



HAL
open science

Optimisation de l'Imagerie de Résistivité Electrique appliquée à l'auscultation des ouvrages et des sites naturels

Yannick Fargier

► To cite this version:

Yannick Fargier. Optimisation de l'Imagerie de Résistivité Electrique appliquée à l'auscultation des ouvrages et des sites naturels. Planète et Univers [physics]. Université Claude Bernard Lyon 1, 2020. <tel-04386043>

HAL Id: tel-04386043

<https://hal.science/tel-04386043v1>

Submitted on 19 Jan 2024

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.



HAL Authorization



N°d'ordre NNT : xxx

**THESE d'HABILITATION A DIRIGER DES
RECHERCHES DE L'UNIVERSITE DE LYON**

opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

**Ecole Doctorale N° accréditation
MEGA**

Spécialité : Génie Civil

Discipline : Géosciences

Soutenue publiquement le 04/06/2020, par :

Yannick FARGIER

**Optimisation de l'Imagerie de Résistivité
Electrique appliquée à l'auscultation des
ouvrages et des sites naturels**

Devant le jury composé de :

Jean-François GIRARD	Professeur des Universités	EOST, Strasbourg	Rapporteur
Géraldine VILLAIN	IDTPE, HDR	Univ. Eiffel, Nantes	Rapporteuse
Anne-Marie DUVAL	Directrice de Recherche	Univ. Cote d'Azur	Rapporteuse
Pascal ALLEMAND	Professeur des Universités	UCBL, ENS, Lyon	Examinateur
Farimah MASROURI	Professeur des Universités	ENSG, Nancy	Examinatrice
Amine IHAMOUTEN	IDTPE, HDR	CEREMA, Angers	Examinateur

Table des matières

Table des sigles et acronymes	xiii
Table des notations scientifiques	xv
Introduction	1
Contexte, enjeux et motivations	1
Démarche de recherche	1
Structure du manuscrit	2
Partie I : Curriculum Vitæ & Recueil des travaux	3
1 Curriculum Vitæ	5
1.1 État civil	6
1.2 Diplômes et titres universitaires	6
1.3 Langues	7
1.4 Formation continue	7
1.5 Affiliations (Groupes de travail)	7
1.6 Fonctions exercées	8
1.7 Contrats	10
1.7.1 Contrats de recherche académiques	10
1.7.2 Contrats de recherche avec partenaires industriels	11
1.7.3 Études et Expertises	12
1.8 Enseignements	12
1.9 Encadrement	13
1.9.1 Encadrement en doctorat	13

1.9.2	Encadrement en post-doctorat	15
1.9.3	Analyse des encadrements post-master	16
1.10	Diffusion de la culture scientifique	16
1.11	Contribution à l'élaboration des politiques publiques	17
1.12	Développement de codes et logiciels	18
1.13	Développement de matériels	19
2	Production scientifique	21
2.1	Revue internationale à comité de lecture [ACL]	23
2.2	Prix - Distinctions [Prix]	25
2.3	Conférence invité [INV]	26
2.4	Conférences internationales avec actes [ACTI]	26
2.5	Conférences nationales avec ou sans actes [ACTN]	29
	Partie II : Synthèse des travaux & Perspectives	33
3	Synthèse des travaux de recherche	35
3.1	<i>IRE</i> : Instrumentation et mesure <i>in situ</i>	37
3.1.1	Mesure	37
3.1.2	Résistivimètre	38
3.1.3	Développement d'une sonde de résistivité	39
3.1.4	Résultats essentiels	43
3.2	<i>IRE</i> : Modélisation numérique	44
3.2.1	Théorie	44
3.2.2	Géométrie & photogrammétrie	46
3.2.3	Rugosité & Photogrammétrie	48
3.2.4	Rugosité 3D & hétérogénéité des milieux	52
3.2.5	Résultats essentiels	53

3.3	<i>IRE</i> : Problème Inverse	54
3.3.1	Théorie	54
3.3.2	Topographie et Inversion	56
3.3.3	Stratégies d'inversion intermédiaires	58
3.3.4	Optimisation de l'acquisition	64
3.3.5	Résultats essentiels	67
3.4	<i>IRE</i> : Post-traitement	68
3.4.1	Complémentarité des méthodes d'auscultation pour l'évaluation des <i>SNO</i>	68
3.4.2	Fusion d'informations	74
3.4.3	Résultats essentiels	77
4	Discussion et perspectives	81
4.1	Discussion	81
4.1.1	Verrous thématiques	81
4.1.2	Verrous techniques & technologiques	82
4.1.3	Verrous méthodologiques	83
4.2	Évolution scientifique & thématique	83
4.3	Perspectives	84
4.3.1	Perspectives à court terme	84
4.3.2	Perspectives à moyen terme et long terme	86
	Conclusion Générale	89
	Bibliographie	95
	A Fauchard <i>et al.</i>, 2013	97
	B Fargier <i>et al.</i>, 2014	99
	C Fares <i>et al.</i>, 2016	101

D Bièvre <i>et al.</i> , 2017	103
E Fargier <i>et al.</i> , 2017	105
F Jodry <i>et al.</i> , 2017	107
G Dezert <i>et al.</i> , 2018	109
H Fargier <i>et al.</i> , 2018	111
I Fauchard <i>et al.</i> , 2018	113
J Badr <i>et al.</i> , 2019	115
K Dezert <i>et al.</i> , 2019	117
L Portal <i>et al.</i> , 2019	119

Table des figures

1.1 Synthèse chronologique des encadrements en doctorat et post-doctorat par thématique de recherche.	16
3.1 Organigramme des objets d'études abordés et des thématiques empruntées.	36
3.2 a) Principe de la mesure de résistance à quatre points. b) Signal injecté par les électrodes de courant, DDP mesurée avec effet capacitif c) sans bruit et d) avec bruit et effet <i>PS</i> . Modifié d'après Clément et al. (2020).	37
3.3 Détails de OhmPi. a) Schéma électronique global de la mesure 4-points. b) Photographie de OhmPi placé dans une armoire électrique. Modifié d'après Clément et al. (2020)	38
3.4 Comparaison de OhmPi avec un résistivimètre référence. a) Résistances de transfert mesurées par OhmPi et Syscal Pro. b) Résultats d'imagerie par le logiciel BERT pour les deux jeux de données. Modifié d'après Clément et al. (2020)	39
3.5 Schéma des installations en surface et en profondeur du centre d'enfouissement CI-GEO.	40
3.6 Capteurs de résistivités en <i>CI</i> . a) Schéma et b) photographie du capteur «échelle» en <i>CI</i> . c) Schéma et d) photographie du capteur «raquette» en <i>CI</i> . Modifié d'après Badr et al. (2019).	40
3.7 Photographie prise après fendage de l'éprouvette de béton avec a) la vue d'ensemble et b) deux zooms sur l'empreinte sur les deux faces fendues. Modifié d'après Badr et al. (2019).	41
3.8 Validation du dispositif échelle a) dans une solution saline b) par séchage d'une éprouvette en béton. Modifié d'après Badr et al. (2019)	42
3.9 Résultat de modélisation de la sensibilité d'un quadripole en mode (a) transmission et b) Wenner. c) Schéma du mode transmission et d) schéma électrique équivalent.	42
3.10 a) Schéma du modèle numérique et ses conditions de frontières. b) Exemple de modèle 3D maillé.	45
3.11 Erreur de modélisation du potentiel en % pour trois types de conditions de frontières a) Dirichlet b) Bettes et c) une nouvelle formulation. Modifié d'après Taoum et al., 2020b.	46
3.12 Procédure de maillage d'un milieu présentant une forte topographie à partir d'un modèle photogrammétrique (ou Lidar). Modifié d'après Taoum et al., 2020b	47

3.13 Résultats a) photogrammétrique des Vaches Noires (Houlgate, 14), b) de modélisation numérique pour une électrode d'injection vue en perspective. c) Effet de la topographie sur la mesure (%). Modifié d'après Taoum et al., 2020b.	47
3.14 a) Schéma du modèle numérique utilisé pour réaliser l'étude paramétrique. b) Résultat de l'étude paramétrique avec en haut le schéma de position du quadripole transversalement sur la digue de canal. Modifié d'après Fargier et al. (2014)	48
3.15 Comportement de trois modèles présentant à la fois une rugosité importante ($H=0.2$) et une faible rugosité ($H=1$). D'après Fargier et al. (2018).	49
3.16 Méthodologie de modélisation de l'effet de la rugosité de surface sur la mesure électrique. a) Principe du modèle axi-symétrique avec conditions de frontières, b) premier niveau de maillage, c) second niveau de maillage (adaptatif) et d) résultat de modélisation. Pour b), c) et d) deux niveaux de grossissement sont proposés. D'après Fargier et al. (2018).	50
3.17 a) Distribution statistique des paramètres de rugosité des 1500 modèles simulés. b) Erreur de mesure liant la rugosité et le nombre de points de maillage simulant la rugosité réelle. Modifié d'après Fargier et al. (2018).	50
3.18 Scanner photogrammétrique du Cerema, a) 1 ^{er} prototype du scanner, b) cliché de l'éprouvette sur un damier de tags « Aruco » et c) résultat photogrammétrique. Modifié d'après Dore et Fargier (2017).	51
3.19 Rugosité de surface de quatre blocs par photogrammétrie et quadripole de mesure (ABMN). D'après Fargier et al. (2018).	51
3.20 a) Relation entre nombre de points inter-électrodes pour définir une rugosité, erreur de modélisation et bloc étudié. b) Valeur de R_q et R_{sk} des différents blocs et c) valeurs de H et R_{ku} des différents blocs. modifié d'après Fargier et al. (2018).	52
3.21 a) Champ gaussien 3D centré sur une valeur nulle. b) modèle discret de granulats d'après Mollon (2018).	53
3.22 Etude du Puy-de-Dôme. a) Localisation des profils IRE-2D et b) modèle 3D maillé du Puy-de-Dôme. c) Coupe 2D extraite du résultat d'inversion 3D et d) interprétation géologique. modifié d'après Portal et al. (2019).	56
3.23 a) Nuage de points issu de la procédure photogrammétrique. b) En noir, contour issu du nuage de points à 1 m de hauteur. Les contours rouge et bleu sont des versions appauvries du précédent. Les ronds verts indiquent la position des électrodes. c) Partie centrale du modèle numérique synthétique 3D intégrant trois anomalies cylindriques (A1, A2 et A3). Modifié d'après Fargier et al., 2017.	57

3.24 A gauche, modèle vrai issu du modèle 3D à la hauteur $H1$. À droite, coupes 2D issues des résultats d'inversion 3D. Chaque colonne reprend un niveau de bruit différent. Chaque ligne représente l'utilisation d'un contour plus ou moins résolu pour l'inversion.	58
3.25 Guide sur l'apport des stratégies d'inversion suivant le milieu étudié.	59
3.26 Méthodologies de discrétisation du problème inverse a) par agrégation de mailles du problème direct présentes dans une maille du problème inverse et b) par remaillage du problème inverse.	60
3.27 Inversion $3D^-$. a) modèle 3D maillé d'une digue de Loire avec position de deux lignes d'électrodes en vert. b) plusieurs coupes issues du modèle 3D inversé. Modifié d'après Jodry et al., 2017.	60
3.28 Procédures d'acquisition réalisables avec la stratégie $3D^-$	61
3.29 Maillage $2D^+$ d'une digue	61
3.30 a) Résultat d'inversion 2D conventionnel obtenu avec le logiciel Res2dinv. b) résultat d'inversion $2D^+$. Modifié d'après Fargier, 2011.	62
3.31 Deux paramétrisations du problème inverse avec à gauche une discrétisation $3P$ et à droite une paramétrisation continue $4P$. a) et d) modèles vus en perspectives. b) et e) modèles vus en coupe. c) et f) évolution de résistivité en profondeur des deux modèles. Modifié d'après Fargier et al. (2020).	63
3.32 Etude de la topologie de la fonction objectif Γ_d pour six couples de paramètres de la paramétrisation continue. Les diamants rouges représentent la solution. Modifié d'après Fargier et al. (2020).	64
3.33 Lignes 1, 2 et 3 : résultats d'inversion de modèles synthétiques respectivement doux, intermédiaire et franc. Colonne de gauche : Inversion $3P$. Colonne de droite : Inversion $4P$. Modifié d'après Fargier et al., 2020.	65
3.34 a) Optimisation du placement des électrodes sur la digue; b) et c) sensibilités liées à un positionnement optimisé et conventionnel respectivement. d) Apport en sensibilité lié à l'optimisation du positionnement.	66
3.35 Trois exemples de résultat présentant le couplage d'un modèle photogrammétrique et d'imagerie géophysique provenant I) du pont-de-coq, II) d'un pilier de carrière souterraine (Vendome) et III) de l'île volcanique de Stromboli. a) Cliché sur SNO étudié. b) modèle photogrammétrique. c) résultat d'IRE.	69
3.36 Etude de l'abbaye de Notre Dame du Bec Hellouin. a) Superposition de résultats géophysiques pour déterminer la position de fondations d'une ancienne abbaye. b) Résultats de fouilles à la pelle guidées par le couplage géophysique ayant permis la détection de fondations. Modifié d'après Fauchard et al. (2018).	70

3.37 Campagne d'essais sur la digue du canal de Digoin. Résultats a) géotechniques, b) sismiques et c) électriques. Modifié d'après Bièvre et al. (2018).	73
3.38 Modèle géotechnique a) longitudinal et b) transversal résultant de l'interprétation conjointe (naturaliste) des résultats géophysiques et géotechniques. Modifié d'après Bièvre et al. (2018).	73
3.39 Présentation du Perméafor. a) Photographie de la pointe Perméafor ancienne génération équipée sur une sondeuse géotechnique. Schéma b) de la nouvelle pointe VH développée au Cerema Blois et c) du module Perméafor pour la réalisation de l'essai.	74
3.40 Méthodologie de fusion d'informations géophysiques et géotechniques basée sur la théorie des masses de croyance.	75
3.41 Modèle d'étude de la méthodologie de fusion. a) Modèle géotechnique 2D synthétique bicouche et résultats géotechnique, b) résultat d'inversion de données IRE-2D synthétiques bruitées.	77
3.42 Comparaison des résultats de fusion. Fusion de « Smets » avec a) les événements ou conflit présentant la plus grande masse de confiance et b) la masse de confiance associée. Fusion type « PCR6 » avec c) les événements présentant la plus grande masse de confiance et d) la masse de confiance associée.	78
4.1 Synthèse de mes travaux de recherche avec les objets d'études présentés sur le cercle extérieur, les verrous scientifiques et la thématique centrale de cette HDR au centre.	82

Liste des tableaux

1.10 Synthèse des projets de recherche. <i>F1</i> Financeurs : ERDF et Région Normandie. <i>C1</i> : EDF, LCPC, Irstea, ISL, EDG, ... <i>C2</i> : Cerema, Ifsttar. <i>C3</i> : INGV, CNR, CNRS... (24 part.). <i>C4</i> : Redbird, Survey COPTER , CEREN, IFSTTAR, Irstea, IGN, DREAL Centre, Cerema, DICT, Geomatys. <i>C5</i> : IRSTEA, Cerema, IFSTTAR, ESPACE, SYMADREM. <i>C6</i> : Cerema, INSA Rouen, Univ. Caen.	10
1.11 Synthèse des projets industriels auxquels j'ai participé. *Projet avorté mais pour lequel j'avais investi de mon temps.	11
1.12 Activités d'enseignement réalisées.	13
1.13 Doctorats encadrés. <i>P1</i> : Andra/INSA/IFSTTAR/Cerema. <i>P2</i> :Univ Strachclyde, Ifsttar.	13
1.14 Post-doctorat encadrés. <i>P1</i> =Région Normandie - Cerema - INSA Rouen.	15
2.1 Synthèse de la production scientifique par type de production	22
2.2 Synthèse chronologique de la production scientifique	22
3.1 Capacité des méthodes à caractériser une propriété physique d'une digue. +++ correspond à une forte relation entre le paramètre et la propriété de la digue, ++ à une estimation raisonnablement bonne, + méthode très peu étudiée ou en cours d'étude et 0 indique l'incapacité de la méthode. d'après Dezert et al. (2019b).	72

Table des sigles et acronymes

La liste ci-dessous regroupe les notations et acronymes pouvant être rencontrés dans ce manuscrit.

Organismes

Cerema	<i>Centre d'Etudes et d'expertises sur les Risques, l'environnement, la Mobilité et l'Aménagement</i>
CETE-NC	<i>Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement - Normandie Centre</i>
EDF	<i>Electricité de France (société)</i>
CIH (EDF)	<i>Centre d'Ingénierie Hydraulique</i>
RD (EDF)	<i>Recherche et Developpement</i>
ENTPE	<i>Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat</i>
ERA	<i>Equipe de Recherche Associée du MTES</i>
ERDF	<i>European regional development fund</i>
FEHRL	<i>Forum of European National Highway Research Laboratories</i>
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (EPST)</i>
INGV	<i>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia</i>
INRAE	<i>Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (EPST)</i>
IPGP	<i>Institut de Physique du Globe de Paris</i>
IRSTEA	<i>Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (EPST)</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LRPC ou LR	<i>Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées</i>
LMA	<i>Laboratoire de Mécanique et Acoustique, Aix-Marseille Université, UMR 7031</i>
MTES	<i>Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire</i>
DGPR (MTES)	<i>Direction Générale de la Prévention des Risques du MTES</i>
DGITM (MTES)	<i>Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer du MTES</i>
OPGC-LMV	<i>Observatoire de Physique du Globe de Clermont Ferrand - Laboratoire Magma et Volcan</i>
OSUNA	<i>Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes Atlantique</i>
UGE	<i>Université Gustave Eiffel (Etablissement)</i>
ORSI	<i>Opération de Recherche Structurante et Incitative, IFSTTAR/Cerema</i>

Terminologie scientifique

CI	<i>Circuit Imprimé</i>
CND	<i>Contrôle Non Destructif</i>
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
DS	<i>Dempster-Shafer</i>
ERI	<i>Electrical Resistivity Imaging</i>
FOD	<i>Frame of Discernment</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MEF	<i>Méthode des Eléments Finis</i>
OHT	<i>Ouvrage Hydraulique en Terre</i>
PCR6	<i>Proportional Conflict Redistribution rule n° 6</i>
SfM	<i>Structure from Motion, aka Photogrammetry</i>
SNO	<i>Sites Naturels et Ouvrages</i>
SP (PS)	<i>Self Potential (Polarisation Spontanée)</i>
SPT	<i>Standart Penetration Test</i>
TBM	<i>Transferable Belief Model</i>

Table des notations scientifiques

La liste ci-dessous regroupe les notations et symboles mathématiques pouvant être rencontrés dans ce manuscrit.

Notations et symboles

\emptyset : Conflit entre les sources d'information

\mathcal{V} : Domaine Element Finis

\mathcal{S} : Frontières domaine Élement Finis

\mathcal{J} : Densité de courant [A.m⁻²]

\mathcal{E} : Champ électrique [V.m⁻¹]

\square : Potentiel électrique [V]

σ : Conductivité électrique [S.m⁻¹]

2^Θ : Ensemble des sous-ensembles de Θ (Powerset)

\cap : Intersection d'ensembles

\cup : Union d'ensembles

$m(\cdot)$: Fonction de masse de croyance

$M(0)$: Distribution de masses de croyance affectée aux hypothèses du cadre de discernement au niveau du sondage, pour $x = 0$

$M(x)$: Distribution de masses de croyance affectée aux hypothèses du cadre de discernement pour une position x par rapport au sondage géotechnique de référence

ρ : Résistivité électrique [$\Omega.m$]

ρ_a : Résistivité apparente [$\Omega.m$]

S_j : Source d'information j

Θ : Cadre de discernement

θ_n : Hypothèse n constitutive de Θ

Introduction

Ce travail d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) porte sur le développement et l'optimisation d'outils géophysiques et géotechniques ainsi que sur leur apport pour l'auscultation des sites naturels et des ouvrages (SNO) du génie civil.

Contexte, enjeux et motivations

Le contexte mondial en matière d'occupation du territoire tend vers une optimisation des ouvrages du génie civil dans leur environnement (augmentation durée d'exploitation, ouvrages en zone de risque...). Cependant, cette optimisation doit aller de concert avec la sûreté des installations et des populations.

Dans la panoplie de méthodes d'auscultation à la disposition des gestionnaires et des bureaux d'études, se trouvent les méthodes géophysiques et géotechniques. Cependant, bien que celles-ci bénéficient de plus de 100 ans de développement, leur utilisation n'est pas toujours possible. En effet, le matériel et les méthodes de traitement de l'information "conventionnels" ne permettent pas toujours d'aboutir à un résultat de reconnaissance robuste. Ce contexte est d'autant plus vrai pour les problématiques actuelles sur des SNO possédant une géométrie complexe 3D (ex : digues, barrages, ponts, volcans...).

Mes travaux de recherche se sont ainsi focalisés sur l'optimisation des méthodes d'auscultation géophysiques et géotechniques pour permettre une auscultation robuste et efficiente de ces milieux. Mon objectif a également été de profiter de l'émergence de méthodes innovantes pour répondre aux problématiques rencontrées sur ces SNO. Ma motivation finale est ainsi de pouvoir proposer aux gestionnaires d'ouvrages et aux politiques publiques des outils méthodologiques permettant une aide à la décision.

Démarche de recherche

Mon intérêt pour cette thématique à l'interface entre géophysique, géotechnique, génie-civil, géologie... m'est venu de ma thèse de doctorat réalisée à EDF-R&D (Laboratoire d'accueil : LCPC). Ce travail était consacré au développement de méthodes électromagnétiques pour l'auscultation des ouvrages hydrauliques en terre.

Mes compétences en géotechnique et géophysique ainsi que mon engouement pour les grands ouvrages m'ont alors attiré vers ce domaine. Mes travaux de thèse m'ont ainsi renforcé dans mon objectif de carrière et m'ont également permis d'affirmer mon goût pour la recherche finalisée et l'instrumentation.

C'est sur ces fondations à la fois théorique et expérimentale que reposeront les futures recherches que je mènerai au CETE de l'Ouest, puis au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois et enfin à l'Ifsttar (devenu Université Gustave Eiffel).

Au travers de mon expérience au Cerema, j'ai pu, dans le cadre d'études, d'expertises et de groupes de travail (CFBR, ICOLD) affiner ma compréhension des enjeux liés aux risques inondations et mieux identifier les attentes et préoccupations des maîtres d'ouvrages. Nourri de cette confrontation avec des enjeux réels, j'ai participé à l'élaboration de méthodologies d'inspection et participé au développement d'outils de reconnaissances innovants. J'ai depuis peu eu l'opportunité de renforcer mes activités de recherche et d'expertise en intégrant l'Ifsttar.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches est influencé par ce parcours. Il se décompose en quatre chapitres, permettant d'aborder sous différents aspects mon cheminement, les publications académiques que j'ai pu réaliser, une synthèse de mes travaux de recherche et des perspectives quant à ces travaux.

Structure du manuscrit

Le chapitre 1 retrace mon parcours, mes orientations et synthétise les contrats, encadrements, expertises et développements matériels et logiciels que j'ai menés.

Le chapitre 2 présente un recueil de la production scientifique littéraire consécutive à dix années de recherche. Est présentée la liste exhaustive des publications dans des revues internationales à comité de lecture, dans des conférences nationales et internationales.

Le chapitre 3 synthétise les apports et résultats que je juge innovants et/ou pertinents dans le cadre de l'optimisation des méthodes géophysiques et géotechniques pour l'auscultation des sites naturels et des ouvrages. Cette synthèse s'articule plus particulièrement autour de développements réalisés sur la méthode d'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE).

Le chapitre 4 présente une discussion et une conclusion sur les travaux que j'ai menés. Ce travail abouti sur une présentation de perspectives de recherche à court et moyen terme dans ce domaine et sur ma vision pour les concrétiser.

Partie 1

Curriculum Vitae

&

Recueil des travaux

Curriculum Vitæ

Sommaire

1.1 État civil	6
1.2 Diplômes et titres universitaires	6
1.3 Langues	7
1.4 Formation continue	7
1.5 Affiliations (Groupes de travail)	7
1.6 Fonctions exercées	8
1.7 Contrats	10
1.7.1 Contrats de recherche académiques	10
1.7.2 Contrats de recherche avec partenaires industriels	11
1.7.3 Études et Expertises	12
1.8 Enseignements	12
1.9 Encadrement	13
1.9.1 Encadrement en doctorat	13
1.9.2 Encadrement en post-doctorat	15
1.9.3 Analyse des encadrements post-master	16
1.10 Diffusion de la culture scientifique	16
1.11 Contribution à l'élaboration des politiques publiques	17
1.12 Développement de codes et logiciels	18
1.13 Développement de matériels	19

1.1 État civil

Nom	FARGIER
Prénom	Yannick
Date de naissance	24 juin 1984
Etat civil	Marié - 3 enfants
Corps - Grade	Chargé de Recherche - <i>Classe Normale</i> - 5 ^{ème} échelon
Ministère	Transition Écologique et Solidaire (MTES)
Organisme d'affectation	Université Gustave Eiffel
Département	Géotechnique, Environnement, Risques Naturels et Sciences de la Terre (GERS)
Laboratoire	Risque Rocheux et Ouvrages Géotechniques (RRO)
Adresse professionnelle	Université Gustave Eiffel - Campus de Lyon GERS / RRO 25, avenue François Mitterrand F69650 - Bron Cedex
Téléphone	04 72 14 26 83
E-mail	yannick.fargier@univ-eiffel.fr
Lien externe	orcid.org/0000-0003-1139-6461

1.2 Diplômes et titres universitaires

Décembre 2011	Grade de docteur en Génie Civil de l'École Doctorale en Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture (SPIGA) - École Centrale Nantes. Sujet : Développement de l'Imagerie de Résistivité Electrique pour la Reconnaissance et la Surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre.
Septembre 2008	Ingénieur Géophysicien de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

1.3 Langues

Anglais	Lu, écrit, parlé
Espagnol	scolaire

1.4 Formation continue

2019	Formation « Calcul Scientifique », 28h, ENTPE.
2018	Formation « Mécanique des sols », 24h, ENTPE.
2015	Formation « Ingénierie des digues », Irstea, Cerema & France Dignes, 2 jours, Orléans.
2015	Formation « Reconnaissance des sols : Essais <i>in situ</i> et prélèvements », Ponts Formation Conseil, 3 jours, Rouen.
2015	Formation « Secouriste du Travail », 1 jour, Blois.
2015	Formation « Management », 2 jours, Rouen.
2014	Formation « Intrumentation des ouvrages hydrauliques », CEMENTYS/IRSTEA, 3 jours, Massy.
2014	Formation COMSOL Multiphysics, 2 jours, Grenoble
2011	Formation « Propriété Intellectuelle / Industrielle », INPI, Cerema/DLRCA, 2 jours, Angers
2011	Formation « Comsol Multiphysics - IFSTTAR, 2 jours, Nantes
2010	Formation « SPIGA : Calcul Parallèle - Ecole Centrale, 20 h, Nantes
2010	Formation SPIGA « Métrologie », Ifsttar, 2 jours, Nantes
2010	Formation SPIGA : « LaTeX », Faculté des Sciences et des Techniques, 1 jour, Nantes
2010	Formation SPIGA : « Anglais pour la recherche », Ecole Centrale, 40h, Nantes
2009	Formation STIM : « Modèles physiques et numériques appliqués au génie civil, »IFSTTAR, 20h, Nantes

1.5 Affiliations (Groupes de travail)

2012 -2019	Membre du Comité Français de Géologie de l'Ingénieur (CFGI)
2012 -2017	Membre du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR)
2012 -2017	Membre de l'European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE)
2015 -2017	Membre de l'American Geophysical Union (AGU)
2014 -2017	Participation au Groupement d'échange et de Recherche de l'Ifsttar évaluation Non Destructive de l'IFSTTAR (GERi END)
2015	Co-animateur du Groupe Miroir sur la Propriété Intellectuelle du Cerema, Responsable pour le Cerema Normandie Centre.

2019 -2020	Contributeur pour groupe de travail CFBR sur la justification des ancrages passifs pour barrages poids.
2014 -2017	Contributeur « confirmé » à la communauté métier 09 du Cerema « Prototypes, Télécommunications et Instrumentation »
2014 -2017	Contributeur « référent » à la communauté métier 07 du Cerema « Mesures et Auscultation »
2014 -2017	Contributeur « référent » à la communauté métier 06 du Cerema « Diagnostic des ouvrages de réseaux et d'Infrastructures » sur les sujets d'auscultations et d'instrumentation

1.6 Fonctions exercées

Depuis 2017	sept. <i>Chargé de Recherche</i>	<i>Université Gustave Eiffel / GERS /RRO - Campus de Lyon</i>
------------------------	---	---

- Cadre & Chargé de recherche dans le domaine de l'auscultation des sites naturels et des ouvrages géotechniques. Encadrement de stages et de doctorats. Veille scientifique. Valorisation des travaux de Recherche.
- Chargé d'étude. Réalisation d'études et d'expertises géotechniques et géophysiques. Rédaction des rapports. Relation client.
- Chef de projets. Rédaction des projets, relation avec les entreprises, élaboration des devis. Suivi des dossiers. Délégation des études. Relecture des rapports.
- Chargé d'enseignements. Enseignements du niveau L3 à M2 (volume horaire <50h/an).
- Représentant du personnel du département GERS. Mandataire de la liste.

Aout 2012 à sept. 2017	<i>Chargé de Recherche - Responsable de l'ERA44</i>	<i>CEREMA / DTER Normandie Centre / ERA44</i>
-----------------------------------	---	---

- Responsable de l'équipe de recherche associée 44 (ERA44) du ministère de l'écologie du développement durable et de l'environnement. Gestion des agents (entretiens d'évaluation, dossier professionnel, formation, évolution). Définition et répartition des travaux de recherche et d'expertise en fonction des compétences. Suivi des projets et relectures des rapports.
- Chef de projets. Rédaction des projets, relation avec les entreprises, élaboration des devis. Suivi des dossiers. Délégation des études. Relecture des rapports.

- Responsable du matériel d'essais « Perméafor » du Cerema pour la mesure en continue de la perméabilité (2012-2017).
- Formateur interne des agents du laboratoire de Blois, Angers et Rouen aux outils de programmation, modélisation et mesure en géotechnique et géophysique (chercheurs, ingénieurs, techniciens et experts techniques)
- Membre du conseil scientifique et stratégique du Pôle de Compétence Innovation (PCI) Connaissance des Ouvrages Hydrauliques et de la Morphodynamique Fluviale (COHMF). Réunions avec la DGPR et DGITM.
- Jury pour le concours de chargés d'études en géotechnique
- Trésorier d'une association du personnel.

Avr. 2012 à juin 2012 *Post-doctorant* *CETE Ouest - DLRCA - Angers*

- Réalisation d'un algorithme de détection à seuil adaptatif (ATDA) de véhicules par mesure magnétique.

Jan. 2009 à déc. 2011 *Ingénieur-Chercheur* *EDF R&D/STEP - Chatou*

- suivi et participations aux projets de recherche (ERINOH, PAREOH).
- Réalisation d'une thèse de doctorat intitulée : "Développement de l'Imagerie de Résistivité Electrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre".
- Formation à COMSOL auprès de stagiaires et doctorants et aide au développement de modèles numériques.
- Encadrant de stages de master 2, ingénieurs et de DUT
- Participation à l'organisation locale d'un symposium international
- Membre de l'Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique

1.7 Contrats

1.7.1 Contrats de recherche académiques

Le tableau 1.10 présente les contrats que j'ai pu encadrer et/ou auxquels j'ai plus simplement participé. Parmi ces contrats, il me semble intéressant de revenir sur trois d'entre eux.

TABLE 1.10 Synthèse des projets de recherche. *F1* Financeurs : ERDF et Région Normandie. *C1* : EDF, LCPC, Irstea, ISL, EDG, ... *C2* : Cerema, Ifsttar. *C3* : INGV, CNR, CNRS... (24 part.). *C4* : Redbird, Survey COPTER, CEREN, IFSTTAR, Irstea, IGN, DREAL Centre, Cerema, DICT, Geomatys. *C5* : IRS-TEA, Cerema, IFSTTAR, ESPACE, SYMADREM. *C6* : Cerema, INSA Rouen, Univ. Caen.

Type	Intitulé	Période	Budget	Consortium	Rôle	Implication
PN	ERINOH	2006-2014	4.3M €	<i>C1</i>	Contributeur	++
ORSI	DOFEAS	2011-2014	300 k€/an	<i>C2</i>	Contributeur	++
FP7	MEDSUV	2012-2016	6 M€	<i>C3</i>	Contributeur	+
ORSI	Ecodem	2013-2016	730 k€/an	<i>C2</i>	Contributeur	+
ORSI	APOS	2013-2016	788 k€/an	<i>C2</i>	Contributeur	+
ORSI	PRECAS	2013-2016	475 k €/an	<i>C2</i>	Contributeur	+
R&I	APHOGEO	2014-2017	440 k€/an	Cerema	Contributeur	++
R&I	EVAGEOH	2015-2018	120 k€/an	Cerema	Porteur	+++
FUI	DIDRO	2016-2020	2 M€	<i>C4</i>	Contributeur	-
CPER	DIGUE2020	2016-2020	1.8 M€	<i>C5</i>	Contributeur	-
<i>F1</i>	Teledetac	2016-2020	0.5 M€	<i>C6</i>	Contributeur	+

Le 1^{er} contrat auquel j'ai participé est le Projet National, et ANR, ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques (ERINOH) qui a servi de support à mon doctorat. C'est ce projet qui a financé une partie des essais expérimentaux sur la « DiguExpERT » (Fargier, 2011). J'ai participé à sa clôture en co-rédigeant un ouvrage sur les travaux de ce projet (François, 2018). De plus amples informations techniques sur le projet sont disponibles dans la littérature (bonelli2013, www.irex.asso.fr). De plus, mon immersion dans ce projet d'envergure, m'a permis de côtoyer les managers de ce projet; à savoir Jean-Jacques FRY (EDF-CIH) et Christian Bernardini (IREX).

Le 1^{er} projet que j'ai porté concernait l'EVALuation Géophysique & GEotechnique des Ouvrages Hydrauliques (EvaGEOH). D'un point de vue scientifique, ce projet a permis de faire avancer les connaissances et le développement d'outils géotechniques et géophysiques pour l'auscultation des digues et barrages (section 1.13). Les éléments présentés dans ce mémoire sont en grande partie rattachés à ce projet. Ce projet a également intégré les travaux de Théo Dézert sur la fusion de données géotechniques et géophysiques (section 1.9.1). Ce projet m'a permis plus personnelle-

ment de consolider un réseau au niveau national et de gérer des équipes de recherche ou opérationnelles présentes sur plusieurs sites en France.

Le projet européen « Mediterranean SUPersite Volcanoes » (MED-SUV) m'a permis de me confronter à deux éléments de taille. Le premier concerne l'organisation des projets européens, guichet de financement jusque là inconnu pour moi. Le second concerne la dimension des études réalisées et auxquelles j'ai participées. J'ai beaucoup appris scientifiquement mais également d'un point de vue organisationnel des expéditions sur le Mont Somma-Vésuve et ETNA. J'éprouve ainsi toute ma reconnaissance pour les porteurs de ces WP (T. Ricci (INGV) et A. Finizola (IPGP)) qui m'ont invité à prendre part à cette aventure.

1.7.2 Contrats de recherche avec partenaires industriels

Le tableau 1.11 présente les contrats de recherche, dont le financement provient d'un industriel que j'ai pu porter ou auxquels j'ai plus simplement participé. C'est un type de contrat que j'affectionne particulièrement du fait de la proximité et de la réactivité que l'on doit avoir avec le bénéficiaire (client).

TABLE 1.11 Synthèse des projets industriels auxquels j'ai participé. *Projet avorté mais pour lequel j'avais investi de mon temps.

Client	Intitulé	Période	Budget	Rôle
EDF-CIH	Fusion	2020-2021	222 k€	Responsable
ANDRA	Resi2	2019-2020	284 k€	Responsable axe 1
SNCF	Ancrage Multisites	2018-2020	140 k€	Responsable
ANDRA	Resi	2013-2016	475 k€	Responsable
GDF	*SmartCasing	2013	670 k€	Contributeur
EDF	InGEOHT	2013	21 k€	Responsable

Parmi ces projets, je retiens le projet « ANDRA-Resi » porté par G. Villain (UGE), J.-P. Balayssac (INSA Toulouse), S. Lesoille (ANDRA) et moi-même (Cerema). C'est ce projet qui m'a permis de vraiment intégrer le domaine du *CND*. D'un point de vue scientifique, ce projet a fourni des solutions de capteurs innovantes et pertinentes pour les problématiques de l'ANDRA (section 3.1.3). Ce travail m'a également permis d'appréhender les difficultés d'organisation et de mise en collaboration des instituts. Ce projet se poursuit dans le cadre d'un nouveau contrat pour lequel je suis responsable de l'axe 1.

A noter également le projet Fusion financé par EDF-CIH qui a pour objectif de tester et valider la méthodologie de fusion d'informations (cf. Projet EvaGEOH, section 1.7.1) développée dans le cadre de la thèse de Théo Dézert et dont je suis porteur. Ce projet me permet de conforter mes compétences en gestion de projet et de me confronter aux problématiques de montage en lien avec un contrat cadre en cours de renouvellement, au sein d'un établissement naissant...

1.7.3 Études et Expertises

Au cours de ma carrière j'ai pu diriger de nombreuses études et expertises. C'est naturellement lors de mon passage au Cerema de Blois que j'ai accompli la majorité des activités opérationnelles de valorisation de la Recherche avec en moyenne 5-6 prestations par an. À titre d'exemple :

- J'ai réalisé une étude pour le bénéfice de la Dreal Centre-Val de Loire pour tester les capacités d'une technique de renforcement en place des ouvrages hydrauliques ; à savoir la technique du *soil mixing*. Cette collaboration incluait une assistance à maîtrise d'ouvrage lors des chantiers de Sigloy (45), MaisonVieille (45) et Veuves (41) (suivi à long terme supérieur à 2 ans) incluant des campagnes géotechniques et géophysiques *in situ* et en laboratoire. Ce travail s'est poursuivi sur les chantiers de Veuves (41), Tours (37), Saint Pierre des Corps (37), La ville aux dames (37).
- J'ai encadré plusieurs chantiers géotechniques et géophysiques pour la détection de cavités sous le chemin de halage de digues de Loire. En raison de la qualité des résultats obtenus et des recommandations fournies, cette étude a été reproduite pour suivre l'évolution de l'ouvrage. Collaboration avec le Cerema/ENDSUM.
- En tant que responsable du développement de l'outil Perméafor (cf. section 1.13), j'ai encadré plusieurs chantiers Perméafor : réalisation des essais, traitement des données, rédaction des rapports. Ces essais ont été réalisés en majorité pour le compte d'EDF-CIH sur des canaux de centrales hydro-électriques. Je suis ainsi intervenu sur les sites de Strasbourg (67), Marckolsheim (67), Rhinau (67), Donzere-MontDragon (84), Oraison (04), et également pour des études de danger de digues de Loire ou pour un gestionnaire de barrage, Le Gast (14). Depuis mon intégration à l'Ifsttar, j'ai assuré le transfert de compétence en réalisant deux expertises avec le Perméafor (Strasbourg, Erstein) et en formant du personnel du Laboratoire de Blois.

1.8 Enseignements

J'ai eu le plaisir de pouvoir former des étudiants dans le cadre de plus de 150 h de formation au sein de divers établissements (tableau 1.12). Cette (petite) expérience dans l'enseignement m'a beaucoup apporté concernant la prise de recul sur mes propres travaux, l'aspect didactique et le fonctionnement des établissements d'enseignement supérieur. J'ai, en plus de ces enseignements, préparé des TP et TD en géotechnique et géophysique. J'espère pérenniser cette activité en réalisant une cinquantaine d'heures annuellement à l'ENTPE, Univ. Lyon 1 et établissements de la région et ainsi favoriser des collaborations au sein de nos établissements.

TABLE 1.12 Activités d'enseignement réalisées.

Etablissement	Niveau	Intitulé du cours	Nombre d'heures	Période
ENTPE	1ere année	Calcul Scientifique	56h	2019
ENTPE	1ere année	Mécanique des sols	21h	2020
ENTPE	2eme année	AGSUN	18h	depuis 2018
EOST	3eme année	ERT3D - application	3h	2019
Univ. Paris 6	Master 2	Tomographie Electrique	15h	2013-2016

1.9 Encadrement

J'ai eu l'opportunité depuis mon entrée dans la vie active de pouvoir collaborer ou encadrer de nombreux étudiants. Cela concerne des doctorants et post-doctorants mais également des stagiaires depuis le niveau 3^{ème} jusqu'au niveau M2 (3^{ème} année d'école d'ingénieur). Pour ces derniers, j'ai encadré quatre stages de niveau M2 de plus de 5 mois (Sihem Benahmed, Simon Pradeau, Yannick Ananfouet [ACL11,ACT11], Elodie Pairault [ACT11]). À noter, chaque stage s'est passé dans de très bonnes conditions jusqu'aux soutenances très appréciées côté encadrement/jury universitaire.

1.9.1 Encadrement en doctorat

Le tableau 1.13 synthétise les actions d'encadrement scientifique que j'ai pu réaliser pour des étudiants au niveau doctorat. Le devenir des doctorants étant lié en partie aux publications, j'essaie de les accompagner dans la valorisation de leurs travaux. Sur le tableau apparait en rouge trois des publications réalisées dans le cadre des doctorats.

TABLE 1.13 Doctorats encadrés. *P1* : Andra/INSA/IFSTTAR/Cerema. *P2* :Univ Strachclyde, Ifsttar.

Prénom	Nom	Période	Partenaires	Taux enc.	Publications
Milia	Fares	2012-2015	IFSTTAR	30%	[ACL6,ACT11,ACTI2]
Clara	Jodry	2013-2016	IFSTTAR	30%	[ACL14,ACL15,ACTI17]
Angélie	Portal	2013-2016	OPGC	10%	[ACL16,ACTI21,ACTI22]
Cécile	Mézon	2014-2017	IPGP	10%	[Mezon et al., 2017;ACTI18]
Théo	Dezert	2016-2019	IFSTTAR/Cerema	30%	[ACL4,ACL5,ACLX2]
Joanna	Badr	2016-2019	<i>P1</i>	25%	[ACL2,ACT11,ACTI2]
Scarlett	Gendrey	2017-2020	Cerema	<5%	[En cours]
Cédric	Sachet	2016-2019	<i>P2</i>	<5%	[En cours]

La thèse de Clara Jodry intitulée « *Développements méthodologiques pour l'imagerie et le suivi temporel par méthodes géoélectriques des structures de protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines* » (dir. P. Côte) représente une "suite" et bien plus de mes travaux de thèse. Ces travaux ont notamment permis de fiabiliser l'utilisation de la stratégie 3D⁻ développée dans ma thèse en la confrontant à de nouveaux ouvrages (dunes, levées de Loire). Mon apport est essentiellement technique et concerne le développement de codes de modélisation et inversion 4D (monitoring).

Mon implication dans la thèse de Milia Farès intitulée « *Évaluation de gradients de teneur en eau et de chlorures par méthodes électromagnétiques non-destructives* » provient d'une collaboration pérenne avec Géraldine Villain (dir. de la thèse, UGE) sur le développement d'outils *CND* pour l'évaluation des ouvrages du génie-civil. J'ai développé dans ce cadre le code de modélisation/inversion de données capacitives. Ces travaux représentant mon initiation au *CND* ont eu un fort impact sur la définition de mon parcours professionnel.

Le doctorat de Théo Dezert (dir. P. Côte, S. Palma Lopes co-encadrant) « *Combinaison d'informations ponctuelles et volumiques pour le diagnostic d'ouvrages en terre soumis à des risques hydrauliques* » représente le sujet qui m'a le plus tenu à cœur. En effet, c'est un sujet que j'avais mûri depuis de nombreuses années en parfaite application de mes travaux au Cerema Blois sur les Études de Dangers (EdD) des Levées de Loire (évaluation de l'aléa rupture). En effet, les EdD n'exploitent pas à leur plein potentiel les résultats de campagnes géophysiques et géotechniques ce qui en limite l'utilisation. Nous avons appuyé, avec réussite, cette demande de financement auprès du Cerema, de l'Ifsttar et de la région Pays de Loire. À noter, ces travaux sont prolongés dans le cadre d'un post-doctorat avec *EDF* (section 1.9.2).

Mes collaborations avec Cécile Mézon¹ et Angélie Portal² sont nées lors d'une campagne de reconnaissance sur le Mont Somma-Vésuve dans le cadre du Projet FP7 - MedSuv. Ces thèses reposent sur l'étude du Puy de Dome [ACL16] et de Stromboli [ACT118] par méthodes géophysiques. Ma collaboration a consisté à accompagner les doctorantes dans le traitement de leur données (modélisation et inversion 3D).

Mon intégration à l'encadrement du doctorat de Joanna Badr (dir. G. Villain et J.-P. Balayssac) intitulé « *Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons* » provient des mes collaborations avec G. Villain. C'est elle qui m'a invité à faire partie de ce projet financé par l'ANDRA (tableau 1.11, projets industriels). Outre mon intérêt et mon implication pour la modélisation et la conception des capteurs, cette thèse m'a également permis de renforcer mes compétences en montage de projet avec des industriels.

Ma collaboration avec Cédric Sachet (Dir. P. Sentenac) est très faible et concerne l'utilisation de mes codes d'inversion 3D pour l'auscultation de quais par méthode électrique.

La thèse de Scarlett Gendrey porte sur le « *Diagnostic par contrôles non destructifs de digues de*

1. Dir. A. Finizola, IPGP. Sujet : « *Caractérisation des circulations thermo-convectives à l'échelle d'une zone fracturée par méthodes géophysiques et numériques* ».

2. Dir. P. Labazuy - J.-F. Lénat, OPGC. Sujet : « *Étude géophysique de la structure interne d'un dôme volcanique : le Puy de Dôme et son environnement (Chaîne des Puys, France)* ».

protection contre les submersions. Caractérisation des signatures et combinaison des données fusion de données géophysiques pour l'auscultation des digues en traitée à la chaux» (Dir. V. Garnier, LMA). Cette thèse est issue du projet CPER Digue2020, porté avec ténacité par A. Tekatlian (Cerema Aix en Provence) et auquel j'ai participé au montage. J'ai participé au recrutement de Scarlett et devais assurer un co-encadrement, mais mon départ du Cerema m'a poussé à confier l'encadrement à un de mes collègues.

1.9.2 Encadrement en post-doctorat

Le tableau 1.14 synthétise les actions d'encadrement scientifique que j'ai pu réaliser pour des étudiants au niveau post-doctorat.

TABLE 1.14 Post-doctorat encadrés. *PI*=Région Normandie - Cerema - INSA Rouen.

Prénom	Nom	Période	Partenaires	Taux enc.	Publications
Anna	Lushnikova	2018-2019	SNCF-NGE	80%	[ACTN32;en cours]
Joanna	Badr	2019-2020	INSA Toul./ ANDRA	30%	[ACTI2;en cours]
Théo	Dezert	2020-2021	EDF-CIH/R&D	50%	[ACTI7;ACTI8;en cours]
Sam	Taoum	2018-2019	<i>PI</i>	30%	[ACLX5;ACLX6;ACTN31]

Deux de ces post-doctorats concernent la poursuite de travaux de thèses.

(1) Le post-doctorat de Joanna Badr a pour objectif de finaliser l'étude des capteurs développés et de les mettre en application dans le cadre de Cigeo. J'ai élaboré dans ce cadre un logiciel de modélisation numérique et d'inversion dédié à ces sondes.

(2) Le post-doctorat de Théo Dézert, financé par EDF-CIH, a pour objectif de fiabiliser ses travaux en les confrontant à trois jeux de données issus du parc d'ouvrages hydrauliques d'EDF. L'objectif est également d'augmenter le nombre de sources d'informations à fusionner (MASW).

Le post-doctorat de Samer Taoum a pour objectif d'améliorer le code EResI-3D développé depuis mon arrivée au Cerema (cf. section 1.12). Ce travail a permis le transfert de mon code sous environnement complètement libre (python) ainsi que plusieurs améliorations notables (cf. section 1.12). Ma participation est essentiellement technique et concerne la formation du post-doctorant sur le code EResI-3D et sur les choix de développement de PyMERI.

Le post-doctorat réalisé par Anna Lushnikova concerne l'étude du comportement des ancrages au rocher par fibre optique. Ce travail, financé par SNCF-Réseau et en collaboration avec NGE Fondations, a permis d'améliorer notre compréhension des mécanismes de transfert des sollicitations en profondeur en fonction du type de roche encaissante (collaboration A. Khadour, UGE, pour la mesure par fibre optique). Ces travaux récents que j'ai pilotés m'ont permis de me familiariser avec la mesure par fibre optique et d'exprimer mes compétences en instrumentation des sites et en gestion de projet.

- 6 relectures pour le « Journal of Applied Geophysics » ;
- 1 relecture pour le journal « Near Surface Geophysics » ;
- 1 relecture pour la revue « Comptes Rendu Geoscience » ;
- 1 relecture pour le BOEG « Bulletin of Engineering Geology and the Environment ;
- 1 relecture pour IEEE-JSTAR « Journal of Selected Topics un Applied Earth Observations and Remote Sensing ».

J'ai également participé à la relecture d'articles pour des conférences nationales et internationales :

- 6 relectures pour les JNGG2020 ;
- 4 relectures pour le congrès ISC6 ;
- N (>10) relectures pour l'AGAP.

J'ai fait partie de plusieurs jurys de soutenance de thèse :

- Angélie Portal en décembre 2015 ;
- Clara Jodry en mars 2016 ;
- Joanna Badr en novembre 2019 ;
- Théo Dezert en décembre 2019.

J'ai fait partie de comités de suivi de thèse :

- Clara Jodry ;
- Scarlett Gendrey.

J'ai participé à l'organisation de conférences :

- NDTCE2009 à Nantes (assistant) ;
- JNGG2020 à Lyon (comité scientifique) ;
- Fusion2020 (co-organisateur).

À noter, j'ai tenu de nombreux stands lors de conférences dans l'objectif de valoriser les actions du Réseau Scientifique et Technique de mon ministère, notamment :

- Dignes 2013, Aix en Provence ;
- Assises Nationales sur les Risques Naturels 2016, Marseille ;
- Réunion des sciences de la Terre 2016, Caen ;
- JNGG2018, Marne La Vallée.

J'ai également participé au montage de pages Web pour le site du Cerema, réalisé des apparitions sur des chaînes TV (Juin 2015 - Projet MEDSUV), et participé à deux court métrages sur la mission ETNA et Vesuve présentés au festival du film scientifique de l'île de la Réunion.

1.11 Contribution à l'élaboration des politiques publiques

J'ai travaillé sur plusieurs ouvrages dont l'objectif est l'amélioration des politiques publiques en matière de sûreté des ouvrages hydrauliques. Ce travail comprend :

- la traduction française de l' « ILH » (International Levee Handbook) [OS1]. Cet ouvrage est la référence internationale des bonnes pratiques pour la gestion des digues à l'attention des gestionnaires d'ouvrages et bureaux d'études.
- la participation au groupe de travail CFBR (comité français des barrages et réservoirs) : réparations et confortements des digues. L'objectif est de fournir des guides à l'usage des gestionnaires et des entreprises de travaux. Je suis auteur et relecteur de plusieurs fiches dans ce groupe.
- la rédaction du Guide Erinoh Vol. 2. Intitulé « Méthodes de détection de l'érosion interne » [OS2]. L'objectif est de présenter une méthodologie et un état de l'art des méthodes d'auscultation des digues à l'usage des gestionnaires.
- la rédaction d'un chapitre d'un guide ICOLD (International Commission on Large Dams) intitulé « Internal Erosion of Existing dams, Levees and Dikes » [OS3].
- une participation à des retours d'expérience organisés au niveau européen portant sur la sûreté des ouvrages hydrauliques.
- une participation à l'élaboration d'essais pour évaluer le comportement en flexion d'ancrages passifs scellés au rocher dans le cadre du PN C2ROP.
- ma participation enfin à un Groupe Technique CFBR sur la justification des ancrages passifs scellés au rocher pour les barrages-poids.

1.12 Développement de codes et logiciels

J'ai développé ou co-développé et j'assure la maintenance d'une dizaine de codes de traitement des données (dont deux déposés à l'APP). Ces codes sont utilisés en moyenne par quatre chercheurs/ingénieurs/doctorants.

- Le code le plus abouti, intitulé EResI-3D, permet la modélisation et l'inversion de mesures électriques. C'est le seul code dans cette catégorie permettant d'adapter les stratégies de mesures et d'inversion sur tout type de milieu (y compris 3D complexe). Collaboration externe : Ifsttar/ EDF/ IRSTEA/IPGP/ Univ. Strathclyde/ OPGC/ Univ. Paris 6.
- Le code AxERI, permet la prise en compte de mesures en forage en hypothèse 2D axi-symétrique. Collaboration externe : Ifsttar/ Cerema / Irstea / Univ. Paris6.
- Le code CERIS permet de reconstruire les gradients (implémentation d'une fonction continue) d'imbibition d'eau et chlorure à partir de mesures électriques réalisées en surface sur des éprouvettes de béton. Collaboration externe : Ifsttar/ Cerema/ Andra.

- RugElec est un code de modélisation numérique axi-symétrique aux éléments finis permettant de simuler l'effet d'une rugosité de surface sur la mesure électrique. Ifsttar/ Cerema.
- Le code ResiGrad permet de reconstruire les gradients (implémentation d'une fonction continue et de modèles discrets) d'imbibition d'eau à partir de mesures électriques réalisées à partir des sondes de résistivité développées par Joanna Badr. Collaboration externe : Ifsttar/Andra/INSA Toulouse (en cours).
- Le code CAPEX est similaire au code CERIS. Cependant, il permet le traitement des données capacitives et non électriques. Collaboration externe : Ifsttar/Andra.
- Le code Permea4Pro permet le traitement des mesures « Permeafor VH » permettant de remonter à la conductivité hydraulique des milieux. J'ai également réalisé des feuilles de calcul pour le traitement des PV de réalisation des essais (dont calibration et calcul des pertes de charge).
- La méthode de calcul CARDIGUES permet le Calcul de l'Aléa Rupture des DIGUES pour cinq pathologies. Contribution très faible de ma part portant sur la sensibilité de certains paramètres d'entrée.
- Le code de fusion d'information géotechniques (ponctuelles) et géophysiques (spatiales). Dépôté à l'APP. Collaboration externe : Ifsttar, Cerema, EDF-CIH-R&D.
- PyMERI (Python Modelling of Electrical Resistivity Imaging-3D) est un code d'imagerie électrique déposé à l'APP. Ce travail concerne l'implémentation et l'amélioration du code ERESI-3D sous environnement de programmation Python. Des améliorations notables concernent i) l'introduction d'éléments infinis, une nouvelle méthode ii) de régularisation et iii) d'implémentation de l'état adjoint. Collaboration : Ifsttar, Cerema, INSA Rouen.

1.13 Développement de matériels

J'ai, au cours de mes travaux au Cerema et depuis mon arrivée à l'Université Gustave Eiffel, développé des matériels d'essai. Ces matériels géotechniques et géophysiques sont à la fois le support et la finalité de travaux de recherche.

- J'ai participé au développement du Perméafor (section 3.4.1.3) qui est un outil de mesure en forage en quasi continu de la perméabilité. Cet outil, par opposition aux méthodes Lefranc / Nasberg, ne nécessite pas l'utilisation de « packers » et offre un résultat bien plus résolu en profondeur permettant de détecter des fuites dans les digues et canaux [ACL1, ACL3]. Cette responsabilité, m'a amené à réaliser de nombreuses expertises avec ce matériel.

- J'ai participé, avec Ludovic Dore (de mon équipe au Laboratoire Régional de Blois), au développement d'un scanner *3D* basé sur la photogrammétrie et des techniques de reconnaissance d'image. L'objectif est de fournir un outil à bas coût à destination du réseau scientifique et technique du ministère pour améliorer les essais réalisés en laboratoire de mécanique des sols [ACL10;ACTN11].

- J'ai collaboré avec Rémi Clément (INRAe) pour développer un prototype de résistivimètre à faible cout (Chapitre 3.1.2) [ACLX1]. L'objectif est de fournir à la communauté une plateforme ouverte de résistivimètre à 32 électrodes (à ce stade). L'objectif à terme étant de permettre une diffusion de ce matériel pour des applications nouvelles (monitoring long...) et pour des problématiques orphelines (archéologie, humanitaire...).

- Enfin, depuis mon arrivée à l'Ifsttar, j'ai développé des matériels d'essai pour améliorer notre compréhension du comportement des ancrages scellés au rocher (utilisés en risque rocheux). Cela inclus un endoscope en forage avec objectif final de pouvoir reconstruire une carotte *3D* avec trajectographie du forage.

Production scientifique

Sommaire

2.1	Revue internationale à comité de lecture [ACL]	23
2.2	Prix - Distinctions [Prix]	25
2.3	Conférence invité [INV]	26
2.4	Conférences internationales avec actes [ACTI]	26
2.5	Conférences nationales avec ou sans actes [ACTN]	29

Ce chapitre présente la production scientifique littéraire consécutive à dix années de recherche. Le tableau 2.1 est une synthèse numérique par catégorie de production. Une sélection de 12 articles de Rang A est présentée en annexes A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L. Afin de limiter la liste aux publications présentant un caractère scientifique majeur, les références concernant les rapports de recherche Ifsttar/Cerema et les rapports d'études et d'expertises ne seront pas listées.

TABLE 2.1 Synthèse de la production scientifique par type de production

Type de production		Nombre
Revue Internationale à comité de lecture	[ACL]	16
Chapitre ou Ouvrage Scientifique	[OS]	3
Conférence internationale avec actes	[ACTI]	>20
Conférence nationale avec ou sans actes	[ACT]	>30
Conférence invité	[INV]	1
Séminaire invité	[SINV]	6
Prix - Distinctions	[PRIX]	6
Rapport de recherches	[RAPP]	>20
Rapport d'études ou d'expertises	[RAPPEX]	>20

Le tableau 2.2 informe sur l'évolution de la production scientifique depuis la soutenance de mon doctorat. Ce tableau montre l'augmentation du nombre de publications au cours du temps avec en moyenne trois articles par an ces dernières années. Ma participation à des conférences nationales et internationales est assez fluctuante et fonction du besoin de mon laboratoire de diffuser nos travaux auprès de la communauté scientifique.

TABLE 2.2 Synthèse chronologique de la production scientifique

Type de production	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ACL	1	1	1	2	1	3	2	5	(4)
ACTI	4	1	1	4	5	2	3	2	4
ACTN	1	4	8	4	3	0	5	4	5

2.1 Revues internationales à comité de lecture [ACL]

- [ACL1] Antoine, R., C. Fauchard, Y. Fargier, E. Durand (2015) Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging. *International Journal of Geophysics* (0.35). Volume 2015. doi :10.1155/2015/610172.
- ¹E[ACL2] Badr, J., Y. Fargier, S. Palma Lopes, F. Deby, J.-P. Balayssac, S. Lesoille, L.-M. Cottineau G., Villain (2019) Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor 1 Resistivity Profiles over Depth in Concrete. *Construction & Building Materials* (4.05). 233, 310-321. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226.
- [ACL3] Bièvre, G., P. Lacroix, L. Oxarango, D. Goutaland, G. Monnot, Y. Fargier (2017) Assessment of an earth-filled dyke with a permanent hydraulic head. Integration of geotechnical and geophysical investigations (seismics, resistivity) and localization of internal erosion piping using ambient vibrations. *Journal of applied geophysics* (1.67), 139, 1-15. DOI : 10.1016/j.jappgeo.2017.02.002.
- [ACL²X1] Clément, R., Y. Fargier, V. Dubois, J. Gance, E. Gros, N. Forquet (2020) OhmPi : an open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale. soumis à HardwareX. Accepté avec révisions majeures.
- E[ACL4] Dezert, T., Y. Fargier, S. Palma Lopes, P. Cote (2018) Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a review. *Engineering Geology* (3.91). 260, 132-151, DOI :10.1016/j.jappgeo.2019.05.008.
- E[ACL5] Dezert, T., S. Palma Lopes, Y. Fargier, P. Cote (2019) Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions : assessment with numerical and laboratory data. *Journal of Applied Geophysics* (1.7), 170. 103824.
- E[ACLX2] Dezert, T., S. Palma Lopes, Y. Fargier, P. Cote (2020) Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information for Levee Characterization. soumis au Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Accepté avec révisions mineures.
- E[ACL6] Fares, M., Y. Fargier, G. Villain, S. Palma Lopes, X. Dérobert (2015) Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes. *NDT&E International* (2.22), 80, 1-9. doi :10.1016/j.ndteint.2016.01.0027.
- [ACL7] Fargier, Y., C. Fauchard, S. Palma Lopes, P. Mériaux, P. Royet, D. François and F. Bretar (2012) Methodology applied to the diagnosis and monitoring of dikes and dams. *Novel Approaches in Risk Assessment*. ISBN 979-953-307-765-8.

1. E : Article co-réalisé avec un doctorant que j'encadrais.

2. X : Article soumis non publié.

- [ACL8] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2014) DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation : A 3D extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics* (1.67), 103, 245-256. doi :10.1016/j.jappgeo.2014.02.007.
- [ACL9] Fargier, Y., R. Antoine, L. Dore, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2017) 3D assessment of a quarry pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods. *Geophysics* (2.02), 82(4), E143-E153.
- [ACL10] Fargier, Y., L. Dore, A. Ihamouten (2018) Surface variations effect on electrical resistivity measurement : A roughness based approach. *Journal of Applied Geophysics* (1.67), 159, 341-349. doi :10.1016/j.jappgeo.2018.08.016.
- [ACL11] Fargier, Y., S. Palma Lopes, Y. Ananfouet, L. Saussaye, C. Fauchard, G. Bièvre (2019) Quality assessment by 2D-ERI of cut-off wall dike reinforcement technics. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* (1.28), 24(3), 451-463.
- [ACLX3] Fargier, Y., G. Villain, S. Palma Lopes, M. Fares (2020) Optimized Retrieval of 1D-resistivity profiles in cover concrete by electrical sounding measurements. *Soumis au Journal of Applied Geophysics*.
- [ACL12] Fauchard, C., R. Antoine, F. Bretar, J. Lacogne, Y. Fargier, C. Maisonnave, P.F. Thérain, P. Marjorie, J.P. Dupont, M. Pierrot Deseilligny (2013) Assessment of an historical bridge with geophysical and advanced photogrammetric methods : Application to Le Pont de Coq, Normandy, France. *Journal of Applied Geophysics* (1.67), 98, 100-112. doi :10.1016/j.jappgeo.2013.08.009.
- [ACL13] Fauchard, C., A. D. Saley, Y. Fargier, R. Antoine, P.-F. Thérain, C. Camerlynck (2017) Discovery of the Romanesque church of the Abbey of Our Lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods. *Journal of Archaeological Science* (1.5). 25(4), 315-328. <https://doi.org/10.1002/arp.1711>.
- E[ACL14] Jodry, C., Y. Fargier, S. Palma Lopes, P. Côte, M. Sanchez (2016) Assessment of the 3D–Electrical Resistivity Imaging approach for embankment dike evaluation : application to an earth dike along the river Loire. *Near Surface Geophysics* (1.18), 15(1), 27-41. doi : 10.3997/1873-0604.2016036.
- [ACL15] Jodry, C., S. Palma Lopes, Y. Fargier, M. Sanchez, P. Côte (2019) 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee : A case study. *Journal of Applied Geophysics* (1.67), 15(1), 27-41. doi :10.1016/j.jappgeo.2019.05.008.
- E[ACLX4] Lushnikova, A., Y. Fargier, M. Bost, P. Joffrin, C. Pruvost, A. Khadour, W. Sedoud (2020) Study of passive rock anchors in fractured environments using optical fiber sensors. *Soumis au Journal Zhejiang University of Science A* (1.39).

- E[ACL16] Portal, A., Y. Fargier, J-P Lénat, P. Labazuy (2019) Internal structure of a complex lava dome inferred from geophysical imaging, Part II : 2D and 3D electrical resistivity tomography inversion approaches. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2.62). 373, 97-107, DOI :10.1016/j.jvolgeores.2019.01.019.
- E[ACLX5] Sachet, C., P. Sentenac, P. Cote, Y. Fargier (2020) 3D-ERI of MillPort pier site. *Soumis au Maritime Engineering journal*.
- E[ACLX6] Taoum, S., A. Tonnoir, Y. Fargier, R. Antoine, C. Fauchard (2020) "PyMERI" I : Modelling the electrical diffusion in the ground using the finite element method with open boundary conditions. à soumettre.
- E[ACLX7] Taoum, S., Y. Fargier, A. Tonnoir, R. Antoine, C. Fauchard (2020) "PyMERI" II : new inversion scheme for the electrical resistivity imaging of the underground. à soumettre.

2.2 Prix - Distinctions [Prix]

- [Prix1] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2012) Management of a priori information during inversion of geo-electrical data acquired on hydraulic structures. *Near Surface Geoscience 2012 - 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Sept. 3 - 5, Paris, France. [Prix « Best paper »].
- [Prix2] Fares M., Y. Fargier, G. Villain, S. Palma Lopes, X. Derobert (2015) International Estimation of water content gradient and concrete durability indicators using capacitive and electrical probes, *Symposium NDT in Civil Engineering*. [Prix « Best Paper »].
- [Prix3] Portal A., Y. Fargier, J-P Lénat, P. Labazuy (2015) Electrical resistivity tomography applied to a complex lava dome : 2D and 3D models comparison. *Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2015)*, 17, Wien, Austria. [Prix « Best Poster »].
- [Prix4] Badr, J., Fargier, Y, Deby, F, Villain, G., Palma Lopes, S., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L.-M. (2018) Design and implementation of embedded sensors based on electrical resistivity to determine water content profiles in thick concrete structures. *9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018)*, 10-13 July 2018, Manchester, United Kingdom, 10p. [Prix « Best Paper »]
- [Prix5] Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019) Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton. *20 ème édition des Journées scientifiques, Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)²B 2019)*, 1-3 Juillet 2019, Bruxelles, Belgique. [PRIX « JEUNE SCIENTIFIQUE »]

- [Prix6] Dezert, T., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., and Cote, P. (2018b) Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance. 11e Colloque GEOFCAN, 20 et 21 novembre 2018, Antony. [PRIX « JEUNE SCIENTIFIQUE »]

2.3 Conférence invité [INV]

- [INV1] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2013) Management of a priori information during inversion of geo-electrical data acquired on hydraulic structures. Symposium on applied geophysics for environmental and engineering problems, Denver, Colorado, USA. ISBN : 978-1-62748-381-0.

2.4 Conférences internationales avec actes [ACTI]

- [ACTI1] Badr, J., Fargier, Y., Deby, F., Villain, G., Palma Lopes, S., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L.-M. (2018) Design and implementation of embedded sensors based on electrical resistivity to determine water content profiles in thick concrete structures. 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018), 10-13 July 2018, Manchester, United Kingdom, 10p.
- [ACTI2] Badr, J., Villain, G., Balayssac, J.-P., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Deby, F., Delepine-Lesoille, S. (2020) Implementation of embedded sensor based on electrical resistivity to monitor drying in thick concrete slabs. 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 30 June - 03 July, Barcelona, Spain.
- [ACTI3] Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Côte, P., and Jodry, C. (2017) A New Database Structure Guiding the Combination of Geophysical and Geotechnical Methods for Levee Investigation. In 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Malmö, Sweden.
- [ACTI4] Dezert, T., Fargier, Y., Lopes, S. P., and Cote, P. (2018) Application of Belief Functions to Levee Assessment. In International Conference on Belief Functions, pages 73-76. Springer.
- [ACTI5] Dezert, T., Lopes, S. P., Fargier, Y., and Cote, P. (2018) Geophysical and Geotechnical Data Fusion for Levee Assessment-Interface Detection with Biased Geophysical Data. In 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- [ACTI6] Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., and Cote, P. (2019) Levee Characterization by Means of Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information. In 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. The Hague, Netherlands.

- [ACTI7] Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., and Cote, P. (2020) Levee Characterization by Means of Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information. SAGEEP, Denver, Colorado, USA.
- [ACTI8] Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., and Cote, P. (2020) Levee Characterization by Means of Data Fusion of In-Situ Geophysical and Geotechnical Information. International conference on Site Construction, Dubapest, Hungary.
- [ACTI9] Dore, L., Fargier, Y., Antoine, R., Fauchard, C. (2017) Comparison of surface and 3D-ERI measurements to assess an underground quarry pillar. In 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Malmö, Sweden.
- [ACTI10] Fares M., Y. Fargier, G. Villain, S. Palma Lopes, X. Derobert (2015) International Estimation of water content gradient and concrete durability indicators using capacitive and electrical probes, Symposium NDT in Civil Engineering. [Prix « Best Paper »].
- [ACTI11] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2012) A new and cost-effective DC-Resistivity Imaging approach for investigating embankment hydraulic structures. 100 years of electrical imaging, July 9 - 10, Paris, France.
- [ACTI12] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2012) Management of a priori information during inversion of geo-electrical data acquired on hydraulic structures. Near Surface Geoscience 2012 - 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sept. 3 - 5, Paris, France. [Prix “best paper”].
- [ACTI13] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2012) Robustness of the 2D-DC Resistivity imaging method applied to dike survey : state of the arts, limitation and outlooks. In : 6eme International Conference on Scour and Erosion, Aug. 21-23, Paris, France.
- [ACTI14] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2013) Management of a priori information during inversion of geo-electrical data acquired on hydraulic structures. Symposium on applied geophysics for environmental and engineering problems, Denver, Colorado, USA. ISBN : 978-1-62748-381-0. [Conférence invitée].
- [ACTI15] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, J. Lacogne, E. Pairault, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2015) Combinaison of SFM and ERI methods for underground quarry pillar assessment. In 20th European Meeting of environmental and Engineering Geophysics, Sept. 6-10, Torino, Italy.

- [ACTI16] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2016) Combination of photogrammetric and geoelectric methods to assess 3D structures associated to natural hazards. Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2016), 18, Wien, Austria.
- [ACTI17] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, T. Dezert, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2020) Combinaison of SFM and ERI methods for underground quarry pillar assessment. International conference on Site Construction, Dubapest, Hungary.
- [ACTI18] Finizola, A., R. Antoine, T. Ricci, Y. Fargier and Etna team (2016) The summit part of Mount Etna revealed by high resolution DC-ERT coupled with complementary geophysical and soil gas techniques. Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2016), 18, Wien, Austria.
- [ACTI19] Finizola, A., R. Antoine, T. Ricci, Y. Fargier and Etna team (2016) Geochemical characterization of a High Resolution DC Electrical Resistivity Tomography crossing the summit craters of Mt Etna. Conference Goldschmidt. June 26- July 01, Yokohama, Japan.
- [ACTI20] Jodry C., Y. Fargier, S. Palma Lopes, P. Côte, M. Sanchez-Angulo (2014) A cost-effective 3D Electrical Resistivity Imaging approach for embankment dike assessment, In 20th European Meeting of environmental and Engineering Geophysics, Sept. 7-9, Athen, Greece.
- [ACTI21] Mezon, C., R. Antoine, Y. Fargier, A. Finizola, (2015) Geophysical characterisation and numerical modeling of the summit hydrothermal system of Stromboli volcano, Aeolian islands, Italy. Proceedings of the 4th European Geothermal Workshop, Oct. 19-20, Strasbourg, France.
- [ACTI22] Palma Lopes, S., Y. Fargier, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2012) Improving DC-Electrical Resistivity Imaging techniques for water infiltration detection and monitoring in earth hydraulic structures. In : 6eme International Conference on Scour and Erosion, Aug. 21-23, Paris, France.
- [ACTI23] Poret, M., T. Ricci, A. Finizola, Y. Fargier, et al. (2016) Multidisciplinary investigation (ERT, CO₂, SP and T) reveals fluid circulation at Somma-Vesuvius. Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2016), 18, Wien, Austria.
- [ACTI24] Portal A., Y. Fargier, J-P Lénat, P. Labazuy (2015) Electrical resistivity tomography applied to a complex lava dome : 2D and 3D models comparison. Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2015), 17, Wien, Austria. [Prix « Best Paper »].

- [ACTI25] Portal A., Y. Fargier, J-P Lénat, P. Labazuy (2016) Contribution of 3D inversion of ERI data applied to a complex lava dome. Conference : European Geosciences Union General Assembly (EGU2016), 18, Wien, Austria.
- [ACTI26] Ricci, T., A. Finizola, E. Delcher, R. Antoine, M. Neri, A. Peltier, L. Gailler, A. Portal, J. Bernard, E. Brothelande, Y. Fargier, C. Fauchard, B. Foucard, R. Gusset, I. Lazarte, E. Martin, C. Mezon, M. Poret, M. Rossi, A. Sciarra, S. Calabrese (2016) Hydrothermal fluid flow structures at Mt Etna inferred by very deep ERT, Self-Potential, Temperature and Soil Degassing. Cities on the Volcanoes 9, Puerto Varas, Chili.

2.5 Conférences nationales avec ou sans actes [ACTN]

- [ACTN1] Antoine, R., Y. Fargier, E. Durand, C. Fauchard (2014) Détection de fuites dans un canal à partir de données radar et de perméabilité in-situ. Séminaire de Cloture Dofeas, 18-20 oct., Aix en Provence, France.
- [ACTN2] Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019) Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton (vidéo). 37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (RUGC 2019), 19-21 Juin 2019, Nice, France .
- [ACTN3] Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019) Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton. 20 ème édition des Journées scientifiques, Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)²B 2019), 1-3 Juillet 2019, Bruxelles, Belgique.
- [ACTN4] Bost, M., D.A Ho, C. Pruvost, A. Khadour, P. Joffrin, M. Huteau, P. Robit, Y. Fargier (2018) Etude paramétrique de la résistance à l'arrachement d'un ancrage passif scellé au rocher. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 13-15 Juin, Champs sur Marne, France.
- [ACTN5] Boussafir, Y., Y. Fargier, Y. Ananfouet, S. Palma Lopes, A. LeKouby (2015) Qualification des méthodes géophysiques pour le contrôle et le suivi des panneaux de sol renforcé réalisés par la technique du Soil Mixing. Journées AGAP Qualité, 17-19 Nov., Grenoble, France.
- [ACTN6] Derobert, X., G. Villain, Y. Fargier, A. Ihamouten et al. (2015) Gradients de teneur en eau : Approche des multi-techniques EM. Séminaire ECND-PDL, nov 05, Nantes, France.
- [ACTN7] Dezert, T., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., and Cote, P. (2018b) Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance. Journées AGAP Qualité.

- [ACTN8] Dezert, T., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., and Cote, P. (2018b) Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance. 11e Colloque GEOFCAN, 20 et 21 novembre 2018, Antony.
- [ACTN9] Dezert, T., Palma-Lopes, S., Fargier, Y., Forquenot de la Fortelle, Q., Cote, P., and Tourment, R. (2019) Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues. Dignes2019. Aix en Provence.
- [ACTN10] Dezert, T., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Q., Cote, P. (2020) Fusion de données géotechniques et géophysiques pour la caractérisation d'un ouvrage hydraulique. Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'ingénieur. Lyon
- [ACTN11] Dore, L., Fargier, Y. (2017) Développement d'un scanner 3D économique pour les géosciences de l'ingénieur. Journées techniques de la Société Française de Photogrammétrie Terrestre, 7-9 mars, Marnes-La-Vallée, France.
- [ACTN12] Fares M., Y. Fargier, G. Villain, X. Dérobert, O. Coffec, S. Palma-Lopes (2014) Détermination du profil de teneur en eau dans le béton par inversion des mesures de permittivité au moyen de sondes capacitives, Congrès Diagnobéton, 19-20 mars, Toulouse, France.
- [ACTN13] Fares, M., G. Villain, B. Thauvin, Y. Fargier, S. Bonnet, M. Thiery (2016) Suivi des profils de concentration de chlorures par une méthode électrique non destructive. Congrès Diagnobéton, 24-25 mars, Marrakech, Maroc.
- [ACTN14] Fargier, Y. (2012) Diagnostic des digues : utilisation et développement du Perméafor. Club des gestionnaires des levées et du lit du bassin de la Loire, 22 nov., Orléans, France.
- [ACTN15] Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. Francois, P. Côte (2013) Prise en compte des effets 3D en IRE : Application à l'auscultation des ouvrages hydrauliques en terre. Journées Contrôle Non Destructif, 26 juin, Rouen, France.
- [ACTN16] Fargier, Y., E. Durand, R. Rousselet (2013). Le Perméafor, un outil de diagnostic des ouvrages hydrauliques en terre et de leur fondation. Colloque CFBR, Modernisation des barrages, 4-5 déc., Chambéry.
- [ACTN17] Fargier Y., E. Durand, B. Bridoux (2013) Méthodologie et modèle CARDIGUES. Journées Géotechnique, 01-03 oct., Richelieu, France.
- [ACTN18] Fargier, Y., E. Durand, F. Pilnière (2014) Le Perméafor, un outil de diagnostic in-situ des ouvrages hydrauliques. Séminaire de Cloture de l'opération de recherche Dofeas, 18-20 oct., Aix en Provence, France.

- [ACTN19] Fargier, Y. (2014) Le Perméafor : un outil de diagraphie de perméabilité in-situ. Journées Géotechniques, 14-16 oct., Dourdan, France.
- [ACTN20] Fargier, Y., E. Durand, F. Pilnière (2014) Le Perméafor, un outil de diagnostic in-situ des ouvrages hydrauliques. Séminaire de Cloture de l'opération de recherche Dofeas, 18-20 oct., Aix en Provence, France.
- [ACTN21] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, J. Lacogne, E. Pairault, C. Fauchard, D. Mathon, S. Palma Lopes (2015) Contribution of SFM and ERI methods to assess an underground quarry pillar. JPI-3D. 3-4 juin, Rouen, France.
- [ACTN22] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, J. Lacogne, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2015) Auscultation d'un pilier de carrière souterraine par combinaison des techniques géo-électriques et photogrammétriques. Journées AGAP Qualité, 17-19 Nov., Grenoble, France.
- [ACTN23] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, J. Lacogne, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2016) Auscultation d'un pilier de carrière souterraine par combinaison de la photogrammétrie et de l'imagerie 3D géo-électrique. Réunion des Sciences de la Terre, 24-28 octobre, Caen, France.
- [ACTN24] Fargier, Y., Y. Ananfouet, Y. Boussafir, S. Palma Lopes, A. Le Kouby, L. Saussaye (2016) Renforcements des digues de Loire par la méthode du deep soil mixing : apport des techniques géophysiques pour le contrôle. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 6-8 Jul., Nancy, France.
- [ACTN25] Fargier, Y., L. Dore, R. Antoine, J. Lacogne, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2017) Auscultation d'un pilier de carrière souterraine par combinaison de la photogrammétrie et de l'imagerie 3D géo-électrique. Journées techniques de la Société Française de Photogrammétrie Terrestre, 7-9 mars, Marne-la-Vallée., France.
- [ACTN26] Fargier, Y., Dore, L. (2018) comparaison de methodes geophysiques pour l'auscultation d'un pilier de carriere souterraine. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 13-15 Juin, Champs sur Marne, France.
- [ACTN27] Fauchard, C., R. Antoine, T. Roulland, O. Maquaire, S. Costa, R. Davidson, Y. Fargier (2016) Combinaison de données aériennes et de mesures geophysiques pour l'étude des falaises des Vaches Noires. Réunion des Sciences de la Terre, 24-28 octobre, Caen, France.
- [ACTN28] Fauchard, C., R. Antoine, T. Roulland, O. Maquaire, S. Costa, R. Davidson, Y. Fargier (2017) Mesures combinées d'imagerie de résistivité électrique et de photogrammétrie : étude des falaises des Vaches Noires. Journées techniques de la Société Française de Photogrammétrie Terrestre, 7-9 mars, Marne-la-Vallée., France.

- [ACTN29] Joffrin P, Khadour, A., Y. Fargier (2019) Tour d’horizon des technologies de Fibres Optiques appliquées à la métrologie. INDURA-journée Fibres Optiques. 3 avril, Lyon, France.
- [ACTN30] Kaouane, C., L. Saussaye, Y. Fargier, S. Palma Lopes (2018) La polarisation provoquée pour le suivi des écrans étanches : une première approche. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’ingénieur, 13-15 Juin, Champs sur Marne, France.
- [ACTN31] Le Kouby A., L. Saussaye, Y. Fargier, Y. Boussafir, E. Durand (2016) Renforcements des digues de Loire par la méthode du deep soil mixing : Suivi sur deux ans. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’ingénieur, 6-8 Juil., Nancy, France.
- [ACTN32] Lushnikova, A., Joffrin, P., Pruvost, C., Bost, M., Khadour, A., Sedoud, W., Forest, O., Robit, P., Fargier, Y. (2020) Apport de la fibre optique pour l’étude des ancrages passifs scellés au rocher en milieu fracturé. Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l’ingénieur. Lyon.
- [ACTN33] Mezon, C., Antoine R., Barde-Cabusson S., Delcher E., Fargier Y., Finizola A., Ricci T., Carapezza M.L. (2014) Characterizing fluid flow in a hydrothermal system from geophysical insights : application to Stromboli volcano, Aeolian Islands. 24eme Réunion des Sciences de Terre. Pau, France.
- [ACTN34] Mezon, C., Antoine R., Barde-Cabusson S., Delcher E., Fargier Y., Finizola A., Ricci T., Carapezza M.L. (2014) Etude geophysique des circulations fluides dans le système hydrothermal de Stromboli, 9eme colloque GEOFCAN, Orsay, France.
- [ACTN35] Taoum, S., Saydy, A., Fauchard, C., Antoine, R., Tonnoir, A., Fargier, Y. (2020) Apport du logiciel pycneri-3d pour l’imagerie des sites a geometrie et geologie complexe. Journées AGAP Qualité.
- [ACTN36] Taoum, S., Saydy, A., Fauchard, C., Antoine, R., Tonnoir, A., Fargier, Y. (2020) Apport du logiciel pycneri-3d pour l’imagerie des sites a geometrie et geologie complexe. Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l’ingénieur. Lyon.
- [ACTN37] Saydy, A., Taoum, S., Fauchard, C., Antoine, R., Tonnoir, A., Fargier, Y. (2020) Imagerie de résistivité électrique sur pilier de carrière. Journées AGAP Qualité.

Partie 2

Synthèse des travaux

&

Perspectives

Synthèse des travaux de recherche

Sommaire

3.1 IRE : Instrumentation et mesure <i>in situ</i>	37
3.1.1 Mesure	37
3.1.2 Résistivimètre	38
3.1.3 Développement d'une sonde de résistivité	39
3.1.4 Résultats essentiels	43
3.2 IRE : Modélisation numérique	44
3.2.1 Théorie	44
3.2.2 Géométrie & photogrammétrie	46
3.2.3 Rugosité & Photogrammétrie	48
3.2.4 Rugosité 3D & hétérogénéité des milieux	52
3.2.5 Résultats essentiels	53
3.3 IRE : Problème Inverse	54
3.3.1 Théorie	54
3.3.2 Topographie et Inversion	56
3.3.3 Stratégies d'inversion intermédiaires	58
3.3.4 Optimisation de l'acquisition	64
3.3.5 Résultats essentiels	67
3.4 IRE : Post-traitement	68
3.4.1 Complémentarité des méthodes d'auscultation pour l'évaluation des SNO	68
3.4.2 Fusion d'informations	74
3.4.3 Résultats essentiels	77

Ce chapitre a pour vocation de synthétiser une partie des recherches que j'ai menées autour d'un axe directeur concernant l'auscultation des Sites Naturels et des Ouvrages (SNO) par des méthodes d'auscultation géophysiques et géotechniques. Ce travail débouchera sur une discussion et des perspectives quant aux travaux futurs à mener (Chapitre 4).

Les SNO ont en commun qu'ils remplissent une ou plusieurs fonctions et interagissent avec un environnement pouvant modifier leurs propriétés et altérer leurs fonctions. Suivant le comportement étudié, les propriétés à mesurer peuvent varier. Ainsi, l'étude des propriétés physiques, chimiques ou mécaniques ou leur couplage multiphysique peut être préférée selon la problématique de l'ouvrage. Pour exemple, pour le suivi d'une digue de protection contre les crues peuvent s'opposer des visions environnementales, géotechniques, hydrauliques. Par conséquent, afin d'évaluer

la capacité de *SNO* à remplir une fonction pour laquelle ils sont étudiés, il est nécessaire de disposer d'outils de caractérisation de leurs propriétés.

J'ai étudié depuis 10 ans plusieurs méthodes géophysiques et géotechniques en évaluant leur apport pour l'auscultation des *SNO*. Plus particulièrement, je me suis intéressé à la technique d'Imagerie de Résistivité Électrique (*IRE*) et ce chapitre suit ces développements. Ces travaux couvrent plusieurs angles de recherche depuis l'instrumentation, jusqu'au post-traitement en passant par des considérations méthodologiques, de modélisation numérique, d'inversion, et d'optimisation de l'information. La figure 3.1 présente à la fois les domaines d'utilisation (cercle extérieur), les stratégies d'approches des problématiques, et au centre la thématique générale des mes travaux.

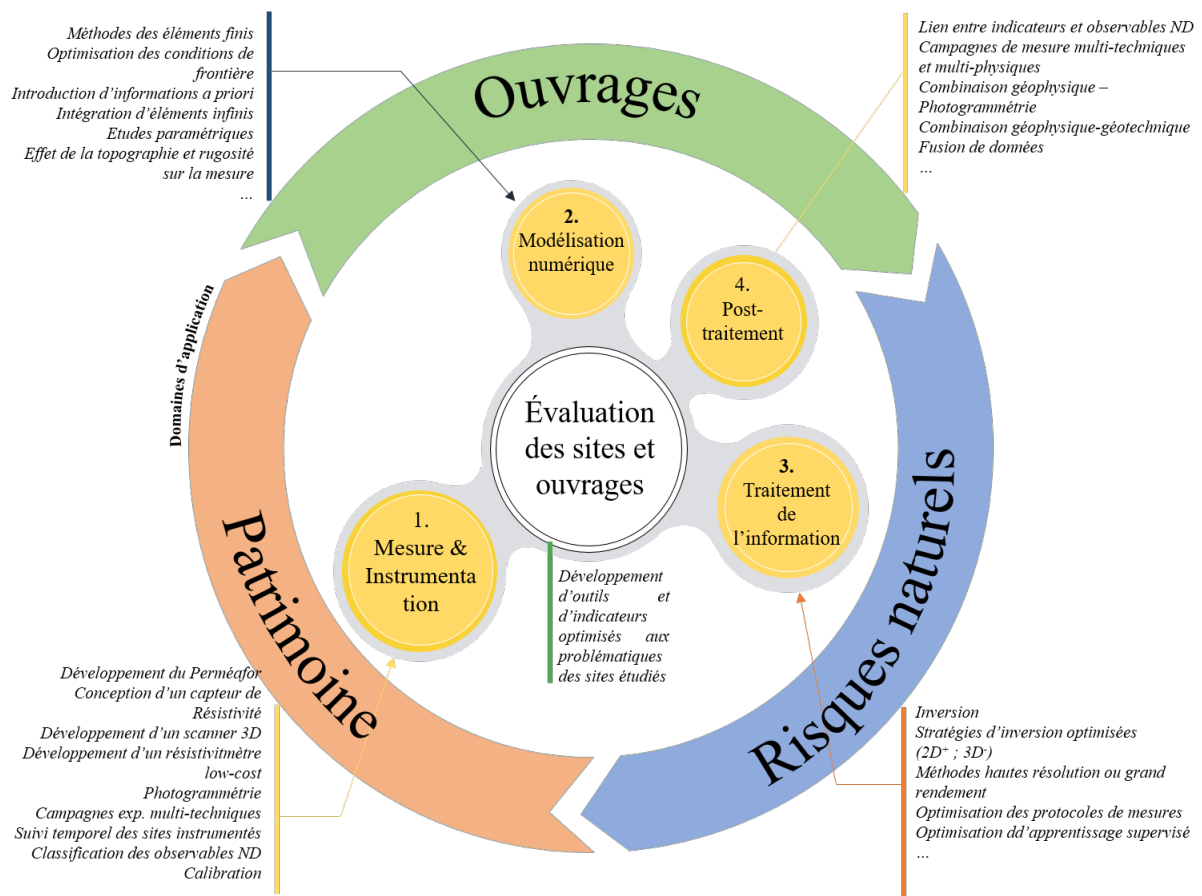


FIGURE 3.1: Organigramme des objets d'études abordés et des thématiques empruntées.

Ces travaux se sont attachés à travailler sur le couplage de l'*IRE* avec d'autres outils émergents, innovants ou tout simplement pertinents pour le comportement étudié. Ces travaux ont également largement concerné l'étude de *SNO* sur lesquels l'*IRE* n'était en théorie pas applicable et pour lesquelles des stratégies optimisées ont du être développées. Ceci intègre notamment la problématique de la dimension et géométrie des *SNO*, leurs effets sur la mesure et leurs prise en compte lors de la procédure d'inversion.

3.1 IRE : Instrumentation et mesure *in situ*

3.1.1 Mesure

Toute la démarche d'Imagerie de Résistivité Electrique (*IRE*) repose sur une mesure de résistance de transfert dite à « 4-points » ou quadripole (4-wire, 4-terminal) (Zhdanov et Keller, 1994). En effet, à la différence d'une mesure de résistance à 2 points (dipôle), un quadripôle permet de supprimer l'effet de la résistance des câbles d'injection et les résistances de contact qui peuvent parfois être supérieures à la résistance du sol mesurée (Clément et al., 2020).

À partir des quatre électrodes, la résistance est calculée en exploitant simplement la loi d'Ohm prenant le rapport entre la différence de potentiel (DDP) mesurée (V) et le courant injecté (A), $R_t = \Delta V / I$. Pour cela, deux électrodes dites de courant sont utilisées pour faire circuler un courant électrique et deux autres pour mesurer une DDP (Figure 3.2.a). La résistance mesurée (Ω) dépend ainsi de la résistivité ($\Omega.m$) du milieu notée ρ traversée par la courant. ρ représente la capacité d'un matériau à s'opposer à l'arrachement de charges électriques sous la présence d'une DDP (Kunetz, 1966).

Le courant injecté, pour des questions de polarisation des électrodes, est composé d'une alternance de créneaux carrés positifs, négatifs et nuls (3.2.b). Suivant les propriétés du milieu ausculté, celui-ci peut jouer un rôle de condensateur ayant pour effet de retarder la montée (ou la descente) de la DDP mesurée (3.2.c). À cet effet s'ajoute un bruit aléatoire sur la mesure plus ou moins important (3.2.c), et également un bruit constant pouvant dériver dans le temps (3.2.d) consécutif à l'effet du potentiel spontané naturellement présent dans les milieux. La figure 3.2 présente la forme complète du signal injecté et mesuré. En pratique, une seule résistance est déduite par créneau d'injection. Cette mesure est ensuite moyennée sur plusieurs créneaux d'injection (stacks).

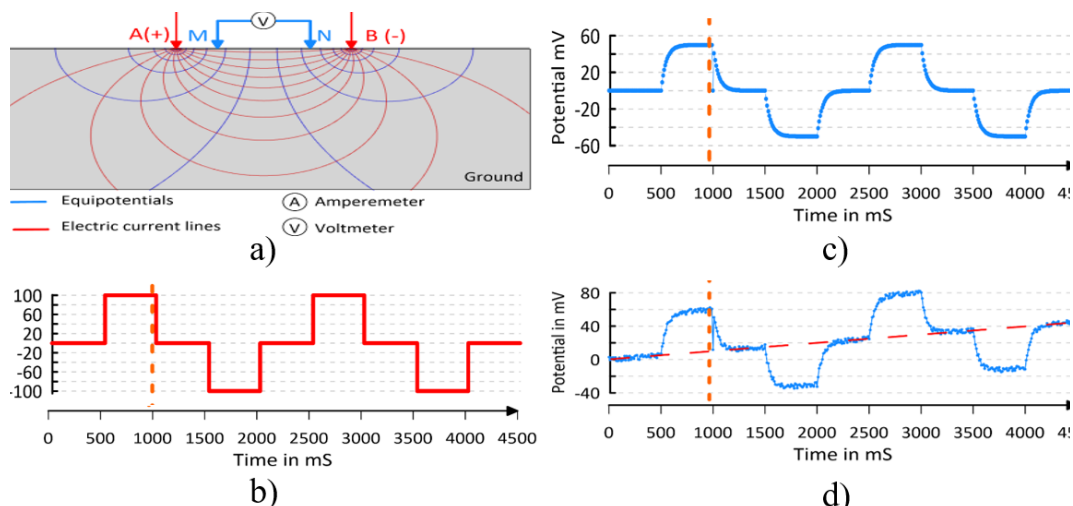


FIGURE 3.2: a) Principe de la mesure de résistance à quatre points. b) Signal injecté par les électrodes de courant, DDP mesurée avec effet capacitif c) sans bruit et d) avec bruit et effet *PS*. Modifié d'après Clément et al. (2020).

Afin de satisfaire les besoins d'imagerie liés à la gestion d'un problème inverse (section 3.3), cette mesure est ensuite répétée sur différents quadripôles interrogeant différentes électrodes d'un jeu complet d'électrodes. Les dispositifs actuels intégrant plusieurs dizaines voire centaines d'électrodes, cette mesure nécessite l'utilisation de multiplexeurs intégrés au sein du résistivimètre de mesure.

3.1.2 Résistivimètre

Bien que le principe de mesure soit assez simple, le développement d'un résistivimètre est lui beaucoup plus complexe. Cette complexité induit un coût élevé (plusieurs dizaines de milliers d'euros) "garantissant" une qualité de mesure optimale quelque soit l'application. Cela intègre les prospections en domaine minier ou en volcanologie nécessitant de grandes profondeurs d'investigation et donc une puissance d'injection élevée (supérieure à 200 W).

Cependant, le prix de ce matériel limite sa diffusion et donc son utilisation pour des applications moins rémunérées. Plus particulièrement, le domaine humanitaire (ex : recherche de nappes phréatiques (Descloitres et al., 2008)) et certains domaines scientifiques (ex : archéologie, Fauchard et al. (2018)), intégrant des applications « orphelines », n'emploient pas à sa pleine capacité ce type de matériel.

Cette problématique vient en complément de deux grandes tendances : 1) le big data (Martínez et Morales, 2019; Zhang et al., 2018; Phillips et al., 2015) - Internet des objets (IoT) (Moulat et al., 2018) et 2) le monitoring des ouvrages (Badr et al., 2019), nécessitant une multiplication des appareils de mesure dans l'espace et/ou l'immobilisation de matériels dans le temps.

Par conséquent, dans l'objectif de pouvoir diffuser cette méthode, j'ai participé au développement d'un résistivimètre *low-cost* en collaboration avec Rémi Clément (INRAe) porteur de ce projet (Clément et al., 2020). La figure 3.3 présente a) le schéma électronique global de la partie mesure et b) le résistivimètre « OhmPi » placé dans une armoire électrique pour des applications en laboratoire.

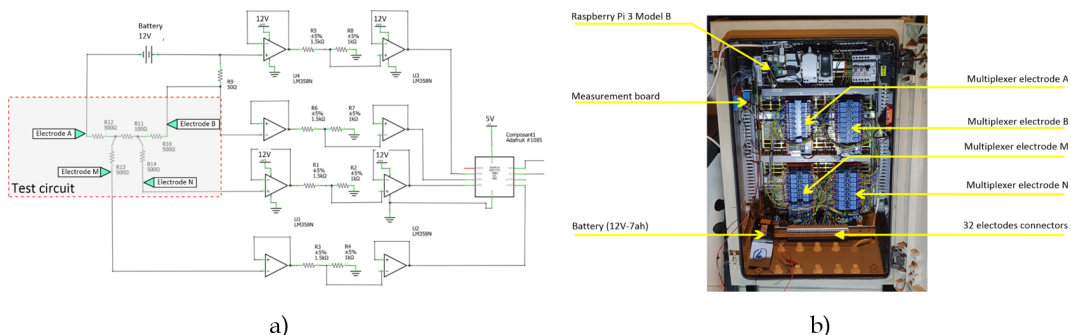


FIGURE 3.3: Détails de OhmPi. a) Schéma électronique global de la mesure 4-points. b) Photographie de OhmPi placé dans une armoire électrique. Modifié d'après Clément et al. (2020)

Une validation du matériel a été réalisée en dupliquant quasi simultanément des mesures OhmPi avec un résistivimètre référence (Syscal Pro) (www.iris-instruments.com). La figure 3.4 pré-

sente a) la corrélation entre les mesures issues des deux systèmes d'acquisition et b) les résultats d'inversion pour ces deux jeux de données. Ce résultat démontre que pour ce cas d'application (faible profondeur d'investigation) le nouveau résistivimètre fournit un résultat tout à fait comparable au résistivimètre référence. Ce développement ne constitue pas un objet de recherche en soi mais représente un "catalyseur" permettant d'atteindre de nouveaux résultats scientifiques. Il représente également une première tentative de « plateforme » d'échange sur le sujet qui pourra aider, à terme, à l'amélioration du matériel de mesure.

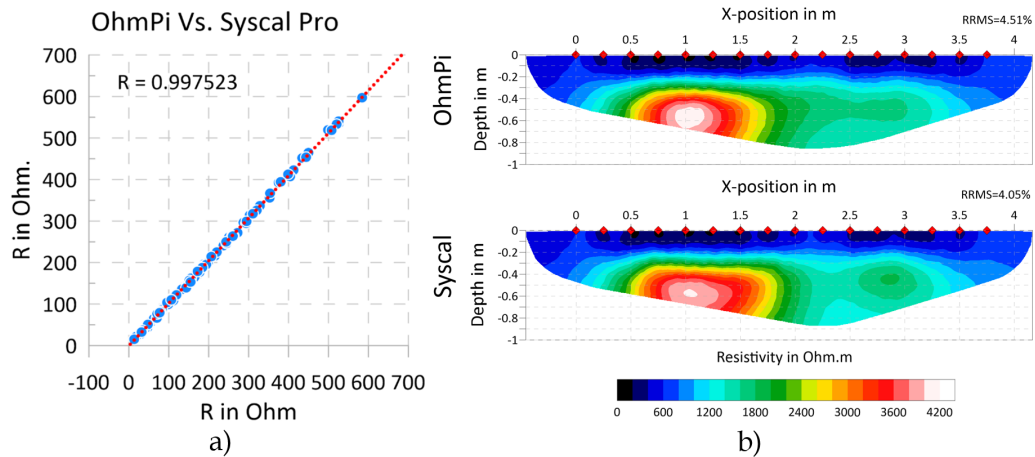


FIGURE 3.4: Comparaison de OhmPi avec un résistivimètre référence. a) Résistances de transfert mesurées par OhmPi et Syscal Pro. b) Résultats d'imagerie par le logiciel BERT pour les deux jeux de données. Modifié d'après Clément et al. (2020)

3.1.3 Développement d'une sonde de résistivité

Depuis une décennie, les technologies émergentes liées aux mouvances «IoT», «BigData», «Smart Devices» rencontrent un engouement fort de la part des industriels, du public mais également de la communauté scientifique (Moulat et al., 2018; Martínez et Morales, 2019). L'essor de ces nouvelles technologies ouvre une nouvelle voie pour nos applications grâce à une forte distribution spatiale et temporelle de capteurs à bas coût.

Je participe au développement d'une sonde de résistivité pour le compte de l'Agence Nationale de gestion des Déchets RadioActifs (Andra) dans le cadre de deux contrats (cf. tableau 1.11, section 1.7.2). L'objectif est de permettre le suivi de gradients de teneur en eau dans le béton couvrant les colis de déchets radioactifs localisés au sein du centre CIGEO situé à 500 m de profondeur (Figure 3.5).

En effet, au sein de cette installation, le dernier rempart avant l'argilite encaissante est une épaisse couverture de béton de 60 cm d'épaisseur. Ce béton d'une perméabilité très faible doit limiter les transferts vers l'argilite. Afin de s'assurer de ce comportement, l'Andra souhaite s'équiper de capteurs répondant à un cahier des charges précis. Ainsi, une résolution élevée (centimétrique) en profondeur doit par exemple être atteinte.

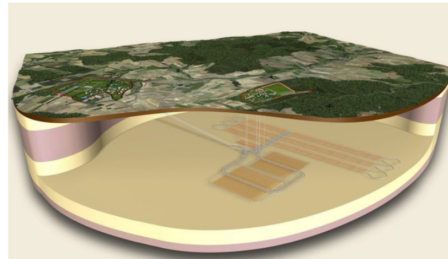


FIGURE 3.5: Schéma des installations en surface et en profondeur du centre d'enfouissement CI-GEO.

Cette problématique nous a poussé à étudier plusieurs technologies de support pour un capteur résistif. Parmi les solutions techniques disponibles, nous avons choisi l'utilisation d'un circuit imprimé (*CI*) comme support à ce développement (Badr et al., 2019). Bien qu'abondamment utilisé pour d'autres applications, le *CI* représente une forte innovation pour certaines applications en *IRE*. En effet, un *CI* possède les avantages d'être :

- Peu coûteux;
- Robuste / grande durabilité pour des applications en conditions sévères;
- Fabriqué avec une très grande précision ($<30 \mu\text{m}$);
- Idéal pour conduire un courant électrique (principe du *CI*);
- Peu encombré par les câbles;
- Lié à un fort tissu industriel;
- Documenté avec un retour d'expérience important.

L'un des avantages lié à cette technologie concerne la précision de fabrication. En effet, comme nous le verrons à la section 3.2.2, une erreur même faible dans la fabrication peut engendrer des erreurs importantes sur la mesure (Oldenborger et al., 2005). La figure 3.6 présente deux capteurs basés sur la technologie du *CI* avec chacun un objectif d'auscultation.

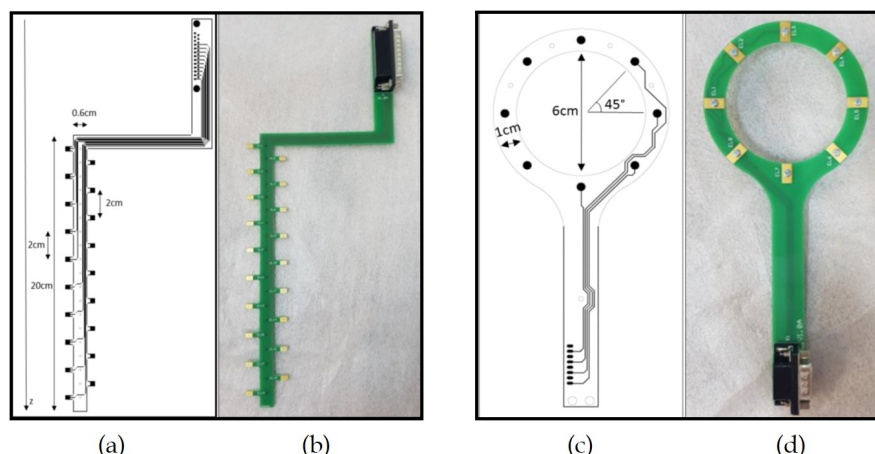


FIGURE 3.6: Capteurs de résistivités en *CI*. a) Schéma et b) photographie du capteur «échelle» en *CI*. c) Schéma et d) photographie du capteur «raquette» en *CI*. Modifié d'après Badr et al. (2019).

La base du capteur se compose du matériau Flame Retardant-4 (FR-4), qui est un stratifié époxy renforcé par du verre. Toutes les propriétés physiques (dilatation thermique, résistivité), chimiques et mécaniques (<https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>) en font un choix pertinent proposé par Chang et al. (2012).

Au sein de cette résine sont disposées des pistes en cuivre permettant la circulation d'un courant électrique. Sur cette résine est déposé un vernis épargne permettant de protéger le *CI* de détériorations externes et de compléter l'isolation des pistes en cuivre. Des vernis dits de « tropicalisation » sont utilisés en cas de conditions extrêmes (acidité, humidité...). D'autres précisions sur les matériaux entrant dans la réalisation de la sonde sont proposées dans Badr et al. (2019).

Un critère de conception des capteurs concernait leur ancrage dans le béton afin d'assurer un contact durable pour la mesure. La figure 3.7 présente un résultat de fendage d'une éprouvette cylindrique avec un capteur échelle en son sein. La figure montre qu'une empreinte du circuit est bien présente dans le béton reflétant la présence d'un contact électrode/béton effectif. Ce point sera validé par les faibles résistances de contact observées lors des essais du doctorat de Joanna Badr (section 1.9.1).

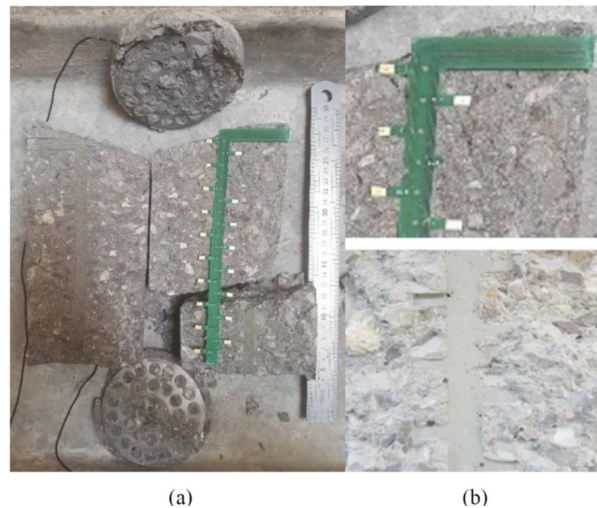


FIGURE 3.7: Photographie prise après fendage de l'éprouvette de béton avec a) la vue d'ensemble et b) deux zooms sur l'empreinte sur les deux faces fendues. Modifié d'après Badr et al. (2019).

Après conception et réalisation des capteurs une phase de validation a été réalisée tout d'abord sur des solutions étalons. La figure 3.8.a) présente un résultat pour la solution théorique à $63 \Omega.m$. Cette figure présente également la mesure obtenue avec une sonde du commerce et sa barre d'erreur. Cette figure, montre que notre mesure est ici comprise entre la valeur de la sonde et la valeur théorique pour le mode « Wenner » et « Transmission » (modes d'interrogation détaillés ci-après).

Une seconde campagne de validation a ensuite été réalisée sur des éprouvettes de béton soumises à un séchage unidimensionnel. La figure 3.8.b présente les résultats obtenus à partir du dispositif échelle à différents temps de séchage. Ce résultat permet de visualiser l'augmentation des résistivités en surface consécutives d'un séchage unidimensionnel.

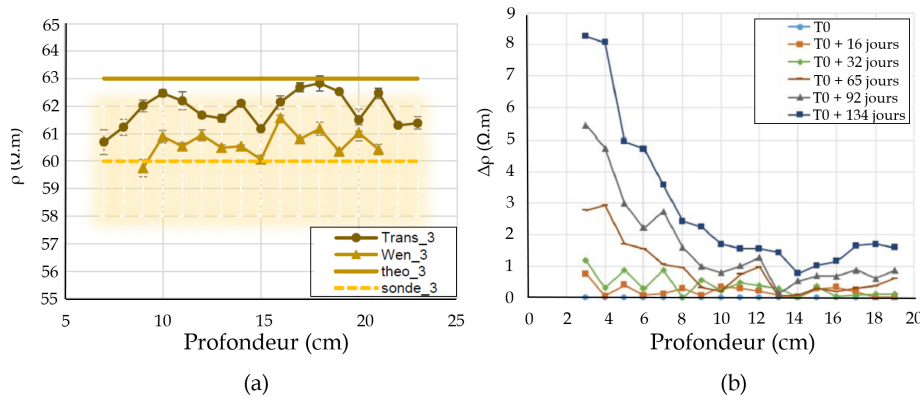


FIGURE 3.8: Validation du dispositif échelle a) dans une solution saline b) par séchage d'une éprouvette en béton. Modifié d'après Badr et al. (2019)

Il existe deux modes d'interrogation du dispositif échelle. Le premier consiste à prendre quatre électrodes du dispositif et à réaliser une mesure (ex : mode « Wenner »). Le second consiste à réaliser l'injection à partir de plaques métalliques placées au dessus et en dessous de l'échelle (cf. Figure 3.7) (mode « Transmission »). Ce second mode s'est avéré particulièrement intéressant (contrairement à ce que j'envisageais à l'origine) car l'effet des plaques sur la mesure est très faible. Pour quantifier et valider cela, j'ai modélisé la sensibilité (cf. section 3.3) des deux modes d'acquisition (figure 3.9). Ce résultat confirme bien, pour le mode transmission, contrairement au 1^{er} mode, que seules les électrodes de potentiels sont sensibles à la mesure du fait du confinement des lignes de courant entre les plaques extérieures.

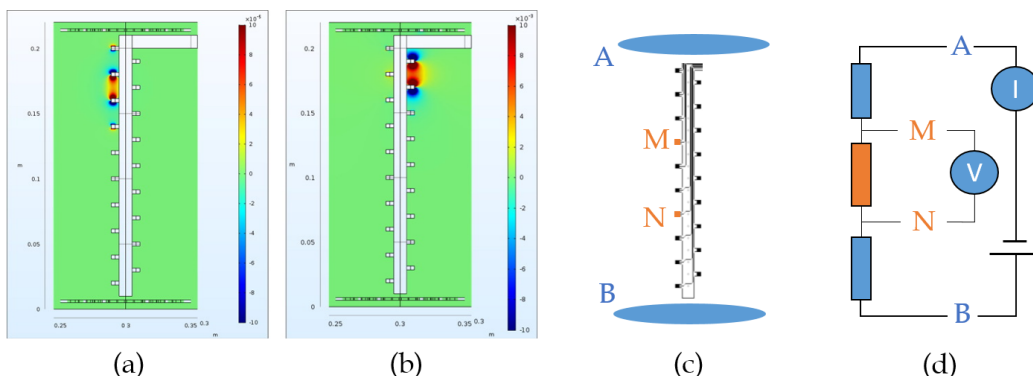


FIGURE 3.9: Résultat de modélisation de la sensibilité d'un quadripôle en mode (a) transmission et b) Wenner. c) Schéma du mode transmission et d) schéma électrique équivalent.

Ce résultat amène à un résultat intéressant illustré sous forme de schéma électrique équivalent (figure 3.9.c et d). Cette représentation montre, si les disques d'injection sont suffisamment grands, que le matériau entre l'électrode A et M (et entre B et N) équivaut à une résistance de contact, donc que les électrodes de transmission n'ont pas d'impact sur la mesure.

3.1.4 Résultats essentiels

L'IRE repose sur une mesure théoriquement « simple » mais qui pour des considérations pratiques rendent le matériel couteux. J'ai participé au développement à la fois d'une sonde de résistivité et d'un système de mesure à coût maîtrisé présentant l'avantage de pouvoir être multiplié, déployé et immobilisé autant que nécessaire. Ce système possède l'avantage second de permettre un déclenchement à distance et/ou en lien avec une autre mesure (ex : teneur en eau). Cela doit permettre d'optimiser les acquisitions limitant ainsi le coût d'un monitoring.

D'un point de vue personnel, ma participation à ces deux thématiques de Recherche, m'a permis de prendre du recul sur la notion de mesure et ce qu'elle implique d'un point de vue instrumental (électronique) et métrologique. Ce travail m'a amené à proposer des solutions pertinentes pour une problématique de surveillance pour l'ANDRA.

3.2 IRE : Modélisation numérique

Les méthodes géophysiques n'occuperaient pas leur place dans le monde économique si les outils de modélisation numérique n'avaient permis leur essor. En effet, pour obtenir un résultat d'imagerie les méthodes géophysiques nécessitent la résolution d'un problème inverse qui lui-même emploie un problème direct. Pour ce dernier, le recours aux outils de modélisation tels que les éléments finis est aujourd'hui rentré dans l'ingénierie commune.

3.2.1 Théorie

Le problème direct consiste à simuler numériquement la mesure à 4-points préalablement décrite. Cette modélisation repose sur l'exploitation des équations de Maxwell et plus particulièrement sur l'utilisation de la loi d'Ohm locale (Equation 3.1).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (3.1)$$

où \vec{J} symbolise la densité de courant ($A.m^{-2}$), σ la conductivité électrique (inverse de la résistivité électrique) (S/m) et \vec{E} le champ électrique ($V.m^{-1}$). En utilisant le théorème de la divergence du flux nous pouvons déduire du Théorème d'Ampère que :

$$-\nabla \cdot \vec{J} = 0. \quad (3.2)$$

Finalement, sachant (3.1) et que le champ électrique dérive du potentiel scalaire (V) ($\vec{E} = \nabla V$), nous obtenons la formule satisfaisant le potentiel V :

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0. \quad (3.3)$$

Cette formule est définie pour un domaine ouvert \mathcal{V} correspondant dans notre cas au sous-sol. Pour formuler un problème bien posé, cette équation s'accompagne de conditions de frontière. Tout d'abord, à l'infini, nous imposons la nullité du potentiel (figure 3.10.a). Deuxièmement, à la frontière correspondant à l'interface sol/air, nous imposons un flux de courant nul, soit $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$. Ceci se traduit physiquement par le fait que l'air joue le rôle d'isolant parfait. Il reste à simuler le terme source correspondant à l'injection de courant au niveau d'une électrode. Conventionnellement, nous utilisons un point source (dirac) localisé sur le sol. Ainsi, le problème à résoudre consiste à trouver le potentiel V satisfaisant l'expression :

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -I\delta(\vec{r} - \vec{r}_s) & \text{dans } \mathcal{V} \\ \sigma \nabla V \cdot \vec{n} = 0 & \text{sur } \mathcal{S} \\ \lim_{\infty} V = 0 \end{cases}, \quad (3.4)$$

où $\delta(\vec{r} - \vec{r}_s)$ représente une distribution de Dirac localisée à l'électrode r_s . Ainsi, ce problème aux frontières est reconnu n'avoir qu'une solution unique (Hadamard, 1902). le système 3.4 montrant qu'il y a additivité des sources, nous pouvons découper une mesure « 4-points » en deux injections de courant. Ce découpage permet ainsi de limiter le nombre de modélisations à N_e , ce qui est bien souvent très inférieur au nombre de mesures à 4-points (avec N_e le nombre d'électrodes). La figure 3.10.a) schématise le problème avec les conditions de frontières.

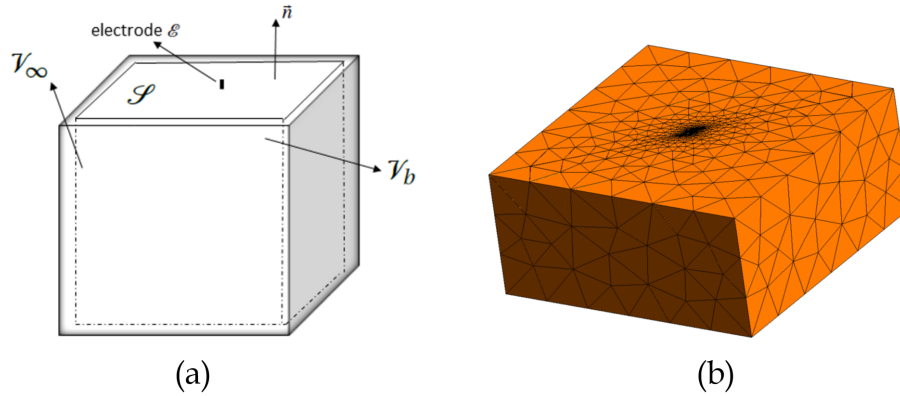


FIGURE 3.10: a) Schéma du modèle numérique et ses conditions de frontières. b) Exemple de modèle 3D maillé.

Ainsi, la méthode nécessite de résoudre l'équation de Poisson régissant la diffusion d'un courant électrique sur une géométrie au préalable maillée (Figure 3.10.b).

En pratique, la mesure est réalisée sur un milieu tellement étendu qu'il peut être considéré infini. Pour sa modélisation, le milieu est nécessairement fini tout en devant décrire le comportement d'un milieu infini. Ainsi, le potentiel nul (Dirichlet) présent sur les frontières inférieure et latérales n'est réaliste que si ces frontières sont suffisamment éloignées des électrodes sources. De cette manière, le potentiel V est suffisamment faible et peut être considéré nul. Cependant, cela implique un domaine de taille élevée pour ne pas impacter la distribution de potentiel à proximité des électrodes entraînant un coût machine important.

Pour contourner cette limitation, le code d'imagerie géo-électrique 3D que j'ai développé (EResI-3D, section 1.12) a subi un relifting dans le cadre du Post-doctorat de Sam Taoum (section 1.9.2, encadrements post-doctoral) dirigé par C. Fauchard (Cerema Rouen) et A. Tonnoir (INSA Rouen) (cf. Projet Télé détac, section 1.7.1). Ces modifications implémentées dans le cadre du logiciel PyMERI-3D concernent notamment l'utilisation de nouvelles conditions de frontières pour simuler cette décroissance du potentiel à l'infini. Pour cela, la méthode des éléments infinis enrichissant les éléments finis classiques par des fonctions avec un support infini (Bettess, 1977) a été utilisée.

La figure 3.11 présente l'erreur commise par l'utilisation de conditions de frontières de type a) Dirichlet (classique), b) Bettess (éléments infinis) et c) une nouvelle formulation d'éléments infinis (Taoum et al., 2020b). Pour la lecture de cette figure, chaque élément des matrices correspond à une erreur (%) pour une électrode de potentiel (colonnes) et une électrode de courant (lignes). Ainsi comme déjà abordé, nous pouvons recalculer à partir de cette matrice tous les quadripôles $ABMN$ issus d'un protocole d'acquisition. Cette méthode de présentation du résultat de modélisa-

tion permet ainsi de représenter toute l'information (issue des mesures) disponible. Le problème étant commutatif la matrice est symétrique. Ces travaux suggèrent que l'utilisation de fonctions à support infini permet de limiter l'erreur de modélisation tout en limitant fortement le maillage nécessaire à une résolution en éléments finis, limitant ainsi le coût calculatoire.

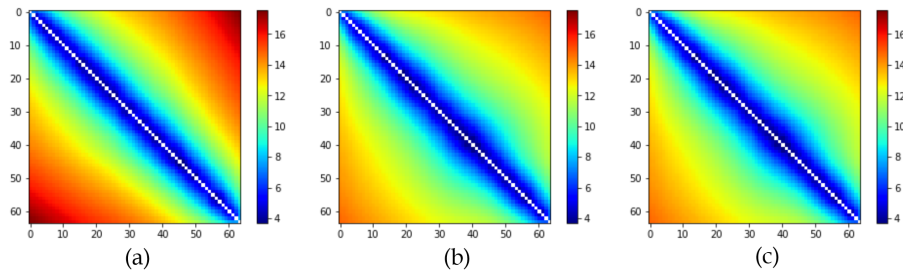


FIGURE 3.11: Erreur de modélisation du potentiel en % pour trois types de conditions de frontières a) Dirichlet b) Bettes et c) une nouvelle formulation. Modifié d'après Taoum et al., 2020b.

3.2.2 Géométrie & photogrammétrie

Pour obtenir un résultat de modélisation précis et représentatif des conditions réelles de mesure, il est nécessaire de simuler finement le milieu investigué. Ceci intègre donc une prise en compte précise à la fois de la géométrie (topographie) *a minima* à proximité des électrodes et de la géométrie des électrodes (Badr et al., 2019).

Suite à une collaboration avec C. Fauchard (Cerema Rouen), j'ai proposé l'utilisation de la photogrammétrie pour obtenir la géométrie du milieu pour des applications d'*IRE*. Cette méthode, dont le principe ne sera pas détaillé ici, permet de fournir un nuage de points représentant la surface en *3D* du milieu investigué (Pierrot Deseilligny et Clery, 2012). Cette méthode est actuellement en plein essor du fait de l'amélioration conjointe des capacités de traitement des ordinateurs, des drones et des appareils photographiques. À titre d'exemple, un « simple » smartphone haut de gamme intègre aujourd'hui une caméra avec une résolution de 108 MPx.

En dehors de ces considérations, j'affectionne particulièrement cette méthode pour sa simplicité (apparente) et son adaptabilité sur le terrain. En effet, l'*IRE* nécessite d'avoir une connaissance précise de la géométrie à proximité des électrodes de mesure. Par conséquent, le protocole d'acquisition peut être adapté rapidement sur le terrain pour renforcer la résolution sur ces zones.

Les codes *IRE-3D* que j'ai développés permettent une prise en compte explicite des résultats photogrammétriques. La figure 3.12 présente un exemple de méthodologie développée pour obtenir, à partir d'un nuage de points, un maillage *3D* tétraédrique optimisé pour une résolution du problème géo-électrique en éléments finis.

Cette méthodologie appliquée à l'étude de recul du trait de côte est présentée figure 3.13. La figure 3.13.a) présente le résultat photogrammétrique obtenu par survol d'un drone sur la zone auscultée avec la position des électrodes d'une campagne *IRE-3D* en rouge. La figure b) présente le résultat d'une modélisation consécutive à une injection de courant sur une des électrodes. La

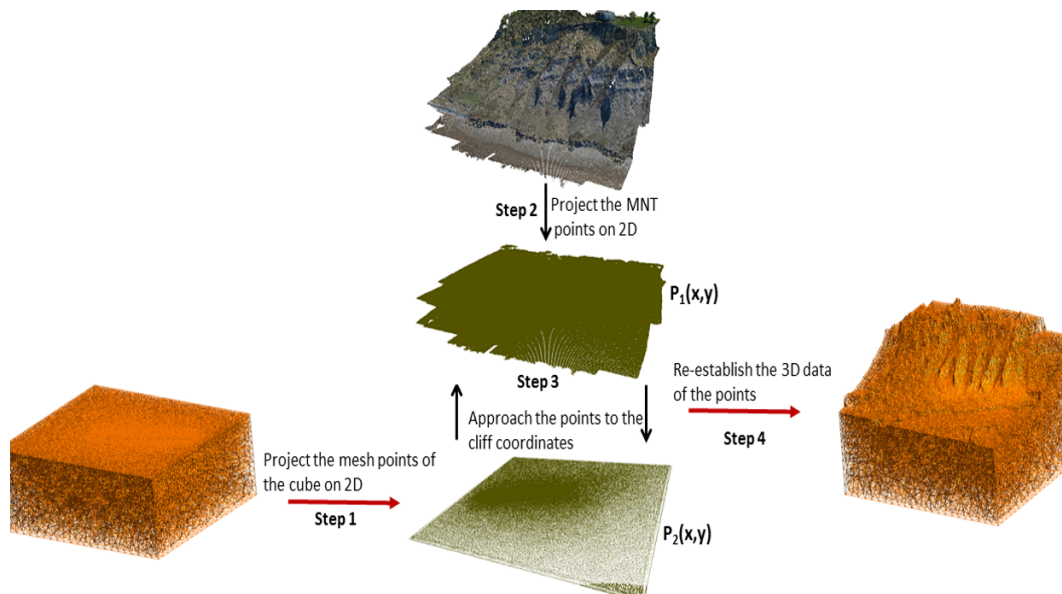


FIGURE 3.12: Procédure de maillage d'un milieu présentant une forte topographie à partir d'un modèle photogrammétrique (ou Lidar). Modifié d'après Taoum et al., 2020b

figure 3.13.c) présente l'erreur liée à la topographie sur la mesure, soit entre des mesures sur un milieu avec et sans topographie. Ce résultat permet d'identifier les mesures mais également les zones où la topographie a un fort effet sur la mesure (ici jusqu'à 35 %).

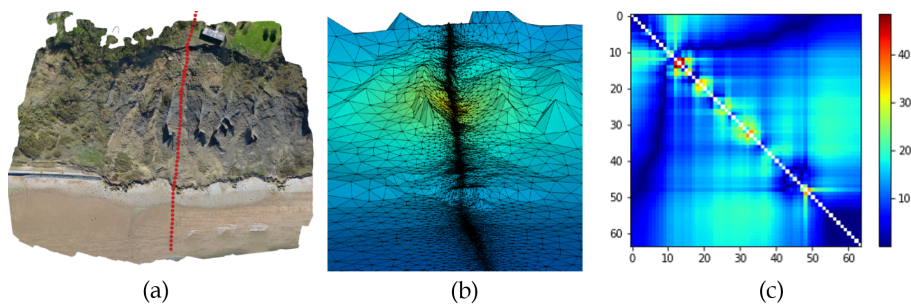


FIGURE 3.13: Résultats a) photogrammétrique des Vaches Noires (Houlgate, 14), b) de modélisation numérique pour une électrode d'injection vue en perspective. c) Effet de la topographie sur la mesure (%). Modifié d'après Taoum et al., 2020b.

La figure 3.14 présente un second résultat illustrant l'effet de la topographie/géométrie des milieux auscultés sur la mesure. Ces résultats synthétiques n'utilisent pas de modèle photogrammétrique. Ce résultat va plus loin que le précédent en intégrant l'effet d'un corps 3D indésirable mais « connu » sur la mesure. La figure 3.14 présente a) un digue de barrage hypothétique de résistivité $1000 \Omega.m$ avec un réservoir d'eau de $100 \Omega.m$. Sur cet ouvrage un quadripôle linéaire est positionné en surface longitudinalement à la digue. Plusieurs positions sur la digue sont testées ainsi que plusieurs espacements inter-électrodes. La figure 3.14 présente l'effet en % sur la mesure pour ce couple de paramètres d'entrée. En poussant plus loin ce travail, Fargier et al. (2014) montrent que la topographie peut avoir jusqu'à 15% d'effet sur la mesure, tandis que le réservoir

d'eau peut avoir jusqu'à 35% d'effet sur la mesure dans ces conditions de modélisation.

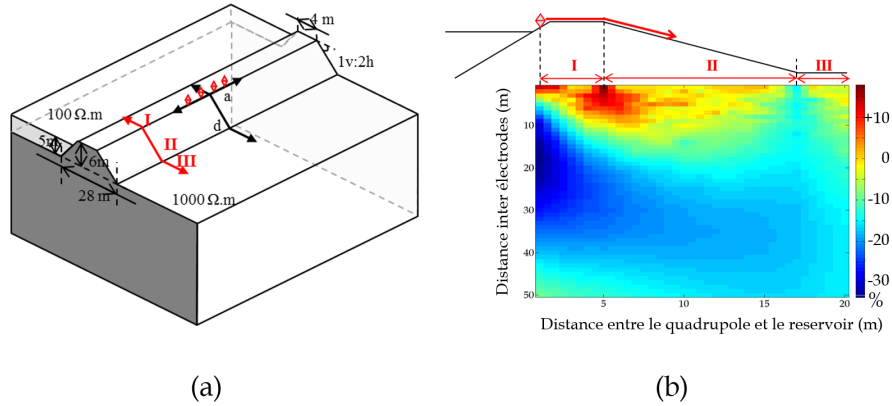


FIGURE 3.14: a) Schéma du modèle numérique utilisé pour réaliser l'étude paramétrique. b) Résultat de l'étude paramétrique avec en haut le schéma de position du quadripole transversalement sur la digue de canal. Modifié d'après Fargier et al. (2014)

Il est extrêmement complexe de définir un critère « général » liant cette erreur de mesure aux variations à proximité d'une électrode. Seuls Fargier et al. (2017) proposent un critère simple basé sur le rapport adimensionnel de la distance entre deux électrodes « en ligne droite » et la distance à la surface du milieu. Cependant, ce critère simple n'est pas applicable pour des milieux présentant une topographie vraiment importante.

3.2.3 Rugosité & Photogrammétrie

Nous proposons dans cette section une étude menée sur l'effet de la rugosité surfacique d'un milieu sur une mesure de résistance à 4-points. La finalité est de définir un critère objectif permettant de quantifier l'effet d'une topographie sur la mesure. Ce travail fait suite aux limitations du critère cité au paragraphe précédent.

D'après la théorie fractale initiée par les travaux de Mandelbrot (1967), le critère précédent tendrait vers 0 pour la côte de la Bretagne, limitant son utilisation. Suite à ces travaux, la théorie fractale s'est complétée et sont apparues des applications dans de nombreux domaines dont les géosciences (Sayles et Thomas, 1978). Ces travaux stipulent que les variations de topographie peuvent s'interpréter au sens d'une rugosité présentant des propriétés auto-affines (fractales). Dans ce cadre, les variations d'altitude $Z(x)$ d'un milieu peuvent être interprétées comme une juxtaposition de l'effet de plusieurs longueurs d'ondes (Eq. 3.5) (Peitgen et Saupe, 1988; Jacobs et al., 2016).

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m A_i \cos(k_i x + \varphi) \quad (3.5)$$

avec m un entier définissant un jeu discret de fréquences spatiales, k le nombre d'onde et φ la

phase. A représente l'amplitude associée à chaque composante i . Avec cette méthode, des outils plus complexes basés sur la théorie fractale peuvent être utilisés. Le lecteur intéressé est ici renvoyé à la littérature scientifique pour plus de détails sur ces outils (références proposées dans les travaux de Fargier et al. (2018)). La figure 3.15 présente trois exemples (bleu, rouge ou noir) représentatifs de variations topographiques présentant un composante fractale. Pour chaque ligne une variation du paramètre fractal H permet d'obtenir différents niveaux de rugosité (Mandelbrot, 1985).

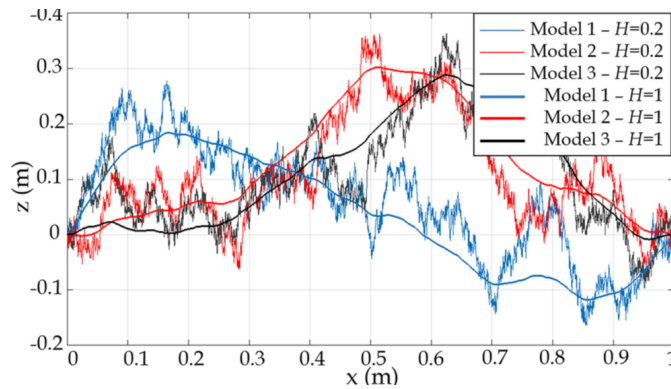


FIGURE 3.15: Comportement de trois modèles présentant à la fois une rugosité importante ($H=0.2$) et une faible rugosité ($H=1$). D'après Fargier et al. (2018).

Cette base théorique m'a permis d'élaborer une méthodologie permettant de caractériser l'effet de paramètres de rugosité sur la mesure de résistance. Pour cela, j'ai développé un modèle 2D axi-symétrique représentant les variations topographiques précédentes. Un maillage adaptatif (Sloan, 2013) est alors employé pour garantir une précision importante lors de la modélisation. La figure 3.16 présente la procédure de modélisation employée.

Cette procédure est répétée sur une tirage aléatoire de 1500 courbes présentant différents paramètres de rugosité (dont H). Plusieurs paramètres quantifiant la rugosité sont ensuite évalués *a posteriori* sur ces courbes :

- R_q : Erreur quadratique moyenne : $R_q = \sqrt{\frac{1}{le} \int_0^{le} Z^2(x) dx}$;
- R_a : Erreur absolue : $R_a = \frac{1}{le} \int_0^{le} abs(Z(x)) dx$;
- R_{sk} : Skewness/asymétrie : $R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} [\frac{1}{le} \int_0^{le} Z^3(x) dx]$;
- R_{ku} : Kurtosis/applatissement : $R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} [\frac{1}{le} \int_0^{le} Z^4(x) dx]$.

Avec le la longueur de la courbe définie par des variations de hauteur Z suivant x . La figure 3.17.a) présente la distribution statistique des paramètres de rugosité mesurés à partir des 1500 modèles simulés. De plus amples informations sur la méthodologie et les résultats sont présentés dans Fargier et al. (2018).

La figure 3.17.b) résume les résultats de cette étude synthétique dont l'objectif est de pouvoir quantifier l'erreur de modélisation liée à l'effet du nombre de mailles définissant une rugosité. Nous regardons ainsi si N mailles sont suffisantes pour modéliser une certaine rugosité. Ce résultat montre que pour $|R_q * R_{sk}| > 0.1$, il est nécessaire d'avoir 10 points topographiques décrivant la rugosité pour avoir une erreur de modélisation inférieure à 10%.

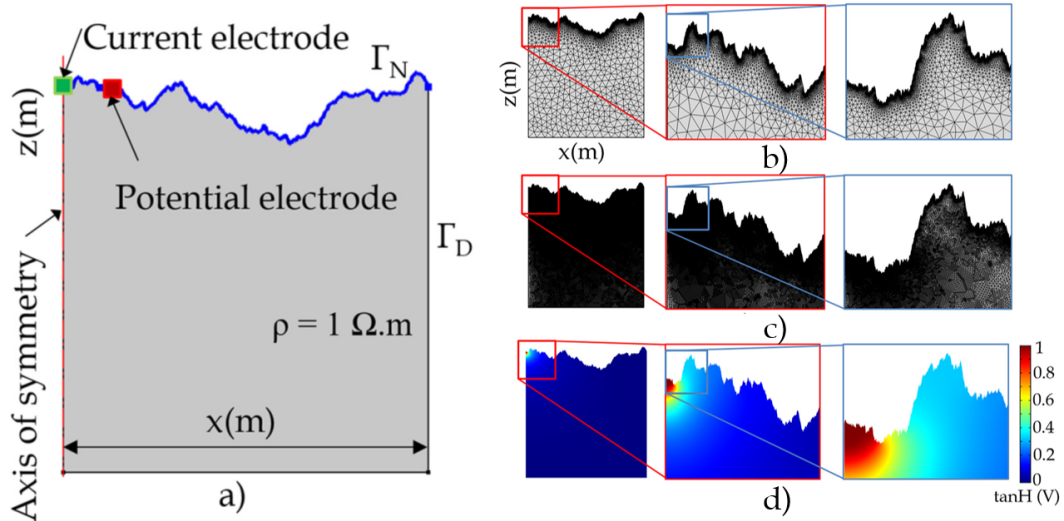


FIGURE 3.16: Méthodologie de modélisation de l'effet de la rugosité de surface sur la mesure électrique. a) Principe du modèle axi-symétrique avec conditions de frontières, b) premier niveau de maillage, c) second niveau de maillage (adaptatif) et d) résultat de modélisation. Pour b), c) et d) deux niveaux de grossissement sont proposés. D'après Fargier et al. (2018).

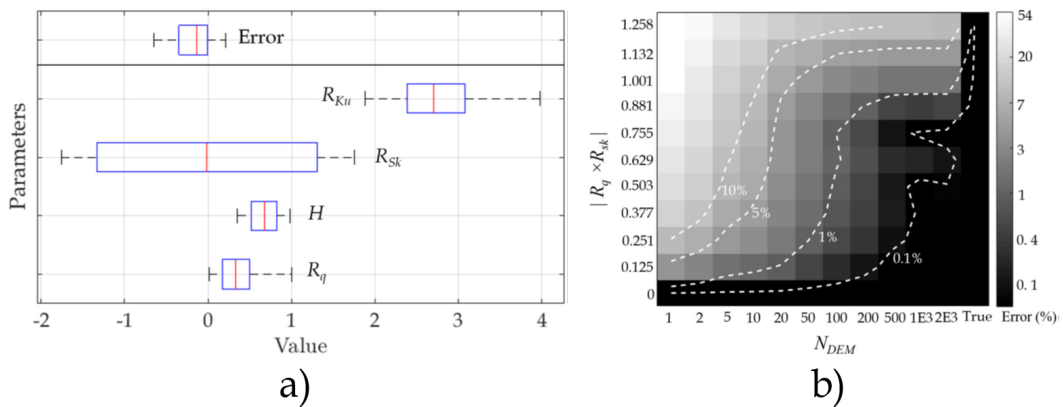


FIGURE 3.17: a) Distribution statistique des paramètres de rugosité des 1500 modèles simulés. b) Erreur de mesure liant la rugosité et le nombre de points de maillage simulant la rugosité réelle. Modifié d'après Fargier et al. (2018).

Une étude de ces 1^{ers} résultats a permis de montrer que certains paramètres de rugosité (H et R_q) joue un rôle prépondérant sur la mesure. Pour valider cela, un scanner photogrammétrique a été développé (section 1.13) (Dore et Fargier, 2017). Ce scanner présenté en figure 3.18 a été conçu à bas coût (<100 €) dans un objectif de diffusion au sein du Réseau Scientifique et Technique du ministère de l'écologie pour des applications en mécanique des sols. À ce travail, se sont ajoutés de nombreux codes et une méthodologie pour transformer le nuage de points obtenu à l'issu du traitement photogrammétrique en modèle maillé utilisable pour des besoins d'imagerie.

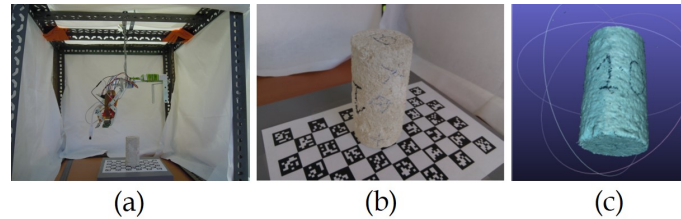


FIGURE 3.18: Scanner photogrammétrique du Cerema, a) 1^{er} prototype du scanner, b) cliché de l'éprouvette sur un damier de tags « Aruco » et c) résultat photogrammétrique. Modifié d'après Dore et Fargier (2017).

La figure 3.19 illustre quatre scans issus d'une étude sur plus de 30 blocs de matériaux extraits d'une carrière souterraine. À partir de ces scans, une étude de l'effet de la rugosité sur la mesure *4-points* en fonction du maillage est réalisée.

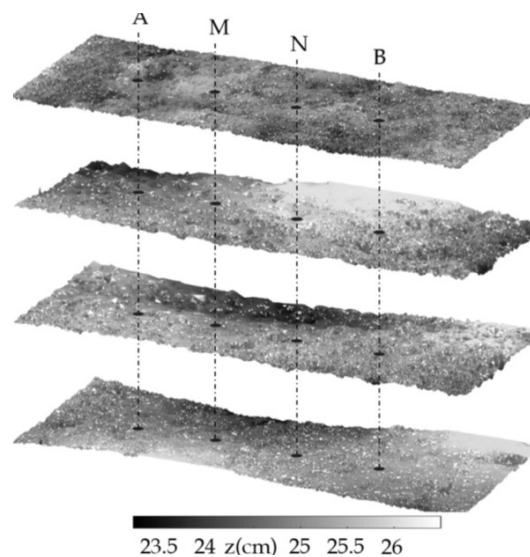


FIGURE 3.19: Rugosité de surface de quatre blocs par photogrammétrie et quadripole de mesure (ABMN). D'après Fargier et al. (2018).

Pour les 30 blocs scannés, huit niveaux de maillage sont testés, à savoir 1, 2, 5, 10, 50, 100, 500 et 1000 mailles entre électrodes (figure 3.20) pour modéliser ces rugosités. Pour ces niveaux de maillage, on estime ensuite, l'erreur (%) réalisée pour chaque bloc. Ce résultat indique par exemple, pour le bloc 1 (#), que 500 points sont nécessaires pour avoir une erreur de 0.1% sur la mesure. Avec moins de 10 points, l'erreur sur la mesure est cette fois-ci supérieure à 5%. Suivant

le bloc étudié, un maillage que l'on peut considérer élevé (10 points) entraîne des erreurs supérieures à 10%. Une analyse plus poussée des résultats montre que les paramètres H et R_{sk} ont un impact fort sur la mesure. C'est en particulier pour ces milieux que la rugosité est difficilement modélisable.

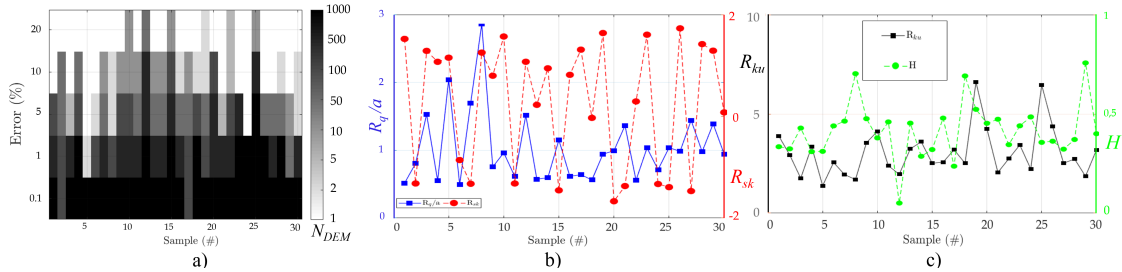


FIGURE 3.20: a) Relation entre nombre de points inter-électrodes pour définir une rugosité, erreur de modélisation et bloc étudié. b) Valeur de R_q et R_{sk} des différents blocs et c) valeurs de H et R_{ku} des différents blocs. modifié d'après Fargier et al. (2018).

Ce travail bien que limité ici à des essais en laboratoire, pourrait avoir un impact important sur la communauté. Actuellement, seule la position des électrodes (en z) est, au mieux, prise en compte. Cependant, nous montrons qu'une rugosité de surface moyenne peut avoir un impact important sur la mesure si un minimum de points intermédiaires n'est pris en compte. Cependant, un effet réellement impactant n'est anticipé que pour les études en laboratoire, pour les mesures en milieu rocheux et en volcanologie.

3.2.4 Rugosité 3D & hétérogénéité des milieux

La modélisation numérique bien que partie intégrante du processus d'inversion, n'est pas limitée à cette seule utilisation. Elle doit permettre également d'anticiper et de quantifier des phénomènes physiques simplifiés (ex : rugosité de surface).

Elle peut également être utilisée pour simuler l'effet de l'hétérogénéité interne des milieux auscultés. L'objectif étant de pouvoir optimiser la mesure (position des électrodes, séquences d'acquisition), brouter des modèles synthétiques et ainsi tester la robustesse d'algorithmes d'inversion.

Dans le cadre du développement de la sonde de résistivité (section 3.1.3) nous obtenons des résultats bruités dont l'origine provient en partie de l'hétérogénéité naturelle du matériau. Par conséquent, nous avons proposé l'utilisation d'outils de modélisation numérique (éléments finis) pour simuler l'effet de la présence d'hétérogénéités représentatives du béton.

Pour simuler cette hétérogénéité divers modèles peuvent être employés. J'ai sélectionné deux méthodes de simulation diamétralement opposées. Le 1^{er} modèle est basé sur la simulation d'un champ gaussien 3D (figure 3.21.a) (Räss et al., 2019) tandis que le second permet l'insertion de granulats discrets dans un volume fini (figure 3.21.b) (Mollon, 2018).

Pour évaluer l'effet de l'hétérogénéité sur la mesure, 50 distributions aléatoires sont simulées

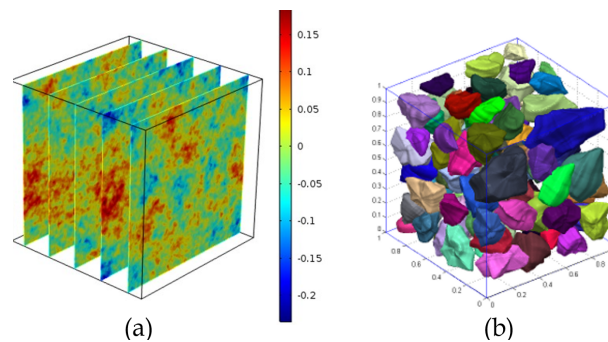


FIGURE 3.21: a) Champ gaussien 3D centré sur une valeur nulle. b) modèle discret de granulats d'après Mollon (2018).

par jeu de paramètres définissant les deux modèles. Ensuite, au sein de ces distributions, une mesure d'un quadripôle avec les sondes ANDRA est réalisée. Ce travail permet ainsi de montrer que statistiquement, l'effet de l'hétérogénéité sur la mesure, peut être supérieur à la mesure. Dans les conditions « représentatives » des essais de Joanna Badr (section 1.9.1), cet effet est rapidement supérieur à 20% expliquant les résultats obtenus.

J'espère que ce type de développement permette à terme l'optimisation de la mesure réalisée avec les sondes ANDRA. En effet, ces travaux montrent que des quadripôles avec un espacement inter électrodes deux fois supérieurs divise l'effet sur la mesure par cinq (aspect intégrant de la méthode).

3.2.5 Résultats essentiels

La modélisation numérique représente une de mes compétences principales. Les travaux que j'ai menés dans ce domaine ont été largement valorisés (Fargier et al., 2014; Fargier et al., 2018; Fargier et al., 2019; Taoum et al., 2020b; Taoum et al., 2020a) et intègrent le développement de plusieurs codes en éléments finis (section 1.12, EResI-3D, PyMERI-3D, RugElec...)

En particulier, j'ai tiré profit de cet outil pour améliorer ma compréhension de phénomènes physiques liés notamment aux variations de topographie sur la mesure.

Ces travaux ont connu un aboutissement intéressant concernant la juxtaposition d'outils initialement dédiés aux objets « fractals » et donc à l'étude de la rugosité des surfaces. Ces travaux, que je considère achevés, m'ont apporté des compétences utiles pour la caractérisation et la modélisation de variations dans l'espace réalistes.

3.3 IRE : Problème Inverse

3.3.1 Théorie

En règle générale et en particulier pour l'étude des *SNO* nous partons d'observations (données) sur lesquelles nous réalisons des hypothèses de processus (loi physique) en lien avec des propriétés du milieu. Cette volonté d'obtenir une inférence, nécessite la définition de lois de constitution du problème physique (problème direct), et la définition du milieu modélisé. Ainsi, si le problème direct peut être réduit à la relation 3.6, le problème inverse peut également se simplifier en équation 3.7.

$$\mathcal{F}(m) = d \quad (3.6)$$

$$m = \mathcal{F}^{-1}d \quad (3.7)$$

L'objectif est donc de retrouver les propriétés d'un modèle physique m à partir de données d et du processus physique \mathcal{F} reliant ces deux quantités. En pratique, d est souvent une collection de données discrètes et bruitées (eq. 3.8) :

$$d = \mathcal{F}(m_{\text{true}}) + \mu \quad (3.8)$$

$$= d_{\text{true}} + \mu \quad (3.9)$$

Avec d_{true} une expression des données issues du modèle vrai m_{true} sans ajout de bruit. Ce bruit, dont il est difficile d'identifier la nature exacte, peut entraîner de lourdes conséquences sur le résultat d'un processus inverse. Nous n'entrerons pas plus dans la théorie des problèmes inverses déjà fortement documentée (Menke, 1984; Tarantola, 2005). Nous assumerons que nous situons notre problème dans le cadre d'un problème non-linéaire et sous-déterminé. À ce titre, le problème inverse est linéarisé sous la forme 3.10.

$$Gm = d \quad (3.10)$$

Avec G la matrice des dérivées de Fréchet, aussi appelée matrice de sensibilité. Dans le cadre des travaux présentés ici nous emprunterons toujours la formulation proposée dans Fargier (2011) basée sur la méthode de l'état adjoint (Geselowitz, 1971; Park et Van, 1991). Le problème ainsi défini est connu pour être mal posé (Hadamard, 1902), rendant le calcul instable en lien également avec le bruit sur les données. Afin de stabiliser le processus d'inversion, un terme de régularisation est souvent ajouté à la fonction objectif (Tarantola, 2005).

Cette régularisation est souvent pondérée par un paramètre de régularisation, noté λ , connu sous le nom de *damping factor* jouant le rôle de compromis entre la minimisation de la fonction-

nelle sur les données et sur le modèle (M. H. Loke et Barker, 1995). Ainsi, ce paramètre permet de trouver un modèle m minimisant le résidu $r = Gm - d$ mais ne nécessitant pas de transformation trop importante du modèle de référence m_{ref} (eq. 3.11).

$$\Gamma = \Gamma_d + \lambda \Gamma_m = \frac{1}{2} \|Gm - d\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} \|L(m - m_{ref})\|_2^2 \quad (3.11)$$

Avec L une matrice de régularisation adaptée à l'introduction d'informations *a priori* sur les données. Cette fonctionnelle se résout assez aisément en adoptant une formulation par moindres carrés (eq. 3.12) :

$$(G^T G + \lambda L)m = G^T d \quad (3.12)$$

Qui peut prendre la formulation compacte 3.13 :

$$\begin{bmatrix} G \\ \sqrt{\lambda} W \end{bmatrix} \delta m = \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

La résolution de ce système peut ensuite aisément être réalisée avec des algorithmes de type *QR* prenant en compte le caractère épars des données. La matrice $L = W^T W$ permet de régulariser le problème inverse en quantifiant la « rugosité » du milieu (à prendre au sens de la variabilité du milieu). Pour quantifier cette rugosité, j'emploie classiquement la formulation 3.14 :

$$W_{i,j} = \begin{cases} -1 & i = j \\ 0 & j \notin \Psi^i \\ \frac{1}{N} & j \in \Psi^i \end{cases} \quad (3.14)$$

Avec Ψ^i les éléments tétraédriques voisins de i , N_i représente le nombre de voisins i ($N_i=1,2,3$ ou 4). Des éléments dits voisins partagent une même face (triangle).

Nous avons proposé dans *PyMERI-3D* une version généralisée de cette matrice de lissage ne tenant pas uniquement compte des voisins par face mais également ceux présentant une arête en commun ou simplement un sommet. L'apport relatif de ces types de voisins est fixé grâce au scalaire s (eq. 3.15). Ces travaux, en cours de valorisation, permettent une régularisation plus robuste et paramétrable à dire d'expert.

$$W_{i,j}^* = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & j \notin \Psi^i \\ -\frac{p_j^s}{\sum_j p_j^s} & j \in \Psi^i \end{cases} \quad (3.15)$$

3.3.2 Topographie et Inversion

Une prise en compte explicite fine de la géométrie du milieu ausculté est nécessaire afin de limiter toute génération d'artéfacts dans le résultat d'imagerie (Tong et Yang, 1990). De plus, bien que la quantification d'un effet de la géométrie sur la mesure soit assez aisée, quantifier la propagation d'une erreur durant le processus d'inversion est extrêmement complexe.

Pour étudier cette problématique, je me suis penché sur les données *LiDAR* et *IRE-3D* obtenues dans le cadre de la thèse d'Angélie Portal (Portal et al., 2019). La figure 3.22 présente les résultats d'une étude portée sur la caractérisation interne du Puy-de-Dôme (63). La figure a) présente les profils *IRE* réalisés, à gauche sur tout le cratère ou à droite sur la partie sommitale du volcan. La figure b) présente le modèle d'inversion maillé. Le maillage plus fin souligne la position des lignes d'électrodes. Les résultats c) et d) présentent respectivement une coupe *2D* issue du bloc *IRE-3D* et son interprétation géologique. Ces résultats comparés à de l'imagerie par méthodes microgravimétriques et Tomographie Muon ont permis de montrer la complémentarité et la qualité du résultat d'*IRE-3D*. Une comparaison de ce résultat avec une inversion *3D* plus classique, n'utilisant pas de *MNT*, permet de localiser les zones où l'erreur de reconstruction se focalise. Ce travail permet pour ce cas précis d'évaluer où et comment l'erreur (liée au *MNT*) se propage lors de l'inversion.

J'ai entrepris une étude tout à fait similaire sur des données issues de campagnes *IRE-3D* sur les volcans : Hawaï, Mont Somma-Vésuve, Stromboli, Etna.

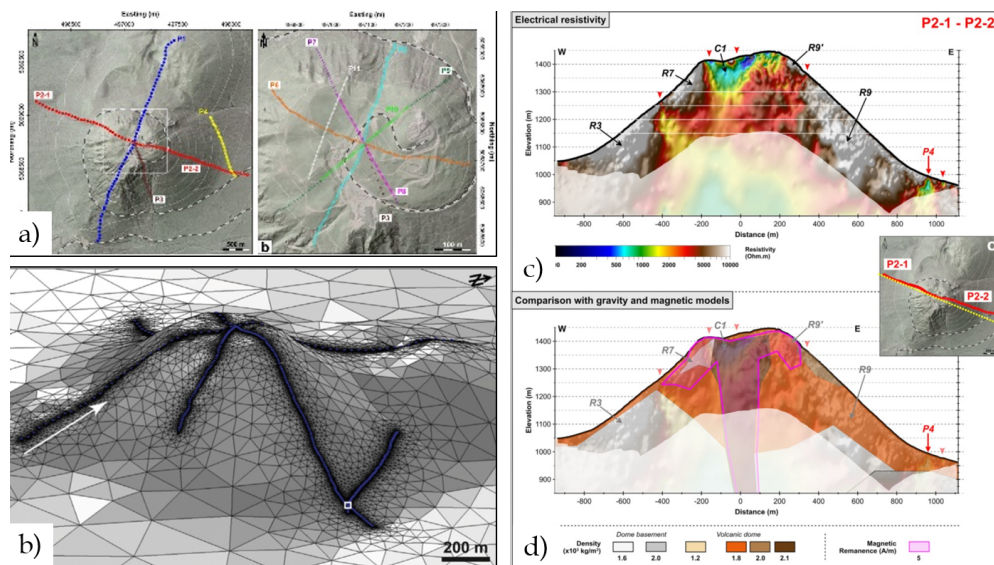


FIGURE 3.22: Etude du Puy-de-Dôme. a) Localisation des profils *IRE-2D* et b) modèle *3D* maillé du Puy-de-Dôme. c) Coupe *2D* extraite du résultat d'inversion *3D* et d) interprétation géologique. modifié d'après Portal et al. (2019).

Toujours dans le domaine des risques naturels, j'ai travaillé sur l'aptitude de l'*IRE* à évaluer la résistance des piliers de carrière souterraine au poids des terres sus-jacentes (Brady et Brown, 2006). Pour cette étude, trois ceintures de 64 électrodes étaient positionnées à 1 m, 1.5 m et 2 m de hauteur sur un pilier de 3 m de hauteur localisé dans une carrière de craie à Vendome (Fargier et al.,

2017). C'est dans ce cadre que je me suis le plus heurté à l'inaptitude des logiciels conventionnels à traiter des données issues de milieux fortement 3D. Par conséquent, j'ai développé toute une méthodologie combinant photogrammétrie (figure 3.23.a) et IRE-3D (Fargier et al., 2017).

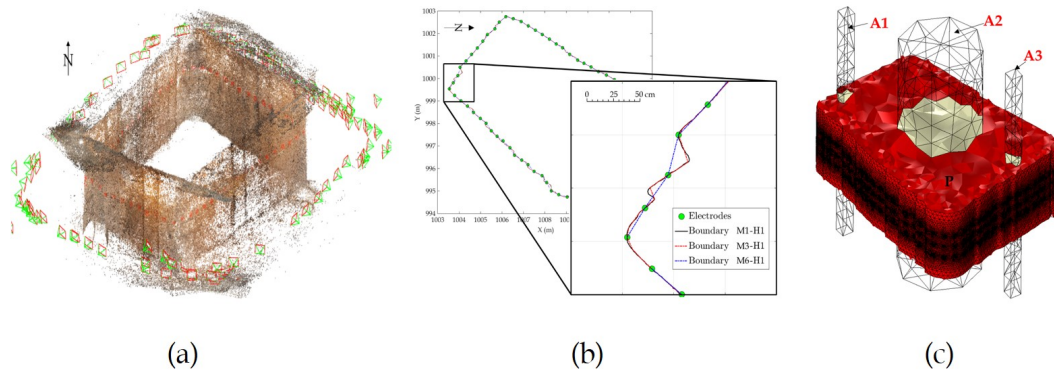


FIGURE 3.23: a) Nuage de points issu de la procédure photogrammétrique. b) En noir, contour issu du nuage de points à 1 m de hauteur. Les contours rouge et bleu sont des versions appauvries du précédent. Les ronds verts indiquent la position des électrodes. c) Partie centrale du modèle numérique synthétique 3D intégrant trois anomalies cylindriques (A1, A2 et A3). Modifié d'après Fargier et al., 2017.

Les figures 3.23.b) et c) présentent les résultats issus d'une étude synthétique portant sur ce pilier de carrière. L'objectif de l'étude est de quantifier l'effet de la précision du MNT du pilier sur l'inversion. Des données sont ainsi simulées sur un modèle synthétique présentant trois anomalies (3.23.c) et une précision/résolution « parfaite » de la géométrie du pilier.

Trois modèles de surface plus ou moins résolus (M1, M3 et M6) sont alors utilisés pour inverser les données simulées (Figure 3.23.b). La figure 3.24 présente les résultats d'inversion pour trois niveaux de résolution et quatre niveaux de bruit sur les données (0 à 10%). Sont présentés les coupes 2D du résultat d'inversion 3D à 1 m de hauteur. La figure de gauche présente le modèle « vrai ». Les figures de droite présentent les résultats d'inversion, (colonne) pour différents niveaux de bruit sur les données, (lignes) pour différents niveaux de finesse du modèle d'inversion.

En ne tenant compte que des résultats non bruités, ceux-ci montrent que le contour le plus résolu (M1 40 nœuds entre électrodes) fournit une tomographie presque parfaite avec une bonne détection des anomalies internes. Le modèle M3, composé de 5 nœuds entre électrodes, permet d'obtenir un résultat plus que satisfaisant tandis que le modèle M6, 0 nœud entre les électrodes, mène à de nombreux artefacts.

Concernant les inversions de données bruitées (bruit blanc gaussien), nous voyons que le résultat d'imagerie M1-10% de bruit permet une meilleure détection des anomalies et moins d'artefacts qu'une inversion M6-1% de bruit. Par conséquent, l'effet d'une mauvaise prise en compte de la géométrie du milieu est pire (dans cette proportion) qu'un bruit gaussien de 10%.

Cette étude fait écho aux résultats présentés en section 3.2.3 sur l'effet de la rugosité de surface. En effet, contrairement à la pratique, nous voyons qu'il est nécessaire de prendre en compte un nombre élevé de points entre électrodes pour obtenir un résultat d'inversion satisfaisant.

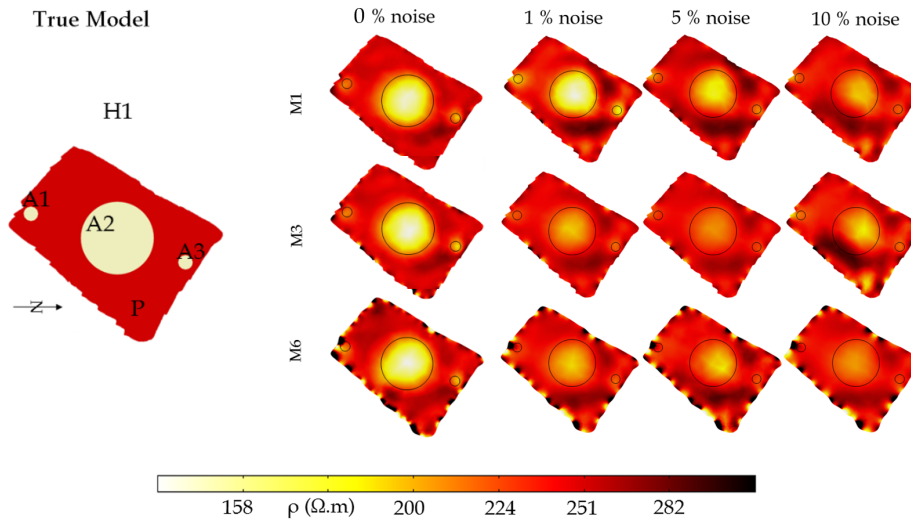


FIGURE 3.24: A gauche, modèle vrai issu du modèle $3D$ à la hauteur $H1$. À droite, coupes $2D$ issues des résultats d'inversion $3D$. Chaque colonne reprend un niveau de bruit différent. Chaque ligne représente l'utilisation d'un contour plus ou moins résolu pour l'inversion.

Finalement, ce résultat se trouve intervenir en parfaite concordance avec l'essor des méthodes photogrammétriques et des capacités machines. Ces résultats montrent que l'*IRE* est arrivée à un tournant nécessaire pour permettre l'auscultation d'ouvrages présentant une géométrie $3D$ complexe.

3.3.3 Stratégies d'inversion intermédiaires

La pratique commune en inversion consiste à définir un modèle discrétisé du *SNO* ausculté. Les 1^{ers} *SNO* auscultés étaient essentiellement $1D$ du fait de la seule disponibilité, à ce moment, d'outils d'inversion $1D$ (Ex : Le Sondage Électrique Vertical, SEV). Pour pouvoir traiter des cas plus complexes, présentant des variations à la fois verticales et horizontales, des procédures d'inversions $2D$ se sont imposées dans les années 90 (M. H. Loke et Barker, 1995). Enfin, sont arrivés les outils d'inversion $3D$ qui ont explosé à partir des années 2000, profitant de résistivimètres multi-canaux (parallélisables) et des capacités machines plus importantes.

Cependant, cet emploi de méthodes à dimension supérieure a toujours entraîné une complexité, un coût terrain (lié à l'acquisition) et un coût machine (calculatoire) supérieurs. Cette complexité peut même amener à desservir la méthode en renforçant la sous-détermination du problème inverse. Ainsi, lorsqu'un milieu est $1D$, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes $1D$, si celui-ci est nD , il est nécessaire d'évoluer vers du nD ($n=1$ à 4).

Cependant, un milieu n'est jamais complètement $1D$, nD ou même discret. C'est pourquoi, j'ai proposé la définition de stratégies d'inversion intermédiaires (Fargier et al., 2012; Jodry et al., 2017)

3.3.3.1 Imagerie entre 2D et 3D

Mon 1^{er} sujet de prédilection fut l'auscultation des digues. L'auscultation de ces ouvrages se heurte à un verrou scientifique lié à leur dimension. En effet, ces ouvrages présentent des variations de composition transversales et en profondeur importantes, ainsi que des variations longitudinales de composition plus faibles. De plus, plus de 8000 km de digues en France doivent être contrôlées dans le cadre du risque inondation. Il est donc nécessaire de disposer d'outils efficaces, donc haut rendement, pour leur auscultation.

Cependant, les outils d'inversion classiques 2D ou 3D ne sont pas adaptés au traitement des données issues de la pratique courante. Celle-ci consiste à réaliser des « panneaux électriques » (IRE-2D) longitudinalement à la digue sur la crête. En effet, une digue présente transversalement à la fois des variations topographiques et un réservoir d'eau. Ces éléments peuvent induire une erreur de modélisation jusqu'à 35% (figure 3.14). Pour ces raisons, j'ai développé des stratégies d'inversion intermédiaires. La figure 3.25 schématise le principe théorique de ces développements et l'apport de ces stratégies en fonction du type de terrain. Cette figure indique par exemple, lorsque le terrain est 2D, qu'une inversion 3D est peu efficace. De même, lorsque le terrain est 3D, une inversion 2D amène à de mauvais résultats. Dans ce cadre, j'ai développé les stratégies 2D⁺ et 3D⁻.

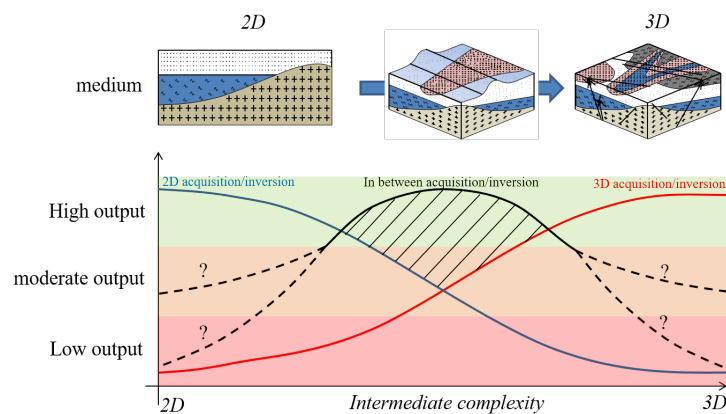


FIGURE 3.25: Guide sur l'apport des stratégies d'inversion suivant le milieu étudié.

Pour arriver à ces stratégies d'inversion, de nombreux choix ont dû être réalisés jusqu'à la méthodologie de maillage du problème inverse et direct. La figure 3.26 présente deux méthodes à double niveau de maillage (Günther et al., 2006), l'un pour le problème direct l'autre pour l'inversion, présentant des bénéfices et inconvénients. La première méthode permet de limiter fortement le nombre de mailles pour le problème direct ce qui limite les coûts calculatoires. Cela se fait au détriment de la justesse du calcul en particulier lorsqu'un nombre insuffisant de maille du problème direct est présent dans le maillage du problème inverse figure (3.26.a) (ce qui est impossible avec la seconde méthode, figure 3.26.b).

Stratégie 3D⁻

Cette stratégie est assez proche de la procédure d'inversion 3D classique (M. Loke et al., 2013) à la différence que seule une ligne d'électrodes peut constituer le jeu de données. En effet, la com-

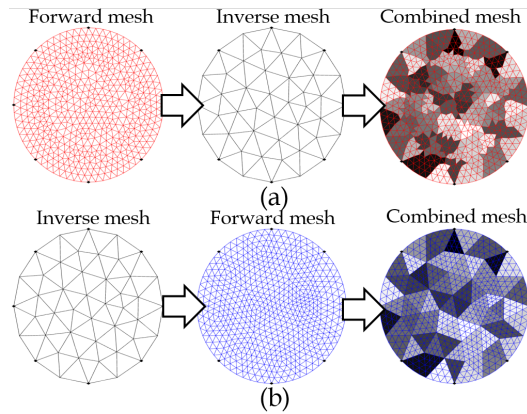


FIGURE 3.26: Méthodologies de discrétisation du problème inverse a) par agrégation de mailles du problème direct présentes dans une maille du problème inverse et b) par remaillage du problème inverse.

munauté scientifique refuse assez catégoriquement d'accepter qu'une inversion $3D$ puisse être réalisée sans acquisition $3D$; soit plusieurs lignes d'électrodes (quadrillage) s'interrogent mutuellement. Je suis conscient qu'une telle procédure est nécessaire pour reconstruire avec précision et robustesse un milieu $3D$. Cependant, une inversion beaucoup moins contrainte, mais utilisant une discrétisation $3D$ du milieu, peut donner des résultats tout à fait satisfaisants tout en maintenant un coût terrain limité (lié à l'acquisition).

La figure 3.27 présente les résultats d'inversion issus de cette stratégie appliquée à deux lignes d'électrodes positionnées chacune longitudinalement sur une digue (Jodry et al., 2017). Ces résultats ont permis de montrer qu'une caractérisation robuste de la digue est ainsi permise mais avec une résolution faible transversalement. De plus, en comparaison d'un traitement $2D$ conventionnel, ces travaux ont permis de localiser des anomalies transversales tout en maintenant un coût terrain égal aux campagnes $2D$.

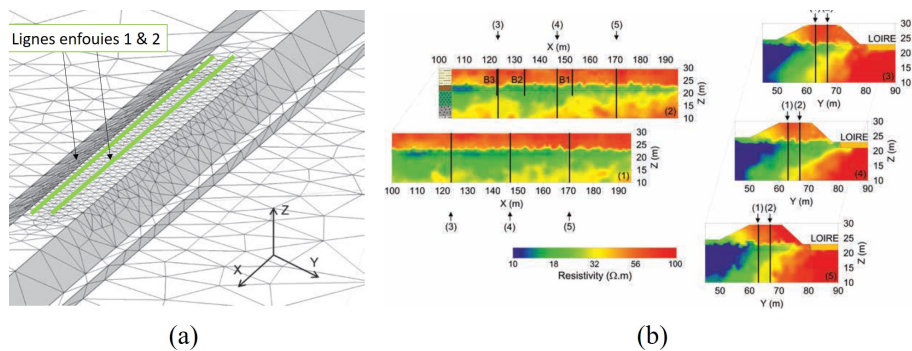


FIGURE 3.27: Inversion $3D$. a) modèle $3D$ maillé d'une digue de Loire avec position de deux lignes d'électrodes en vert. b) plusieurs coupes issues du modèle $3D$ inversé. Modifié d'après Jodry et al., 2017.

Ces travaux ont également permis de revoir, dans la profession, les techniques d'acquisition. La

figure suivante présente différentes procédures d'acquisition n'augmentant pas forcément le coût terrain mais pouvant apporter, *via* la stratégie $3D^-$, une meilleure caractérisation des ouvrages (figure 3.28).

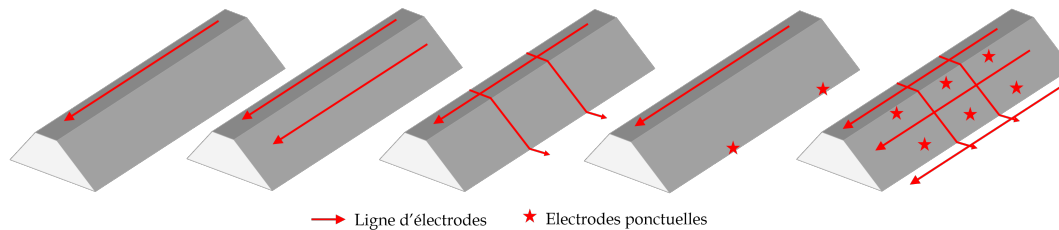


FIGURE 3.28: Procédures d'acquisition réalisables avec la stratégie $3D^-$

Stratégie $2D^+$

Toujours dans une optique de répondre à une problématique de reconnaissance efficace des digues, j'ai proposé la stratégie dite $2D^+$ (figure 3.29). L'idée de cette stratégie est de conserver le principe d'acquisition « grand rendement » de l'*IRE-2D* longitudinale et de permettre un traitement de l'information intégrant les effets $3D$ indésirables (réservoir d'eau, topographie). Pour cela j'ai projeté une discrétisation $2D$ classique selon l'axe transversal en appliquant une déformation de maillage (Fargier, 2011) pour prendre en compte explicitement la topographie. Cette méthodologie permet de séparer explicitement le réservoir d'eau pour l'intégrer ou non dans le processus d'inversion (figure 3.29).

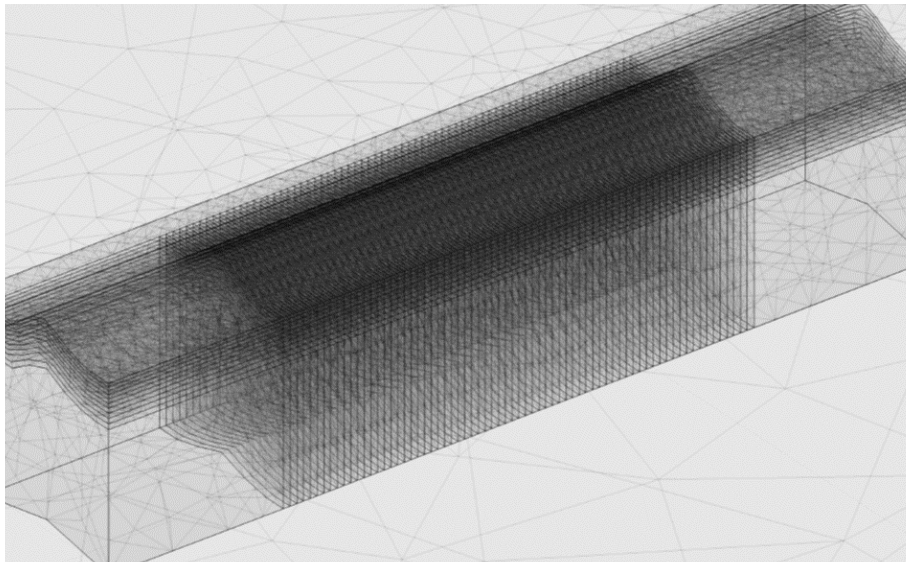


FIGURE 3.29: Maillage $2D^+$ d'une digue

La figure 3.30 présente les résultats d'inversion avec a) un traitement conventionnel (Res2dinv, M. H. Loke et Barker, 1995) et b) avec la stratégie $2D^+$. Nous pouvons tout d'abord observer la grande similarité des résultats malgré l'échelle de couleur différente. Ce résultat fait également ressortir des différences notables concernant la disparition de la couche conductrice en profondeur.

Après une étude poussée de ce résultat, il s'avère que cette couche conductrice est un artéfact d'inversion lié à la présence du réservoir d'eau. La suppression de cette couche, qui aurait pu amener à une mauvaise interprétation du résultat (avec Res2dinv), permet de faire ressortir des anomalies résistantes (en violet sur la figure 3.30.b) au niveau de l'interface corps de digue/fondation. Or, c'est une zone à risque où peut se développer préférentiellement de l'érosion interne (Foster et al., 2000), montrant ainsi l'apport de cette stratégie d'inversion.

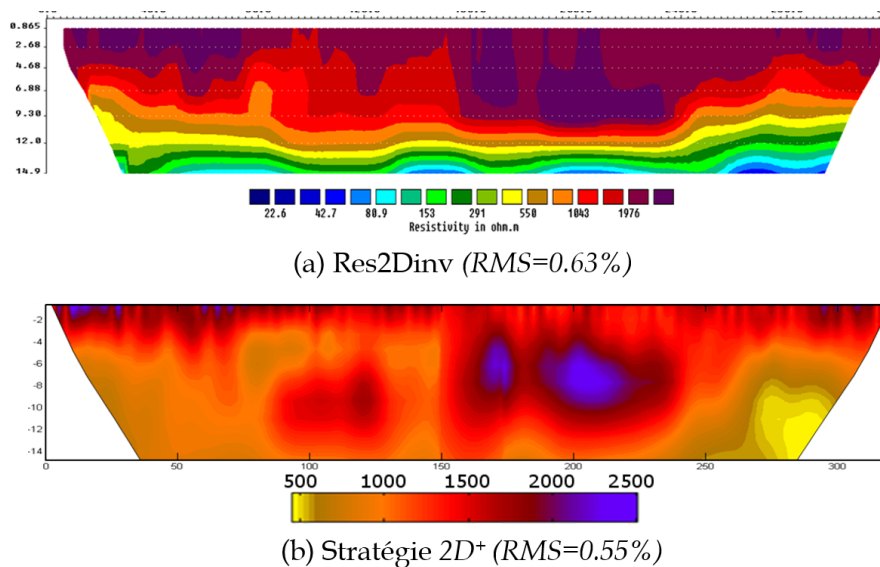


FIGURE 3.30: a) Résultat d'inversion 2D conventionnel obtenu avec le logiciel Res2dinv. b) résultat d'inversion $2D^+$. Modifié d'après Fargier, 2011.

3.3.3.2 Stratégie entre $1D$ - discret & $1D$ continu

Dans le domaine du Contrôle Non Destructif (CND), l'information recherchée est souvent de nature $1D$; avec des applications concernant l'épaisseur du béton de couverture, l'état de collage de la chaussée (Todkar et al., 2017) ou la variation (gradient) de la teneur en eau ou en chlorures (Fares et al., 2016).

Cependant, bien que la problématique soit effectivement $1D$, les ouvrages sur lesquels ces problématiques sont rencontrées ne le sont pas nécessairement (quais, ponts...). Dans ce cadre et pour limiter des effets de bord néfastes, le problème $1D$ doit nécessairement être implémenté dans un modèle $3D$ (Tong et Yang, 1990) et non subir une simple normalisation des données (Fox et al., 1980).

La littérature regorge de références d'inversion $1D$ discrètes mais aucune recherche ne permet la réalisation d'une paramétrisation du problème inverse « continue ». En effet, pour décrire des variations $1D$ complexes, nous avons tendance à augmenter le nombre de DDL du modèle discret $1D$ plutôt que réfléchir au phénomène physique sous-jacent.

Or, lorsque notre *a priori* sur le matériau le permet, il est préférable d'employer une paramétri-

sation continue ayant pour avantage de ne pas sous déterminer le problème inverse et orienter la convergence dans l'espace des solutions. La figure 3.31 présente le principe de cette réflexion avec a) une discrétisation classique ici à trois paramètres ($3P$) (une épaisseur de couche et les résistivités de chaque couche) et b) une fonction de type Weibull à quatre paramètres ($4P$) permettant des gradients plus ou moins francs de variation de propriétés en profondeur.

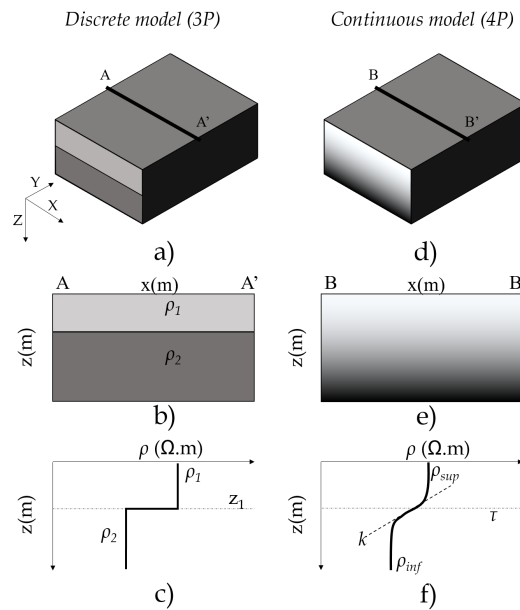


FIGURE 3.31: Deux paramétrisations du problème inverse avec à gauche une discrétisation $3P$ et à droite une paramétrisation continue $4P$. a) et d) modèles vus en perspectives. b) et e) modèles vus en coupe. c) et f) évolution de résistivité en profondeur des deux modèles. Modifié d'après Fargier et al. (2020).

Pour accompagner ce travail, une étude de la fonction objectif basée sur un modèle synthétique $1D$ est réalisée (Figure 3.32). Ce travail permet d'illustrer le comportement de la fonction objectif sur les données (Γ_d) au voisinage de la solution (diamant rouge). Ce résultat montre la difficulté de reconstruction (inversion) due à la présence de vallées étroites synonymes de multiples solutions équiprobables en présence d'un bruit même faible sur les données.

J'ai ensuite étudié les performances des deux paramétrisations ($3P$ et $4P$) dans le cadre de données synthétiques non bruitées (figure 3.33), bruitées et réelles (Fargier et al., 2018). La figure 3.33 présente les résultats d'inversion de données modélisées non bruitées issus de modèles présentant une variation a) et d) lisse, b) et e) franche et c) et f) abrupte des propriétés en profondeur. La comparaison des résultats permet d'illustrer la supériorité de la paramétrisation continue quelque soit les données d'entrée. Ces résultats ont ensuite été confirmés sur des dalles d'essai réelles grâce aux résultats d'essais gammadensimétriques (Fargier et al., 2020).

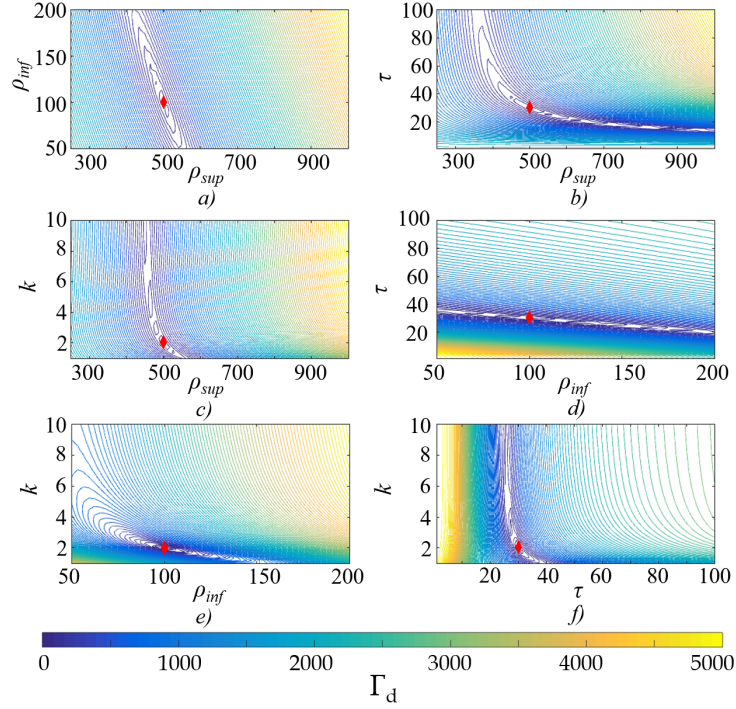


FIGURE 3.32: Etude de la topologie de la fonction objectif Γ_d pour six couples de paramètres de la paramétrisation continue. Les diamants rouges représentent la solution. Modifié d'après Fargier et al. (2020).

3.3.4 Optimisation de l'acquisition

Entre inversion des données et optimisation de l'acquisition, il n'y a qu'un pas. En effet, le second point est principalement basé sur les outils développés pour satisfaire le 1^{er} point (Menke, 1984). Ainsi, en travaillant sur la formulation simplifiée du problème inverse, nous obtenons :

$$d = Gm^{vrai} \quad (3.16)$$

$$m^{inv} = G^{-g} d \quad (3.17)$$

$$m^{inv} = G^{-g} Gm^{vrai} = R_M m^{vrai} \quad (3.18)$$

avec G^{-g} l'inverse généralisé de G , R_M la matrice de résolution du modèle calculée à partir d'un modèle « vrai » m^{vrai} et m^{est} le modèle estimé par inversion (Menke, 1984). Chaque élément de la diagonale de cette matrice symétrique correspond à un élément inversé et informe sur la capacité d'inverser de manière unique chaque cellule du problème inverse. Si la valeur correspondant à chaque cellule tend vers 1, l'inversion est unique, si la valeur tend vers 0, le nombre de

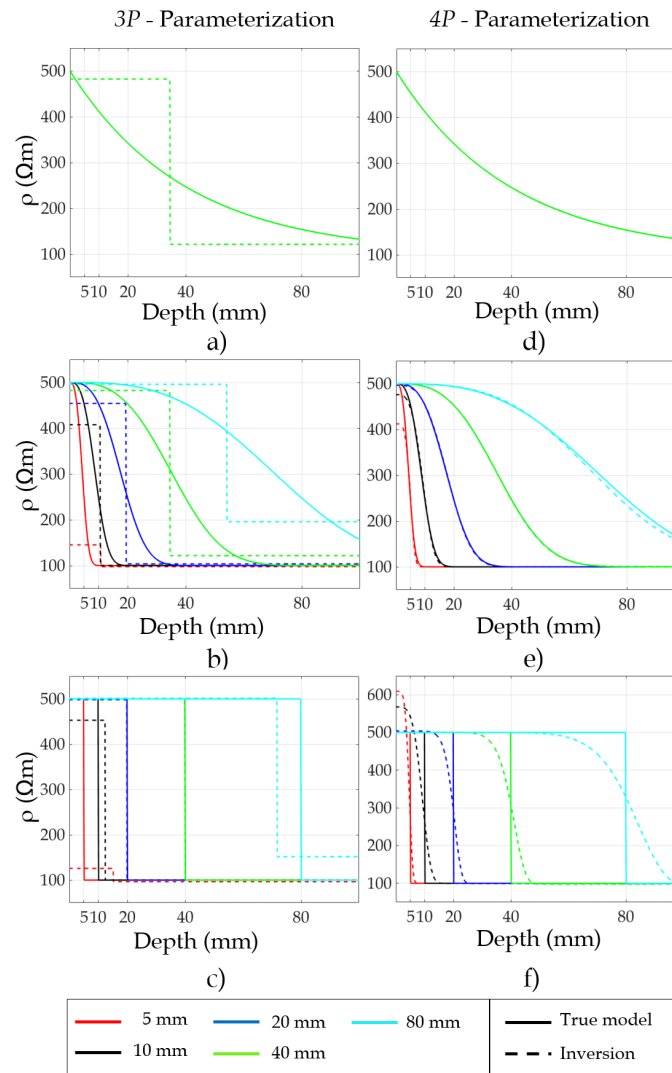


FIGURE 3.33: Lignes 1, 2 et 3 : résultats d'inversion de modèles synthétiques respectivement doux, intermédiaire et franc. Colonne de gauche : Inversion 3P. Colonne de droite : Inversion 4P. Modifié d'après Fargier et al., 2020.

solutions équiprobables est infini. En exploitant la formulation de l'équation normale d'inversion (sans introduction du bruit sur la mesure), nous obtenons :

$$R_M = (G^T G + \lambda L)^{-1} G^T G \quad (3.19)$$

Entre 2000 et 2015 de nombreux travaux de recherche ont visé à optimiser les protocoles de mesure dans un objectif d'augmentation de la résolution ou de la robustesse des résultats d'inversion (Stummer et al., 2002; M. Loke et al., 2014). Mon point de vue s'est avéré assez divergent. En effet, à mon sens, la position initiale des électrodes composant une acquisition (2D ou 3D) impacte plus la résolution finale que le protocole d'acquisition lui-même, pour un nombre égal d'électrodes.

Par conséquent, j'ai développé une méthodologie innovante permettant d'optimiser le positionnement d'électrodes à la surface d'un milieu dans un objectif de suivi d'un processus évolutif (ex : suivi d'infiltrations) (Fargier et al., 2010; Fargier, 2011). Le principe consiste à modéliser un grand nombre d'électrodes et à éliminer les électrodes participant moins à la résolution globale (diagonale de R_M). Cette méthodologie implique la définition d'une fonction de perte FP quantifiant l'apport en résolution de chaque électrode i :

$$FP(i) = \sum_{j=1}^m P_j \frac{R_{M_{jj}}^{base}}{R_{M_{jj}}^{exh}} \quad (3.20)$$

Avec P un vecteur contenant une pondération pour chaque cellule d'inversion j (Fargier et al., 2010), $R_{m_{jj}}^{base}$ la résolution sans l'électrode i , $R_{m_{jj}}^{exh}$ la résolution avec toutes les électrodes. La figure présente un des résultats issus de cette étude permettant le suivi d'infiltrations générées en trois points d'une digue en sable (figure 3.34.a). La figure 3.34.c) présente la résolution offerte par un positionnement « non avisé » et b) celle offerte par une optimisation des positions des électrodes. La figure 3.34.d) présente la variation relative entre les deux résultats précédents montrant l'apport en résolution sur les zones présentant un intérêt pour le suivi.

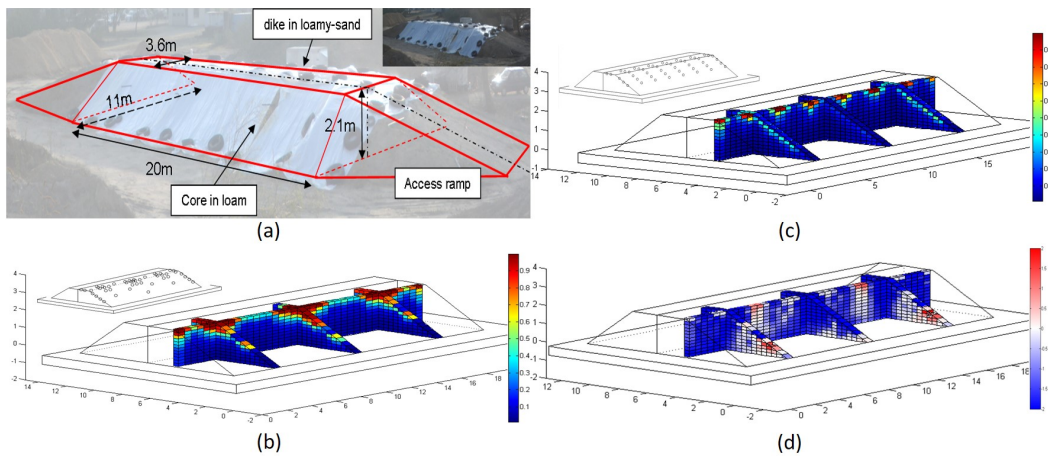


FIGURE 3.34: a) Optimisation du placement des électrodes sur la digue; b) et c) sensibilités liées à un positionnement optimisé et conventionnel respectivement. d) Apport en sensibilité lié à l'optimisation du positionnement.

Rétrospectivement, cet algorithme s'est avéré présenter un défaut majeur. En effet, pour cette application, les écoulements réels n'ont pas suivi le comportement prédit par modélisation numérique (dû aux discontinuités des couches de sable). L'infiltration s'est donc répandue sur des zones ne présentant pas de renforcement de la résolution (Fargier, 2011). Cette limitation ne doit cependant pas couvrir l'apport potentiel que peut avoir l'optimisation du placement des électrodes pour de nombreuses applications de reconnaissance ou de surveillance.

3.3.5 Résultats essentiels

Cette section présente quatre résultats essentiels de mes travaux de recherche. Tout d'abord, thématique centrale de cette HDR, la gestion de l'effet de la géométrie d'un milieu lors du problème inverse. C'est une thématique importante soutenue assez activement par la communauté scientifique (Blome et al., 2009; Fargier et al., 2014; Penz et al., 2013; Portal et al., 2019). Mes travaux ont démontré le besoin d'une prise en compte très précise de la géométrie des milieux étudiés. Ces travaux ont exploité de manière efficiente la photogrammétrie pour étudier ces effets.

J'ai également développé lors de ma thèse la notion de « Stratégie intermédiaire d'inversion (In between Inversion Strategy) ». Cette « vision » du problème inverse a rencontré un très bon accueil de la communauté scientifique présentant des recherches similaires encourageantes (Lesparre et al., 2014). Ces travaux m'ont permis de développer des solutions d'auscultation (acquisition, inversion) optimisées aux problématiques qui m'étaient posées (digues, volcans...). Dans ce sens, ce travail permet une évolution des pratiques en redéfinissant, à la base, la paramétrisation (entre 1D, 2D et 3D, discret ou continu) du problème inverse en fonction de la problématique du SNO étudié.

Enfin, le travail d'optimisation du placement des électrodes n'a pas été développé et valorisé à sa juste valeur (Fargier et al., 2010). J'estime qu'il existe un potentiel extrêmement fort pour la communauté de ce type d'étude. Soulignons qu'un certain engouement pour la question a très récemment repris (Wagner et al., 2015; Udosen et Potthast, 2018; Uhlemann et al., 2018).

3.4 IRE : Post-traitement

Les approches d'inversion précédentes ne présentent d'intérêt à mes yeux que si elles permettent une meilleure compréhension des Sites Naturels et des Ouvrages SNO qui nous entourent. Une autre approche consiste à étudier les observables géophysiques en lien avec la problématique des SNO étudiés. Plus de dix ans d'utilisation de l'IRE sur divers SNO m'a montré ses limites lorsque étudiée individuellement (sans information *a priori* ou complémentaires).

3.4.1 Complémentarité des méthodes d'auscultation pour l'évaluation des SNO

3.4.1.1 Photogrammétrie & Géophysique

Comme évoqué en sections 3.2.2 et 3.3.2 la photogrammétrie est une méthode à fort potentiel pour nos applications en géosciences et génie-civil. En plus des apports en modélisation et inversion discutés aux sections 3.2 et 3.3, cette méthode permet une meilleure interprétation des résultats *via* une représentation des résultats géophysiques au sein du modèle photogrammétrique. Dans ce cadre, j'ai participé à plusieurs travaux « originaux ».

La figure 3.35 présente plusieurs de ces travaux avec a) le SNO étudié, b) le modèle photogrammétrique obtenu et c) l'incrustation des résultats géophysiques au sein du modèle photogrammétrique. Cette présentation combinée permet ainsi d'améliorer considérablement l'interprétation des résultats et leur « publicité » auprès des gestionnaires d'ouvrages, donneurs d'ordres. Ne sont présentés ici que des résultats issus du spectre visible, une imagerie spectrale plus complète (ex : infrarouge) fournit une somme d'informations parfois cruciale pour l'étude des SNO (Thiele et al., 2017).

J'ai participé et/ou piloté plusieurs projets de Recherche (section 1.7.1, AphoGeoPhy, Teledetac, EvaGEOH, Ecodem) dont un des objectifs était la diffusion de la photogrammétrie en géosciences auprès du réseau scientifique et technique du MTEs. Ce travail, à l'origine impulsé par Cyrille Fauchard (Cerema, ENDSUM), a permis l'obtention de résultats précurseurs dans le domaine (Fauchard et al., 2013; Fargier et al., 2017; Fargier et al., 2018; Taoum et al., 2020b) et a confortablement amélioré nos prestations d'études et d'expertises.

3.4.1.2 Complémentarité des méthodes Géophysiques

Chaque méthode géophysique prise séparément présente des avantages et inconvénients qui lui sont inhérents et qui peuvent dépendre des problématiques posées. Ces différences peuvent cependant s'avérer être un allié pour améliorer la caractérisation d'un SNO. En effet, les méthodes ne renseignant pas nécessairement le même paramètre physique, une interprétation conjointe de méthodes doit permettre de discriminer une nature de matériau. Dans ce cadre, les campagnes de reconnaissance de SNO intègrent souvent de multiples méthodes géophysiques. J'ai participé à de nombreux travaux de recherche portant i) sur la définition des méthodes géophysiques com-

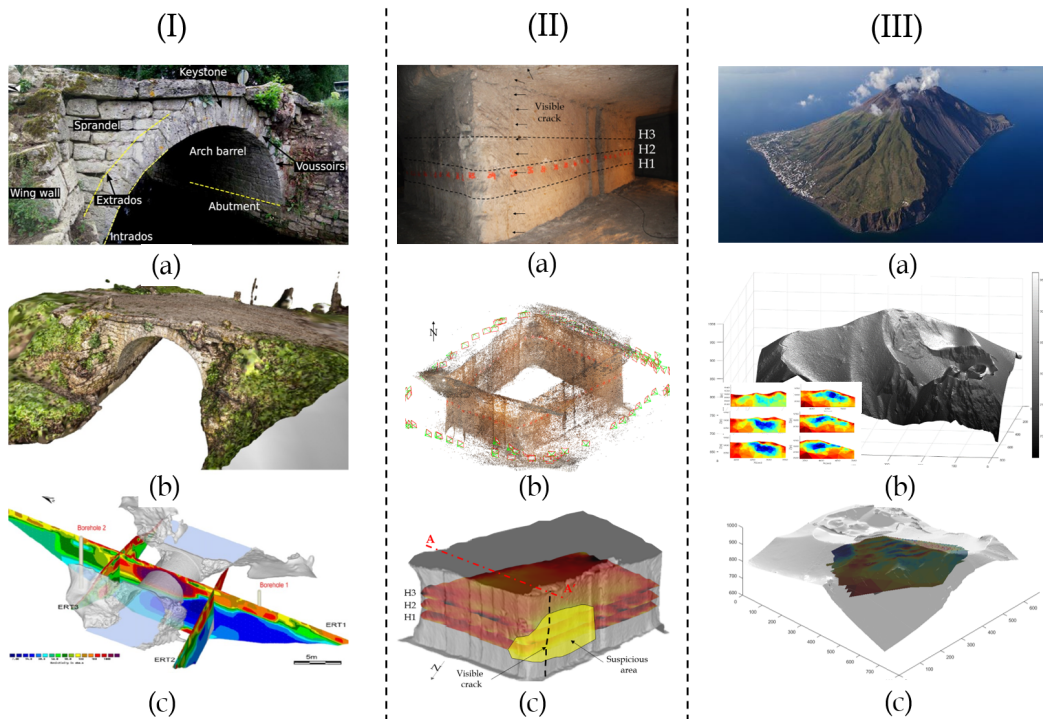


FIGURE 3.35: Trois exemples de résultat présentant le couplage d'un modèle photogrammétrique et d'imagerie géophysique provenant I) du pont-de-coq, II) d'un pilier de carrière souterraine (Vendome) et III) de l'île volcanique de Stromboli. a) Cliché sur SNO étudié. b) modèle photogrammétrique. c) résultat d'IRE.

plémentaires et ii) sur leur utilisation pour la caractérisation des *SNO*. Les figures 3.36.a) et b) présentent le cas d'une reconnaissance archéologique intégrant des méthodes électrique, radar, magnétique qui ont permis de faire revivre l'histoire de l'abbaye de Notre Dame du Bec Hellouin (Fauchard et al., 2018). Les résultats ont été validés par de nombreuses inspections à la pelle révélant la présence d'anciennes fondations (figure 3.36.c).

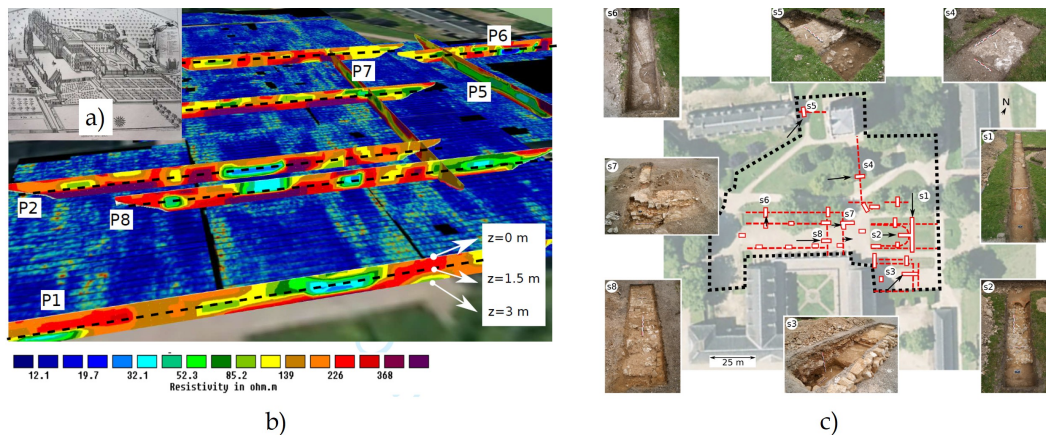


FIGURE 3.36: Etude de l'abbaye de Notre Dame du Bec Hellouin. a) Superposition de résultats géophysiques pour déterminer la position de fondations d'une ancienne abbaye. b) Résultats de fouilles à la pelle guidées par le couplage géophysique ayant permis la détection de fondations. Modifié d'après Fauchard et al. (2018).

À plus grande échelle et pour une application traitant des risques naturels, j'ai participé à plusieurs campagnes de reconnaissance de volcans (Mont Somma-Vésuve, Stromboli, Etna). Ces travaux intégrant les avantages liés à chaque méthode (électriques, *PS*, émission de gaz et température) permettent d'améliorer nos modèles de ces sites (Ricci et al., 2014; Finizola et al., 2016), essentiels pour prévenir du comportement en cas de phases éruptives. Pour exemple, Naples, construite sur les pentes du mont Somma-Vésuv, et à proximité d'Ercolano et Pompei, abrite plus de 150 000 personnes dans la « zone rouge » à évacuer en moins de deux semaines en cas d'éruption.

3.4.1.3 Géotechnique & Géophysique

Certains diraient que tout oppose les méthodes géophysiques et géotechniques. Les 1^{ères} sont non intrusives, haut rendement, intégrantes, fournissant une caractérisation « continue » du sous-sol mais tâchées d'une imprécision difficile à quantifier. De plus, les paramètres physiques approchés sont souvent décorrélés des besoins liés aux calculs de stabilité des ouvrages.

À l'inverse les secondes sont invasives, renseignent sur les propriétés du sous-sol en un point (x,y). Elles sont couteuses mais entachées d'une imprécision plus faible. De plus, les informations résultant de ces méthodes peuvent parfois servir directement au dimensionnement des ouvrages (ex : Pressiomètre ou *CPT*).

Par conséquent, ces deux types de méthodes présentent une complémentarité intéressante pour l'auscultation des *SNO*. Deux aspects se détachent ainsi pour l'étude de cette complémentarité :

- Quels sont les paramètres à compiler ensemble en fonction des problématiques des ouvrages?
- Comment comparer des résultats entre eux?

En effet, pour une problématique de *SNO* donnée, la méthode d'auscultation à choisir n'est pas nécessairement la même suivant le budget alloué et/ou si l'on se limite à 1, 2 ou N méthodes. Dans ce cadre, j'ai travaillé sur le concept de complémentarité des méthodes géophysiques et géotechniques en fonction des problématiques liées aux ouvrages auscultés.

Ce travail a notamment mené à une publication sous forme de review des méthodes géophysiques et géotechniques utilisées pour l'auscultation des digues et barrages. Le tableau 3.1 présente une synthèse de ce travail.

TABLE 3.1 Capacité des méthodes à caractériser une propriété physique d'une digue. +++ correspond à une forte relation entre le paramètre et la propriété de la digue, ++ à une estimation raisonnablement bonne, + méthode très peu étudiée ou en cours d'étude et 0 indique l'incapacité de la méthode. d'après Dezert et al. (2019b).

Geophysical and geotechnical method	Water content	Interfaces	Granulometry	Cracks	Heterogeneities	Man-made pipes	Cavities	Compactness	Hydraulic permeability	Shear strength	Flow velocity
Geophysical method	EKT	+++	++	+	+++	+++	+++	++	+	0	0
	SP	0	0	+	0	+(+)	+(+)	0	+	0	++(+)
	IP	+	++(+)	+	+++	+++	0	+	+++	0	0
	Slingram	++	++(+)	+	+++	+++	+	0	0	0	0
	GPR	++	+++	0	++	+++	+++	+	0	0	0
	NMR	+++	(+)	+(+)	0	0	0	+++	++	0	0
	Seismic refraction tomography	+	+++	0	0	0	0	+	++	0	0
	MASW	0	++	0	+	(++)	0	(++)	0	+++	0
	Acoustic	+	0	0	0	0	0	0	0	0	(+)
	Micro-gravimetry	0	0	0	0	+	0	+++	+	0	0
	IR thermography	+	0	0	(+)	0	0	+	0	0	+
	Geotechnical method	Drilling parameters recordings	+	+++	0	+			++	+	+
CPT		+	+++	0	++			+++	++	++	0
Field Vane Shear Test		0	+	0	+			++	0	+++	0
Pressuremeter		0	0	++	+			++	+	++	0
Leifranc test		0	0	++	0	0		0	+++	0	0
Permeator		0	++	++	0	+		++	+++	0	0

Ce travail synthétise les résultats de nombreux travaux quantifiant ou qualifiant les propriétés des milieux (ex : suffusion) par différentes méthodes d'auscultation. Cet article de review référence ainsi plus de 100 articles. Parmi ces travaux, je pense notamment aux travaux issus des PN et ANR ERINOH (section 1.7.1) auxquels j'ai participé.

Nous pouvons également illustrer ce propos par les figures 3.37a), b) et c) représentant les résultats de campagnes respectivement géotechniques, sismiques et électriques (Bièvre et al., 2018). Ces travaux ont permis de montrer la complémentarité de ces méthodes « traditionnelles » pour arriver à diagnostiquer une typologie d'érosion interne au sein d'un ouvrage.

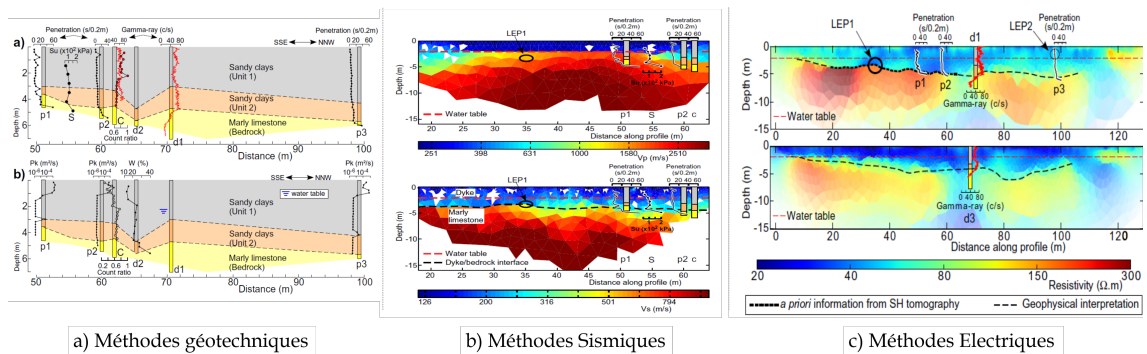


FIGURE 3.37: Campagne d'essais sur la digue du canal de Digoin. Résultats a) géotechniques, b) sismiques et c) électriques. Modifié d'après Bièvre et al. (2018).

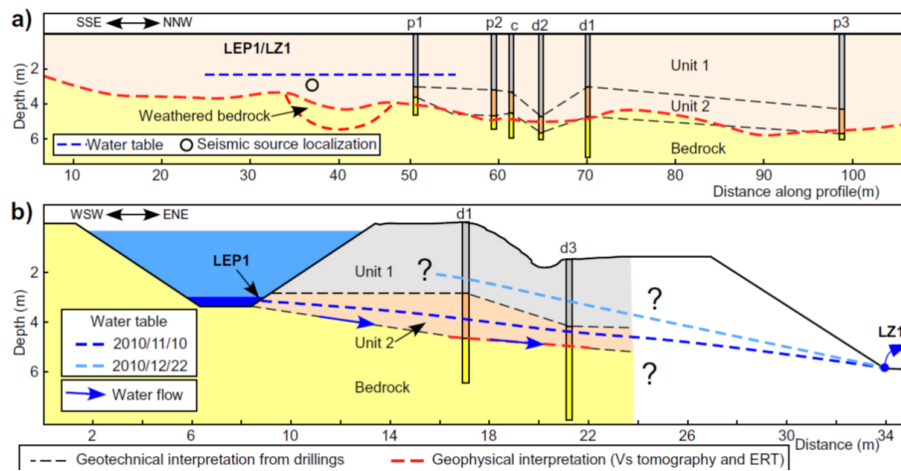


FIGURE 3.38: Modèle géotechnique a) longitudinal et b) transversal résultant de l'interprétation conjointe (naturaliste) des résultats géophysiques et géotechniques. Modifié d'après Bièvre et al. (2018).

Parmi les méthodes géotechniques précédentes, il est intéressant de noter l'utilisation d'une méthode optimisée pour l'auscultation des digues, à savoir le Perméafor (Antoine et al., 2015). En effet, cet outil géotechnique, que j'ai participé à développer au Laboratoire de Blois, permet d'évaluer en quasi-continue la conductivité hydraulique d'une digue en profondeur et donc la présence potentielle de fuites internes. La figure 3.39 présente a) une photo de la pointe perméafor, b) une nouvelle pointe permettant une injection verticale et horizontale pour tester l'anisotropie de per-

méabilité et c) le module Perméafor nécessaire à l'essai (Antoine et al., 2015; Bièvre et al., 2018). Il faut noter que lors de mon poste à Blois, j'étais responsable de ce matériel d'essai dont mon laboratoire avait l'exclusivité (Nationale et internationale). Cette responsabilité m'a ainsi amené à réaliser de nombreuses expertises d'ouvrages avec cette méthode (cf. section 1.7.3).

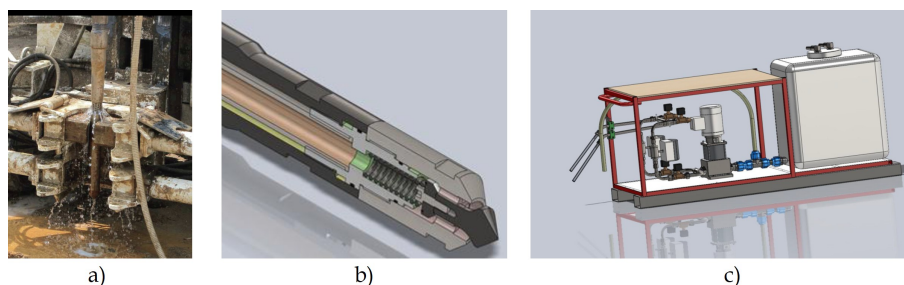


FIGURE 3.39: Présentation du Perméafor. a) Photographie de la pointe Perméafor ancienne générée sur une sondeuse géotechnique. Schéma b) de la nouvelle pointe VH développée au Cerema Blois et c) du module Perméafor pour la réalisation de l'essai.

3.4.2 Fusion d'informations

Bien que les méthodes géophysiques et géotechniques soient complémentaires les unes par rapport aux autres, l'information qui en découle n'est pas, à mon sens, utilisée à son plein potentiel. En effet, une simple juxtaposition des résultats géophysiques et géotechniques telle que précédemment présentée, ne permet pas d'optimiser l'information issue de chaque méthode. Pour répondre à cette problématique, une méthodologie innovante exploitant la théorie des masses de croyance a été proposée (thèse Théo Dézert, section 1.9.1). Toutes les informations synthétisées ci-dessous sont précisées dans le cadre de ses travaux de recherche (Dezert et al., 2019a; Dezert et al., 2019b; Dezert, 2019).

La théorie des masses de croyance a été introduite par Shafer (1976) à partir des travaux antérieurs de Dempster (1967). Cette théorie est parfois appelée théorie de Dempster-Shafer (*DS*). L'intérêt des fonctions de masse de croyance réside dans leur capacité à modéliser les informations incertaines, imprécises et incomplètes. Pour exploiter le potentiel de cette théorie à fusionner des informations ponctuelles (géotechniques) et spatiales (géophysiques) toute une méthodologie de combinaison a vu le jour.

3.4.2.1 Méthodologie de combinaison

La méthodologie proposée suit cinq étapes illustrées en figure 3.40 :

1. Définition de milieu étudié;
2. Réalisation des campagnes d'acquisition géophysique;
3. Traitement des données (ex : inversion);
4. Calcul des masses de croyance;

5. Fusion des masses de croyance.

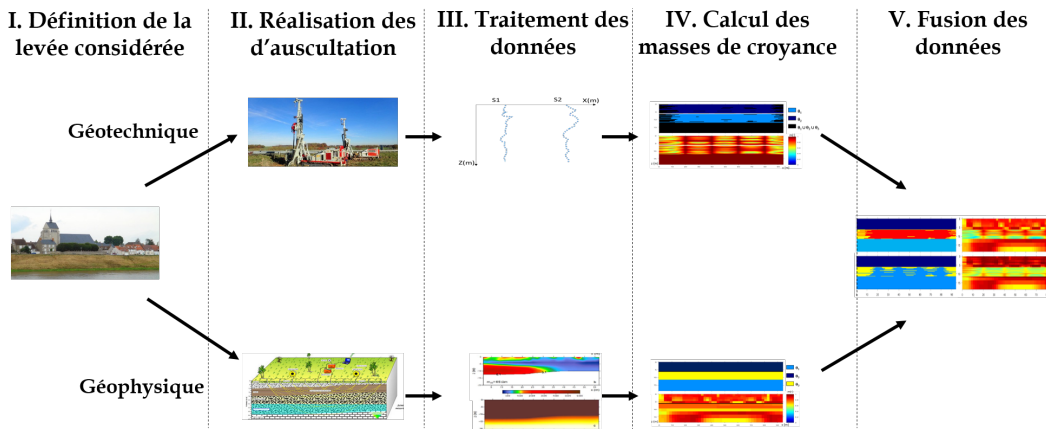


FIGURE 3.40: Méthodologie de fusion d'informations géophysiques et géotechniques basée sur la théorie des masses de croyance.

La 1^{ère} étape consiste à définir un cadre de discernement $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ comme un ensemble fini contenant n éléments et l'ensemble 2^Θ , appelé le powerset de Θ , regroupant tous les sous-ensembles de Θ , les sous-ensembles issus de leurs unions et l'ensemble vide \emptyset représentatif du conflit entre les sources d'information. Sachant que pour $X \in 2^\Theta$, il est considéré que $m(X)$ représente le degré de **croissance** attribué à la proposition X , $m(\Theta)$ représente le degré d'**ignorance**, $m(\emptyset)$ représente le niveau de **conflit** entre les sources. **Croissance**, **ignorance** et **conflit** représentent ainsi les trois informations fournies par cette méthode.

Pour notre problématique, ce cadre permet d'attribuer à un événement Θ (ou union d'événements) une classe de sol. Ensuite, pour chaque type d'information, l'observable mesurée (ex : cellule inversée de résistivité) est transformée en masses de croyance sur les événements du powerset. Ces masses de croyance provenant des différentes sources d'informations sont enfin fusionnées.

3.4.2.2 Règles de combinaison

Hypothèse d'un monde fermé : règle de Dempster-Shafer et PCR6

La règle de combinaison de Dempster-Shafer (*DS*) (Shafer, 1976) correspond à une règle conjonctive normalisée de fonctions de masses de croyance. La combinaison de *DS* fait l'hypothèse d'un monde fermé, c'est-à-dire que le conflit entre sources n'est pas une solution admissible. Le conflit est alors redistribué à chaque masse de croyance.

Dans certains cas précis, cette normalisation appliquée peut être mise en difficulté. Pour pallier les défauts de *DS*, une règle de fusion reposant sur une redistribution proportionnelle du conflit (Proportional Conflict Redistribution rule no 6 - PCR6) a été proposée par Martin et Osswald (2008) afin de répartir les masses conflictuelles sur les ensembles du cadre de discernement, proportionnellement à l'implication de ces ensembles dans les conflits.

Hypothèse d'un monde ouvert de Smets

Contrairement à la règle de combinaison de *DS* faisant l'hypothèse d'un monde fermé, Smets et Kennes (1994) font l'hypothèse d'un monde ouvert avec leur Transferable Belief Model (*TBM*). Il s'agit donc ici de laisser la masse de croyance affectée au conflit \emptyset , et de considérer que les hypothèses constitutives de Θ ne sont pas exhaustives.

3.4.2.3 Caractérisation du cadre de discernement

Suite au processus d'inversion, ou directement pour les données géotechniques, il est nécessaire de pouvoir associer, pour chaque cellule du modèle discrétisé, les valeurs des observables aux hypothèses constitutives du cadre de discernement fixé. Cette sélection de bornes est faite à dire d'experts en regroupant les ensembles de classes modales de résistivités proches (Dezert et al., 2019b). Une approche basée sur l'utilisation de méthodes de clustering permettrait également une définition automatique (plus objective) de ce cadre (Ward et al., 2014).

3.4.2.4 Attribution des masses de croyance

Pour attribuer des masses de croyance sur chaque hypothèse de Θ , plusieurs méthodes de calcul sont proposées (section 1.9.1, Dezert, 2019) :

- Méthode 1 : distances de Wasserstein;
- Méthode 2 : distances de Hausdorff;
- Méthode 3 : distances de Wasserstein et classes concernées;
- Méthode 4 : distances de Wasserstein et aire sous la Gaussienne;
- Méthode 5 : Aire sous la Gaussienne.

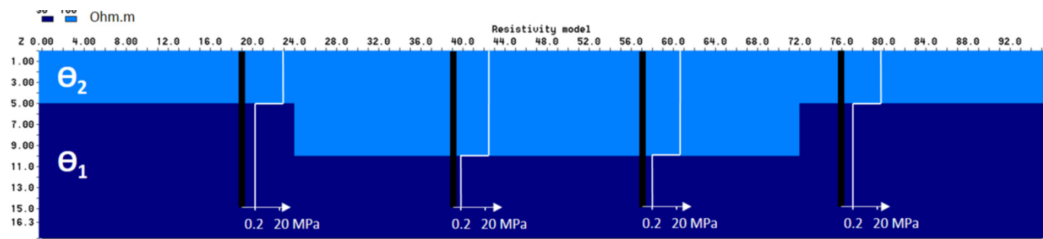
Toutes ces méthodes de calcul présentent des avantages et inconvénients discutés dans une étude exhaustive proposée par Dezert (2019).

3.4.2.5 Résultats de fusion

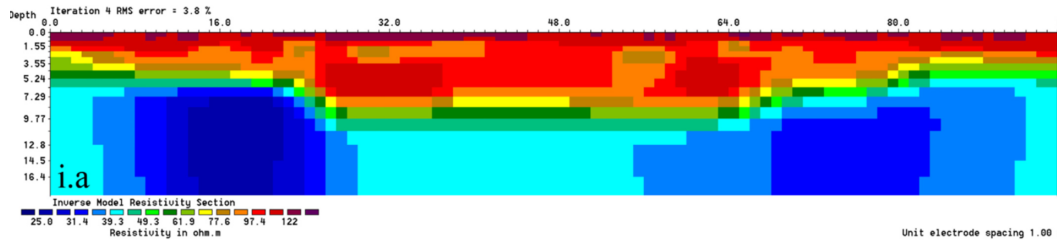
Les figures suivantes présentent les résultats issus de données modélisées sur un ouvrage synthétique présenté figure 3.41.a). Ce modèle *2D* du sous-sol est un milieu bicouche avec variation du toit de la couche inférieure. La figure 3.41.a) présente également le résultat de quatre sondages pénétrométriques modélisés sur ce milieu.

La figure 3.41.b) présente un résultat d'inversion *2D* de données modélisées sur le milieu précédent plus un bruit gaussien de 4%. La coupe est assez représentative du milieu « vrai » malgré la présence de plusieurs artéfacts d'inversion liés au bruit et à la dégradation de la résolution en profondeur intrinsèque à la méthode.

La figure 3.42 présente le résultat de fusion des données géophysiques et géotechniques. a) et b) présentent le résultat de fusion (événement avec la plus grande masse de croyance) et masse de croyance associée à l'événement respectivement pour l'hypothèse d'un monde ouvert de Smets. c)



(a)



(b)

FIGURE 3.41: Modèle d'étude de la méthodologie de fusion. a) Modèle géotechnique 2D synthétique bicouche et résultats géotechnique, b) résultat d'inversion de données IRE-2D synthétiques bruitées.

et d) représentent le même résultat mais pour l'hypothèse PCR6. Les résultats pour l'hypothèse du monde fermé DS ne sont pas représentés car assez similaires aux résultats issus de la fusion PCR6.

Ces résultats illustrent clairement l'apport de la méthodologie de fusion d'informations. En effet, celle-ci renseigne à la fois sur les typologies de matériaux du sous-sol, sur l'incertitude liée à cette estimation et sur le conflit entre les sources d'information.

3.4.3 Résultats essentiels

Une forte partie de mes travaux de recherche a consisté à tester individuellement ou conjointement la capacité d'auscultation des méthodes géophysiques et géotechniques en fonction des problématiques posées.

Ce travail possède deux facettes. La 1^{ère} ne consiste qu'à (savoir) écouter et décrire une conversation d'outils entre eux. La 2^{ème} nécessite de créer des solutions logicielles et méthodologiques permettant une collaboration des outils. J'espère, dans le futur, continuer sur cette voie en favorisant le développement d'outils numériques et méthodologiques permettant la combinaison de méthodes d'auscultation complémentaires.

*Les travaux de recherche sur la fusion de données que j'ai pu encadrer présentent à mon sens trois grandes avancées. Tout d'abord, le résultat permet de quantifier l'événement majoritaire (type de sol) ou sein de la section 2D tout en intégrant l'ignorance des données mesurées. Ensuite, le résultat met en avant la présence d'un **conflit** potentiel entre les sources de données. Enfin, ce résultat informe sur la confiance (croyance) qui peut être donnée aux événements. Ces résultats révolutionnent l'in-*

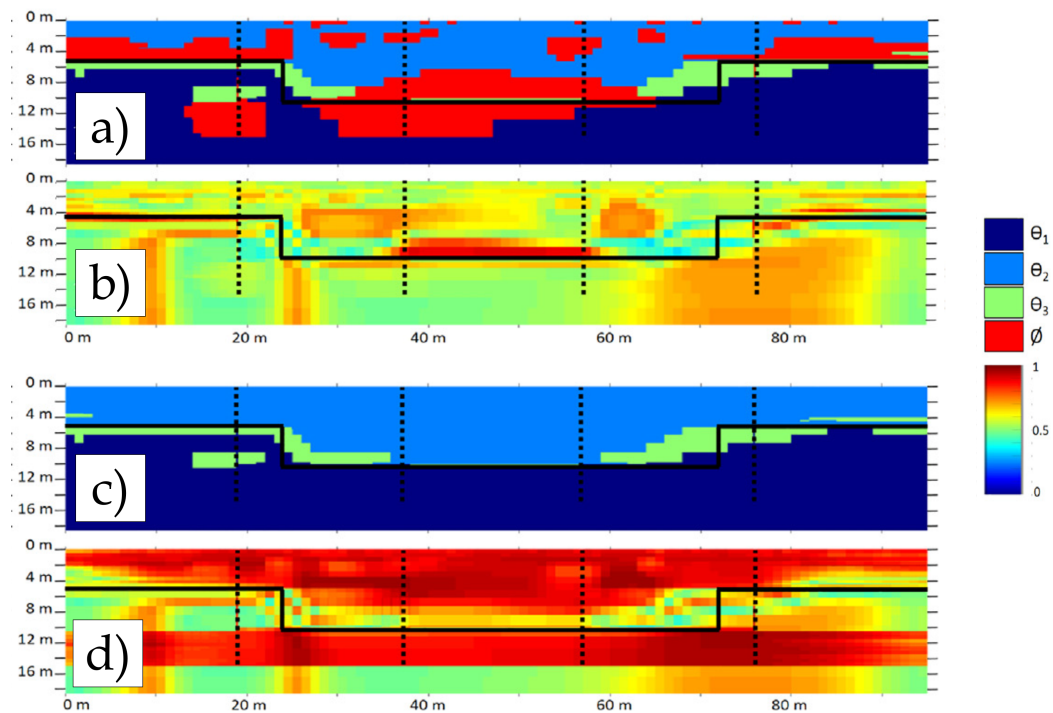


FIGURE 3.42: Comparaison des résultats de fusion. Fusion de « Smets » avec a) les événements ou conflit présentant la plus grande masse de confiance et b) la masse de confiance associée. Fusion type « PCR6 » avec c) les événements présentant la plus grande masse de confiance et d) la masse de confiance associée.

terprétation classique des données telle que proposée dans la section 3.4.1 en offrant de nouvelles « garanties » pour les gestionnaires d'ouvrages. Cela peut également permettre de revoir les pratiques de reconnaissance des ouvrages en permettant la réalisation de reconnaissances géotechniques et géophysiques sur des zones potentiellement conflictuelles ou incertaines.

Ce travail qui est valorisé académiquement (Dezert et al., 2018; Dezert et al., 2019a)(+ 1 code déposé à l'APP) rentre actuellement dans une phase de validation par le biais d'un contrat avec EDF (section 1.7.2). En effet, l'objectif premier de ce contrat est de confronter les travaux menés à des ouvrages réels d'EDF. Cette confrontation amènera, je le pense, de la maturité à ces travaux pour les faire entrer dans une phase de transfert technologique vers l'ingénierie et d'appui aux politiques publiques. De plus, au travers de ce contrat, des développements supplémentaires sont envisagés tels que l'introduction de méthodes géophysiques complémentaires (ex : MASW) et une prise en compte explicite du caractère 3D des ouvrages.

Discussion et perspectives

Sommaire

4.1 Discussion	81
4.1.1 Verrous thématiques	81
4.1.2 Verrous techniques & technologiques	82
4.1.3 Verrous méthodologiques	83
4.2 Évolution scientifique & thématique	83
4.3 Perspectives	84
4.3.1 Perspectives à court terme	84
4.3.2 Perspectives à moyen terme et long terme	86

4.1 Discussion

Mon parcours fait de moi un spécialiste dans la reconnaissance de Sites Naturels (Géosciences) et des Ouvrages (Génie-Civil). J'ai pu découvrir différentes facettes de ce métier lors de mon parcours professionnel ; à savoir, l'angle opérationnel en bureau d'études (CEBTP en 2008), l'aspect expertise et Recherche « finalisée » (EDF R&D de 2009 à 2011 et Cerema de 2012 à 2017) et la Recherche académique (UGE depuis 2017). Ces travaux de recherche et d'expertise m'ont amené à prendre du recul sur les outils & méthodologies que je développe et notamment sur les spécificités liées à ma double approche Géologie/Génie-Civil.

La figure 3.1 présente une synthèse de mes travaux de recherche avec les verrous scientifiques que j'ai tentés de lever. Ces verrous, développés autour d'une thématique centrale (centre de la figure), sont à la fois thématiques (couronne extérieure), technologiques et méthodologiques (bulles intérieures).

4.1.1 Verrous thématiques

Le 1^{er} verrou scientifique auquel je me suis heurté concerne l'extension spatiale et la géométrie des milieux étudiés. Ce paramètre « dimensionnel » joue un rôle primordial dans la définition des méthodologies et méthodes d'auscultation. Ce verrou représentait ainsi une limite conceptuelle et technique à l'utilisation de la méthode *IRE* pour des applications nouvelles.

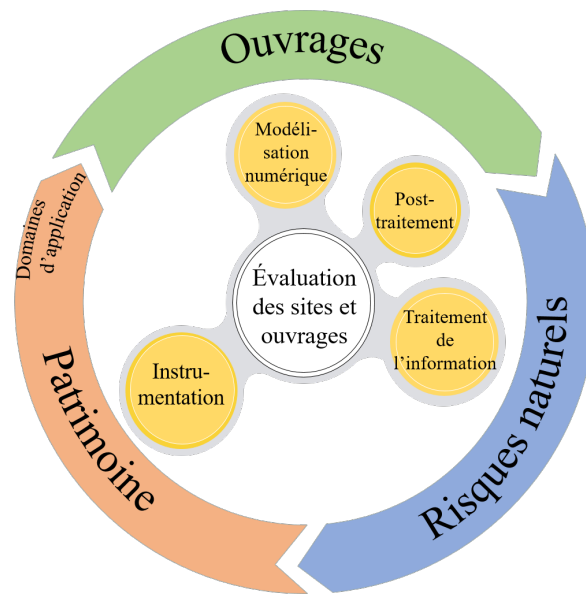


FIGURE 4.1: Synthèse de mes travaux de recherche avec les objets d'études présentés sur le cercle extérieur, les verrous scientifiques et la thématique centrale de cette HDR au centre.

Mes travaux m'ont permis d'évoluer de l'échelle de l'échantillon de sol (rugosité) à l'étude des volcans (altitude de l'Etna=3350 m) en passant par la problématique des digues; présentant une emprise faible (10 m de large) mais couvrant plusieurs milliers de km en France. Cette problématique m'a amené à chaque fois à devoir proposer des solutions d'auscultation optimisées et robustes.

L'aspect dimensionnel n'est, bien sûr, pas le seul verrou scientifique. Chaque typologie de *SNO* présente un contexte et des problématiques propres nécessitant une adaptation des approches. Dans ce contexte, j'ai œuvré à comprendre les phénomènes physiques cachés derrière les problématiques des *SNO* dans l'objectif de définir des indicateurs performantiels liés à leur interaction avec l'Homme.

4.1.2 Verrous techniques & technologiques

Les expertises sur site que j'ai pu diriger m'ont amené à réaliser un 1^{er} constat de non applicabilité des outils d'auscultation existants pour de nombreux *SNO*. En effet, du fait de la dimension des *SNO* ou leur géométrie, aucune méthode géophysique ou géotechnique n'est optimisée que ce soit en termes de pertinence, de robustesse, de rendement ou de résolution.

Fort de ce constat, j'ai souhaité orienter mes recherches en optimisant des méthodes géophysiques et géotechniques. Le chapitre 3 de ce mémoire retrace plus particulièrement les travaux d'optimisation de l'*IRE*. Ces travaux ont impliqué la levée de plusieurs verrous techniques à la fois instrumentaux et numériques.

Effectivement, le 1^{er} verrou technologique concerne la faible distribution spatiale, temporelle

et thématique de la mesure de résistivité électrique, consécutive au coût élevé des résistivimètres. De manière connexe, j'ai souhaité proposer de nouvelles technologies de capteurs basés sur la mesure de résistivité en *CI*. J'ai également participé au développement d'outils de mesure de type i) électromagnétique (sondes capacitives), ii) optique (scanner 3D) et iii) hydraulique (Perméafor).

Le traitement de l'information représente un verrou scientifique capital dans le cadre des méthodologies d'auscultation des *SNO*. J'ai proposé des solutions liées à l'optimisation du problème inverse et direct permettant de répondre aux problématiques spécifiques des sites étudiés, à savoir, prise en compte de l'environnement *3D*, définition de stratégies intermédiaires ($2D^+$ et $3D^-$).

4.1.3 Verrous méthodologiques

Les développements techniques précédents ne sont que peu de choses s'ils ne s'insèrent pas habilement au sein de méthodologies d'auscultation des *SNO*. Dans ce cadre, j'ai participé à la levée de verrous méthodologiques concernant l'application des méthodes d'auscultation (Perméafor, *IRE*, *IRE* + photogrammétrie) et leur intégration au sein de méthodologies plus large d'évaluation des *SNO* (ex : calcul aléa rupture des digues).

En prenant du recul sur mes travaux, il ressort que j'ai voulu faire communiquer des domaines complémentaires au sein de méthodologies d'auscultation (ex : géophysique & géotechnique). J'ai notamment profité de technologies récentes (ex : photogrammétrie, circuits imprimés...) pour permettre aux méthodes géophysiques conventionnelles de répondre à de nouvelles problématiques et participer à la définition de nouvelles méthodologies d'auscultation.

4.2 Évolution scientifique & thématique

Depuis deux ans, j'ai concrétisé le besoin de faire évoluer mon projet scientifique en intégrant le Département GERS de l'Ifsttar (devenu Université Gustave Eiffel). L'objectif était de découvrir une nouvelle facette de mon domaine d'étude en arborant un regard plus académique sur mes recherches et en focalisant mes compétences sur l'étude des risques gravitaires et des ouvrages de confortement.

Mon laboratoire de rattachement, intitulé Risque Rocheux et Ouvrages géotechnique (RRO), développe des compétences dans le domaine de l'observation et de l'analyse des sites et des ouvrages *in situ*. C'est ainsi que je transpose mes connaissances précédemment acquises pour ce nouveau champ d'applications et que j'en développe de nouvelles.

4.3 Perspectives

4.3.1 Perspectives à court terme

Les pistes de développement dans le domaine de l'auscultation des *SNO* sont nombreuses et quelques pages ne seraient pas suffisantes pour simplement les lister. Voici trois perspectives à court terme plus ou moins intercorrélées qui me semblent pertinentes, réalistes et en adéquation avec les recherches présentées au préalable.

Développement et diffusion d'un résistivimètre à faible coût

La méthode d'*IRE* est aujourd'hui à un nouveau tournant de son évolution. Hier, le prix des outils de mesure limitait sa diffusion pour des applications moins rémunérées (humanitaire, archéologie, Recherche), et notamment pour le suivi à long terme.

La naissance de systèmes à faible coût va permettre, je l'espère, l'apparition de nouvelles applications et donc de nouveaux résultats scientifiques. Ce travail ne représente pas en soit de la recherche scientifique, c'est bien son emploi qui pourrait revoir notre vision de la méthode.

Si j'ai eu le privilège de participer à la mise au point de la 1^{ère} plateforme libre d'échange sur le sujet, il reste à explorer et développer de nouvelles applications (Collaboration avec Rémi Clément, INRAe). J'espère dans ce cadre travailler à la diffusion de ce projet et participer à son déploiement sur des thématiques sous-investiguées. Plusieurs perspectives de collaboration sont notamment en cours (Andra cf. ci-dessous, IRD, Univ. Grenoble, ENTPE, Cerema).

Le prototype développé (*OhmPi*, $\Omega\Pi$) est actuellement opérationnel pour des applications nécessitant une faible puissance (cf. capteur résistif, essais en laboratoire...). Ainsi, à très court termes, une amélioration de la partie puissance est envisagée. L'objectif à terme est également de travailler sur le "full waveform", en exploitant le signal complet (injection et mesure) ouvrant des perspectives intéressantes en termes de robustesse de la mesure et de chargeabilité des milieux.

Instrumentation des Sites Naturels et des Ouvrages - apport des capteurs à coût maîtrisé

Actuellement, l'industrie électronique des capteurs à faible coût est en plein essor. Cette émergence nous amène à penser autrement l'auscultation des *SNO* et à sortir de notre zone de confort. Plutôt que de déployer un Radar (ou l'*IRE*) pour le suivi d'ouvrages (ex : quais, route) nous pouvons réfléchir lors de la réalisation des ouvrages (ou de leur réparation) sur la mise en place de capteurs distribués. Cette multiplication de capteurs, qui peut parfois intervenir en contrepartie d'une qualité de la mesure doit permettre d'étudier autrement les milieux. Ce mode de réflexion profite ainsi du développement des capteurs à bas coût proposés dans cet HDR.

Dans un avenir proche, j'espère valider la technologie de capteur résistifs (cf. section 3.1.3) dans le cadre d'un contrat de post-doctorat financé par l'ANDRA. Ce contrat prévoit de mettre en œuvre et tester le capteur dans son environnement final. Dans ce cadre, à plus long terme, j'espère pouvoir augmenter leur distribution spatiale. Celle ci permettra d'analyser les variations temporelles de teneur en eau à différentes échelles de l'ouvrage et améliorer notre compréhension

de ces ouvrages. Ce travail devrait largement profiter du développement du résistivimètre présenté dans le précédent point, car actuellement, une ou deux sondes nécessitent l'immobilisation d'un résistivimètre. À terme, du fait du faible courant nécessaire, chaque sonde pourrait intégrer l'électronique indispensable à la mesure à *4-points* tout en relayant la mesure (à faible périodicité) grâce aux technologies émergentes de type LoRa (<https://lora-alliance.org>) ou SigFox (<https://www.sigfox.com>).

Le développement du capteur résistif présente des débouchés autres avec notamment des applications en agronomie, hydrogéologie (partenariat en discussion avec l'ENTPE et INRAE) et en génie civil. En effet, comprendre les processus de transferts hydriques en milieux poreux intéresse de nombreux scientifiques et industriels. Dans ce cadre, j'espère assurer la diffusion de ce matériel auprès de la communauté intéressée pour accompagner l'émergence de nouveaux résultats scientifiques.

Dans un avenir proche, j'espère également favoriser l'émergence d'outils à coût maîtrisé (tel que proposés dans le Projet SETIER, INRAE : <https://reversaal.inrae.fr/recherche/projets/setier>) en Risques Naturels et plus particulièrement dans le domaine des Risques Rocheux. En effet, l'emprise spatiale des aléas rocheux/gravitaires et des solutions de confortement actuelles (filets, ancrages, merlons) nécessitent l'utilisation de capteurs répartis intelligents. Or, le domaine ne permet pas d'instrumenter suffisamment les SNO pour répondre de manière optimisée à cette problématique. Dans ce cadre, je propose suite à mon expérience dans l'instrumentation des ouvrages, l'utilisation couplée de capteurs à coût faible mais à forte représentation spatiale communiquant par technologie LoRa. Les apports dans le domaine seraient élevés à la fois pour les gestionnaires d'infrastructures (DIR CE, SNCF...), pour la sûreté des populations mais également pour la Recherche. À noter, je participe au portage d'un WorkPackage et d'actions du Projet National C2ROP2 (en montage) dans l'objectif de porter cette problématique.

Fusion de données

La complémentarité des méthodes est une notion bien acquise par la profession mais dont l'exploitation est encore mal maîtrisée. Cette question initiée par Grandjean et al. (2006) a permis d'ouvrir la voie aux travaux auxquels j'ai participé sur la fusion de données (Dezert et al., 2019a).

J'estime qu'il existe un fort potentiel de recherche caché derrière ces outils. La 1^{ère} étape de mon projet concernera la validation de la méthode de fusion par fonctions de croyance lors d'un contrat post-doctoral financé par EDF-CIH (cf. section 1.7.2). Ces travaux s'attacheront à confronter la méthodologie développée sur trois ouvrages hydrauliques EDF. De plus, nous prévoyons d'augmenter le nombre d'informations à fusionner, avec par exemple l'ajout de résultats MASW et de sondages carottés.

À ce stade nous avons recentré l'utilisation de la méthode à l'auscultation des ouvrages hydrauliques. Or, cette méthode peut tout à fait s'appliquer à d'autres problématiques issues des géosciences (risques gravitaires...) ou du génie civil (auscultation des ponts et chaussées).

La méthode des fonctions de croyance ne représente qu'un outil de la famille des méthodes de fusion de données. À titre d'exemple, l'émergence de l'intelligence artificielle (SVR, machine

learning, deep learning...), qui occupe une place centrale dans la recherche mondiale, pourrait jouer un grand rôle dans ce domaine.

Dans ce cadre général, je co-organise un Workshop, 1^{er} de ce genre, sur la fusion de données en géosciences. L'objectif est de pouvoir échanger sur les savoir-faire de la communauté française dans le domaine. L'objectif est également de structurer la communauté sur cette thématique et définir à terme un projet de recherche sur le sujet.

Il est intéressant de noter que cette perspective s'inscrit en parfaite application des perspectives précédentes, capteurs & résistivimètre à bas coût dans une mouvance « Big-Data »; Thématique jugée prioritaire en génie-civil par le FEHRL (2017-2020) et le cluster INDURA. En effet, cumuler de l'information est une étape nécessaire, mais quelle information? et quoi en faire? sont deux autres questions. Une des pistes proposée dans ce cadre est de profiter de l'adaptabilité du résistimètre *OhmPi* permettant un déclenchement de la mesure lié à une autre observable (ex : variation teneur en eau par mesure *TDR*). Cette possibilité qui n'est actuellement disponible pour aucun autre résistivimètre permettra ainsi d'optimiser fortement la quantité de données issues d'un monitoring.

4.3.2 Perspectives à moyen terme et long terme

Des perspectives de recherche ne sont prometteuses que si elles s'inscrivent dans la durée (Fauchard, 2015). Mon premier objectif à moyen terme est de renforcer aujourd'hui les bases de collaborations pérennes avec les partenaires universitaires et industriels de mon champ d'activité. Je pense naturellement à une collaboration avec les équipes du Cerema qui regorgent de compétences variées pour la recherche finalisée liées aux problématiques terrains. J'espère que cette démarche permettra d'inscrire mon laboratoire dans une dynamique de projets présentant un fort impact sociétal.

Mon second objectif à moyen et long terme est de participer à une meilleure interaction des domaines géotechniques et géophysiques. En effet, ces domaines très complémentaires auraient beaucoup à apprendre l'un de l'autre. J'espère faire le pont entre ces deux domaines et réussir à fédérer cette double communauté en proposant des outils novateurs géophysiques pour mieux anticiper et répondre aux problématiques géotechniques.

Pour remplir ces objectifs, l'obtention d'une HDR est une 1^{ère} étape qui me permettra de diriger des recherches en complète autonomie, favorisant cette synergie Géophysique/Géotechnique. Fort de ce statut, j'espère ainsi mutualiser les compétences collectives internes et externes à l'Université Gustave Eiffel et fédérer une équipe sur cette thématique.

À titre d'exemple, je pense à la thématique des ancrages au rocher. Pour ces ouvrages géotechniques, il n'existe aucune méthode permettant de qualifier la bonne réalisation de ces ouvrages après réception sans en endommager les performances. J'ai pour perspective d'investiguer ce vide scientifique afin de proposer à la profession des outils de contrôle couplant géophysique (dont radar ULB), géotechnique, capteurs *in situ* et fusion d'informations.

Pour conclure, je tiens à signaler que je place mes plus grands espoirs sur les collaborations que j'ai initiées et pérennisées ainsi que sur la formation de futurs collègues scientifiques. C'est ainsi confiant que je répondrai aux prochains défis scientifiques qui me seront posés, conscient des enjeux scientifiques et sociétaux, du travail et de l'investissement personnel à fournir.

Conclusion Générale

Nous interagissons tous les jours avec les sites naturels et les ouvrages du génie-civil qui nous entourent. Pourtant, le fonctionnement de ces milieux est assez méconnu, limitant ainsi les possibilités d'occupation et d'emploi durables du territoire et des infrastructures.

Les méthodes d'auscultation géophysiques et géotechniques appartiennent à deux champs disciplinaires qui ont trouvés leur place dans le monde économique tout au long du XX^e siècle. Cependant, à l'aube du XXI^e siècle ces méthodes se heurtaient toujours à des limitations théoriques et matérielles restreignant leur utilisation et diffusion.

Ce mémoire d'HDR est l'occasion de dresser un bilan de ma trajectoire professionnelle et de mes activités de recherches et d'expertise. Ce fut surtout l'occasion de faire le point, de prendre un temps de réflexion, dans les questionnements qui m'ont accompagnés et dresser ceux qui me guideront à l'avenir.

Ce manuscrit retrace tout d'abord mon parcours et la littérature grise produite. Une place importante est ensuite accordée aux développements réalisés exclusivement en *IRE*. Plus particulièrement, quatre facettes de la méthode sont détaillées, i) l'instrumentation, ii) la modélisation numérique, iii) le problème inverse et iv) le post-traitement de l'information.

L'enjeu est à chaque fois le même : optimiser des outils de reconnaissance pour répondre aux problématiques portées par les *SNO*. La notion d'effet *3D* et la synergie des méthodes occupent une place importante dans ce cadre. Afin que le lecteur puisse découvrir mes travaux, les 1^{res} pages d'une sélection d'articles de rang A sont proposées en Annexes.

Ce travail conclut plus de dix années de recherche finalisée dans le domaine de l'auscultation des *SNO*. De nombreuses limitations se dressent encore pour l'évaluation de leur fonctionnement. Pour autant, je suis persuadé que les recherches actuelles et leur combinaison avec de nouvelles technologies, fourniront demain une réponse pour une interaction durable de l'Homme avec les *SNO*.

Bibliographie

- Antoine, R., C. Fauchard, Y. Fargier et E. Durand (2015). « Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging ». In : *International Journal of Geophysics*.
- Badr, J., Y. Fargier, S. Palma-Lopes, F. Deby, J.-P. Balayssac, S. Delepine-Lesoille, L.-M. Cottineau et G. Villain (2019). « Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor Resistivity Profiles over Depth in Concrete ». In : *Construction and Building Materials* 223, p. 310-321.
- Bettess, P. (1977). « Infinite Elements ». In : *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 11.1, p. 53-64.
- Bièvre, G., L. Oxarango, T. Günther, D. Goutaland et M. Massardi (2018). « Improvement of 2D ERT Measurements Conducted along a Small Earth-Filled Dyke Using 3D Topographic Data and 3D Computation of Geometric Factors ». In : *Journal of Applied Geophysics* 153, p. 100-112.
- Blome, M., H. Maurer et K. Schmidt (2009). « Advances in Three-Dimensional Geoelectric Forward Solver Techniques ». In : *Geophysical Journal International* 176.3, p. 740-752.
- Brady, B. et E. Brown (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Third Edition. Springer. 628 p.
- Chang, H. C., H. T. Lin et C. H. Lin (2012). « Benzoxazine-Based Phosphinated Bisphenols and Their Application in Preparing Flame-Retardant, Low Dielectric Cyanate Ester Thermosets ». In : *Polymer Chemistry* 3.4, p. 970-978.
- Clément, R., Y. Fargier, V. Dubois, J. Gance, E. Gros et N. Forquet (2020). « OhmPi : An Open-Source Datalogger for Dedicated Applications of Electrical Resistivity Imaging at the Small and Laboratory Scale. » In : In prep.
- Dempster, A. P. (1967). « Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping ». In : *The Annals of Mathematical Statistics* 38.2, p. 325-339.
- Descloitres, M., L. Ruiz, M. Sekhar, A. Legchenko, J.-J. Braun, M. S. M. Kumar et S. Subramanian (2008). « Characterization of Seasonal Local Recharge Using Electrical Resistivity Tomography and Magnetic Resonance Sounding ». In : *Hydrological Processes* 22.3, p. 384-394.
- Dezert, T., Y. Fargier, S. Palma Lopes et P. Côte (2018). « Application of Belief Functions to Levee Assessment ». In : *Belief Functions : Theory and Applications*. Sous la dir. de S. Destercke, T. Denoeux, F. Cuzzolin et A. Martin. Cham : Springer International Publishing, p. 73-76.
- Dezert, T., S. Palma Lopes, Y. Fargier et P. Côte (2019a). « Combination of Geophysical and Geotechnical Data Using Belief Functions : Assessment with Numerical and Laboratory Data ». In : *Journal of Applied Geophysics* 170, p. 103824.
- Dezert, T., Y. Fargier, S. Palma Lopes et P. Côte (2019b). « Geophysical and Geotechnical Methods for Fluvial Levee Investigation : A Review ». In : *Engineering Geology* 260, p. 105206.
- Dezert, T. (2019). *Combinaison d'informations Ponctuelles et Volumiques Pour Le Diagnostic d'ouvrages En Terre Soumis à Des Risques Hydrauliques*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes.
- Dore, L. et Y. Fargier (2017). « Développement d'un Scanner 3D Économique Pour Les Géosciences de l'ingénieur ». In : Journées Techniques de La Société Française de Photogrammétrie Terrestre. 7-9 mars, Marnes La Vallée.

- Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. Francois et P. Côte (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*.
- Fargier, Y., C. Fauchard, P. Mériaux, P. Royet, S. Palma Lopes, D. Francois et F. Bretar (2012). « Methodology Applied to the Diagnosis and Monitoring of Dikes ». In : *Novel Approaches and Their Applications in Risk Assessment*. Sous la dir. d'Intech. Intech.
- Fargier, Y., S. P. Lopes, C. Fauchard, D. François et P. Côte (2014). « DC-Electrical Resistivity Imaging for Embankment Dike Investigation : A 3D Extended Normalisation Approach ». In : *Journal of Applied Geophysics* 103, p. 245-256.
- Fares, M., Y. Fargier, G. Villain, X. Derobert et S. P. Lopes (2016). « Determining the Permittivity Profile inside Reinforced Concrete Using Capacitive Probes ». In : *NDT & E International* 79 (Supplement C), p. 150-161.
- Fargier, Y., R. Antoine, L. Dore, S. Lopes et C. Fauchard (2017). « 3D Assessment of an Underground Mine Pillar by Combination of Photogrammetric and Geoelectric Methods ». In : *Geophysics* 82.4, E143-E153.
- Fargier, Y., L. Dore et A. Ihamouten (2018). « Surface Variations Effect on Electrical Resistivity Measurement : Aroughness Based Approach ». In : *Journal of Applied Geophysics* 159, p. 341-349.
- Fargier, Y., Y. Ananfouet, S. P. Lopes, L. Saussaye, L. Dore, C. Jodry, C. Fauchard et G. Bièvre (2019). « Quality Assessment of a Cut-Off Wall Dike Reinforcement by 2D-ERI ». In : *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 24.3, p. 451-463.
- Fargier, Y., S. Palma Lopes, G. Villain et M. Fares (2020). « Optimized Retrieval of 1D-Resistivity Profiles in Cover Concrete by Electrical Sounding Measurements ». In : *Journal of Applied Geophysics* Soumis.
- Fargier, Y. (2011). *Développement de l'Imagerie de Résistivité Electrique Pour La Reconnaissance et La Surveillance Des Ouvrages Hydrauliques En Terre*. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale Nantes. 217 p.
- Fauchard, C., R. Antoine, F. Bretar, J. Lacogne, Y. Fargier, C. Maisonnavé, V. Guilbert, P. Marjerie, P.-F. Thérain, J.-P. Dupont et M. Pierrot-Deseilligny (2013). « Assessment of an Ancient Bridge Combining Geophysical and Advanced Photogrammetric Methods : Application to the Pont De Coq, France ». In : *Journal of Applied Geophysics* 98, p. 100-112.
- Fauchard, C., A. D. Saley, C. Camerlynck, Y. Fargier, R. Antoine et P.-F. Thérain (2018). « Discovery of the Romanesque Church of the Abbey of Our Lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by Means of Geophysical Methods ». In : *Archaeological Prospection* 25.4, p. 315-328.
- Fauchard, C. (2015). *Caractérisation Diélectrique Des Matériaux et Prospection Géophysique de Sub-surface Par Méthodes Électromagnétiques*. Thèse d'Habilitation à diriger des recherches de l'université de Rouen. 130 p.
- Finizola, A., T. Ricci, A. Sciarra, E. Delcher, R. Antoine, A. Peltier, M. Neri, J. Bernard, E. Brothelande, S. Calabrese, Y. Fargier, C. Fauchard, B. Foucart, L.-S. Gailler, R. Gusset, I. Zerpa, E. Martin, c. Mezon, M. Poret et M. Rossi (2016). « Geochemical Characterization of a High Resolution DC Electrical Resistivity Tomography Crossing the Summit Craters of Mt Etna ». In : Goldschmidt. Yokohama.
- Foster, M., R. Fell et M. Spannagle (2000). « The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents ». In : *Revue canadienne de géotechnique* 37.5, p. 1000-1024.

- Fox, R. C., G. W. Hohmann, T. J. Killpack et L. Rijo (1980). « Topographic Effects in Resistivity and Induced-Polarization Surveys ». In : *Geophysics* 45.1, p. 75-93.
- François, D. (2018). *Recommandations ERINOH (Volume 2) : Méthodologie de Diagnostic de l'érosion Interne Dans Les Dignes En Remblai*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. 408 p.
- Geselowitz, D. (1971). « An Application of Electrocardiographic Lead Theory to Impedance Plethysmography ». In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 18.1, p. 38-41.
- Grandjean, G., A. Malet J.-P. Bitri. et O. Méric (2006). « Geophysical Data Fusion by Fuzzy Logic for Imaging the Mechanical Behaviour of Mudslides ». In : *Bulletin de la société géologique de France* 177.2, p. 127-136.
- Günther, T., C. Rücker et K. Spitzer (2006). « Three-Dimensional Modelling and Inversion of DC Resistivity Data Incorporating Topography—II. Inversion ». In : 166.2, p. 506-517.
- Hadamard, J. (1902). « Sur Les Problèmes Aux Dérivées Partielles et Leur Signification Physique ». In : *Princeton University Bulletin*, p. 49-52.
- Jacobs, T., T. Junge et L. Pastewka (2016). « Quantitative Characterization of Surface Topography Using Spectral Analysis ». In : *Surface Topography : Metrology and Properties*. IOP Publishing.
- Jodry, C., S. P. Lopes, Y. Fargier, P. Côte et M. Sanchez (2017). « A Cost-Effective 3D Electrical Resistivity Imaging Approach Applied to Dike Investigation ». In : *Near Surface Geophysics* 15.1, p. 27-41.
- Kunetz, G. (1966). *Principle of Direct Current Resistivity Prospecting*. Sous la dir. de S. Gebruder Borntraeger. Geosurvey monograph series 1.
- Lesparre, N., B. Grychtol, D. Gibert, J.-C. Komorowski et A. Adler (2014). « Cross-Section Electrical Resistance Tomography of La Soufrière of Guadeloupe Lava Dome ». In : *Geophysical Journal International* 197.3, p. 1516-1526.
- Loke, M., J. Chambers, D. Rucker, O. Kuras et P. Wilkinson (2013). « Recent Developments in the Direct-Current Geoelectrical Imaging Method ». In : *Journal of Applied Geophysics* 95, p. 135-156.
- Loke, M., P. Wilkinson, S. Uhlemann, J. Chambers et L. Oxby (2014). « Computation of Optimized Arrays for 3-D Electrical Imaging Surveys ». In : *Geophysical Journal International* 199.3, p. 1751-1764.
- Loke, M. H. et R. D. Barker (1995). « Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudo-sections ». In : *Geophysics* 60.6, p. 1682-1690.
- Mandelbrot, B. (1967). « How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension ». In : *Science* 156.3775, p. 636.
- Mandelbrot, B. (1985). « Self-Affine Fractals and Fractal Dimension ». In : *Physica Scripta* 32.4, p. 257.
- Martin, A. et C. Osswald (2008). « A New Generalization of the Proportional Conflict Redistribution Rule Stable in Terms of Decision ». In : arXiv : [0806.1797 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/0806.1797).
- Martínez, A. F. et E. A. Morales (2019). « Big Data and Natural Disasters : New Approaches for Spatial and Temporal Massive Data Analysis ». In : *Computers & Geosciences* 129, p. 38-39.
- Menke, W. (1984). *Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory*. Sous la dir. d'A. Press.
- Mollon, G. (2018). « A Unified Numerical Framework for Rigid and Compliant Granular Materials ». In : *Computational Particle Mechanics* 5.4, p. 517-527.

- Moulat, M. E., O. Debauche, S. Mahmoudi, L. A. Brahim, P. Manneback et F. Lebeau (2018). « Monitoring System Using Internet of Things For Potential Landslides ». In : *Procedia Computer Science*. The 15th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2018) / The 13th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2018) / Affiliated Workshops 134, p. 26-34.
- Oldenborger, G. A., P. S. Routh et M. D. Knoll (2005). « Sensitivity of Electrical Resistivity Tomography Data to Electrode Position Errors ». In : *Geophysical Journal International* 163.1, p. 1-9.
- Park, S. K. et G. P. Van (1991). « Inversion of Pole-Pole Data for 3-D Resistivity Structure beneath Arrays of Electrodes ». In : *Geophysics* 56.7, p. 951-960.
- Peitgen, H.-O. et D. Saupe, éd. (1988). *The Science of Fractal Images*. New York : Springer-Verlag.
- Penz, S., H. Chauris, D. Donno et C. Mehl (2013). « Resistivity Modelling with Topography ». In : *Geophysical Journal International* 194.3, p. 1486-1497.
- Phillips, J. D., W. Schwanghart et T. Heckmann (2015). « Graph Theory in the Geosciences ». In : *Earth-Science Reviews* 143, p. 147-160.
- Pierrot Deseilligny, M. et I. Clery (2012). « APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images ». In : *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-5/W16*, p. 269-276.
- Portal, A., Y. Fargier, P. Labazuy, J. -F. Lénat, P. Boivin et D. Miallier (2019). « 3D Electrical Imaging of the Inner Structure of a Complex Lava Dome, Puy de Dôme Volcano (French Massif Central, France) ». In : *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, p. 97-107.
- Räss, L., D. Kolyukhin et A. Minakov (2019). « Efficient Parallel Random Field Generator for Large 3-D Geophysical Problems ». In : *Computers & Geosciences* 131, p. 158-169.
- Ricci, T., A. Finizola, M. Poret, E. Delcher, A. Peltier, R. Antoine, J. Bernard, G. Boudoire, E. Brothelande, G. Fanizza, Y. Fargier, L.-S. Gailler, E. Gueguen, R. Gusset, c. Mezon, S. Piscitelli, A. Portal, E. Rizzo, M. Rossi et R. Nave (2014). « Fluid Circulation at Somma-Vesuvius Volcanic Complex Inferred by Electrical Resistivity Tomography, Self-Potential, Temperature and Soil Degassing ». In : *Cities on Volcanoes 8*. Yogyakarta.
- Sayles, R. S. et T. R. Thomas (1978). « Surface Topography as a Nonstationary Random Process ». In : *Nature* 271.5644, p. 431-434.
- Shafer, G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press.
- Sloan, S. (2013). « Geotechnical Stability Analysis ». In : *Géotechnique* 63.7, p. 531-571.
- Smets, P. et R. Kennes (1994). « The Transferable Belief Model ». In : *Artificial Intelligence* 66.2, p. 191-234.
- Stummer, P., H. Maurer, H. Horstmeyer et A. G. Green (2002). « Optimization of DC Resistivity Data Acquisition : Real-Time Experimental Design and a New Multielectrode System ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40.12, p. 2727-2735.
- Taoum, S., Y. Fargier, A. Tonnoir, R. Antoine et C. Fauchard (2020a). « PyMERI II : New Inversion Scheme for Electrical Resistivity Imaging. » In : *Computers & Geosciences*, In prep.
- Taoum, S., A. Tonnoir, Y. Fargier, R. Antoine et C. Fauchard (2020b). « PyMERI I : Finite Element Modelling of the Electrical Diffusion in the Ground with Open Boundary Conditions. » In : *Computers & Geosciences*, In prep.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse Problem Theory : Methods for Model Parameter Estimation*. Sous la dir. de SIAM. Second Edition.

- Thiele, S. T., N. Varley et M. R. James (2017). « Thermal Photogrammetric Imaging : A New Technique for Monitoring Dome Eruptions ». In : *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 337, p. 140-145.
- Todkar, S. S., C. Le Bastard, A. Ihamouten, V. Baltazart, X. Dérobert, C. Fauchard, D. Guilbert et F. Bosc (2017). « Detection of Debondings with Ground Penetrating Radar Using a Machine Learning Method ». In : *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), p. 1-6.
- Tong, L. et C. Yang (1990). « Incorporation of Topography into Two-dimensional Resistivity Inversion ». In : *Geophysics* 55.3, p. 354-361.
- Udosen, N. et R. Potthast (2018). « Automated Optimization of Electrode Locations for Electrical Resistivity Tomography ». In : *Modeling Earth Systems and Environment* 4.3, p. 1059-1083.
- Uhlemann, S., P. B. Wilkinson, H. Maurer, F. M. Wagner, T. C. Johnson et J. E. Chambers (2018). « Optimized Survey Design for Electrical Resistivity Tomography : Combined Optimization of Measurement Configuration and Electrode Placement ». In : *Geophysical Journal International* 214.1, p. 108-121.
- Wagner, F. M., P. Bergmann, C. Rücker, B. Wiese, T. Labitzke, C. Schmidt-Hattenberger et H. Maurer (2015). « Impact and Mitigation of Borehole Related Effects in Permanent Crosshole Resistivity Imaging : An Example from the Ketzin CO₂ Storage Site ». In : *Journal of Applied Geophysics* 123, p. 102-111.
- Ward, W. O. C., P. B. Wilkinson, J. E. Chambers, L. S. Oxby et L. Bai (2014). « Distribution-Based Fuzzy Clustering of Electrical Resistivity Tomography Images for Interface Detection ». In : *Geophysical Journal International* 197.1, p. 310-321.
- Zhang, X., N. Chen, Z. Chen, L. Wu, X. Li, L. Zhang, L. Di, J. Gong et D. Li (2018). « Geospatial Sensor Web : A Cyber-Physical Infrastructure for Geoscience Research and Application ». In : *Earth-Science Reviews* 185, p. 684-703.
- Zhdanov, M. S. et G. V. Keller (1994). *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*. Sous la dir. d'A. Elsevier. Elsevier. Methods in Geochemistry and Geophysics. 873 p.

Fauchard *et al.*, 2013

Fauchard, C., R. Antoine, F. Bretar, J. Lacogne, Y. Fargier, C. Maisonnave, P.F. Thérain, P. Marjorie, J.P. Dupont, M. Pierrot Deseilligny (2013) Assessment of an historical bridge with geophysical and advanced photogrammetric methods : Application to Le Pont de Coq, Normandy, France. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 100-112. [doi:10.1016/j.jappgeo.2013.08.009](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.009).



Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the Pont De Coq, France



Cyrille Fauchard ^{a,*}, Raphaël Antoine ^a, Frédéric Bretar ^a, Julien Lacogne ^b, Yannick Fargier ^c, Cindy Maisonnave ^a, Vincent Guilbert ^a, Pierre Marjerie ^d, Paul-Franck Thérain ^e, Jean-Paul Dupont ^f, Marc Pierrot-Deseilligny ^g

^a Centre d'Études Techniques de l'Équipement - Normandie Centre, ERA23, Université de Rouen, 10 chemin de la Poudrière, CS 90245, 76121 Le Grand Quevilly, France

^b Centre d'Études Techniques de l'Équipement - Normandie Centre, DADT, Université de Rouen, 10 chemin de la Poudrière, CS 90245, 76121 Le Grand Quevilly, France

^c Centre d'Études Techniques de l'Équipement - Normandie Centre, ERA44, 11 rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois France

^d Laboratoire ECODIV, Institut de Recherche et d'Enseignement en Sciences de l'Environnement, Université de Rouen, Place Emile Blondel, F-76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

^e Direction Régionale des Affaires Culturelles - Haute Normandie, Conservation Régionale des Monuments Historiques, 7 Place de la Madeleine, 76000 Rouen, France

^f Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143-CNRS, Université de Rouen, Place Emile Blondel, F-76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

^g École Nationale des Sciences Géographiques, 6 et 8 Avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne la Vallée, Cedex 2, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 February 2013

Accepted 8 August 2013

Available online 26 August 2013

Keywords:

Arch bridge

Historical heritage

Ground penetrating radar

Electrical resistivity tomography

Photogrammetry

ABSTRACT

A high resolution geophysical survey was carried out on the Pont De Coq, a medieval stone arch bridge located in Normandy (France) in 2011 and 2012. Two complementary methods are used: Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Ground Penetrating Radar (GPR). They allow to evaluate the structural state of the bridge and to characterize the subsurface around and beneath the bridge. An excellent correlation is obtained between the geophysical methods and the geological data obtained around the bridge. In order to improve the restitution of the geophysical data, an advanced photogrammetric method is performed, providing a high resolution 3D Digital Terrain Model (DTM) of the Pont de Coq. The advanced photogrammetry enhances the presentation of the GPR and ERT data. This approach is an easy-to-use, rapid and cost-effective tool for stakeholders. Finally, it is a promising and original method for improved interpretations of future geophysical surveys.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In the last decades, public institutions have shown an increased interest in heritage conservation and monuments protection. For that purpose, geophysical methods have been used for 20 years as powerful tools to assist in the curation of buildings (Colla et al., 1997; McCann and Forde, 2001; Nuzzo et al., 2010; Orbán and Gutermann, 2009; Orbán et al., 2008; Ranalli et al., 2004).

Bridges exhibit complex structures (Boothby et al., 1998), built in various geological conditions. This characteristic makes the combination of geophysical methods necessary to obtain a meaningful model of the internal structure of such constructions and their environment. For instance, Flint et al. (1999) used the Electric Resistivity Tomography (ERT), the Seismic and the Ground Penetrating Radar (GPR) methods to observe masonry structures. GPR and infrared thermography were performed by Hing and Halabe (2010) to detect water infiltration and defects at the surface at the surface deck of a Glass-Fiber-Reinforced Polymer bridge. On masonry bridges, the GPR is one of the most used tool, due its high

practicality in the field (Hugenschmidt and Mastrangelo, 2006; Solla et al., 2010, 2011a,b). Indeed, it can be applied on the different parts of the bridge (deck, wingwalls, sprandel walls, barrel) and provides a quick observation of potential disorders (voids, roots, water infiltration, etc.) within the bridge.

The first objective of this paper is to investigate the internal structure of a small masonry arch bridge called “Pont de Coq” crossing the Epte river located in Normandy, France. This 400 year-old bridge has been severely damaged by the vegetation during several tens of years and will be subject to a complete rehabilitation in the near future. Thus, the small dimensions of the structure (a few meters) make the use of the GPR clearly suitable for a preliminary characterization of the extent of the internal disorders.

The second objective of this work is the determination of the nature of the soil around the river and under the bridge. In particular, the characterization of the foundations lying beneath the abutments is critical, because it will strongly constrain the rehabilitation stages. In such an alluvial context, the ERT and GPR methods are suitable for a rapid imaging of the shallow subsurface (Doetsch et al., 2012; Ercoli et al., 2012; Gourry et al., 2003). We performed several GPR and ERT profiles along the road crossing the bridge, as well as in the transverse direction to the structure. GPR observations were also made along the arch barrel of the bridge. Finally, the subsurface of the two banks of the river near

* Corresponding author. Tel.: +33 235689295; fax: +33 235688188.
E-mail address: cyrille.fauchard@developpement-durable.gouv.fr (C. Fauchard).

Fargier *et al.*, 2014

Fargier, Y., S. Palma Lopes, C. Fauchard, D. François, P. Côte (2014) DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation : A 3D extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*, 103, 245-256. [doi:10.1016/j.jappgeo.2014.02.007](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.02.007).



DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation: A 3D extended normalisation approach



Yannick Fargier^{a,b,c,*}, Sérgio Palma Lopes^b, Cyrille Fauchard^a, Daniel François^c, Philippe Côte^b

^a Centre d'Études Techniques de l'Équipement — Normandie Centre, 11, Rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois Cedex, France

^b LUNAM, Ifsttar, Route de Bouaye, 44230 Bouguenais, France

^c EDF R&D, 6 Quai Watier, 78000 Chatou, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 August 2013

Accepted 2 February 2014

Available online 17 February 2014

Keywords:

Embankment hydraulic structures

Electrical Resistivity Imaging

Apparent resistivity concept

Normalisation

ABSTRACT

Levee, dike and earth embankment dam structures are difficult to assess because of their length and complexity. Managers often include geophysical investigations in the overall dike condition assessment and the DC-Electrical Resistivity Imaging (ERI) method is particularly applicable owing to its cost-effectiveness and its potential sensitivity to internal erosion. However, due to the truly 3D nature of embankment dikes, implementing inline longitudinal tomographies along with conventional 2D inversion is likely to yield image artefacts. 3D effects from external causes (geometry, water reservoir) can be predicted and therefore we present a new approach based on redefining the normalisation principle to derive apparent resistivities from the measured data. The aim is to provide a set of pre-processed apparent resistivities that are not contaminated by external 3D effects and that yield more reliable results when processed within a 2D conventional inversion scheme. The presented approach is successfully applied to synthetic and real data sets, proving superior to the conventional 2D approach, although data acquisition approach is the same thus keeping the same cost-effectiveness.

© 2014 Published by Elsevier B.V.

1. Introduction

Hydraulic earthfill structures such as the embankment dams, dikes and levees are essential infrastructures. A variety of functions are performed by hydraulic embankments in interest of populations such as energy production, waterway freight transport, water retention and storage and protection against flood events (Fauchard and Mériaux, 2007; Royet, 2006). However, embankment dikes and dams are subject to several phenomena such as water infiltration and internal erosion, which may lead to mechanical weakness and even breaching (Fell and Fry, 2007; Foster et al., 2000a).

Stability assessment methodologies more often include geophysical investigations for the identification of weak segments and for the optimization of geotechnical testing (Carlsten et al., 1995; Mériaux et al., 2006). More precisely, the common geophysical practice includes high output investigation methods for fast zoning purposes, and DC-Electrical Resistivity Imaging (ERI) for a higher resolution locating and characterizing of defaults (Fauchard and Mériaux, 2007; Royet et al., 2012). Thanks to recent improvements in data acquisition, ERI is now widely used for dike survey and monitoring (Hennig et al., 2005;

Sjödahl et al., 2006, 2008; Tsourlos et al., 1999). Advantages of ERI based techniques are numerous. They are moderately fast to implement, cost-effective and highly sensitive to DC-electrical conductivity contrasts commonly found in dikes due to state and variability of encountered materials (clay content, moisture content in vadose zone, temperature, porosity or compaction level) (Johansson and Dahlin, 1996). For cost-effectiveness reasons (dikes being long linear structures), ERI is usually applied in a conventional way, based on a line of equidistant electrodes parallel to the longitudinal direction (e.g. on the crest axis). When the layout includes two or more parallel lines, these are usually obtained or processed separately and inverted within two-dimensional (2D) type inversion schemes (except in few cases e.g. (Cho and Yeom, 2007), but still with a 2D type of inversion).

However, dike geometry and internal property distribution clearly violate such a simple 2D assumption leading to potential artefacts in resulting 2D images (Hennig et al., 2005; Tsourlos et al., 1999). The development of data processing techniques for improving ERI relevance for dike investigation is clearly essential. Although fully 3D approaches would address the problem in a more rigorous manner, they do not benefit from the cost-effectiveness of 2D data acquisition procedures for dike assessment.

In this context, we propose to still carry out a classical 2D ERI acquisition technique and then to insert external 3D information in the data before performing the conventional 2D data inversion, similarly to previously published work for other applications (Fox et al., 1980; Vickery

* Corresponding author at: Centre d'Études Techniques de l'Équipement — Normandie Centre, 11, Rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois Cedex, France. Tel.: +33 254554932; fax: +33 254554871.

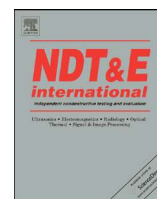
E-mail address: yannick.fargier@developpement-durable.gouv.fr (Y. Fargier).

Fares *et al.*, 2016

Fares, M., Y. Fargier, G. Villain, S. Palma Lopes, X. Dérobert (2015) Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes. *NDT&E International*, 80, 1-9. [doi:10.1016/j.ndteint.2016.01.0027](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.01.0027).

Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

NDT&E International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ndteint

Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes



Milia Fares ^{a,*}, Yannick Fargier ^b, Géraldine Villain ^a, Xavier Derobert ^a, Sergio Palma Lopes ^a

^a IFSTTAR Nantes LUNAM Université, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais, France

^b CEREMA, Direction Territoriale Normandie-Centre (site de Blois), 11 rue Laplace, CS2912, 41029 Blois Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 July 2015

Received in revised form

30 December 2015

Accepted 12 January 2016

Available online 18 January 2016

Keywords:

Durability

NDT

Concrete

Permittivity

Water content

ABSTRACT

Non-destructive techniques are the future of structure health assessment and monitoring. The dielectric permittivity is sensitive to the water and ionic content of concrete and it can be measured by capacitive probes. In this paper, an inversion method to obtain the permittivity profile inside reinforced concrete from surface capacitive measurements is presented. The inversion process is applied to synthetic models using two forms of parametrizations (discrete and continuous). In addition, the effect of data noise on the inversion is studied. At last, water saturation profiles inside a concrete slab are obtained by means of inversion of experimental capacitive data.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The development of infrastructures has played an important role in economic growth and the quality of life. The consequences of lack of maintenance of infrastructures can be dangerous to the economy, the environment and most importantly to human lives. Therefore, regular inspections and performance control are essential to ensure the safety and the durability of infrastructures.

For these reasons, many research programs have been conducted to optimize inspection and maintenance management [1–6]. Early inspection and repair of the structures can limit the damage and lower the costs. Several inspection methods can be applied depending on the purpose of the inspection, the accuracy and the cost of the methods [2]. In preliminary assessment, visual inspection is the most simple and used technique [3]. However, visual inspection can fail to detect critical damage inside the structure and therefore the use of more developed non-destructive techniques (NDT) can improve the reliability of the assessment.

Various NDT applied to civil engineering have been developed, they are sensitive to different properties of the material and they vary with their investigation depth. For strength assessment and defect detection for example, ultrasonic methods can be applied for they are sensitive to the elastic modulus and the density of the

material as well as to the presence of voids and cracks [7–11]. Furthermore, electromagnetic methods measuring the dielectric permittivity have been proven sensitive to the water and ionic content [12–15].

This article deals with NDT based on capacitive probes that measure the real part of the complex dielectric permittivity in concrete [13,16]. The dielectric permittivity of concrete is sensitive to the three phases constituting the material (gaseous, dry and liquid phases) [14]. Therefore, variation in permittivity can indicate a variation of water and ionic contents. Assessment of these parameters is very important to monitor the health of the concrete. Chloride penetration for example can induce corrosion of reinforcement bars hence damaging the structure. Furthermore, water content affects the rate of chloride penetration [17–19] and other damage mechanisms [20] such as alkali–silica reaction [21,22] and freeze/thaw attack [23]. For these reasons, this article focuses on determining the water content profile using capacitive techniques.

The capacitive system offers three probes of different sizes and thus allows a range of investigation depths. The capacitance can be expressed in terms of permittivity of the material. The permittivity obtained is referred to as “apparent”: it is the permittivity of a homogeneous medium whose capacitance measurement is the same as that of the medium being tested [24]. Our aim in this study is the development of an inversion process to obtain the permittivity profile versus the depth in a concrete slab which can

* Corresponding author.

E-mail address: milia.fares@ifsttar.fr (M. Fares).

Bièvre *et al.*, 2017

Bièvre, G., P. Lacroix, L. Oxarango, D. Goutaland, G. Monnot, Y. Fargier (2017) Assessment of an earth-filled dyke with a permanent hydraulic head. Integration of geotechnical and geophysical investigations (seismics, resistivity) and localization of internal erosion piping using ambient vibrations. *Journal of applied geophysics*, 139, 1-15. [doi:10.1016/j.jappgeo.2017.02.002](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.002).



Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage



Grégory Bièvre ^{a,*}, Pascal Lacroix ^{a,b}, Laurent Oxarango ^c, David Goutaland ^d, Guy Monnot ^e, Yannick Fargier ^f

^a Univ. Grenoble Alpes, ISTERre, F-38000 Grenoble, France

^b Univ. Grenoble Alpes, IRD, ISTERre, F-38000 Grenoble, France

^c Univ. Grenoble Alpes, LTHE, F-38000 Grenoble, France

^d CEREMA, Direction Territoriale Centre-Est, F-63017 Clermont-Ferrand, France

^e CEREMA, Direction Territoriale Centre-Est, F-71405 Autun, France

^f CEREMA, Direction Territoriale Normandie-Centre, F-41029 Blois, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 July 2016

Received in revised form 23 January 2017

Accepted 9 February 2017

Available online 21 February 2017

Keywords:

Earth-filled canal dyke

Water head

Geometry

Leakage

Internal erosion

Geophysics

ABSTRACT

This paper investigates the combined use of extensive geotechnical, hydrogeological and geophysical techniques to assess a small earth dyke with a permanent hydraulic head, namely a canal embankment. The experimental site was chosen because of known issues regarding internal erosion and piping phenomena. Two leakages were visually located following the emptying of the canal prior to remediation works. The results showed a good agreement between the geophysical imaging techniques (Electrical Resistivity Tomography, P- and SH-waves Tomography) and the geotechnical data to detect the depth to the bedrock and its lateral variations. It appeared that surface waves might not be fully adapted for dyke investigation because of the particular geometry of the studied dyke, non-respectful of the 1D assumption, and which induced depth and velocity discrepancies retrieved from Rayleigh and Love waves inversion. The use of these classical prospecting techniques however did not allow to directly locate the two leakages within the studied earth dyke. The analysis of ambient vibration time series with a modified beam-forming algorithm allowed to localize the most energetic water flow prior to remediation works. It was not possible to detect the leakage after remediation works, suggesting that they efficiently contributed to significantly reduce the water flow. The second leakage was not detected probably because of a non-turbulent water flow, generating few energetic vibrations.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Earth-filled canal embankments play several functions. Their role is to ensure shipping, water transport and water storage. Depending on their degree of impermeability, these dykes present the particularity of containing a more or less permanent hydraulic head. As such, they are prone to internal erosion phenomena, such as leakage and piping, which may lead to breaching (Foster et al., 2000; Fell et al., 2003). Furthermore, these structures might be older than several tens of years with very few available geotechnical data. Finally, these linear infrastructures may be stretched over up to several thousands of km per country (e.g. 9000 km of embankments in France according to the French Association of Embankments' Managers; france-digues.fr). As such, rapid and cost-effective methods are needed to assess the geotechnical conditions of these structures, to locate heterogeneous and/

or weak zones and to optimize the location of geotechnical prospecting (drilling and in situ tests).

Since the pioneering works of Ogilvy et al. (1969) and due to technological improvements in the past decades, geophysical methods have been increasingly used to assess the geotechnical and hydrogeological setting of earth dykes. These methods have been used to characterize both the internal architecture of dykes (geometry, lateral variations, etc.) but also to try to localize specific anomalies such as internal erosion pipes. To achieve a first qualitative zoning, in terms of architecture and geometry, it is generally recommended to apply first rapid and efficient methods such as Slingram and/or Airborne ElectroMagnetic (AEM) induction techniques (Fauchard and Mériaux, 2007; Royet et al., 2013). When heterogeneous zones are detected, quantitative imaging techniques (among others: electrical resistivity, seismic refraction, ground-penetrating radar (GPR)) are then applied to try to locate in two dimensions (2D) defaults within the dyke (Fauchard and Mériaux, 2007; Niederleithinger et al., 2012). Among all geophysical techniques, Electrical Resistivity Tomography (ERT) is the most

* Corresponding author.

E-mail address: gregory.bievre@univ-grenoble-alpes.fr (G. Bièvre).

Fargier *et al.*, 2017

Fargier, Y., R. Antoine, L. Dore, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2017) 3D assessment of a quarry pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods. *Geophysics*, 82(4), E143-E153

3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods

Yannick Fargier¹, Raphaël Antoine², Ludovic Dore¹, Sérgio Palma Lopes³, and Cyrille Fauchard²

ABSTRACT

The monitoring of underground cavities plays a key role in risk management policies. Mine and underground quarry stakeholders require relevant methodologies and practices to define and assess hazards associated with these structures. To monitor these structures, geophysical methods may offer an interesting compromise among operating cost, invasiveness, and risk assessment reliability. The use of conventional 3D-electric resistivity imaging (ERI) software validated on relatively flat media is not sufficient to efficiently assess complex 3D geometries such as underground mine pillars. We have developed a new approach to evaluate pillar condition by means of a sequential use of two techniques. First, the

photogrammetric method yields a detailed 3D model of the pillar geometry from a set of pictures. Second, 3D-ERI is performed based on this suitable geometry. The methodology is tested on a synthetic model to evaluate the effect of various geometry resolutions on the inversion. We also evaluated the combination of the effect of measurement and geometry error. We performed a quasi 3D-ERI survey (three parallel electrode lines) on a real limestone mine pillar to determine the benefits and limitations of the combined procedure. First results revealed the capacity of the photogrammetric methods to obtain a high-precision geometry and its key role during the inversion process. Second results of the real case study revealed that a highly accurate geometry is required to detect accurately conductive anomalies in a complex 3D context.

INTRODUCTION

Degradation of underground quarries can lead to collapses, which can directly impact buildings and civil engineering structures on the surface and, even worse, dangerously threaten people's safety (Bell et al., 1992; Al Heib et al., 2014). In this context, the monitoring of abandoned quarries is of major importance.

Stability assessment methods of underground chalk mines are mainly based either on structural numerical modeling or on geometric criteria (i.e., tributary area method) (Brady and Brown, 2013). Both are combined with rock physical properties measured in the vicinity of the area studied. Nevertheless, these methods are based on the assumption that the internal properties of pillars are quite homogeneous (Ferrero et al., 2010), and consequently, they are likely to underestimate the associated risk of collapse.

A complementary approach consists of using geophysical methods to overcome this limitation. To this end, Dérobert and Abraham (2000) use seismic and ground-penetrating radar methods to assess

pillar conditions in a gypsum quarry. Results showed that both methods were able to detect internal cracks in the medium.

Electric resistivity imaging (ERI) is a widely used method exhibiting two main benefits when applied to mine pillar assessment. The first is to provide qualitative detection and monitoring of anomalies within the pillar (e.g., cracks or heterogeneous zones [Jones et al., 2014; Li et al., 2015]). The second is to provide a quantitative description of the electric resistivity distribution within the pillar. ERI is considered to be a relevant tool to assess the internal distribution of water content in geologic (Brunet et al., 2010) or civil engineering (Rings et al., 2008) contexts. This quantitative description can be interpreted with empirical laws to link the variation in chalk mechanical properties with water content distribution (Gombert et al., 2013).

However, conventional 2D and 3D imaging techniques are mainly applied to flat surface surveys (Dahlin, 1996) or to surfaces with moderate topography (Fox et al., 1980; Günther et al., 2006; Erdoğan et al., 2008; Demirci et al., 2012; Fargier et al., 2014). Interesting

Manuscript received by the Editor 26 May 2016; revised manuscript received 23 January 2017; published online 9 May 2017.

¹Cerema, Direction Territoriale Normandie Centre, Blois, France. E-mail: yannick.fargier@cerema.fr; ludovic.dore@cerema.fr.

²Cerema, Direction Territoriale Normandie Centre, Rouen, France. E-mail: raphael.antoine@cerema.fr; cyrille.fauchard@cerema.fr.

³LUNAM Université, IFSTTAR, Department GERS, Nantes, France. E-mail: sergio.palma.lopes@ifsttar.fr.

© 2017 Society of Exploration Geophysicists. All rights reserved.

Jodry *et al.*, 2017

Jodry, C., Y. Fargier, S. Palma Lopes, P. Côte, M. Sanchez (2016) Assessment of the 3D- Electrical Resistivity Imaging approach for embankment dike evaluation : application to an earth dike along the river Loire. *Near Surface Geophysics*, 15(1), 27-41. [doi:10.3997/1873-0604.2016036](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016036).

A cost-effective 3D electrical resistivity imaging approach applied to dike investigation

Clara Jodry^{1*}, Sérgio Palma Lopes², Yannick Fargier³, Philippe Côte² and Martin Sanchez⁴

¹ Nantes University, Observatory of the Sciences of the Universe Nantes Atlantique, 44322 Nantes, France

² IFSTTAR Nantes GERS department, GeoEND laboratory, CS4 44344 Bouguenais Cedex, France

³ Cerema, DTer Normandie-Centre, Laboratory of Blois, CS 32912 41029 Blois, France

⁴ Nantes University, Planetology and geodynamic laboratory, 44322 Nantes, France

Received August 2015, revision accepted September 2016

ABSTRACT

Although DC electrical resistivity imaging is widely applied to dike investigation, either rapid 2D or high-resolution 3D approaches fail to address actual needs. An intermediate electrical resistivity imaging approach referred to as “3D-” is introduced in this paper. The methodology is based on existing tools, and it offers useful and sufficiently reliable 3D images of the investigated structure within a cost-effective and flexible procedure. The survey design, the model discretisation, and the thorough integration of *a priori* information are the main phases of this procedure. To demonstrate the benefits and limitations of this approach, it is applied to an existing stretch of embankment levee along the Loire River. A numerical study was carried out both on synthetic and real data to assess the 3D imaging capability of the approach and the influence of prior information on the inversion outputs. The important role of *a priori* information is shown to be even more essential here. The results demonstrate the efficiency and versatility of the 3D- approach for reliable and cost-effective investigations of long dikes.

INTRODUCTION

Embankment dikes are vulnerable to ageing processes that can ultimately lead to instability and failure (Foster, Fell, and Spannagle 2000). These are linear earthworks that serve as water-retaining or flood protection structures. Flood protection dikes are also called levees (CIRIA, MEDDE, and USACE 2013). The failure of flood defence systems is costly in terms of both human and financial impacts, and associated risks need to be mitigated by means of cost-effective methodologies of stability assessment. Many geophysical methods have been applied to earthen levee and dam condition assessments (e.g., Niederleithinger *et al.* 2012), including DC resistivity techniques (e.g., Inazaki and Sakamoto 2005), low-frequency electromagnetic profiling (e.g., Fauchard and Mériaux 2007; Niederleithinger *et al.* 2012), ground-penetrating radar (e.g., Carlsten, Johansson, and Wörman 1995; Antoine *et al.* 2015), and seismic methods (e.g., Cardarelli, Cercato, and Di Filippo 2010; Cardarelli, Cercato, and De Donno 2014). DC electrical resistivity imaging (ERI) is widely applied to mapping the inner structure of dikes, as well as to detecting and monitoring seepage phenomena (e.g., Johansson and Dahlin 1996; Sjö Dahl *et al.* 2008; Weller *et al.* 2014). Furthermore, the efficiency of inte-

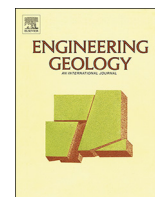
grated approaches combining geophysical methods and geotechnical testing in improving the stability assessment of levees and embankments is now widely accepted (e.g., Inazaki and Sakamoto 2005; Fauchard and Mériaux 2007; Donohue, Gavin, and Tolooyan 2011; Royet *et al.* 2013).

In order to allow rapid investigation of long stretches of dikes and for easy field implementation, ERI is mainly carried out within a 2D framework: the survey line is usually set parallel to the longitudinal axis of the dike, and the measured data are processed by means of 2D inversion software (Royet *et al.* 2013). Dikes, however, are complex 3D structures that do not comply with the required 2D assumption. On one hand, their inner structure may exhibit strong longitudinal and transverse variability (e.g., presence of a clay core or repaired zones). On the other hand, embankment topography and high water-level fluctuations adjacent to the dike have 3D effects on the resistivity measurements leading to image artefacts (Hennig, Weller, and Canh 2005; Sjö Dahl, Dahlin, and Zhou 2006; Oh 2012; Fargier *et al.* 2014; Cho *et al.* 2014). In order to account for the full 3D attributes of the problem, one would normally recommend the use of a complete 3D ERI procedure (e.g., Chambers *et al.* 2014). However, these high-resolution techniques are time consuming and are not workable for rapid investigation of long dikes (Royet *et al.* 2013). Moreover, the

* clara.jodry@gmail.com

Dezert *et al.*, 2018

Dezert, T., Y. Fargier, S. Palma Lopes, P. Cote (2018) Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation : a review. *Engineering Geology*, 260, 132-151, [doi:10.1016/j.jappgeo.2019.05.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.008).



Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review



Théo Dezert^{a,b,*}, Yannick Fargier^{b,c}, Sérgio Palma Lopes^a, Philippe Côte^a

^a GERS, GeoEND, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France

^b Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, F-41000 Blois, France

^c GERS, RRO, IFSTTAR, Univ Lyon, F-69675 Lyon, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Levee
Condition assessment
Near surface geophysics
Geotechnical engineering

ABSTRACT

Fluvial levees are assets of major importance for protecting human lives and activities. To prevent the risk of failures and to assess their stability, survey campaigns involving geophysical and geotechnical methods are needed. These two types of methods play highly complementary roles and provide information of different natures, uncertainties and spatial distributions. In this work, we first present the function of fluvial levees and describe the associated physical properties that may become pathological and lead to failure mechanisms. Then for each presented investigation method, we introduce : its basic principles, its ability to characterize specific physical properties (or characteristics) of fluvial levees, and then its advantages and drawbacks under specific environmental conditions. It should be emphasized that geophysical and geotechnical methods are placed on an equal footing in order to assist agencies and levee managers in selecting the most relevant ones to assess the condition of their levees and characterize potential weak zones, according to a specific type of pathology and to the environmental constraints. Throughout this review, we introduce a certain amount of literature that is believed to be of potential interest to the research community as well. We also draw attention to some lack of information on the application of specific methods to levee investigation. Finally, we discuss some complementarities of the presented methods and we propose a dedicated comparative table, leading us to suggest new method combinations for levee investigation.

1. Introduction

Fluvial levees are manmade structures built up for flood protection (Brierley et al., 1997). They are considered as hazardous structures that can fail and lead to disastrous consequences such as human or material loss and economic disasters (van der Veen et al., 2003). To prevent the risk of failure, it is required to carry out survey campaigns in order to assess the stability of levees. Fluvial levees are very various: their age, history, structure and composition materials make each one unique (Foster et al., 2000b) and more or less subject to failure in weak zones under specific loads. The purpose of the assessment is to verify the levee serviceability level in comparison with design serviceability level. It is firstly based on technical surveys able to establish if specific pathologies that could lead to failure mechanisms are present in the levee structure. In order to perform a reliable assessment, it is required to be aware of the relations linking these pathologies to the different existing failure mechanisms.

There are globally acknowledged methodologies for levee assessment (Royet et al., 2013) that include a phase of investigation involving geophysical investigation methods (Kearey et al., 2013) and geotechnical investigation methods (Look, 2014). Geophysical methods provide physical information on large volumes of subsoil with potentially important related uncertainties. These associated uncertainties are notably due to the resolution of inverse problems and to the indirect and integrative aspects of the methods. These methods are non-intrusive, unlike geotechnical investigation methods that provide more punctual and more accurate information. The aim of this paper is to place on an equal footing these two types of methods in order to assist agencies and levee managers in selecting the most relevant methods to characterize the vulnerability of a levee, according to a type of pathology and to the environmental constraints, in an effective way. In this work, we confine ourselves exclusively to fluvial levees and to survey campaigns excluding monitoring and well logging methods. Even though monitoring techniques bring a lot to fluvial levee diagnosis

* Corresponding author.

E-mail addresses: theo.dezert@ifsttar.fr (T. Dezert), yannick.fargier@ifsttar.fr (Y. Fargier), sergio.lopes@ifsttar.fr (S. Palma Lopes), philippe.cote@ifsttar.fr (P. Côte).

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105206>

Received 27 March 2018; Received in revised form 13 June 2019

Available online 18 June 2019

0013-7952/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Fargier *et al.*, 2018

Fargier, Y., L. Dore, A. Ihamouten (2018) Surface variations effect on electrical resistivity measurement : A roughness based approach. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 341-349. doi: [10.1016/j.jappgeo.2018.08.016](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.08.016).



Surface variations effect on electrical resistivity measurement: A roughness based approach

Yannick Fargier ^{a,*}, Ludovic Dore ^b, Amine Ihamouten ^c

^a Univ. Lyon/IFSTTAR/GERS, F-69675, Lyon, France

^b Cerema, 41029 Blois, France

^c Cerema, Project-teamENDSUM, 49136, Les Ponts de Cé, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 January 2018

Received in revised form 31 August 2018

Accepted 31 August 2018

Available online 07 September 2018

ABSTRACT

Electrical Resistivity Imaging technique requires accurately taking surface geometry into account during the inversion process to avoid artefacts. Some terrains (for example volcanology) or materials (at low scale) present important high frequency topography variations that common inversion software cannot take into account. Recent Digital Elevation Model (DEM) tools offer a high resolution that permit to image some characteristics of these rough surfaces. The aim of this paper is to examine the effect on the electrical measurement of different surface topography features at different DEM resolutions. For this purpose, we evaluate the effects on a micro and macro scale. We define mathematical criteria (based on geometrical roughness parameters) to analyse and generate surfaces and we simulate electrical measurements with a Finite Element Analysis code. An initial numerical study shows that roughness parameters play a key role in resistivity measurement. A second study performed on 30 limestone samples shows that a DEM resolution trade-off can be found based on geometrical roughness parameters. This study gives a rule of thumb to determine a resolution threshold for real survey data.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Electrical Resistivity Imaging (ERI) technique is applied more and more on complex field cases where surface topography can affect measurement. Mention may be made of some research in civil engineering (Lataste et al., 2003; Taillet et al., 2014), archaeology/cultural heritage (Abu-Zeid et al., 2006; Fauchard et al., 2013) and vulcanology (Fikos et al., 2012; Johnson et al., 1980; Lesparre et al., 2014).

Recent surface mapping tools (such as Lidar, Radar, Photogrammetry) supply increasingly accurate and high resolution Digital Elevation Models (Li et al., 2005). There are numerous examples in geoscience (Bistacchi et al., 2011; Brothelande et al., 2015; Candela et al., 2009) and civil engineering (Avdelidis et al., 2004; Gentile and Bernardini, 2008; Laefer et al., 2014; Pieraccini et al., 2008; Pieraccini et al., 2002).

DEM tools supply much more resolution that ERI inversion software can handle. However, not taking into account this information can lead to the creation of artefacts (Günther et al., 2006; Tong and Yang, 1990). This context leads to the three main questionings of this article:

- How can we describe DEM mathematically?
- What is the impact of surface roughness on electrical resistivity measurement?
- What is the “optimal” DEM resolution for ERI?

From our knowledge, answers are proposed for the first question (Jacobs et al., 2016; Mandelbrot, 1967). Although topography is a well studied ERI issue (Fargier et al., 2014; Tsourlos et al., 1999), the last two questions are scarcely addressed in the literature. For the last question, an empirical rule of thumbs is given by Fargier et al. (2017) based on the ratio between real and direct length between two electrodes. However this basic rule cannot handle complex and rough topography.

This work first presents the theory behind the definition of topography, roughness and ERI method. In a second time, a numerical study demonstrates the effects of different roughness parameters on ERI measurements. Third, a laboratory test on limestone samples was performed. DEMs and ERI measurements are obtained with a photogrammetric scanner and an Ohmmeter, respectively (Abem, Terrameter SAS 1000). Moreover, we performed a surface analysis of the DEMs and we quantified the necessary DEM resolution to limit modelling errors. Results show that certain roughness parameters play a key role while others have a minor impact on measurement. It also

* Corresponding author.

E-mail address: yannick.fargier@ifsttar.fr (Y. Fargier).

Fauchard *et al.*, 2018

Fauchard, C., A. D. Saley, Y. Fargier, R. Antoine, P.-F. Thérain, C. Camerlynck (2018) Discovery of the Romanesque church of the Abbey of Our Lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods. *Journal of Archaeological Science*, 25(4), 315-328. [doi:10.1002/arp.1711](https://doi.org/10.1002/arp.1711).

RESEARCH ARTICLE

Discovery of the Romanesque church of the Abbey of our lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods

Cyrille Fauchard^{1,2}  | Abdoulaziz Djibrila Saley³ | Christian Camerlynck⁴ | Yannick Fargier⁵ | Raphael Antoine^{1,3} | Paul-Franck Thérain⁶

¹ Cerema, Equipe-Projet Evaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux, ENDSUM, Le Grand-Quevilly, France

² Université de Rouen Normandie, UMR 6634 GPM, Saint-Etienne-du-Rouvray, France

³ Université de Rouen Normandie, UMR 6143 M2C, Mont-Saint-Aignan, France

⁴ Sorbonne Université, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, Paris, France

⁵ Ifsttar, GERS-RRO, Bron, France

⁶ Direction Régionale des Affaires Culturelles de Normandie, Rouen, France

Correspondence

Cyrille Fauchard, Cerema, Equipe-Projet Evaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux, ENDSUM, F-76121 Le Grand-Quevilly, France.

Email: cyrille.fauchard@cerema.fr

Abstract

A geophysical survey was carried out in 2015 for the development of the patrimonial site of the Abbey of Our Lady of Bec (also called the Bec Abbey), located in Le Bec-Hellouin, Normandy, France. This survey aimed at optimizing the future accessibility programme by preserving the historical heritage of the Bec Abbey, taking into account potential underground remains. The ground penetrating radar (GPR), the electrical resistivity imaging (ERI) and the magnetic method (MM) were used to prospect the shallow surface. The GPR imaging shows longitudinal and curved structures, drawing the classical and simplified plan of a Romanesque church basement of the eleventh century. This is the most important discovery of this survey, since the existence of this church was historically known but has remained unlocated till this geophysical survey. The ERI measurements confirm and locally complete most of the GPR results. Despite the very magnetic-noisy environment, the MM investigation is the only method detecting a longitudinal structure that can be the foundation of an ancient wall between the Saint Nicolas' tower and the church nave of the thirteenth century. Finally, authorities recently allowed in July 2017 the publication of excavations performed by archaeologists. Most of the geophysical anomalies have helped to target the archaeological investigation and the results provide a detailed interpretation in terms of depth and nature of remnants. Archaeological investigation then offers an important historical outcome of the various stages of construction and destruction of the Bec Abbey.

KEYWORDS

electrical resistivity imagery, ground penetrating radar (GPR), magnetic method, Romanesque church

1 | INTRODUCTION

In the past decades, geophysical methods have been increasingly used in archaeological studies for locating buried structures in a shallow surface (Drahor, Berge, & Öztürk, 2011; Rabbel et al., 2015; Rodrigues, Porsani, Santos, DeBlasis, & Giannini, 2009; Zheng et al., 2013) or for assessing walls condition of ancient buildings (Brooke,

1994; Orlando, Cardarelli, Cercato, & De Donno, 2015; Souffaché, Kessouri, Blanc, Thiesson, & Tabbagh, 2016). Various techniques can be carried out, depending on the area to be surveyed, the depth of targets and the nature of the surrounding media. The best solution generally consists in (i) combining several geophysical methods with an accurate positioning system, (ii) observing on site details and (iii) gathering historical data from previous studies. For very large areas,

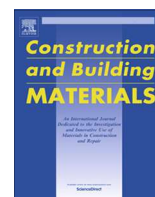
Badr *et al.*, 2019

Badr, J., Y. Fargier, S. Palma Lopes, F. Deby, J.-P. Balayssac, S. Lesoille, L.-M. Cottineau G., Villain (2019) Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor 1 Resistivity Profiles over Depth in Concrete. *Construction and Building Materials*, 233, 310-321. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226).



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete



Joanna Badr^{a,b,*}, Yannick Fargier^{b,c}, Sérgio Palma-Lopes^b, Fabrice Deby^a, Jean-Paul Balayssac^a, Sylvie Delepine-Lesoille^d, Louis-Marie Cottineau^b, Géraldine Villain^b

^aLMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil, Toulouse 31077, France

^bIFSTTAR, Site de Nantes, Bouguenais 44344, France Site de Bron, Bron 69675, France

^cCEREMA, Site de Blois, Blois 41029, France

^dAndra, French National Radioactive Waste Management Agency, Chatenay-Malabry 92298, France

HIGHLIGHTS

- Design of an embedded sensor to monitor concrete resistivity profiles.
- The designed solution is a multi-electrode printed circuit board (PCB) sensor.
- Numerical validation of the sensor was performed.
- Validation of the sensor in solutions of known conductivity.
- Validation of the sensor in concrete to monitor concrete drying.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 March 2019

Received in revised form 27 June 2019

Accepted 29 June 2019

Keywords:

(Multi-electrode) embedded sensor

Monitoring

Electrical resistivity

Concrete structures

Finite element modeling

ABSTRACT

Electrical resistivity is sensitive to various properties of concrete, such as water content. Usually used on the surface of old structures, devices for measuring such properties could also be adapted in order to be embedded inside the constitutive concrete of the linings of new tunnels or in new bridges, to contribute to structural health monitoring. This paper introduces a novel multi-electrode embedded sensor for monitoring the resistivity profile over depth in order to quantify concrete durability. The paper focuses on the design of the sensor as a printed circuit board (PCB), which brings several advantages, including geometric accuracy and mitigation of wiring issues, thus reducing invasiveness. The study also presents the numerical modeling of the sensor electrical response and its ability to assess an imposed resistivity profile, together with experimental validations using (i) saline solutions of known conductivity and (ii) concrete specimens subjected to drying. The results demonstrate the capability of the sensor to evaluate resistivity profiles in concrete with centimeter resolution.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Water content is one of the main parameters governing the long-term durability of concrete structures. It is necessary to check hydric transfers over their entire thickness and not only in their concrete cover. Various methods enable concrete water content

to be measured and monitored. They include Time Domain Reflectometry TDR [1–4], capacitive techniques [5–7], Ground Penetrating Radar GPR [8–10], electrical resistivity techniques [6,7,11–15] and Gammadensimetry [16,17] which is indirectly sensitive to the water content of concrete via its density. These different techniques have their own resolutions and constraints (related to the physical measurement but also to the signal processing). In this work, we specifically address the need to monitor the water content profile of concrete over its entire thickness. This is of great importance for the thick concrete repository structures used for radioactive wastes; and for applications that require a centimeter resolution over the entire thickness.

* Corresponding author at: Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse LMDC, 135, Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex 4, France.

E-mail addresses: badr@insa-toulouse.fr, joanna.badr@ifsttar.fr (J. Badr), yannick.fargier@ifsttar.fr (Y. Fargier), sergio.lopes@ifsttar.fr (S. Palma-Lopes), f_deby@insa-toulouse.fr (F. Deby), balayssa@insa-toulouse.fr (J.-P. Balayssac), Sylvie.Lesoille@andra.fr (S. Delepine-Lesoille), louis-marie.cottineau@ifsttar.fr (L.-M. Cottineau), geraldine.villain@ifsttar.fr (G. Villain).

Dezert *et al.*, 2019

Dezert, T., S. Palma Lopes, Y. Fargier, P. Cote (2019) Combination of geophysical and geo-technical data using belief functions : assessment with numerical and laboratory data. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103824. [doi:10.1016/j.jappgeo.2019.103824](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103824).



Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions: Assessment with numerical and laboratory data

T. Dezert^{a,b,*}, S. Palma Lopes^a, Y. Fargier^{b,c}, P. Côte^a

^a IFSTTAR, GERS, GeoEND, F-44344 Bouguenais, France

^b Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, F-41000 Blois, France

^c Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, F-69675 Bron, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 December 2018

Received in revised form 13 June 2019

Accepted 16 July 2019

Available online 22 July 2019

Keywords:

Data fusion

Belief functions

Geophysical data

Geotechnical data

Experimental test bench

Electrical resistivity tomography

ABSTRACT

The identification of the subsoil constitutive materials, as well as the detection of possible interfaces and anomalies, are crucial for many site characterization applications. During investigation campaigns, complementary geophysical and geotechnical methods are usually used. These two sets of methods yield data with very different spatial scales and different levels of incompleteness, uncertainty and inaccuracy. In this work, a mathematical combination of geophysical and geotechnical information is proposed in order to produce a better subsoil characterization. It is shown that belief functions can be used for such a fusion process. A specific methodology is developed in order to manage conflictual information and different levels of uncertainties and inaccuracies from different investigation methods. In order to test and validate this methodology, we focus on the use of two selected methods, Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Cone Penetration Test. First, a synthetic model with artificial data is considered, taking advantage of the results obtained to conduct a comparative study (effect of parameters and noise level). Then, an experimental test bench is considered, in which a two-layered model is placed (plaster and saturated sands) and geophysical and geotechnical data are generated, using a mini-ERT device and insertion depth values. This work also aims at providing a better graphical representation of a subsoil section with associated degrees of belief. The results highlight the ability of this fusion methodology to correctly characterize the considered materials as well as to specify the positions of the interfaces (both vertical and horizontal) and the associated levels of confidence.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

For subsoils characterization, investigation campaigns are set up, usually consisting of geophysical and geotechnical methods. These two families of methods are complementary and are used for various issues such as the characterization of slope stability (Caris and Van Asch, 1991; Merritt et al., 2014; Chambers et al., 2013; Abidin et al., 2012) the characterization of potentially dangerous sites (James et al., 2014), the characterization of sites at construction (Coker, 2015) or the characterization of river embankments (Perri et al., 2014).

On the one hand, geophysical methods are non-intrusive and provide physical information on large volumes of soils but with significant potential uncertainties. These uncertainties are due in particular to the integrative and indirect aspects of the methods as well as to the resolution of the inverse problems. On the other hand, the geotechnical investigation methods are intrusive and provide more punctual information but also more accurate. An important issue for the assessment of

subsoils is to be able to combine acquired geophysical and geotechnical data, while taking into account their respective uncertainties, inaccuracies and spatial distributions (Royet et al., 2013). The complementarity of these two sets of methods is often underused since the uncertainty and inaccuracy associated with each method are rarely considered. Furthermore, the results are usually only graphically superimposed (Shaaban et al., 2013) instead of being mathematically merged.

To characterize a section of subsoil and its potentially risky areas, it is essential to distinguish the different materials in place. The horizontal and vertical interfaces, as well as possible anomalies, have to be located. For levee embankment, as an example, it is in these locations that internal erosion is likely to develop, which may lead to the complete rupture of the levee (Foster et al., 2000). Such a section characterization, with associated confidence indexes, could be included in failure hazard models.

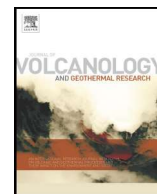
The use of belief functions (Shafer, 1976; Dempster, 1967) and different information combination rules to combine geotechnical and geophysical data is proposed. This makes it possible to take into account at the same time the uncertainties, inaccuracies and incompleteness of data related to each method. In the field of geosciences, belief functions have already been used and provide interesting results for slope

* Corresponding author at: IFSTTAR, GERS, GeoEND, F-44344 Bouguenais, France.

E-mail addresses: theo.dezert@ifsttar.fr (T. Dezert), sergio.lopes@ifsttar.fr (S. Palma Lopes), yannick.fargier@ifsttar.fr (Y. Fargier), philippe.cote@ifsttar.fr (P. Côte).

Portal *et al.*, 2019

Portal, A., Y. Fargier, J-P Lénat, P. Labazuy (2019) Internal structure of a complex lava dome inferred from geophysical imaging, Part II : 2D and 3D electrical resistivity tomography inversion approaches. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 373, 97-107, [doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.01.019](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.019).



3D electrical imaging of the inner structure of a complex lava dome, Puy de Dôme volcano (French Massif Central, France)

A. Portal^{a,d,*}, Y. Fargier^b, P. Labazuy^a, J.-F. Lénat^a, P. Boivin^a, D. Miallier^c

^a Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, LMV, F-63000 Clermont-Ferrand, France

^b GERS, IFSTTAR, Bron, France

^c Université Clermont Auvergne, CNRS-IN2P3, LPC, F-63000 Clermont-Ferrand, France

^d BRGM, DRP/JGT, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 August 2018

Received in revised form 16 January 2019

Accepted 23 January 2019

Available online 25 January 2019

Keywords:

Lava dome

Electrical Resistivity Tomography

3D inversion

Puy de Dôme volcano

ABSTRACT

Lava domes result from extrusion of massive lava, frequent explosions and collapses. This contribution focuses on a complex trachytic lava dome, the Puy de Dôme volcano, located in the Chaîne des Puys volcanic field (French Massif Central, France). We performed Electrical Resistivity Tomography (ERT) acquisitions on the entire edifice in order to investigate its overall inner structure as well as to detail its summit area. The resulting large ERT dataset integrated a recently developed 3D inversion code based on an unstructured discretization of the geometrical model. The 3D inversion models obtained refine the existing geological model of the Puy de Dôme's inner structure obtained by previous geophysical studies. These results also highlight the strong fracturing and fumarolic alteration that affect the summit part of the volcano.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Volcanic lava domes are complex structures built up by highly viscous magmas and formed by both intrusion and extrusion processes. During their growth, gravitational instabilities create talus formed by rockfalls, and large collapses may trigger explosive eruptions (e.g. Mount St Helens 1980, Christiansen and Peterson, 1981; Soufrière Hills, Herd et al., 2005) and pyroclastic flows (e.g. Unzen volcano 1991, Sato et al., 1992). Because their construction is often incremental and/or polyphase, lava domes are usually compound edifices. Even in the case of composite lava domes whose construction has been monitored, their inner structure remains difficult to establish because of the intercalation of massive lava, talus breccia and pyroclastites, and also because endogenous processes, such as magma intrusion or hydrothermal activity, cannot be observed at the surface. Nevertheless, an understanding of volcanic dome construction and evolution is an important issue for hazard assessment.

Here, we have used the Electrical Resistivity Tomography – ERT – method to study the internal structure of a large Holocene lava dome, the Puy de Dôme, in the French Massif Central. The ERT technique, initially developed for environmental investigations and engineering (Chambers et al., 2006; e.g. Dahlin, 1996; Loke et al., 2013 and references therein), is now widely used in volcanology (e.g. Barde-

Cabussou et al., 2014; Brothelande et al., 2015; Byrdina et al., 2018; Fikos et al., 2012; Gresse et al., 2017; Soueid Ahmed et al., 2018). As a large range of resistivity values is expected in lava domes, this imaging technique is well suited to the study of their inner structure, as shown by the example of La Soufrière de Guadeloupe lava dome (Brothelande et al., 2014; Lesparre et al., 2014; Nicollin et al., 2006).

This study presents the main results from ERT surveys performed on the Puy de Dôme volcano between 2011 and 2014. Given the spatial geometry of the datasets, we were able to carry out a 3D inversion approach, in order to better constrain the inner structure of the volcano. For this purpose, we used a recent inversion code developed by Fargier et al. (2017). Our inversion strategy was first to study the whole lava dome, and then to focus on its summit area only. The geological interpretation of the 3D inversion models provides new information about the dome's inner structure. We propose a comparison between electrical resistivity models and results obtained from gravity and magnetic measurements (Portal et al., 2016) and discuss the synthetic geological model of the Puy de Dôme volcano.

2. Geological and structural settings

The Puy de Dôme volcano is located in the Chaîne des Puys volcanic field, the most recent manifestation of the French Massif Central volcanism, composed of around 80 aligned Quaternary monogenetic volcanoes (scoria cones, lava domes and maars) (Boivin et al., 2017). The Puy de Dôme, an 11,000 years old trachytic lava dome, is the largest edifice of the volcanic chain with an elevation of 1465 m, a basal diameter

* Corresponding author at: BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans Cedex 2, France.

E-mail address: a.portal@brgm.fr (A. Portal).

Résumé

Nous partageons et interagissons tous les jours, parfois sans le savoir, avec les sites naturels et les ouvrages du génie civil qui nous entourent. Pourtant le fonctionnement de ces milieux est assez méconnu ce qui limite nos possibilités en matière d'occupation du territoire et d'emploi des infrastructures. Ce mémoire d'HDR retrace les recherches entreprises pour apporter un éclairage innovant sur le comportement de ces milieux. Plus particulièrement, un détail concernant l'optimisation de méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique est porté en fonction de problématiques propres aux sites. Les deux premiers chapitres sont consacrés à présenter mon parcours, mes travaux et un recueil de la littérature grise réalisée dans le cadre de mes travaux de recherche. Le troisième chapitre, cœur de ce mémoire, présente les recherches & innovations réalisées dans le cadre du développement de l'Imagerie de Résistivité Electrique pour la reconnaissance des sites naturels et des ouvrages du génie civil. Ce travail s'achève sur les perspectives que je souhaite investiguer dans un domaine qui doit se redécouvrir grâce à l'essor de nouvelles technologies.

Mots-clés *Géophysique, Géotechnique, Géoscience, Génie-Civil, Imagerie de Résistivité Electrique, Eléments finis, Problème Inverse, Photogrammétrie, Fusion de données.*

Abstract

We share and interact every day, and sometimes without knowing it, with natural sites and structures that surround us. However, the behavior of these environments is relatively unknown, which limits our possibilities in terms of occupation of the territory and optimization of infrastructures. This HDR thesis retraces the research undertaken to shed innovative light on the behavior of these environments. More specifically, a detail concerning the optimization of geophysical and geotechnical surveying methods is carried out according to site-specific issues. The first two chapters are devoted to presenting my background, my works and a collection of publications produced as part of my research work. The third chapter, heart of this thesis, presents the research & innovations carried out within the framework of the development of the Electrical Resistivity Imaging method for the assessment of natural sites and civil engineering structures. Finally, I propose personal perspectives in a field that must evolved thanks to the development of new technologies.

Keywords *Geophysics, Geotechnics, Geoscience, Civil-Engineering, Electrical Resistivity Imaging, finite element method, Inverse Problem, Photogrammetry, Data Fusion.*

