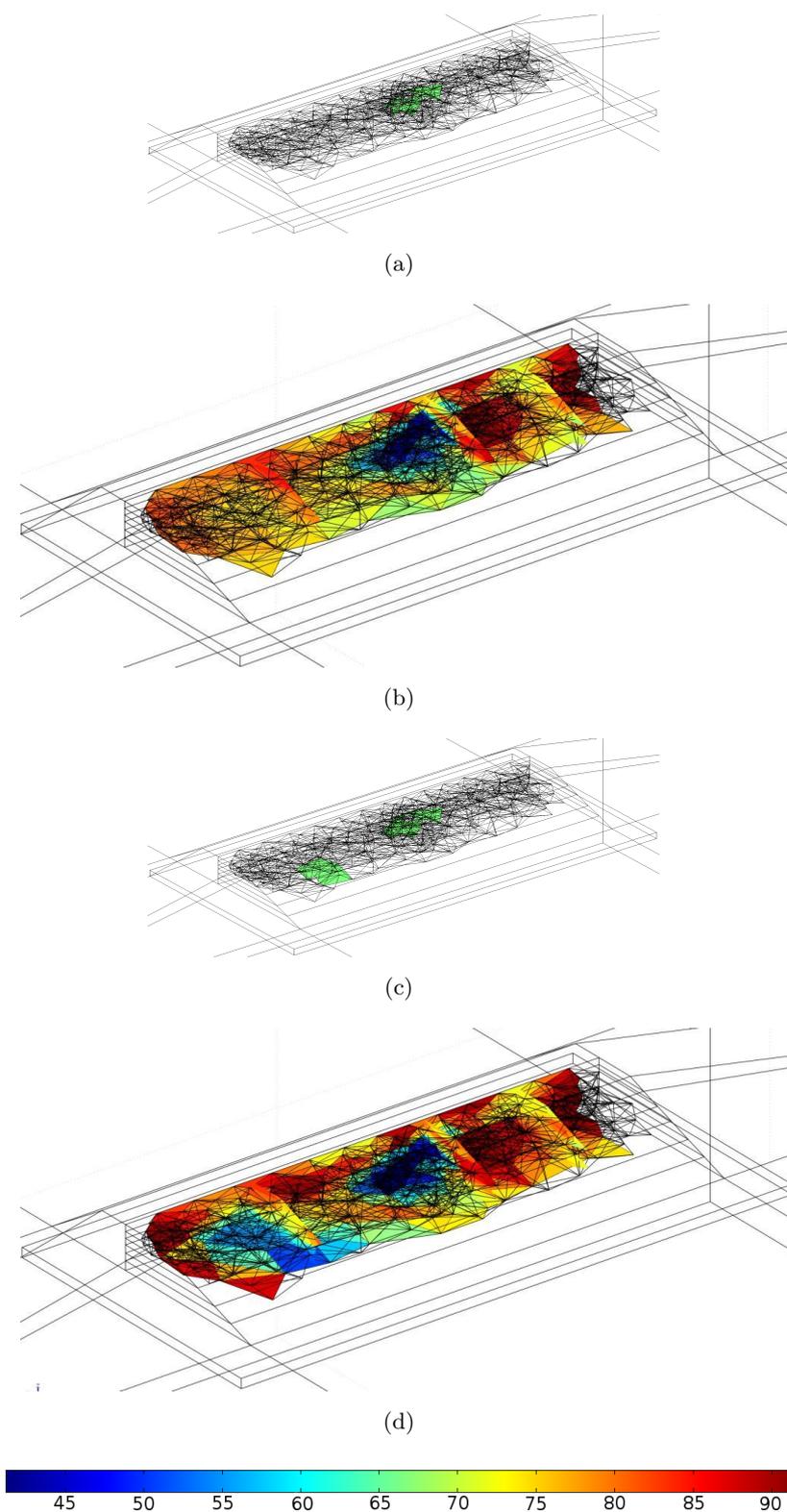


FIGURE 3.14 – Illustration de deux inversions $3D^-$ avec 3.14(b) et 3.14(d) respectivement les résultats d'inversion obtenus à partir de données simulées sur les modèles illustrés aux figures 3.14(a) et 3.14(c). Les résultats d'inversion sont présentés à la troisième itération d'inversion et possèdent une erreur RMS d'environ 3.1 %.

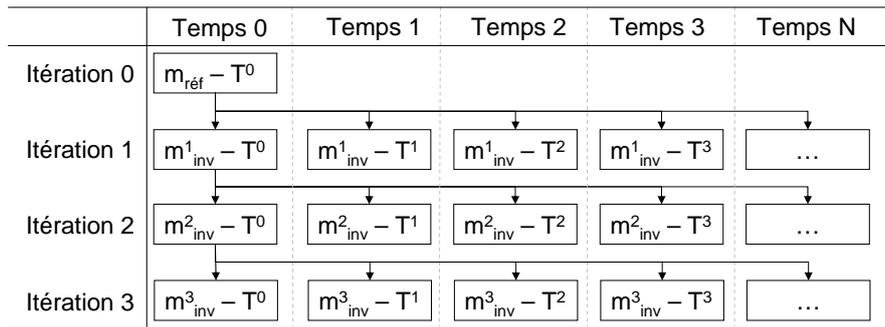


FIGURE 3.15 – Schématisation d’un principe de traitement en variation temporelle avec contraintes imposées sur le modèle de référence. En abscisse sont présentés les différents instants de mesures. L’axe des ordonnées illustre les différentes itérations d’inversion.

L’utilisation de la stratégie $3D^-$ permet d’insérer un maximum d’*a priori* sur le milieu tout en conservant une hypothèse $3D$ complexe du milieu. De plus, l’utilisation de contraintes d’inversion en variation temporelle permet une reconstruction précise de l’évolution du milieu limitant la formation d’artéfacts. Enfin, les reconnaissances d’IRE réalisées sur les OHT entraînent à la fois une grande profondeur d’investigation lors de prospections longitudinales, mais une faible profondeur d’investigation lors de prospections transversales (du fait de la longueur de la couverture possible d’électrodes). En conséquence, en interprétant les données de manière conjointe, une stratégie $3D^-$ doit permettre à la fois de s’affranchir de cette perte de résolution en profondeur (liée à l’auscultation transversale) et offrir une meilleure contrainte d’auscultation à la fois latérale et longitudinale.

Un point particulièrement intéressant, mais n’ayant pas été abordé durant la thèse, porte sur l’optimisation de l’inversion en variation temporelle. En effet, des algorithmes permettant d’exploiter des informations *a priori* spécifiques permettraient d’améliorer considérablement le résultat d’inversion. Les campagnes de détection de fuite pas traçage à la saumure sont un exemple de méthodes impliquant une forme d’*a priori* très spécifique. En effet, l’ajout de saumure doit entraîner une variation toujours négative de la résistivité. Or, cette contrainte (évolution toujours négative) s’implémente de manière très spécifique dans un problème inverse et doit permettre d’améliorer considérablement la capacité de détection d’une fuite [Singha & Moysey, 2006; Singha *et al.*, 2011].

3.3 Optimisation de l’acquisition

Définition de l’information : La théorie de l’information stipule que l’information est une quantité permettant de répondre à une problématique [Gibert & Lopes, 2010]. Ainsi chaque donnée contient une certaine quantité d’information différente selon l’objet de la problématique.

L’inversion peut être perçue comme une quête de l’information [Tarantola & Valette, 1982a]. Depuis que les fondements des méthodes géophysiques sont posés, la question de leur optimisation

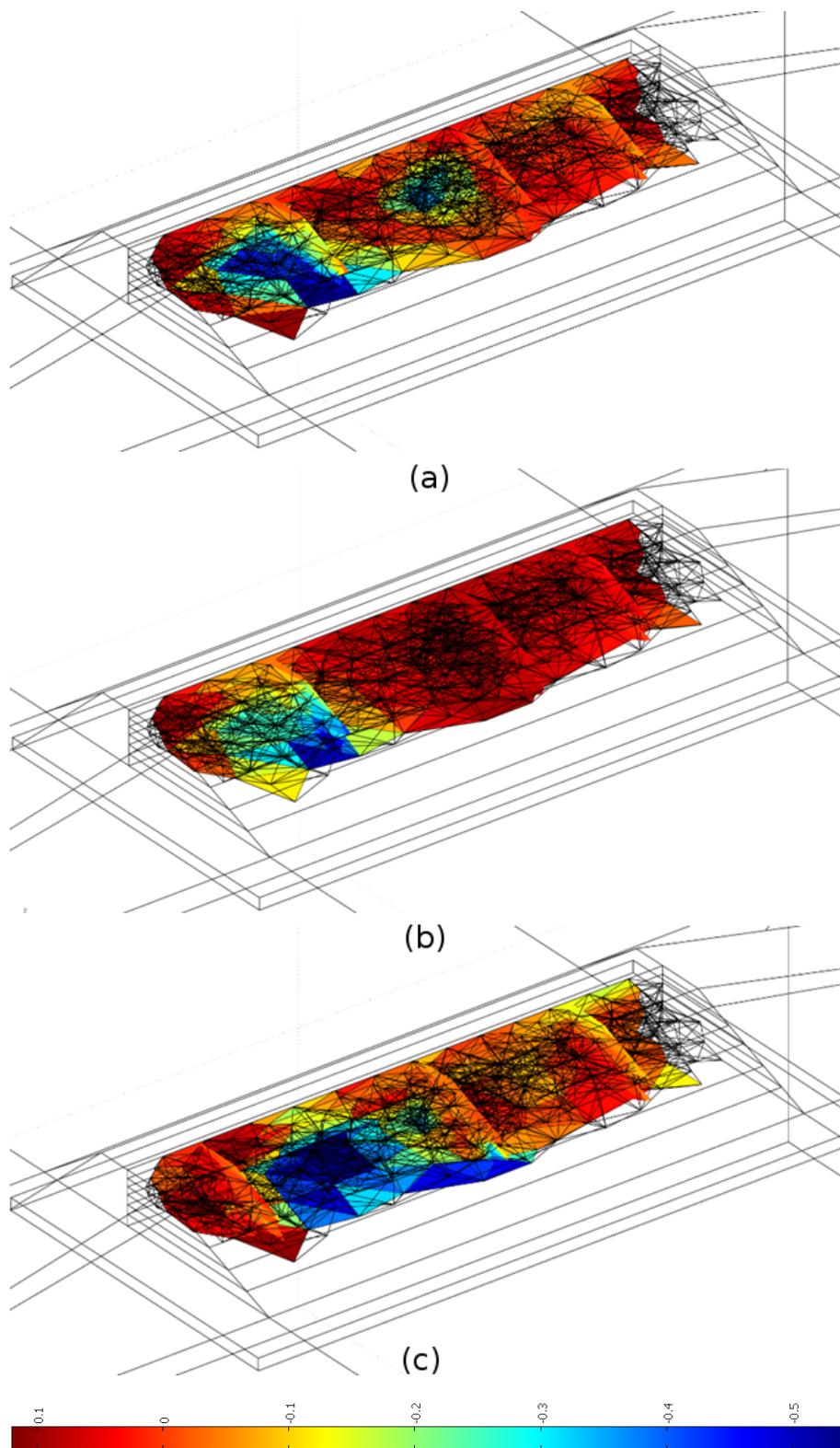


FIGURE 3.16 – Représentation de l'inversion en variation temporelle (a) entre les modèles 3.13(b) et 3.13(c), (b) entre le modèle 3.13(c) et 3.13(d) et enfin (c) entre le modèle 3.13(d) et 3.13(e). L'échelle de couleur est en variation relative de résistivité électrique.

est étudiée. La majorité des recherches portant sur l'optimisation date seulement des années 90, cependant, elles ont toutes conclu sur l'intérêt que pouvait avoir cette réflexion [Maurer & Boerner, 1998; Maurer *et al.*, 2010]. D'un point de vue pratique, les méthodes probabilistes n'étant pas encore disponibles l'optimisation d'un nombre élevé de paramètres et de données [Maurer *et al.*, 2010], seule l'optimisation *via* des méthodes déterministes sera présentée.

3.3.1 Optimisation des protocoles d'acquisition

Depuis l'origine de la méthode électrique à courant continu, une partie importante de la recherche a permis de définir un certain nombre de protocoles dont l'objectif était d'offrir, suivant l'objet de l'auscultation, la plus grande résolution verticale et horizontale. De ce principe est né une multitude de protocoles ayant chacun leurs avantages et leurs inconvénients [Xu & Noel, 1993; Dahlin & Zhou, 2002, 2004; Szalai & Szarka, 2008, 2011] répondant ainsi, à mon sens, au principe d'optimisation.

3.3.1.a Choix du protocole d'acquisition

Le choix du protocole d'acquisition est déterminant pour la résolution d'une auscultation. En effet, la profondeur d'investigation, la résolution et la sensibilité au bruit sont directement dépendant du choix du protocole (cf. Annexe A). Cette différence entre les protocoles peut aisément être visualisée par la représentation graphique des sensibilités (figures 2.25 et 2.26, Chapitre 2). En conséquence, il est nécessaire pour le bon déroulement d'une campagne d'auscultation, de pouvoir sélectionner les protocoles permettant de répondre de la manière la plus précise à une problématique.

Concrètement, plusieurs méthodes permettent d'optimiser le choix du protocole. Une des premières et plus simples méthodes d'optimisation consiste à réaliser une étude de sensibilité des différents protocoles à une problématique [Dahlin & Zhou, 2004]. Dans ce sens, les travaux de Tsourlos *et al.* [1999]; Zhou & Dahlin [2003]; Dahlin & Zhou [2004]; Hennig *et al.* [2005]; Sjö Dahl *et al.* [2008] ont permis de proposer l'utilisation de certains protocoles dont la sensibilité était moindre à l'effet de la topographie. De plus, les travaux de [Hennig *et al.*, 2005] ont permis de montrer la prévalence de l'utilisation du protocole « Half-Wenner » afin de limiter l'effet de la topographie lors de l'auscultation des OHT.

Ces études ont pour objectif de préserver l'inversion de la génération d'artéfacts en limitant les mesures sensibles à la présence de topographie. Cependant, ces protocoles possèdent une profondeur d'investigation limitée ce qui est un inconvénient majeur de la méthode. De plus, ce critère de sélection des quadripôles pose comme hypothèse que la topographie d'un ouvrage ne peut être pris en compte. Or, les travaux de Tong & Yang [1990] et de Tarantola [2005] ont permis de montrer qu'il est toujours plus intéressant en inversion d'intégrer un effet perturbateur que d'essayer de le filtrer.

3.3.1.b Protocoles non-conventionnels

L'amélioration continue des matériels d'auscultation (résistivimètres) permet de réaliser un nombre toujours croissant de mesures sur un laps de temps toujours plus court. Cette évolution « naturelle » a ainsi permis de remettre en cause le positionnement précédent. En effet, les sys-

tèmes récents d'acquisition permettent de réaliser plusieurs milliers de mesures en l'espace d'une heure. Ainsi, un protocole « Dipôle-Dipôle » de 608 quadripôles peut être aujourd'hui réalisé en l'espace de quelques minutes à la différence d'anciens systèmes qui auraient nécessité plusieurs heures d'acquisition. En conséquence, le gain de temps peut être utilisé afin d'acquérir des protocoles plus complets et/ou réaliser des mesures supplémentaires. Cependant, cette capacité mène à la formulation d'une question :

Quelles mesures faut-il faire pour répondre au mieux à une problématique ?

Les travaux de [Xu & Noel \[1993\]](#) indiquent que pour un jeu de N_e électrodes, le nombre total de combinaisons de quadripôles (N_{quad}) réalisables équivaut (sans les quadripôles réciproques) à :

$$N_{quad} = \frac{N_e(N_e - 1)(N_e - 2)(N_e - 3)}{8} \quad (3.8)$$

Le nombre de combinaisons pôles-dipôles (N_{pdp}) se calcule par :

$$N_{pdp} = \frac{N_e(N_e - 1)(N_e - 2)}{4} \quad (3.9)$$

Le nombre de combinaisons pôle-pôle (N_{pp}) peut être calculé selon :

$$N_{pp} = \frac{N_e(N_e - 1)}{2} \quad (3.10)$$

Soit, de façon plus générale :

$$Nb_{total}^{mes} = \frac{N_e!}{2^{(N_p-1)}} \quad (3.11)$$

avec Nb_{total}^{mes} le nombre total de mesures réalisables à partir du nombre N_p de pôles utilisés.

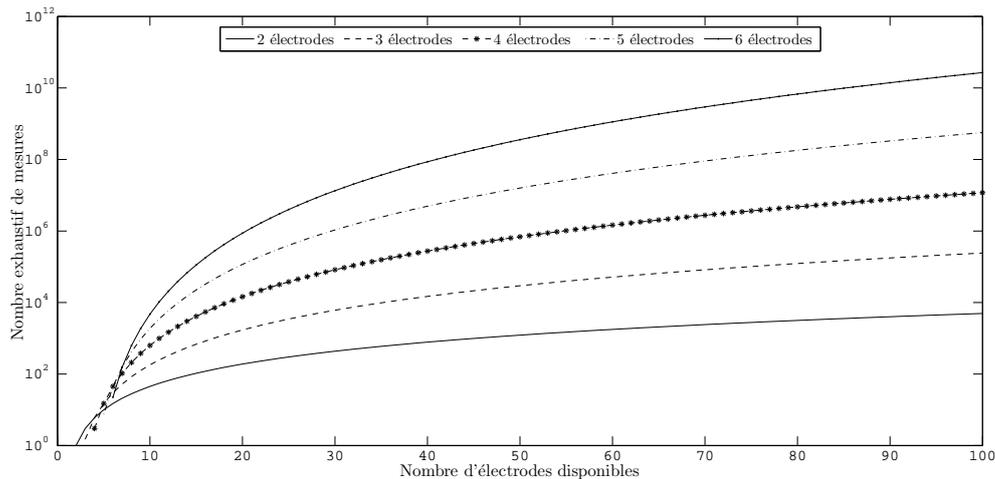


FIGURE 3.17 – Courbe illustrant le nombre total (exhaustif) de mesures réalisables à partir de dispositifs de 2 à 6 électrodes d'acquisition en fonction du nombre de d'électrodes disponibles.

La figure 3.17 illustre d'après l'équation 3.11 le nombre de mesures réalisables pour un jeu de 2 à 6 électrodes prises parmi un nombre N_e d'électrodes disponibles [[Szalai & Szarka, 2008](#)]. Cependant, il est aisé de démontrer, du fait du principe de recombinaison, qu'une partie des

mesures est redondante. Afin d'illustrer ce propos prenons simplement quatre électrodes. D'après les équations précédentes, ce jeu d'électrodes est capable de générer 3 mesures de quadripôle indépendantes. Lorsque les électrodes sont alignées et équidistantes on évoque souvent le nom des configurations Wenner α (W_α), Wenner β (W_β) et Wenner γ (W_γ). Or, une mesure Wenner γ est théoriquement égale à la somme des protocoles Wenner α et Wenner β . Ainsi, cette mesure est redondante car l'information apportée par cette mesure est déjà contenue dans les deux précédentes mesures par recombinaison. Cependant, ce principe de recombinaison n'est valide qu'en l'absence de bruit. En effet, ce principe est d'ailleurs utilisé pour mesurer le bruit sur une mesure. De manière plus précise la redondance peut être visualisée en calculant simplement le rang de la matrice de création des protocoles [Xu & Noel, 1993]. Avec l'hypothèse d'une absence de bruit sur les mesures, ce type d'analyse montre que toute l'information comprise dans un jeu exhaustif de données est aussi présente dans un jeu « complet » de données indépendantes composées simplement de :

$$Nb_{complet}^{mes} = N_e(N_e - 3)/2 \quad (3.12)$$

Un protocole complet n'implique que des données indépendantes ne présentant aucune redondance. L'équation 3.12 démontre qu'un rapport d'environ $N_e^2/4$ existe entre le nombre de possibilités pour un protocole exhaustif et un protocole complet. À cet effet, la figure 3.18 illustre la différence de nombre de quadripôles réalisables à partir d'un jeu exhaustif de deux et quatre électrodes, et le nombre de mesures indépendantes (complètes) réalisables avec un jeu de quatre électrodes. En l'absence de bruit sur la mesure, pour 100 électrodes il existe environ 10 millions de quadripôles possibles réalisables (jeu exhaustif) alors que l'information n'est contenue que dans cinq mille quadripôles (jeu complet), soit deux mille fois moins.

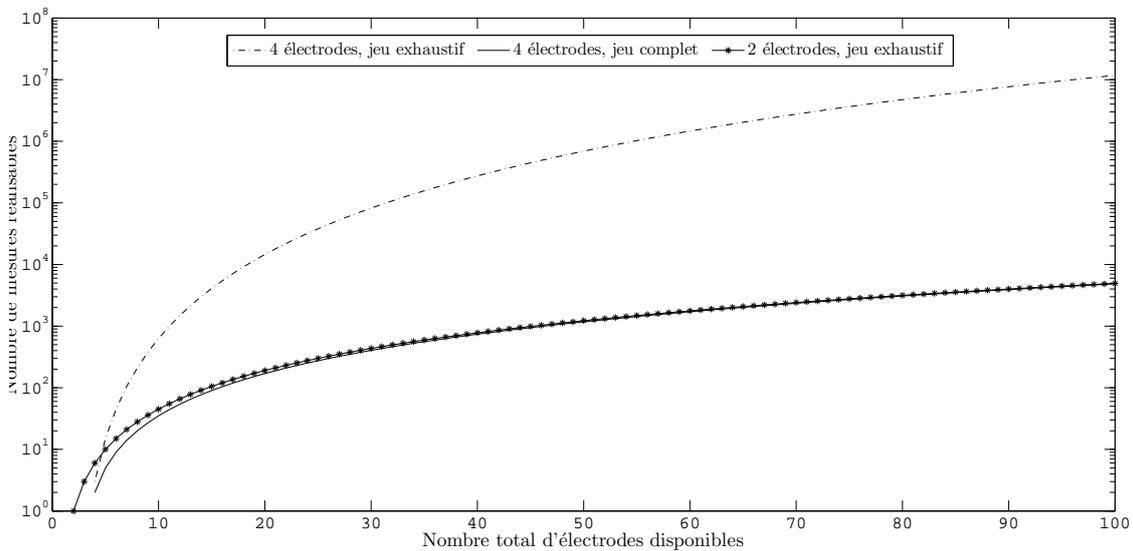


FIGURE 3.18 – Illustration du nombre de mesures réalisables pour des jeux exhaustif et complet de quadripôles, et un jeu exhaustif de bipôles, en fonction du nombre d'électrodes disponibles.

3.3.1.c Protocoles optimisés

Dans la littérature [Maurer & Boerner, 1998; Stummer *et al.*, 2004], le terme d'optimisation de l'acquisition n'est généralement pas employé lorsque l'étude se « résume » à une étude de

sensibilité entre les protocoles. La communauté travaillant sur l'optimisation de l'acquisition en géophysique conserve généralement l'emploi du terme pour les études dites « déterministes » et « probabilistes ». Même si les techniques probabilistes sont considérées supérieures aux méthodes déterministes du fait de l'exploration globale de l'espace des solutions, celles-ci sont peu utilisées en raison d'un coût de calcul prohibitif [Maurer *et al.*, 2010]. La majorité des travaux base l'optimisation sur une exploitation de la matrice des dérivées de Fréchet. Ces études peuvent être regroupées en trois familles.

Les premières recherches déterministes basées sur l'exploitation de la matrice de sensibilité remontent aux travaux de Menke [1984]; Alumbaugh & Newman [2000]; Furche & Weller [2002]; Furman *et al.* [2002]; Furman & Warrick [2004]. Ces travaux montrent que l'acquisition peut être optimisée globalement [Furman *et al.*, 2007] ou localement [Hennig *et al.*, 2008] (méthode Object Oriented Focussing (OOF)) en améliorant la distribution locale de sensibilité.

La seconde méthode, basée aussi sur l'étude de la matrice de sensibilité, étudie le conditionnement de la matrice $G^T G$. Plus précisément, l'étude des vecteurs propres (après décomposition en valeurs singulières de la matrice $G^T G$) vise à optimiser la trace normalisée de $G^T G$ [Curtis, 1999; Blome *et al.*, 2011]. Il est intéressant de noter que l'approche développée par Blome *et al.* [2011] se distingue sensiblement des autres stratégies. En effet, au lieu d'optimiser les protocoles de mesures, Blome *et al.* [2011] exposent qu'une sélection avisée de mesures « pôle-dipôle » permet la reconstruction de tous les quadripôles possibles. La faisabilité technique de cette démarche n'est toutefois possible que grâce au développement d'un système d'acquisition à 64 voies (ETH-DCMES2) [Stummer *et al.*, 2002].

La troisième méthode vise à travailler d'une manière différente avec la matrice de sensibilité, en introduisant le concept de matrice de résolution du modèle R_M [Backus & Gilbert, 1968, 1970; Menke, 1984; Stummer *et al.*, 2004; Wilkinson *et al.*, 2006; Loke, 2011]. Cette dernière méthode (cf. section 3.1.3) prend pour hypothèse que la matrice de résolution du modèle (R_M) peut être utilisée afin de quantifier la robustesse (capacité de résoudre de manière unique chaque cellule d'inversion) d'un jeu de données. Partant de cette hypothèse, Stummer *et al.* [2004] présentèrent le premier algorithme (compareR) permettant de sélectionner les quadripôles améliorant une fonction qualité (équation 3.13). Cette fonction qualité, la « Goodness Function » (GF), étendue à la modified Goodness function (mGF) par Wilkinson *et al.* [2006], permet de comparer par un système de pondération l'apport de chaque quadripôle à un système total.

$$GF(i) = \sum_{j=1}^m \frac{|G_{ij}^{add}|}{G_j^{sum}} \left(1 - \frac{R_{M_{jj}}^{base}}{R_{M_{jj}}^{exhaus}} \right) \quad i = [1 : (N - n^{base})] \quad (3.13)$$

Avec i l'indice des mesures étudiées, j l'indice de la cellule d'inversion étudiée et m le nombre de paramètres du modèle. G_{ij}^{add} représente la matrice de sensibilité des mesures ajoutées pour le test. $R_{M_{jj}}^{base}$ symbolise la matrice de résolution du modèle pour un jeu de mesures de références. Le terme « *exhaus* » correspond à tous les quadripôles réalisables avec un nombre N_e d'électrodes. Ainsi, $R_{M_{jj}}^{exhaus}$ correspond à la diagonale de la matrice de résolution du modèle calculée pour un jeu exhaustif de mesures. Enfin G_j^{sum} qui représente un vecteur contenant la somme de toutes les sensibilités pour chaque cellule d'inversion peut être mis en équation de la manière suivante [Stummer *et al.*, 2004] :

$$G_j^{sum} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_{ij}^{exhaus}| \quad (3.14)$$

Avec N le nombre de données et G_{ij}^{exhaus} la matrice des dérivées de Fréchet du jeu exhaustif de mesures réalisables. Enfin, avant d'ajouter les mesures « optimisées » ($GF(i)$) à la « base » de référence, leur complémentarité est testée grâce à l'algorithme LI (équation 3.15) [Stummer *et al.*, 2004] :

$$LI(i) = \left| \frac{\sum_{j=1}^{nm} G_{ij}^{base} G_{kj}^{add}}{|G_i^{base}| |G_k^{add}|} \right| \quad i = 1 \dots n^{base} \quad (3.15)$$

En conséquence, une simple matrice peut être insérée afin d'ajouter de *a priori* au processus d'optimisation permettant de focaliser l'information sur un domaine d'intérêt. Dans le cadre des travaux de Stummer *et al.* [2004], les auteurs limitent cette possibilité à la définition d'une profondeur d'investigation maximale. Ainsi, toutes les cellules situées en dessous de 30 m ne sont pas considérées. Des travaux plus récents [Fargier *et al.*, 2010] ont ainsi pu montrer que la pondération pouvait être utilisée pour défavoriser des zones présentant peu d'intérêt lors d'un monitoring par IRE. Cependant, le principe d'exploiter R_M pour améliorer un protocole de mesure suppose une connaissance *a priori* du milieu, ce qui est une hypothèse forte pour une reconnaissance d'un site réel.

3.3.1.d Protocoles optimisés et mesures sur le terrain

L'optimisation nécessite une connaissance du milieu ausculté. Habituellement, cette connaissance provient du résultat d'inversion d'une première auscultation à un temps donné. Ensuite, en supposant que le modèle inversé soit représentatif de la réalité du terrain ausculté, une optimisation peut alors être réalisée afin de focaliser l'information sur certaines zones de faible résolution.

Dans le cas d'une campagne de suivi de variations temporelles, la procédure se complique considérablement. En effet, lorsque l'inversion en variation temporelle est réalisée en différences de données, celle-ci nécessite conventionnellement de répéter le même protocole d'acquisition. Ainsi, si l'on désire réaliser une optimisation des mesures pour ce type d'inversion « time-lapse » il faut attendre la troisième série de données pour pouvoir visualiser le « bénéfice » d'une optimisation.

3.3.2 Optimisation du placement des électrodes

Lorsqu'une étude de reconnaissance ou de surveillance par méthode IRE est engagée, plusieurs questions se posent quant au « design » de l'acquisition :

- i). *Quels sont les protocoles de mesures apportant le plus d'information ?*
- ii). *Quel est l'espacement optimal entre les électrodes permettant d'obtenir la meilleure résolution ?*
- iii). *Comment positionner arbitrairement les électrodes afin d'optimiser la robustesse de l'imagerie ?*

La majorité des travaux réalisés au cours des deux dernières décennies s'est focalisée principalement sur un seul aspect de l'optimisation de l'acquisition, à savoir l'amélioration des protocoles de mesure. À mon sens, cette restriction provient de plusieurs difficultés inhérentes aux problèmes d'optimisation.

- i). La raison principale est la relation liant la discrétisation du problème inverse et les données issues de l'acquisition.
- ii). La seconde raison concerne la quantité d'information *a priori* nécessaire pour réaliser un modèle de référence à optimiser.

En conséquence, ce sous-chapitre tentera de développer une méthodologie d'optimisation du placement des électrodes. L'objectif de cette méthodologie est de fournir une technique permettant d'augmenter la robustesse d'une reconstruction afin d'améliorer son interprétation. Cette méthodologie sera appliquée, lors d'une étude numérique, à l'optimisation du placement des électrodes pour le suivi d'une infiltration dans un ouvrage expérimental.

3.3.2.a Problématique et état de l'art

L'objectif de l'optimisation en géophysique est de permettre une amélioration de la robustesse et donc de la fiabilité du résultat. Lors de certaines campagnes, l'opérateur peut désirer obtenir une fiabilité élevée autour de zones à fort intérêt (zone de fuite) et une confiance faible dans des régions présentant un intérêt moindre. Dans ces cas précis, l'optimisation doit permettre de focaliser l'information recueillie sur les zones à fort intérêt [Fargier *et al.*, 2010].

Il est indéniable que les travaux de Friedel [2003] puis de Stummer *et al.* [2004]; Wilkinson *et al.* [2006]; Loke *et al.* [2010] ont eu un fort impact sur la communauté géo-électrique durant la première décennie du XXI siècle. Le principe de ces travaux suppose la capacité de pouvoir quantifier la robustesse d'une inversion à partir de la matrice de résolution du modèle. Lors de leurs travaux, une limitation est posée concernant la dépendance de la méthode avec les caractéristiques du milieu étudié. Une seconde limitation est ensuite avancée par Stummer *et al.* [2004] concernant, les capacités de calcul demandées par sa méthode. En effet, cette méthode est actuellement restreinte aux inversions ne possédant qu'un faible nombre de paramètres et de données. Stummer *et al.* [2004] présentent, lors de la publication de leurs travaux, un système à 30 électrodes permettant la création de 82 215 quadripôles de mesures, pour environ 600 paramètres du modèle.

L'hypothèse de pouvoir optimiser le positionnement des électrodes [Fargier *et al.*, 2010] nécessite le choix d'un critère tel que l'optimisation de la fonction GF [Stummer *et al.*, 2004]. À la différence de la méthode précédente, notre méthode ne vise pas à comparer des quadripôles entre eux, mais des jeux de quadripôles. En effet, le principe de base énonce que chaque électrode peut générer, grâce aux autres électrodes, un certain nombre de quadripôles de mesures. Ainsi, chaque électrode peut être définie par les quadripôles de mesure qu'elle peut générer, permettant de comparer l'apport de chaque électrode au système total.

Le chapitre précédent présentait l'hypothèse, en mettant de côté le bruit sur la mesure, que toute l'information contenue dans un jeu exhaustif de données est comprise dans un jeu complet de données indépendantes. Cette simplification peut, à mon sens, être réalisée car l'optimisation

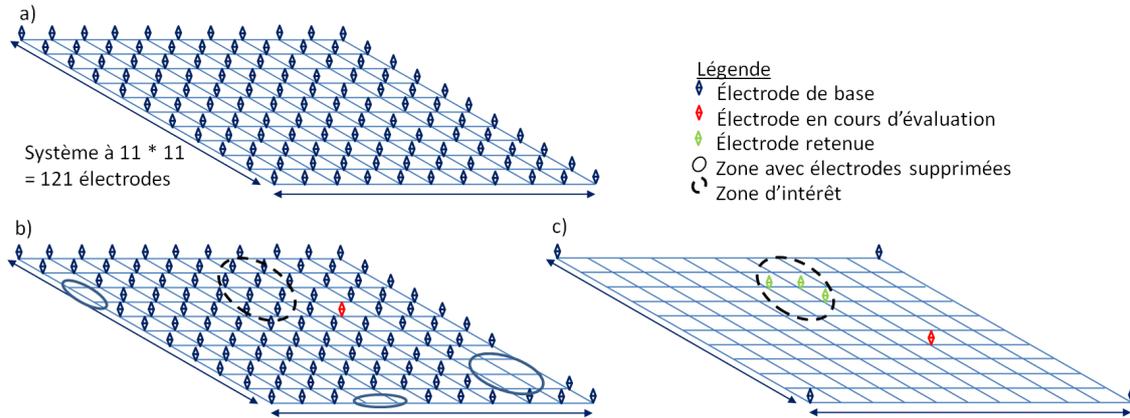


FIGURE 3.19 – Schématisation de deux options pour l'optimisation du placement des électrodes. Les figures 3.19(a) et (b) illustrent l'option 3 de la démarche d'optimisation impliquant une réduction du nombre initial d'électrodes (figure 3.19(b)). La figure 3.19(c) présente l'option 2 d'optimisation illustrant le principe de sélection des électrodes les plus pertinentes en fonction d'une zone d'intérêt.

du placement des électrodes ne calcule pas la distinction entre les quadripôles mais entre les électrodes. Cette supposition de réduction est alimentée par les travaux de [Loke et al. \[2010\]](#) montrant qu'une partie importante d'un jeu de données peut être supprimée du calcul d'optimisation. Cependant, afin de ne pas laisser de doute à ce sujet, les calculs d'optimisation sont réalisés avec à la fois des protocoles exhaustifs et complets [[Wilkinson et al., 2006](#)]. L'étude de [Loke et al. \[2010\]](#) révèle que l'optimisation des protocoles peut être réalisée de différentes manières. Il en est de même pour la démarche d'optimisation du placement des électrodes développée ici.

3.3.2.b Stratégies d'optimisation du positionnement

Plusieurs stratégies peuvent être mises en place (figure 3.19) afin d'optimiser le placement des électrodes :

L'option 1 représente la première et plus simple méthode afin de comparer des résultats de la matrice R_M . Cette option nécessite la création de plusieurs positionnements différents afin de tester la résolution de chacun d'entre eux. Cette méthode est intéressante pour « dégrossir » le problème et pour tester « naïvement » des positionnements conventionnels. Cependant, une comparaison quantitative des différents positionnements est complexe car nécessite une discrétisation identique du milieu pour chaque positionnement. Or, suivant le positionnement, la discrétisation peut avoir un effet prépondérant.

L'option 2 nécessite *a minima* un démarrage avec 3 électrodes de référence (figure 3.19(c)). Ensuite, toutes les électrodes supplémentaires correspondant à une grille fine d'électrodes sont testées en comparant l'apport de chacune d'entre elles. Lors de cette option, la fonction GF peut ainsi être utilisée pour comparer les résultats des R_M^{add} par rapport à la matrice R_M^{exhaus} (générée avec la totalité des électrodes de la grille). Enfin, l'électrode ayant fourni le plus grand apport à la fonction GF est retenue et ensuite considérée comme électrode de référence. Cette option nécessite le calcul de la matrice R_M réalisée à partir de toutes les électrodes correspondant à une grille d'électrodes.

L'option 3 procède dans le sens inverse à l'option 2. Cette option nécessite tout d'abord le calcul de la matrice R_M réalisée à partir de toutes les électrodes correspondant à une grille d'électrodes. Ensuite, la diminution de la résolution engendrée par la suppression d'une électrode est comparée à la perte engendrée par la suppression de chacune des autres électrodes (figures 3.19(a) et (b)). L'électrode apportant le moins de résolution est ainsi supprimée de la grille totale et le processus itératif reprend jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un nombre désiré d'électrodes optimisées. Les pertes de résolution engendrées par la suppression de chacune des électrodes sont comparées grâce à une fonction de perte « FP » (équation 3.16).

$$FP(i_{elec}) = \sum_{j=1}^{nm} P \left(\frac{R_{M_{jj}}^{base}}{R_{M_{jj}}^{exhaus}} \right) \quad (3.16)$$

Avec i_{elec} l'indice de l'électrode étudiée, $R_{M_{jj}}^{exhaus}$ la matrice de résolution du modèle pour un jeu exhaustif de données et $R_{M_{jj}}^{base}$ la matrice de résolution du modèle générée à partir de toutes les électrodes moins l'électrode i_{elec} en cours de test. P est un vecteur de longueur égale au nombre de paramètres du modèle, dont chaque élément permet de pondérer l'impact d'une cellule d'inversion. Lorsque le rapport $R_{M_{jj}}^{base}/R_{M_{jj}}^{exhaus}$ est faible, cela indique que l'électrode testée apporte beaucoup de résolution et inversement.

Concrètement, si l'on désire limiter la résolution de la cellule « j » alors il est nécessaire de sélectionner le paramètre « P_j » inférieur à 1. Cette pondération a ainsi pour effet de limiter l'effet d'un faible rapport $R_{M_{jj}}^{base}/R_{M_{jj}}^{exhaus}$ sur la somme totale. Une pondération supérieure à 1 permet à l'inverse de donner plus d'importance aux électrodes présentes sur des zones d'« intérêt ».

Dans le cadre des options 2 et 3, et contrairement aux méthodes d'optimisation des protocoles, le nombre d'itération de calcul n'équivaut pas au nombre de quadripôles ajoutés mais au nombre d'électrodes supprimées (option 3), ou ajoutées (option 2). En conséquence, le processus nécessite un nombre bien inférieur de calcul.

3.3.2.c Paramètres d'influence de la méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation telle que nous la présentons émet plusieurs hypothèses importantes qu'il est nécessaire d'investiguer :

- l'impact d'une erreur d'estimation de la distribution de résistivité réelle du milieu ausculté ;
- l'effet d'une connaissance limitée du bruit sur les mesures ;
- la conséquence d'une modification de la discrétisation du problème inverse.

Erreur sur le milieu ausculté : Lorsqu'une optimisation de l'acquisition est souhaitée, la théorie implique que le milieu doit être connu afin de pouvoir optimiser l'acquisition. Cependant, cette connaissance ne peut être atteinte, ou dans ce cas précis, la prospection n'a plus d'utilité. Le modèle ainsi utilisé n'est qu'une reconstruction partielle de celui-ci pouvant provenir d'un résultat d'inversion ou des données d'archives du milieu ausculté. En conséquence, une question importante se pose :

Quel est l'effet d'une erreur concernant la distribution de résistivité électrique du milieu sur l'optimisation ?

Lors de leurs travaux sur l'optimisation, [Stummer et al. \[2004\]](#); [Wilkinson et al. \[2006\]](#); [Loke et al. \[2010\]](#) montrent que l'optimisation des protocoles de mesures est principalement sensible à la position des électrodes, au choix des électrodes de mesures, et enfin à la topographie du milieu. La variabilité spatiale des propriétés du milieu n'apparaît pas comme un facteur ayant un impact primordial dans l'optimisation. Dans leur étude, [Stummer et al. \[2004\]](#) indiquent qu'une variation raisonnable, dans des gammes de variation de la résistivité électrique pour les matériaux géologiques, a une influence faible sur l'optimisation. Afin de contester ou valider ce principe, une étude paramétrique a été réalisée dans l'objectif d'optimiser le placement des électrodes dans un ouvrage expérimental. Cet ouvrage sera présenté plus en détail au niveau du Chapitre 4.

L'étude se focalise en particulier sur le contraste présent entre une partie sablo-limoneuse d'infiltration et des zones plus fortement conductrices. En effet, il m'a semblé qu'étant donné la sensibilité des mesures aux milieux conducteurs l'étude devait se focaliser sur le contraste présent entre ces milieux. D'un point de vue théorique, l'augmentation du rapport de résistivité entre le remblai sableux « résistant » et le noyau limoneux « conducteur » doit avoir une influence sur l'optimisation du placement des électrodes. En effet, l'énergie d'un signal électrique est attirée par les milieux conducteurs. Ainsi, l'énergie des électrodes positionnées à trop grande proximité du noyau est dissipée dans le noyau et leur apport pour la résolution totale est diminuée. Les électrodes en question peuvent alors devenir « obsolètes » en comparaison des autres. Cependant, d'un point de vue numérique, et pour des variations de rapport de résistivité rationnelles ce phénomène n'est pas observé.

Bruit sur les mesures : Un second point important peu abordé par les travaux de [Stummer et al. \[2004\]](#) mais soulevé par les travaux de [Blome et al. \[2011\]](#) concerne le bruit sur les mesures. En effet, le principe d'optimisation suppose de pouvoir hiérarchiser l'apport de tous les quadripôles. Cependant, toute mesure est entachée, à plus ou moins haut niveau, d'un bruit pouvant impacter son apport à la résolution. Générer numériquement ce bruit n'est pas une chose aisée car celui-ci dépend à la fois de la rigueur de l'acquisition (erreur sur la position des électrodes, nombre de répétitions des mesures, ...) mais aussi du contexte d'acquisition (bruit de fond, contact électrode-milieu, ...). Afin de limiter l'effet de ce bruit, [Stummer et al. \[2004\]](#) choisissent de ne sélectionner que les quadripôles ayant un facteur géométrique « suffisamment » faible. Cette étude mène à la formulation de plusieurs questions :

Quelle limite implique le terme « suffisamment » faible ?

Cette limite est elle acceptable ?

N'existe-t-il pas d'autres méthodes d'estimation du bruit de mesure ?

Dans le cadre de l'optimisation du placement des électrodes, une fonction empirique proposée par [Dahlin & Zhou \[2004\]](#) est utilisée afin de calculer un bruit statistique sur les mesures. Cependant, ce bruit ne peut refléter complètement les réelles spécificités d'un site d'étude (même si certains paramètres de cette expression sont fonction du site d'étude), laissant une part d'indétermination dans l'utilisation de l'optimisation.

Choix de la grille d'optimisation : Un troisième paramètre prépondérant inscrit dans le processus d'optimisation est l'effet de la discrétisation du problème inverse du milieu. Conven-

tionnellement, ce paramètre n'est pas pris en compte lors des études d'optimisation [Stummer *et al.*, 2004; Wilkinson *et al.*, 2006; Loke *et al.*, 2010]. Cependant, à mon sens, une étude sur la paramétrisation du problème inverse devrait être intégrée à ces études. En effet, la sensibilité d'un quadripôle de mesure à un milieu discrétisé dépend fortement de la taille et de la forme des mailles du milieu discrétisé. Une simple comparaison des sensibilités $1D$ et $2D$ montre la différence que la discrétisation induit. En effet dans le cas $1D$, une mesure n'est quasiment pas sensible aux premiers décimètres du sous-sol (en fonction de l'espacement des électrodes), alors que dans le cas $2D$, une mesure est en grande partie sensible aux variations à proximité des électrodes.

Le choix de la grille d'inversion et donc de la grille d'optimisation est une question extrêmement importante. Des recherches réalisées sur le sujet pourraient contribuer largement à l'amélioration de la méthode IRE. Dans le domaine géo-électrique, à notre connaissance, l'étude de la bibliographie n'a signalé aucune publication entièrement dédiée à la discrétisation du problème inverse et à son optimisation. Cependant, la recherche bibliographique a permis de révéler un article concernant l'optimisation de la discrétisation pour des campagnes d'acquisition en sismique réfraction en transmission [Wéber, 2001].

Dans le cadre de notre étude d'optimisation, le milieu ausculté est discrétisé par des cellules de tailles équivalentes afin de simplifier l'interprétation des résultats de résolution. Cependant, ce choix est difficilement justifiable car la discrétisation de l'optimisation doit être équivalente à la discrétisation du problème inverse. En conséquence, ces limitations concernant le choix de discrétisation du milieu entraînent une faiblesse dans les résultats potentiels de la technique d'optimisation du placement des électrodes.

Effet du paramètre P : Lors de l'optimisation du placement d'électrodes, la fonction de perte (eq 3.16) utilisant un vecteur de pondération P est utilisée. Ce paramètre permet de donner un poids aux différentes cellules d'optimisation. Dans le cadre de notre étude, un poids significativement faible de 0.5 a été utilisé afin de dévaluer l'importance des cellules placées à distance des zones d'infiltration supposées. *A contrario*, les zones d'infiltrations supposées ont été dotées d'un poids de 1.5 afin de focaliser l'information vers ces cellules.

En conséquence ce facteur a pour effet d'augmenter la résolution locale au détriment de la résolution globale. Ainsi, il est difficile de déterminer objectivement les limites de cette pondération.

Synthèse et application : L'optimisation du placement des électrodes nécessite un fort *a priori* sur le milieu étudié. C'est pourquoi cette méthode est particulièrement intéressante pour les milieux anthropisés offrant un fort *a priori* sur leur composition, ainsi que pour les études de variation temporelle de résistivité électrique. Or, la reconnaissance et la surveillance des OHT entrent précisément dans ces deux cas de figure.

3.3.2.d Évaluation numérique de l'optimisation du placement des électrodes

Valider objectivement la méthodologie du placement des électrodes n'est pas une tâche aisée. En effet, cette validation dépend notamment du caractère arbitraire de la pondération permettant

de focaliser l'information en des zones précises. Cependant, la méthode utilisant la matrice de résolution du modèle comme base d'optimisation, il est possible d'observer et de comparer l'effet de l'optimisation du positionnement sur cette matrice.

L'objectif final d'optimisation porte sur l'amélioration du positionnement des électrodes placées à demeure dans un ouvrage expérimental (Chapitre 4). En conséquence, les caractéristiques de cet ouvrage (géométrie, résistivité des matériaux) ont été fixées pour cette expérimentation. À cet effet, les figures 3.20 et 3.21 présentent à la fois le principe d'optimisation du placement des électrodes ainsi que le résultat obtenu. L'ouvrage, dont la description détaillée est donnée au niveau du Chapitre 4, peut être découpé en quatre parties (figure 3.20) :

- une fondation en limon (en marron clair) ;
- un noyau en limon (en marron) ;
- un corps d'ouvrage en sable limoneux (en jaune) ;
- des rampes d'accès en matériau grossier et hétérogène (en marron plus foncé).

La figure 3.20 présente le point de départ de l'optimisation, avec une grille régulière d'électrodes positionnée sur le milieu soumis à infiltration. Afin de focaliser l'inversion, une grille de 122 électrodes est simulée sur l'ouvrage. Ce test a surtout pour vocation de visualiser les électrodes les plus sensibles à plusieurs volumes discrétisés du modèle.

L'équation normale d'inversion étant écrite dans l'espace des modèles, la plus grande limitation en termes de calcul provient du nombre de paramètres du modèle [Stummer *et al.*, 2004]. En effet, l'optimisation nécessite l'inversion du Hessien dont la taille est de $[M, M]$, avec M le nombre de paramètre du modèle. Le second point critique pour le calcul du Hessien est le produit des matrices de sensibilité. Dans le cadre de simulations de plusieurs millions de mesures avec plusieurs centaines de paramètres du modèle ce produit matriciel devient lourd. Cependant, grâce à l'utilisation de méthodes de décomposition des produits de matrices, en somme de produits vectoriels (routines *BLAS*, *matlab*), ce calcul peut être réalisé de manière précise en limitant fortement l'espace mémoire requis.

La figure 3.22 présente la distribution de la capacité de résolution obtenue à partir de deux positionnements différents d'électrodes. La première figure correspond à un positionnement « conventionnel » 3D d'électrodes placées de manière équidistante sur une grille. Ce positionnement est décrit par la figure au dessus à gauche du résultat de résolution.

La seconde figure (3.22(b)) correspond à la retranscription du positionnement optimisé des électrodes. Ce placement optimisé correspond aux électrodes notées en rouge sur le schéma vu en plan. La matrice en couleur présentée est le véritable résultat d'optimisation. Ce résultat indique :

- **En rouge foncé** : les électrodes les plus importantes pour la résolution. Ces électrodes ne sont supprimées qu'au dernier stade de l'optimisation,
- **En bleu foncé** : les électrodes supprimées au premier stade de l'optimisation. Ces électrodes sont censées intervenir en moindre proportion dans la résolution totale.

À notre sens, ce résultat ne doit pas être interprété comme tel. En effet, il nous semble plus pertinent d'interpréter cette matrice comme une distribution de densité d'électrodes. En conséquence, les zones en rouge doivent contenir un nombre élevé d'électrodes, alors que les zones en

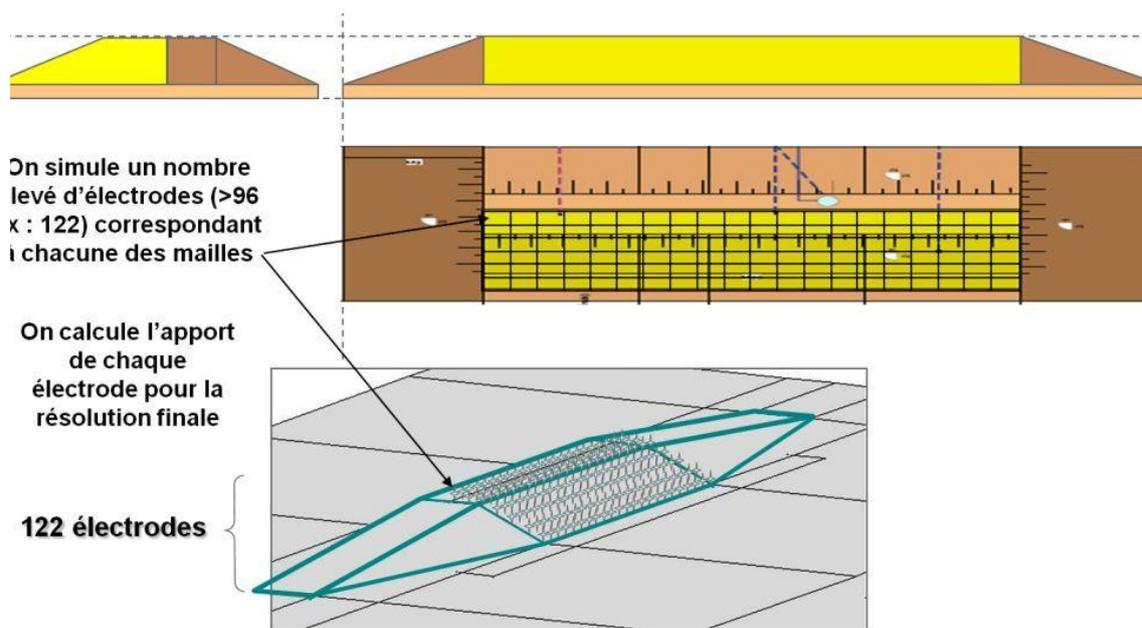


FIGURE 3.20 – Schéma de l'ouvrage expérimental *DiguExpERT* vu en plan en coupes transversale et longitudinale. La partie jaune correspond à la partie sablo-limoneuse, siège de l'infiltration. Une grille régulière d'électrodes, schématisée en noir sur la figure en plan et en croix bleues sur le bloc 3D est disposée sur la zone d'infiltration.

bleu doivent statistiquement compter un nombre restreint d'électrodes. Suivant ce principe, un « design » optimisé d'électrodes est réalisé en tenant compte des spécificités du milieu ausculté. Ces spécificités liées au montage de l'ouvrage limitent le nombre de degré de liberté joint au placement des électrodes.

En effet, le nombre de lignes longitudinales d'électrodes est limité à 7, en raison du nombre de couches de l'ouvrage et des contraintes liées au montage. Ensuite, afin de garder des marges de sécurité, deux lignes longitudinales, correspondant transversalement aux zones rouges de la figure 3.22 sont sur-équipées d'électrodes. Ces lignes « 2D » permettent de réaliser une imagerie « simple » avec le progiciel Res2Dinv®, assurant la présence de résultats d'inversion « conventionnels » pour la comparaison de résultat.

Afin de parfaire l'essai numérique, une étude complémentaire est réalisée dans le but de visualiser l'apport de l'optimisation du placement des électrodes sur la matrice de résolution du modèle. À cet effet, la figure 3.22 présente en couleurs les valeurs diagonales de la matrice de résolution du modèle pour un placement 3.22(a) 3D conventionnel des électrodes et 3.22(b) optimisé des électrodes. La figure 3.22(c) illustre la variation relative de la résolution entre le résultat 3.22(a) et 3.22(b). Ce résultat montre clairement l'amélioration des valeurs diagonales de la matrice de résolution du modèle au niveau principalement de l'intersection des coupes présentées. Les coupes transversales sont situées au niveau des infiltrations simulées. En conséquence, la capacité de résolution des cellules présentes à proximité des infiltrations est améliorée laissant supposer une amélioration de la robustesse de l'inversion.

Synthèse et application : D'un point de vue pratique, l'optimisation entraîne globalement un positionnement des électrodes à proximité des zones d'intérêt. Une

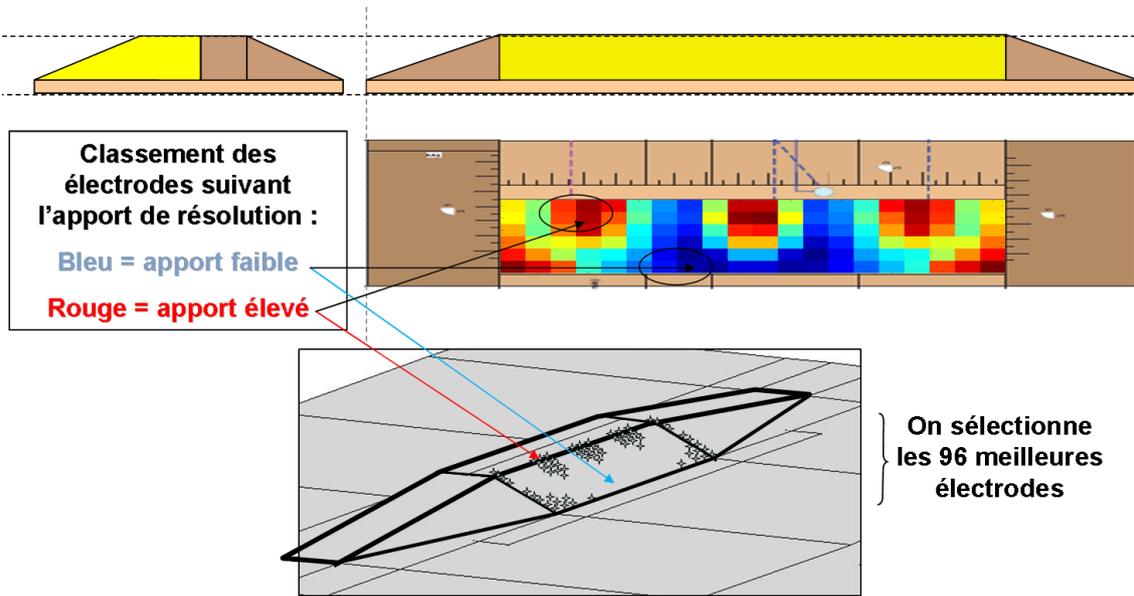


FIGURE 3.21 – Illustration du résultat d'optimisation du placement des électrodes. La matrice d'importance des électrodes est superposée sur la zone d'investigation de l'ouvrage expérimental. Une interprétation en termes de positionnement optimisé est donnée sur la figure en perspective.

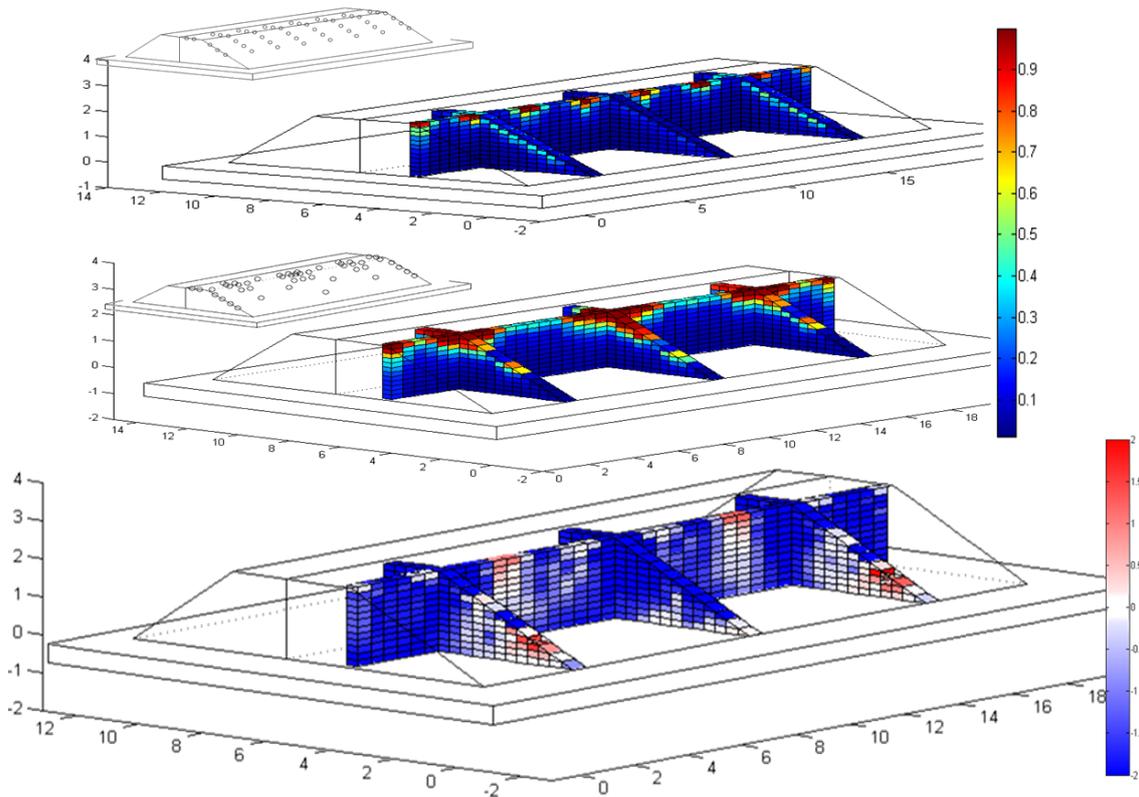


FIGURE 3.22 – La figure du bas présente le gain en bleu, et la perte en rouge de la capacité de résolution apportés par l'optimisation du placement des électrodes. Ce résultat correspond à la variation relative entre la résolution du modèle obtenue avec un positionnement optimisé des électrodes (figure centrale) et une position plus conventionnelle de l'acquisition (figure du haut) [Fargier et al., 2010].

seconde tendance montre que les zones à distance élevée des zones d'intérêt peuvent aussi révéler une grande importance 3.21. Un placement d'électrodes à ces positions « éloignées » permet d'obtenir une profondeur d'investigation maximale et permet ainsi d'optimiser le suivi des anomalies recherchées.

3.4 Conclusion

La résolution du problème inverse est un passage incontournable dans la chaîne de traitement de l'information de données d'IRE. La qualité d'une inversion peut être définie comme la capacité d'imager de manière fiable la variation spatiale ou temporelle de résistivité électrique du sous-sol. Cette fiabilité dépend de l'information contenue dans les données, et de la capacité de cette information à contraindre de manière unique les cellules d'inversion. L'information contenue dans les données dépend de la discrétisation du problème inverse mais aussi du milieu étudié. Enfin, la discrétisation du problème inverse doit permettre d'expliquer au mieux la distribution de résistivité électrique du sous-sol afin de ne pas générer d'artéfacts. En conséquence, afin d'améliorer la fiabilité d'une inversion, il est nécessaire de repenser le problème inverse pour qu'il s'adapte à la problématique d'auscultation. Trois étapes peuvent être distinguées :

- l'optimisation de l'acquisition ;
- l'optimisation du traitement de l'information par le problème inverse ;
- l'optimisation de l'interprétation des résultats d'inversion.

Les deux premiers points sont extrêmement liés. En effet, en fonction d'une stratégie d'inversion (1D, 2D, ...) un protocole de mesures peut apporter plus ou moins d'information permettant d'approcher l'unicité. Dans le cadre de ce travail de thèse, plusieurs travaux ont été réalisés afin d'améliorer chacun des trois points précédents.

Concernant l'optimisation de l'acquisition, des algorithmes d'optimisation des protocoles de mesures sont réalisés et adaptés à l'auscultation de milieux 3D. Ces algorithmes sont basés sur l'utilisation de la matrice de résolution du modèle dans une fonction d'optimisation. De plus, des travaux concernant l'optimisation du placement des électrodes de mesure sont réalisés. Cette optimisation est simulée pour un ouvrage expérimental de type digue afin de favoriser le suivi d'infiltrations en trois zones de l'ouvrage. Les résultats indiquent que l'optimisation du placement des électrodes permet d'améliorer les valeurs de la diagonale de la matrice de résolution du modèle et donc d'augmenter la capacité à résoudre de manière unique chaque cellule d'inversion.

Concernant l'optimisation du traitement de l'information, deux approches différentes d'auscultation sont développées permettant une meilleure prise en compte de la complexité des OHT. Ces approches, nommées $2D^+$ et $3D^-$, ont nécessité l'élaboration d'un nouveau code de modélisation et d'inversion découplant totalement le maillage du problème direct et la discrétisation du problème inverse. En conséquence, des éléments tels que le réservoir d'eau ou la topographie de l'ouvrage sont pris en compte dans le problème inverse tout en limitant sa sous-détermination. Ces approches ont pour objectif de remplir différents rôles dans la démarche globale d'auscultation des OHT. En effet, la première est dédiée à l'auscultation grand rendement tandis que la seconde est plus adaptée à la reconnaissance ou à la surveillance fine d'ouvrages 3D. Plusieurs études numériques sont réalisées afin de tester la robustesse de ces stratégies. La qualité des résultats numériques obtenus illustre le bénéfice que peuvent apporter ces stratégies.

Enfin, des techniques d'amélioration de la fiabilité de l'interprétation sont présentées. Ces outils sont indispensables afin d'améliorer la qualité d'une interprétation. Cependant, ces techniques possèdent plusieurs limitations et sont indisponibles pour les auscultations réalisées sur les ouvrages $3D$ (dans le cadre des progiciels commerciaux actuels). C'est pourquoi, une de ces techniques, la matrice de résolution du modèle, est implémentée afin d'améliorer l'interprétation de résultats d'inversion $2D^+$ ou $3D^-$.

Les tests réalisés de manière numérique ne permettent pas de valider l'utilisation des méthodes développées dans ce paragraphe. Afin de tester, confronter et valider ces développements, des expérimentations sur ouvrage contrôlé sont nécessaires. Le caractère contrôlé de l'ouvrage devant permettre de valider une possible amélioration induite par ces nouvelles stratégies d'inversion.

Chapitre 4

Étude expérimentale semi-contrôlée : DiguExp'E.R.T.

Contents

4.1	Introduction	136
4.1.1	Rappel du contexte	136
4.1.2	Le besoin d'un ouvrage contrôlé	137
4.1.3	Le choix d'un critère d'étude	137
4.1.4	Étude préalable	138
4.1.4.a	Étude numérique d'écoulement en milieu poreux	138
4.1.4.b	Les études sur planches de matériaux	140
4.2	Le dispositif expérimental	141
4.2.1	Géométrie et structure de l'ouvrage	141
4.2.2	Le système hydraulique d'injection	143
4.2.3	Étude des propriétés de l'ouvrage avant infiltration	143
4.2.3.a	Évaluation du degré de compactage	144
4.2.3.b	Instrumentation de suivi des paramètres d'état	145
4.3	Les essais d'infiltration	147
4.3.1	Déroulement des essais	147
4.3.2	Suivi de la teneur en eau du sol en place	149
4.3.3	Suivi de la température du sol en place	149
4.3.4	Suivi des volumes d'eau injectés dans le sol	151
4.4	Étude d'auscultation	151
4.4.1	Campagne d'étude 1 (MG-32-S)	152
4.4.1.a	Présentation de la campagne d'étude	152
4.4.1.b	Présentation des résultats	154
4.4.1.c	Discussion et conclusion	158
4.4.2	Campagne d'étude 2 (MG-25-E)	159
4.4.2.a	Présentation de la campagne d'étude	159
4.4.2.b	Présentation des résultats	160
4.4.2.c	Conclusion	165
4.4.3	Campagne d'étude 3 (MG-3D-S)	165
4.4.3.a	Présentation de la campagne d'étude	165
4.4.3.b	Présentation des résultats	166

4.4.3.c	Conclusion	169
4.4.4	Campagne d'étude 4 (PDP-Opt-E)	169
4.4.4.a	Présentation de la campagne d'étude	169
4.4.4.b	Présentation des résultats	172
4.4.4.c	Conclusion	179
4.5	Conclusion des études réalisées sur l'ouvrage DiguExpERT	179

4.1 Introduction

4.1.1 Rappel du contexte

Les responsables d'OHT tels qu'EdF, les Voies Navigables de France (VNF) ou l'État doivent garantir la sécurité de leurs ouvrages. Cette responsabilité entraîne une demande légitime quant au développement de méthodes robustes de détection des pathologies pouvant entraîner la rupture des ouvrages. Afin de valider plusieurs développements méthodologiques quant à l'utilisation de la méthode d'IRE pour l'auscultation et la surveillance des OHT, un ouvrage expérimental a été réalisé au Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen.

Le projet d'expérimentation intitulé DiguExp'E.R.T. « Digue Expérimentale pour la Tomographie de Résistivité Électrique » (TRE, ou ERT en anglais) a impliqué dans ce projet la collaboration de plusieurs partenaires : le CER de Rouen, le Cemagref, l'IFSTTAR, le LRPC de Rouen, EDF R&D, EDF-DTG, Fugro Géotechnique, Géophy *Consult*, l'Opération de Recherche LCPC-Solem et le PN ERINOH.

Les objectifs de l'étude, toutes phases confondues, ont été définis en 2009 suite à de nombreux échanges avec le Cemagref d'Aix-en-Provence et les membres du comité de suivi de thèse. Il s'agit principalement :

- d'améliorer la détectabilité des phénomènes d'infiltration (accompagnant ou pouvant aboutir à de l'érosion interne) et plus particulièrement d'étudier l'effet de la pathologie sur les paramètres du sol dont dépendent les observables géophysiques (humidité, température) ;
- de développer et améliorer la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques par IRE, notamment par confrontation entre les modélisations numériques (études paramétriques, optimisation des configurations d'acquisition) et des données réelles ;
- de tester d'autres méthodes de détection, et de s'appuyer sur leur complémentarité avec l'imagerie électrique pour fiabiliser une méthodologie intégrant plusieurs outils d'auscultation non destructifs.

Afin de valider ces objectifs, plusieurs jalons doivent être franchis. Une partie de cette validation nécessite l'auscultation d'un ouvrage expérimental contrôlé. Cependant, cette affirmation soulève deux questions :

- *Pourquoi réaliser un ouvrage expérimental ?*
- *Comment réaliser un ouvrage expérimental ?*

4.1.2 Le besoin d'un ouvrage contrôlé

Lors de prospections réalisées sur des ouvrages réels, les limitations de la méthode, la complexité des ouvrages et des phénomènes/pathologies s'y produisant entraînent une très forte difficulté quant à l'interprétation des résultats d'imagerie. C'est pourquoi, afin de valider certains développements, un contrôle plus abouti des paramètres est nécessaire.

À l'inverse, lorsque des études sont réalisées de manière théorique ou en laboratoire, l'interprétation et la validation sont facilitées par la connaissance des milieux simulés ou auscultés. Cependant, dans ces cas précis, la complexité du milieu ausculté, la physique des phénomènes simulés, ainsi que les capacités d'auscultation mises en place ne peuvent refléter ni la complexité d'un ouvrage réel ni les difficultés et limitations pratiques d'une prospection sur le terrain.

Pour ces raisons un ouvrage expérimental a été réfléchi, discuté, conçu et exploité au cours de la thèse. Son objectif est de pouvoir garder les avantages des deux points précédents en trouvant le meilleur compromis entre réalisme de l'auscultation et contrôle des milieux auscultés. De plus, la « qualité » du milieu reproduit nécessite aussi une simulation réaliste des pathologies rencontrées. C'est pourquoi, une attention particulière a été portée sur la sélection de la pathologie à détecter et sur sa simulation.

4.1.3 Le choix d'un critère d'étude

Plusieurs réflexions ont été menées avec le Cemagref afin de pouvoir déterminer la pathologie d'érosion interne à étudier en fonction de sa fréquence d'apparition, de sa dangerosité et de sa détectabilité par la méthode d'IRE.

En pratique, l'objectif ne peut pas être de détecter directement de l'érosion interne, phénomène trop fin et local (en dehors du phénomène de suffusion), dont aucun critère (à notre connaissance) ne permet de relier directement le phénomène à un résultat d'imagerie géo-électrique. Il s'agit plutôt de détecter, imager et suivre dans le temps l'évolution d'une infiltration à travers un remblai. En effet, quel que soit le facteur de déclenchement de l'E.I., une infiltration localisée dans l'ouvrage précède généralement le phénomène d'érosion (Chapitre 1). Cette infiltration se produisant en amont (avant le processus de continuation, cf. Chapitre 1), il est intéressant de pouvoir quantifier cette phase.

En conséquence, le phénomène étudié est l'évolution d'une infiltration pouvant précéder de l'érosion interne. Dans le but de pouvoir simuler ces infiltrations, l'ouvrage a été conçu en plusieurs tronçons permettant d'abriter plusieurs infiltrations en conditions contrôlées. Afin de pouvoir « vérifier » en continu l'évolution des infiltrations, l'ouvrage est monitoré par une instrumentation positionnée à l'intérieur de l'ouvrage. En suivant ces critères, la DiguExp'ERT doit offrir, grâce au contrôle de la structure et au suivi des paramètres internes de l'ouvrage, un cadre expérimental permettant de tester et valider les développements de la méthode IRE réalisés durant la thèse.

4.1.4 Étude préalable

Afin que l'ouvrage expérimental fournisse toutes les capacités présentées au paragraphe précédent, une étude préalable à sa conception fut nécessaire. Cette étude regroupe une étude numérique et une étude de mise en œuvre des matériaux. Cette dernière a consisté en la réalisation d'une planche expérimentale de 16 m de long et de 8 m de large afin de caractériser la conductivité hydraulique du matériau pour trois mises en œuvre différentes réalisées au CER de Rouen. Le but étant de pouvoir imposer, lors de la mise en œuvre, la conductivité hydraulique de la zone d'infiltration. La conductivité hydraulique (coefficient de perméabilité hydraulique) représente la vitesse de déplacement des fluides présents dans l'espace poral ($m.s^{-1}$).

Dans le but de générer des séquences d'infiltrations compatibles avec la durée d'une thèse, la conductivité hydraulique du matériau ainsi que la géométrie de l'injection ont dû être calibrées. La digue expérimentale pouvant recevoir l'injection en trois zones, il a été jugé nécessaire de limiter la durée des phases transitoires d'infiltration à un mois environ.

4.1.4.a Étude numérique d'écoulement en milieu poreux

Des simulations numériques d'écoulements en milieu poreux ont été réalisées à l'aide du progiciel commercial Hydrus 2D dans l'objectif :

- de déterminer une conductivité hydraulique cible pour le montage de la digue expérimentale afin de borner temporellement la durée d'une infiltration ;
- de calibrer les protocoles de mesure d'IRE en temps ;
- de visualiser la forme du front de saturation théorique et de son évolution, et ainsi de placer au mieux l'instrumentation (sondes de suivi des paramètres d'état).

Afin de simuler des infiltrations, un modèle numérique (figure 4.1) respectant la géométrie de l'ouvrage DiguExpERT et la position de la source d'infiltration est réalisé. Il s'agit d'un modèle 2D aux éléments finis sur lequel les équations d'écoulement en milieu poreux non saturé (équations de Brinkman) sont résolues. Le milieu est homogène et isotrope et ses propriétés peuvent être choisies librement ou prises dans une banque de données. Une étude de sensibilité est réalisée pour deux typologies de sols sélectionnés : un « limon-sableux » et un « sable-limoneux ». Ensuite, pour ces deux types de sols, différentes conductivités hydrauliques sont fixées. La sollicitation est une charge hydraulique équivalente à une hauteur de 2 m par rapport au point d'injection dans le milieu.

La séquence temporelle de résultats présentée à la figure 4.1 correspond à l'étude d'un sol « sablo-limoneux » dont la conductivité hydraulique initiale est de $10^{-5} m.s^{-1}$. Cette séquence montre que l'écoulement est essentiellement gravitaire dans un premier temps avec un « bulbe » qui se développe à l'aplomb du point d'injection. Ensuite, le bulbe génère une saturation progressive du remblai.

La connaissance de la vitesse d'évolution d'un milieu est un paramètre capital lorsque l'on réalise une étude géophysique, que ce soit en variation temporelle ou en « absolu ». En effet, la résolution du problème inverse suppose que le milieu est invariant à l'échelle temporelle d'un protocole d'acquisition. En conséquence, il est nécessaire de quantifier cette évolution afin de déterminer le temps disponible pour réaliser un protocole. La modélisation réalisée sous Hydrus étant 2D,

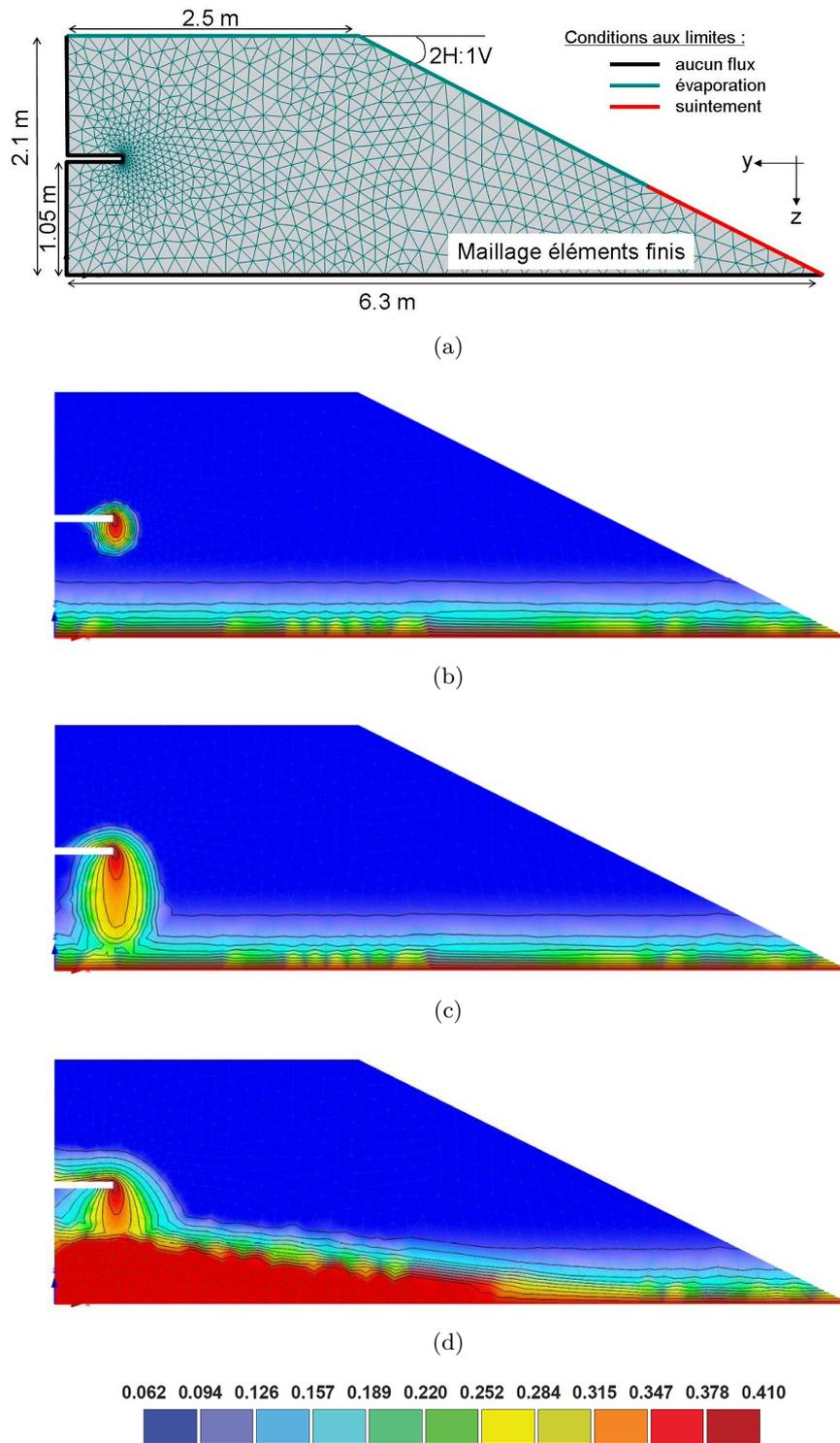


FIGURE 4.1 – Modélisation numérique 2D réalisée à partir du progiciel Hydrus 2D montrant l'évolution d'une infiltration au sein d'une partie sablo-limoneuse d'un ouvrage hydraulique. Le maillage en éléments finis ainsi que les conditions aux limites sont illustrées à la figure 4.1(a). Les figures 4.1(b) à 4.1(d) permettent de visualiser l'évolution théorique de la teneur en eau dans le remblai après 4.1(b) 2 h, 4.1(c) 10 h et après 4.1(d) 5 jours d'infiltration. L'échelle des couleurs représente la teneur en eau volumique (%).

une source « ponctuelle » équivaut à une source linéique en réalité. Or, l'infiltration réalisée dans la DiguExpERT est sensée être simulée par un « point source ». L'infiltration générée par une source linéique (à charge équivalente) est supérieure à une source ponctuelle. En conséquence, afin de ne pas sous-estimer la vitesse d'évolution du bulbe (pour déterminer un laps de temps de mesure d'IRE), l'hypothèse $2D$ est gardée (le phénomène étant plus rapide dans ce cas là).

De plus, bien que simplifié ($2D$ sans anisotropie), ce modèle a servi à optimiser le positionnement de l'instrumentation dans le corps de digue. En effet, le développement de l'infiltration étant principalement gravitaire, il est décidé de placer les sondes suivant l'implantation présentée à la figure 4.5, soit suivant un plan transversal à l'ouvrage.

En conclusion de cette étude numérique, notons que les modélisations ont montré qu'une conductivité hydraulique de $1.10^{-6}m.s^{-1}$ permettait d'obtenir une infiltration sur la durée désirée (3 semaines à 1 mois). Cependant, plusieurs études menées par le CER de Rouen ont indiqué que ce sable est caractérisé par une grande résistance à l'infiltration. C'est pourquoi, un compromis entre le résultat de la modélisation numérique et l'expérience du CER a été réalisé et a conduit à déterminer une conductivité hydraulique cible pour le sable de $5.10^{-5}m.s^{-1}$.

4.1.4.b Les études sur planches de matériaux

Une étude de réaction au compactage est réalisée au CER de Rouen avec pour objectif de mettre en œuvre un ouvrage avec une conductivité hydraulique donnée. Cette étude doit permettre de tester différents niveaux de compactage d'un sol et de caractériser la conductivité hydraulique sur chacun de ces compactages pour déterminer une conductivité hydraulique cible. Ainsi, un sol « sablo-limoneux » de type B2 (Classification GTR, [SETRA-LCPC, 1992]) est sélectionné pour sa plage de variation de la conductivité dans des gammes de compactage conventionnelles. Trois modalités de compactage sont comparées :

- i). compactage élevé avec sept passes d'un chargeur à chenilles sans passage d'un compacteur (quatre passes normales et trois passes supplémentaires) ;
- ii). compactage moyen (quatre passes du chargeur et deux passes de compacteur) ;
- iii). compactage « normal » suivant le Guide Terrassement Routier (quatre passes du chargeur et cinq passes de compacteur).

Le compactage est assuré au moyen d'un compacteur double cylindre, par application des conditions du GTR, c'est à dire par couches de 35 cm compactées à une vitesse de 2 km/h. Il peut être noté que ces spécifications ont été ensuite appliquées au montage de la digue expérimentale.

Afin de pouvoir déterminer les bonnes modalités de compactage et contrôler leur obtention lors du montage de la digue expérimentale, des mesures du taux de compactage, de teneur en eau et de conductivité hydraulique sont nécessaires. Les mesures de conductivité verticale sont réalisées à l'aide d'un perméamètre double anneau ouvert [NF X 30-418, 1998], le taux de compactage est mesuré par un GPV 25-40 (gammadensimètre à pointe à profondeur variable (25 à 40 cm), [NF P 94-061-1, 1996]) et enfin des prélèvements à la tarière sont réalisés pour déterminer la teneur en eau massique. Les résultats de l'étude en fosse sont synthétisés au niveau de la table 4.1, le plan des mesures est présenté en Annexe C et le détail des résultats est réalisé par Jacqueline *et al.* [2010].

TABLE 4.1 – Synthèse des résultats obtenus sur des planches de matériaux

Mise en Oeuvre	Taux de compactage (%)	Teneur en eau massique (%)	Perméabilité hydraulique verticale (10^{-5} m.s^{-1})
Chargeur à chenille	100.24 ± 0.53	6.18 ± 0.24	0.95 ± 0.02
VT2 - 5p	97.85 ± 1.89	6.10 ± 0.52	1.33 ± 0.37
VT2 - 2p	97.22 ± 0.12	5.68 ± 0.10	1.73 ± 0.16

Plusieurs notations telles que le taux de compactage sont utilisées dans ce chapitre concernant les propriétés géomécaniques des sols. Ainsi, les symboles ρ_d , w et θ représentent respectivement la masse volumique sèche, la teneur en eau massique et la teneur en eau volumique d'un sol. L'OPN (Optimum Proctor Normal) est un test normalisé permettant de déterminer la masse volumique maximale d'un matériau. ρ_d^{OPN} symbolise la masse volumique sèche à l'OPN et le taux de compactage représente un rapport entre la masse volumique sèche réelle du milieu compacté et la masse volumique sèche mesurée à l'OPN.

4.2 Le dispositif expérimental

4.2.1 Géométrie et structure de l'ouvrage

En résumé, il s'agit d'une portion de digue expérimentale (figure 4.2) de 23 m de long, 2.25 m de haut, 3.5 m de large en crête et 14.6 m en pied, sur une fondation limoneuse de 0.6 m d'épaisseur (l'épaisseur devait être de 0.5 m en théorie). Dans le sens transversal, la digue est constituée de deux matériaux différents (figure 4.3). La partie amont et la fondation de l'ouvrage sont réalisées en limon compacté pour atteindre une étanchéité optimale. Cette partie amont imperméable a pour objectif de représenter le noyau étanche d'un OHT. Côté aval, l'ouvrage est constitué de sable limoneux susceptible d'être le lieu d'infiltrations. Le talus possède une pente finale de 1V pour 2H côté aval (partie sableuse) et de 2V pour 3H côté amont (partie limoneuse).

Longitudinalement, la digue est divisée en 3 zones correspondant à des modes de compactage différents (figure 4.2). Dans chaque zone, un conduit transversal en PVC à haute densité a été installé horizontalement à travers la partie « amont » limoneuse, l'extrémité de ces tuyaux dépassant dans la partie « avale » sableuse. Ces tuyaux sont posés à mi-hauteur du corps de digue, c'est-à-dire entre les couches 3 et 4 de compactage. Leur rôle est de pouvoir par la suite y injecter de l'eau et ainsi simuler des infiltrations à travers la partie étanche dans la partie plus perméable (figure 4.2). Les paragraphes suivants présentent plus en détail la mise en œuvre des trois zones de l'ouvrage.

Zone 1 : mise en œuvre du matériau par chargeur à chenilles, puis compacté au compacteur tandem à double cylindre vibrant. Ce traitement amène à un objectif légèrement supérieur à l'objectif moyen de compactage. Par conséquent, cette zone est considérée comme légèrement « sur-compactée ». Le tuyau d'injection (non crépiné) dépasse de 0.5 m dans la partie sableuse.

Zone 2 : Les modalités de compactage sont similaires aux modalités de la Zone 1, avec une mise en œuvre du matériau par chargeur à chenilles puis compacté au compacteur VT2, mais avec seulement une passe en vibrant plus une passe en statique. L'objectif est d'atteindre un

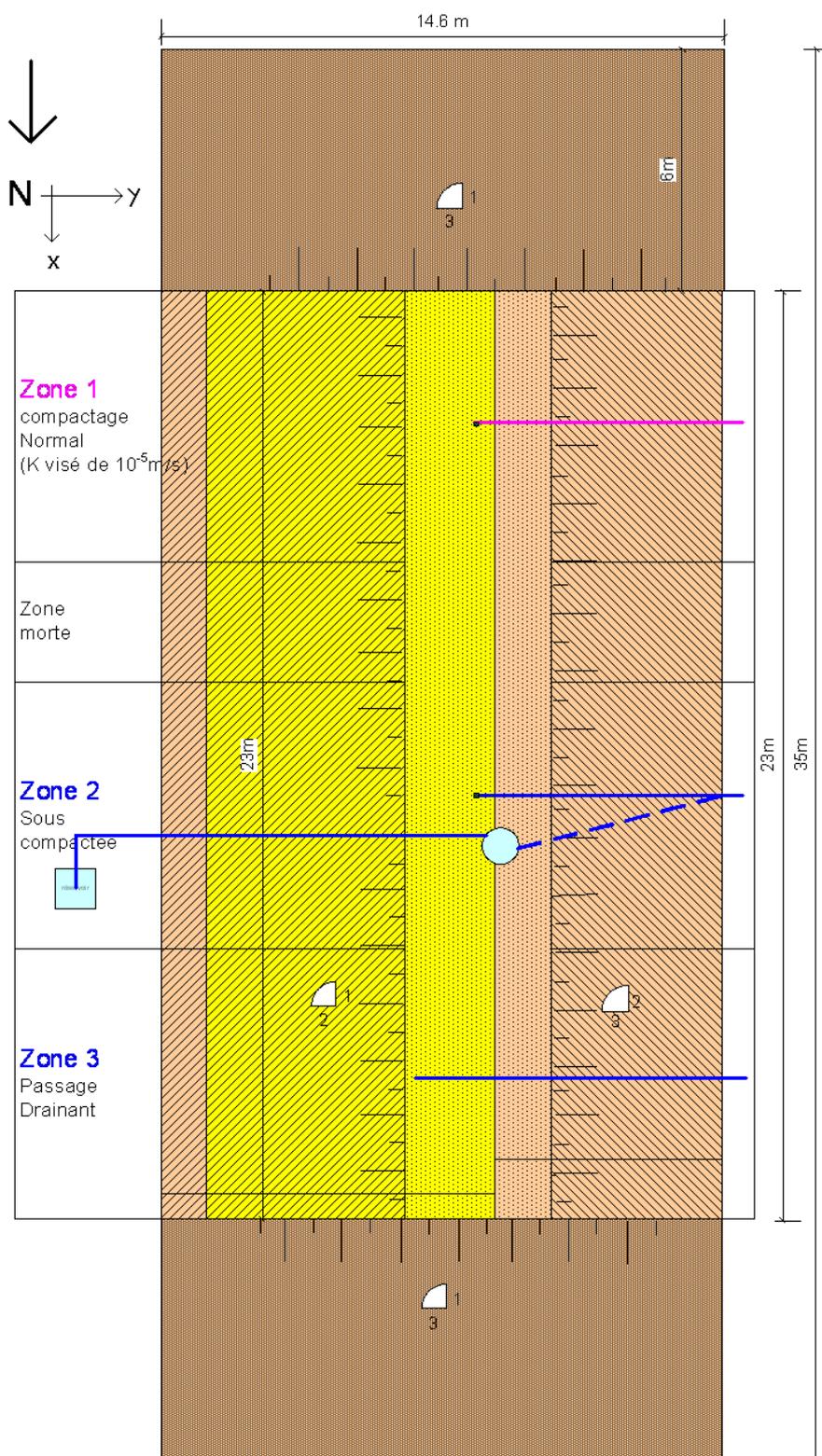


FIGURE 4.2 – Schéma de la digue expérimentale vue en plan avec dimensions et zones d'expérimentation. En jaune la partie sableuse, en marron clair les parties limoneuses, et en marron grisé les rampes d'accès. Les tuyaux d'injection à travers le remblai limoneux et le système d'injection (cuves) sont également représentés. d'après *Jacqueline et al. [2010]*.

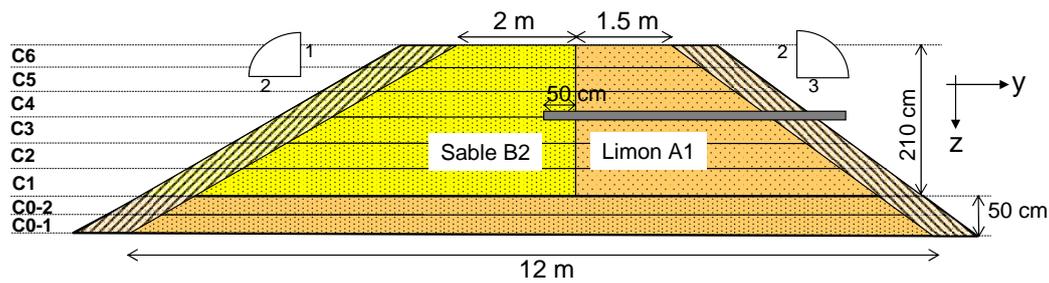


FIGURE 4.3 – Schéma de la digue expérimentale vue en coupe transversale avec dimensions et zones d'expérimentation. En jaune la partie sableuse, en marron clair les parties limoneuses. Les surfaces hachurées correspondent aux volumes de matériel supprimés pour obtenir la géométrie finale. Un tuyau d'injection traversant le limon positionné à mi-hauteur du remblai est également représenté.

compactage légèrement inférieur à la Zone 1. Par conséquent cette zone est considérée comme "sous-compactée". Le tuyau d'injection (non crépiné) dépasse de 0.5 m dans la partie sableuse.

Zone 3 : Modalité de compactage identique à la Zone 2. L'objectif est aussi d'obtenir une compacité légèrement inférieure à l'objectif moyen de compactage. À la différence de la Zone 2, le tuyau d'injection dépasse de 1.5 m dans la partie sableuse et il est crépiné sur 1 m à partir de son extrémité afin de générer une infiltration plus diffuse que celle prévue en Zone 2 (figure 4.2).

4.2.2 Le système hydraulique d'injection

L'alimentation de la digue en eau se fait par un tuyau annelé permettant de déplacer le dispositif d'une zone d'infiltration à une autre, et par un tuyau PVC dans le sol, à travers le remblai amont étanche en limon. Le réservoir de mise en charge alimentant la digue est une cuve cylindrique de 2 m de hauteur, de couleur beige (pour limiter les variations de température) positionnée en crête de l'ouvrage. Un capteur de pression a été rajouté pendant la première injection en Zone 1 afin de connaître le niveau d'eau à l'intérieur du réservoir.

L'extrémité des tuyaux, crépinés ou non, est recouverte d'un géotextile pour empêcher l'obstruction par du sable. Enfin, chaque tuyau est entouré d'un bouchon de bentonite au niveau de la transition limon/sable afin d'empêcher tout retour d'eau le long des tuyaux vers la partie limoneuse.

4.2.3 Étude des propriétés de l'ouvrage avant infiltration

Les mesures réalisées lors du montage permettent de contrôler les paramètres physiques tels que la masse volumique, la teneur en eau et la conductivité des matériaux lors de la conception. Ce contrôle permet de respecter le cahier des charges dans l'objectif que les temps d'infiltrations ne dépassent pas les durées prévues. De plus, cette étude apporte des informations sur la composition initiale de l'ouvrage (densité à l'instant T_0). Cet *a priori* peut ainsi être utilisé pour alimenter des modèles initiaux d'inversion et améliorer l'interprétation des résultats.

4.2.3.a Évaluation du degré de compactage

Des mesures permettant de caractériser spatialement l'état réel des matériaux mis en place ont été réalisées pendant la mise en œuvre et à chaque couche de compactage : mesures au GPV (Gamma-densimètre à Profondeur Variable) et prélèvements pour teneurs en eau. Les mesures sont synthétisées au niveau de la table 4.2.

TABLE 4.2 – Synthèse des mesures de teneur en eau pondérale, de masse volumique sèche et humide et de taux de compactage réalisées lors du montage des couches de l'ouvrage au CER de Rouen. Le positionnement des mesures est illustré à la figure C.2 à l'Annexe C.

	Sable B2	Sable B2-Z1			Sable B2-Z23			Limon			
	W % GPV	MASSE VOLU. HUMIDE t/m3	MASSE VOLU. SECHE t/m3	TAUX DE COMPAC. (%)	MASSE VOLU. HUMIDE t/m3	MASSE VOLU. SECHE t/m3	TAUX DE COMPAC. (%)	W % GPV	MASSE VOLU. HUMIDE t/m3	MASSE VOLU. SECHE t/m3	TAUX DE COMPAC. (%)
C6	9.7	2.15	1.96	108.34	2.09	1.91	105.67	16.4	2.10	1.80	100.18
	0.4	0.01	0.00	0.18	0.03	0.03	1.50	0.4	0.01	0.02	0.85
C5	9.3	2.13	1.94	107.10	2.09	1.91	105.71	16.4	2.09	1.80	99.84
	0.7	0.01	0.01	0.55	0.04	0.02	1.12	0.4	0.00	0.01	0.33
C4	6.6	1.97	1.85	98.24	1.95	1.83	97.15	16.4	2.05	1.77	98.12
	0.5	0.03	0.02	1.11	0.05	0.04	1.89	1.0	0.02	0.00	0.26
C3	6.2	1.99	1.87	103.36	1.93	1.82	100.30	14.0	2.04	1.79	99.35
	0.2	0.01	0.00	0.23	0.02	0.02	0.90	1.9	0.01	0.03	1.49
C2	5.5	1.94	1.84	101.38	1.90	1.80	99.67	17.1	2.08	1.77	97.95
	0.5	0.01	0.01	0.48	0.01	0.01	0.73	0.8	0.03	0.04	2.32
C1	5.5	1.94	1.84	101.70	1.87	1.77	97.56	17.0	2.08	1.78	98.72
	0.7	0.07	0.06	3.21	0.03	0.03	1.79	0.3	0.02	0.01	0.82
C02	-	-	-	-	-	-	-	17.3	1.91	1.63	90.59
	-	-	-	-	-	-	-	0.4	0.01	0.01	0.41
C01	-	-	-	-	-	-	-	16.9	2.06	1.77	98.11
	-	-	-	-	-	-	-	0.5	0.03	0.03	1.72

Des mesures ont également été réalisées après achèvement du montage de la digue, pour caractériser verticalement l'état réel de compactage des matériaux mis en place dans le corps de digue (figure 4.4). Ainsi, des profils verticaux de masse volumique ont été réalisés par le CER de Rouen au moyen d'une Double Sonde Gamma (GDS200), à partir de la surface et jusqu'à 2 m de profondeur avec un pas de mesure de 25 mm [NF P 94-062, 1997].

Les quatre profils de GDS200 présentés à la figure 4.4 sont réalisés dans la digue à partir de la crête, deux dans la partie « avale » sableuse et deux dans la partie « amont » limoneuse. Leur positionnement est illustré à la figure C.2 à l'Annexe C. Les profils ont été réalisés en avril 2010, juste après l'achèvement du compactage des six couches de la digue.

De 0 à 0.7 m de profondeur, le sable présente une teneur en eau pondérale de l'ordre de 9 % alors que de 0.7 à 2 m la teneur en eau avoisine les 5 à 6 %. La teneur en eau pondérale du limon est homogène sur toute la hauteur avec une valeur moyenne d'environ 16 %.

Les résultats des essais à la Double Sonde Gamma GDS200 donnent accès à la masse volumique en place (humide). Ils sont tout d'abord exprimés en masse volumique sèche grâce aux teneurs en eau mesurées, puis en taux de compactage par rapport aux valeurs à l'OPN du sol considéré. Toutes les couches, excepté la couche C2 dans le sable et la couche C5 dans le limon, atteignent l'objectif de compactage « q4 ». On observe une différence de 3% de taux de compactage entre la Zone 1 légèrement sur-compactée et la zone sous-compactée (Zones 2 et 3), comme désiré par le cahier des charges. Ce résultat est également conforté par les résultats couche par couche (table 4.2).

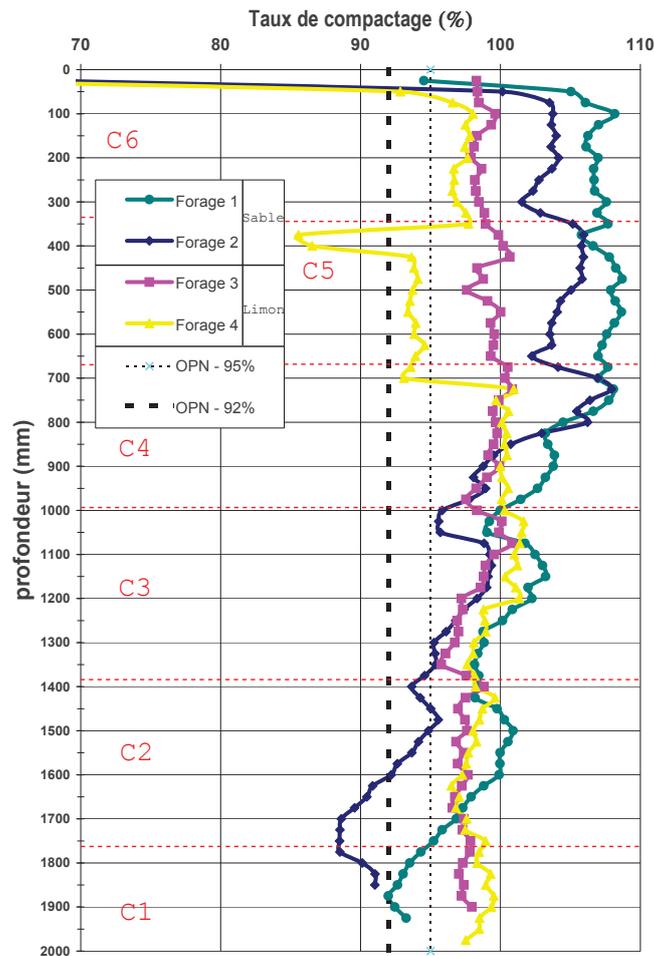


FIGURE 4.4 – Illustration du taux de compactage au niveau de quatre profils verticaux réalisés à partir d'un GDS200 sur quatre forages dans l'ouvrage « DiguExpERT » au CER de Rouen. Les tracés en pointillés rouges correspondent aux moyennes des séparations entre couche obtenues par nivellement.

La couche C5 du limon présente un taux de compactage moyen inférieur à l'objectif « q4 » de 93.7 %. De plus, le sable a été moins bien compacté sur les couches C1 – C3 du fait de la teneur en eau plus faible ($w=5$ à 6 %) par rapport aux couches C4 – C6 ($w=7$ à 8 %). Un gradient du taux de compactage apparaît sur la zone sableuse contrairement à la zone limoneuse. La couche C2 au niveau de la zone sous-compactée (Zone 2 et Zone 3) présente un compactage inférieur à l'objectif « q4 » avec un taux de compactage moyen d'environ 92 % et un taux de compactage en fond de couche de 88 %. Il est aisé de voir l'intérêt de cette information car une couche sous-compactée peut servir de zone préférentielle d'écoulement et ainsi dévier l'infiltration du comportement théorique attendu.

4.2.3.b Instrumentation de suivi des paramètres d'état

La digue expérimentale a été instrumentée durant la phase de montage au moyen de diverses sondes pour le suivi des variations temporelles de certains paramètres : teneur en eau, température. Cette connaissance doit permettre à la fois de valider les résultats d'inversion par Imagerie de Résistivité Électrique et de corriger des effets externes (variations de température) si ceux-ci sont trop élevés. La figure 4.5 schématise sous forme d'un bloc 3D la position des sondes TDR et PT100 dans la zone sableuse de la DiguExpERT.

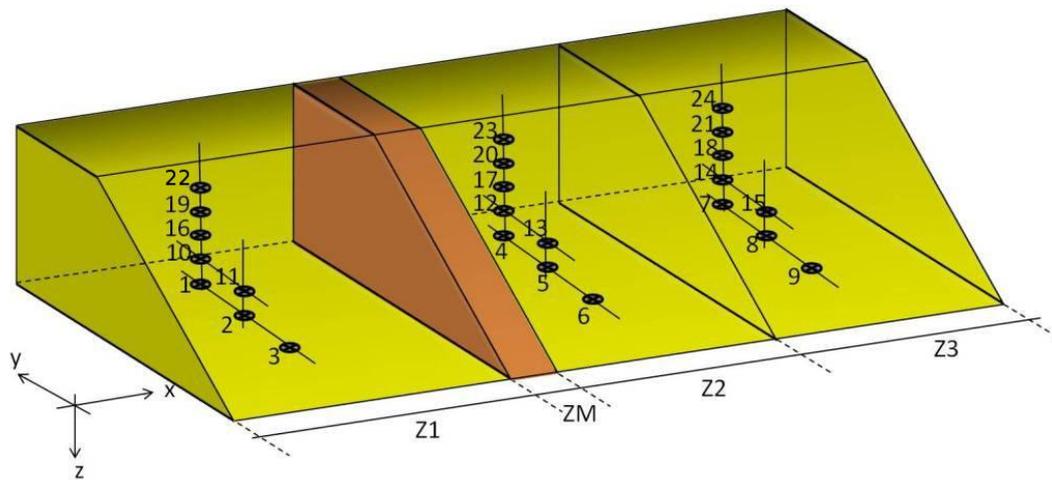


FIGURE 4.5 – Schéma décrivant la position et la numérotation des sondes TDR et PT100 présentes dans la digue expérimentale au niveau des Zones 1, 2 et 3.

La figure 4.6 illustre la position théorique des sondes PT100 et TDR ainsi que le passage des câbles IRE. Cette figure correspond à une coupe transversale placée au centre de la Zone 1 (Z1) par rapport à la figure 4.5. Ce positionnement a été réalisé en fonction des résultats obtenus à partir de l'étude numérique d'écoulement en milieu poreux (figure 4.1).

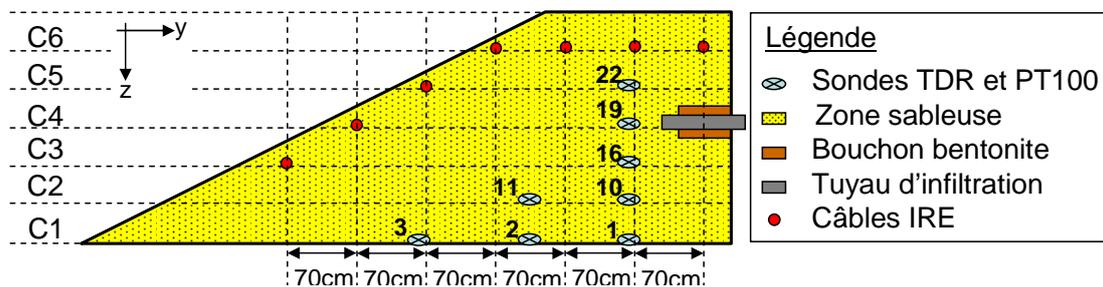


FIGURE 4.6 – Schématisation de la section transversale de la partie sableuse de la digue au centre de la Zone 1 avec position des sondes de mesure PT100 et TDR. Les sections transversales des câbles de mesure IRE sont également présentées.

Température

La fréquence d'échantillonnage des mesures de température à l'intérieur du remblai est de 30 minutes. La figure 4.7 présente une photographie des sondes de température et de teneur en eau installées entre les couches de la digue. La température de l'eau injectée a également été suivie au moyen d'une sonde de température installée dans le réservoir de mise en charge.

Teneur en eau

Pour chaque zone d'infiltration, la section transversale contenant le point d'entrée de l'eau est équipée de 8 sondes TDR mesurant la teneur en eau massique (figure 4.7). Ces sondes sont positionnées par paire TDR-PT100 pour suivre les paramètres aux mêmes endroits (mais néanmoins espacées de 50 cm pour ne pas s'influencer, figure 4.7). La numérotation des paires de sondes TDR-PT100 dans la Zone 1 est indiquée au niveau de la figure 4.6. La numérotation des sondes

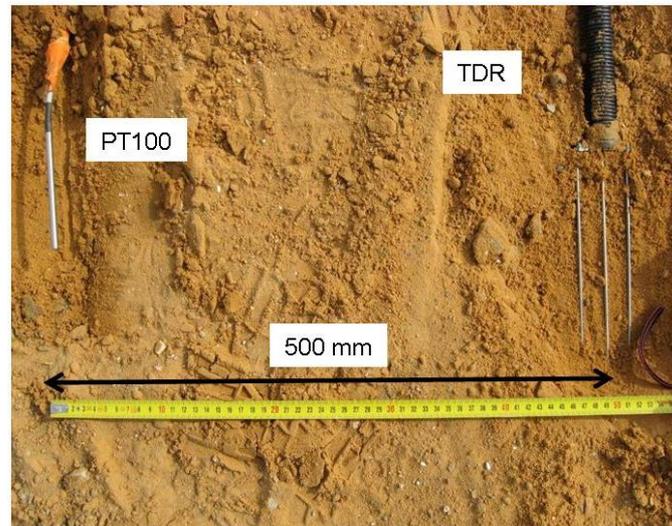


FIGURE 4.7 – Vue des deux types de sondes présentes dans le remblai et espacées de 50 cm. La mesure de température est réalisée par une sonde PT100 (à gauche) alors que la sonde TDR (à droite) permet la mesure de la teneur en eau massive.

dans les autres zones suit la même logique (figure 4.5).

Monitoring par IRE

La digue expérimentale a été instrumentée à l'aide d'un dispositif de 96 électrodes à demeure afin de réaliser un suivi temporel par IRE pendant les infiltrations d'eau dans chaque zone. Les deux câbles multi-électrodes ont été mis en place à la base des couches de remblai C3 à C6 (donc posés au-dessus des couches C2 à C5) de sorte que les électrodes se trouvent à 20 cm de la surface du sol côté sable, ce qui améliore la pérennité du système et la qualité des mesures. Afin d'assurer un meilleur contact électrique avec le milieu, chaque électrode a été entourée d'une petite épaisseur de bentonite avant d'être recouverte par le matériau de la couche suivante de remblai.

Les points de passage des câbles d'IRE dans la section transversale sont rappelés sur la figure 4.6. L'implantation spatiale des 96 électrodes d'IRE à la base des couches C3 à C6 a été préalablement optimisée au cours d'une étude spécifique par modélisation numérique (cf. Chapitre 3).

4.3 Les essais d'infiltration

4.3.1 Déroulement des essais

Les campagnes d'injection d'eau ont été réalisées séquentiellement dans chacune des zones de la digue expérimentale. En effet, ces zones avaient été conçues pour tester des conditions de compactage (et donc de conductivité hydraulique) différentes. La charge hydraulique nominale étant la même pour chaque zone, ces spécifications doivent offrir une gamme suffisamment large de cinétiques de phénomènes, et donc de durées d'observations. Ceci était primordial pour optimiser les chances que les durées d'observation soient compatibles à la fois avec les durées d'acquisition des IRE et le planning de thèse.

Pour chaque infiltration, la charge hydraulique a été maintenue constante durant toute la durée, hormis quelques incidents liés au matériel. Le débit et les volumes injectés ont été suivis en continu. L'intention était de poursuivre chaque essai jusqu'à ce que le débit d'injection, après avoir observé une décroissance, atteigne un plateau de stabilisation. L'hypothèse est que l'écoulement à charge constante a alors atteint un régime quasi-stationnaire, avec des cheminements de l'eau définis et une répartition spatiale du degré de saturation stable ou très lentement variable. Dans la pratique, cette stratégie a été adaptée à chaque essai.

La première expérimentation a donc eu lieu dans la *Zone 1*, plus fortement compactée que les deux autres zones et donc théoriquement moins perméable. Cette expérimentation s'est déroulée du 2 septembre au 13 octobre 2010 soit pendant environ 6 semaines. Elle a été arrêtée lorsqu'un régime quasi permanent a été atteint, d'après l'observation du débit d'injection.

La seconde expérimentation a eu lieu dans la *Zone 3*, légèrement sous-compactée par rapport à la *Zone 1* et donc théoriquement plus perméable. Le tuyau étant crépiné sur cette partie, on pouvait s'attendre à l'infiltration la plus rapide des trois. Cette expérimentation a duré du 8 novembre au 25 novembre 2010, soit un peu plus de deux semaines. Elle a été stoppée avec l'arrivée de l'hiver, sachant qu'un régime quasi permanent avait été atteint. Les essais ont ensuite été mis en veille pendant les mois d'hiver 2010/2011 afin de protéger le dispositif de mise en charge et d'injection contre le gel.

Enfin, la troisième expérimentation a eu lieu dans la *Zone 2*, compactée suivant la même modalité que la *Zone 3*, donc partant de la même perméabilité « théorique », mais possédant un tuyau d'injection non prolongé et non crépiné, comme en *Zone 1*. On s'attendait donc à ce que cette expérimentation ait une durée intermédiaire. Elle a duré du 5 au 19 avril 2011 soit environ deux semaines. Notons que la *Zone 2* est particulière puisqu'elle a fait l'objet de deux types d'infiltrations :

- i). Une période d'infiltration d'eau du réseau avec l'intention de poursuivre jusqu'à atteinte d'un régime quasi-permanent ;
- ii). Une courte période d'injection de saumure afin d'amplifier les contrastes de résistivité et de simuler une stratégie utilisée sur site pour mettre une fuite en évidence et la localiser.

L'infiltration de la *Zone 2* fut donc la plus rapide de toutes, ce qui montre la difficulté de « calibrer » à l'avance ce type d'essais. De plus, l'éventualité de chemins préférentiels d'écoulement est toujours possible. Rétrospectivement, ces difficultés justifient le choix d'avoir conçu la digue en trois modalités différentes (zones de vitesses d'infiltration différentes) pour maximiser les chances de réussite.

L'étude au cas par cas des infiltrations n'apportant qu'une information comparative entre les différentes modalités de compactage, seule l'infiltration en *Zone 2* sera présentée au cours du Chapitre. En effet, les expérimentations réalisées en *Zone 2* comportent les résultats les plus poussés et les plus pertinents vis-à-vis de l'étude.

4.3.2 Suivi de la teneur en eau du sol en place

Au cours de la troisième infiltration sur la partie centrale de la digue (*Zone 2*), les sondes TDR (figure 4.7) réagissent temporellement suite au démarrage de l'injection d'eau. La figure 4.8 illustre la réponse temporelle de plusieurs sondes TDR positionnées en *Zone 1*, *2* et *3*.

L'étude de la figure 4.8 tend à indiquer que l'infiltration ne gagne pas (ou en faible proportion) la couche *C1* au niveau de la *Zone 2* car les TDR 4, 5 et 6 ne répondent pas de manière significative. Cependant, le positionnement de ces sondes à l'interface limon-sable peut limiter la détection d'une évolution de la teneur en eau dans la partie sableuse (car la teneur en eau du limon est déjà bien supérieure à la teneur en eau du sable). En conséquence, il est difficile d'interpréter les faibles évolutions observées comme des témoins du passage de l'infiltration.

La figure 4.8 illustre que l'essai d'injection dans la *Zone 2* affecte en premier lieu cette zone. Ensuite, des indices du passage de l'infiltration sont détectés par la réaction des sondes TDR n° 10 et 11 en *Zone 1* et en *Zone 3* avec les TDR n° 14-15 et 18. Nous remarquons que les sondes TDR qui réagissent correspondent essentiellement à la zone de faiblesse détectée à la double sonde GDS200 (figure 4.4) c'est à dire à la base de la couche *C2*.

Les sondes TDR soumises à l'infiltration réagissent pour atteindre un palier correspondant à la saturation du matériau. Ce niveau reste constant sur environ huit jours puis chute fortement sur les TDR n° 12, 13, 17 et 20 et lentement sur les TDR n° 23 et 5. Cette forte diminution correspond temporellement à l'injection de la saumure (figure 4.8, trait vertical bleu). La variation occasionnée par l'arrivée de saumure déstabilise les sondes TDR en sortant de leur plage de mesure, et entraîne la « chute » du signal.

4.3.3 Suivi de la température du sol en place

L'évolution de la température au sein de l'ouvrage est mesurée au cours du temps au niveau de sondes PT100. Cette évolution est représentée au niveau de la figure 4.9. Celle-ci montre une augmentation de la température au niveau des sondes PT100 n° 4-12-13-17-20 et 23. Nous remarquons une augmentation de la température dans le sol de 1 °C sur 5 jours avant le déclenchement de l'injection, ceci pouvant être lié à l'augmentation de la température extérieure. La réaction des sondes PT100 est similaire à celle des sondes TDR correspondantes. On peut noter que la variation de température est légère sur la PT100 n° 6 alors que la réponse est plus visible sur la TDR n° 6.

En conséquence, lorsqu'une sonde de température est présente à proximité du début de l'infiltration (proche du réservoir) celle-ci permet de visualiser « facilement » la présence d'une fuite. *A contrario*, lorsqu'une fuite se propage en un temps trop élevé, la température de l'eau de la fuite se rapproche rapidement de la température du remblai, limitant ainsi la détection de fuites diffuses et lentes. Cependant, d'un point de vue plus sécuritaire, les fuites « dangereuses » sont supposées rapides. Plus la vitesse de ces fuites est élevée et plus leur température tend vers la température du réservoir.

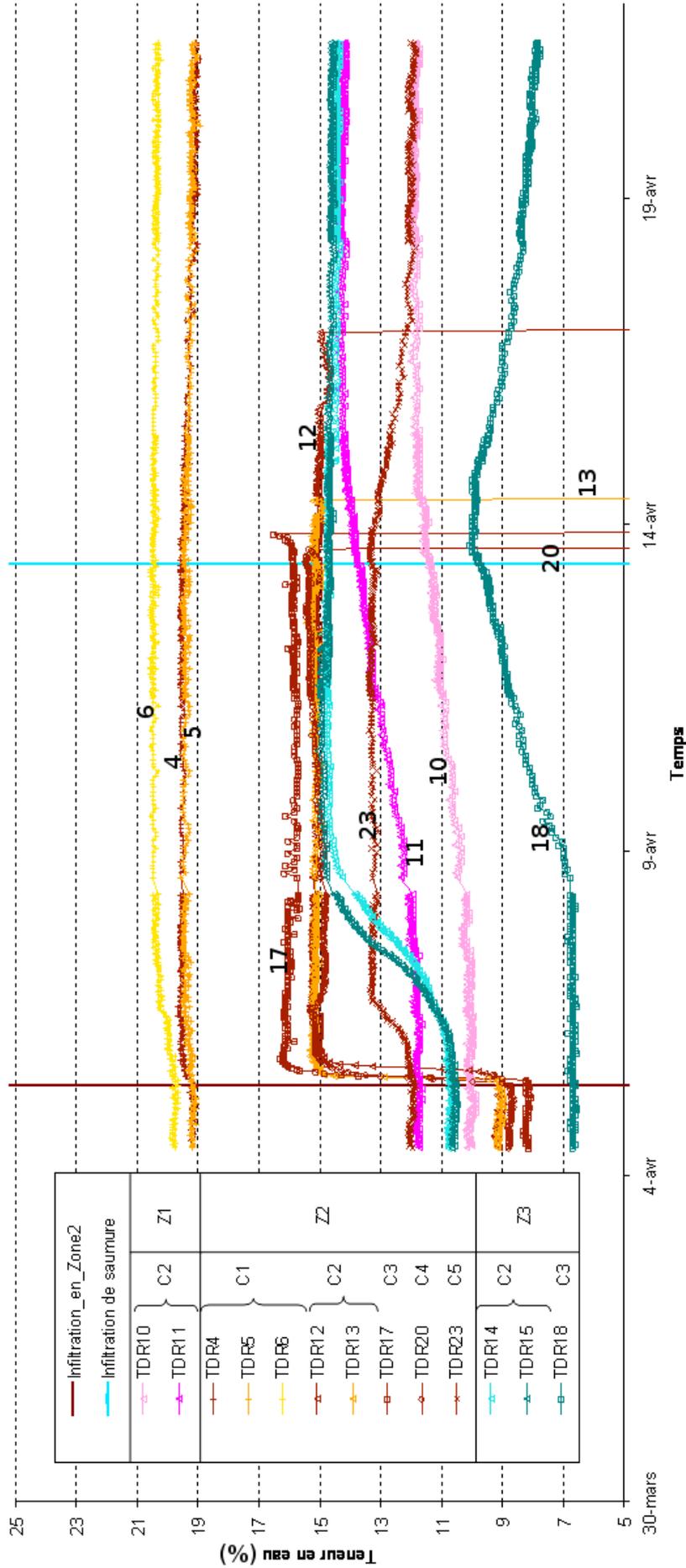


FIGURE 4.8 – Évolution de la teneur en eau massique (%) au cours de l'infiltration en Zone 2 mesurée à partir de différentes TDR présentes dans le remblai en Zone 1, 2 et 3. Seules les sondes TDR présentant une évolution au cours de l'infiltration sont représentées. Le trait vertical marron illustre le début de l'injection d'eau et le trait vertical bleu symbolise le début de l'injection de saumure.

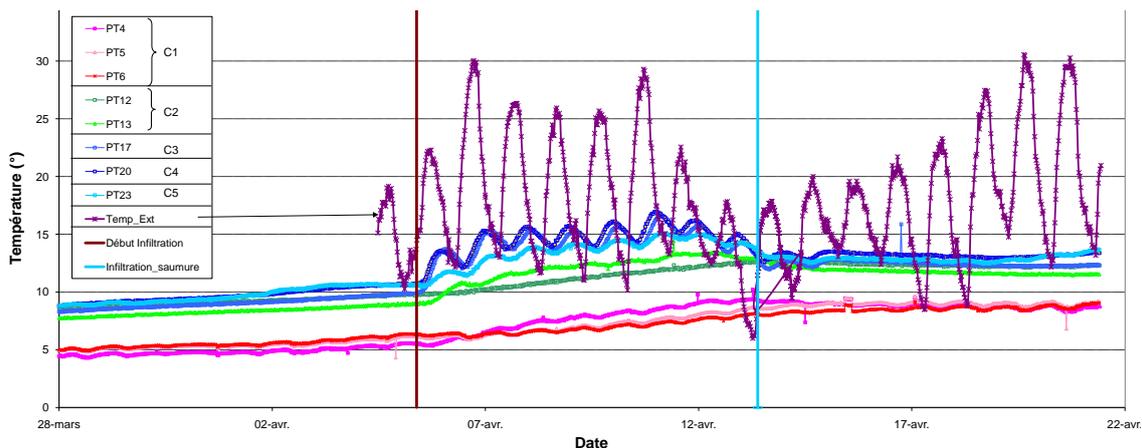


FIGURE 4.9 – Évolution de la température au cours de l'infiltration en Zone 2 mesurée à partir de différentes sondes PT100 présentes dans le remblai et à l'extérieur du remblai. Le trait vertical marron illustre le début de l'injection d'eau et le trait bleu vertical symbolise le début de l'injection de saumure.

La figure 4.9 présente à la fois la température extérieure et interne à l'ouvrage. Cette représentation permet de montrer :

- le décalage temporel de la variation diurne entre les deux types de données ;
- la diminution de l'amplitude des variations en fonction de la profondeur.

Ces deux types de décalage proviennent de l'inertie thermique du matériau composant la digue. En conséquence, des variations diurnes maximales de 20°C se produisent à l'extérieur alors que des variations maximales de 3°C se produisent au sein de l'ouvrage. Ainsi, des variations thermiques assez faibles sont attendues au cours de l'expérimentation sur la Zone 2. Afin de limiter les effets thermiques, la majorité des acquisitions en variations temporelles sont réalisées à des moments équivalents de la journée.

4.3.4 Suivi des volumes d'eau injectés dans le sol

Le volume d'eau est calculé en intégrant le débit toutes les trois secondes. La figure 4.10 présente les volumes injectés dans la Zone 2 de la digue. Ainsi, il est possible de constater qu'en 15 jours, 7700 litres ont été injectés dans la Zone 2.

4.4 Étude d'auscultation

Afin de valider les développements de la thèse, une série de campagnes possédant des objectifs variés sont traités dans cette section. Les jalons nécessaires à la validation des objectifs ont ainsi été regroupés autour de quatre études différentes :

- une campagne 2D avec électrodes en surface intitulée « MG-32-S » ;
- une campagne 2D avec électrodes enfouies intitulée « MG-25-E » ;
- une campagne 3D avec électrodes en surface intitulée « MG-3D-S » ;
- une campagne 3D avec électrodes enfouies intitulée « PDP-Opt-E ».

Le tableau 4.3 regroupe les caractéristiques des quatre études. Les symboles « MG », « PDP » et « Opt » représentent respectivement des protocoles de mesure « Multi-Gradient », « Pôle-Dipôle » et « Optimisés ». Les lettres « S » et « E » indiquent respectivement que les électrodes

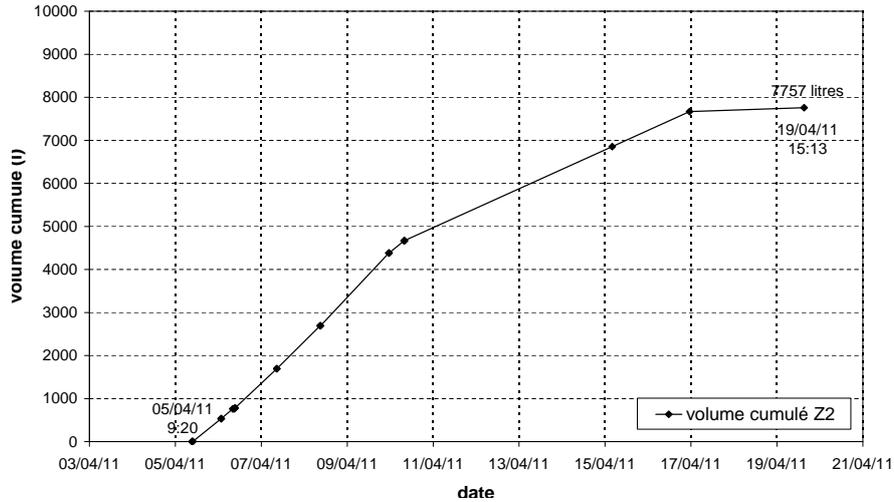


FIGURE 4.10 – Volume cumulé injecté dans l'ouvrage en fonction du temps en Zone 2 entre le 5 avril et le 19 avril.

sont en surface et enfouies. Chacune des campagnes suivantes présente une étude en variation temporelle. Pour les inversions avec le progiciel Res2Dinv® les options suivantes sont sélectionnées : a) « Least-squares smoothness constraint », b) « Simultaneous inversion », c) « difference of data » et d) « First data set » [Loke, 2011]. Ces options sont sélectionnées en raison de la meilleure qualité des résultats issus de ces inversions.

TABLE 4.3 – Caractéristiques des campagnes d'acquisition réalisées lors de l'infiltration en Zone 2 (nombre d'électrodes, code d'inversion, ...) et des méthodes d'inversion utilisées.

Campagnes	MG-32-S	MG-25-E	MG-3D-S	PDP-Opt-E
Dimensionnalité	2D	2D	3D	3D
Normalisation	Oui	Oui	Non	Non
Code d'inversion	Res2Dinv®	Res2Dinv®	Res3Dinvx64®	InGEOHT - 3D ⁻
Nombre d'électrodes	32	25	64	29
Protocole	multi-gradient	multi-gradient	multi-gradient	pôle-dipôle
Variation temporelle	Oui	Oui	Oui	Oui
Avec contrainte	Oui	Oui	Non	Oui

4.4.1 Campagne d'étude 1 (MG-32-S)

4.4.1.a Présentation de la campagne d'étude

L'objectif de l'étude est de valider la capacité de la méthode IRE 2D dans son utilisation « quasi-conventionnelle » d'imager une fuite dont le comportement est 3D sur un ouvrage lui aussi 3D. En complément, une étude portant sur l'apport d'une technique de normalisation de l'effet de la topographie est intégrée.

Pour cet exemple, l'inversion se base sur des données provenant d'une ligne de 32 électrodes positionnées en surface, temporairement installées sur la digue au cours des essais d'injection en Zone 2. L'implantation spatiale des électrodes est schématisée sur la figure 4.11(a).

Les électrodes sont alignées suivant une ligne se trouvant à la limite entre crête et talus « aval » et positionnées suivant deux espacements réguliers. Le premier espacement de 0,5 m au dessus de la zone d'intérêt permet d'augmenter la résolution sur cette zone. Le second espacement est de 1,5 m en dehors de la zone d'intérêt afin d'augmenter la profondeur d'investigation (augmentation de la couverture d'électrodes).

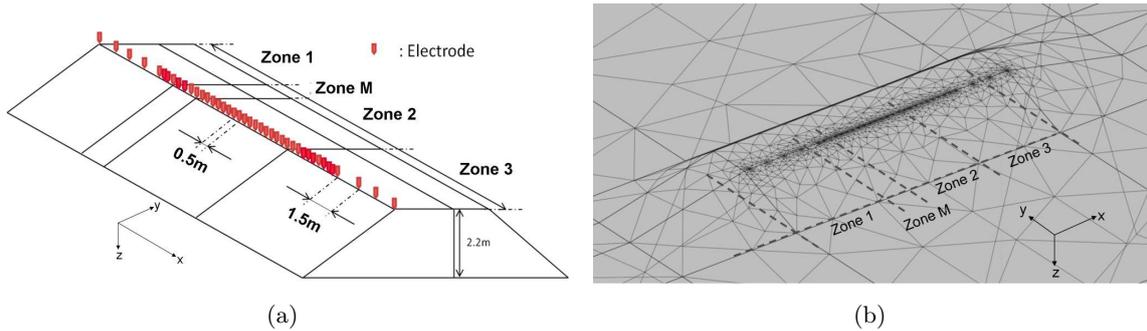


FIGURE 4.11 – Schéma d'implantation des électrodes pour le protocole d'acquisition à 32 électrodes en surface 4.11(a) et maillage d'éléments finis utilisé pour la technique de normalisation de l'effet de la topographie 4.11(b).

Une séquence d'acquisition de type multi-gradient (Annexe A) est répétée à différents instants de l'essai d'injection. Ces séquences sont hautement parallélisables ce qui permet de limiter la durée d'acquisition. La séquence utilisée contient 2592 quadripôles. La durée d'acquisition d'un protocole est de l'ordre de 40 minutes environ.

La figure 4.12 représente l'évolution temporelle des teneurs en eau massiques enregistrées au cours de l'essai d'injection en *Zone 2*, et sur laquelle il est indiqué les différents instants d'acquisition de la séquence MG-32-S. Remarquons tout d'abord que la première acquisition (T_0) n'intervient qu'après le démarrage de l'injection d'eau (liée à des difficultés matérielles). Des acquisitions antérieures au 5 avril auraient permis la visualisation de l'amorce de l'infiltration dans la *Zone 2* au niveau de l'interface entre les couches *C3* et *C4*, et ainsi formées un réel instant initial de référence.

L'arrivée d'eau dans la *Zone 2* est confirmée par les réponses des sondes TDR n° 12, 13, 17 et 20 situées à proximité de l'infiltration (figure 4.5). Ensuite, à partir de l'instant T_1 , les sondes TDR n° 14 et 15 (situées en *Zone 3*) ainsi que la sonde TDR n° 23 commencent à réagir, et se stabilisent à l'instant T_5 . Cet instant marque ainsi la fin de variation des réponses des sondes TDR précédentes mais aussi le début de variation, plus lissée, des signaux des sondes TDR n° 10, 11 (situées en *Zone 1*) et 18 (située en *Zone 3*).

À partir de l'instant T_7 la nature de l'eau d'infiltration est modifiée par de la « saumure » (eau salée à environ 30 g/l de sel). Cette modification est directement répercutée sur les sondes TDR à proximité de l'infiltration, entre les instants T_7 et T_8 , par une chute brutale des signaux enregistrés. Les sondes TDR n'étant pas calibrées pour mesurer une teneur en eau dans un milieu saturé en saumure la réponse de la sonde est coupée. À noter que le signal de la sonde

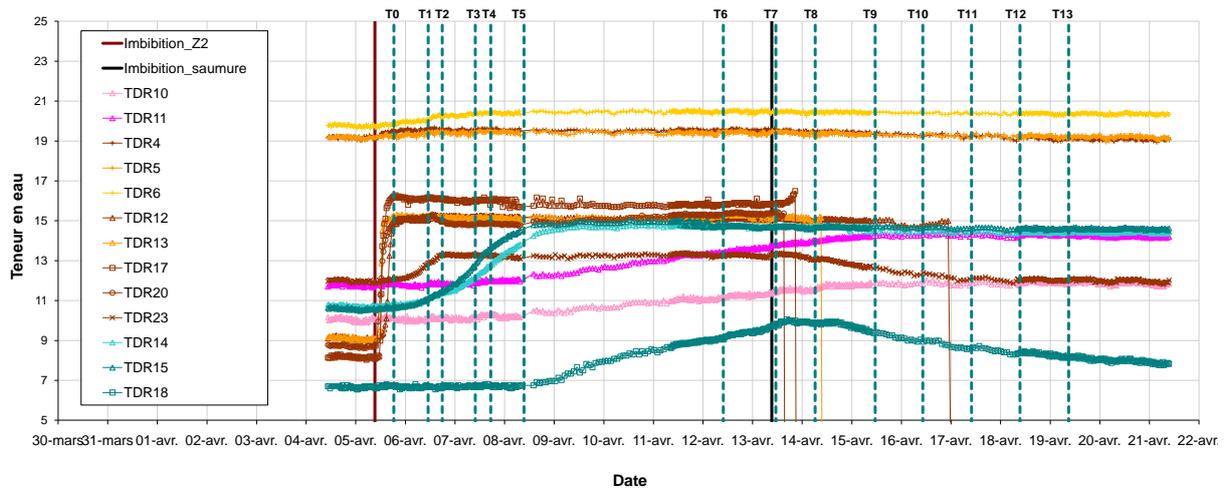


FIGURE 4.12 – Réponse des sondes TDR à l'évolution de l'infiltration au cours de l'essai en Zone 2. Les traits verts verticaux représentent les différentes séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle.

TDR n° 18 commence à diminuer à partir de l'instant T_8 , pouvant indiquer une désaturation à ce niveau-là. Cette diminution intervient au même moment que la diminution de signal de la TDR n° 23, ce qui indique probablement une perturbation des sondes TDR par l'arrivée de la « saumure ». À partir de l'instant T_{10} et jusqu'à l'instant T_{12} le système ne présente plus de variations notables hormis une légère baisse de signal de la TDR n° 18. Certaines de ces évolutions peuvent être visualisées spatialement grâce à la figure 4.13.

4.4.1.b Présentation des résultats

La planche présentée figure 4.14 illustre les inversions obtenues avec le progiciel Res2dinv® sur les séries de données MG32-S sans normalisation de l'effet de la topographie. Cette figure contient les coupes de résistivité inversées pour les instants d'acquisition T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_5 et T_6 (figure 4.12). À partir de ces résultats nous pouvons tout d'abord conclure qu'il est presque impossible de réaliser une interprétation en termes d'évolution temporelle en n'observant que les coupes « instantanées » (figure 4.14). Cette constatation pourrait être plus nuancée si le milieu était relativement moins perturbé et les variations plus élevées. Ainsi, l'interprétation en termes d'évolution est plus facile à réaliser lorsque l'on étudie les résultats en « inversion d'écart temporels » (figure 4.15). Une notation particulière est utilisée pour définir ces derniers résultats. Ainsi, le résultat d'inversion noté $TL1$ correspond à l'évolution entre l'instant de référence T_{ref} (par exemple T_0) et l'instant T_1 .

Au niveau de l'erreur « RMS », les premières reconstructions retrouvent bien les données mesurées car l'erreur est inférieure à 1%. Dès l'instant T_7 , l'erreur dépasse 1% (ce qui reste une très bonne valeur du critère) puis atteint 2% à T_8 et enfin dépasse 6% après cet instant. À partir de l'instant T_7 , l'injection de saumure entraîne la génération d'un milieu à fort gradient spatial de résistivité électrique, impliquant une reconstruction plus complexe. Cette difficulté de reconstruction ajoutée à l'absence de prise en compte de la topographie mène à la création d'artéfacts. C'est pourquoi les reconstructions réalisées après l'instant T_8 ne sont pas représentées.

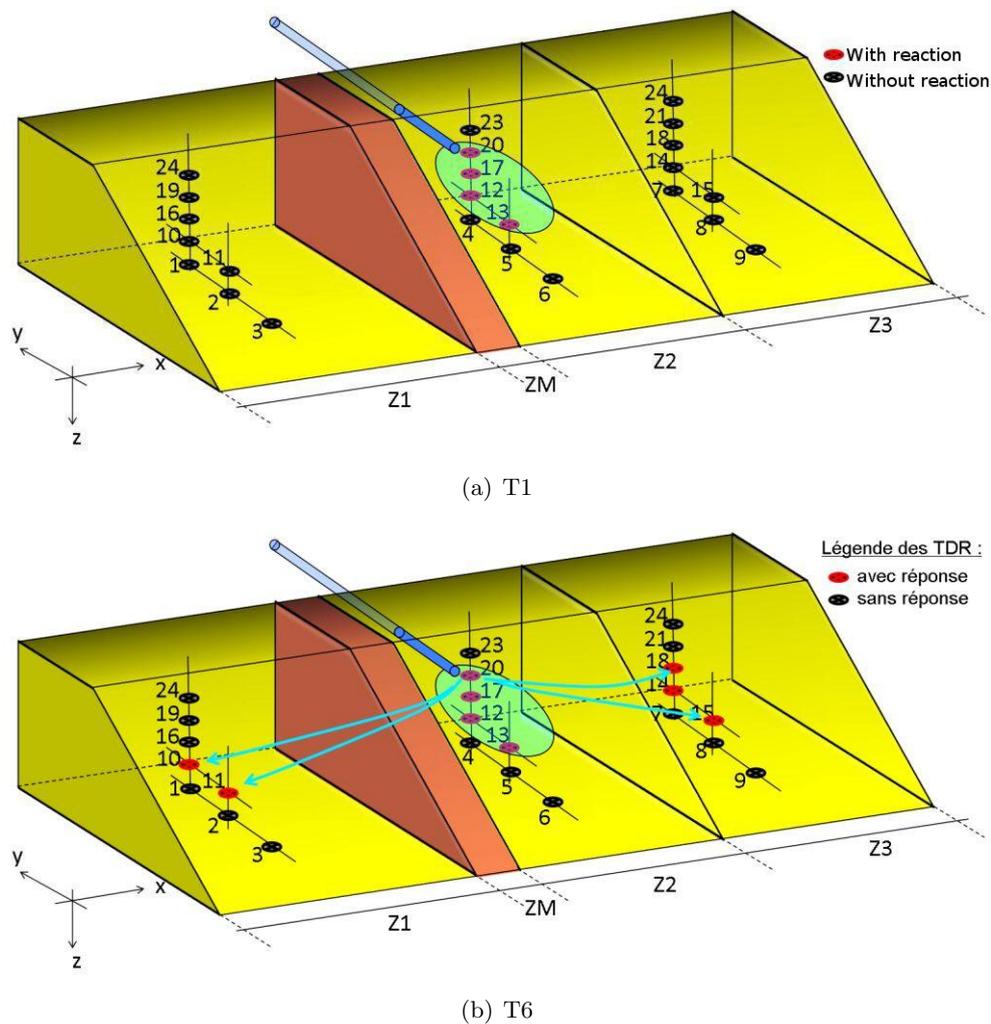


FIGURE 4.13 – Représentation de l'évolution de l'infiltration en fonction des réponses enregistrées par les sondes TDR positionnées dans le remblai. Deux instants correspondant aux séquences temporelles de mesures (« T1 » et « T6 ») sont mis en avant. La surface bleutée représente le bulbe d'infiltration hypothétique et les flèches bleues illustrent des chemins d'écoulement probables. Les sondes TDR répondant au passage de l'infiltration sont représentées en rouge tandis que les sondes ne présentant pas de variations importantes sont colorées en noir.

Cette étude illustre des variations négatives de résistivité qui sont représentatives d'une infiltration, puisque l'électrolyte (eau du réseau, salée ou non) est plus conducteur que le milieu encaissant. Les inversions en écart temporel des instants T1 et T2 montrent une faible diminution de la résistivité sur la Zone 2, de l'ordre de 10 %. À partir de l'instant T4, il est possible d'observer une diminution de la résistivité inversée, interprétable comme une augmentation de la teneur en eau, en direction des Zones 1 et 3. Cette évolution peut être directement corrélée avec les variations des signaux des sondes TDR des Zones 1 et 3 (figure 4.12).

Sur la base de la séquence temporelle T2, la figure 4.16 illustre l'effet de la normalisation de l'effet de la topographie sur le résultat d'inversion. Ainsi, la figure 4.16(a) est réalisée sans normalisation d'effet de la topographie et la figure 4.16(b) illustre le résultat d'inversion obtenu à partir de données où l'effet de la topographie est normalisé (Annexe B).

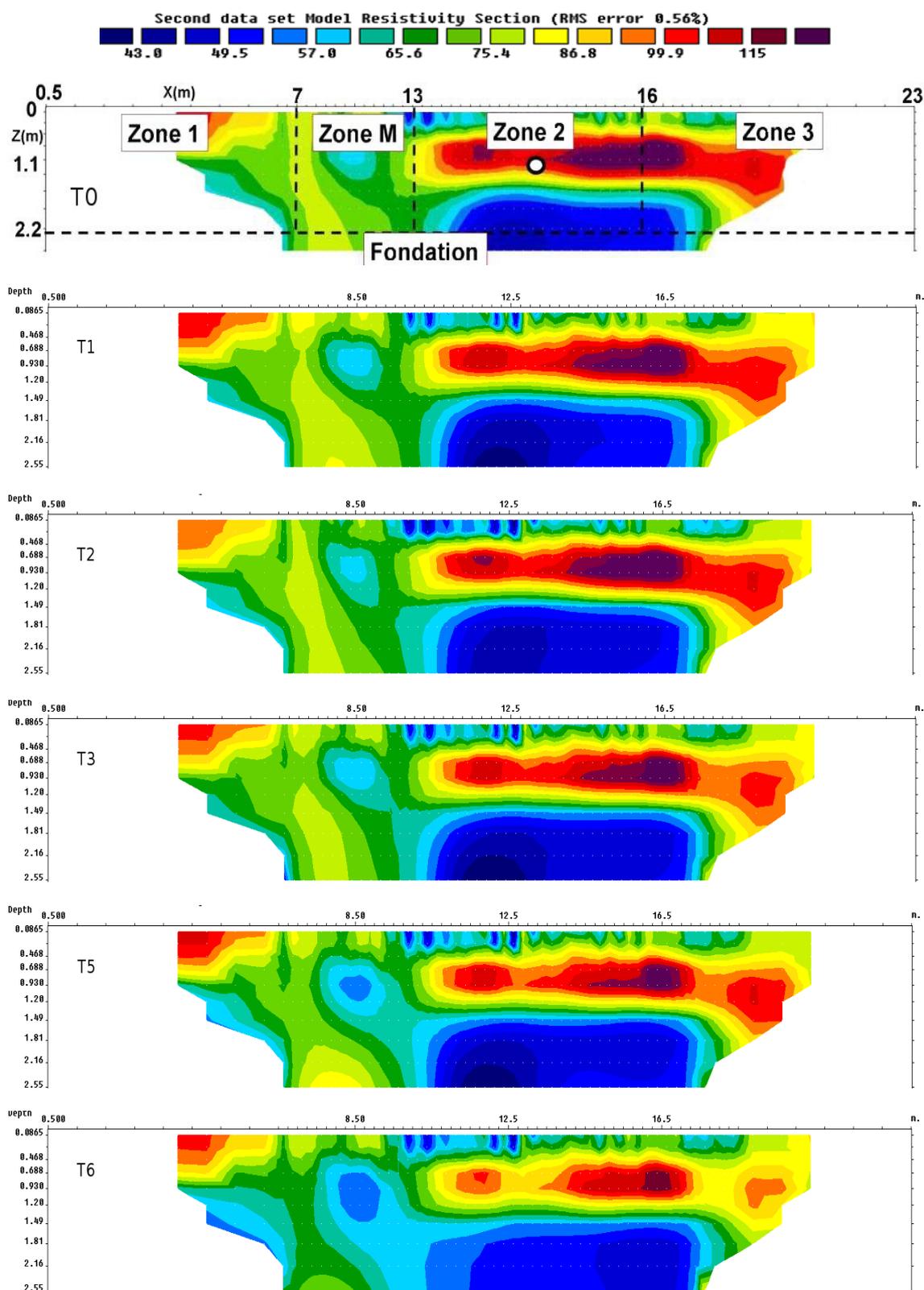


FIGURE 4.14 – Suite séquentielle de résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® en absolu. La première figure schématise les limites des Zones 1, 2 et 3 ainsi que la position de la source d'injection en Zone 2. Les résultats correspondent aux inversions de mesures provenant de six séquences temporelles (T0, T1, T2, T3, T5, T6) différentes. Les erreurs RMS démarrent à 0.56% et montent jusqu'à 0.63%.

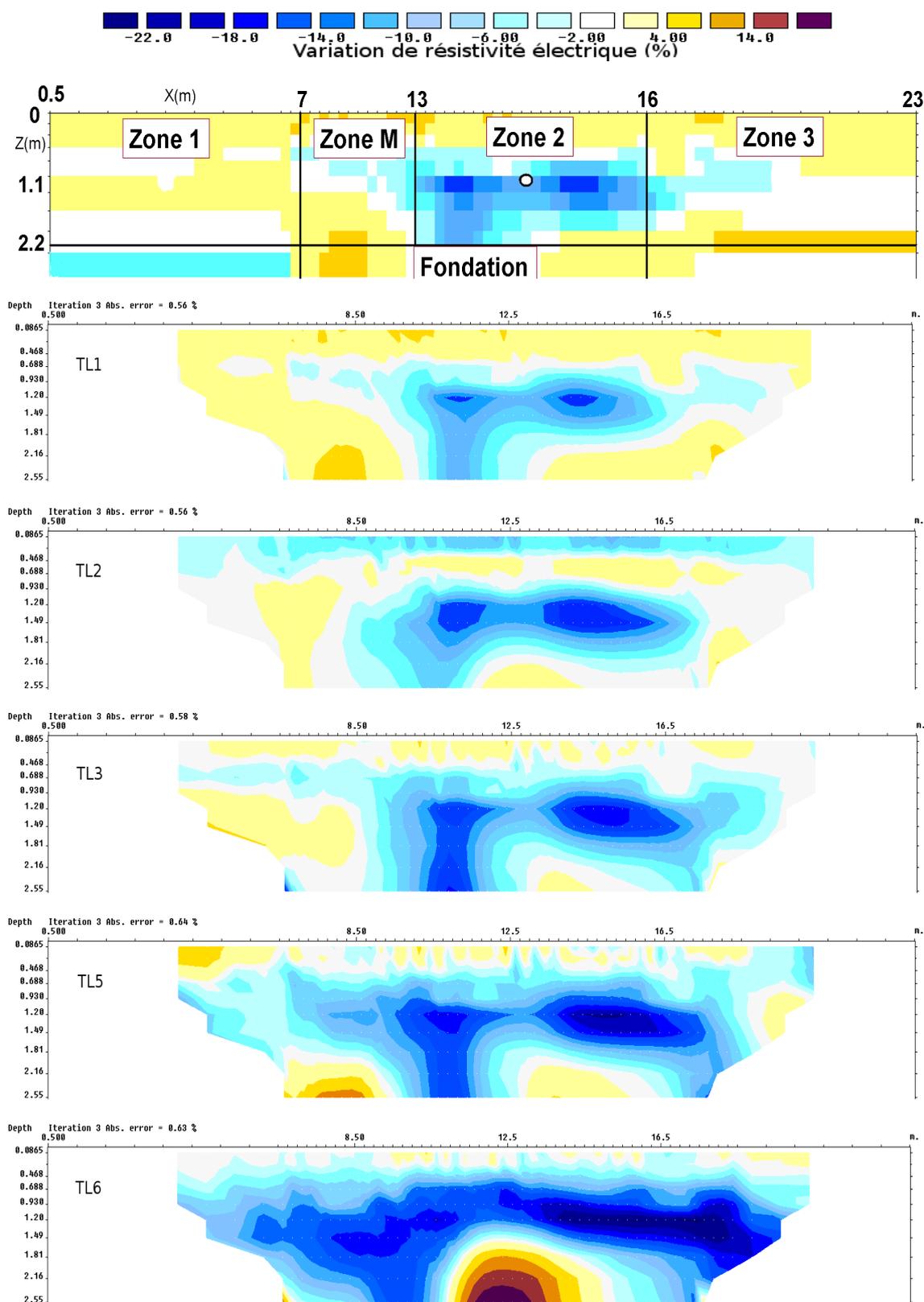


FIGURE 4.15 – Suite temporelle de résultats d'inversion en variation temporelle obtenus avec le progiciel *Res2Dinv*®. La première figure schématise les limites des Zones 1, 2 et 3 ainsi que la position de la source d'injection en Zone 2. Ensuite, cinq résultats d'inversion en variation temporelle TL1, TL2, TL3, TL5, TL6 sont présentés. Le corps dont la résistivité augmente (au fond, au centre, TL6) peut être interprété comme un artéfact ou un départ de fines.

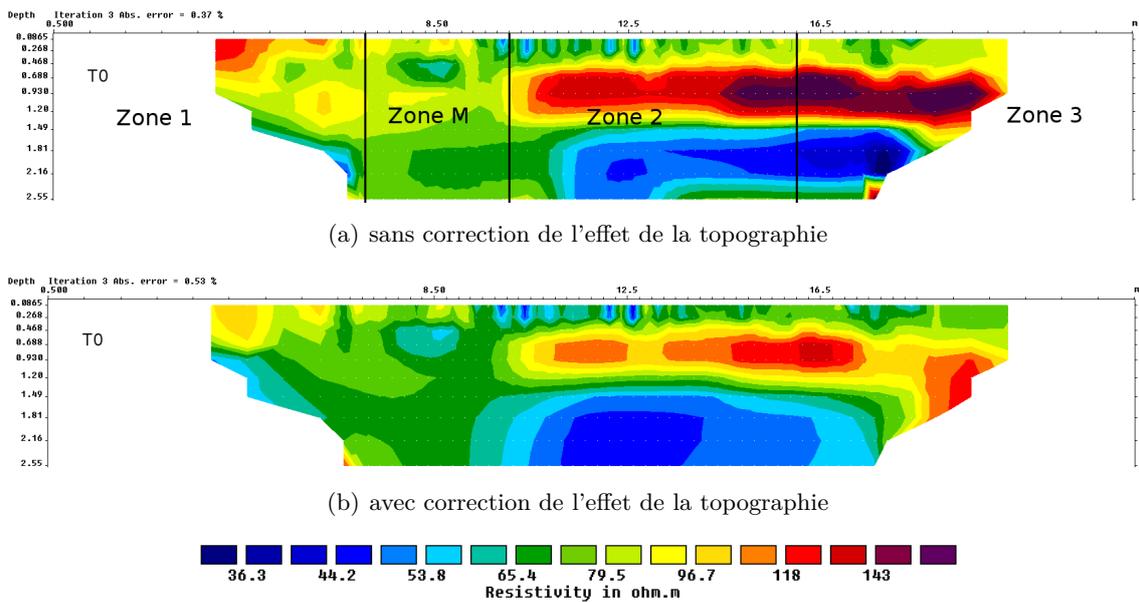


FIGURE 4.16 – Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-32-S. Les résultats sont obtenus à partir du progiciel Res2Dinv®. La figure présente 4.16(a) le résultat d'inversion sans normalisation et 4.16(b) le résultat d'inversion avec normalisation de l'effet de la topographie à l'instant T0. L'erreur RMS sur les deux résultats est de 0.37 % et de 0.53 %.

La normalisation des données vis-à-vis notamment des effets 3D de la topographie modifie en partie le résultat d'inversion. Cette technique permet notamment de diminuer le contraste de la couche résistante positionnée en 0.5 et 1 m de profondeur (figure 4.16(a)). L'erreur RMS fournie par ces deux résultats est « excellent » ($< 0.5\%$) et illustre le principe de non-unicité de la solution. En conséquence, il est difficile de conclure à la supériorité d'un résultat par rapport à l'autre.

En théorie, une étude en variation temporelle doit permettre de supprimer les effets permanents (effet de la topographie) perturbant l'inversion [Sjödahl *et al.*, 2006]. C'est pourquoi, une étude portant sur les bénéfices de la technique de normalisation est confrontée à des résultats en variation temporelle. La figure 4.17 illustre l'impact de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur un résultat d'inversion en variation temporelle. Ainsi, la figure 4.17(a) présente le résultat en variation temporelle sans correction de l'effet de la topographie et la figure 4.17(b) illustre le résultat avec une correction de la topographie. Ce résultat indique une très faible différence entre le résultat « corrigé » et le résultat « non-corrigé ».

4.4.1.c Discussion et conclusion

Les résultats d'inversion de cette étude 2D en surface ne permettent pas de distinguer l'infiltration lorsque les reconstructions sont observées en absolu. Cependant, lorsque les reconstructions sont étudiées en variation temporelle, elles permettent de faire ressortir des évolutions cohérentes de la résistivité électrique pouvant être rapprochées de l'infiltration. En effet, les résultats présentés correspondent aux réponses enregistrées par les sondes TDR, avec une évolution latérale du panache de saturation sur les premières reconstructions (cf. figure 4.13) puis un épanchement plus prononcé en Zone 2.

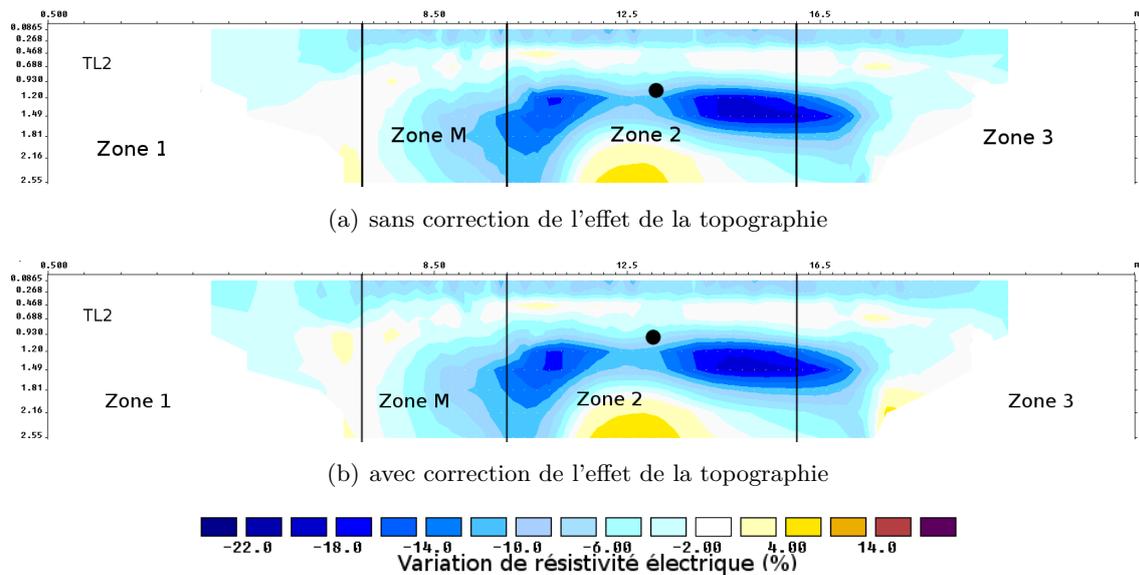


FIGURE 4.17 – Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-32-S. Les résultats (Res2Dinv®) présentent les variations temporelles entre les instants T_0 et T_2 (TL2) avec contraintes, 4.17(a) sans normalisation et 4.17(b) avec normalisation de l'effet de la topographie sur les données TL2. L'erreur RMS sur les deux résultats est de 0.37 % et de 0.53 %.

L'utilisation de la technique de normalisation dans ce cadre précis ne présente pas réellement d'intérêt (figure 4.17). En effet, aucune variation n'est observée lorsque la technique de normalisation est utilisée en variation temporelle. Ce résultat nous amène à conclure qu'une inversion en variation temporelle permet de supprimer une grande partie des artéfacts liés à la présence de topographie.

4.4.2 Campagne d'étude 2 (MG-25-E)

4.4.2.a Présentation de la campagne d'étude

L'étude se base sur des données provenant d'une ligne de 25 électrodes positionnées à demeure lors de la phase de montage de la digue. Ces électrodes font partie des 96 électrodes enfouies à environ 20 cm sous la surface de la partie sableuse de la digue (figure 4.18). Les objectifs de cette nouvelle campagne sont de visualiser l'impact de l'enfouissement d'une ligne d'électrodes comparé à une ligne de surface, de déterminer les avantages et inconvénients de l'utilisation d'une ligne enfouie et enfin de comparer les effets de la normalisation avec l'utilisation d'algorithmes d'inversion temporelle.

Les câbles multi-électrodes ont été installés à demeure dans la digue afin de garantir une meilleure répétabilité des mesures, ce qui est essentiel pour une approche dont l'objectif est le suivi des variations temporelles du milieu et, à terme, la surveillance d'un ouvrage. Les résistances de contact sont toutes de l'ordre ou inférieures à 1 k Ω . Cette valeur très basse est favorable à la qualité des mesures.

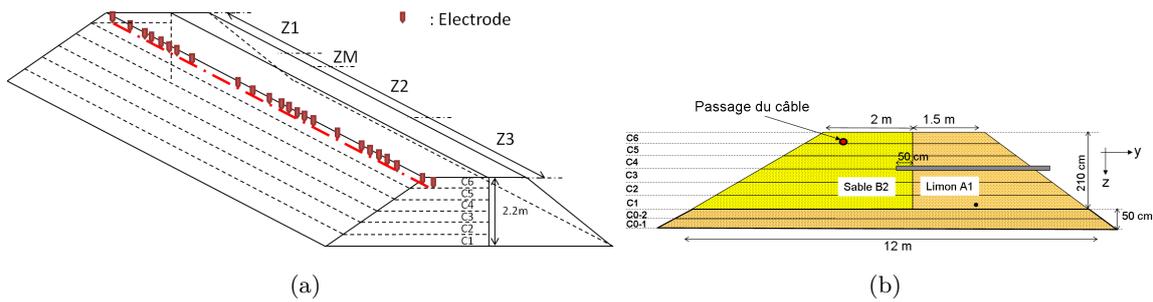


FIGURE 4.18 – Schémas de la digue expérimentale 4.18(a) vue en perspective avec dimensions et zones d'expérimentation (Zone 1, Zone Morte, Zone 2 et Zone 3) et implantation des 25 électrodes et 4.18(b) vue en coupe illustrant la zone de passage de la ligne d'électrodes (cercle rouge).

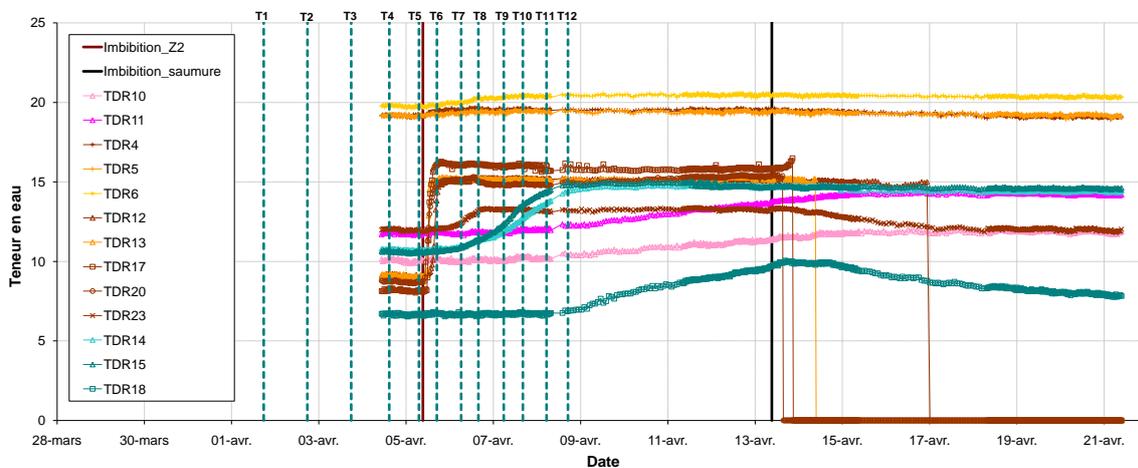


FIGURE 4.19 – Réponse des sondes TDR au cours de l'infiltration en Zone 2. Les traits verts verticaux représentent les différentes séquences de mesures retenues pour l'étude en variation temporelle.

4.4.2.b Présentation des résultats

La figure 4.19 représente l'évolution temporelle des teneurs en eau massiques enregistrées au cours de l'essai d'injection en Zone 2, et sur laquelle il est indiqué les différents instants d'acquisition de la séquence MG-25-E. Remarquons tout d'abord que la première acquisition (T1) intervient cette fois-ci avant le démarrage de l'injection d'eau permettant de visualiser l'amorce de l'infiltration dans la Zone 2.

La séquence d'acquisition utilisée est une séquence de type « Multi-Gradient » basée sur 25 électrodes et génère 878 quadripôles de mesure. La durée d'acquisition pour un protocole est de l'ordre de 50 minutes. La figure 4.20 illustre le résultat d'inversion obtenu à partir des données mesurées à l'instant T1. Cette inversion en « absolu » présente une distribution spatiale de la résistivité électrique beaucoup plus contrastée que l'inversion précédente (figure 4.14(b)). Ce résultat présente des variations élevées à proximité de la surface pouvant être la conséquence d'une mauvaise gestion de l'information par le progiciel Res2Dinv®. En effet, le progiciel ne permet pas d'imposer une ligne d'électrodes en dessous de la surface ce qui génère automatiquement des artéfacts. Afin de visualiser l'effet de la topographie, une correction du facteur géométrique est employée (cf. Annexe B) afin d'inverser les données. La coupe 4.20(b), en plus d'afficher une convergence du critère RMS 2.5 fois supérieure, est beaucoup moins contrastée en surface et

plus fortement corrélée avec le résultat précédent (figure 4.16(b)).

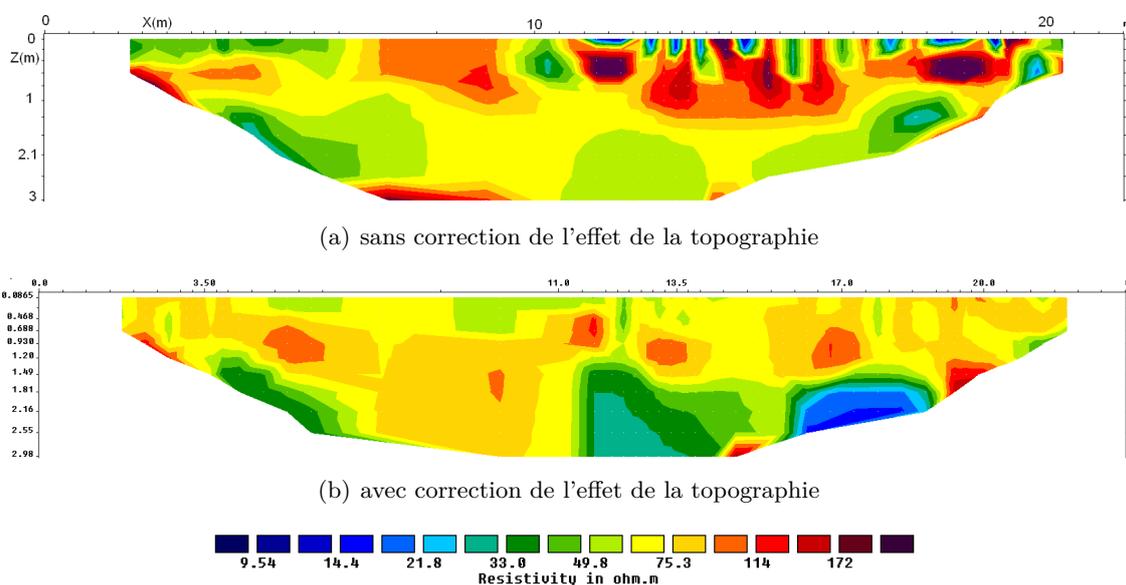


FIGURE 4.20 – Illustration de l'apport de la technique de normalisation de l'effet de la topographie sur des données issues d'un protocole MG-25-E à l'instant T1. Les résultats sont obtenus à partir du progiciel Res2Dinv®. Le résultat de l'inversion sans normalisation est présenté à la figure 4.20(a) et l'inversion avec normalisation de l'effet de la topographie est présenté à la figure 4.20(b). L'erreur RMS sur les deux résultats est de 1.34 % et de 0.55 %.

L'utilisation de la technique de normalisation permet d'obtenir un résultat plus corrélée avec les informations *a priori* sur le milieu. En conséquence, cette technique est utilisée pour l'inversion de données en variation temporelle. À cet effet, la figure 4.21 présente les résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® pour les données corrigées provenant des séries temporelles T3, T6, T7, T8, T10 et T12.

De la même manière que pour l'étude précédente (MG-25-E) la visualisation des résultats en « absolu » ne permet pas une bonne distinction des évolutions temporelles. En effet, le milieu ausculté présente un contraste trop élevé en comparaison des évolutions temporelles observées. C'est pourquoi afin d'augmenter la capacité de visualisation des évolutions temporelles les coupes de résistivité sont présentées en variation temporelle à la planche 4.22.

Les résultats d'inversion présentés à la figure 4.22 correspondent à l'évolution entre l'instant de référence T1 et les instants T3, T6, T7, T8, T10, T12. Très peu de variations sont observées entre l'instant T1 et T3. Ce résultat est corrélé avec les modalités d'injection d'eau débutant à partir de l'instant T5. Ensuite, une baisse notable est visualisée à partir de l'instant T6 (seconde figure) au niveau du tuyau d'injection. Un panache gravitaire semble se dessiner majoritairement en Zone 2 et en direction de la Zone 3. Ce résultat correspond assez fortement aux réponses des sondes TDR (figure 4.19). À noter la présence d'un artefact résistant (en jaune) sur l'inversion « en écarts temporels » à partir de l'instant T6. Cet artefact n'est présent, à notre sens, qu'en raison du manque d'information provenant du faible nombre d'électrodes à l'aplomb de cette position. Jusqu'à l'instant T11, seule la zone en direction de la Zone 3 semble alimentée. Cepen-

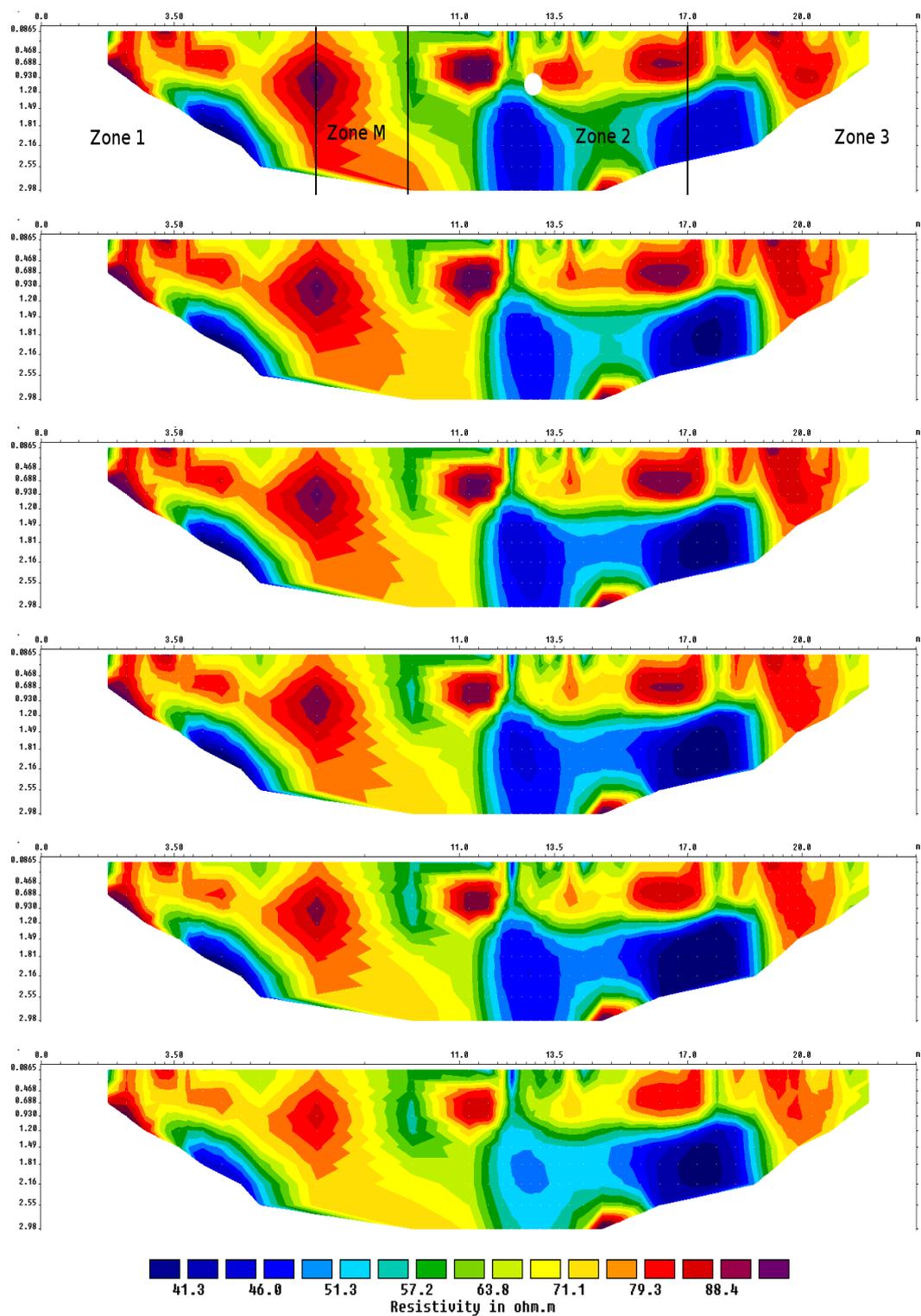


FIGURE 4.21 – Suite temporelle de plusieurs résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® en « absolu ». La première figure schématise les limites des Zones 1, 2 et 3 ainsi que la position du tuyau d'injection (point blanc). Les résultats correspondent aux inversion de mesures provenant de six séquences temporelles différentes (T3, T6, T7, T8, T10, T12). L'erreur RMS augmente continuellement de 0.5 à 0.75%.

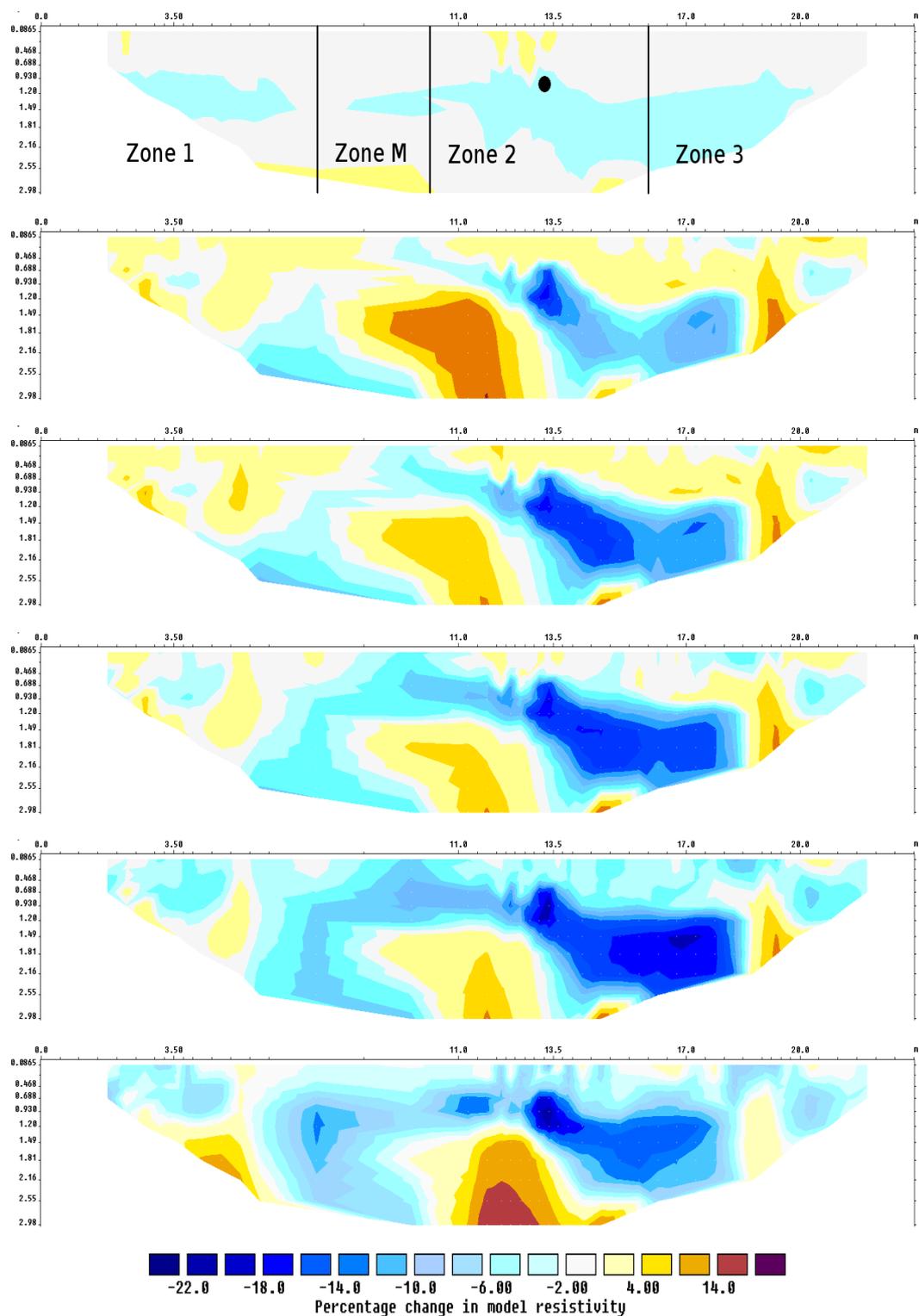


FIGURE 4.22 – Séquence temporelle de plusieurs résultats d'inversion en variation temporelle obtenus avec le progiciel Res2Dinv® après suppression de l'effet de la topographie. La première figure schématise l'évolution entre l'instant T1 et T3 avec les limites des zones 1, 2 et 3 ainsi que la position du tuyau d'injection (cercles noirs). Ensuite, cinq résultats d'inversion en variation temporelle TL6, TL7, TL8, TL10, TL12 sont présentés. Les erreurs RMS augmentent continuellement depuis le premier résultat de 0.56 à 1.13 %.

dant, à partir de l'instant T_{12} la résistivité de la *Zone 1* diminue fortement, pouvant indiquer une modification des chemins préférentiels d'écoulement. Ces dernières observations sont bien corrélées d'un point de vue spatial et temporel avec les réponses des sondes TDR.

La figure 4.23 présente deux résultats d'inversion (Res2Dinv®) illustrant la variation de résistivité de la digue entre les instants T_1 et T_7 (figure 4.19). Le premier résultat (figure 4.23(a)) est réalisé sans correction de l'effet de la topographie tandis que le second (figure 4.23(b)) est réalisé avec une correction de l'effet de la topographie. À la différence de l'étude précédente (MG-32-S), des variations importantes sont présentes entre les deux résultats, montrant l'apport de la technique de normalisation (Annexe B). Ce résultat illustre aussi le fait qu'une inversion temporelle ne peut supprimer tous les effets liés à la présence d'une topographie 3D. On retrouve notamment la présence d'une hétérogénéité « positive » à fort contraste dans le premier résultat qui n'est pas présente dans le second résultat. Cette différence peut être en partie expliquée par le fait que très peu d'électrodes sont présentes à l'aplomb de cette anomalie et qu'en conséquence cette zone (la *Zone Morte*) est très peu renseignée lors de l'inversion. De plus, l'erreur RMS de ce premier résultat (4.4 %) est quatre fois supérieure à celle du second (1.17 %) indiquant que le second résultat est plus représentatif des données mesurées.

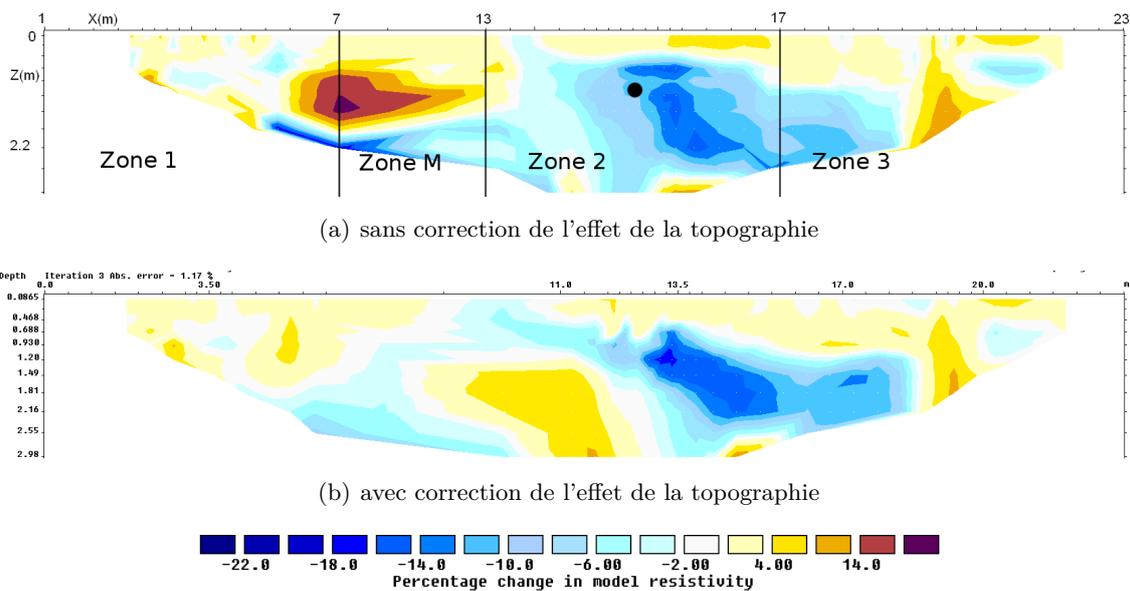


FIGURE 4.23 – Comparaison des résultats d'inversion en variation temporelle obtenus à partir d'un protocole multi-gradient avec 25 électrodes. La séquence temporelle utilisée correspond à l'évolution entre le temps T_1 et l'instant T_5 (figure 4.19). Le résultat 4.23(a) est réalisé sans normalisation à la différence du résultat 4.23(b). La position de la source en *Zone 2* est indiquée par le rond noir.

La figure 4.24 présente une comparaison entre deux résultats d'inversion (Res2Dinv®) obtenus avec une correction de l'effet de la topographie issus 4.24(a) de la campagne d'acquisition MG-32-S à l'instant T_3 et 4.24(b) de la campagne d'acquisition MG-25-E à l'instant T_8 . Or, ces deux instants d'acquisition sont très proches temporellement. Ces deux résultats dévoilent des dissimilitudes en plusieurs zones notamment en surface où la figure 4.24(a) présente des variations alors que la seconde figure n'en présente pas. Cependant, l'allure des deux résultats est assez similaire et permet la visualisation de l'évolution du panache en direction de la *Zone 3*.

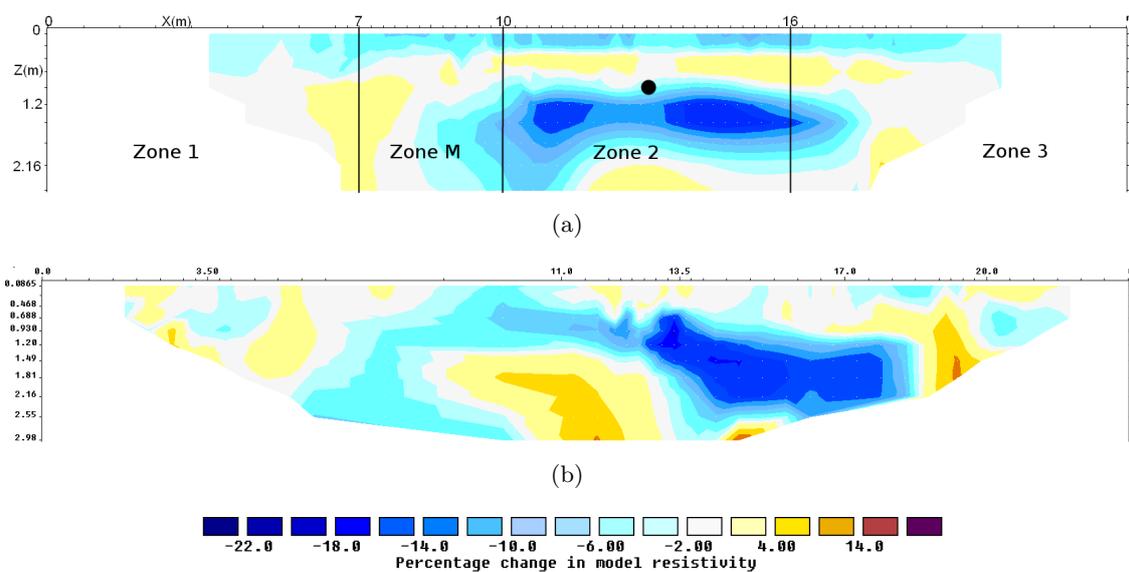


FIGURE 4.24 – Illustration de l'apport de la technique de normalisation sur des données issues d'un protocole 4.24(a) MG-32-S et 4.24(b) MG-25-E. Les résultats sont inversés à partir du progiciel Res2Dinv® en variation temporelle avec contrainte. Les erreurs RMS issues des deux reconstructions sont 0.56 et 1.13 %.

4.4.2.c Conclusion

L'utilisation d'électrodes enfouies à une certaine profondeur permet une augmentation de la sensibilité aux phénomènes d'infiltration. De plus, ces électrodes sont moins sensibles aux variations diurnes de température se produisant sur les premiers centimètres du remblai. Cependant, le progiciel d'inversion Res2Dinv® ne permet pas de simuler la position d'une ligne d'électrodes en profondeur. Cette limitation entraîne dans le cadre de cette campagne des artefacts présents à la fois dans le résultat « en absolu » et dans le résultat en variation temporelle. Ce résultat démontre que l'inversion en variation temporelle ne permet pas de supprimer la totalité des effets 3D (liés à la topographie) lors d'un processus d'inversion. De plus, l'utilisation de la technique de normalisation permet d'obtenir des résultats mieux corrélés avec notre *a priori* du milieu et de son évolution.

4.4.3 Campagne d'étude 3 (MG-3D-S)

4.4.3.a Présentation de la campagne d'étude

Dans cet exemple, l'étude est basée sur des données provenant d'une grille régulière de 64 électrodes positionnées suivant 4 lignes de 16 électrodes en surface (figure 4.25). Le premier objectif de cette étude est d'évaluer la capacité d'une campagne 3D à détecter et suivre une infiltration. Le second objectif implique de qualifier la supériorité d'une campagne 3D en comparaison de campagnes 2D. Les résultats d'inversion présentés dans cette étude sont obtenus avec le progiciel Res3Dinvx64®. Afin d'aider à la visualisation 3D des résultats, la figure 4.25 schématise le positionnement des trois coupes dans l'espace.

Une séquence d'acquisition de type « Multi-Gradient » basée sur 64 électrodes est répétée à différents instants de l'essai d'injection. La séquence utilisée génère 1376 quadripôles de mesure

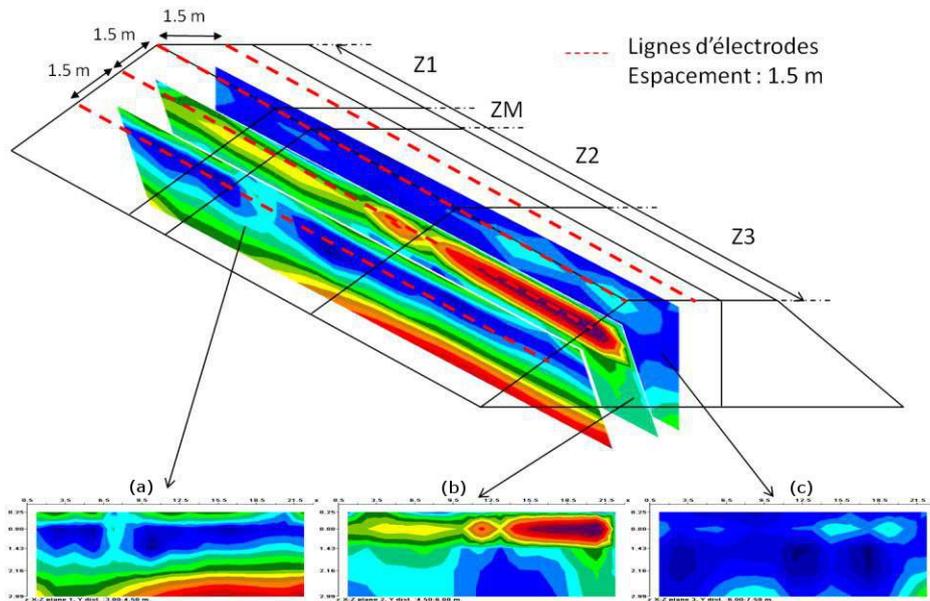


FIGURE 4.25 – Schéma de la digue expérimentale vue en perspective avec détail des trois zones d'expérimentation et position des lignes d'électrodes de la campagne MG-3D-S. Ce schéma permet d'illustrer (sans détailler) la position théorique des coupes d'inversion issues d'une inversion 3D. La coupe (a) correspond à la zone en pied de talus, (b) au centre de la partie sableuse et (c) en direction du noyau limoneux.

pour une durée de l'ordre de 48 minutes. Ces acquisitions couvrent l'ensemble de la période de l'essai d'injection en Zone 2. La figure 4.26 représente l'évolution temporelle des teneurs en eau massiques enregistrées au cours de l'essai d'injection en Zone 2, et sur laquelle sont indiqués les différents instants d'acquisition de la séquence MG-3D-S.

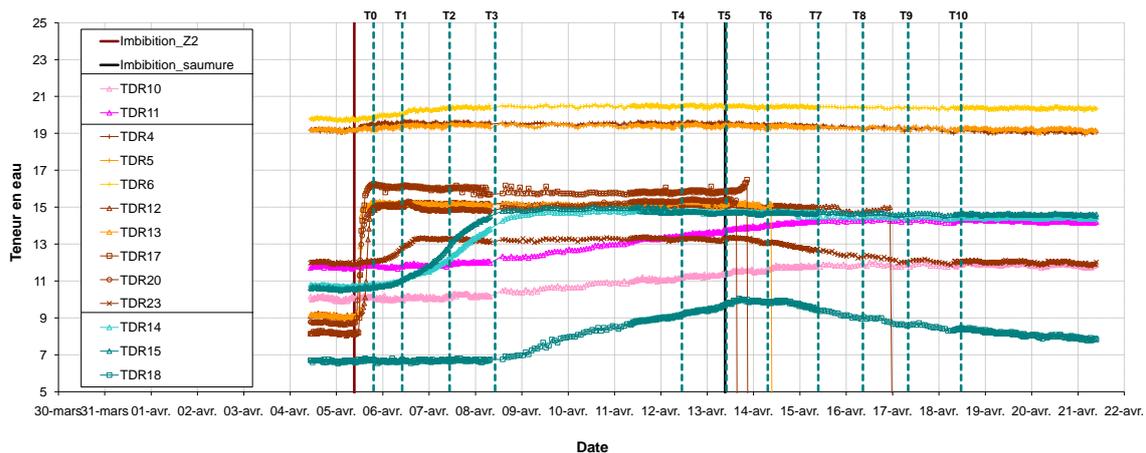


FIGURE 4.26 – Réponse des sondes TDR au cours de l'essai d'infiltration en Zone 2. Les traits bleus verticaux représentent les instants des séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle.

4.4.3.b Présentation des résultats

La figure 4.27 illustre la coupe centrale (issue du bloc 3D) d'un résultat d'inversion (campagne MG-3D-S). Une comparaison rapide, avec les tomographies 2D précédentes (sur zone similaire

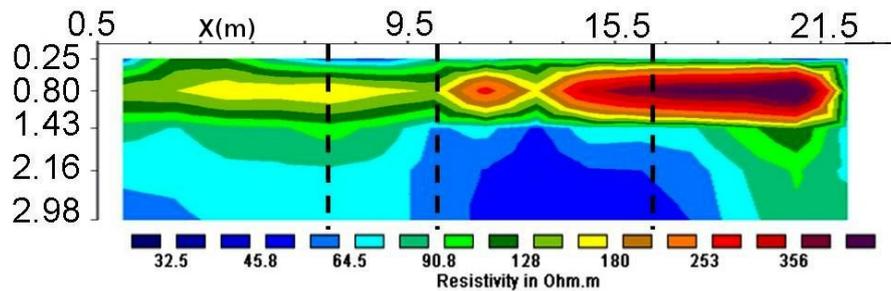


FIGURE 4.27 – Résultat d'inversion avec le progiciel Res3Dinv® sur des données provenant de la campagne MG-3D-S. Seule la coupe centrale (b) (cf. figure 4.25) est présentée afin de présenter les similitudes en terme de variation spatiales de résistivité en comparaison des campagnes précédentes.

et à deux instants très proches, exemple : figure 4.14(c)) indique une certaine cohérence entre les résultats. Bien que la tomographie 3D est issue d'une grille d'électrodes plus grossière (16*4 électrodes), l'inversion 3D permet une meilleure prise en compte des effets 3D liés à la topographie et à la composition interne de l'ouvrage.

Il est nécessaire de se référer à la figure 4.25 afin de visualiser de manière 3D les résultats. Cependant, la distinction claire des chemins d'infiltration est rendu difficile par la complexité du milieu. C'est pourquoi, afin d'améliorer la détection de l'infiltration, les données sont étudiées en « écart temporel ». À cet effet, la figure 4.28 illustre les résultats d'inversion 3D (Res3Dinv®) correspondant aux instants $T1$, à $T6$, (figure 4.26) en variation temporelle sans contrainte.

De fortes variations sont observées à partir du temps $T1$ au niveau du tuyau d'injection sous forme d'un panache déformé de manière gravitaire. À partir de l'instant $T2$, ce panache s'étoffe latéralement, induisant une modification possible des chemins d'infiltration. À partir de l'instant $T3$ et jusqu'en $T6$ ($TL3$ à $TL6$) la résistivité de la couche la plus en surface évolue considérablement sur la coupe entre 3 et 4,5 m transversalement (colonne de gauche). Cette évolution se produit sur les 50 premiers centimètres de cette coupe. Cette information indiquerait que la fuite a pris un chemin préférentiel en suivant la couche $C3$ en direction de la zone « avale ». Entre les temps $T4$ et $T5$ une anomalie résistante se forme au niveau de l'injection d'eau dans le remblai. Cette anomalie peut être représentative d'un artefact présent dans la solution ou d'une érosion des particules à ce niveau. De manière corrélée avec les réponses des sondes TDR le panache se déplace tout d'abord préférentiellement en *Zone 3* aux instants $T4$ et $T5$, puis en *Zone 1* au temps $T5$.

L'injection de saumure a un effet rapide et notable sur le résultat (figure 4.29) en ce sens que la résistivité du milieu chute très brusquement. Cette perturbation du milieu est si élevée qu'une modification de l'échelle des variations relatives (%) et des paramètres d'inversion est nécessaire dès l'instant $T7$. À partir de cet instant et jusqu'au temps $T10$ (instant représenté à la figure 4.29) des variations importantes de 60 à 70 % sont ainsi observées au niveau de la *Zone 2*. Ce comportement est largement corrélé avec les réponses des sondes TDR indiquant que seule la *Zone 2* est affectée par la saumure. Les reconstructions obtenues durant l'injection de saumure présentent une faible fiabilité du fait d'une erreur RMS supérieure à 10 %. C'est pourquoi, les résultats complémentaires à la figure 4.29 ne sont pas présentés.

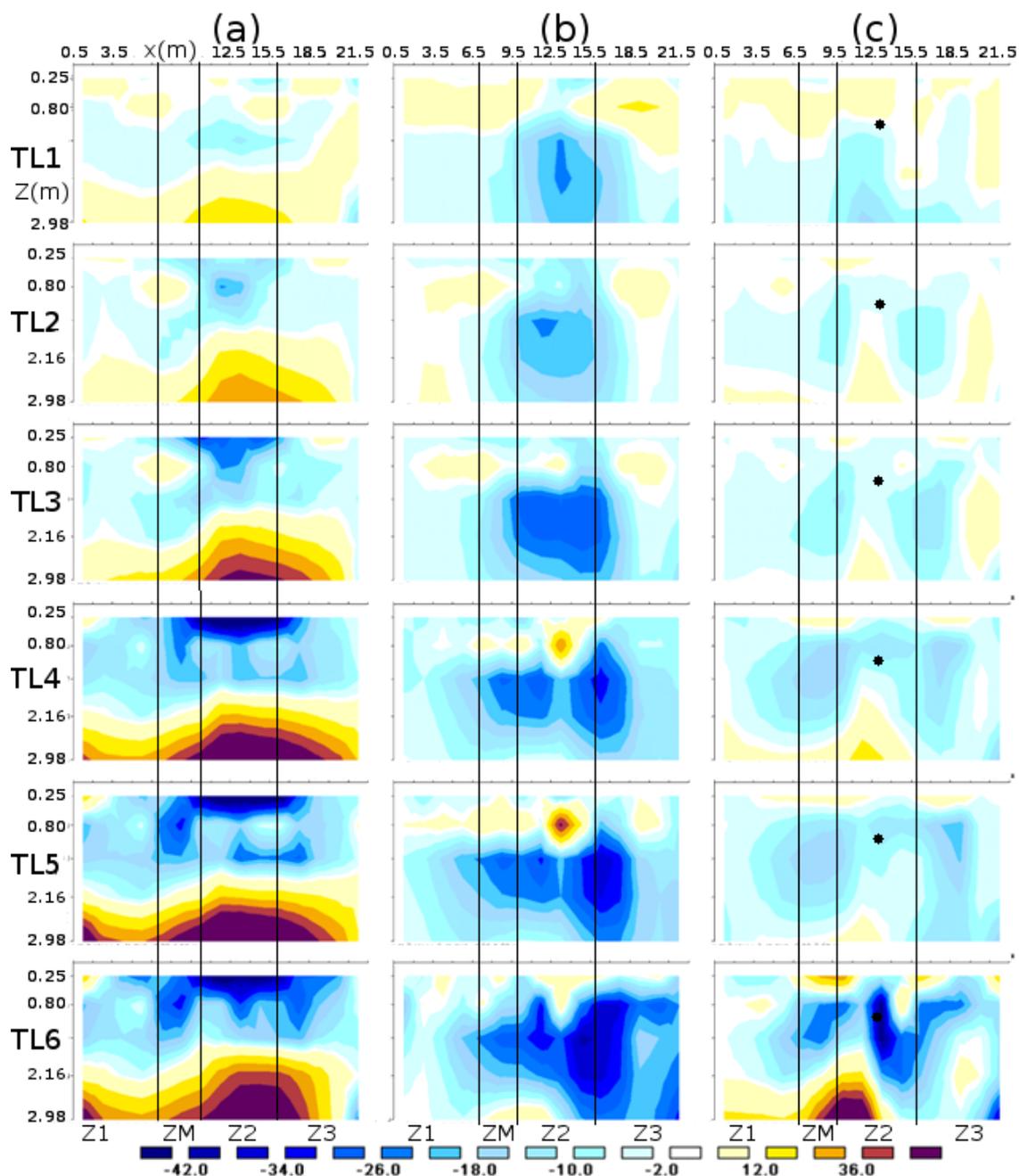


FIGURE 4.28 – Variations temporelles relatives (%) de résistivité inversées 3D obtenus entre l'instant T_0 (instant de référence) et les instants T_1 à T_6 . Les colonnes à gauche, au centre, et à droite représentent respectivement les coupes (a), (b) et (c) de la figure 4.25.

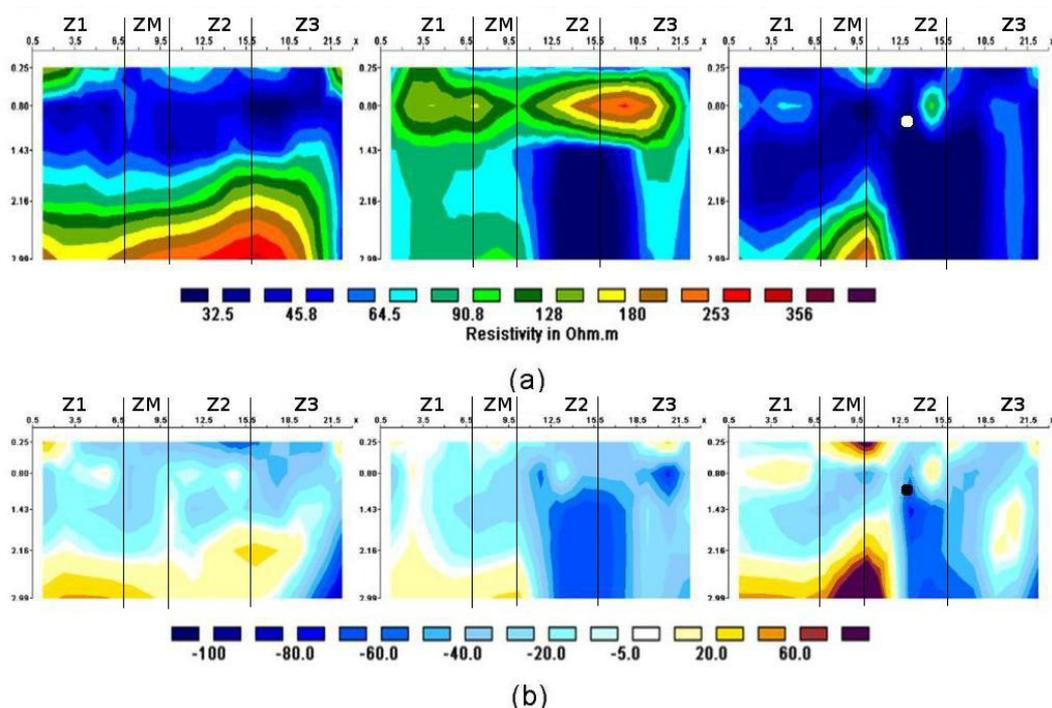


FIGURE 4.29 – Illustration de deux résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res3Dinv® sur des données provenant de la campagne MG-3D-S au cours de l'injection de saumure. Les reconstructions sont présentées (a) en « absolu » et (b) en variation relative (%) à l'instant T10.

4.4.3.c Conclusion

Les résultats de cette campagne illustrent l'apport certain d'une campagne 3D permettant de détecter, décrire et caractériser les variations temporelles de résistivité électrique dans les trois directions de l'espace. En effet, la détection de nouveaux chemins préférentiels d'écoulement permet de souligner le comportement réellement 3D des infiltrations dont la caractérisation est impossible en 2D. Cependant, la présentation des résultats sous forme de coupes limite la visualisation des chemins préférentiels d'écoulement et il peut être noté une perte significative de la résolution au niveau de ces résultats d'inversion 3D en comparaison des résultats 2D. C'est pourquoi, des techniques d'auscultation 3D plus fines permettant une visualisation facilitée de la distribution de résistivité électrique doivent être mises en place.

4.4.4 Campagne d'étude 4 (PDP-Opt-E)

4.4.4.a Présentation de la campagne d'étude

Dans le cadre de cette dernière campagne, l'objet de l'étude porte sur l'apport du code InGEOHT - 3D⁻ en comparaison de méthodes plus classiques pour le suivi d'une infiltration. En conséquence, il s'agit de présenter les travaux permettant la génération d'un modèle 3D⁻ optimisé pour la surveillance des OHT et permettant une prise en compte plus réaliste de la spécificité du milieu investigué.

Lorsque la discrétisation du problème inverse n'est pas représentative de la structure interne du milieu investigué, la reconstruction engendre nécessairement la formation d'artéfacts. Cependant, plus le milieu est finement discrétisé et plus la sous-détermination du problème augmente.

Cette sous-détermination entraîne à son tour la formation de nombreux minima locaux et donc de solutions « équivalentes ». C'est pourquoi, trouver le compromis le plus acceptable entre représentativité et sous-détermination devient primordial pour obtenir un résultat robuste d'inversion.

Dans ce cadre, la discrétisation spécifiquement retenue pour cette expérience permet une sur-discrétisation des zones susceptibles de présenter des variations temporelles (partie sableuse) et une sous-discrétisation des zones sans variation attendue (fondation en limon, noyau amont en limon, rampes d'accès). À cet effet, la figure 4.30 représente une discrétisation « éclairée » de l'ouvrage. En plus des considérations précédentes, un maximum d'*a priori* est utilisé. Cet *a priori* concerne : la géométrie de la fondation, du noyau et du remblai sableux, mais aussi la hauteur de chaque couche de sable (issue d'une campagne de nivellement à chaque couche). Le milieu discrétisé est ainsi sensé « coller » au mieux au milieu ausculté.

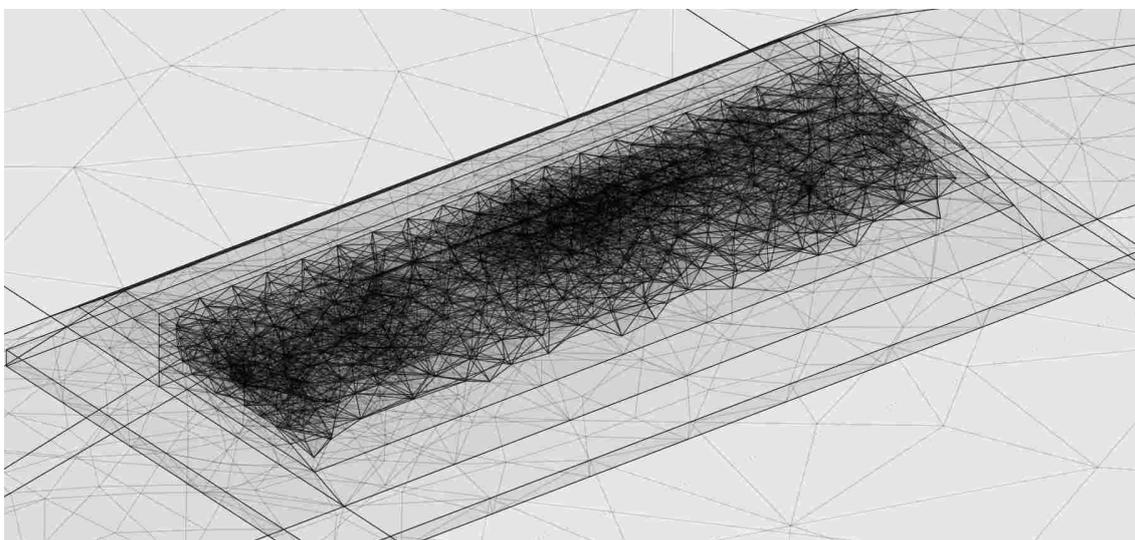


FIGURE 4.30 – Maillage du problème direct (traits fins) raffinant la discrétisation du problème inverse (traits épais) de la digue expérimentale. La résolution du problème direct implique plus de 150 000 degrés de liberté alors que seulement 6000 paramètres du modèle doivent permettre de décrire la distribution de résistivité électrique du milieu.

L'hypothèse *a priori* que nous formulons sur le modèle est que la variation spatiale de résistivité dans la partie sableuse est « lisse », alors que la variation de résistivité entre la partie sableuse et la fondation en limon est franche. Cet *a priori* est illustré au niveau de la figure 4.31. De plus, l'infiltration dans la partie sableuse est supposée se propager de manière diffuse n'engendrant pas de variations spatiales très brutales.

Le cas complexe de la DiguExpERT impose une définition rigoureuse de l'*a priori* précédent. Dans ce sens, la contrainte sur le lissage est bien plus importante pour les cellules voisines présentes dans la partie sableuse que pour les cellules à l'interface entre remblai en limon et remblai sableux. Ce travail permet d'imposer un lissage spatial dans la zone sableuse et de fortes variations à l'interface entre les zones sableuses et limoneuses. À cet effet, la figure 4.32 schématise la construction de la matrice de lissage utilisée pour la régularisation du problème inverse. Ainsi, le lissage nécessaire à l'inversion de chaque maille du problème inverse est découpé en trois super sous-domaines. Seules les mailles présentes à l'intérieur d'un même super sous-

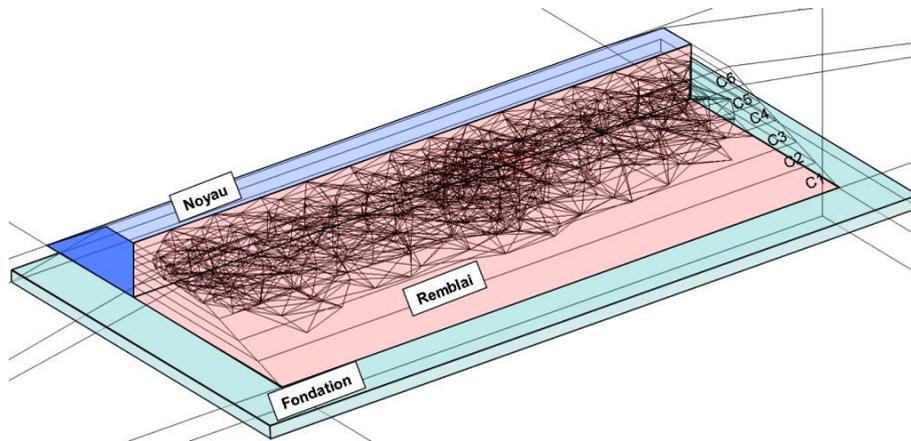


FIGURE 4.31 – Illustration d'une discrétisation 3D optimisée pour l'introduction d'a priori dans l'inversion. Le milieu peut être découpé en trois ensembles : le remblai (partie sur-discrétisée), le noyau (en bleu) et la fondation (en vert). Les deux surfaces roses illustrent les limites de variation franche de la résistivité électrique.

domaine sont contraintes entre elles (ex : $C_1 = \text{Noyau}$). A l'intérieur de ces sous-matrices de lissage des variations spéciales peuvent être imposées (Cas du noyau : variation de la résistivité seulement en profondeur).

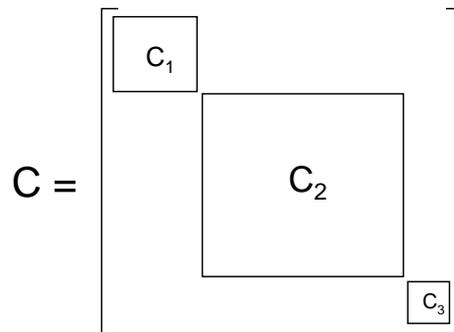


FIGURE 4.32 – Schématisation de la matrice de lissage utilisée pour inclure un maximum d'a priori dans l'inversion. Chaque grand ensemble est représenté par une sous-matrice permettant d'imposer des variations lisses à l'intérieur d'un sous-domaine et de permettre des variations élevées entre les sous-domaines.

Dans cette étude (PDP-Opt-E), l'interprétation se base sur l'inversion de données issues d'un protocole « pôle-dipôle » particulier réalisé à partir de 29 électrodes. Ces électrodes font partie des 96 électrodes dont la position a été optimisée pour le suivi des infiltrations (Chapitre 3). L'implantation spatiale des électrodes est schématisée sur la figure 4.33.

Le principe du protocole « PDP-Opt-E » (figure 4.33) est de sélectionner tout d'abord une électrode d'injection (un pôle) parmi plusieurs électrodes présentes à la périphérie de la zone d'intérêt et ensuite de réaliser tous les « quadripôles » possibles avec les électrodes présentes à l'aplomb de la zone d'intérêt. Plus précisément, seuls les quadripôles indépendants sont réalisés. Enfin, une modification du pôle d'injection est opérée et répétée afin de modifier les « angles de vue ». La figure 4.33 illustre ce principe et permet de distinguer les pôles et les tripôles utilisés pour l'étude. Dans l'objectif de pouvoir réaliser tous les tripôles indépendants sur une période

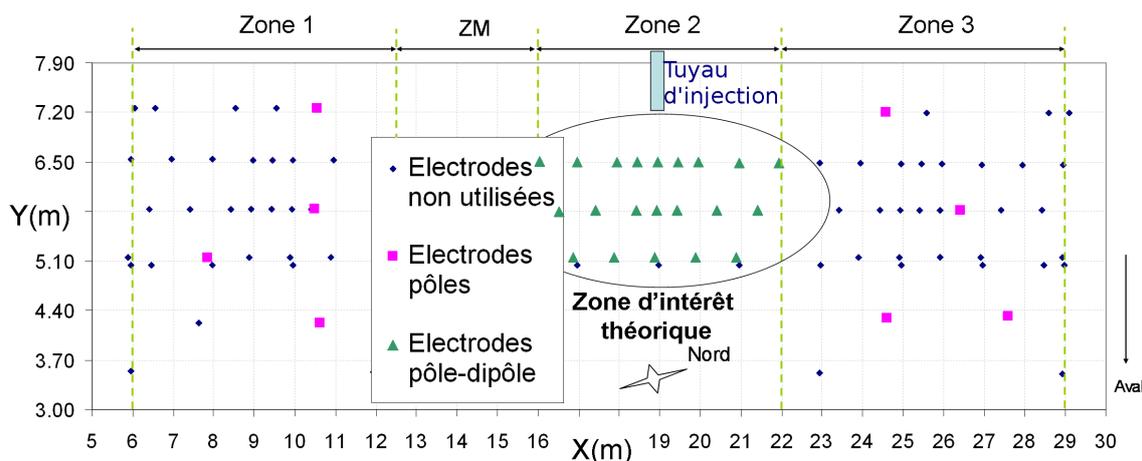


FIGURE 4.33 – Schéma de la partie sableuse de la digue expérimentale vue en plan avec position (X, Y) des électrodes enfouies. Les 29 électrodes utilisées dans le cadre de l'étude sont figurées en carrés roses pour les électrodes de type « pôle » et en triangles verts pour les électrodes de type « pôle-dipôle ». Les positions du tuyau et des zones d'expérimentation sont aussi présentées.

temporelle limitée (inférieure à une heure) un nombre faible d'électrodes pôles doit être sélectionné. En effet, sélectionner un pôle supplémentaire occasionne une augmentation importante du nombre de quadripôles total (cf. équation 3.11, Chapitre 3). C'est pourquoi, seuls 8 pôles et 21 tripôles sont sélectionnés parmi les 96 électrodes pour réaliser cette étude.

La majorité des électrodes de mesure est située sur la Zone 2 à proximité du tuyau d'infiltration. Les électrodes d'injection de type pôle sont utilisées à la périphérie de cette zone afin « d'éclairer » le phénomène suivant des angles différents. Cet « éclairage » multi-angulaire a pour objectif d'améliorer la caractérisation des variations internes 3D.

La figure 4.34 représente l'évolution temporelle des teneurs en eau massiques enregistrées au cours de l'essai d'injection en Zone 2, et sur laquelle sont indiqués les différents instants d'acquisition de la séquence PDP-Opt-E. Le premier instant de mesure (T_0) se situe juste avant la première injection d'eau. En conséquence, cette séquence de données fournit un état de référence où le milieu n'est pas encore perturbé par l'infiltration.

4.4.4.b Présentation des résultats

La démarche précédente de discrétisation et de régularisation est utilisée afin d'inverser les données obtenues sur la digue expérimentale avec le protocole « PDP-Opt-E ». La figure 4.35 illustre un résultat d'inversion « absolu » de données mesurées à l'instant T_0 . Avant toute chose, il peut être souligné l'aspect « confortable » d'un tel résultat. En effet, à la différence des autres codes d'inversion, le code InGEOHT permet de représenter de manière explicite la forme de l'ouvrage ainsi que sa distribution interne de résistivité.

Ce résultat est obtenu après quatre itérations d'inversion et présente une erreur RMS de 2.3 %. La résistivité du milieu est assez contrastée (de 25 à 175 $\Omega.m$) et est caractérisée par des variations 3D de l'ouvrage. Afin d'« évaluer » la qualité de ce résultat une comparaison est réalisée avec un résultat d'inversion obtenu avec le progiciel Res2Dinv® à la figure 4.36. Le premier

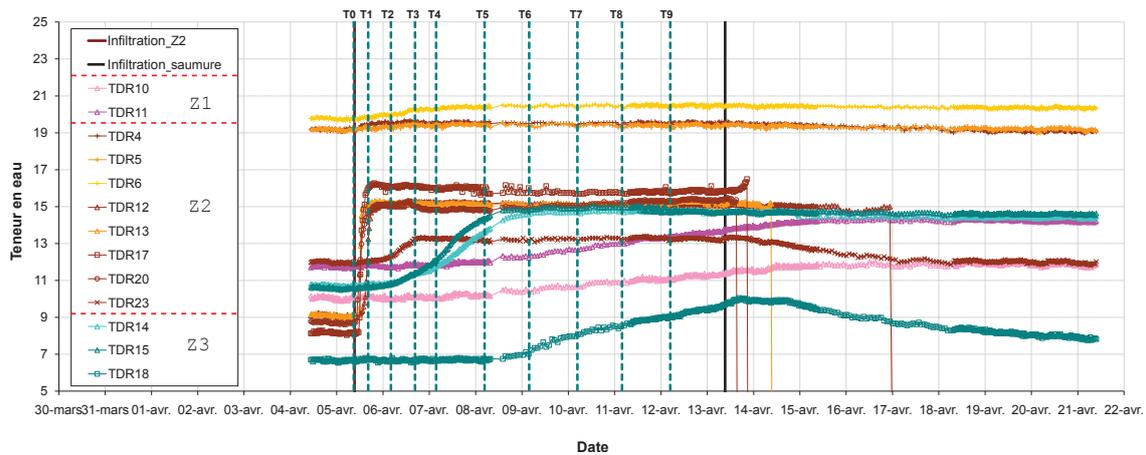


FIGURE 4.34 – Réponse des sondes TDR à l'évolution de l'infiltration au cours de l'essai d'infiltration en Zone 2. Les traits verts verticaux représentent les instants des différentes séquences de mesure retenues pour l'étude en variation temporelle de la campagne « PDP-Opt-E ».

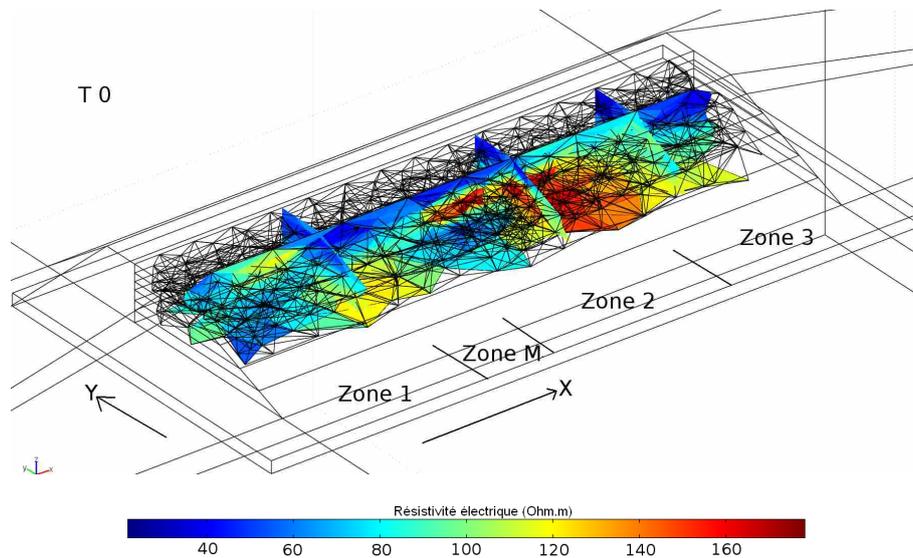


FIGURE 4.35 – Résultat d'inversion 3D vu en volume du protocole PDP-Opt-E à l'instant T0.

résultat correspond à la coupe longitudinale extraite de la figure 4.35. La position de la seconde section dans la digue expérimentale est relativement équivalente à la position de la première coupe. De plus, les jeux de données utilisés pour l'inversion ont été mesurés à des instants relativement proches où seule la séquence d'acquisition et le code d'inversion changent.

Tout d'abord, il est possible de noter que la gamme de variation de la résistivité électrique est comparable pour ces deux résultats. Cependant, les échelles de couleur diffèrent assez fortement et ne facilitent pas l'interprétation croisée des résultats. Néanmoins, il est aisé de retrouver les mêmes structures dans les deux reconstructions. La structure résistante à faible profondeur et ses discontinuités sont assez précisément reconstruites par les deux résultats. L'absence de couche conductrice en fond sur le premier résultat provient, à notre sens, de la capacité du code InGEOHT - 3D⁻ d'intégrer de manière explicite la fondation limoneuse. Les progiciels Res2Dinv® et Res3Dinv® ne permettent pas ce découplage, ce qui explique la présence de ce

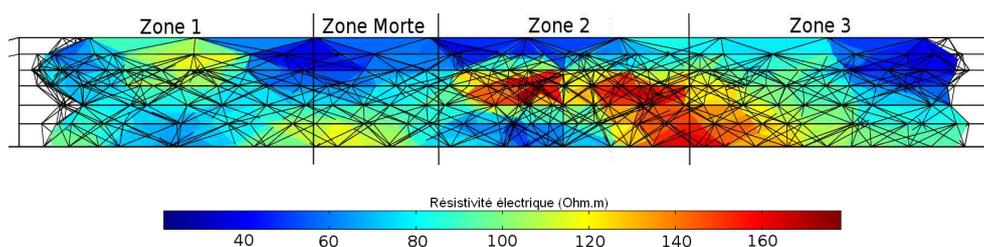


FIGURE 4.36 – Extraction de la coupe centrale présentée à la figure 4.35. Cette représentation sous forme de coupe permet de faire ressortir les ressemblances en termes de distribution de résistivité avec les résultats 2D précédents (figure 4.14(c)).

fond conducteur sur la figure 4.36(a). Ces résultats montrent que l'utilisation du code InGEOHT permet de garder une discrétisation élevée de l'ouvrage en comparaison du progiciel Res3Dinv®. Cette finesse permet ainsi une meilleure prise en compte de la variabilité 3D du milieu et de son évolution.

L'utilisation des méthodes d'inversion en variation temporelle est encore récente et leur transfert pour l'inversion 3D n'a pas encore été réalisée dans l'ingénierie (Res3Dinv® ne permet pas d'inversion en variation temporelle). Cependant, plusieurs stratégies d'inversion 3D en laps de temps existent dans la littérature (cf. Chapitre 2). La première et plus simple technique d'inversion en variation temporelle nommée précédemment sans contrainte calcule « simplement » la variation relative entre deux résultats inversés indépendamment. La figure 4.37 illustre les variations relatives du logarithme de la résistivité entre l'instant T_0 et les instants T_1 à T_4 obtenus avec la technique d'inversion en laps de temps sans contrainte. La suite des résultats est présentée à la figure 4.38 présentant l'évolution relative entre l'instant T_0 et les instants T_6 à T_9 . D'après ces résultats, dès l'instant T_1 un panache d'infiltration est formé à l'intérieur de la Zone 2 en cohérence avec les réponses des sondes TDR (figure 4.34). Ce premier résultat indique déjà la direction du chemin préférentiel d'écoulement vers la Zone 3. À partir de l'instant T_2 jusqu'à l'instant T_4 compris, la forme du panache évolue peu mais se précise (diminution de la résistivité). À partir de l'instant T_6 (figure 4.38) une modification des chemins d'écoulement s'opère pour alimenter le remblai en direction de la Zone 1. Il peut être noté que cette variation temporelle est parfaitement expliquée par les variations des signaux TDR de la Zone 1 à cette période. De plus, d'après les réponses des sondes TDR entre les instants T_6 et T_9 , la géométrie de l'infiltration ne doit plus évoluer mais doit simplement voir la teneur en eau augmenter, ce qui est compatible avec les résultats d'inversion présentés.

L'inversion en laps de temps sans contrainte possède l'avantage d'être plus tolérante face au bruit de mesure, de permettre une modification des protocoles d'acquisition et enfin de bien gérer de fortes variations du milieu. La seconde méthode (présentée lors de la section 2.3.9) choisit comme modèle *a priori* (initial) le résultat de l'inversion à l'instant T_0 . Cette méthode permet d'optimiser la détection de phénomènes évolutifs et de limiter la formation d'artéfacts. De plus, elle possède aussi l'avantage de pouvoir travailler avec des protocoles d'acquisition différents, mais est limitée lors de trop fortes variations du milieu. Ce type de sélection du modèle initial suit la démarche proposée lors du Chapitre 3 (figure 3.15). Les figures 4.39 et 4.40 présentent ainsi les résultats d'inversion appliquant cette démarche.

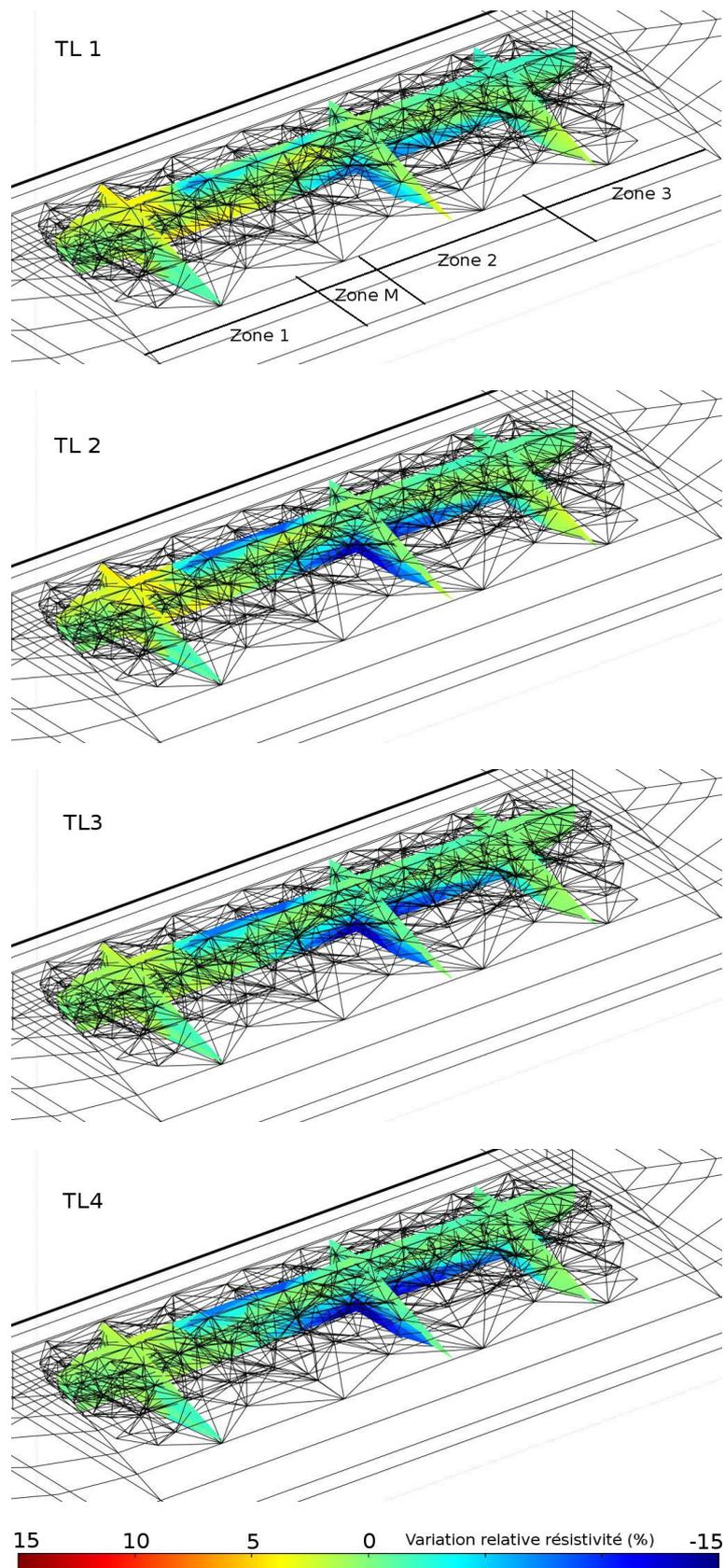


FIGURE 4.37 – Succession temporelle de résultats d'inversion présentant respectivement les variations relatives TL1, TL2, TL3 et TL4. La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité du milieu. L'erreur RMS augmente quasi continuellement de 1.2 à 1.7 %.

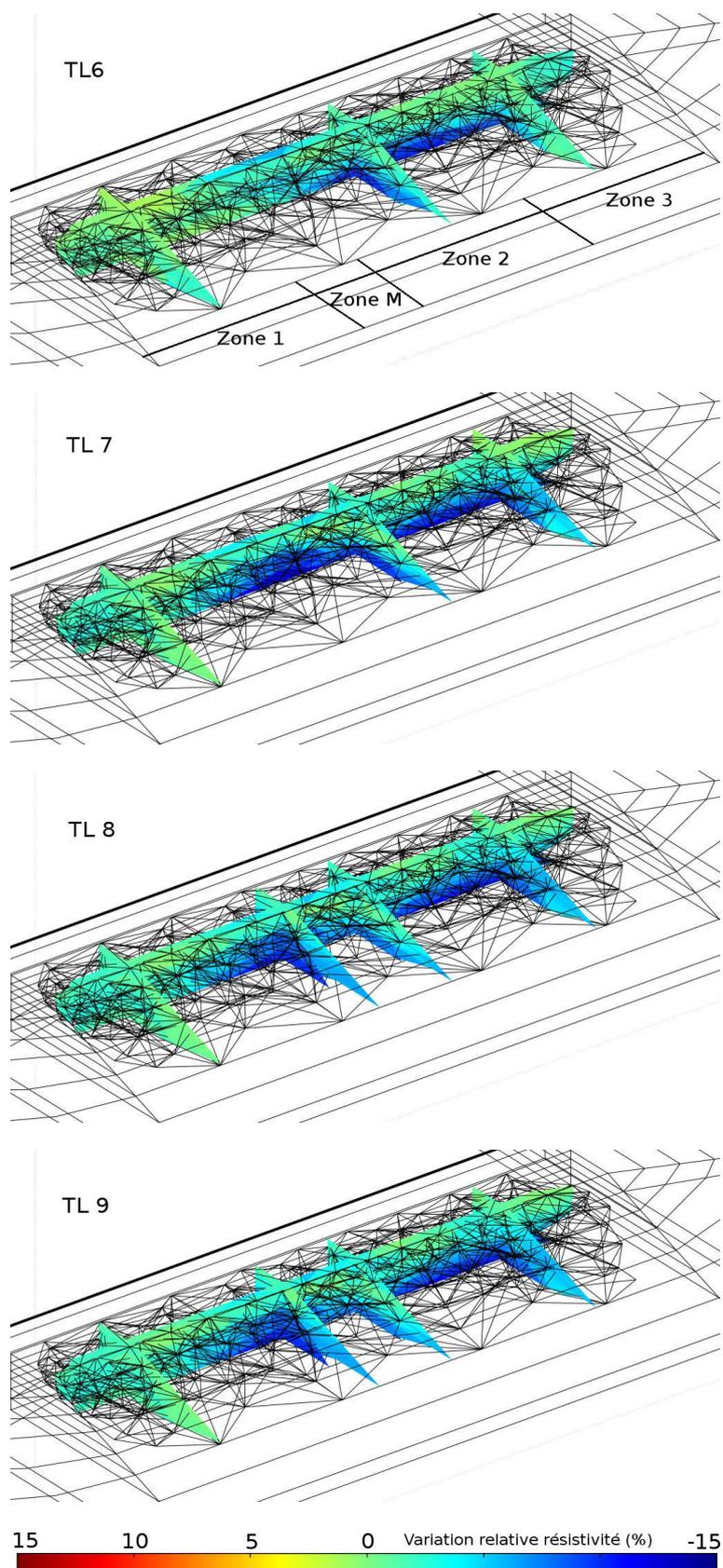


FIGURE 4.38 – Suite des séquences temporelles de résultats d'inversion présentant respectivement les variations relatives TL6, TL7, TL8 et TL9. La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité du milieu. L'erreur RMS varie entre 1.7 à 2.3 %.

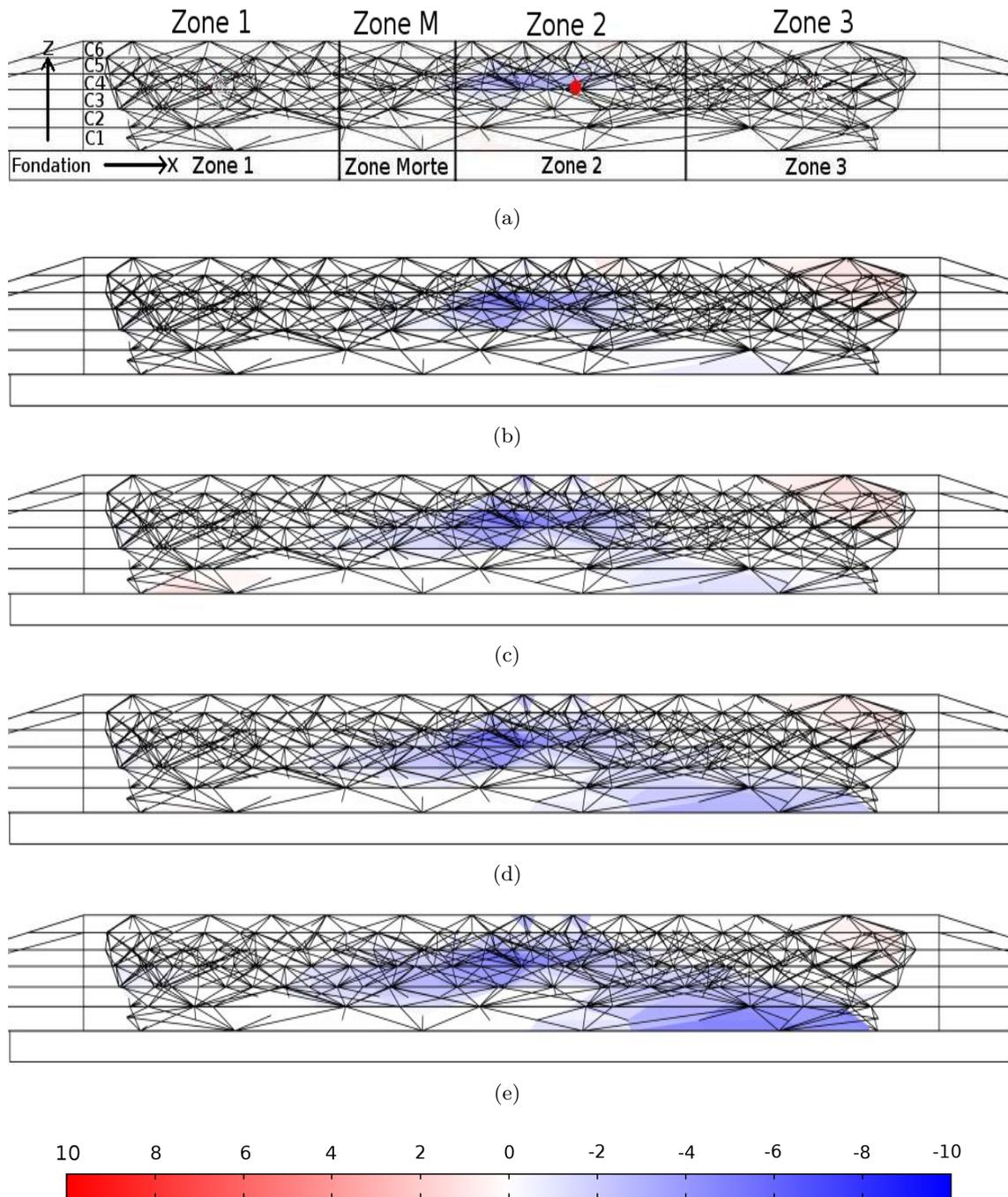


FIGURE 4.39 – Séquences temporelles d'inversion présentant respectivement la variation relative entre l'instant T_0 de référence depuis l'instant 4.39(a) T_1 jusqu'à l'instant 4.39(e) T_5 . La couleur bleue indique une variation négative du logarithme de la résistivité électrique du milieu. La position du tuyau d'injection est représentée en rouge sur la première figure avec la délimitation des Zones 1, 2 et 3.

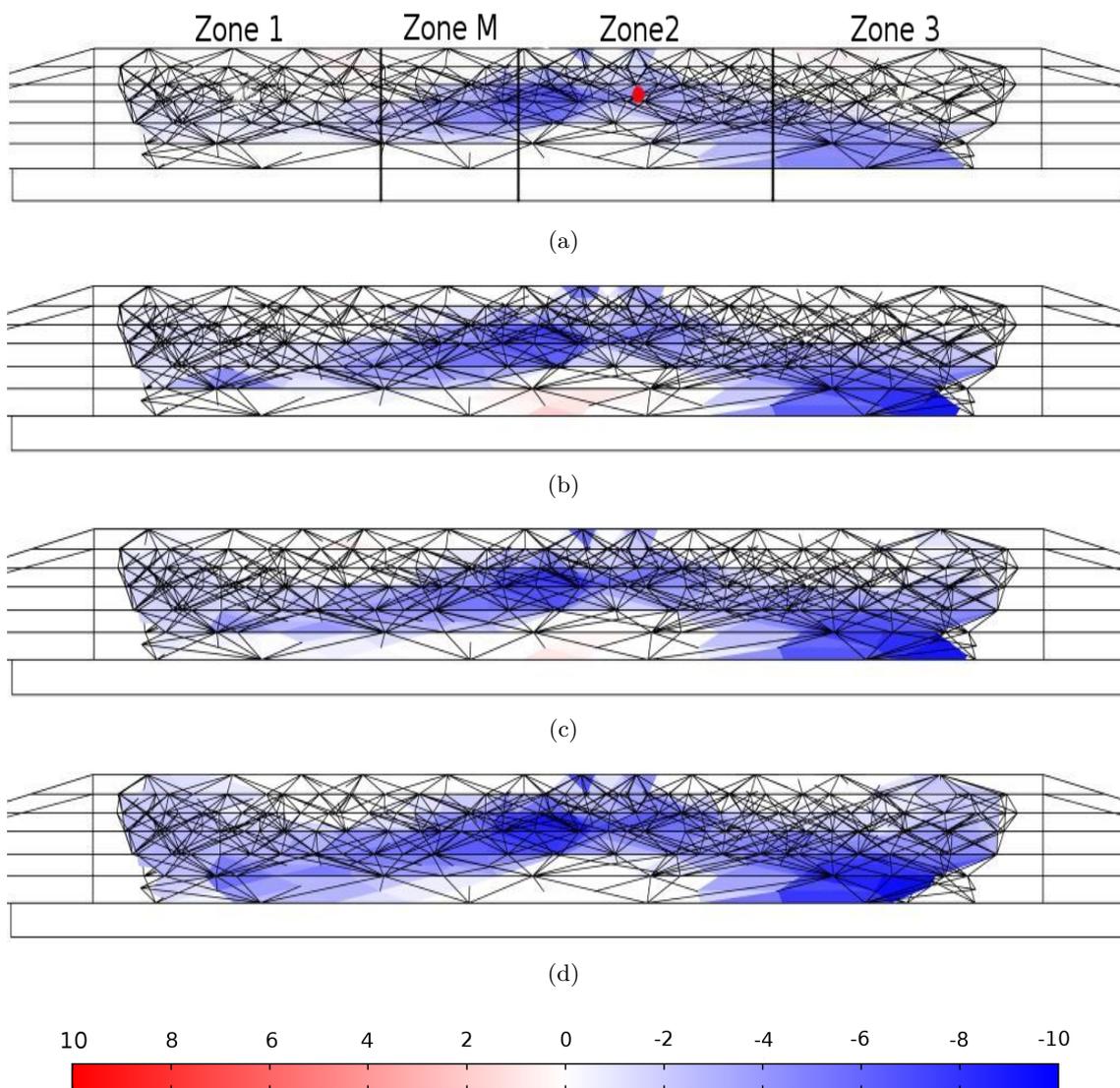


FIGURE 4.40 – Suite des séquences temporelles de résultats d'inversion présentant respectivement la variation relative entre l'instant T_0 de référence depuis l'instant T_6 (figure 4.40(a)) jusqu'à l'instant T_9 (figure 4.40(d)). La couleur bleue indique une variation négative de la résistivité électrique du milieu. L'échelle des couleurs représente la variation relative des logarithmiques de résistivité (%). La position du tuyau d'injection est représentée en rouge sur la figure 4.40(a) avec la délimitation des Zones 1, 2 et 3.. L'erreur RMS varie faiblement sur cette séquence temporelle entre 1.5 et 2.0 %.

Pour ce cas, et pour faciliter la lisibilité du résultat, seule la coupe transversale du résultat précédent est illustrée (coupe située 1 m après la fin du tuyau d'injection en direction de la partie sableuse). Ce type de visualisation permet de distinguer plus clairement les zones préférentielles d'écoulement. Ainsi, d'après ces résultats entre l'instant $T1$ et $T3$ seule une augmentation du bulbe d'injection se produit. À partir de l'instant $T4$ et jusqu'à l'instant $T6$ la *Zone 3* est atteinte par l'infiltration et une augmentation de la saturation est observée. Il peut être noté que ce comportement est parfaitement expliqué par les réponses des sondes TDR. Ensuite, à partir de l'instant $T6$ et jusqu'à l'instant $T9$ une modification de l'écoulement s'opère pour alimenter la *Zone 1* d'abord finement ($T6$) puis plus franchement ($T8$). Or, cette distribution est parfaitement expliquée par les réponses des sondes TDR.

4.4.4.c Conclusion

Cette étude présente deux résultats d'inversion en variation temporelle, le premier sans contrainte entre les instants d'inversion (figure 4.37 et 4.38) et le second avec contrainte entre les évolutions temporelles (figure 4.39 et 4.40). À la différence de l'inversion non contrainte ce résultat apporte une vision plus précise de l'évolution de l'ouvrage et dont les résultats sont mieux corrélés avec les sondes TDR. Nous espérons ainsi montrer que ce dernier résultat présente la manière la plus robuste (parmi les méthodes présentées) permettant d'assurer la surveillance de la DiguExpERT par imagerie de résistivité électrique. De plus, ce résultat montre que l'utilisation d'algorithmes adaptés peut améliorer considérablement l'inversion et qu'un effort modéré dans ce domaine pourrait encore apporter énormément en termes de résolution et de robustesse.

D'un point de vue quantitatif, et à partir d'une loi d'Archie modifiée [Keller & Frischknecht, 1966], cette évolution de résistivité peut être traduite en termes d'évolution de la saturation pour être ensuite comparée à la teneur en eau mesurée par les sondes TDR. Cependant, ces développements sont encore à réaliser et offrent une perspective intéressante à court terme de validation quantitative de la méthode.

4.5 Conclusion des études réalisées sur l'ouvrage DiguExpERT

Une digue expérimentale de 23 m de longueur, 16 m de largeur et 3 m de hauteur a été élaborée, réalisée et étudiée au cours de la thèse. Plusieurs études préalables ajoutées à un contrôle rigoureux du montage ont permis la réalisation de cet ouvrage dont le but est la génération d'infiltrations dans des conditions semi-contrôlées. De plus, de nombreuses sondes intégrant plusieurs phénomènes physiques ont été positionnées au cœur de la digue expérimentale afin d'assurer le suivi temporel du phénomène d'infiltration.

Au niveau de la *Zone 2*, une séquence d'infiltration est générée afin de qualifier la capacité de codes commerciaux (Res2Dinv® et Res3Dinv®) et d'un code réalisé au cours de la thèse (InGEOHT) à détecter son évolution. Ces résultats illustrent notamment qu'une visualisation en « absolu » ne permet pas d'interpréter le passage d'un front de saturation du fait de la complexité naturelle des milieux étudiés. À l'inverse, l'utilisation d'algorithmes « time-lapse » a permis de mettre en évidence des évolutions temporelles dans le corps de l'ouvrage pertinentes (vis à vis des sondes TDR) que ce soit avec les progiciels Res2Dinv® et Res3Dinv® ou avec le code InGEOHT.

De plus, un test portant sur le bénéfice de la technique de normalisation a été confronté aux résultats en variation temporelle. En conclusion, et dans le cadre de l'expérimentation, cette technique n'a pas apporté d'amélioration lorsque les électrodes sont placées en surface (figure 4.17). Cependant, dans le cadre de mesures 2D avec des électrodes enfouies (étude 2, MG-25-E) l'utilisation de la technique de normalisation entraîne une modification des résultats en variation temporelle. Cette différence de résultat (figure 4.24) indique que le code commercial Res2Dinv® n'est pas adapté à ce type d'inversion (électrodes enfouies) même en variation temporelle. De plus, ce résultat illustre qu'une inversion réalisée en variation temporelle ne peut supprimer la totalité des effets liés à la topographie, mais qu'elle peut, dans certains cas, en limiter les effets.

L'une des raisons principales ayant menée à la construction de l'ouvrage expérimental concernait la validation du code d'inversion InGEOHT - 3D⁻. Même si la « validation » de l'apport de ce nouveau code n'a pas pu être démontrée, la qualité des résultats obtenus illustre la pertinence d'une stratégie permettant d'inclure un maximum d'information *a priori*. En conséquence, l'application du code InGEOHT - 3D⁻ a surtout permis de cerner les difficultés liées à son utilisation dans le cadre d'une expérimentation réelle et de proposer de nouvelles solutions plus adaptées à la problématique de surveillance.

L'expérimentation réalisée au CER de Rouen était aussi l'occasion de tester la pertinence des résultats d'optimisation du positionnement des électrodes (cf. Chapitre 3). À cet effet, des câbles spécifiquement conçus pour l'expérimentation avaient été réalisés et ont été employés pour la caractérisation des infiltrations. Encore une fois, même si les reconstructions obtenues présentent les résultats les plus satisfaisants, il peut être noté que l'étude n'a pas permis de valider l'apport de la technique d'optimisation du positionnement des électrodes. Cependant, cette étude a permis de faire ressortir les limitations d'une telle démarche. En effet, la technique d'optimisation du placement des électrodes (comme toute démarche d'optimisation basée sur la matrice de résolution du modèle) suppose que l'expérimentation va suivre les études théoriques. Or, une des principales hypothèses à la base de l'optimisation stipulait que l'évolution des infiltrations suivrait une géométrie de type bulbe gravitaire. Cependant, les résultats ont montré que l'infiltration s'est comportée de manière beaucoup plus complexe que la théorie ne le prévoyait. En conséquence, l'auscultation était bien optimisée mais pour la détection d'un phénomène qui ne s'est pas produit, limitant ainsi très fortement l'utilité d'une telle démarche. C'est pourquoi, même si les résultats issus des électrodes optimisées sont prometteurs, il est difficile de séparer la part liée i) à l'optimisation du placement des électrodes, ii) à l'utilisation du code InGEOHT - 3D⁻. Cette expérimentation confirme ainsi l'expression tirée du folklore scientifique :

« la différence entre théorie et pratique est toujours plus faible en théorie qu'en pratique ».

Cette expression est lourde de sens. Elle illustre clairement que le passage de la théorie à l'application terrain ne peut se faire du jour au lendemain et justifie pleinement l'utilisation d'un outil expérimental semi-contrôlé (la DiguExpERT) afin de confronter les développements réalisés. Cette expression nous amène à une dernière conclusion, à savoir, la complexité d'une auscultation sur un ouvrage semi-contrôlé ne peut être représentative de la complexité d'une auscultation sur un ouvrage réel. C'est pourquoi, afin de parfaire l'utilisation des développements réalisés au cours de la thèse, une confrontation sur un ouvrage hydraulique réel est nécessaire.

Chapitre 5

Expérimentation sur ouvrage réel : Cas d'étude

Contents

5.1	Caractérisation conventionnelle de l'ouvrage	182
5.1.1	Présentation de l'ouvrage ausculté	182
5.1.2	Contexte géologique	183
5.1.3	L'inspection visuelle	184
5.1.4	La topographie de l'ouvrage	184
5.1.5	Conclusion des études préalables	184
5.2	Démarche de création d'un modèle $2D^+$	185
5.2.1	Évaluation de l'information <i>a priori</i> nécessaire	185
5.2.1.a	Le réservoir d'eau	185
5.2.1.b	Les parements en béton	186
5.2.1.c	Niveau d'eau dans le corps de digue	187
5.2.1.d	Les apports d'une reconnaissance conventionnelle	187
5.2.2	Intégration de l'information <i>a priori</i>	188
5.2.2.a	Discrétisation du problème inverse	189
5.2.2.b	Régularisation du problème inverse	193
5.3	Campagne de reconnaissance longitudinale	195
5.3.1	Présentation des données	195
5.3.2	Traitement conventionnel	197
5.3.3	Approche par normalisation	198
5.3.3.a	Normalisation de l'effet de la topographie	199
5.3.3.b	Normalisation de l'effet couplé du réservoir et de la topographie	200
5.3.3.c	Discussion	201
5.3.4	Application de l'approche $2D^+$	201
5.3.4.a	Résultats de l'approche $2D^+$	201
5.3.4.b	Comparaison, interprétation et conclusion	203
5.4	Application de l'approche $3D^-$ à une auscultation locale	204
5.4.1	Illustration numérique de l'approche $3D^-$	205
5.4.2	Application de l'approche $3D^-$ au cas d'étude	208
5.4.3	Résultats, discussion et conclusion	208
5.5	Conclusion	212

Introduction

Afin de tester et valider les développements de la thèse en conditions réelles d'auscultation, une étude est réalisée dans le Sud-Ouest de la France sur un ouvrage de type digue en charge à proximité d'une centrale de production d'électricité.

Cette étude de R&D réalisée pour le compte de EDF-CIH (Centre d'Ingénierie Hydraulique) fait suite à une campagne d'auscultation des canaux d'amenée de cette région. Cette campagne a notamment concentré l'intervention d'une recherche géologique, d'une inspection visuelle et d'une reconnaissance géophysique multi-méthodes. Cette dernière a fait intervenir une reconnaissance à grand rendement d'IRE et par Potentiel Spontané (PS) aquatique et terrestre. L'étude géophysique présentée a été réalisée en marge de ces autres prestations plus « opérationnelles ».

Ce chapitre introduit tout d'abord le site, les études préalables réalisées et la portion d'ouvrage sélectionnée. Ensuite, le cas d'une prospection longitudinale est sélectionné afin d'illustrer les problèmes liés à la création d'un modèle $2D^+$ d'inversion. Cette section permet ainsi d'illustrer comment est réalisé un modèle $2D^+$ d'inversion et avec quelle information *a priori*. Par la suite, deux niveaux d'utilisation de la technique de normalisation sont appliquées aux données mesurées issues d'une campagne de reconnaissance longitudinale de 500 m de longueur. Ces traitements sont réalisés dans l'objectif de comparer ces résultats à un résultat d'inversion plus conventionnel. Cette campagne longitudinale peut être assimilée à une reconnaissance « grand-rendement » dans une méthodologie d'auscultation des OHT. Afin de pousser la démarche d'auscultation, la stratégie $2D^+$ est appliquée aux données issues de cette campagne longitudinale. À la suite de ces résultats, une démarche supplémentaire, la stratégie $3D^-$, est appliquée à une étude numérique puis à des données issues d'une campagne plus localisée sur l'ouvrage. Enfin, une conclusion sur les différents niveaux de traitement de l'information est présentée en parallèle d'une synthèse des stratégies développées.

5.1 Caractérisation conventionnelle de l'ouvrage

La recherche d'indices, présentée sous le nom de phase 1 (étude préalable) dans la méthodologie de Fauchard & Mériaux [2004], est une étape primordiale pour le bon déroulement des reconnaissances géophysiques conventionnelles. De plus, ces indices sont indispensables pour l'application des développements réalisés dans la thèse. En conséquence, cette section a pour objectif de présenter tous les indices récoltés concernant cet ouvrage.

5.1.1 Présentation de l'ouvrage ausculté

La typologie d'ouvrage ausculté correspond à une digue en charge homogène (sans noyau). Depuis la sortie d'une centrale (canal de fuite) jusqu'au bassin de mise en charge (BMC) de la centrale suivante, le canal d'amenée est successivement construit en déblai puis en remblai. Les figures 5.1(a) et 5.1(b) présentent respectivement une coupe schématique d'un ouvrage construit en remblai et une photographie des bajoyers au niveau d'un BMC.

Pour les zones en remblai, l'étanchéité des ouvrages est obtenue grâce à un parement en béton sur la face amont de l'ouvrage. Avec une hauteur pouvant atteindre 10 mètres, le remblai est essentiellement composé d'alluvions quaternaires prélevées à proximité.

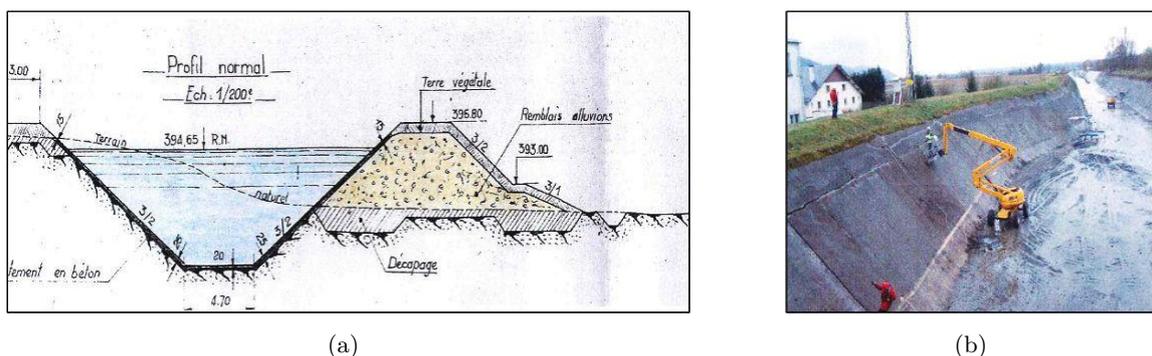


FIGURE 5.1 – Illustrations 5.1(a) d'une coupe schématique de la composition de l'ouvrage au niveau d'une section en remblai et 5.1(b) des bajoyers au niveau d'un BMC.

5.1.2 Contexte géologique

L'extrait de la carte géologique indique que la zone d'étude se situe à l'interface entre les formations glaciaires F_{ya} et F_{yb} (figure 5.2(a)). Ces formations sont très hétérogènes et composées essentiellement de matériaux moyens à grossiers (sables, graviers, galets) avec un diamètre moyen de 10 à 20 cm pour les galets (figure 5.2(b)). Il peut être indiqué que la formation servant de fondation à l'ouvrage est semblable au matériau constituant le corps de l'ouvrage. Enfin, les résultats de forages réalisés à proximité témoignent d'une épaisseur d'alluvions supérieure à 14 m.

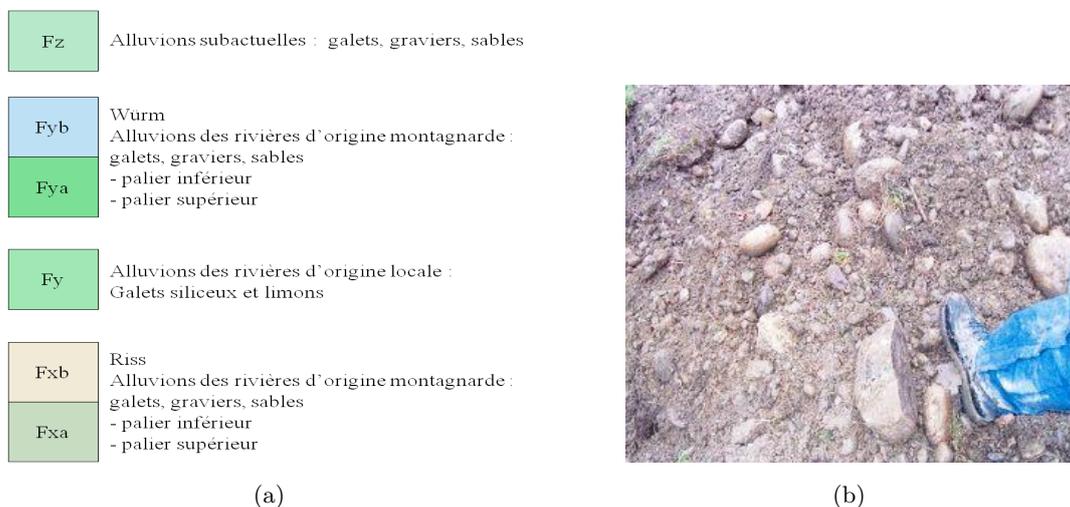


FIGURE 5.2 – Illustration 5.2(a) d'un extrait de la légende de la carte géologique (BRGM) et 5.2(b) du matériau composant le corps de l'ouvrage.

D'un point de vue « géo-électrique », les formations étant très semblables, la différenciation entre la fondation et le corps de digue semble peu probable. De plus, le matériau étant très hétérogène, sa résistivité électrique peut varier entre 50 à 10 000 $\Omega.m$ d'après Palacky [1987] (figure 2.4, Chapitre 2). Enfin, d'après l'étude géologique du BRGM, l'épaisseur de la formation F_{ya} varie de 3 à 5 m, et de 7 à 10 m pour la formation F_{yb} . Cependant, l'épaisseur de ces formations pouvant évoluer, il est difficile d'intégrer cette information dans la méthodologie de traitement de l'information.

5.1.3 L'inspection visuelle

Le rapport réalisé par le CIH détaille les pathologies observées sur l'ouvrage lors d'une inspection visuelle. L'unité principale de distance utilisée pour localiser les anomalies est le Point Métrique (*PM*). Cette unité donne la distance en mètre, suivant la digue en charge, depuis le début du canal de fuite d'une centrale. Lors de cette inspection et en fonction des positions sur l'ouvrage, les flaches, les terriers, les tassements en crête, les dégradations du parement amont, les déformations du talus aval, et les ouvrages traversants sont répertoriés, et leur position repérée.

5.1.4 La topographie de l'ouvrage

Les méthodologies conventionnelles de monitoring des ouvrages hydrauliques [Fauchard & Mériaux, 2004; Fell & Fry, 2007], demandent un suivi de la déformation de l'ouvrage à partir d'une surveillance topographique. En conséquence, un relevé topographique a été réalisé par profils longitudinaux (figure 5.3 en bleu) à tous les niveaux de rupture de pente (aux deux extrémités de la crête de la digue et en pied de digue). De plus, plusieurs profils transversaux ont été réalisés tous les 100 à 200 m illustrés par les points verts de la figure 5.3. La figure 5.3 illustre les positions géo-référencées (en rouge) des électrodes de mesures issues d'un profil 2D longitudinal réalisé au centre de la crête de la digue et (en noir) des points fixes de repère tels que les piézomètres. Ainsi, 96 électrodes ont été positionnées avec un pas de 5 m afin de respecter les critères conventionnels d'acquisition. Ces mesures reproduisent les traits d'une auscultation d'IRE à grand rendement, sur une portion limitée d'ouvrage (475 mètres de linéaire).

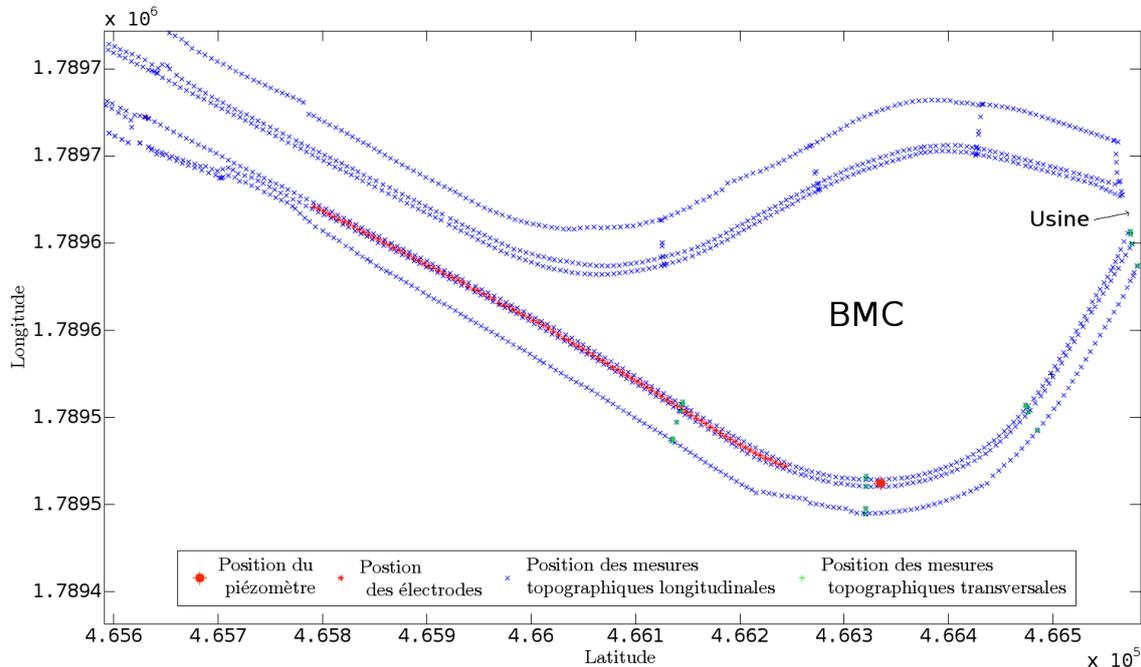


FIGURE 5.3 – Vue en plan du géoréférencement des points de mesure topographique, des électrodes d'IRE (d'une campagne longitudinale) et du piézomètre en coordonnées Lambert III (mètres).

5.1.5 Conclusion des études préalables

Les résultats de l'étude géophysique conventionnelle ont été utilisés de manière complémentaire à l'inspection visuelle et aux considérations liées au risque de rupture afin de déterminer une

portion d'ouvrage pour notre étude. La portion d'ouvrage sélectionnée correspond à une digue montée en remblai dont la hauteur varie de 5 à 7 mètres et s'étend sur 500 mètres (figure 5.3). Le milieu de la zone d'intérêt correspond à l'entrée du BMC (figure 5.3).

Les considérations ayant entraîné le choix de cette zone sont :

- i). le risque engendré par l'existence d'habitations et d'industries à proximité, au regard de la hauteur de charge à cet endroit ;
- ii). l'observation de légers flaches et de détériorations sur le parement amont ;
- iii). les résultats géophysiques à grand rendement indiquant des zones de faiblesse potentielles ;
- iv). l'absence de conduite traversante pouvant perturber la méthode d'IRE.

5.2 Démarche de création d'un modèle $2D^+$

L'auscultation conventionnelle des OHT par méthode $IRE - 2D$ peut générer la formation d'artéfacts dans le résultat. En conséquence, il est nécessaire de disposer de méthodes permettant de fiabiliser ce résultat d'imagerie afin d'améliorer son interprétation. L'objectif est donc d'appliquer les développements réalisés au Chapitre 3 et 4 pour les confronter aux difficultés d'une auscultation d'un ouvrage réel. L'auscultation correspond dans cette section à une reconnaissance longitudinale de 475 m de long dont la position des électrodes est illustrée à la figure 5.3. Dans ce cadre précis, cette section présente l'information *a priori* pouvant être intégrée dans le problème inverse, la manière dont elle est intégrée et enfin les modèles issus de ces développements. Plus particulièrement, l'application de cette démarche est limitée dans cette section à la création d'un modèle $2D^+$. Cependant, cette démarche est en partie identique pour la création d'un modèle $3D^-$, c'est pourquoi, celle-ci ne sera pas présentée dans cette section.

5.2.1 Évaluation de l'information *a priori* nécessaire

D'après l'étude numérique présentée au Chapitre 2, les mesures de différence de potentiel obtenues sur une digue en charge sont principalement affectées par :

- i). la composition interne de l'ouvrage (fondation, corps d'ouvrage, noyau, palplanches, parement, ...);
- ii). le réservoir d'eau présent côté amont de l'ouvrage ;
- iii). la topographie de l'ouvrage.

À mon sens, il est nécessaire de différencier l'effet naturel lié à la composition du milieu, des effets « perturbateurs » liés à la présence du réservoir et de la topographie. En effet, l'objectif d'une auscultation vise à imager l'intérieur de la digue et non les milieux perturbateurs (le réservoir). Cependant, afin d'améliorer l'inversion des données, ces trois éléments doivent être représentés de la manière la plus précise dans le modèle du problème inverse.

5.2.1.a Le réservoir d'eau

La présence du réservoir peut impacter les différences de potentiel mesurées de manière prépondérante en fonction :

- de la position des mesures ;

- du rapport de résistivité entre le corps du remblai et le réservoir d'eau ;
- de la géométrie du réservoir d'eau.

La géométrie du réservoir peut être déterminée à partir de documents de conception de l'ouvrage (figure 5.1(a)) et de la connaissance du niveau d'eau dans la digue. Afin de déterminer l'amplitude de l'impact du réservoir sur les mesures, des prélèvements doivent être réalisés au sein du réservoir d'eau, accompagnés de mesures de température de l'eau. Une caractérisation en laboratoire des prélèvements in-situ permet ainsi de déterminer la résistivité de l'eau du réservoir (après correction de l'effet de la température). Ces prélèvements ont permis de caractériser une eau à $80 \Omega.m$. Or, la résistivité électrique moyenne du corps de l'ouvrage (moyenne des résistivités apparentes corrigées de l'effet de la topographie et du réservoir) est d'environ $2000 \Omega.m$. Ainsi, le rapport de résistivité entre le corps de digue et l'eau du réservoir est d'environ 25. Ce rapport très élevé illustre, en fonction de la position et des protocoles d'acquisition, que l'effet du réservoir sur la mesure peut être très important.

Au niveau du réservoir d'eau, un léger courant animait le canal permettant d'émettre une hypothèse d'« homogénéité » de la résistivité électrique de l'eau du réservoir. Cependant, en fond de réservoir un envasement composé d'un dépôt alluvionnaire fin est présent. Ce matériau fin (dont aucun prélèvement n'a été réalisé) doit être un très bon conducteur électrique pouvant renforcer la conductivité du bloc réservoir. En conséquence, il réside une part d'incertitude dans la géométrie et la composition du réservoir qu'il est nécessaire de minimiser au maximum. C'est pourquoi, de nouvelles recommandations peuvent être demandées pour l'auscultation des OHT telles que la mesure du gradient de résistivité dans le réservoir, le niveau d'envasement, et la géométrie exacte du réservoir. En effet, il est nécessaire de différencier les caractérisations pouvant être réalisées de manière préalable (mesure du gradient de résistivité du réservoir, géométrie du réservoir) des caractérisations nécessitant des méthodes géotechniques ou géophysiques (imagerie des corps solides).

5.2.1.b Les parements en béton

Des essais d'auscultation à proximité de la zone d'étude ont été réalisés en 2006 conjointement entre EDF-R&D et le LCPC et ont donné lieu à l'élaboration d'un rapport d'étude. Une partie de l'étude est focalisée sur la caractérisation de l'effet des parements en béton sur les mesures de résistivité électrique. Afin de caractériser cet effet, plusieurs tomographies de résistivité électrique ont été réalisées de manière longitudinale à l'ouvrage à des distances plus ou moins élevées des parements. La figure 5.1(a) présente un des documents d'archives schématisant la géométrie et la composition du parement en béton au niveau de ces essais. Cette étude a montré que l'éloignement des lignes longitudinales d'électrodes avait pour effet de limiter l'action d'un milieu conducteur. Un béton sec ayant une résistivité élevée, il est nécessaire que le parement soit saturé en eau afin d'expliquer une signature conductrice [Lataste, 2002]. Cependant, le réservoir d'eau placé à proximité permet d'expliquer en grande partie la signature mesurée. Ainsi, quelle que soit sa résistivité réelle (dans la gamme des géo-matériaux), l'effet du parement semble « noyé » dans l'effet du réservoir. Cette hypothèse est confortée par l'étude numérique réalisée au chapitre 2 (figure 2.14), indiquant que le parement amont possède un effet négligeable en comparaison de l'effet du réservoir. Cependant, il existe des ferrailages (non jointifs) présents dans les parements dont l'impact est mal connu sur les mesures IRE.

5.2.1.c Niveau d'eau dans le corps de digue

La connaissance du niveau de la ligne de saturation est un paramètre primordial à la fois pour les gestionnaires d'ouvrages hydrauliques et les géophysiciens travaillant avec la méthode d'IRE. En effet, le niveau de la ligne de saturation ayant un impact important sur la mesure, sa connaissance permet d'améliorer considérablement l'inversion. Les logiciels d'inversion actuels proposent à cet effet une option permettant d'indiquer cette profondeur [Loke, 2011; Günther *et al.*, 2006].

Les responsables d'ouvrages s'intéressent vivement à ce paramètre car une partie du diagnostic de surveillance conventionnel impose un suivi de la hauteur d'eau dans les piézomètres (cf. Chapitre 1). De plus, cette information peut être primordiale pour la quantification du potentiel de fuite et d'érosion par les méthodes de Fibre Optique et/ou de modélisation d'écoulement en milieu poreux. À cet effet, plusieurs mesures de hauteur de nappe ont été réalisées dans les piézomètres positionnés sur la portion d'ouvrage étudiée. Ces mesures ont révélé l'absence de la nappe jusqu'à 11 m de profondeur.

5.2.1.d Les apports d'une reconnaissance conventionnelle

Afin d'améliorer la fiabilité d'un résultat d'inversion, il est important que sa discrétisation s'apparente le plus possible à la distribution réelle de résistivité du milieu ausculté. Dans l'objectif d'améliorer la discrétisation d'une stratégie $2D^+$ pour l'auscultation longitudinale à l'ouvrage, il est nécessaire de posséder un *a priori* sur la distribution de résistivité électrique dans la direction transversale et verticale à l'ouvrage. Or, cette information peut être fournie par le résultat d'une campagne d'IRE-2D transversale à l'ouvrage.

En conséquence, une campagne d'IRE avec une ligne d'électrodes placée transversalement à l'ouvrage est réalisée. Afin que les résultats d'une campagne $2D$ « transversale » soient pleinement exploitables, il est nécessaire que celle-ci respecte plusieurs règles :

- les variations internes de résistivité dans le sens longitudinal à l'ouvrage sont suffisamment faibles pour garder l'hypothèse $2D$ correcte ;
- la topographie de l'ouvrage ne varie pas longitudinalement (pas de modification de la hauteur du remblai, de sa forme ou d'incurvation dans la forme du linéaire) ;
- le réservoir d'eau placé côté amont de l'ouvrage peut être spécifié dans l'inversion.

Ainsi, lorsque ces conditions sont respectées, le résultat d'inversion peut être considéré en théorie robuste. Cette fiabilité dépend nécessairement d'autres paramètres tels que la composition interne de l'ouvrage, les spécifications de l'acquisition (choix des protocoles), et du bruit sur les mesures. En conséquence, une imagerie $2D$ transversale peut renseigner sur la composition verticale et transversale de l'ouvrage. Cette information peut être utilisée pour façonner la discrétisation du problème inverse. À cet effet, la figure 5.4 présente le résultat d'une prospection $2D$ transversale réalisée sur l'ouvrage hydraulique que nous supposons *a priori* robuste.

De plus, le critère RMS d'erreur sur les données est inférieur à 2% à partir de la quatrième itération d'inversion indiquant que la reconstruction explique « bien » les données mesurées. En conséquence, le milieu peut être interprété comme un tri-couche, composé d'un premier horizon « conducteur » de 600 à 1500 $\Omega.m$ sur les 50 premiers centimètres, puis d'une couche plus résistante sur près d'un mètre de 1500 à 3000 $\Omega.m$. Enfin, en dessous de 1 à 1,5 m de profondeur la

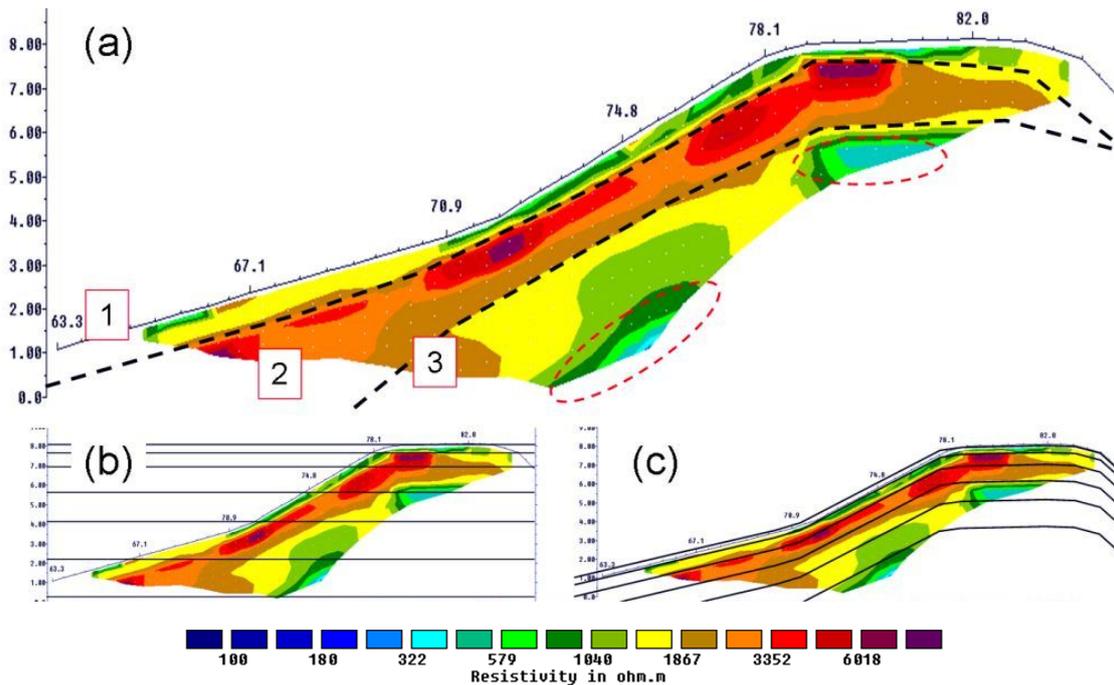


FIGURE 5.4 – Coupe 2D de résistivité inversée à partir d'une ligne d'électrodes disposée transversalement à la digue. Les données mesurées sont issues d'un protocole Wenner-Schlumberger de 24 électrodes espacées de 1 m. Trois interprétations sont données : (a) sous forme de 3 sous domaines, (b) sous forme de six couches horizontales (hypothèse 2D) et (c) sous forme de six couches reproduisant la topographie de l'ouvrage en profondeur.

résistivité rechte en dessous de $1800 \Omega.m$ et présente deux anomalies entourées en rouge (figure 5.4(a)). Le document d'archive présenté à la figure 5.1(a) semble conforter une partie de cette hypothèse indiquant une première couche assimilable à de la terre végétale sur le premier mètre de remblai puis d'un milieu homogène composé d'alluvions sur le reste de la hauteur du remblai. Ainsi, la troisième couche n'apparaît pas dans le document d'archive remettant en question son existence réelle.

Afin de réaliser la stratégie $2D^+$ deux choix de discrétisation sont superposés sur le résultat d'inversion précédent (figure 5.4). La figure 5.4 présente ainsi le principe d'une discrétisation (b) sans déformation de maillage et (c) avec déformation de maillage. Ce résultat illustre clairement que les distributions transversale et verticale ne peuvent se conformer à la discrétisation sans déformation de maillage (hypothèse 2D). *A contrario*, la discrétisation avec déformation de maillage semble convenir assez précisément à la distribution transversale de résistivité interne de l'ouvrage et permet d'intégrer à la fois la topographie de l'ouvrage et la présence d'un réservoir.

5.2.2 Intégration de l'information *a priori*

Le paragraphe précédent a montré de manière thématique les différentes informations *a priori* importantes pour la mise en oeuvre de la stratégie $2D^+$ et $3D^-$. Afin de pouvoir intégrer explicitement tout cet *a priori*, deux étapes sont nécessaires :

- optimiser la discrétisation du maillage d'inversion ;
- optimiser la régularisation du problème inverse.

5.2.2.a Discrétisation du problème inverse

L'information tirée des tomographies $2D$ transversales (figure 5.4) illustre qu'une discrétisation par déformation de maillage permet d'expliquer la distribution de résistivité électrique verticale et transversale de l'ouvrage. En effet, la discrétisation réalisée sur la figure 5.4(c) est beaucoup plus représentative de la distribution de résistivité du milieu que ne le permet une discrétisation $2D$ conventionnelle (figure 5.4(b)).

La méthode de déformation de maillage est une méthode souple permettant de « simplifier » le processus de création d'un modèle en limitant très fortement son maillage. Ainsi, lorsqu'une topographie est créée de manière explicite, chaque point de nivellement est interprété comme un point du modèle et nécessite d'être maillé. Ces contraintes alourdissent fortement le modèle lorsque celui-ci est complexe. Dans le cas de la déformation de maillage, les points ne sont pas créés explicitement. En effet, ces points de nivellement génèrent une fonction de déformation, s'appliquant directement aux mailles du problème direct du milieu. En conséquence, plus le maillage est fin et plus il permet de respecter une déformation de maillage. À l'inverse, plus le maillage est grossier et moins il permet de représenter une fonction de déformation, limitant ainsi sa précision. Toutefois, les zones topographiques nécessitant d'être reconstruites avec précision sont les zones à proximité des électrodes qui sont elles-mêmes des zones avec une forte densité de mailles.

Afin de générer un modèle par déformation de maillage plusieurs précautions doivent être prises. En effet, si une certaine attention n'est pas portée à la technique, celle-ci peut générer des erreurs. À cet effet, la figure 5.5 illustre le principe d'application d'une déformation de maillage permettant d'explicitier au mieux les particularités liées à son utilisation. Le premier schéma (a) reprend une fonction de déformation de maillage $2D$ en fonction de l'axe transversal à une digue. Cette déformation verticale est appliquée aux figures (b), (c), (d) et (f). La sous-figure (b) illustre que l'utilisation d'une déformation de maillage sur un seul des sous-domaines peut entraîner des discontinuités entre les sous-domaines. L'objectif d'un problème direct géo-électrique étant de permettre la diffusion d'un courant électrique entre les sous-domaines, cette discontinuité pose un problème important. Ensuite, les figures (c), (d) et (f) illustrent la nécessité de compenser la déformation de maillage sur certains des sous-domaines présentant déjà une topographie (cas du réservoir). Lorsque cette compensation n'est pas réalisée, la géométrie finale n'est pas représentative du milieu réel (figure (c)).

L'objectif d'une discrétisation $2D^+$ implique de pouvoir séparer certains effets perturbateurs en générant de manière explicite la géométrie de tous les sous-domaines importants (réservoir, remblai, ...). Or, la discrétisation présentée à la figure 5.5(d) ne permet pas d'atteindre cet objectif. En conséquence, la figure 5.5(f) représente l'objectif de discrétisation à atteindre car il permet une prise en compte explicite de la topographie de l'ouvrage, de la géométrie du réservoir et permet une variation interne de la résistivité électrique compatible avec le résultat de la figure 5.4.

En conséquence, en reprenant la démarche présentée à la figure 5.5, il est tout d'abord nécessaire d'obtenir la fonction de déformation verticale et de réaliser le modèle sans déformation. À cet effet, la figure 5.6 présente la discrétisation pouvant être utilisée pour l'inversion de campagnes

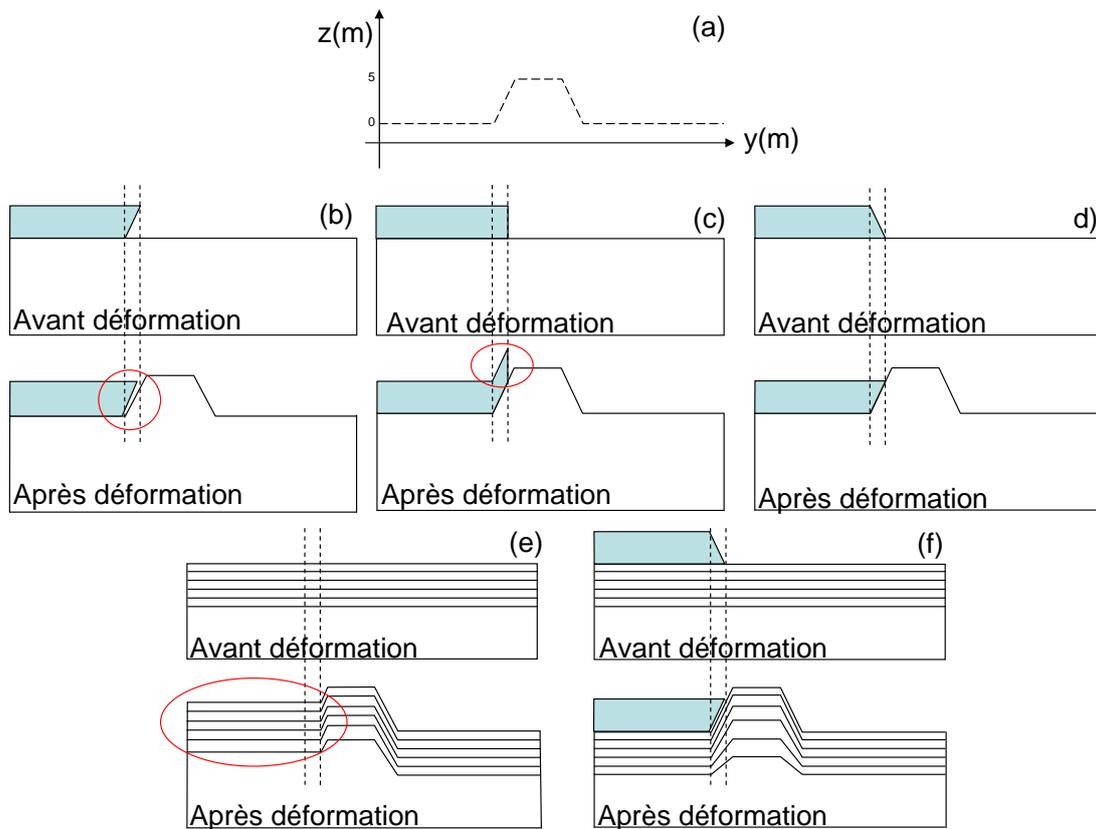


FIGURE 5.5 – Démarche schématisée de déformation de maillage sur un remblai (couleur blanche) et un réservoir (couleur bleue) appliquant une fonction de déformation verticale en fonction de l'axe transversal (a). Les figures suivantes présentent (b) une déformation de maillage s'appliquant seulement au remblai et générant une discontinuité (cercle rouge), (c) une déformation de maillage du réservoir et du remblai mais sans anticipation de la déformation générant une mauvaise géométrie (cercle rouge), (d) une déformation du remblai et du réservoir avec anticipation de la déformation du réservoir, (e) une déformation de maillage d'un milieu ne comprenant pas de réservoir mais un remblai discrétisé verticalement ne permettant pas la séparation du réservoir du remblai et (f) identique à (d) mais avec un remblai discrétisé verticalement.

longitudinales.

Il est important de comprendre que chaque sous-domaine de la figure 5.6 correspond à une cellule d'inversion et donc qu'aucune variation n'est possible à l'intérieur des cellules. À partir de ce modèle, il est possible d'extraire une vue 2D en coupe longitudinale permettant d'illustrer plus en détail la discrétisation interne. Cette coupe est illustrée à la figure 5.7 et indique que cette discrétisation d'inversion correspond grossièrement à celle utilisée par le progiciel Res2Dinv®.

À cet effet, une grille d'inversion est générée à partir du progiciel Res2Dinv® à partir d'un protocole généré durant la campagne d'auscultation. Cette grille d'inversion est présentée à la figure 5.8 et permet d'illustrer le haut niveau de similarité avec la discrétisation précédente.

Ces figures illustrent à quel point les discrétisations 2D et 2D⁺ sont semblables lorsqu'elles sont vues de face. Le modèle 2D⁺ est composé verticalement de 15 cellules (figure 5.9) générées avec un taux d'accroissement de l'épaisseur en profondeur de 1,15. La hauteur de la première cellule

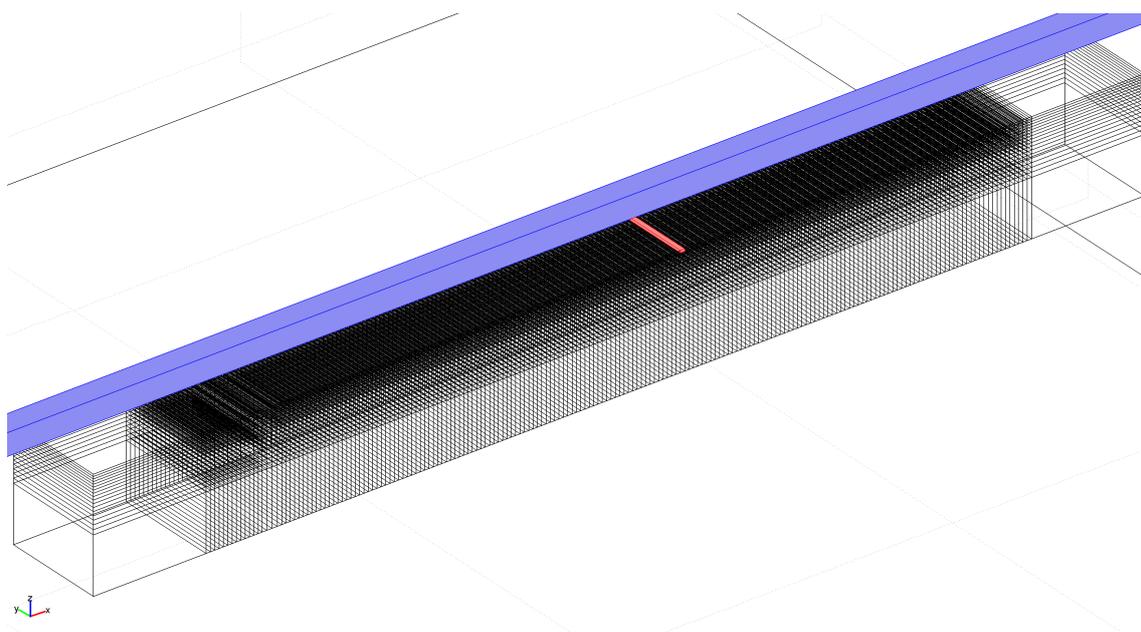


FIGURE 5.6 – Illustration 3D d'un exemple de modèle avant déformation de maillage. Le bloc bleu représente le réservoir d'eau, et chaque cellule discrétisée représente une cellule d'inversion. Une cellule est colorée en rouge afin de faire ressortir sa forme.

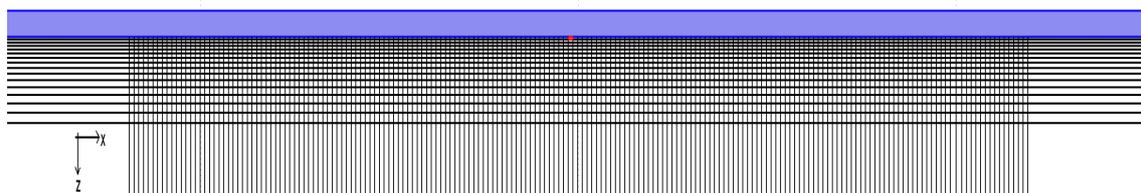


FIGURE 5.7 – Vue en coupe longitudinale de la discrétisation d'inversion 2D⁺ présentée à la figure 5.6. Le sous-domaine bleu représente le réservoir d'eau, les sous-domaines blancs les paramètres du milieu et enfin le sous-domaine rouge une cellule particulière du milieu.

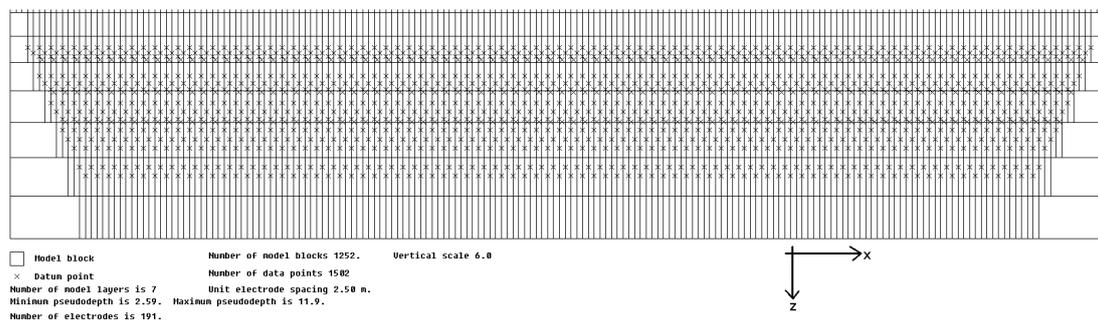


FIGURE 5.8 – Coupe longitudinale présentant une discrétisation d'inversion générée à partir du progiciel Res2Dinv® en fonction d'un protocole de mesure gradient multiple pour 96 électrodes. Le modèle est composé d'environ 2000 mailles.

(en surface) est ici fixée à 0,25 fois la distance séparant deux électrodes.

L'intérêt de cette discrétisation est de reproduire un maillage simple testé et utilisé avec « succès » par le progiciel Res2Dinv® dont les contraintes de régularisation sont assez simples à implémenter.

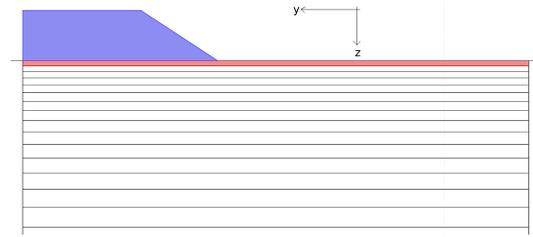


FIGURE 5.9 – Représentation du maillage d'inversion présenté à la figure 5.7 utilisant la stratégie $2D^+$, vu en coupe transversale. La surface bleue symbolise le réservoir avant déformation de maillage. La surface rouge présente une cellule d'inversion placée en proche surface vue de côté.

ter (cf. Chapitre 2). La figure 5.10 illustre une partie de la démarche présentée auparavant. En effet, la figure expose un maillage en éléments finis avant la déformation de maillage. La position des électrodes peut être identifiée grâce à la haute densité des mailles à proximité. Le trapézoïde situé à proximité des électrodes en amont représente le réservoir d'eau de manière semblable à la forme exposée au schéma 5.5(c). Cette forme évasée sur la base est nécessaire afin de prévenir la future déformation verticale.

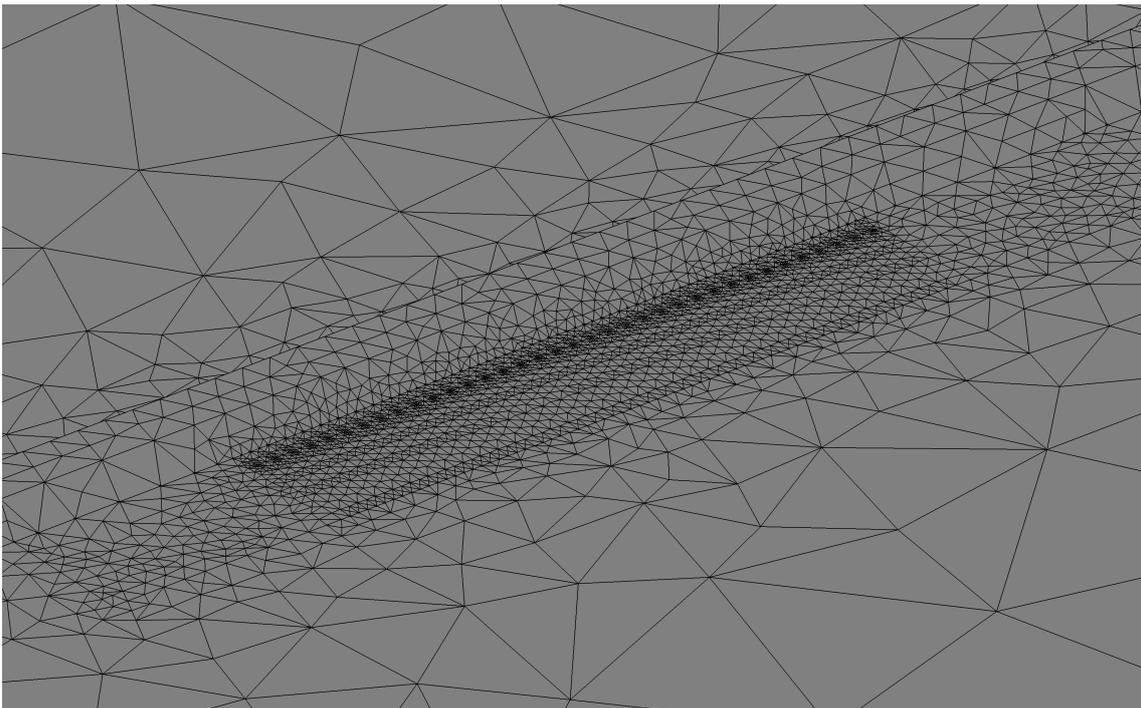


FIGURE 5.10 – Modèle de la digue vue en perspective utilisant une discrétisation de type $2D^+$ avant déformation de maillage. Les positions des électrodes correspondent aux points impliquant une forte densité de mailles.

En conséquence, un nombre important de mailles du problème direct est nécessaire pour satisfaire les contraintes du problème direct et la discrétisation du problème inverse. La figure 5.11 présente le même maillage que précédemment mais obtenu après déformation verticale. Contrairement à la figure précédente, la forme exposée épouse la géométrie à la fois de la digue et du réservoir. On retrouve les électrodes (maillage fin) au sommet de la digue, au centre de la crête.

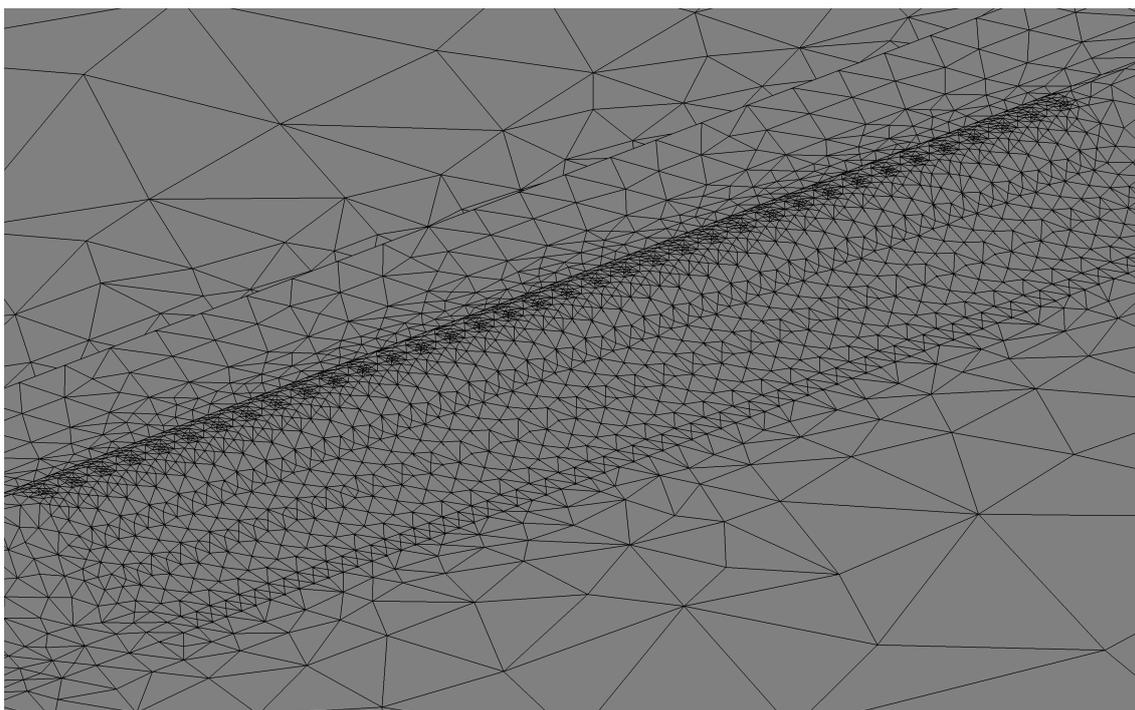


FIGURE 5.11 – Modèle de la digue vue en perspective utilisant une discrétisation de type $2D^+$ après déformation de maillage. Les électrodes peuvent être identifiées au niveau des zones de maillage dense au centre de la crête de la digue modélisée.

La figure 5.12 reproduit avec un fort niveau de transparence le maillage du problème direct et en tracé épais la discrétisation du problème inverse. En conséquence, chaque sous-domaine du problème inverse est composé de plusieurs mailles du problème direct. Une augmentation de l'épaisseur des sous-domaines est imposée en profondeur (avec un rapport de 1,1) afin de contrer la diminution de la résolution. Il peut être noté que la forme « convexe » de l'ouvrage permet une moindre perte de résolution en comparaison d'une prospection sur un milieu plan voire « concave » (cas des mesures en tunnel par exemple).

Suivant la direction longitudinale, la discrétisation comprend deux mailles entre deux électrodes voisines. Cette sur-discrétisation permet une plus grande finesse de l'inversion et permet aussi de reconstruire une forte variabilité à proximité des électrodes.

5.2.2.b Régularisation du problème inverse

La résolution du problème inverse requiert une régularisation afin de pouvoir assurer une convergence [Tikhonov & Arsenin, 1976]. Plusieurs méthodes de régularisation peuvent alors intervenir pour améliorer l'inversion. Dans le cadre de la thèse, seules des méthodes explicites de régularisation sont employées (Chapitre 2, section 3). Afin d'insérer de manière explicite une régularisation portant sur le modèle, une matrice de lissage est couplée à un paramètre d'amortissement pour imposer un lissage spatial au modèle inversé (équation 2.86, Chapitre 2, section 3).

Ainsi, le critère de convergence ne se limite pas seulement à la norme sur les données, mais impose que le modèle résultant soit suffisamment lisse. Cet *a priori* « lisse » du milieu provient des archives de construction de l'ouvrage et de l'étude géologique indiquant une homogénéité apparente des matériaux de la structure.

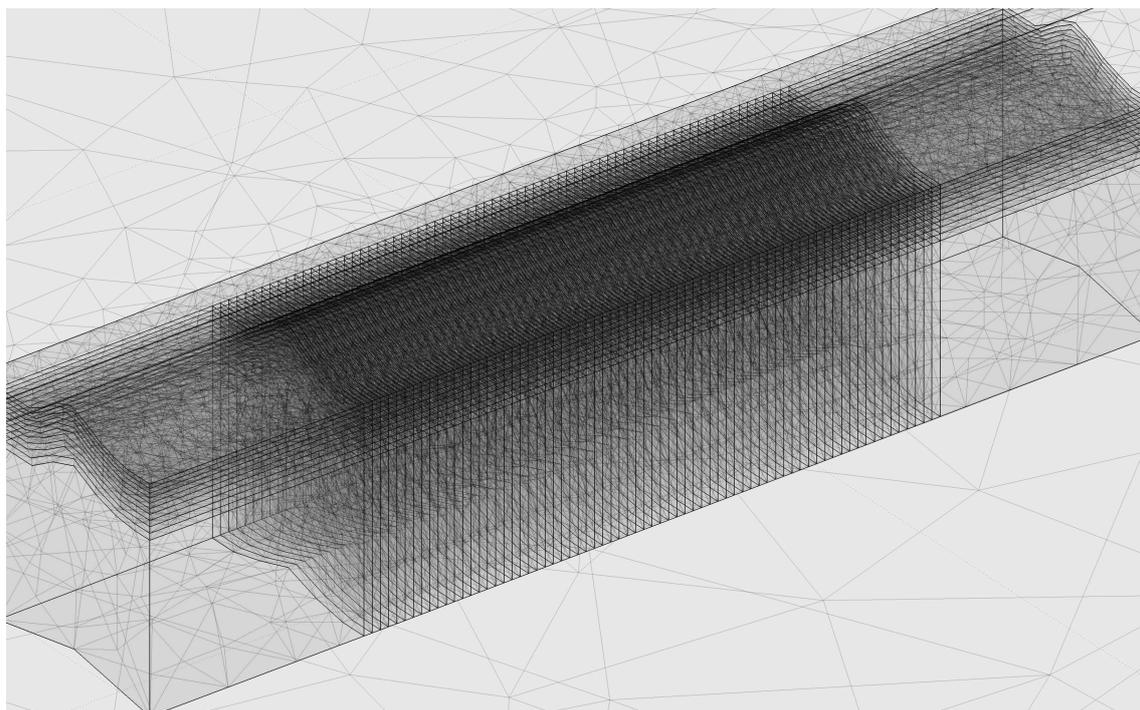


FIGURE 5.12 – Maillage d'inversion (tracés pleins et gras) et maillage du problème direct (en tracé fin) suivant la stratégie $2D^+$ obtenus après déformation de maillage.

Cependant, ce caractère « lisse » n'est pas souhaité en tout point du modèle. En effet, la reconstruction du modèle inverse implique de reconstruire la discontinuité présente entre le réservoir et l'ouvrage hydraulique. La figure 5.13 expose les différents degrés de discontinuité attendus entre les différents sous-domaines du modèle. Le contraste entre le remblai et le réservoir étant très important, l'équivalent d'une « surface de découplage » [Günther *et al.*, 2006] est employé afin d'assurer une libre variation de la résistivité entre les cellules d'inversion représentant le remblai et le sous-domaine réservoir. Plusieurs valeurs de contrainte imposant le lissage entre les sous-domaines sont testées.

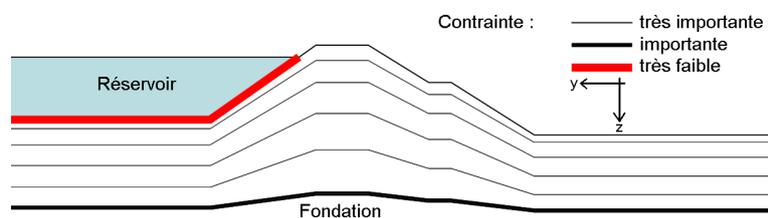


FIGURE 5.13 – Simplification des contraintes de lissage apposées aux limites des sous-domaines permettant d'intégrer explicitement l'a priori connu sur le milieu. Le tracé en gras, rouge, indique une forte discontinuité représentant la limite entre le réservoir d'eau conducteur et le corps de la digue résistant.

Un second point important, évoqué précédemment, indique que la résistivité de l'eau présente dans le réservoir est connue. Ce type d'information peut être implémenté avec différents niveaux de confiance.

L'*a priori* le plus fort pouvant alors être utilisé, consiste à ne pas inclure le réservoir dans l'inversion. L'inversion peut alors se focaliser sur le comportement de l'ouvrage. Cette technique, bien que précise, peut dans le cas d'erreur sur l'*a priori* entraîner des problèmes de reconstruction. En effet, en imposant un milieu, le nombre de degrés de liberté diminue, et l'inversion doit chercher la solution dans l'espace des solutions restant, ce qui en cas d'erreur sur l'*a priori* entraîne la formation d'artéfacts. Par ailleurs, plus la mesure est sensible au milieu (dont la résistivité est imposée) et plus une erreur faite sur la résistivité *a priori* de ce milieu engendrera des artéfacts sur la reconstruction.

Une seconde solution permettant de « relaxer » ce problème consiste à intégrer dans l'inversion les cellules constituant le réservoir. De cette manière, l'opérateur donne la possibilité à l'inversion de faire évoluer la résistivité du réservoir. En conséquence un paramètre d'amortissement particulier est affecté à toutes les cellules composant le réservoir. De cette manière, plus ce facteur d'amortissement (paramètre de Marquardt) est élevé et moins la résistivité évolue.

Dans le cadre de l'étude, plusieurs paramètres d'amortissement sont testés afin d'évaluer le meilleur moyen d'intégrer l'information *a priori*. Cependant, l'utilisation de ce paramètre dépend nécessairement de la confiance que l'on possède sur l'*a priori* à insérer. En conséquence, cette implémentation dépend de la qualité des mesures de l'*a priori* (mesure de la résistivité du réservoir, mesure de la topographie) et de la précision avec laquelle le modèle inverse peut intégrer ces informations. Dans le cadre des résultats d'inversion présentés dans la section suivante un amortissement dix fois supérieur est imposé aux cellules constituant le réservoir.

Cependant, avant d'appliquer directement les modèles générés aux données mesurées, il est tout d'abord nécessaire de présenter les campagnes réalisées, et les résultats de traitements conventionnels. Ensuite, les modèles $2D^+$ sont appliquées afin de visualiser la plus value.

5.3 Campagne de reconnaissance longitudinale

5.3.1 Présentation des données

Dans l'objectif de tester la stratégie $2D^+$ développée au cours de la thèse, différentes campagnes de mesures ont été réalisées. Le tableau 5.1 synthétise les points importants concernant les campagnes d'acquisition. Les acquisitions présentées dans ce tableau correspondent aux séquences étudiées dans cette section. La figure 5.3 présente la position des électrodes de cette campagne longitudinale.

TABLE 5.1 – Synthèse des caractéristiques des mesures réalisées.

date d'acquisition	position sur l'ouvrage	résistance de prise maximum	type de protocole	nombre de quadripoles	température du sol en surface (° C)
2010-10-12	crête	2 $k\Omega$	« complet »	26451	5
2010-10-12	crête	2 $k\Omega$	WS	1502	5

En premier lieu, un protocole (cf. Annexe A) de type Wenner-Schlumberger (WS) (tableau 5.1) est sélectionné pour sa robustesse et son pouvoir de résolution aussi bien horizontal que

vertical. Ensuite, afin d'améliorer la capacité de résolution de la méthode d'IRE, des protocoles d'acquisition non-conventionnels sont testés. Le protocole noté « complet » dans le tableau 5.1 est réalisé de la manière suivante :

- une profondeur d'investigation « suffisante » est sélectionnée. Dans le cadre de l'étude la profondeur d'investigation recherchée est de 14 mètres, soit deux fois la hauteur du corps de digue afin d'assurer la caractérisation de la limite remblai/terrain naturel (cf. Chapitre 1) ;
- en fonction de l'espacement, le nombre d'électrodes nécessaires pour atteindre cette profondeur d'investigation est évalué. Or, l'espacement inter-électrodes étant de 5 m, 20 électrodes sont suffisantes pour atteindre la profondeur d'investigation recherchée [Loke, 2011] ;
- tous les quadripôles indépendants correspondant à ce jeu d'électrodes sont interrogés.

Ce protocole apporte plusieurs bénéfices :

- permettre de réaliser toutes les mesures indépendantes possibles, donnant accès à une profondeur d'investigation donnée ;
- augmenter la capacité de résolution des données ;
- permettre des recombinaisons de quadripôles afin de construire des protocoles « exhaustifs » d'acquisition ;
- permettre un calcul de l'erreur sur la réciprocité à partir du protocole WS et des données reconstruites ;
- limiter le nombre de quadripôles d'acquisition impliquant une profondeur d'investigation trop élevée.

En effet, une prospection couvrant un linéaire de 475 m doit, en théorie, permettre une imagerie sur les 50 premiers mètres du sous-sol. Or, seuls les 15 premiers mètres du sous-sol intéressent l'auscultation.

La figure 5.14 présente une pseudo-section des résistivités apparentes mesurées à partir du protocole WS sur 96 électrodes. Ce résultat indique des variations importantes de la résistivité apparente s'étendant sur une gamme de 500 à 1600 $\Omega.m$.

La qualité des données 2D peut être visualisée à travers la figure 5.15. Cette représentation est utilisée par le progiciel Res2Dinv® afin de supprimer les mesures « aberrantes ». En étudiant cette figure, aucun à-coup de prise ne ressort, et aucun point de mesure ne nécessite d'être supprimé pour inverser les données. De plus, de très faibles résistances de contact caractérisent les mesures (inférieures au $k\Omega$ en moyenne).

Afin de disposer de critères supplémentaires permettant de déterminer l'erreur sur les mesures, des calculs de « réciprocité » peuvent être employés. Le premier calcul consiste à comparer la mesure de WS avec sa mesure réciproque réalisée sur le terrain (en théorie, la réciproque d'une mesure doit être égale à la mesure). Le second calcul d'erreur, sur critère de redondance, consiste à reconstruire les mesures WS à partir d'un jeu complet de quadripôles. La figure 5.16 présente ainsi en rouge les résistivités apparentes reconstruites et en bleu les résistivités apparentes mesurées directement. Ce résultat 5.16 indique que la mesure est entachée d'un bruit (erreur de réciprocité) très faible, en moyenne inférieur à 0.5 %.

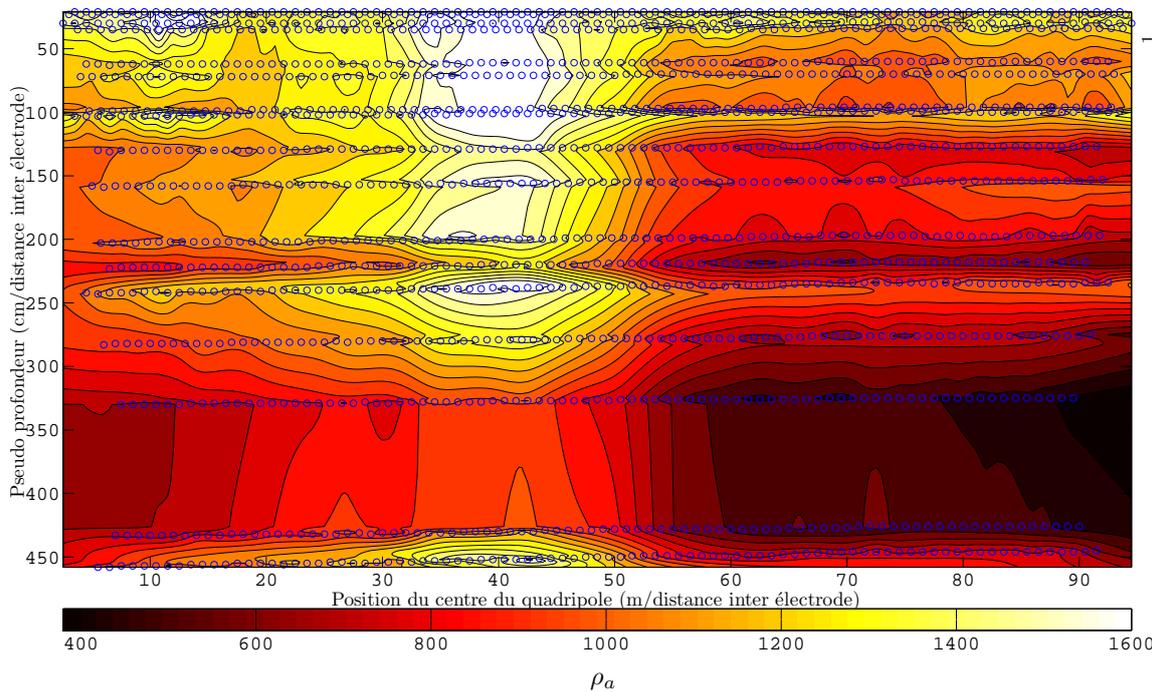


FIGURE 5.14 – Pseudo-section de résistivité apparente représentant chaque mesure (rond bleu) en pseudo profondeur à l'aplomb du centre du quadripôle. Les mesures sont réalisées à partir d'un jeu de 96 électrodes réalisant un protocole de type Wenner-Schlumberger. Les pseudo-profondeurs sont issues des travaux de [Edwards \[1977\]](#). L'échelle des couleurs est en résistivité apparente (ρ_a). Les coordonnées sont normalisées par l'espacement entre électrodes

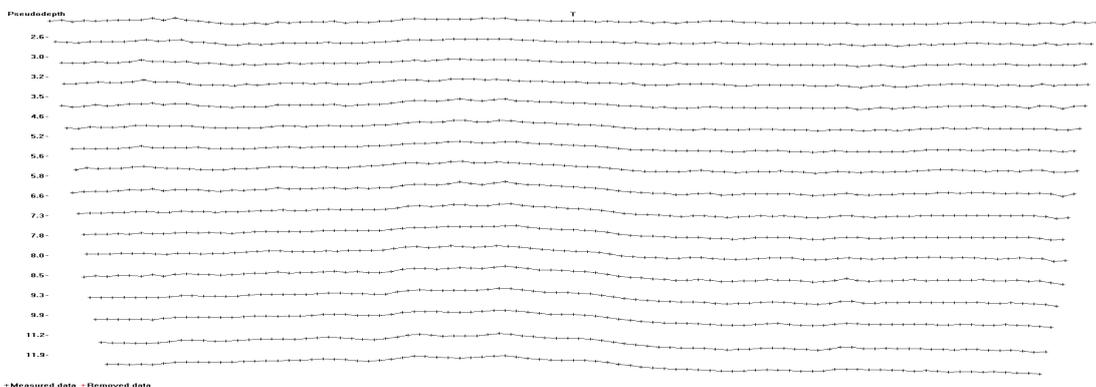


FIGURE 5.15 – Représentation de mesures réalisées en pseudo profondeur à partir du progiciel [Res2Dinv®](#) permettant de supprimer les données aberrantes et visualiser la qualité des données. Chaque courbe regroupe toutes les mesures correspondent à un même « niveau d'acquisition » et fait ressortir les variations relatives des mesures par rapport à leur moyenne.

5.3.2 Traitement conventionnel

Afin d'évaluer l'apport d'un traitement par méthodologie $2D^+$, une interprétation conventionnelle est d'abord réalisée sur les données issues du protocole WS à 96 électrodes. La figure [5.17\(a\)](#) présente le résultat d'inversion obtenu à partir du progiciel [Res2Dinv®](#) à l'itération 4. La profondeur d'investigation atteint environ 15 m. L'espacement inter-électrodes étant de 5 mètres pour 96 électrodes, le linéaire couvert par la campagne est de 475 m.

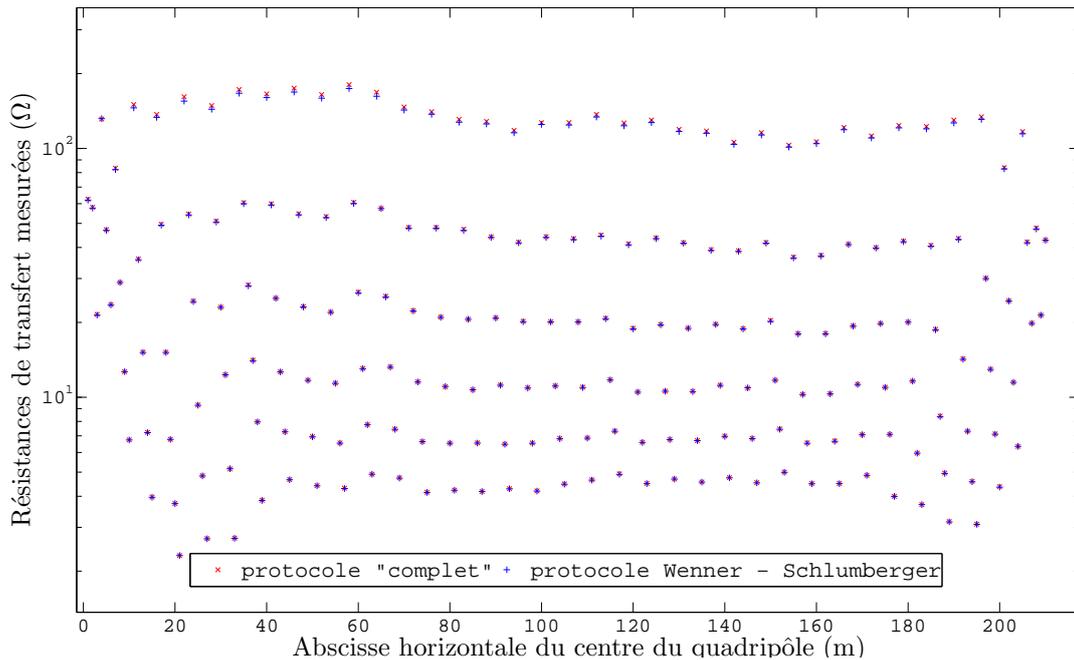


FIGURE 5.16 – Comparaison de différences de potentiel (en bleu) mesurées à partir d'un protocole de type WS et (en rouge) reconstruites à partir d'un protocole de type « complet ».

Le modèle de la figure 5.17(a) présente un milieu assimilable à un terrain « bicouche » avec une première couche résistante de 7 à 10 m d'épaisseur dont la résistivité varie entre 1000 et 2000 $\Omega.m$. En profondeur, une seconde couche plus conductrice de 50 à 500 $\Omega.m$ apparaît. Une interprétation rapide pourrait mener à la conclusion que cette couche correspond au substratum, lui même composé d'une couche alluvionnaire. Le toit de cette couche est à environ 12 m de profondeur, entre 0 et 240 m longitudinalement, et remonte à environ 7-8 m de profondeur après 250 m en abscisse. Une première analyse pourrait ainsi conclure sur une remontée d'un substratum conducteur. Dans la couche résistante, de nombreuses hétérogénéités « plus » résistantes (cercles bleus) ou plus conductrices (cercles noirs) apparaissent. La mise en avant sous forme de cercle des différentes hétérogénéités du milieu n'a pas pour objectif de détailler chacune des hétérogénéités. L'objectif est plutôt de mettre en avant certaines anomalies pouvant apparaître ou disparaître suivant les différents traitements réalisés.

En prenant l'hypothèse que ces conclusions soient « justes », ces anomalies pourraient être interprétées comme des zones de faiblesse de l'ouvrage ou plus simplement des chemins d'écoulement préférentiel. Cependant, sachant qu'à la fois l'effet de la topographie et du réservoir jouent un rôle dans la mesure, arrêter les interprétations à ce seul stade semble très hasardeux.

5.3.3 Approche par normalisation

Le principe de normalisation permet, en comparaison d'une campagne 2D classique, une meilleure prise en compte de l'environnement. Nous avons proposé deux niveaux d'application de la normalisation dont l'objectif est de :

- corriger les résistivités apparentes de l'effet de la topographie ;
- corriger les résistivités apparentes de l'effet de la topographie et du réservoir.

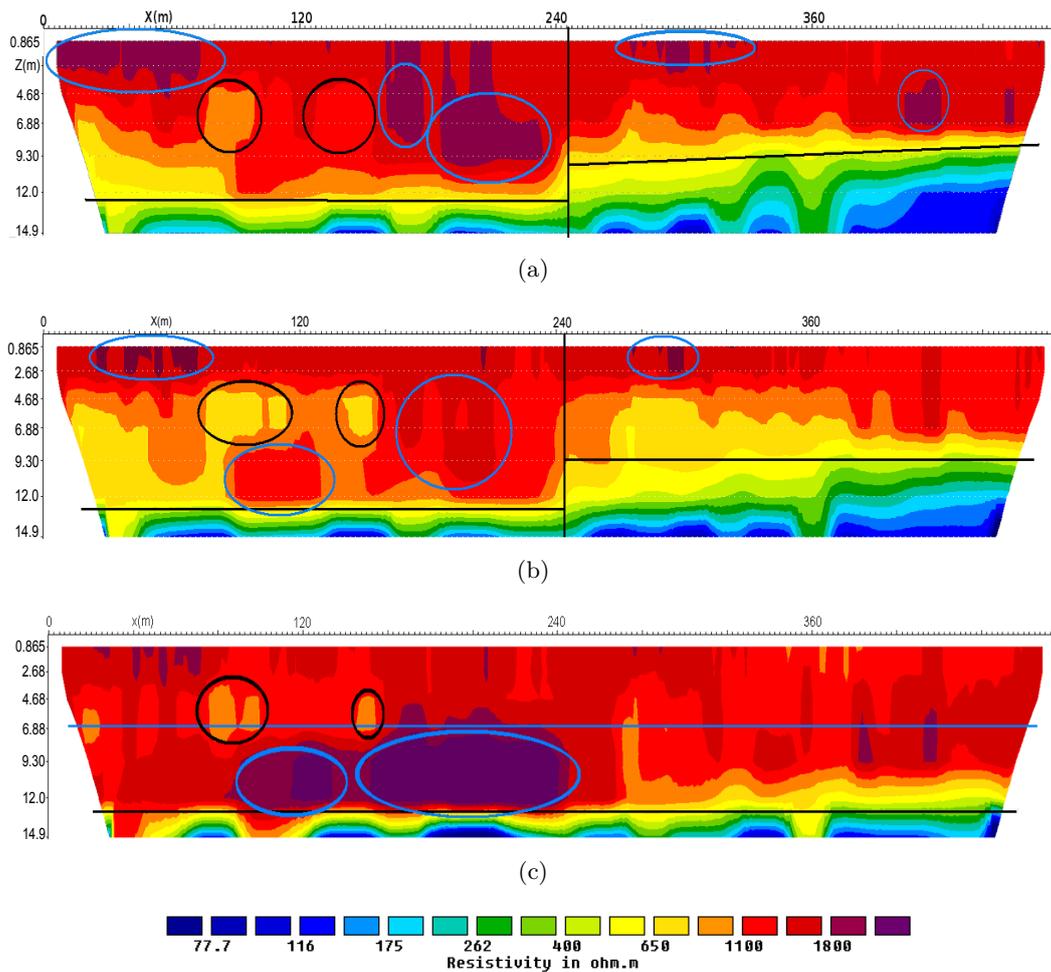


FIGURE 5.17 – Coupes longitudinales d'inversion obtenus sur un profil 2D de 96 électrodes avec un protocole Wenner-Schlumberger à la quatrième itération d'inversion, 5.17(a) sans normalisation, 5.17(b) avec normalisation de l'effet de la topographie, 5.17(c) avec normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir. Les cercles noirs symbolisent les hétérogénéités conductrices, les cercles bleus les hétérogénéités résistantes et enfin les traits noirs des délimitations de grandes structures du milieu. La figure 5.17(c) présente un trait horizontal bleu à 6 m de profondeur symbolisant la position théorique du substratum. Les erreurs RMS sont de 0.6, 0.55 et 0.65%.

5.3.3.a Normalisation de l'effet de la topographie

Les données issues de la campagne topographique sont utilisées afin de réaliser le modèle nécessaire à la technique de normalisation (cf. Annexe B). Des résistances de transfert R_0^{calc} , équivalentes aux résistances de transfert mesurées, sont simulées sur le précédent modèle de résistivité $1 \Omega.m$. Les données normalisées sont ensuite inversées avec le progiciel Res2Dinv®.

La figure 5.17(b) présente le résultat d'inversion (Res2Dinv®) obtenu après normalisation de l'effet de la topographie. On peut tout d'abord noter la forte ressemblance entre ce résultat et le résultat précédent (figure 5.17(a)). De plus, l'erreur RMS sur les données est inférieure à 1% à la quatrième itération d'inversion (itération présentée ici), indiquant une bonne adéquation entre le modèle inversé et les données mesurées.

En comparant ce résultat et le précédent, il est possible de voir que la résistivité moyenne du milieu est globalement diminuée sur la première couche. En effet, les anomalies résistantes du résultat précédent ont tendance à disparaître. De plus, les hétérogénéités conductrices symbolisées par les cercles noirs ont tendance à augmenter.

5.3.3.b Normalisation de l'effet couplé du réservoir et de la topographie

Lorsque l'on désire corriger l'effet d'une topographie sur une mesure, seule la topographie est nécessaire. *A contrario*, si l'on désire corriger l'effet d'un milieu perturbateur sur une mesure (effet du réservoir d'eau) il est nécessaire de connaître à la fois la géométrie des différents sous-domaines et le rapport de résistivité entre ces sous-domaines (cf. Annexe B). La connaissance du rapport de résistivité dans le premier cas n'est pas nécessaire car ce rapport est automatiquement nul (l'air est un isolant « presque » parfait). De plus, le milieu perturbateur étant un milieu conducteur (électriquement), une erreur sur l'estimation de sa géométrie ou sur le rapport de résistivité peut entraîner une erreur plus élevée sur la correction que s'il était résistant. En effet, la méthode IRE est plus sensible aux anomalies conductrices que résistantes (cf. test numérique à la sous-section 2.2.5). La résistivité électrique de l'eau du réservoir mesurée en laboratoire est d'environ $80 \Omega.m$ (après correction de l'effet de la température). La résistivité du corps de digue évoluant entre 1500 et 2000 $\Omega.m$, un contraste élevé est présent entre ces deux milieux.

La figure 5.17(c) illustre le résultat de normalisation de l'effet du réservoir et de la topographie. La normalisation précédente avait eu pour effet (figure 5.17(b)) d'augmenter la conductivité moyenne. Ce résultat est logique puisqu'une topographie convexe augmente les différences de potentiel du milieu, simulant un milieu plus résistant qu'il ne l'est réellement. À l'inverse de la normalisation précédente, la correction du réservoir a pour effet d'augmenter les résistivités du milieu ausculté. Le réservoir d'eau étant conducteur, cette conséquence semble assez logique. Un second effet, quelque peu initié par la précédente normalisation, est une homogénéisation de l'inversion finale. De plus, cette normalisation tend à supprimer l'effet de la couche conductrice en bas de coupe.

Lors de l'interprétation du résultat présenté à la figure 5.17(a), nous émettions l'hypothèse que la couche conductrice en bas de coupe pouvait correspondre à l'effet d'une fondation alluvionnaire conductrice. Cependant, lorsque l'on tente de supprimer l'effet du réservoir, la présence de cette couche conductrice a tendance à diminuer fortement. En conséquence, la zone conductrice des figures 5.17(a) et 5.17(b) n'est, en partie, qu'une retranscription de l'effet du réservoir sur les données. Cette couche représente donc un artéfact pouvant fausser l'interprétation et limiter les capacités de résolution dans le corps de digue.

La figure 5.17(c) présente une couche résistante d'environ $1500 \Omega.m$ sur les 12 premiers mètres en profondeur, et une couche conductrice intermittente en bas de coupe. Cette couche conductrice bien que diminuée peut être expliquée par le manque d'information concernant la géométrie du fond du réservoir et d'un possible envasement. La profondeur hypothétique de la fondation est symbolisée par le trait bleu horizontal sur la figure 5.17(c). À partir de cette limite, deux types d'anomalies ressortent :

- Les anomalies conductrices au-dessus de la fondation (cercles noirs) ;
- Les anomalies résistantes au-dessous de la fondation (cercles bleus).

Deux faibles anomalies conductrices ressortent au niveau du *PM* 1450 et 1510 (à 85 et 145 m). Ces anomalies conductrices pourraient être interprétées comme des zones saturées ou de fuites potentielles. Les deux anomalies résistantes positionnées au dessous de la fondation pourraient être interprétées, en termes de pathologie, comme un départ de fines (érosion interne, cf. Chapitre 1). Cependant, d'une manière plus simple, ces quatre anomalies peuvent très bien s'expliquer par des variations lithologiques cohérentes et/ou par des sur/sous-estimations de l'inversion.

5.3.3.c Discussion

Il peut être hasardeux d'exploiter directement des données $2D$ provenant de campagnes d'auscultation d'OHT, que ce soit avec ou sans normalisation des effets $3D$ sur les mesures. En effet, ces différents résultats doivent être interprétés conjointement, en visualisant l'effet de chaque normalisation. De plus, le degré de confiance que l'on peut attribuer aux différents résultats avec normalisation dépend fortement de la précision avec laquelle les géométries et les résistivités sont connues. Il peut être noté que des actions simples, sur le terrain, peuvent améliorer fortement cette détermination avec par exemple une mesure de conductivité à différentes profondeurs dans l'eau du réservoir.

Dans le cas présent, les mesures topographiques côté aval étaient suffisamment précises. Cependant, concernant la normalisation de l'effet du réservoir, la géométrie exacte de celui-ci, l'épaisseur d'envasement, la résistivité de l'envasement n'étaient pas connues. Ainsi, la normalisation n'est que partielle et certaines hétérogénéités présentes dans le sous-sol peuvent alors être expliquées par ce manque d'information (couche conductrice persistante en bas de profil).

Les méthodes de normalisation ne peuvent pas tenir compte de l'effet non-linéaire engendré par le couplage des effets topographiques, du réservoir et de l'hétérogénéité de la digue. Afin de s'affranchir de ces limitations et de proposer une stratégie permettant la prise en compte des effets non-linéaires, une stratégie d'inversion de type $2D^+$ est appliquée.

5.3.4 Application de l'approche $2D^+$

Les travaux de [Tong & Yang \[1990\]](#); [Tarantola \[2005\]](#) ont montré qu'il est toujours plus intéressant d'intégrer les perturbations $2D$ ou $3D$ plutôt qu'essayer de les normaliser. En conséquence, l'approche $2D^+$ est appliquée à l'auscultation longitudinale.

5.3.4.a Résultats de l'approche $2D^+$

Les résultats présentés dans ce paragraphe traitent des données issues de l'auscultation longitudinale précédente mais focalisée sur un linéaire de 320 m. Les données utilisées pour ce nouveau traitement sont identiques aux données utilisées pour les inversions précédentes. À cet effet, la figure 5.12 illustre la discrétisation employée pour résoudre le problème inverse $2D^+$. La planche 5.18 présente une comparaison des résultats obtenus avec le progiciel Res2Dinv®, 5.18(a) sans normalisation, 5.18(b) avec normalisation de l'effet de la topographie, 5.18(c) avec normalisation de l'effet conjoint de la topographie et du réservoir et enfin 5.18(d) obtenu à partir du code InGEOHT - $2D^+$. Cette dernière inversion correspond à la 3^{ème} itération.

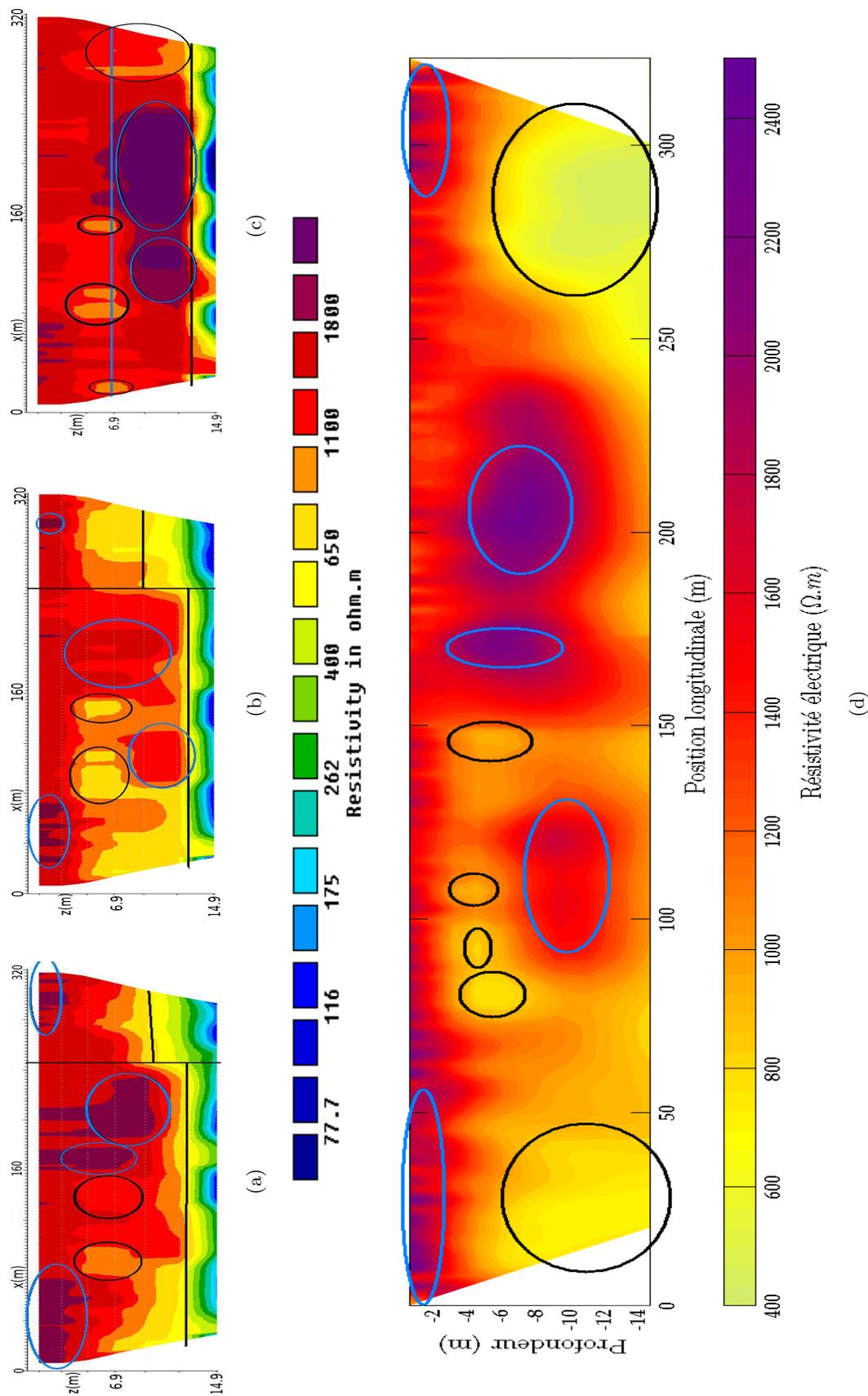


FIGURE 5.18 – Coupes longitudinales 2D inversées obtenues 5.18(a) sans normalisation, 5.18(b) avec normalisation de l'effet de la topographie, 5.18(c) avec normalisation de l'effet cumulé de la topographie et du réservoir et 5.18(d) avec le traitement 2D⁺. Les traits noirs délimitent les grandes structures interprétées des coupes, le trait bleu (c) la profondeur de la fondation, les cercles noirs des hétérogénéités conductrices et les cercles bleus des hétérogénéités résistantes.

La figure 5.19 présente un échantillon des résistivités apparentes mesurées en WS ainsi que des résistivités apparentes simulées avec le modèle initial et les modèles issus des itérations 2 et 3 de l'inversion. Ce résultat illustre clairement la convergence du critère d'erreur sur les données. L'utilisation de l'expression 3.1 indique une erreur RMS de 0.62 % pour les données simulées à partir du modèle à la quatrième itération. Du point de vue de ce critère, la convergence est excellente et presque équivalente à la convergence obtenue à partir du progiciel Res2Dinv®.

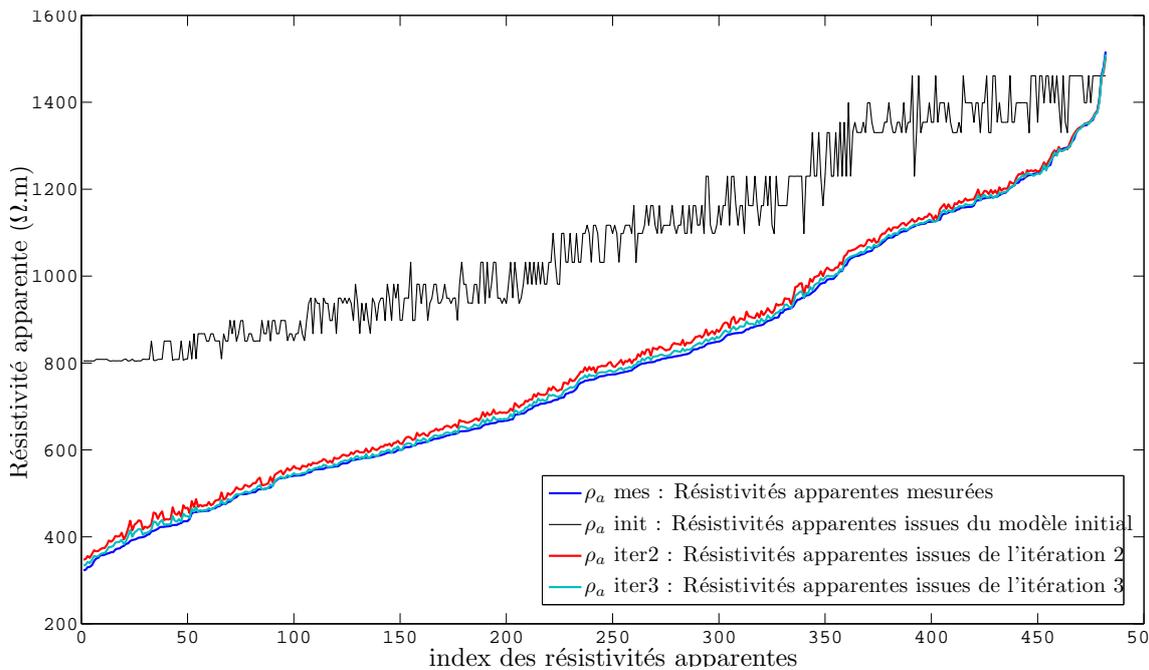


FIGURE 5.19 – Illustration de la convergence de la norme sur les données à partir du code InGEOHT - 2D⁺ par la représentation des ρ_a mesurées (en bleu) et calculées à différentes inversions.

5.3.4.b Comparaison, interprétation et conclusion

De nombreuses similitudes sont rencontrées entre les trois premiers résultats et le résultat d'inversion 2D⁺ (figure 5.18). Les échelles de couleur employées diffèrent légèrement permettant de réaliser quantitativement des comparaisons. Tout d'abord, les hétérogénéités en surface peuvent être identifiées sur les quatre résultats d'inversion. Ensuite, en comparant les figures 5.18(a) et 5.18(b) avec le résultat d'inversion 2D⁺ il est possible d'observer une remontée identique de la couche conductrice sur les extrémités du profil (cercles noirs sur la figure 5.18(d)). Il peut être noté que la présence de cette hétérogénéité en bas de profil sur le côté droit de la reconstruction peut être expliquée par une mauvaise prise en compte de la géométrie du réservoir. En effet, cette zone correspond au démarrage du BMC et la forme du canal modélisée ne tient pas compte de cette évolution.

Ensuite, les deux importantes hétérogénéités résistantes ($160 \text{ m} \leq x \leq 230 \text{ m}$, $-4 \text{ m} \leq z \leq -10 \text{ m}$, cercles bleus, sur la figure 5.18) sont 5.18(a) présentes à une position quasi-identique, 5.18(b) absentes, (c) présentes mais à une plus grande profondeur.

Enfin, les hétérogénéités « plus conductrices » présentes à une profondeur comprise entre 4 et 7 m sur les trois résultats d'inversion (Res2Dinv®) sont identifiées avec une grande précision

sur le résultat $2D^+$ d'inversion. En effet, même les plus faibles variations de géométrie de ces hétérogénéités sont caractérisées. La seule différence réellement notable provient de l'absence totale de la couche conductrice en fond sur le résultat $2D^+$. Cette absence de couche conductrice peut provenir d'une meilleure prise en compte de la non-linéarité du problème par cette approche.

En dehors de l'absence de couche conductrice en bas de profil, chaque hétérogénéité présente dans le résultat d'inversion $2D^+$ (figure 5.18(d)) peut être identifiée dans un des trois résultats inversés avec le progiciel Res2Dinv®. Cette conclusion tend à indiquer la fiabilité de la reconstruction par le résultat $2D^+$. Ces résultats permettent d'arriver à une seconde conclusion déjà exprimée auparavant : les résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® (avec et sans normalisation) doivent être interprétés en commun afin d'améliorer la pertinence de l'interprétation. En effet, ces trois résultats diffèrent assez fortement du point de vue de l'interprétation et il est difficile d'affirmer quel est le « meilleur » résultat et pour quelle zone de la reconstruction.

Le résultat d'inversion présenté à la figure 5.18(d) intègre une meilleure prise en compte des éléments « perturbateurs » qu'une reconstruction issue du progiciel Res2Dinv®. De plus, afin de pouvoir faciliter la comparaison des résultats, la discrétisation $2D^+$ reproduit le plus finement possible la discrétisation employée par le progiciel Res2Dinv®. En conséquence, nous considérons le résultat issu du code InGEOHT - $2D^+$ plus robuste que ne le sont les résultats précédents.

5.4 Application de l'approche $3D^-$ à une auscultation locale

L'avantage principal de la méthodologie $2D^+$ est de permettre une prise en compte d'éléments perturbateurs (topographie, réservoir d'eau) tout en ne sous-déterminant pas l'inversion des données. De plus, cette approche du traitement de l'information est parfaitement adaptée pour l'auscultation longitudinale « grand rendement » permettant de couvrir de longs linéaires d'ouvrages. La limitation principale de cette approche est de ne pas permettre de variations spatiales internes de résistivité dans le sens transversal à l'ouvrage.

Lorsque des zones jugées « anomaliques » sont identifiées, des auscultations supplémentaires à plus haute résolution peuvent intervenir [Fauchard & Mériaux, 2004]. Cette intervention peut prendre la forme de reconnaissances permettant de déterminer la variabilité transversale de résistivité électrique de l'ouvrage. Cette inversion permet ainsi de posséder une information à la fois transversale et longitudinale pour effectuer une interprétation plus pertinente. Cependant, la profondeur d'investigation d'une tomographie transversale dépend d'une couverture spatiale d'électrodes très fortement limitée par la présence du réservoir d'eau. Enfin, les inspections transversales sont « logiquement » placées sur des zones identifiées de faiblesse sur la coupe longitudinale. En supposant que la coupe longitudinale soit « juste », l'hypothèse d'un milieu $2D$ n'est plus valide, limitant ainsi l'utilisation d'une tomographie transversale à la digue.

C'est pourquoi, une nouvelle méthodologie d'auscultation est ici présentée. Cette démarche d'auscultation est basée sur un approche appelée $3D^-$ du traitement de l'information. Sur le terrain, le principe de cette méthodologie consiste à réaliser une tomographie longitudinale avec une distance inter-électrodes assez fine (pouvant être interprétée si possible sur place) et de placer transversalement à cette ligne, sur une zone jugée anomalique, une seconde ligne d'électrodes. Ensuite, des mesures doivent être réalisées sur la ligne transversale et entre les deux lignes. Enfin,

une inversion $3D^-$ basée sur toutes les données acquises est réalisée. Les principaux avantages de cette démarche d'auscultation sont de :

- pouvoir prendre en compte la distribution des propriétés $3D$ interne à l'ouvrage, et donc améliorer la pertinence de la reconstruction (en fonction de cette distribution spatiale) ;
- ne pas engendrer de coût supplémentaire à une méthodologie conventionnelle d'auscultation.

5.4.1 Illustration numérique de l'approche $3D^-$

Afin d'illustrer l'amélioration apportée par cette démarche d'auscultation, une étude numérique est réalisée, dont la figure 5.20 présente le principe. À cet effet, deux lignes d'électrodes sont disposées perpendiculairement l'une à l'autre de manière longitudinale et transversale à la digue. Une sphère de 1 m de rayon et de conductivité 10 fois supérieure à la conductivité de l'ouvrage est positionnée à une profondeur de 2 m sous la surface. Un protocole d'acquisition de type multi-gradient est simulé sur les lignes transversale et longitudinale et un protocole de type dipôle-dipôle équatorial exploite les deux lignes conjointement. Enfin, aucun bruit n'est ajouté aux données.

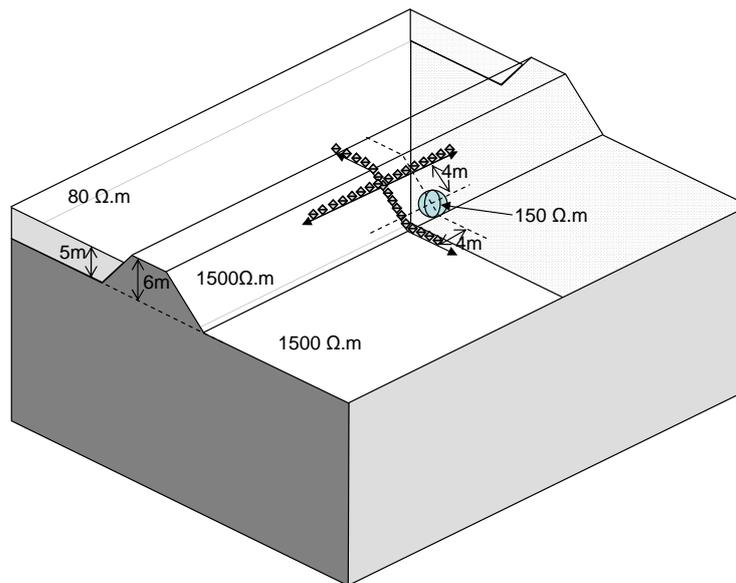


FIGURE 5.20 – Schéma illustrant la démarche de l'étude numérique $3D^-$. Deux lignes d'électrodes sont disposées perpendiculairement de manière longitudinale et transversale à l'ouvrage. L'ouvrage de 6 m de hauteur possède un réservoir d'eau 20 fois moins résistant que le corps de digue. Une anomalie 10 fois plus conductrice que l'encaissant de 1 m de rayon est positionnée à l'intérieur de l'ouvrage.

La figure 5.21 présente les résultats d'inversion obtenus avec le progiciel Res2Dinv® sur les données issues du profil longitudinal et transversal. Les deux résultats affichent un critère de convergence très bon sur les données (0.24 à 0.49%) à la quatrième et cinquième itération d'inversion.

L'interprétation de ces résultats ne permet pas la détection de l'anomalie placée dans le corps de la digue. Plusieurs variations de résistivité sont certes présentes mais ne correspondent à aucune hétérogénéité modélisée, à l'exception d'une faible anomalie présente sur la figure 5.21(b). Le

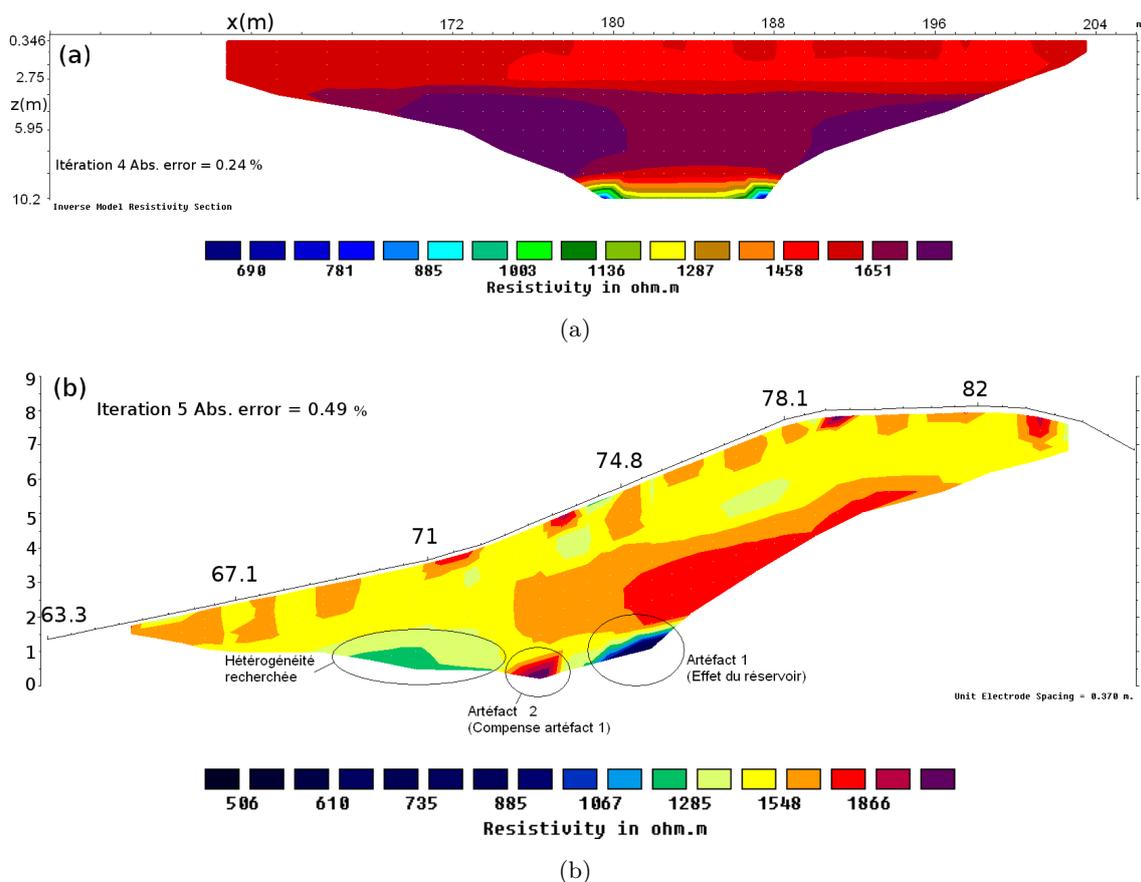
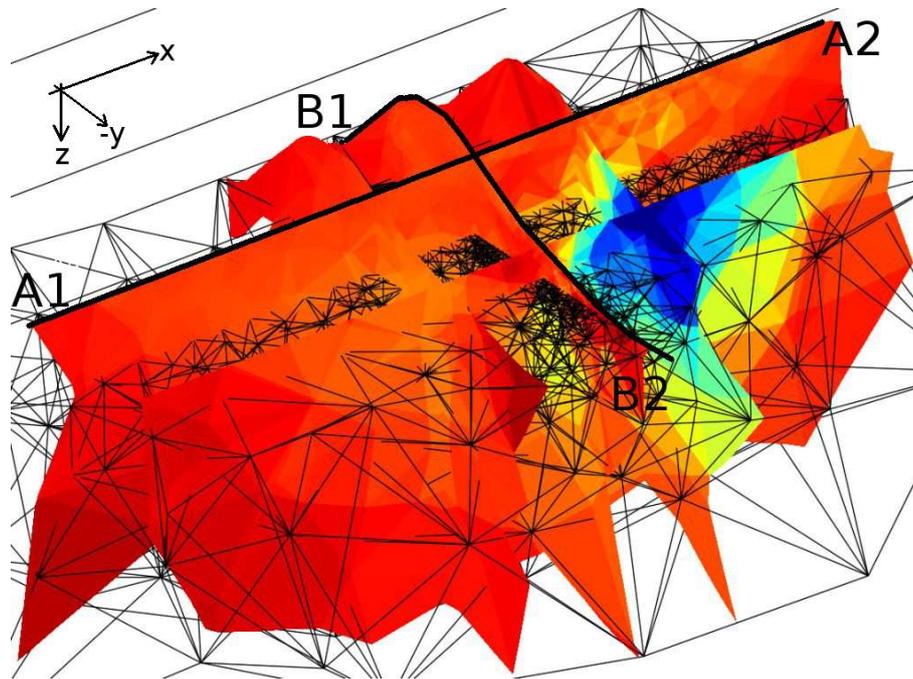


FIGURE 5.21 – Coupes 2D d'inversion (*Res2Dinv*®) obtenues à partir de données issues (a) d'un profil longitudinal et (b) d'un profil transversal à une digue illustrés à la figure 5.20.

résultat longitudinal ne permet pas la détection de l'anomalie car l'effet sur les données lié à son contraste et son volume n'est pas suffisamment élevé. Cet effet étant trop fortement nuancé par l'effet du réservoir sur les données. En conséquence, le traitement « séparé » des deux jeux de données ne permet pas une caractérisation d'une anomalie 3D placée transversalement aux deux coupes d'inversion, dans les conditions de l'étude proposée. Cette absence de détection est un problème afin de pouvoir détecter ce type d'hétérogénéité.

Le code InGEOHT - 3D⁻ est utilisé afin de déterminer l'apport d'un traitement conjoint des données. Des données supplémentaires sont aussi utilisées provenant de mesures entre les lignes. La figure 5.22 illustre les résultats d'inversion (InGEOHT - 3D⁻) obtenus à partir de données provenant des lignes d'électrodes transversales et longitudinales à la digue. La lecture de ce résultat est rendu plus difficile par la présence du maillage (tracé noir) avant déformation. Ces mailles ne sont aucunement utiles à l'interprétation des données, c'est pourquoi, il est nécessaire d'essayer de s'affranchir de leur présence. Il peut être noté que chacun de ces 4200 tétraèdres correspond à une maille d'inversion. La figure 5.22(a) présente une vue en perspective du résultat d'inversion à la troisième itération. Deux coupes particulières (figure 5.22(b) et 5.22(c)) correspondant aux lignes d'électrodes sont extraites du bloc 3D. Le critère de convergence des données (erreur RMS) simulé à la troisième itération (figure 5.22) est de 0.05 %.

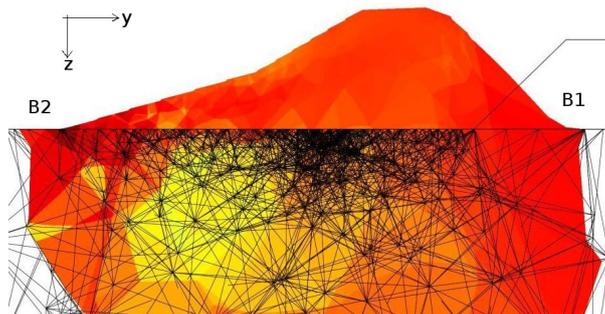
Ce résultat illustre que cette démarche d'utilisation de l'IRE (3D⁻) permet la détection d'hétéro-



(a)



(b)



(c)

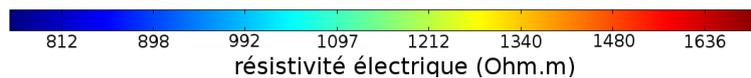


FIGURE 5.22 – Reconstruction issue de l'approche d'inversion ($InGEOHT - 3D^-$) à partir de données provenant de deux lignes d'électrodes placées transversalement et longitudinalement à la digue. La figure 5.22(a) présente une vue en perspective du résultat d'inversion à la troisième itération et les figures 5.22(b) et 5.22(c) deux coupes particulières extraites du bloc 3D. Ces deux coupes correspondent aux positions respectives des deux lignes d'électrodes (A1-A2 et B1-B2).

généités placées en dehors des plans verticaux contenant les lignes d'électrodes, évitant ainsi de « manquer » une anomalie. De plus, l'action de traiter de manière conjointe les données issues des lignes transversale et longitudinale permet de mieux prendre en compte les effets 3D liés à la variation spatiale de composition interne de la digue.

5.4.2 Application de l'approche $3D^-$ au cas d'étude

Dans l'objectif de confronter l'approche $3D^-$ d'acquisition et de traitement à un ouvrage réel, une campagne est réalisée sur la même portion d'ouvrage que précédemment. Cette campagne a impliqué la réalisation de deux lignes d'électrodes transversales et d'une ligne d'électrodes longitudinale à l'ouvrage. Ce dispositif d'acquisition est centré longitudinalement sur l'entrée du BMC. Dans le cadre de ce travail de thèse, seule une des deux lignes transversales est utilisée pour l'inversion. Le dispositif ainsi formé représente une croix vue en plan. La figure 5.23(a) présente le résultat obtenu à la troisième itération d'inversion avec une convergence du critère RMS de 2.8 %. Les données mesurées correspondent exactement aux protocoles de mesure utilisés pour l'étude numérique, soit un gradient multiple sur les deux lignes séparées et un dipôle-dipôle équatorial sur les lignes conjointes. La seconde figure présente le logarithme de la capacité de résolution (R_M) de chaque cellule du modèle normalisé par la plus haute valeur. Ainsi, plus une cellule apparaît en rouge vif et plus celle-ci est supposée être contrainte par les données au cours de l'inversion (laissant supposer que l'inversion de ces cellules est robuste). À l'inverse, plus une cellule apparaît en bleu vif et moins cette cellule est contrainte par les données durant l'inversion. Cependant, la finesse du résultat ne permet pas de visualiser la « robustesse » dans chaque cellule. En effet, ce résultat permet surtout de séparer les volumes de l'ouvrage dont la reconstruction semble « robuste », « non-robuste » et/ou intermédiaire. La modeste qualité de ce résultat provient en partie de l'utilisation de mailles « non-structurées » dont la taille est variable. La résolution d'une cellule étant fonction de sa taille, l'interprétation de la matrice de résolution du modèle (R_M) est rendue difficile dans ce cas.

5.4.3 Résultats, discussion et conclusion

La figure 5.24 compare les coupes transversales de résistivité électrique inversées avec le progiciel Res2Dinv® (figure du haut) et avec le code InGEOHT - $3D^-$ (figure du bas). Le premier résultat est obtenu à la cinquième itération d'inversion avec une erreur RMS de 2.1 %. Le second résultat correspond à la coupe transversale centrale extraite du bloc 3D (figure 5.23). Les deux coupes sont présentées sur des échelles d'iso-résistivité quasi-similaires afin de faciliter la comparaison des données.

Cette comparaison permet de faire ressortir d'importantes ressemblances entre les deux inversions. En effet, la zone hautement résistante sur la partie gauche est caractérisée avec les mêmes détails en surface. La différence la plus notable provient du caractère de certaines structures dans le premier résultat qui suivent la topographie sous forme de bloc (provenant de la discrétisation utilisée par Res2Dinv®). La ressemblance de ces résultats pourrait amener à se poser la question de l'utilité du code InGEOHT - $3D^-$. Cependant, certaines différences apparaissent tout de même entre les résultats. Ces différences peuvent être le fruit d'une meilleure prise en compte du comportement 3D de l'ouvrage par le code InGEOHT - $3D^-$. En conséquence, les résultats du code InGEOHT - $3D^-$ sont considérés plus fiables que les résultats issus d'une

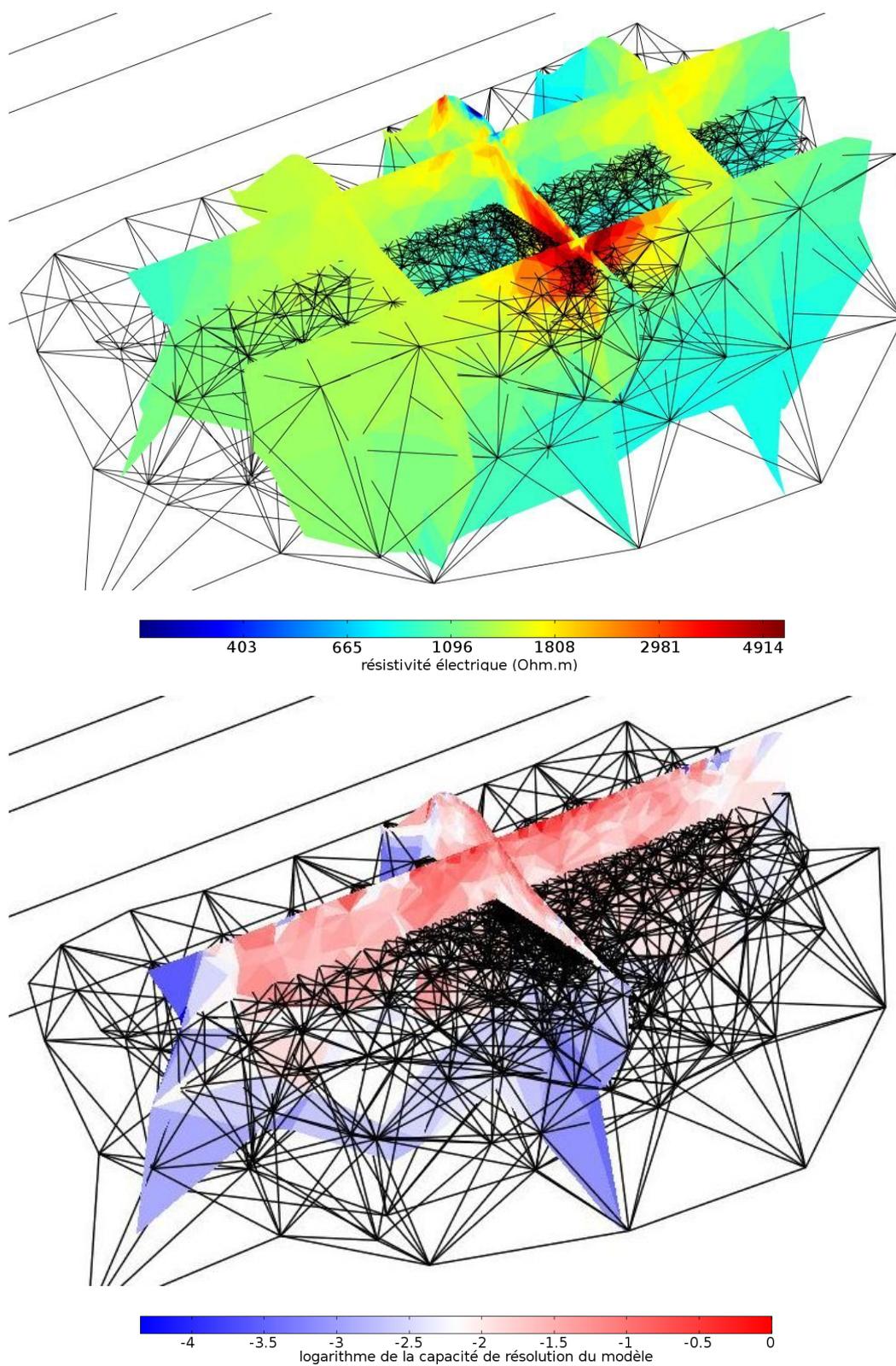


FIGURE 5.23 – Reconstructions issues de l'approche d'inversion $InGEOHT - 3D^-$, à partir de données provenant de deux lignes d'électrodes placées transversalement et longitudinalement à la digue. La figure 5.23(a) présente une vue en perspective du résultat d'inversion à la troisième itération et la figure 5.23(b) illustre le logarithme de la matrice de résolution du modèle normalisé par sa plus forte valeur.

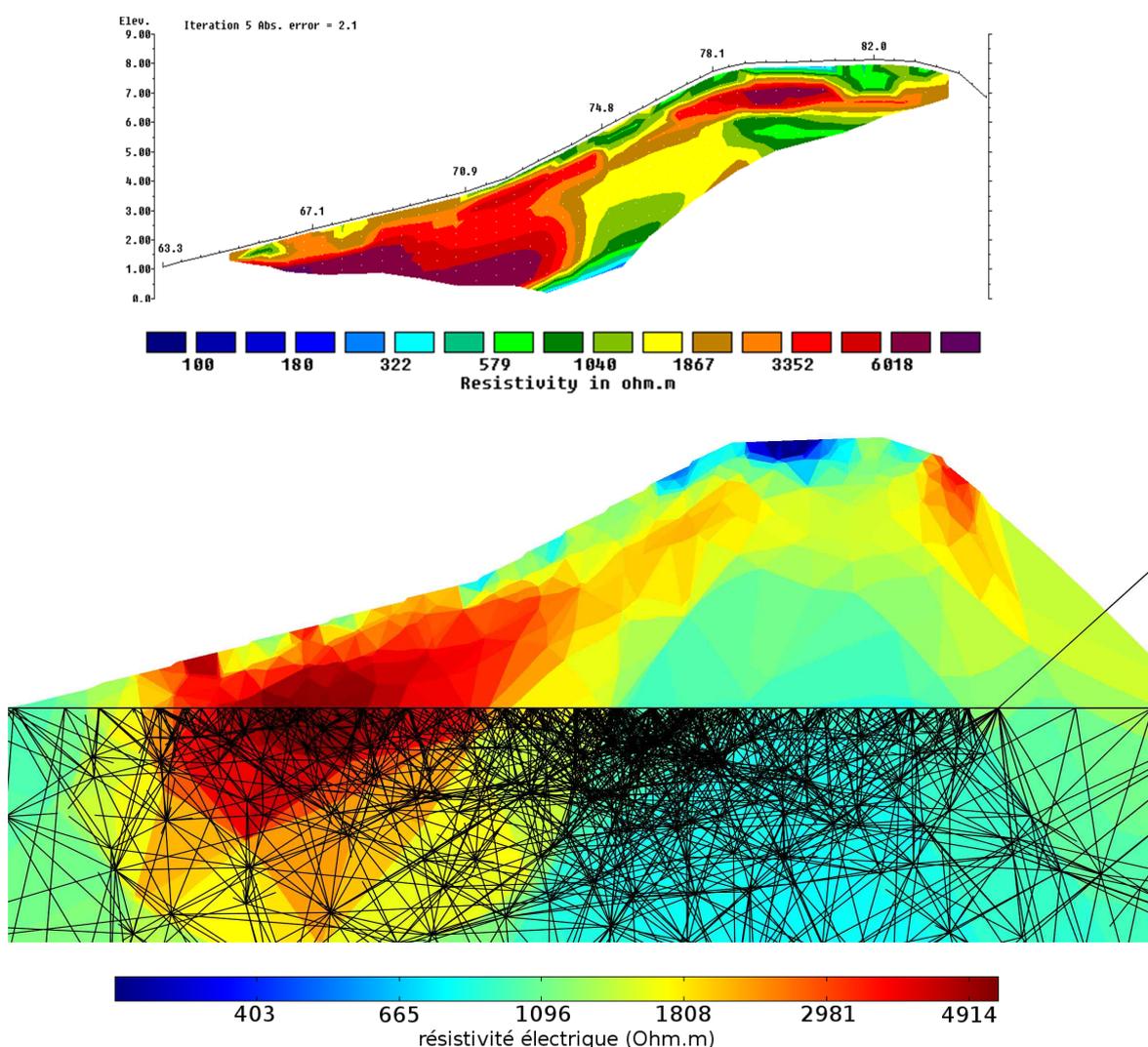


FIGURE 5.24 – Comparaison de coupes transversales de résistivité électrique inversées avec le progiciel Res2Dinv® (figure du haut) et avec le code InGEOHT - 3D (figure du bas). Le premier résultat est obtenu à la cinquième itération d'inversion avec une erreur RMS de 2.1%. Le second résultat est présenté à la troisième itération d'inversion avec une erreur RMS de 2.8%.

inversion transversale par Res2Dinv®.

De plus, l'interprétation d'une hétérogénéité résistante à gauche du profil peut être « confirmée » par la présence d'une zone de matériau plus hétérogène sur le terrain. En effet, un matériau très grossier (matériau peut être drainant) était présent en pied de digue sur la zone d'investigation. Cette connaissance permet de donner plus de crédit à l'inversion obtenue et illustre efficacement l'utilité des informations *a priori* récoltées sur le terrain.

La figure 5.25 présente une analyse de la coupe transversale obtenue distinguant sept structures. Les structures 1 et 6 correspondent respectivement à la résistivité du parement en béton et d'un artefact lié à ce parement. L'utilisation d'un parement en béton pour assurer l'étanchéité d'un OHT correspond à une digue de type 6 d'après Foster *et al.* [2000a] (figure 5.25). L'artefact lié au parement (structure 6) peut aussi être rapproché (en partie) au choix de la norme L_2 pour

l'inversion (imposant un lissage des milieux). En conséquence, le parement amont engendre localement un effet sur le résultat de l'inversion. Les structures 2 et 3 représentent la couche végétale en proche surface. Des discontinuités de cette surface sont présentes sur les deux structures. La structure 4 correspond à zone présentant une hétérogénéité résistante. Cette hétérogénéité pourrait être rapprochée soit d'une zone plus fortement aérée soit d'une zone de recharge. Ce résultat pouvant apparenter l'ouvrage ausculté à une typologie de digue de type 2 (figure 5.25) d'après Foster *et al.* [2000a]. Enfin, la structure 5 correspond à la partie du corps de digue où l'information permet de contraindre efficacement l'inversion. Cette structure peut être opposée à la structure 7 où les données informent moins l'inversion. En conséquence, il est plus hasardeux d'interpréter la distribution de résistivité de la structure 7.

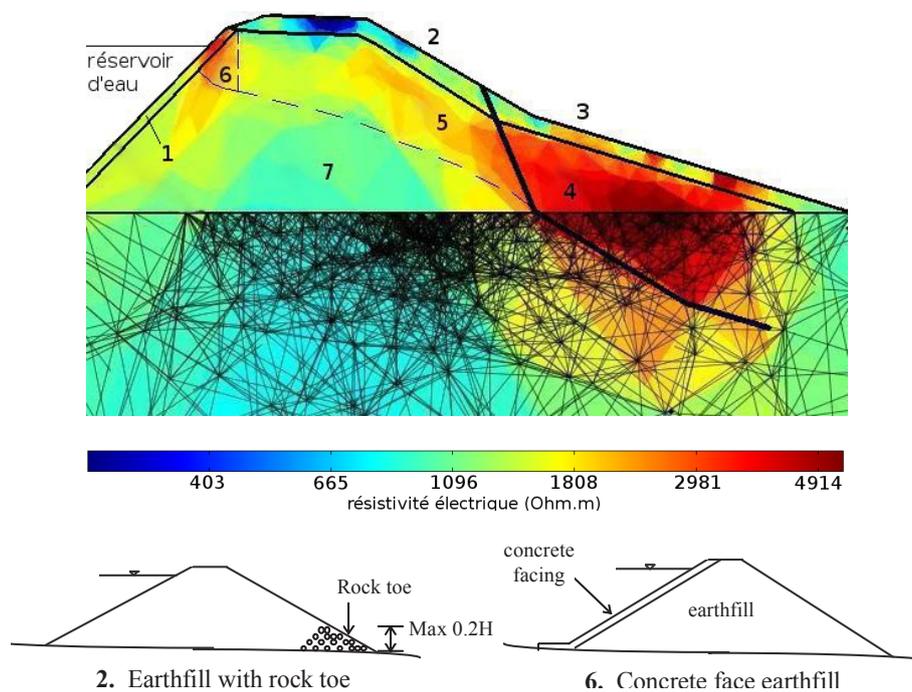


FIGURE 5.25 – Analyse de la coupe transversale issue du bloc 3D inversé à partir de la démarche 3D⁻. Le corps de digue peut être interprété sous forme de 7 zones différentes. L'analyse de ce résultat peut être rapproché des typologies de digue 2 et 6 [Foster *et al.*, 2000a], dont les compositions sont illustrées en bas de la figure.

En conclusion, à l'exception du pied de digue, l'ouvrage ne présente pas d'hétérogénéités marquées (en accord avec les documents d'archive de l'ouvrage). De plus, des observations réalisées sur le terrain permettent de valider une partie des résultats obtenus (partie plus hétérogène en pied de digue au niveau de l'auscultation). En conséquence l'interprétation de ces résultats n'a pas permis d'évoquer des zones suffisamment suspectieuses pour faire intervenir des auscultations supplémentaires.

Cependant, même si plusieurs indices permettent d'évoquer la qualité de ce résultat, afin de valider les reconstructions obtenues il est nécessaire de réaliser des forages destructifs. Cette conclusion engage ainsi la démarche suivante de la méthodologie globale d'auscultation.

5.5 Conclusion

Établir une méthodologie complète de diagnostic de sûreté par méthode géophysique est un point crucial afin de coordonner les auscultations et acquérir un maximum d'information. Dans ce cadre, les méthodes géophysiques contribuent à la méthodologie générale en renseignant sur la variation spatiale ou temporelle de la composition interne d'un ouvrage.

Au cours de ce chapitre, plusieurs approches développées dans le cadre de la thèse sont confrontées à la reconnaissance d'un OHT en charge. Ce chapitre a permis de cerner l'information *a priori* disponible ou mesurable et son utilité dans une démarche conventionnelle d'auscultation par IRE. Un accent particulier est mis sur l'information nécessaire à la création d'un modèle $2D^+$ d'inversion et sur les contraintes et avantages liés à l'utilisation de la technique de déformation de maillage.

Plusieurs niveaux de traitement sont appliqués aux données recueillies sur le terrain. Ainsi, la technique de normalisation est utilisée afin (i) de corriger l'effet de la topographie sur les données, (ii) de corriger l'effet de la topographie et du réservoir sur les données. Ces « corrections » sont comparées à un résultat d'inversion conventionnel ce qui permet d'illustrer les différences liées à l'utilisation des différents niveaux de prise en compte de la normalisation. La conclusion de cette démarche est qu'une reconnaissance $2D$ longitudinale conventionnelle ne doit pas être interprétée seule. En effet, les artéfacts liés à la présence de la topographie et du réservoir sont trop nombreux dans le résultat d'inversion pour espérer détecter des anomalies fines dans le corps de digue. Néanmoins, il est difficile de conclure avec les résultats issus des techniques de normalisation. À notre sens, l'interprétation doit être réalisée avec les trois résultats présentés à la figure 5.18. Ce travail implique d'identifier l'évolution des hétérogénéités entre résultats. Cette analyse croisée doit ainsi permettre de fournir une meilleure interprétation.

La technique de normalisation ne permettant pas une réelle prise en compte de la non-linéarité du problème, une démarche d'étude $2D^+$ est appliquée aux données issues de la campagne longitudinale. Cette technique possède l'avantage de s'inscrire très simplement dans une méthodologie globale d'auscultation des OHT. En effet, celle-ci n'engendre quasiment aucun frais supplémentaire lors de l'acquisition (en dehors de la prise d'échantillons d'eau du réservoir). Néanmoins, un important travail pour construire le modèle $2D^+$ a été nécessaire afin que les résultats issus de ce traitement soient comparables aux résultats issus du progiciel Res2Dinv® (discrétisation comparable). Les résultats obtenus à partir de la démarche $2D^+$ concluent à une meilleure prise en compte des effets perturbateurs et donc de la problématique. C'est pourquoi ces résultats sont considérés plus robustes en comparaison des résultats issus des techniques de normalisation. Cependant, il est important de pouvoir croiser ce résultat avec les résultats précédents afin de fournir la meilleure interprétation possible.

La stratégie d'auscultation $2D^+$ est particulièrement adaptée à l'auscultation « grand rendement » dans l'objectif de réaliser un zonage de l'OHT. Cependant, celle-ci ne permet pas de discerner efficacement les variations transversales du corps de digue. C'est pourquoi, une nouvelle stratégie d'acquisition et de traitement est réalisée. Cette méthodologie consiste à disposer une ligne transversale d'électrodes $2D$ sur la zone jugée suspecte en plus de la ligne longitudinale $2D$. Vues en plan, les lignes d'électrodes forment une croix. Un traitement particulier appelé $3D^-$

est appliqué aux données issues de cette acquisition. Le résultat de l'inversion $3D^-$ illustre avec précision la composition interne $3D$ de l'ouvrage. Ce type de reconnaissance est ainsi adapté à la caractérisation plus locale de portions ciblées d'ouvrages. En conséquence, cette démarche locale d'imagerie peut être réalisée sans aucun frais supplémentaire à une démarche classique impliquant une inspection locale et une inspection grand rendement. La figure 5.26 présente une synthèse sous forme d'organigramme des étapes nécessaires à la création et à la résolution d'un problème inverse $2D^+$ et $3D^-$. Cet organigramme correspond ainsi à la démarche d'utilisation engagée par le code InGEOHT.

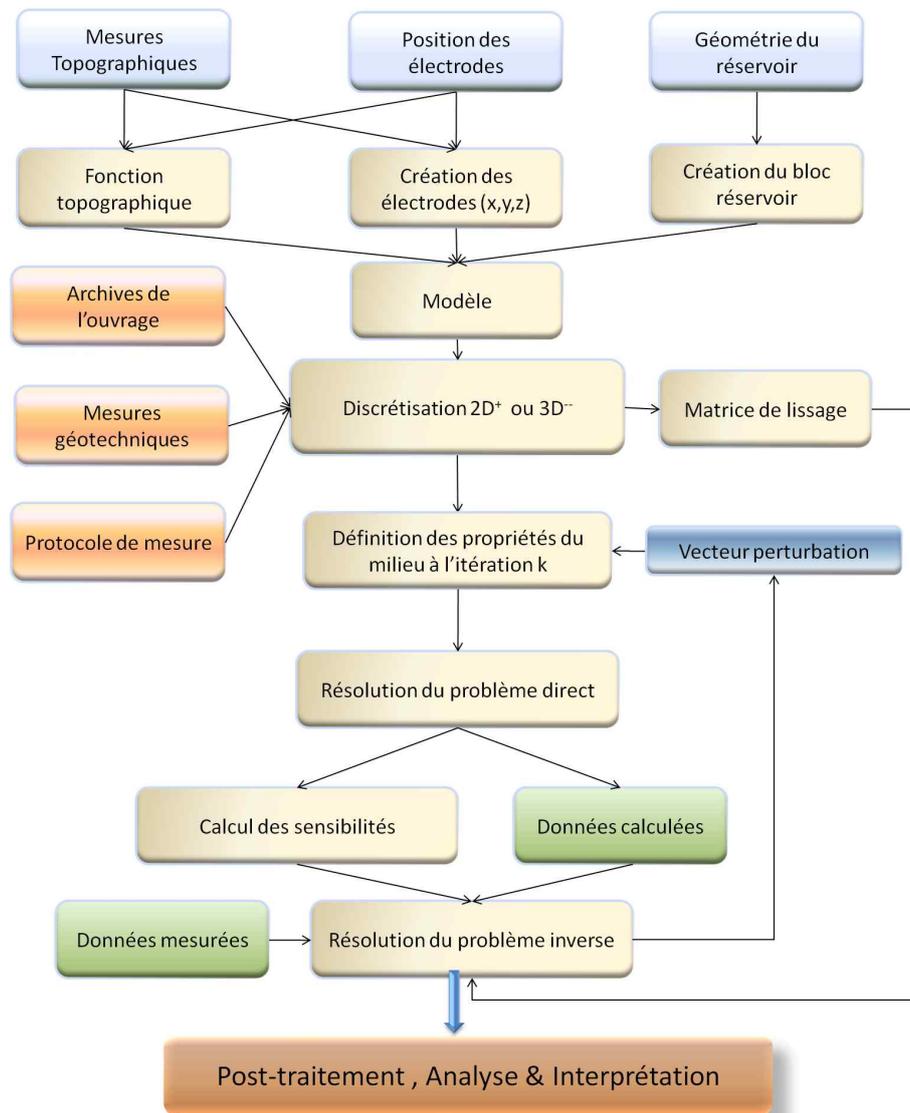


FIGURE 5.26 – Organigramme présentant les étapes nécessaires à la résolution d'un problème inverse utilisant la démarche $2D^+$ ou $3D^-$. Ce schéma détaille les étapes durant lesquelles est insérée l'information a priori. Seule une infime partie de l'information a priori (encadrés oranges) est présentée à titre illustratif.

Trois approches différentes (Normalisation, $2D^+$, $3D^-$) sont proposées pour la problématique de reconnaissance des digues en charge. Les raisons pouvant amener à la sélection d'une stratégie

d'étude plutôt qu'une autre en comparaison de la problématique sont multiples. Ces raisons intègrent notamment des critères financiers et la pertinence des stratégies en fonction des ouvrages auscultés. À cet effet, une synthèse des développements réalisés au cours de la thèse est présentée au niveau du tableau 5.2. Cette synthèse présente les avantages et inconvénients de chaque méthode en fonction de plusieurs considérations.

TABLE 5.2 – Synthèse des avantages et limitations des différentes stratégies d'imagerie en fonction de la robustesse et du coût appliqué à l'auscultation des OHT. ¹Technique de normalisation des effets perturbateurs.

		Stratégie d'inversion				
		2.5D	N ¹	2D ⁺	3D ⁻	3D
Robustesse	Digue 2D, sans effets 3D	++	++	++	++	++
	Digue 2D, avec effets 3D	-	+	+	+	+
	Digue 3D, avec effets 3D	--	-	=	+	++
Coût de l'acquisition	(+ = moins couteux)	++	+	+	-	-
Mesures additionnelles	(+ = moins de mesures)	++	+	-	-	-
Coût de l'inversion	(+ = moins couteux)	++	+	--	--	--
Rendement	Digue 2D, sans effets 3D	++	+	+	-	--
	Digue 2D, avec effets 3D	-	+	++	+	--
	Digue 3D, avec effets 3D	--	-	+	++	+

Ce tableau présente plusieurs critères de sélection des méthodologies. Le terme « digue 2D » s'applique à la composition interne de l'ouvrage, alors que les « effets 2D ou 3D » correspondent aux effets perturbateurs externes tel que la topographie ou la présence d'un réservoir. En conséquence, une « digue 2D sans effets 3D » correspond à une digue de composition interne quasi homogène et ne présentant ni topographie ni réservoir d'eau placé transversalement (ce qui s'éloigne fortement de la définition d'une digue). Une « digue 2D avec effets 3D » correspond à un ouvrage de composition interne quasi-homogène (sans noyau) mais présentant une topographie et/ou un réservoir d'eau placé transversalement. Enfin, une digue « 3D avec effets 3D » est équivalent à la définition précédente à la différence que la composition interne de l'ouvrage est 3D (possibilité de présence d'un noyau). Le terme robustesse est employé pour définir la fiabilité d'une auscultation. Enfin, le rendement est donné à partir d'une appréciation personnelle en fonction du rapport entre le coût d'une campagne et la robustesse du résultat. En conclusion, et en fonction des typologies d'ouvrages, les stratégies d'acquisition/inversion développées dans le cadre de la thèse prennent une place très importante indiquant l'intérêt théorique de ces recherches.

Conclusion et perspectives

La réalisation d'un diagnostic de sûreté des ouvrages hydrauliques en terre nécessite l'emploi de méthodes de reconnaissance et de surveillance. Parmi les méthodes existantes d'auscultation et de surveillance, l'imagerie de résistivité électrique est sélectionnée pour sa grande sensibilité à l'initiation de l'érosion interne ainsi que pour ses capacités d'imagerie des sols et des ouvrages en terre. La finalité d'une campagne d'IRE est d'obtenir une reconstruction de la variation spatiale (pour la reconnaissance) ou temporelle (pour la surveillance) de la résistivité électrique du milieu. Dans le cadre de la thèse, la pertinence de la méthode d'IRE pour la reconnaissance et la surveillance des OHT est testée. Or, les outils de traitement de l'information conventionnels ne permettent pas de répondre de manière pertinente à la problématique d'auscultation des OHT par IRE. C'est pourquoi, l'objectif du travail de thèse a été de créer un ensemble d'outils et de méthodologies permettant de répondre de manière plus robuste à la problématique.

Il s'agissait en particulier d'adapter un logiciel de modélisation en éléments finis pour la résolution du problème direct $3D$ complexe, d'utiliser des techniques existantes dans la littérature pour la résolution du problème inverse et de mettre au point des stratégies d'acquisition et de traitement spécifiquement optimisées pour l'auscultation des OHT employant un maximum d'information *a priori*.

Bilan et apports des travaux réalisés

Modélisation du problème direct

Les techniques d'auscultation géophysiques tel que l'IRE nécessitent la résolution du problème direct et du problème inverse. Dans le cadre d'auscultation des OHT, les techniques de modélisation du problème direct ne peuvent se limiter à l'utilisation de méthodes analytiques ne permettant pas la prise en compte de milieux complexes. Face à la complexité des ouvrages auscultés et en fonction de la souplesse de discrétisation désirée, un progiciel de modélisation numérique utilisant la méthode des éléments finis appelé Comsol Multiphysics® est utilisé au cours de la thèse. Théoriquement, la plus-value du progiciel Comsol Multiphysics® est de permettre une étude conviviale de formulations variationnelles du problème ainsi que pour traiter des aspects « multi-physiques ». La simulation de la méthode géo-électrique nécessite la résolution d'un nombre très élevé de problèmes directs ainsi que des possibilités de paramétrisation du modèle étudié. Le progiciel de modélisation Comsol Multiphysics® n'étant pas à l'origine destiné à ce type d'étude, un important travail d'interfaçage avec le progiciel Matlab® a été nécessaire. Ce travail a permis de faciliter la génération de milieux complexes et permettant de simuler des injections de courant *via* des positions totalement arbitraires des électrodes. En conséquence, cet outil permet de modéliser la diffusion de champs électriques à partir d'une distribution quel-

conque d'électrodes simulant la totalité des combinaisons possibles de quadripôles (ou bipôles ou tripôles). Cet outil a notamment été utilisé afin de réaliser des études de sensibilité illustrant que l'IRE est extrêmement sensible à la topographie des ouvrages ainsi qu'à la présence d'un réservoir d'eau.

Sélection et implémentation d'un algorithme d'inversion

Plusieurs algorithmes d'inversion non-linéaires peuvent être utilisés afin de reconstruire la distribution de résistivité électrique du sous-sol. Dans l'objectif de limiter le nombre d'itérations du problème inverse et de pouvoir *a posteriori* réaliser des études d'optimisation, un algorithme de type Gauss-Newton avec modification de Levenberg-Marquardt est utilisé. Cet algorithme réalisé sous l'environnement Matlab permet de régulariser de manière explicite le problème inverse par l'introduction d'un paramètre d'amortissement supplémentaire à l'expression normale d'inversion. Plus précisément, le principe d'Occam est utilisé afin d'orienter la solution vers une reconstruction lisse des paramètres du modèle. Enfin, une méthode de type état-adjoint est sélectionnée du fait de sa grande précision pour le calcul des matrices de dérivées de Fréchet. De nombreuses études ont été réalisées afin d'implémenter le calcul de l'état adjoint de la manière la plus précise et la plus conviviale. Une solution précise mais lourde du point de vue du calcul est retenue consistant à générer une discrétisation du milieu (sous forme de sous-domaines) et à résoudre l'intégrale nécessaire au calcul de l'état adjoint dans chaque cellule discrétisée.

Conception d'une nouvelle démarche de discrétisation du problème inverse

Les outils d'inversion conventionnels, tels que le progiciel Res2Dinv®, ne permettent pas une prise en compte de la complexité de l'ouvrage, ce qui génère des artefacts. Afin d'améliorer la prise en compte du milieu ausculté plusieurs niveaux d'interprétation sont développés. La réalisation de ces développements ont notamment nécessité la formulation d'une nouvelle méthodologie de discrétisation du problème inverse. En effet, les techniques conventionnelles de maillage du problème inverse, bien que très légères d'un point de vue informatique, ne permettent que très peu de flexibilité pour le choix des géométries des sous-domaines discrétisés. Cette nouvelle méthodologie de discrétisation permet de découpler complètement la discrétisation du problème inverse et du problème direct. Ce découplage permet de créer une discrétisation du problème inverse plus « représentative » du milieu ausculté. Le second avantage est de permettre une insertion explicite de l'information *a priori* mise à disposition par la pré-étude d'auscultation (topographie, position du substratum, structure de l'ouvrage). À partir de cette nouvelle démarche de discrétisation/inversion et afin de répondre de manière plus pertinente à la méthodologie d'auscultation des OHT, trois approches ont été mises au point.

Développement de méthodologies d'auscultation des OHT par IRE

La première approche reprend le concept de normalisation (cf. Annexe B). Cette technique permet de limiter les effets « nuisibles » occasionnés par la présence par exemple de la topographie ou de milieux perturbant la mesure. Cette technique permet d'informer la présence, la position et l'amplitude des effets perturbateurs dans un résultat d'inversion. La quantification de ces effets perturbateurs permet ainsi d'améliorer l'interprétation des résultats d'imagerie. Cette technique possède l'avantage d'être assez légère d'un point de vue calculatoire mais nécessite cependant la connaissance de la géométrie de l'ouvrage (digue et réservoir) et de la résistivité des milieux

perturbateurs (la résistivité du réservoir). Cependant, cette technique ne tient pas compte de la non-linéarité du problème et nécessite d'imposer un contraste de résistivité entre le milieu ausculté et les milieux perturbateurs.

Afin de répondre de manière optimisée au cas de reconnaissance de grands linéaires d'ouvrages, une stratégie d'auscultation nommée $2D^+$ est développée. Cette technique permet de garder la simplicité d'acquisition d'une campagne d'auscultation $2D$ tout en incluant de manière explicite le caractère $3D$ de l'ouvrage ausculté. En conséquence, la sous-détermination du problème inverse reste équivalente à un traitement $2D$ conventionnel et la topographie de l'ouvrage ainsi que la présence d'un réservoir d'eau peuvent être intégrées naturellement. L'objectif visé est de pouvoir « coller » au mieux à l'ouvrage ausculté. Ainsi, contrairement à la technique de normalisation, la stratégie d'inversion $2D^+$ permet d'intégrer toute la non-linéarité du problème direct. Cependant, cette technique nécessite la connaissance de la géométrie de l'ouvrage et du réservoir. De plus, le bénéfice de la technique peut être largement augmenté lorsque la résistivité du réservoir peut être mesurée. Cependant, l'ouvrage discrétisé « $2D^+$ » ne permet pas de variation dans le sens transversal à la prospection. En conséquence, les ouvrages possédant des variations internes importantes (présence d'un noyau argileux) sont mal pris en compte.

Dans l'objectif de permettre une variation transversale des propriétés internes à l'ouvrage (présence d'un noyau par exemple) une stratégie supplémentaire est développée. Cette technique nommée $3D^-$ permet de discrétiser de manière réellement $3D$ un ouvrage tout en limitant fortement le nombre d'électrodes utilisées en comparaison d'une prospection $3D$ classique. En effet, une prospection $3D$ nécessite la disposition d'une grille d'électrodes augmentant largement le coût de la prospection et limitant la résolution de zones particulières. Ainsi, une méthodologie d'auscultation intégrant une ligne longitudinale et une ligne transversale est présentée. Cette méthode permet de limiter fortement le coût d'acquisition et s'intègre avec pertinence dans une méthodologie d'auscultation.

Optimisation de l'acquisition des données et fiabilité des reconstructions

La capacité d'inverser de manière unique les mesures réalisées sur le terrain dépend de la quantité d'information contenue dans les données. Les protocoles d'acquisition conventionnellement utilisés en IRE contiennent moins de 1 % (en fonction du nombre d'électrodes) des quadripôles pouvant être réalisés. En conséquence, la quantité d'information apportée par les données mesurées peut être optimisée en sélectionnant les meilleurs quadripôles. De plus, une étude réalisée dans le cadre de la thèse a montré que la quantité d'information pouvait être augmentée de manière non négligeable en optimisant la position des électrodes de mesure.

La reconstruction issue d'un problème inverse en IRE présentant nécessairement des erreurs, il est nécessaire de disposer de méthodes permettant de qualifier la fiabilité d'un résultat. Cependant, ces méthodes ne sont disponibles dans le commerce que pour l'inversion $2D$ ne permettant qu'une prise en compte partielle de la complexité de l'ouvrage. En conséquence, afin d'améliorer l'interprétation des résultats d'inversion, des méthodes telles que la matrice de résolution du modèle ont été implémentées dans le cadre du code InGEOHT - $2D^+$ et $3D^-$.

Validation des développements

Une digue expérimentale à échelle quasi-réelle a été discutée, réalisée, et étudiée au cours de la thèse dans l'objectif d'évaluer la pertinence de la méthode d'IRE pour la détection d'infiltrations. Un second objectif de l'ouvrage était de tester et confronter les développements réalisés au cours de la thèse. Ces développements concernent la technique d'optimisation du placement des électrodes, la technique de normalisation et enfin le code d'inversion InGEOHT - $3D^-$.

En conséquence, plusieurs infiltrations suivies par la présence d'une instrumentation à demeure ont permis de montrer la pertinence ainsi que les limites des différents traitements de la méthode d'IRE. Tout d'abord, l'étude globale révèle que toutes les campagnes d'acquisition ont permis la détection des infiltrations lorsque la visualisation des résultats est présentée en variation temporelle. Cependant, l'étude a montré que tous les effets liés au comportement $3D$ de l'ouvrage ne peuvent être supprimés par une étude en variation temporelle, contrairement à ce qui est souvent avancé dans les publications actuelles. Enfin, les reconstructions obtenues avec le code InGEOHT - $3D^-$ semblent corrélérer avec la plus grande précision les réponses obtenues avec les sondes TDR.

Un des objectifs de l'ouvrage était de qualifier l'apport d'une optimisation du positionnement des électrodes pour la détection d'infiltrations. Même si les résultats apportés par cette technique semblent les plus pertinents (Chapitre 4, campagne 4 PDP-Opt-E), le comportement de l'infiltration démontre une des limites de la méthode. En effet, la géométrie de l'infiltration était supposée suivre un bulbe évoluant gravitairement, ce qui a permis d'optimiser la position des électrodes. Or, ce comportement n'a pas été observé. Au contraire, des chemins préférentiels d'écoulement se sont construits. En résumé, le positionnement des électrodes a été optimisé pour le suivi d'un phénomène qui ne s'est pas produit (panache gravitaire). En conséquence, l'expérimentation est sortie du cadre de l'optimisation limitant fortement la validation de l'apport de la méthode d'optimisation du placement des électrodes.

Un ouvrage expérimental ne pouvant représenter la complexité d'une auscultation sur un ouvrage hydraulique en charge, une campagne de reconnaissance sur un ouvrage en service a été réalisée. L'étude a notamment permis de dérouler le schéma d'une auscultation $2D^+$ et $3D^-$ comparée à des auscultations classiques $2D$ longitudinales et transversales. Les résultats de l'étude $2D^+$ ont ainsi pu montrer leur supériorité face aux résultats simples et normalisés, fournissant une méthodologie d'auscultation pour la reconnaissance grand rendement. L'étude $3D^-$ indique que des tomographies transversales (à l'ouvrage) peuvent s'intégrer de manière complémentaire à une méthodologie plus « classique » d'auscultation des OHT. Ce traitement $3D^-$ illustre que l'information issues des données réalisées en croix contraint les effets liés au comportement $3D$ de l'ouvrage.

Synthèse des apports méthodologiques confrontés à la problématique d'auscultation des OHT

Le diagnostic de sureté des OHT nécessite l'utilisation de méthodes pertinentes pour la reconnaissance d'un linéaire important d'ouvrages et pour l'inspection détaillée de portions ciblées d'ouvrages. Ainsi, cinq outils sont réalisés dans le but de fiabiliser le résultat d'inversion et son interprétation afin de répondre au mieux aux problématiques d'auscultation des OHT :

- une technique de normalisation applicable aux auscultations $2D$ et $3D$ conventionnelles, pour la reconnaissance et la surveillance des OHT ;
- une « stratégie » $2D^+$ optimisée pour le traitement de données issues d'une campagne $2D$ longitudinale dans le cadre d'opérations de reconnaissance à grand rendement ;
- une « stratégie » $3D^-$ pour les ouvrages présentant des variations transversales dans le cadre d'une imagerie haute résolution de portions ciblées d'ouvrage ;
- un algorithme d'inversion en variation temporelle appliqué au code InGEOHT - $3D^-$ pour la surveillance de portions ciblées d'ouvrages ;
- des techniques d'évaluation de la fiabilité de reconstruction de milieux complexes $3D$.

Perspectives

Il est souvent avancé qu'un travail de thèse soulève plus de questions qu'il n'apporte de réponses. Ainsi, avant de clore ce travail de thèse, je voudrais préciser plusieurs suggestions et perspectives de recherche concernant la méthode d'imagerie de résistivité électrique en général et son application à l'auscultation des OHT.

Point de vue généraliste

L'imagerie de résistivité électrique est une méthode extrêmement pertinente pour un vaste domaine d'applications. Cependant, cette méthode n'a pas encore dévoilé toutes ses capacités et plusieurs études bien orientées pourraient apporter une amélioration conséquente à son utilisation.

Un point largement abordé tout au long de ce travail de thèse concerne la manière de discrétiser le milieu afin de réaliser une inversion. Cette information fut d'ailleurs un frein à plusieurs de mes développements. En effet, les méthodes de discrétisation actuelles ne sont adaptées qu'à des protocoles simples n'apportant que peu d'informations. Ces méthodes ne peuvent être exploitées lorsque des protocoles optimisés, impliquant plusieurs centaines de milliers de mesures, sont utilisés. En conséquence, l'élaboration d'une méthode permettant de discrétiser le milieu ausculté de manière optimale en fonction de la position des électrodes, des données mesurées, et de l'*a priori* que l'opérateur porte sur le milieu ausculté permettrait une avancée très intéressante dans l'utilisation de la méthode IRE.

De plus, les méthodes d'optimisation de l'acquisition basées sur la matrice de sensibilité utilisent nécessairement une discrétisation fixe (qui ne varie pas en fonction de l'optimisation). À mon sens, ce point est un réel problème pour l'amélioration des techniques d'optimisation et mériterait d'être abordé (ce qui n'est pas le cas), voire amélioré.

Un second point ayant fait défaut lors de mes travaux de thèse concerne la compréhension et la caractérisation du bruit sur les mesures. En effet, la qualité d'une inversion dépend largement du bruit présent sur les mesures et les méthodes permettant de le quantifier précisément ne sont ni généralisées ni formalisées. Or, les méthodes d'optimisation actuelles nécessitent l'estimation d'un bruit sur les mesures afin d'améliorer leur pertinence. En conséquence, une étude démontrant comment modéliser de manière pseudo-empirique le bruit sur les mesures permet-

trait d'améliorer considérablement les capacités des méthodes d'optimisation.

Au cours de la thèse plusieurs travaux ont été engagés dans l'objectif d'améliorer l'utilisation des méthodes géo-électriques. Cependant, ces travaux nécessitent d'être approfondis afin de valider l'importance que j'ai voulu leur attribuer. Ces travaux concernent principalement la validation de la technique d'optimisation du positionnement des électrodes. Ces développements sont particulièrement adaptés aux thématiques de surveillance d'ouvrages où l'*a priori* sur le milieu et/ou son évolution sont disponibles. Les travaux réalisés dans le cadre de ce travail de thèse figurent parmi les premières recherches concernant ce type d'optimisation. Or, à mon sens, les améliorations liées à l'optimisation du positionnement des électrodes sont bien plus élevées que celles obtenues par optimisation des quadripôles d'acquisition (protocoles).

Perspectives liées à la problématique de thèse

La sureté des OHT est une thématique sociétale importante nécessitant le développement de méthodes d'auscultation fiables et précises pour la détection du phénomène d'érosion interne. Cependant, la résolution de cette problématique nécessite la validation de trois jalons :

- Étape I. l'obtention d'un résultat d'imagerie fiable de la distribution spatiale de résistivité électrique ou de son évolution ;
- Étape II. la détermination de critères liant le phénomène d'érosion interne au résultat d'imagerie ;
- Étape III. le développement d'outils de traitement *a posteriori* des résultats d'imagerie dans le but de quantifier la présence d'érosion interne.

Les objectifs II et III nécessitent comme base de travail le résultat de l'étape I, c'est pourquoi mes travaux de thèse se sont naturellement focalisés sur ce premier point. L'objectif II est certainement le point le plus intéressant d'un point de vue de la recherche et de l'application aux OHT. Cette étape nécessite d'établir des critères de détection de l'érosion interne (ou autre critère de danger) permettant la réalisation d'un diagnostic. En conséquence, ces travaux impliquent la réalisation d'un pont reliant le domaine de la géotechnique (géomécanique) et de la géophysique. Une méthode complémentaire qui pourrait s'avérer satisfaisante concerne l'utilisation de méthodes géo-statistiques liant (par logique floue par exemple) des signatures géophysiques à des signatures d'érodabilité.

Les formes que peuvent prendre l'information *a priori* sont multiples et il est difficile d'introduire cette donnée de manière pertinente dans un problème inverse. Une partie de ce travail de thèse s'est attachée à lister les formes d'*a priori* pouvant améliorer l'inversion des données géo-électriques et leur provenance dans une méthodologie générale d'auscultation. Cependant, il me semble que les indices accumulés au cours de ce travail de thèse ne font qu'effleurer la somme totale d'information *a priori* disponible. En conséquence, un important travail mêlant les compétences de spécialistes des ouvrages, de spécialistes des phénomènes d'érosion et enfin de spécialistes en méthodes d'auscultation permettrait d'apporter considérablement à la démarche de diagnostic de sureté des OHT.

L'information contenue dans les données détermine l'unicité et donc la robustesse d'une inversion. Cette information peut être améliorée en introduisant dans le problème inverse des données

provenant d'autres méthodes d'auscultation. La communauté géophysique réserve souvent l'emploi du terme « inversion jointe » pour les systèmes de traitement de l'information permettant d'intégrer dans un seul problème inverse toute l'information. Ces méthodes reçoivent un intérêt très particulier de la part de la communauté géophysique dernièrement et sont promises à de forts développements. Dans le cadre de l'auscultation des OHT, l'utilisation conjointe de plusieurs physiques devrait permettre d'améliorer considérablement l'unicité des solutions et donc la fiabilité des méthodes. Concernant l'auscultation des OHT par IRE, quatre méthodes peuvent être différenciées :

- inversion jointe des données géo-électriques & électromagnétiques basses fréquences ;
- inversion jointe des données géo-électriques & du potentiel spontané ;
- inversion jointe des données géo-électriques & thermiques (par fibre optique) ;
- inversion jointe des données géo-électriques & hydrauliques (par mesure de la piézométrie).

Le code InGEOHT a été développé dans le cadre de la thèse sous un environnement Matlab pilotant le progiciel de modélisation numérique Comsol Multiphysics®. Comme son nom l'indique, l'objectif d'un tel logiciel est de permettre l'intégration de plusieurs physiques dans un même problème direct. Ainsi, l'objectif « caché » ayant motivé l'utilisation de ce progiciel est la possibilité d'intégrer différentes physiques et donc fournir un outil de base pour le développement d'inversions jointes.

Des modèles inverses thermo-hydrauliques sont actuellement en cours de développement à EDF-R&D, sous environnement Comsol Multiphysics®, dans l'objectif d'améliorer la quantification du débit de fuite dans les OHT par thermométrie. En conséquence, l'ajout des méthodes géo-électriques permettrait d'améliorer à la fois les capacités de détection du phénomène et l'unicité de la solution. Du point de vue des gestionnaires, ces développements prennent un sens particulier, car garantir la santé de leurs installations implique des méthodes d'auscultation fines et fiables de détection du phénomène d'érosion interne.

L'élaboration de critères permettant de déterminer la présence d'érosion interne est une tâche extrêmement difficile à réaliser à partir de résultats issus d'une reconnaissance géophysique. À l'inverse, l'élaboration de critères et donc d'un diagnostic à partir de résultats en variation temporelle est plus directement envisageable. Cette considération mène à la formulation de nouveaux objectifs à plus ou moins court terme. Ces objectifs concernent la sélection ou le développement d'algorithmes d'inversion optimisés pour la détection d'infiltrations ou pour la quantification d'un débit de fuite lors d'un test de traçage à la saumure. Pour ce dernier cas, des développements très spécifiques permettant d'imposer la positivité de l'évolution de la conductivité permettraient d'améliorer considérablement les capacités de quantification du débit de fuite.

L'utilisation des méthodes inverses pour le traitement des données d'IRE est un passage quasi-obligatoire. Cependant, une piste, non-abordée dans la littérature, serait d'étudier les mesures réalisées du point de vue de leur contenu fréquentiel. En effet, les études de surveillance nécessitent la répétition d'un protocole fixe dans le temps. En conséquence, l'idée liée à cette étude serait de voir si des fréquences propres à un phénomène d'infiltration ne pourrait pas être visualisées par analyse spectrale (principe de la signature). Avant d'engager des études approfondies, de « simples » études paramétriques à l'aide d'outils de modélisation, permettraient d'apporter une réponse à cette question.

Les méthodes d'auscultation présentées dans le cadre de ce travail de thèse correspondent à des méthodes « anciennes » dont les capacités sont appliquées et optimisées à la résolution de la problématique. Cependant, au lieu d'adapter ces méthodes existantes, ne peut-on pas développer des méthodes nouvelles qui répondraient plus directement à la problématique spécifique des OHT ? Cette perspective fait écho à deux exemples récents de développements matériels tels que l'aquatrack et le MAPX. En effet, j'estime qu'un développement en amont, d'une instrumentation directement optimisée pour l'auscultation des OHT, permettrait une meilleure réponse à la problématique.

Un dernier point important pour l'amélioration de l'auscultation des OHT est d'inscrire les méthodes géophysiques dans une approche performantielle de durabilité des ouvrages. Cette approche permettrait de formaliser les reconnaissances réalisées (la ou les méthodes, la zone, le moment, la fréquence de répétition des auscultations, ...) afin d'optimiser au mieux les renseignements fournis par les méthodes géophysiques.

Bibliographie

- Abu-Hassanein, Z. S., Besson, C. H., & Blotz, L. R. 1996. Determining bentonite content in soil-bentonite mixtures using electrical conductivity. *Journal of Geotechnical Engineering*, **19**(1), 397–406. [46](#)
- Adler, A., & Lionheart, W. R. B. 2006. Uses and abuses of EIDORS : an extensible software base for EIT. *Physiol. Meas*, **27**(5), S25. [101](#)
- Aina, A., Olorunfemi, M. O., & Ojo, J. S. 1996. An integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation. *Geophysics*, **61**(2), 349–356. [29](#)
- Al-Chalabi, M. 1992. When least-squares squares least. *Geophysical Prospecting*, **40**(3), 359–378. [72](#)
- Alumbaugh, D. L., & Newman, G. A. 2000. Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic inversion. *Geophysics*, **65**(5), 1455–1467. [123](#)
- Archie, G. E. 1942. The electrical resistivity logs as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of AIME*, **146**, 54–62. [44](#), [45](#)
- Armbruster, H., Dornstadter, J., & Kapplemeyer, O. 1992. *Detection of seepage and flow phenomena by temperature measurements*. Balkema. Pages 93–95. [28](#)
- Backus, G. E., & Gilbert, J. F. 1967. Numerical application of a formalism for geophysical inverse problems. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **13**(1-3), 247–276. [99](#)
- Backus, G. E., & Gilbert, J. F. 1968. The resolving power of gross earth data. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **16**(2), 169–205. [73](#), [123](#)
- Backus, G. E., & Gilbert, J. F. 1970. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **266**(1173), 123–192. [123](#)
- Barthelemy, F., Martin, X., & Nicolazo, J.-L. 2004. *La réglementation en matière de sécurité des barrages et des digues*. Tech. rept. Conseil général des mines. [8](#)
- Beck, Y.-L. 2008. *Évaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique*. Ph.D. thesis, École Centrale Nantes. [44](#), [45](#)
- Bendahmane, F. 2005. *Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne*. Ph.D. thesis, Université de Nantes. [19](#)
- Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., & King, D. 2008. The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples : analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, **173**(10), 707–720. [46](#)

- Bièvre, G., & Norgeot, C. 2005. Utilisation des méthodes géophysiques pour l'auscultation des digues en eau. Étude de cas sur le canal du Centre (France). *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **254**(1), 85–107. [20](#)
- Blome, M., Maurer, H., & Schmidt, K. 2009. Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques. *Geophysical Journal International*, **176**(3), 740–752. [xiv](#), [54](#), [55](#), [57](#), [60](#), [85](#), [95](#), [103](#), [104](#)
- Blome, M., Maurer, H., & Greenhalgh, S. 2011. Geoelectric experimental design - Efficient acquisition and exploitation of complete pole-bipole data sets. *Geophysics*, **76**(1), F15–F26. [123](#), [128](#)
- Bolève, A. 2009. *Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*. Ph.D. thesis, Université de Savoie. [17](#), [28](#)
- Bolève, A., Revil, A., Gevaudan, C., Janod, F., Mattiuzzo, J.-L., & Fry, J.-J. 2009b. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. *Near Surface Geophysics*, **7**(5-6), 447–462. [28](#)
- Bouman, C., & Sauer, K. 1993. A generalized gaussian image model for edge-preserving MAP estimation. *IEEE Trans. on Image Processing*, **2**(3), 296–310. [72](#)
- Bretar, F., Chauve, A., Bailly, J.-S., Mallet, C., & Jacome, A. 2009. Terrain surfaces and 3-D landcover classification from small footprint full-waveform lidar data : application to badlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, **13**(8), 1531–1544. [28](#)
- Butler, D. K., Llopis, J. L., & Deaver, C. M. 1989. Comprehensive geophysical investigation of an existing dam foundation, Part 1. *The Leading Edge*, **8**(8), 10–18. [20](#)
- Butler, D. K., Llopis, J. L., Dobecki, T. L., Wilt, M. J., Corwin, R. F., & Olhoeft, G. 1990. Comprehensive geophysics investigation of an existing dam foundation : Engineering geophysics research and development, Part 2. *The Leading Edge*, **9**(9), 44–53. [20](#)
- Carlsten, S., Johansson, S., & Worman, A. 1995. Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. *Journal of Applied Geophysics*, **33**(1-3), 143–156. [29](#)
- CERTU. 2004. *Bulletin du réseau risques naturels*. Tech. rept. 4. Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques. [8](#)
- Cfbr. *Site internet du Comité Français des Barrages et Réservoirs*. [6](#)
- Chambers, J. E., Loke, M. H., Ogilvy, R. D., & Meldrum, P. I. 2004. Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. *Journal of contaminant hydrology*, **68**(1-2), 1–22. [51](#)
- Chen, C., Liu, J., Xia, J., & Li, Z. 2006. Integrated geophysical techniques in detecting hidden dangers in river embankments. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **11**(2), 83–94. [28](#)
- Cho, I. K., & Yeom, J. Y. 2007. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam. *Geophysics*, **72**(2), G31–G38. [29](#), [51](#)

- Chouteau, M., & Giroux, B. 2006. *Géophysique appliquée II - GLQ 3202 - Méthodes électriques, Notes de cours*. École Polytechnique Montréal. xi, xii, xiii, 38, 40, 48, 49, 69
- Claerbout, J. F., & Muir, F. 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, **38**(5), 826–844. 72
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J.-P., & Gourc, J.-P. 2010. Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Management*, **30**(3), 452–464. 87
- Coggon, J. H. 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, **36**(1), 132–155. 50, 54
- Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. 1987. Occam's inversion - A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**(3), 289–300. 81, 83, 114
- Cosenza, P., & Tabbagh, A. 2004. Electromagnetic determination of clay water content : role of the microporosity. *Applied Clay Science*, **26**(1-4), 21–36. 43
- Curtis, A. 1999. Optimal design of focused experiments and surveys. *Geophysical Journal International*, **139**(1), 205–215. 123
- Dahlin, T. 1993. *On the automation of 2D resistivity surveying for environmental applications*. Ph.D. thesis, Lund University, 187p. 58
- Dahlin, T. 2000. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **48**(1), 181–187. 41
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2002. Gradient and mid-point-referred measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. In : *Procs. 8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Aveiro, Portugal, 8-12 Sept.* 120
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **52**(5), 379–398. 120, 128, 238
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2006. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, **4**, 113–123. 238
- Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D., & Nitao, J. 1992. Electrical resistivity tomography of vadose water movement. *Water Resources Research*, **28**(5), 1429–1442. 51
- deGroot Hedlin, C., & Constable, S. 2004. Inversion of magnetotelluric data for 2D structure with sharp resistivity contrasts. *Geophysics*, **69**(1), 78–86. 83, 114
- Dey, A., & Morrison, H. F. 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped 3-dimensional structures. *Geophysics*, **44**(4), 753–780. *Geophysics*. 50, 53
- Dion, R. 1961. *Histoire des levées de la Loire*. Paris. 312 p. xi, 17
- Doligé, E. 2010. *Les digues de protection contre les inondations*. Tech. rept. Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. 10

- Dornstadter, J. 1997. Detection of internal erosion in embankment dams. *In : Commission Internationale des Grands Barrages, 19ieme congres, Florence.* 28
- Edwards, L. S. 1977. Modified pseudo-section for resistivity and ip. *Geophysics*, **42**(5), 1020–1036. [xxi](#), [197](#), [238](#)
- Fargier, Y., Palma Lopes, S., Fauchard, C., Francois, D., & Côte, P. 2010. Optimization electrodes layouts for 3D-DC Resistivity Imaging : application to water infiltration in an experimental dike. *In : Near Surface 2010 - 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics 6 - 8 September, Zurich, Switzerland.* [xvi](#), [124](#), [125](#), [132](#)
- Fargier, Y., Palma Lopes, S., Fauchard, C., Francois, D., & Côte, P. 2011a. DC-Electrical Resistivity Imaging applied to dike investigation : methodological prospects,. *In : FloodProBE International Geophysics Workshop, March 21-23, Paris, France.* 28
- Fargier, Y., Palma Lopes, S., Luczak, A., Fauchard, C., Francois, D., & Côte, P. 2011b. DC-electrical resistivity tomography for earthen embankment dike survey : improvement strategies in between 2D and 3D approaches. *In : Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion in embankment dams and their foundations (IEWG-ICOLD), April 26-29, Brno, Czech Republic.* [xiv](#), [17](#), [95](#), [103](#), [104](#)
- Farquharson, C. G. 2005. *Approximate sensitivities for the multi-dimensional electromagnetic inverse problem.* Ph.D. thesis, University of British Columbia. 81
- Fauchard, C., & Mériaux, P. 2004. *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues.* Cemagref Editions. [10](#), [11](#), [14](#), [15](#), [17](#), [19](#), [20](#), [21](#), [23](#), [24](#), [29](#), [112](#), [182](#), [184](#), [204](#)
- Fauchard, C., & Mériaux, P. 2007. *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes. Guide for implementation and interpretation.* Editions Quae. [xi](#), [16](#), [17](#)
- Fell, R., & Fry, J.-J. 2007. *The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations.* *Internal Erosion of Dams and their foundation.* [10](#), [11](#), [14](#), [19](#), [184](#)
- Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., & Foster, M. 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment Dams. *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, **129**(4), 307–314. [10](#)
- Fell, R., Wan, C. F., & Foster, M. 2004. *Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping - piping through the embankment.* Tech. rept. Report R-428. UNICIV, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia. [10](#), [19](#)
- Foster, M., Spannagle, M., & Fell, R. 1998. *Report on the ananalysis of embankment dam incidents.* Tech. rept. Report R-374. UNICIV, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia. [xxv](#), [10](#), [13](#)
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. 2000a. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), 1000–1024. [xi](#), [xxiii](#), [xxv](#), [7](#), [10](#), [13](#), [210](#), [211](#)

- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. 2000b. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), 1025–1061. [10](#)
- Foster, M. A., & Fell, R. 1999b. *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods*. Tech. rept. Report R-377. UNICIV, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia. [xi](#), [10](#), [12](#)
- Foster, M.A. 1999a. *The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. Ph.D. thesis, PhD thesis of School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. [xi](#), [10](#), [20](#)
- Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J., & Rijo, L. 1980. Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, **45**(1), 75–93. [17](#)
- French, H., & Binley, A. 2004. Snowmelt infiltration : monitoring temporal and spatial variability using time-lapse geophysics. *J. Hydrology*, **297**(1-4), 174–186. [51](#)
- Friedel, S. 2003. Resolution, stability and efficiency of resistivity tomography estimated from a generalized inverse approach. *Geophysical Journal International*, **153**(2), 305–316. [39](#), [125](#)
- Friedman, S. P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity : a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **46**(1-3), 45 – 70. [45](#)
- Furche, M., & Weller, A. 2002. Sensitivity distributions of different borehole electrode configurations considering a model with a cylindrical coaxial boundary. *Geophysical Journal International*, **149**(2), 338–348. [123](#)
- Furman, A., Warrick, A. W., & Ferre, T. P. A. 2002. Electrical potential distributions in a heterogeneous subsurface in response to applied current : solution for circular Inclusions. *Vadose Zone Journal*, **1**(2), 273–280. [123](#)
- Furman, A., Ferre, T. P. A., & Heath, G. L. 2007. Spatial focusing of electrical resistivity surveys considering geologic and hydrologic layering. *Geophysics*, **72**(2), F65–F73. [123](#)
- Furman, A. and Ferre, T. P. A., & Warrick, A. W. 2004. Optimization of ERT surveys for monitoring transient hydrological events using perturbation sensitivity and genetic algorithms. *Vadose Zone Journal*, **3**(4), 1230–1239. [123](#)
- Geselowitz, D.B. 1971. An application of electrocardiographic lead theory to impedance plethysmography. *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME*, **18**(1), 38–41. [76](#), [77](#)
- Gibert, D., & Lopes, F. 2010. *Théorie de l'information*. [68](#), [118](#)
- Glover, P. W. J., Hole, M. J., & Pous, J. 2000. A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters*, **180**(3-4), 369–383. [45](#)
- Grandjean, G., Malet, J.-P. Bitri., A., & Méric, O. 2006. Geophysical data fusion by fuzzy logic for imaging the mechanical behaviour of mudslides. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **177**(2), 127–136. [28](#)
- Guérin, R., Munoz, M. L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., & Grellier, S. 2004. Leachate recirculation : moisture content assessment by means of a geophysical technique. *Waste Management*, **24**(8), 785–794. [51](#), [87](#)

- Guidoux, C. 2007. *Developpement et validation d'un systeme de detection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues en terre*. Ph.D. thesis, Université de Grenoble 1. 28
- Günther, T. 2004. *Inversion methods and resolution analysis for the 2d/3d reconstruction of resistivity structures from dc measurements*. Ph.D. thesis, Universität Technologische de Freiberg. 40, 56, 74, 75, 79, 81, 86
- Günther, T., Rücker, C., & Spitzer, K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. *Geophysical Journal International*, **166**(2), 506–517. xii, xiv, 18, 19, 28, 54, 57, 58, 75, 80, 81, 85, 95, 101, 102, 103, 104, 106, 113, 187, 194
- Hadamard, J. 1902. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*, 49–52. 67
- Hansen, C. 1992a. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. *SIAM Review*, **34**(4), 561–580. 82
- Hansen, P. C. 1992b. *Regularization tools - a matlab packager for analysis and solution of discrete ill-posed problems*. Tech. rept. Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Lyngby. 82
- Hayley, K., Bentley, L. R., Gharibi, M., & Nightingale, M. 2007. Low temperature dependence of electrical resistivity : Implications for near surface geophysical monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18402. 46
- Hayley, K., Bentley, L. R., & Pidlisecky, A. 2010. Compensating for temperature variations in time-lapse electrical resistivity difference imaging. *Geophysics*, **75**(4), WA51–WA59. 87
- Hayley, K., Pidlisecky, A., & Bentley, L. R. 2011. Simultaneous time-lapse electrical resistivity inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **75**(2), 401–411. 45, 51, 87
- Hennig, T., Weller, A., & Canh, T. 2005. The effect of dike geometry on different resistivity configurations. *Journal of Applied Geophysics*, **57**(4), 278–292. 29, 51, 66, 120
- Hennig, T., Weller, A., & Möller, M. 2008. Object orientated focussing of geoelectrical multi-electrode measurements. *Journal of Applied Geophysics*, **65**(2), 57–64. 123
- Holcombe, H. T., & Jiracek, G. R. 1984. Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys. *Geophysics*, **49**(4), 439–452. 54
- Ihamouten, A., Chahine, K., Baltazart, V., Villain, G., & Derobert, X. 2011. On variants of the frequency power law for the electromagnetic characterization of hydraulic concrete. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **60**(11), 3658–3668. 29
- Jackson, P. D., Northmore, K. J., Meldrum, P. I., Gunn, D. A., Hallam, J. R., Wambura, J., Wangusi, B., & Ogutu, G. 2002. Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment - a precursor to failure. *NDT & E International*, **35**(2), 107–115. 27, 29
- Jacqueline, D., Fargier, Y., & Palma-Lopes, S. 2010. *DiguExpERT (phase 1) : conception et réalisation de la digue au CER de Rouen (LC/10/ERI/59)*. Tech. rept. IREX. xvi, xxiii, 140, 142, 241, 242

- Johansson, S. 1997. *Seepage monitoring in embankment dams*. Ph.D. thesis, Thèse de Doctorat du Royal Institute of Technology de Stockholm, 62p. [xi](#), [23](#), [24](#), [25](#), [28](#), [29](#), [44](#)
- Karaoulis, M. C., Kim, J.-H., & Tsourlos, P. I. 2011. 4D active time constrained resistivity inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **73**(1), 25–34. [87](#)
- Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press. [45](#), [46](#), [179](#)
- Khan, A. A., Vrabie, V., Mars, J. I., Girard, A., & D’Urso, G. 2010. Automatic monitoring system for singularities detection in dikes by DTS data measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **59**(8), 2167–2175. [28](#)
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., Park, S.-G., & Kim, J. G. 2009. 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. *Journal of Applied Geophysics*, **68**(4), 522–532. [87](#)
- Kofoed, V. 2009. *Using Controlled Source - Audio Frequency Domain Magnetics (CS-AFDM) to track, map and monitor groundwater systems (white paper)*. Willowstick Technologies LLC. [50](#)
- Kohn, R.V., & Vogelius, M. 1987. Determining conductivity by boundary measurements ; interior results. *Comm. in Pure and Applied Mathematics*, **38**(5), 745–777. [69](#)
- Kunetz, G. 1966. *Principle of direct current resistivity prospecting*. Ge exploration monograph series 1. [39](#)
- Kuras, O., Pritchard, J.D., Meldrum, P.I., Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Ogilvy, R.D., & Wealthall, G.P. 2009. Monitoring hydraulic processes with automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT). *Comptes Rendus Geoscience*, **341**(10-11), 868–885. [29](#)
- LaBrecque, D., & Daily, W. 2008. Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition. *Geophysics*, **73**(2), F55–F64. [39](#)
- Lafleur, J., Mlynarek, J., & Rollin, A.L. 1989. Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**(12), 1747–1768. [19](#)
- Lagabrielle, R. 1996. *Cours de prospection électrique à courant continu*. Tech. rept. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. [36](#), [38](#), [41](#), [42](#)
- Lanczos, C. 1997. *Linear differential operators*. Londres & New York. [77](#), [78](#)
- Langer, R. 1933. An inverse problem in differential equations. *American Society of Mathematics Journal*, **29**(2), 814–820. [69](#)
- Large, D.B. 1971. Electric potential near a spherical body in a conducting half-space. *Geophysics*, **36**(4), 763–767. [37](#)
- Lataste, J.-F. 2002. *Évaluation non-destructive de l’état d’endommagement des ouvrages en béton béton armé par mesure de résistivités électriques*. Ph.D. thesis, Bordeaux 1. [186](#)
- Lesur, V., Cuer, M., & Straub, A. 1999a. 2-D and 3-D interpretation of electrical tomography measurements, Part 1 : The forward problem. *Geophysics*, **64**(2), 386–395. [54](#), [57](#)

- Lesur, V., Cuer, M., & Straub, A. 1999b. 2-D and 3-D interpretation of electrical tomography measurements, Part 2 : The inverse problem. *Geophysics*, **64**(2), 396–402. [54](#), [57](#)
- Li, Y., & Spitzer, K. 2002. Three-dimensional DC resistivity forward modelling using finite elements in comparison with finite-difference solutions. *Geophysical Journal International*, **151**(3), 924–934. [57](#)
- Lines, L. R., & Treitel, S. 1984. Tutorial - A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, **32**(2), 159–186. [73](#), [74](#)
- Lino, M., Mériaux, P., & Royet, P. 2000. *Méthodologie de diagnostic des digues appliquées aux levées de la Loire moyenne*. Tech. rept. Cemagref Éditions, Paris. [18](#), [19](#)
- Loke, M. H. 2011. *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. [17](#), [18](#), [19](#), [28](#), [51](#), [54](#), [60](#), [70](#), [76](#), [83](#), [84](#), [87](#), [101](#), [102](#), [106](#), [113](#), [116](#), [123](#), [152](#), [187](#), [196](#), [238](#)
- Loke, M. H., & Barker, R. D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections. *Geophysics*, **60**(6), 1682–1690. [76](#)
- Loke, M. H., & Barker, R. D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**(1), 131–152. [82](#), [96](#)
- Loke, M. H., & Dahlin, T. 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **49**(3), 149–162. [75](#)
- Loke, M. H., Wilkinson, P. B., & Chambers, J. E. 2010. Parallel computation of optimized arrays for 2-D electrical imaging surveys. *Geophysical Journal International*, **183**(3), 1302–1315. [125](#), [126](#), [128](#), [129](#)
- Lowry, T., Allen, M. B., & Shive, P. N. 1989. Singularity removal : a refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, **54**(6), 766–774. [38](#), [53](#), [57](#)
- Mainali, G. 2006. *Monitoring of tailings dams with geophysical methods*. M.Phil. thesis, Lulea University of Technology, Sweden. [29](#)
- Mallet, C., & Bretar, F. 2009. Full-waveform topographic lidar : state-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**(1), 1–16. [28](#)
- Mallet, C., Bretar, F., Roux, M., Soergel, U., & Heipke, C. 2011. Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **In press**, corrected proof. [28](#)
- Marescot, L. 2004. *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur les structures 3D complexes par la méthode des éléments finis*. Ph.D. thesis, Université de Lausanne. [xxiii](#), [56](#), [238](#)
- Marescot, L., Loke, M. H., Chapellier, D., Delaloye, R., Lambiel, C., & Reynard, E. 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surface Geophysics*, **1**(2), 55–67. [xiv](#), [97](#)
- Marescot, L., Rigobert, S., Palma Lopes, S., Lagabrielle, R., & Chapellier, D. 2006. A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of Applied Geophysics*, **60**(1), 55–67. [39](#), [51](#), [239](#)

- Marescot, L., Monnet, R., & Chapellier, D. 2008a. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology*, **98**(1-2), 18–28. [97](#), [101](#)
- Marescot, L., Palma Lopes, S., Rigobert, S., & Green, A. G. 2008b. Nonlinear inversion of geoelectric data acquired across 3D objects using a finite-element approach. *Geophysics*, **73**(3), F121–F133. [75](#), [105](#)
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least square estimation of non-linear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**(2), 431–441. [81](#)
- Maurer, H., & Boerner, D. E. 1998. Optimized and robust experimental design : a non-linear application to EM sounding. *Geophysical Journal International*, **132**(2), 458–468. [120](#), [122](#)
- Maurer, H., & Friedel, S. 2006. Outer-space sensitivities in geoelectrical tomography. *Geophysics*, **71**(3), G93–G96. [91](#)
- Maurer, H., Curtis, A., & Boerner, D. E. 2010. Recent advances in optimized geophysical survey design. *Geophysics*, **75**(5), 75A177–75A194. [120](#), [123](#)
- McCarter, W. J. M. 1984. The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnic*, **36**(2), 263–267. [44](#)
- McGillivray, P. R., & Oldenburg, D. W. 1990. Methods for calculating fréchet derivatives and sensitivities for the nonlinear inverse problem - A comparative study. *Geophysical Prospecting*, **38**(5), 499–524. [75](#), [76](#), [77](#)
- Menke, W. 1984. *Geophysical data analysis : discrete inverse theory*. [xiii](#), [72](#), [99](#), [123](#)
- Mériaux, P., Royet, P., & Folton, C. 2004. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Guide pratique à l'usage des gestionnaires*. Paris : Cemagref Éditions. [10](#)
- Mériaux, P., Venntier, M., Aigouy, S., Hoonakker, M., & Zylberblat, M. 2006. Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. In : *ICOLD, 22nd Conference on Large Dams, Barcelone, 551-567*. [28](#)
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., & Tabbagh, A. 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, **39**(1-2), 1138. [43](#)
- MISE. 2009. *Les barrages et les digues de protection*. Tech. rept. Mission Inter Services de l'Eau de lorraine (MISE). [xxv](#), [9](#)
- Monnet, J. 2011. The Geomechameter, a new in-situ apparatus. In : *Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion in embankment dams and their foundations (IEWG-ICOLD), April 26-29, Brno, Czech Republic*. [19](#)
- Mufti, I. R. 1977. Practical approach to finite-difference resistivity modeling. *Geophysics*, **42**(7), 1527–1527. [53](#)
- Multiphysics, Comsol. 2008. *AC/DC module, User's Guide*. [56](#)

- NF P 94-061-1, Norme Française AFNOR. 1996 (octobre). *Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Partie 1 : Méthode au gammadensimètre à pointe (à transmission directe)*. 13p. [140](#)
- NF P 94-062, Norme Française AFNOR. 1997 (aout). *Sols : Reconnaissance et Essais - Mesure de la masse volumique en place - Diagraphie à la double sonde gamma*. 11p. [144](#)
- NF X 30-418, Norme Française AFNOR. 1998 (octobre). *Déchets : Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués. Infiltromètres à double anneau, de type ouvert*. 42p. [140](#)
- Okabe, M. 1981. Boundary element method for the arbitrary inhomogeneities problem in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*, **29**(1), 39–59. [54](#)
- Oldenborger, G. A., & Routh, P. S. 2009. The point-spread function measure of resolution for the 3-D electrical resistivity experiment. *Geophysical Journal International*, **176**(2), 405–414. [100](#)
- Oldenburg, D. W., & Li, Y. G. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, **64**(2), 403–416. [97](#)
- Palacky, G. J. 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. *Pages 53–129 of : Nabighian, M.N. (ed), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Theory*, vol. 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla. [xii](#), [43](#), [183](#)
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., & Shirke, J. M. 2001. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*, **59**(3-4), 281–295. [29](#)
- Park, S. K., & Van, G. P. 1991. Inversion of pole-pole data for 3-d resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, **56**(7), 951–960. [75](#), [76](#), [77](#), [79](#)
- Perez, M. *La maintenance des digues et canaux EDF*, 9p. [6](#)
- Philipponnat, G., & Hubert, B. 1997. *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles. [19](#)
- Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H., & Sill, W. R. 1981. An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in 3 Dimensions. *Geophysics*, **46**(7), 1009–1024. [54](#)
- Queralt, P., Pous, J., & Marcuello, A. 1991. 2-D resistivity modeling; An approach to arrays parallel to the strike direction. *Geophysics*, **56**(7), 941–950. [54](#)
- Ramirez, A., Daily, W., LaBrecque, K., Owen, E., & Chesnut, D. 1993. Monitoring an underground steam injection process using electrical resistance tomography. *Water Resources Research*, **29**(1), 73–87. [51](#)
- Ren, Z., & Tang, J. 2010. 3D direct current resistivity modeling with unstructured mesh by adaptive finite-element method. *Geophysics*, **75**(1), H7–H17. [56](#)
- Revil, A., & Glover, P. W. J. 1998. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays. *Geophysical Research Letter*, **25**(5), 691–694. [43](#), [45](#)

- Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., & Prather, R. J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, **40**(5), 651–655. [44](#)
- Rodi, W., & Mackie, R. L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, **66**(1), 174–187. [81](#)
- Royet, P. 2006. *La surveillance et l'entretien des petits barrages*. Cemagref. [7](#), [8](#), [15](#), [18](#)
- Rucker, C., Gunther, T., & Spitzer, K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - I. Modelling. *Geophysical Journal International*, **166**(2), 495–505. [54](#), [57](#), [102](#)
- Sasaki, Y. 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, **59**(12), 1839–1848. [54](#)
- Saunders, J. H., Herwanger, J. V., Pain, C. C., Worthington, M. H., & De Oliveira, C. R. E. 2005. Constrained resistivity inversion using seismic data. *Geophysical Journal International*, **160**(3), 785–796. [28](#)
- SETRA-LCPC. 1992. *Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide Terrassement Routier*. Tech. rept. Guide Technique SETRA-LCPC, 2 fascicules, 98p et 102p. [140](#)
- Shan, J., & Toth, C.K. 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. CRC Press. [28](#)
- Sheffer, M. R., & Oldenburg, D. W. 2007. Three-dimensional modelling of streaming potential. *Geophysical Journal International*, **169**(3), 839–848. [28](#)
- Silvester, P. P., & Ferrari, R. L. 1990. *Finite elements for electrical engineers, 2nd. ed.* Cambridge University Press. [54](#)
- Singha, K., & Moysey, S. 2006. Accounting for spatially variable resolution in electrical resistivity tomography through field-scale rock-physics relations. *Geophysics*, **71**(4), A25–A28. *Geophysics*. [118](#)
- Singha, K., Li, L., Day-Lewis, F. D., & Regberg, A. B. 2011. Quantifying solute transport processes : are chemically “conservative” tracers electrically conservative? *Geophysics*, **76**(1), F53–F63. [118](#)
- Sjödahl, P., Dahlin, T., & Zhou, B. 2006. 2.5D resistivity modeling of embankment dams to assess influence from geometry and material properties. *Geophysics*, **71**(3), G107–G114. [xii](#), [29](#), [47](#), [51](#), [66](#), [158](#)
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H. 2008. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, **65**(3-4), 155–164. [27](#), [29](#), [120](#)
- Sjödahl, P., Dahlin, T., & Johansson, S. 2010. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Rassvatn embankment dam test facility in Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **69**(4), 643–658. [27](#), [29](#), [87](#)

- Smith, N., & Vozoff, K. 1984. Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **22**(1), 21–28. [77](#)
- Snieder, R., Hubbard, S., Haney, M., Bawden, G., Hatchell, P., & Revil, A. 2007. Advanced non-invasive geophysical monitoring techniques. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **35**(1), 653–683. [20](#)
- Spitzer, K. 1995. A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate-gradient methods. *Geophysical Journal International*, **123**(3), 903–914. [53](#)
- Stefanescu, S., Schlumberger, C., & Schlumberger, M. 1930. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes. *Journal de Physique et du Radium*, **1**(4), 132–140. [37](#), [39](#), [47](#)
- Stummer, P., Maurer, H., Horstmeyer, H., & Green, A. G. 2002. Optimization of DC resistivity data acquisition : real-time experimental design and a new multielectrode system. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, **40**(12), 2727–2735. [123](#)
- Stummer, P., Maurer, H., & Green, A. G. 2004. Experimental design : electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, **69**(1), 120–139. [122](#), [123](#), [124](#), [125](#), [128](#), [129](#), [130](#)
- Sylvester, J., & Uhlmann, G. 1987. A global uniqueness theorem for an inverse boundary value problem. *Annals of Mathematics*, **125**(1), 153–169. [69](#)
- Szalai, S., & Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, **56**(2), 159–175. [120](#), [121](#), [237](#)
- Szalai, S., & Szarka, L. 2011. Expanding the possibilities of two-dimensional multielectrode systems, with consideration to earlier geoelectric arrays. *Journal of Applied Geophysics*, **75**(1), 1–8. [120](#)
- Tarantola, A. 2005. *Inverse problem theory : methods for model parameter estimation*. Second Edition. [77](#), [120](#), [201](#)
- Tarantola, A., & Valette, B. 1982a. Inverse problem = Quest for information. *Journal of Geophysics*, **50**, 159–170. [68](#), [118](#)
- Tarantola, A., & Valette, B. 1982b. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Review of Geophysics and Space Physics*, **20**(2), 219–232. [73](#)
- Telford, W. M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. [43](#)
- Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. 1976. *Méthodes de résolution des problèmes mal posés*. Moscou. [35](#), [81](#), [193](#)
- Tong, L., & Yang, C. 1990. Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, **55**(3), 354–361. [17](#), [120](#), [201](#)
- Tsourlos, P. I., Szymanski, J. E., & Tsokas, G. N. 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, **64**(5), 1357–1363. [120](#)

- Van Nostrand, R. G. 1953. Limitations on resistivity methods as inferred from the buried sphere problem. *Geophysics*, **18**(2), 423–433. [37](#)
- Vogel, C. R. 2002. Computational methods for inverse problems. *Frontiers in applied mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics*. [83](#)
- Wait, J. R. 1982. *Geo-electromagnetism*. London. [37](#)
- Ward, S. H. 1990. *Electrical resistivity techniques for subsurface investigations*. [43](#), [45](#)
- Waxman, M. H., & Smits, L. J. M. 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **8**(2), 107–122. [43](#)
- Wéber, Z. 2001. Optimizing model parameterization in 2D linearized seismic traveltime tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **124**, 33–43. [129](#)
- Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Chambers, J. E., & Kuras, O. and Ogilvy, R. D. 2006. Improved strategies for the automatic selection of optimized sets of electrical resistivity tomography measurement configurations. *Geophysical Journal International*, **167**(3), 1119–1126. [123](#), [125](#), [126](#), [128](#), [129](#)
- Xu, B., & Noel, M. 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, **41**(6), 791–801. [120](#), [121](#), [122](#)
- Xu, S.-Z., Duan, B.-C., & Zhang, D.-H. 2000. Selection of the wavenumbers k using an optimization method for the inverse Fourier transform in 2.5D electrical modelling. *Geophysical Prospecting*, **48**(5), 789–796. [50](#)
- Zantout, S. 2005. *Application of near surface seismic methods to earthen embankment investigations*. M.Phil. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada. [28](#)
- Zhang, J., Mackie, R. L., & Madden, T. R. 1995. 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. *Geophysics*, **60**(5), 1313–1325. [75](#)
- Zhao, S. K., & Yedlin, M. J. 1996. Some refinements on the finite-difference method for 3-D dc resistivity modeling. *Geophysics*, **61**(5), 1301–1307. [57](#)
- Zhou, B., & Dahlin, T. 2003. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, **1**(3), 105–117. [40](#), [41](#), [120](#)
- Zhou, Q. Y. F. 2007. A sensitivity analysis of DC resistivity prospecting on finite, homogeneous blocks and columns. *Geophysics*, **72**(6), F237–F247. [81](#)

Annexe A

Les protocoles d'acquisition en IRE

Afin de réaliser une mesure géo-électrique, quatre électrodes sont au minimum utilisées (cf. Chapitre 2). Deux électrodes (notées A et B) servent à générer la diffusion d'un champ électrique tandis que deux autres électrodes (notées M et N) sont nécessaires à la mesure de différence de potentiel. Dans le but de reconstruire la distribution spatiale de résistivité électrique du sous-sol, un certain nombre de mesures distinctes doivent être réalisées en faisant varier la position relative des électrodes (cf. Chapitre 2). En effet, la sensibilité d'une mesure géo-électrique à la distribution de résistivité électrique du sous-sol dépend de la position des électrodes formant la configuration d'électrodes. À cet effet, les figures 2.25 et 2.26 présentent deux matrices de sensibilité illustrant la différence entre deux configurations différentes d'électrodes (inversion des électrodes B et M). Ces multiples configurations d'électrodes peuvent être séparées en trois catégories différentes liées au nombre d'électrodes placées à une distance infinie de la zone d'investigation (figure A.1).

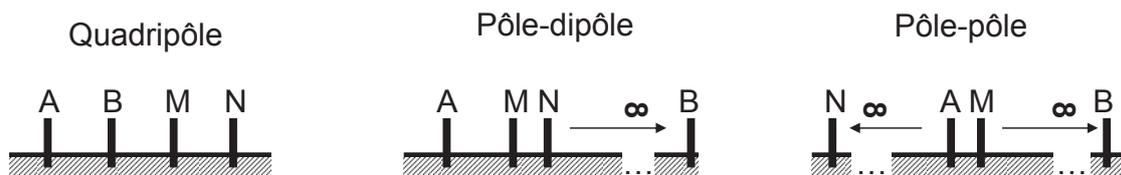


FIGURE A.1 – Schématisation de trois « familles » de dispositifs classés suivant le nombre d'électrodes positionnées à une distance « infini » de la zone d'investigation.

Définition : un protocole d'acquisition d'IRE (aussi appelé séquence d'acquisition) consiste à réaliser un certain nombre de mesures en interrogeant des quadripôles distincts parmi une série d'électrodes pré-installées sur le milieu à investiguer. Cette succession de quadriôples peut s'opérer en déplaçant les électrodes latéralement et/ou en augmentant certaines des distances inter-électrodes (figure A.2). La séquence de base répétée peut, elle aussi, être composée d'une somme de quadripôles (cas du gradient multiple).

Il existe un nombre très élevé de configurations d'électrodes [Szalai & Szarka, 2008] donnant lieu à autant de protocoles différents et possédant chacun des avantages et des limitations. Lorsque les mesures sont réalisées sur une série d'électrodes alignées et équidistantes, il est possible de distinguer plusieurs protocoles « simples » : Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle (figure A.3). Chacun de ces protocoles possède des avantages et des inconvénients en fonction du milieu,

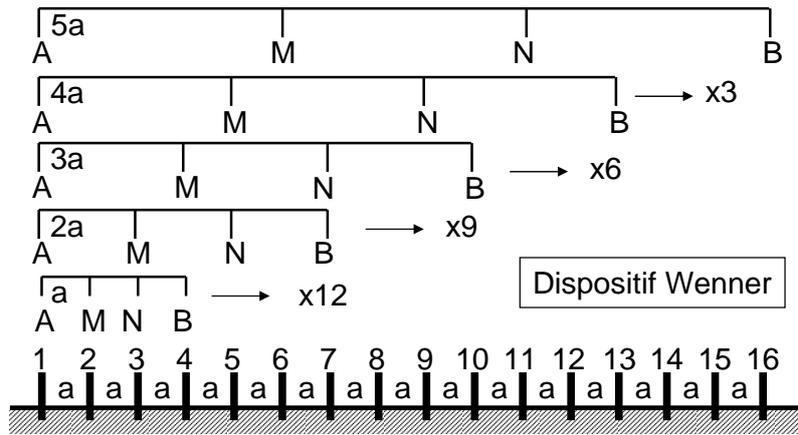


FIGURE A.2 – Schématisation du processus de réalisation d'un protocole Wenner à partir de 16 électrodes équidistantes avec a la plus faible distance entre les électrodes. La réalisation de tous les quadripôles pour chaque valeur d'espacement (a , $2a$, $3a$, $4a$, $5a$) implique $(13+10+7+4+1)$ 35 mesures différentes. Modifié d'après [Marescot, 2004].

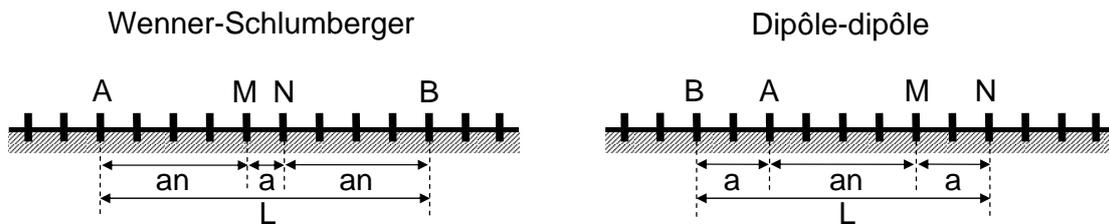


FIGURE A.3 – Schématisation de deux configurations d'électrodes appelées Wenner Schlumberger et Dipôle-dipôle avec respectivement a et an la plus faible et la plus forte distance entre les électrodes voisines. La lettre L symbolise la distance maximale entre les électrodes sélectionnées.

de l'objet de la recherche et du bruit sur la mesure [Dahlin & Zhou, 2004, 2006]. En effet, à titre indicatif, un dipôle-dipôle possède une profondeur d'investigation supérieure (pour une même couverture d'électrodes) à un protocole Wenner même si le premier est beaucoup plus sensible au bruit sur la mesure. De plus, un protocole dipôle-dipôle est indiqué pour la détection de structures verticales (failles) alors que le protocole Wenner est considéré supérieur pour la détection de structures horizontales (milieu tabulaire) [Edwards, 1977; Loke, 2011].

Annexe B

La technique de normalisation

L'action permettant de transformer une mesure de résistance de transfert $R(\Omega)$ en une résistivité apparente peut être appelée technique de normalisation. En effet, en fonction de la géométrie du milieu et du quadripôle d'acquisition, la mesure est multipliée par un facteur géométrique « k » permettant de normaliser l'effet de cette géométrie. Lorsque le milieu est un demi-espace homogène et isotrope, la normalisation est réalisée à partir d'un coefficient géométrique « simple » analytique. Cependant, lorsque le milieu présente une topographie ou une cavité [Marescot *et al.*, 2006] dont la géométrie est connue, aucune fonction analytique évidente ne peut être avancée pour calculer le facteur géométrique. En conséquence, des méthodes de modélisation numérique sont utilisées pour calculer la résistance de transfert R_K simulée à partir d'un milieu homogène et isotrope de résistivité $K(\Omega.m)$ afin d'obtenir le facteur géométrique :

$$k = \frac{K}{R_K} \quad (\text{B.1})$$

Ensuite, ce facteur géométrique est utilisé afin de calculer la valeur de résistivité apparente à partir de l'expression 2.19 (Chapitre 2). Ce calcul de la résistance de transfert « théorique implique de reproduire la géométrie du milieu ausculté et la géométrie du dispositif d'acquisition avec une certaine précision. La figure B.1 schématise un modèle utilisé afin d'illustrer la technique de normalisation.

Principe de normalisation : La résolution du problème direct permettant de quantifier l'effet d'un milieu « perturbateur » sur une mesure (Cf. Chapitre 2.2) une normalisation doit permettre de supprimer cet effet.

Cependant, afin que cette normalisation soit « pertinente », il est nécessaire de connaître le contraste de résistivité présent entre le milieu ausculté et le milieu « perturbateur ». Or, l'air composant le second « demi-espace » peut être considéré comme un milieu possédant une géométrie et une distribution de résistivité. Le contraste entre un milieu même hétérogène et l'air peut être considéré comme nul car l'air est un isolant presque parfait. Ainsi, quelle que soit la distribution de résistivité du milieu (dans la gamme de variation des géo-matériaux) le principe de normalisation reste valable.

La figure B.2 présente le cas d'une normalisation de l'effet de la topographie et du réservoir en supposant que la résistivité du réservoir est 25 fois supérieure à la résistivité du milieu investigué. Ainsi, l'inverse de la mesure de résistance de transfert (figure B.2) peut être utilisée

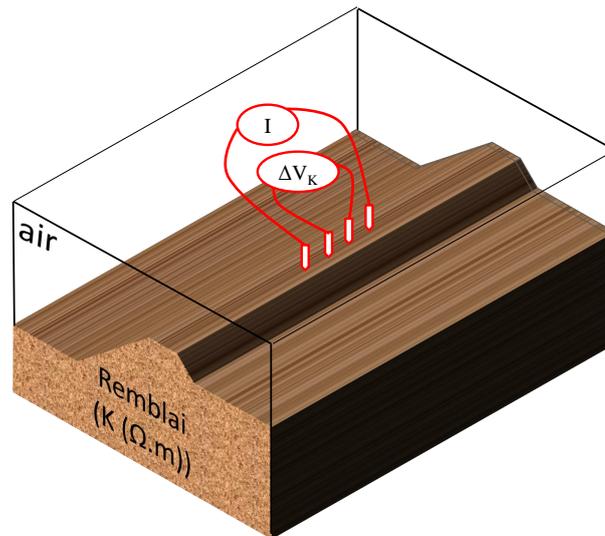


FIGURE B.1 – Schéma d'un modèle numérique utilisé pour calculer la résistance de transfert R_K simulée à partir d'un quadripôle sur un ouvrage de type remblai homogène de résistivité K .

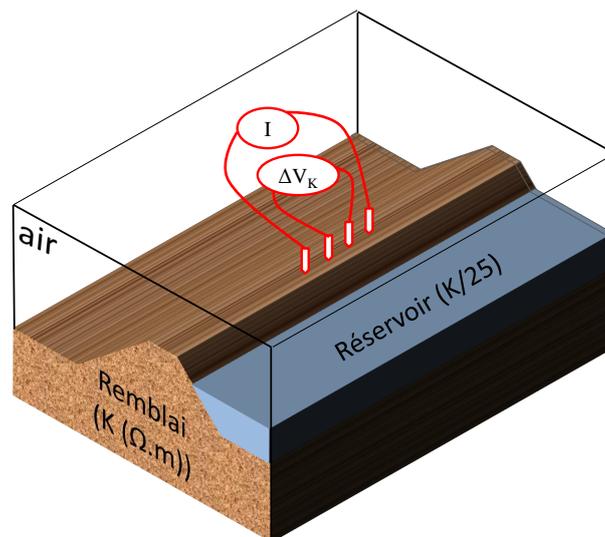


FIGURE B.2 – Schéma d'un modèle numérique utilisé pour le calcul de la résistance de transfert simulée à partir d'un quadripôle sur un ouvrage de type digue homogène de résistivité K avec un réservoir d'eau placé parallèlement à la digue de résistivité 25 fois moins élevée que la résistivité du remblai.

afin de calculer des valeurs de résistivités apparentes corrigées de l'effet de la topographie et du réservoir d'eau.

Annexe C

DiguExpERT

C.1 Étude préalable au CER de Rouen

Afin de déterminer la mise en œuvre permettant d'atteindre une perméabilité hydraulique cible d'un matériau, plusieurs études ont été réalisées au CER de Rouen. Cette exigence vis-à-vis de la perméabilité provient de notre besoin de borner les expérimentations sur une durée compatible avec le travail de thèse. La figure C.1 schématise les passes de compactage de différentes planches (sable identique à celui utilisé pour la digue expérimentale) par un chargeur à chenille (flèches rouges) et d'un compacteur à double cylindre (flèche bleue). Plusieurs mesures positionnées, sur la figure C.1, ont ensuite été réalisées afin de déterminer la teneur en eau et la perméabilité des différentes mises en œuvre. Les zones mortes permettent de réaliser des aller-retours des engins afin de remplir les modalités de compactage désirées, aucune mesure de caractérisation n'est réalisée sur ces zones.

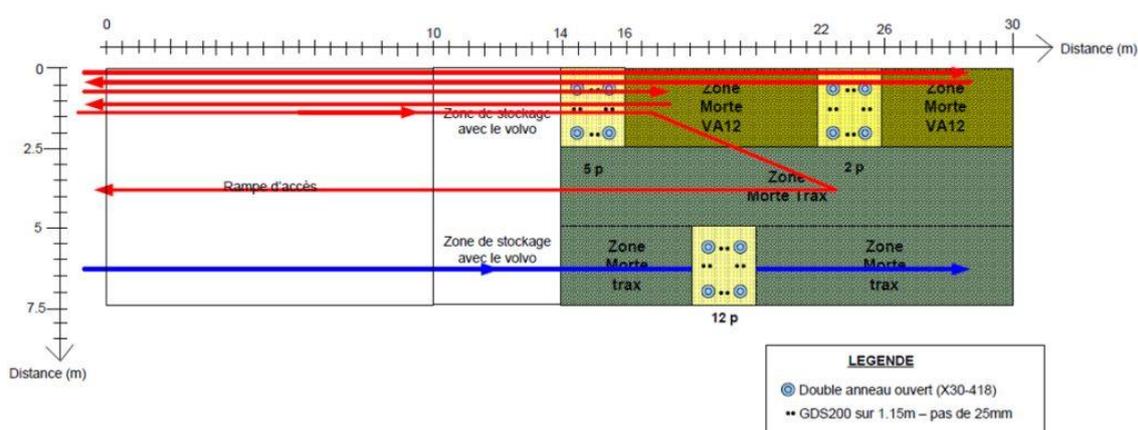


FIGURE C.1 – Schéma d'expérimentation sur planches réalisées au CER de Rouen. Les flèches rouges et bleue représentent respectivement les allers et retours du chargeur à chenille et du compacteur double cylindre. Trois portions sont étudiées et confrontées chacune à une modalité différente de compactage. La légende présente les figurés utilisés pour les mesures d'infiltrométrie et de densité. D'après [Jacqueline et al., 2010].

C.2 Plan de la DigueExpert avec position des mesures lors de la mise en œuvre

Afin de s'assurer du respect du cahier des charges lors de la mise en œuvre du matériau, plusieurs mesures sont réalisées pour contrôler les paramètres d'état du sol en place. À cet effet, la figure C.2 présente les positions des différentes mesures réalisées pour le suivi de la mise en œuvre. Ainsi, après la mise en œuvre de chaque couche, des mesures de nivellement, de GPV 30, de teneur en eau sont réalisées (figure C.2).

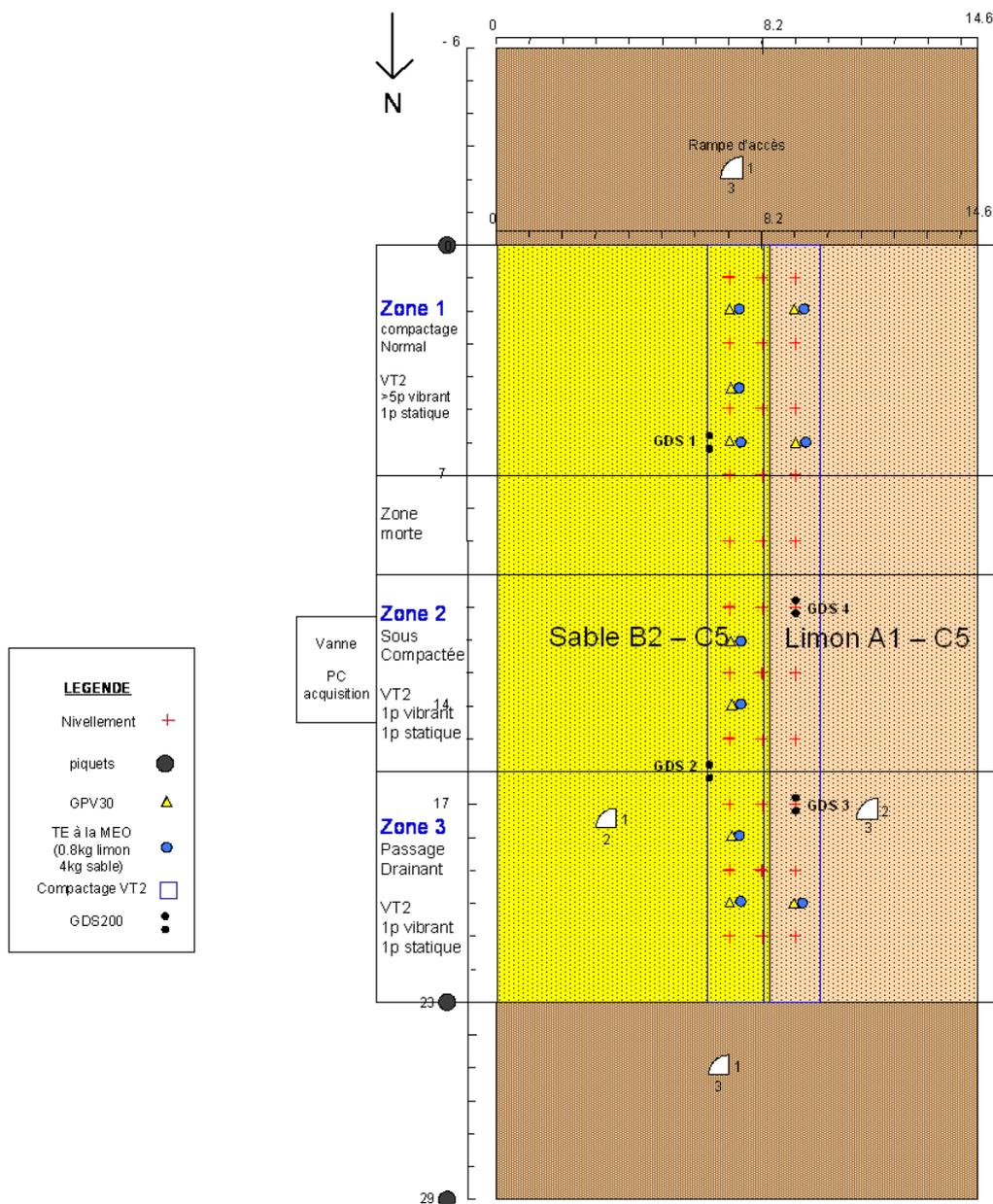


FIGURE C.2 – Schéma de la digue expérimentale vue en plan avec position des forages GDS200, des points de prélèvements, des positions de nivellement et des mesures GPV 30. D'après [Jacqueline et al., 2010].

Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la Reconnaissance et la Surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre

Résumé :

En France, un important parc d'ouvrages hydrauliques en terre dédié à la production hydroélectrique, à la navigation, à l'alimentation en eau des villes et à la régulation des cours d'eau génère des enjeux économiques et sécuritaires conséquents. Pour les ouvrages de protection contre les crues, il n'y a pratiquement pas d'année sans rupture et plus de 70 incidents ont été recensés en 25 ans par le Comité Français des Grands Barrages.

L'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE) est un outil d'imagerie très sensible aux paramètres d'état d'un sol faisant partie des méthodes pertinentes pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Cependant, dans l'utilisation conventionnelle de l'IRE, le manque d'information provenant des mesures, la mauvaise prise en charge de ces mesures et de l'information *a priori* entraînent la formation d'artéfacts dans les résultats d'imagerie. Dans ce sens, de nouvelles approches d'acquisition/inversion sont développées, entre les approches classiques 2D et 3D. Ces nouvelles stratégies dont le but est de tirer le meilleur compromis entre coût d'acquisition et fiabilité du modèle final sont le fruit du développement d'un problème direct par éléments finis et d'un algorithme d'inversion 3D de type Gauss-Newton. Enfin, des auscultations sur ouvrage semi-contrôlé et sur ouvrage réel ont été réalisées afin de confronter ces développements à des conditions d'auscultation plus réalistes. Les résultats révèlent que la qualité du résultat et la capacité d'interprétation peuvent être considérablement améliorées par l'utilisation de telles stratégies d'auscultation.

Mots-clés : Géophysique appliquée, Imagerie de Résistivité Électrique, Ouvrage Hydraulique en Terre, Auscultation, Fiabilité, Optimisation.

Development of the DC-Electrical Resistivity Imaging method for the assessment and monitoring of Hydraulic Earth Structures

Abstract :

In France, a large stock of hydraulic earth structures dedicated to producing hydroelectricity, to navigation and to water supplying generates substantial economic and security challenges. Regarding flood protection structures, there is no year without a failure and more than 70 incidents were recorded in 25 years by the French Committee on Large Dams.

The DC-Electrical Resistivity Imaging (ERI) method is very sensitive to soil state parameters and is widely accepted as one of the relevant geophysical methods for the survey and the monitoring of hydraulic earth structures. However, using ERI in a conventional manner is likely to yield image artifacts. This is due to the lack of information in the measured data and the fact that the full complexity of the problem and available *a priori* information are usually not accounted for. Therefore, new approaches of data acquisition and inversion have been developed. This development aims at filling the gap between more classical 2D and purely 3D approaches, by optimising a compromise between acquisition cost and model reliability. The research work has implied developing a finite element approach for the forward problem and a Gauss-Newton algorithm for the 3D inverse problem. Finally, experimental campaigns were conducted on both a semi-controlled embankment and a real hydraulic embankment in order to test and validate the developments in more realistic conditions. Outcomes indicate that interpretation capability and quality can be significantly enhanced by using these news approaches.

Keywords : DC-Electrical Resistivity Imaging, Applied Geophysics, Hydraulic Earth Structures, Condition Assessment, Reliability, Optimisation.

Discipline : Sciences de l'Ingénieur

