



**HAL**  
open science

# La caractérisation du sous-sol et des structures du génie civil : une approche combinant imagerie optique, géophysique et modélisation numérique

Raphaël Antoine

## ► To cite this version:

Raphaël Antoine. La caractérisation du sous-sol et des structures du génie civil : une approche combinant imagerie optique, géophysique et modélisation numérique. Sciences de la Terre. UNIVERSITE DE ROUEN NORMANDIE, 2022. tel-04515075

**HAL Id: tel-04515075**

**<https://hal.science/tel-04515075>**

Submitted on 21 Mar 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.



Normandie Université

## MEMOIRE

**Pour obtenir le diplôme de l'Habilitation à Diriger des Recherches**

**Sciences de l'Univers**

**Préparé au sein du Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière**

**La caractérisation du sous-sol et des structures du génie civil : une approche combinant imagerie optique, géophysique et modélisation numérique**

**Présenté et soutenu par  
Raphaël ANTOINE**

**HDR soutenue publiquement le 16 décembre 2022 devant le jury composé de**

Yu Jun Cui	Directeur de Recherche du Développement Durable, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées	Examineur
Luminita Danaila	Professeur des Universités, Université Rouen- Normandie	Examineur
Anne Davaille	Directrice de Recherche CNRS, Laboratoire FAST	Rapporteur
Alain Tabbagh	Professeur émérite de Sorbonne Université	Examineur
Stéphane Jacquemoud	Directeur de recherche CNRS, Institut de Physique du Globe de Paris	Rapporteur
Marc Pierrot-Deseilligny	Directeur de recherche du Développement Durable, Ecole Nationale des Sciences Géographiques	Examineur
Michel Rabinowicz	Professeur émérite de l'Université Paul Sabatier	Examineur
Géraldine Villain	Ingénieure Divisionnaire des Travaux Publics de l'Etat, Université Gustave Eiffel	Rapporteur



## Sommaire

<b>1 Démarche scientifique</b>	<b>1</b>
1.1 Une formation initiale conjuguant physique et géologie . . . . .	1
1.2 Contexte de mon poste et positionnement scientifique . . . . .	1
1.2.1 Contexte de mon poste . . . . .	1
1.2.2 Positionnement scientifique . . . . .	3
1.3 Des collaborations nationales et internationales . . . . .	3
1.4 Une activité portant sur l'ensemble des facettes du métier de chercheur . .	4
<b>2 Curriculum vitæ détaillé</b>	<b>6</b>
2.1 Etat civil . . . . .	6
2.2 Diplômes et titres . . . . .	6
2.3 Déroulement de carrière . . . . .	6
2.4 Identification des domaines de compétence et d'études . . . . .	7
2.5 Formation complémentaire . . . . .	7
2.6 Production Scientifique . . . . .	7
2.7 Enseignement et formation à la Recherche . . . . .	8
2.8 Activité d'expertise, de valorisation et de transfert . . . . .	11
2.9 Activité internationale . . . . .	12
2.10 Activité d'administration et d'animation de la Recherche . . . . .	13
2.11 Rayonnement scientifique et diffusion de l'information et de la culture scientifique . . . . .	14
<b>3 Activité de recherche</b>	<b>17</b>
3.1 Imagerie optique et géophysique appliquée à la caractérisation des milieux .	17
3.1.1 Un début de carrière en volcanologie planétaire . . . . .	17
3.1.2 A la recherche de l'eau dans les zones arides et les volcans . . . . .	19
3.1.3 Vers la caractérisation des structures du génie civil . . . . .	25
3.2 Modélisation 3D pour les géosciences . . . . .	28
3.3 Le drone, un moyen d'observation révolutionnaire . . . . .	34
<b>4 Projet de recherche</b>	<b>38</b>
4.0.1 Caractérisation physique des milieux . . . . .	38
4.0.2 Développement de méthodologie d'observations et de traitement de données . . . . .	45
4.0.3 Développement de prototypes et de moyen de recueil de données . . .	47
4.0.4 Perspectives stratégiques et scientifiques . . . . .	48
<b>Références</b>	<b>59</b>

# 1 Démarche scientifique

Cette section est dédiée à la présentation de ma démarche scientifique, qui constitue la colonne vertébrale de mon travail de chercheur. Après avoir décrit ma formation initiale, mon parcours de recherche est présenté en le positionnant dans le contexte de mon établissement. Ce parcours est guidé par un questionnement scientifique dont je décris l'ensemble des aspects, ainsi que les axes de recherche que j'ai mis en place pour y répondre. Enfin, mon positionnement scientifique est exposé au regard de cette activité.

## 1.1 Une formation initiale conjuguant physique et géologie

Après trois années d'études en mathématiques et physique, je me suis tourné vers les sciences de la Terre et l'exploration planétaire. J'ai intégré la Licence 3 de sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Toulouse en 2002, au sein de laquelle j'ai acquis des connaissances en géologie et planétologie. Mon contact avec la recherche a été initié lors de mon stage de Master 1. J'ai ainsi participé à une mission de terrain financée par mes soins sur le volcan Piton de la Fournaise à l'Île de la Réunion, dans le cadre du programme ACI CATNAT<sup>1</sup>. Cette première expédition scientifique, qui demeure un souvenir fabuleux et formateur, fut le point de départ de mon parcours scientifique, forgé par diverses expériences en France et au Japon :

- En 2003-2004 : un stage de Master 1 dans lequel j'ai travaillé sur les données thermiques issus de thermocouples implantés dans le sol volcanique de la Plaine des Sables (Piton de la Fournaise, Île de La Réunion) ;
- En 2004-2005 : un stage de Master 2 sur l'étude locale des circulations d'air et d'eau dans le sol d'un cône volcanique inactif du Piton de la Fournaise (Formica Leo). J'ai découvert la modélisation numérique des processus de convection en milieu poreux dans ce stage ;
- En 2006-2009 : une thèse en co-direction entre l'Université Paul Sabatier et l'Université de La Réunion. Celle-ci étend l'étude des écoulements convectifs d'air et d'eau à l'ensemble du Piton de la Fournaise et à une zone volcanique récente de la planète Mars à partir d'observations optiques, géophysiques et de la modélisation numérique des circulations en milieu poreux ;
- En 2008 : un séjour d'un mois à l'Université de Tokyo en tant que bénéficiaire d'une bourse internationale de l'Université de Toulouse. Ce séjour a permis d'initier mes relations avec l'Université de Tokyo (professeur Kei Kurita) ;
- En 2009-2011 : deux années de post-doctorat à l'Earthquake Research Institute de l'Université de Tokyo sur invitation du professeur Kei Kurita en tant que lauréat du programme franco-japonais CNRS-JSPS<sup>2</sup>. J'y ai étudié la dynamique de la convection en milieu poreux en conditions expérimentales.

## 1.2 Contexte de mon poste et positionnement scientifique

### 1.2.1 Contexte de mon poste

En 2011, j'ai réussi le concours de chargé de recherche en géophysique appliquée du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) et affecté au CETE<sup>3</sup> Normandie-Centre, devenu Cerema<sup>4</sup> en 2014. Il s'agit d'un établissement tourné vers l'appui scientifique et technique aux politiques publiques, placé sous la double tutelle du MTES et du Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales. Le Cerema est issu de la fusion de plusieurs centres d'ingénierie publique (CETE,

---

1. Programme Actions Concertées Incitatives 1999-2004 "Prévention des catastrophes Naturelles"

2. Japan Society for the Promotion of Science

3. Centre d'Étude Technique de l'Équipement

4. Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CERTU<sup>5</sup>, CETMEF<sup>6</sup> et SETRA<sup>7</sup>). Bien qu'étant un centre tourné vers l'ingénierie, l'établissement a été reconnu acteur de la recherche nationale par la loi de programmation de la recherche en 2021. L'équipe ENDSUM<sup>8</sup> a été créée au 1er janvier 2018. Son objectif principal est le développement de méthodes de caractérisation et de diagnostic non destructives des sols et des ouvrages. En effet, les techniques actuelles (tels que les forages) ne délivrent souvent que des résultats ponctuels, onéreux et destructifs des structures et matériaux impliqués. L'enjeu est donc de mettre à disposition des gestionnaires des techniques et outils de diagnostic et de contrôle non invasifs, si possible à grand rendement, à faibles coûts et améliorant l'efficacité des procédures d'inspection et de suivi.

Au sein d'ENDSUM, j'ai poursuivi le développement de mon projet initié en thèse en tentant de répondre à la question scientifique suivante : **Peut-on caractériser le sous-sol et les structures du génie civil en combinant données d'imagerie optiques, géophysiques et modélisation numérique** ? Je me focalise notamment sur l'étude du lien entre phénomènes de surface et profonds (notamment hydrodynamiques), en utilisant une combinaison originale de données associant données de terrain (méthodes électriques, radar géologique, potentiels spontanés), aéroportés (infrarouge thermique, visible), satellitaires (infrarouge thermique, visible, accélérométriques) et modélisation (transferts de chaleur et de masse en milieu poreux, inversion électrique). Cette question centrale m'a amené à construire un parcours qui repose sur l'étude d'objets et de processus variés et qui ont des échelles spatiales et temporelles très différentes. Au Cerema, mes applications se sont enrichies en s'étendant au génie civil, à l'archéologie ou aux sciences pour l'ingénieur. J'ai pu analyser les données de nombreux capteurs, qu'ils soient embarqués depuis l'orbite, aéroportés ou déployés au sol (caméras, matériels géophysiques). La diversité et le volume important de ces observations m'a poussé à faire évoluer ma méthodologie initiale, en développant des outils permettant de combiner ou fusionner ces données spatialisées et les modèles. Cette approche s'est avérée très efficace au fil des années pour 1) mieux comprendre les phénomènes hydrogéologiques ou électriques en jeu dans les sols, 2) mieux contraindre certains traitements géométriques ou géophysiques (inversion...) et 3) fournir des outils de visualisation et d'analyse intuitifs. Mes recherches posent des questions diverses, qu'elles soient de nature scientifique ou technique, qui sont liées :

- au domaine spectral étudié. Peut-on utiliser l'infrarouge thermique, afin de caractériser des écoulements souterrains ou des structures dans les sols ? Cela sous-entend notamment de comprendre 1) comment l'eau circule dans les milieux et 2) comment se font les échanges aéro-hydro-thermiques entre la subsurface et l'atmosphère.
- au volume d'observations acquises. Quelles méthodes utiliser pour combiner/fusionner des données de télédétection, géophysiques et géométriques afin de faciliter et d'enrichir l'interprétation des données ?
- à l'avènement de nouveaux modes d'observation. Peut-on utiliser les drones comme vecteurs d'observation fiables, robustes et à bas coût pour des auscultations à grand rendement ?

Afin de répondre à ces questions, mes recherches sont structurées selon les trois axes de recherche d'ENDSUM, nourris par les remontées de terrain du Cerema, ainsi que par mes interactions avec des établissements et universités au niveau national et international : 1) la caractérisation physique et géométrique des milieux (section 3.1) ; 2) le développement de méthodologies d'observation et de traitement de données (section 3.2) et 3) le développement de prototypes et de moyens de mesure (section 3.3).

---

5. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

6. Centre d'études techniques, maritimes et fluviales

7. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

8. Évaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux

### 1.2.2 Positionnement scientifique

A l'interface entre la physique et les sciences de la Terre, mon investissement est à l'image de ce que j'aime faire :

- réaliser/analyser des observations et concevoir des modèles pour comprendre des phénomènes physiques ;
- Explorer des domaines scientifiques variés et créer de la connaissance pluridisciplinaire ;
- Développer des méthodologies ayant vocation à irriguer l'ingénierie ;
- en étant au Cerema, pouvoir réaliser des expertises pour les collectivités, au plus proche des besoins des concitoyens ;
- pouvoir interagir quotidiennement en relation avec des techniciens et ingénieurs de disciplines diverses.

Mon positionnement scientifique me semble relativement singulier dans le paysage international. De ma formation initiale en physique et géologie a découlé une thèse en géophysique et télédétection appliquée à la volcanologie planétaire, et une carrière en cohérence avec cette orientation pluridisciplinaire. Ce profil me permet de communiquer avec des scientifiques de plusieurs communautés, voire d'être de plus en plus en mesure de les fédérer (géologie, géotechnique, géophysique, télédétection, mathématiques appliquées). Les contributions personnelles issues de ces collaborations sont diversifiées, allant du pilotage de la collecte de données (en géophysique de subsurface ou en télédétection) à la réalisation de modèles numériques permettant d'expliquer les observations (modélisation directe hydro-thermique ou inversion électrique). Mon expérience dans les processus de convection en milieu poreux me permet par ailleurs de développer des idées originales faisant le lien entre températures de surface, phénomènes géophysiques et hydrogéologiques. Du point de vue thématique, mes publications scientifiques peuvent donc aussi bien traiter d'interactions sol-atmosphère, de phénomènes de subsurface, que d'interactions fluide-roche. Enfin, étant télépilote de drone depuis 2016, je maîtrise l'ensemble de la chaîne acquisition-traitement-interprétation pour les observations issues de ce vecteur. A titre d'exemple, cette compétence me permet aujourd'hui de participer au programme de gestion du littoral Ouest Africain (WACA<sup>9</sup>) afin de faire monter en compétence les équipes africaines sur l'usage des drones pour l'observation du littoral.

### 1.3 Des collaborations nationales et internationales

La diversité de mes thématiques de recherche fait que de nombreuses collaborations se sont développées au niveau national et international, donnant lieu à une participation à des projets et/ou à des publications scientifiques communes. D'abord, j'ai toujours su garder le réseau issu de ma thèse, constitué du GET<sup>10</sup> (Michel Rabinowicz), de l'IPGP<sup>11</sup> (Fabrice Fontaine), le Laboratoire Géosciences Réunion (Anthony Finizola) et le laboratoire Magma et Volcans de l'Université Clermont-Auvergne (Lydie Gailler). Ces partenariats ont donné lieu à divers projets CNES (projets TOSCA), ANR (projet Slide4Volc), européens (7<sup>em</sup>e PCRD Medsurv) et internationaux (Huayruro) et à l'encadrement de Cécile Mézon et de Téodolina Lopez en tant que doctorante et post-doctorante pendant plusieurs années. Avec mon intégration au Cerema, mes liens avec d'autres établissements se sont développés comme avec l'UGE<sup>12</sup> (Yannick Fargier, Sergio Palma Lopes et Jean-Luc Sorin) et l'ENPC<sup>13</sup> (Yu-Jun Cui). Ces collaborations ont donné lieu à plusieurs travaux publiés, ainsi qu'au projet FUI national Didro (2016-2019). Ce projet a marqué le début de la montée en compétence de l'équipe ENDSUM Rouen sur les drones et m'a permis d'encadrer Marion Tanguy en tant que post-doctorante. Au niveau régional, je

9. <https://www.wacaprogram.org/fr>

10. Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse

11. Institut de Physique du Globe de Paris

12. Université Gustave Eiffel

13. Ecole des Ponts Paris Tech

possède des liens étroits avec le laboratoire M2C <sup>14</sup> (Fayçal Rejiba et Abdel Jardani), le laboratoire IDEES <sup>15</sup> de Caen (Olivier Maquaire et Stéphane Costa), le Laboratoire de Mathématique de l'INSA de Rouen (Carole Le Guyader) et le Laboratoire de Mathématiques Raphaël Sale (LMRS) de l'Université de Rouen Normandie. Ces liens ont donné lieu à deux projets régionaux sur l'observation des falaises (TéléDÉTAC et Defhy3geo), à la thèse d'Azziz Saley, de Georges EDDE et à l'encadrement de trois post-doctorants : Imen Hassen, Sam Taoum et Thomas Junique.

Enfin, mes relations internationales ont été initiées grâce à mon post-doctorat à l'Université de Tokyo. Mes liens avec Anthony Finizola de l'Université de la Réunion ont permis une collaboration de plusieurs années avec Tullio Ricci de l'INGV <sup>16</sup> dans le cadre de la thèse de Cécile Mézon, mais aussi dans le cadre des projets d'imagerie électrique grande profondeur du Vésuve et de l'Etna (projet Medsurv). Par ailleurs, j'ai réalisé quatre séjours à l'Ingemmet <sup>17</sup> au Pérou entre 2015 et 2018 avec Anthony Finizola, soit un total cumulé de 6 mois en tant que chercheur invité dans le cadre du projet archéologique Huayruro <sup>18</sup>. Depuis ma thèse en 2009, j'ai donc passé 2 ans et demi dans des instituts étrangers afin de mener des travaux collaboratifs. Enfin, depuis 2020, nous avons formé un consortium franco-chinois avec l'ENPC, la Northwest Agriculture and Forestry University (Heijun Hu), Zhengzhu University (Weikang Song), Cardiff University (Ni An) et le pôle "applications satellitaires" du Cerema (Téodolina Lopez) afin de d'étudier le lien entre données satellitaires, données géotechniques et géophysiques en milieu aride. Plusieurs articles sont en cours de rédaction sur cette thématique.

#### **1.4 Une activité portant sur l'ensemble des facettes du métier de chercheur**

Cet investissement constant dans plusieurs domaines me permet aujourd'hui de présenter à l'Habilitation à Diriger des Recherches un dossier attestant de diverses facettes du métier de chercheur qui seront détaillées en section 2 :

- 26 publications en premier auteur ou co-auteur en revues internationales à comité de lecture, donnant un h-index de 8 (référencement Scopus),
- deux chapitres d'ouvrage,
- quatre conférences invitées,
- 45 congrès internationaux avec actes,
- 15 communications avec actes en congrès national,
- 13 rapports de recherche,
- neuf rapports d'expertise.

J'ai co-encadré quatre thèses et ai participé à l'encadrement de quatre chercheurs post-doctoraux et de nombreux étudiants, du niveau prépa/DUT au niveau Master 2. Je porte actuellement un projet pour la Région Normandie en 2022, ainsi qu'un contrat d'expertise pour la ville de La Rochelle. J'ai été responsable de workpackages dans un projet industriel (FUI) et un projet international (franco-péruvien). Enfin, j'ai participé à 12 projets régionaux, nationaux ou internationaux.

En terme d'activité collective, je suis responsable-adjoint de l'équipe ENDSUM du Cerema Normandie-Centre (1DR, 1CR, 4 chargés d'études, 1 à 4 thèses ou post-doctorats par an et 1 à 5 stagiaires par an). Je m'investis pour ma communauté scientifique depuis 2014 en tant qu'élu à la Comeval <sup>19</sup> et membre de son bureau national. Il s'agit de l'équivalent du CoNRS au MTES. Depuis 2022, je suis nommé au Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel de Normandie du fait de mes travaux en hydrogéologie. Enfin, mes travaux sont ponctués par une valorisation très importante à destination de la po-

14. Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de l'Université Rouen Normandie

15. Laboratoire Identité et Différenciation de l'Espace, de l'Environnement et des Sociétés

16. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

17. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

18. Acronyme du projet franco-péruvien "Las civilizaciones olvidadas del volcan HUAYnaputina y les grand Retos del futURO"

19. COMmission nationale d'EVALuation des Chercheurs du Ministère de l'écologie

pulation, sous forme d'articles, d'interviews ou de films réalisés en collaboration avec la société de production 4scienceprod et les médias locaux/nationaux.

Après avoir présenté mon Curriculum Vitae détaillé dans la section suivante, mon mémoire se focalisera sur mes différents axes de recherche, afin de présenter les points saillants de mon activité scientifique. Finalement, je terminerai par le développement de mon projet de recherche pour les années à venir.

## 2 Curriculum vitæ détaillé

### 2.1 Etat civil

**Nom** : ANTOINE

**Prénom** : Raphael

**Date de naissance** : 23/02/1981

**Corps, grade et ancienneté** : Chargé de Recherche du Développement Durable depuis Novembre 2011

**Organisme d'affectation** : Cerema

**Dates d'affectation dans l'organisme et l'unité** : Novembre 2011

**Téléphone** : 02.35.68.90.53 **Télécopie** : 02.35.68.81.88

**E-Mail** : raphael.antoine@cerema.fr

**Adresse professionnelle** : Cerema, Direction Territoriale Normandie-Centre (Dter NC)  
Equipe de Recherche ENDSUM  
10, chemin de la Poudrière  
CS 90245 - F-76121  
Le Grand-Quevilly Cedex

[Lien base de données Scopus](#) et [Lien Google Scholar](#)

### 2.2 Diplômes et titres

**2006-2009** Doctorat de l'Université de Toulouse, spécialité Géophysique.

Titre : Etude et modélisation des écoulements d'air et d'eau dans le Piton de la Fournaise et Cerberus Fossae (Mars). Directeur de thèse : Michel Rabinowicz, co-directeur : Patrick Bachèlery, co-encadrant : David Baratoux. Collaboration entre le Laboratoire Dynamique Terrestre et Planétaire (UMR 5562) et le Laboratoire Géosciences Réunion (UMR 7154).

**2004-2005** Master 2 Sciences de la Terre et des Planètes Solides (STPS), Université Paul Sabatier, Toulouse. Stage de 6 mois au Laboratoire Dynamique Terrestre et Planétaire.

**2003-2004** Master 1 de Sciences de la Terre et de l'Univers, spécialité Géophysique, Université Paul Sabatier, Toulouse. Stage de 4 mois au Laboratoire Dynamique Terrestre et Planétaire.

**2002-2003** Licence 3 de Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Paul Sabatier, Toulouse.

**2001-2002** Licence 3 de Physique, Université Paul Sabatier, Toulouse.

**2000-2001** DEUG de Sciences de la Matière, Université de La Réunion, Ile de la Réunion.

**1999-2000** Classes Préparatoires Mathématiques Physique Sciences de l'Ingénieur, Lycée Leconte de Lisle, Ile de la Réunion.

### 2.3 Déroulement de carrière

**2018-** Chargé de recherche de Classe Normale en géophysique de subsurface. Adjoint au chef de groupe Evaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux (ENDSUM) sur le site de Rouen.

**2017** Création et management de l'équipe inter-département "DRONES", composée de 4 télépilotes, dont moi.

- 2015-2018** Chargé de Recherche de première classe en géophysique de subsurface. Equipe Electromagnétisme Appliquée - Laboratoire Régional de Rouen, Centre d'Etude et d'Expertise sur le Risques, l'Environnement, la mobilité et l'Amenagement (Cerema), Direction Territoriale Normandie-Centre.
- 2014-2015** Chargé de Recherche de seconde classe en géophysique de subsurface. Equipe Electromagnétisme Appliquée - Laboratoire Régional de Rouen, Cerema.
- 2011-2014** Chargé de Recherche de seconde classe en géophysique de subsurface. Equipe Electromagnétisme Appliquée - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC), Centre d'Etude Technique de l'Equipement (CETE).
- 2011** Qualification aux fonctions de Maître de Conférence en 2010, section 35.
- 2009-2011** Post-doctorat. Titulaire d'une bourse post-doc CNRS-JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) de 2 ans à l'Earthquake Research Institute de l'Université de Tokyo, sur invitation du professeur Kei Kurita. Sujet : Étude expérimentale et numérique des phénomènes convectifs et électriques en milieu poreux.
- 2005-2006** Trois mois de CDD en tant qu'Ingénieur sismique. Total, Pau.

## 2.4 Identification des domaines de compétence et d'études

Domaines de compétence : STU2 (Géophysique, géotechnique, géodésie, physique de l'atmosphère) et STU3 (Physique et mécanique des sols, sismique, mécanique des roches, géologie, géothermie)

Mots clé(s) associé(s) au(x) domaine(s) de compétences : Imagerie géophysique, Télédétection, Modélisation, Fluides, Interactions sol-atmosphère

## 2.5 Formation complémentaire

2015 : Qualification au télépilotage de drone (brevet théorique d'ULM + formation pratique), dans le cadre de mon activité de recherche.

2019 : Qualification au vol "hors vue" pour opérer les drones à 1 km de distance.

## Langues

Français, Anglais, Espagnol (courant), Japonais (académique).

## 2.6 Production Scientifique

	Code	Nombre total
Article dans revue à comité de lecture répertoriée dans les BDI JCR, Scopus, ERIH, HCRES	ACL	26
Article dans revue à comité de lecture non répertoriée dans les BDI JCR, Scopus, ERIH, AEREL	ACLN	1
Ouvrage scientifique ou chapitre	OS	2
Conférence invitée dans un congrès international ou national	INV	4
Communications dans un congrès international	ACTI	47
Communications dans un congrès national	ACTN	8
Rapport de recherche	RAPP	12
Rapport d'expertise	RAPP-EX	8

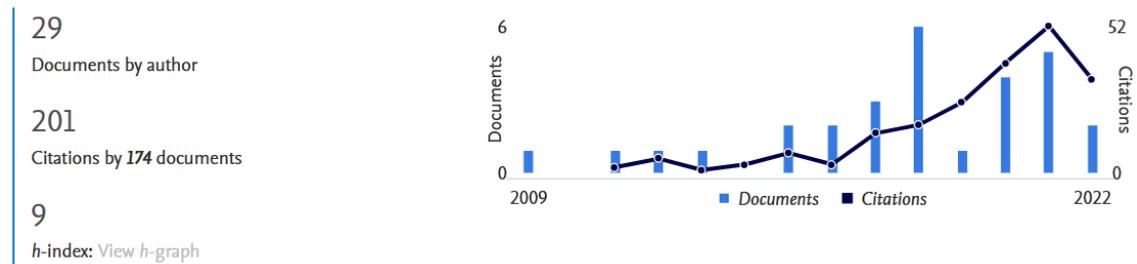


FIGURE 1 – Métrique Scopus.

## 2.7 Enseignement et formation à la Recherche

### Enseignement

**Prévue pour octobre 2022** Formation continue sur les méthodologies d'observation du littoral par drone au Sénégal (ville de Saint Louis) pour 16h (programme franco-africain WACA-BAR).

**Avril 2022** Formation continue interministérielle sur les méthodologies d'observation du littoral par drone en République Démocratique de Sao Tomé-et-Principe (40h) (programme franco-africain WACA-BAR). La formation a réuni des stagiaires de divers horizons : ministères de l'Environnement et de l'agriculture, capitainerie du port, service météorologique et service d'incendie et de secours. La formation a porté sur une introduction à la télédétection avec focus sur les drones, la photogrammétrie appliquée à l'observation du littoral et les techniques d'acquisition.

**2021-** Avec Loic Gourmelen et Pascal Leger du Cerema, nous avons été à l'initiative de la mise en place de la formation continue « les drones pour l'observation des territoires » à destination des personnels du MTES et des collectivités. [Description de la formation ici](#)

Nous avons conçu complètement la formation, dont l'offre n'existait pas et qui contient trois modules :

- Module 1, Découverte des drones (16h) : connaissance des applications possibles en lien avec les politiques publiques, limites de l'usage de drones, principaux aspects réglementaires.
- Module 2, Entreprendre une activité drone (16h) : présentation de l'écosystème professionnel du drone et des usages privilégiés, définition du besoin d'utilisation du drone et des données produites, chiffrage des coûts, appréhension des impacts concrets de l'activité.
- Module 3, Acquisition et traitement des données issues du drone (16h) : présentation des différents capteurs pour l'acquisition de données, introduction à la télédétection visible et infrarouge thermique, traitements photogrammétriques multi-spectraux, manipulation de modèles 3D pour différentes applications (notion de combinaison et de fusion de données).

J'interviens dans le Module 2 pour 8h et dans le Module 3 pour 16h.

**2018-2019** 16h de cours magistraux en télédétection appliquée au drone + 8h de travaux pratiques sur le terrain (Master de l'Ecole d'ingénieur en génie civil de l'Université de Puno, Pérou).

**2016-2017** 16h de cours magistraux en télédétection appliquée au drone + 4h de travaux pratiques sur le terrain (Master en géophysique de l'Université San Augustin, Arequipa, Pérou).

**2010-2011** Heat and Mass Transfer in Porous Media, Master 2 in Earth Sciences, Université de Tokyo, Cours + Travaux Dirigés (24h ETD).

**2008-2009** Attaché d'Enseignement et de Recherche (demi contrat), Université Paul Sabatier. Plus de 130h d'ETD sur l'année. Stage de terrain en géophysique de subsurface appliquée à l'archéologie, Montans (Master 1 STU). Stage de terrain en géologie structurale, Ile de Groix (Master 1 STU). Travaux Pratiques en télédétection satellitaire (Master 1 STU).

**2006-2008** Vacations, Université Paul Sabatier. 75h effectives, soit 70h ETD/an, Université Paul Sabatier. Travaux Dirigés en Sédimentologie (Licence 3 STU). Travaux pratiques en Sédimentologie (Licence 3 STU). Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés (Licence 1 Sciences de l'Environnement).

### Thèses

**2022-2025** Encadrement de la thèse de Georges Edde intitulée "Étude des écoulements d'air et d'eau dans des cavités souterraines à partir de la modélisation numérique et de données de télédétection". Thèse financée par le Cerema. Directeur de thèse : Ionut Danaïla (50 %), Encadrement : Raphael Antoine (50 %). Je deviendrai co-directeur de thèse après l'obtention de l'HDR. Début de la thèse : Octobre 2022

**2021-2024** Encadrement de la thèse de Diego Navarro intitulée "Localisation de drones par méthodes UWB, optique et accélérométrie en contexte de GPS dégradé et mesures radar sur ouvrage". Thèse financée par le Cerema dans le cadre du projet ROAD-AI avec l'Inria. Directeur de thèse : Ezio Malis, Inria (50 %), Encadrement : Raphael Antoine (50 %). Je deviendrai co-directeur de la thèse après l'obtention de l'HDR. Début de la thèse : Octobre 2021.

**2014-2018** Azziz Saley a soutenu sa thèse en Décembre 2018 à l'Université de Rouen. Titre de la thèse : «Tomographie hydraulique des milieux poreux hétérogènes à partir de traçage thermique : approches expérimentales », Directeur de thèse : Jean-Paul Dupont (20 %), Co-direction : Abdel Jardani (40 %), Encadrement : Raphael Antoine (40 %)

**2013-2017** Cécile Mézon a soutenu sa thèse en Janvier 2017 à l'Université Paris-Sorbonne. Titre de la thèse : "« Caractérisation des circulations thermo-convectives à l'échelle d'une zone fracturée par méthodes géophysiques et numériques ». Directeur de thèse : Anthony Finizola (33 %), Co-directeur de thèse : Pierre Adler (33 %), Encadrant : Raphael ANTOINE, encadrement à 33 %.

### Post-doctorats

**2023-2025** Encadrement prévu d'un post-doctorat à 50 % avec Carole Le Guyader (Insa de Rouen) dans le cadre du projet Defhy3geo. Sujet : Détection semi automatique de la fissuration sur les falaises de Normandie par fusion de données thermiques et visibles. Début : janvier 2023 ;

**2023-2024** Encadrement prévu d'un post-doctorat à 33 % avec Ioana Ciotir et Antoine Tonnoir (Insa de Rouen) dans le cadre du projet Defhy3geo. Sujet : Modélisation numérique des écoulements dans la falaise de Sainte-Marguerite-sur-mer. Début : janvier 2023 ;

**2022-2024** Encadrement à 50 % avec Cyrille Fauchard du post-doctorat de Thomas Junique dans le cadre du projet Defhy3geo. Sujet : Observations géophysiques et par drone des sites des Vaches Noires (14) et de de Sainte Marguerite-sur-mer avec application à l'hydrologie de ces falaises (76). Début : juin 2022 ;

**2017-2019** Encadrement de Sam Taoum sur le développement d'un nouveau code d'inversion électrique 3D intégrant des topographies complexes avec application à l'imagerie géophysique des falaises des Vaches Noires (projet Région Télédétac). Encadrement à 25 % avec Cyrille Fauchard (ENDSUM), Antoine Tonnoir (INSA Rouen) et Yannick Fargier (UGE).

**2017-2019** Encadrement de Imen Assen sur la modélisation géologique 3D et hydrologique des falaises des Vaches Noires (projet Télédétac). Encadrement à 50 % avec Cyrille Fauchard.

**2012-2019** Encadrement de Téodolina Lopez à 50 % avec Michel Rabinowicz (Laboratoire Géosciences Environnement, Toulouse) dans le cadre de divers projets (notamment TOSCA CNES) durant 7 ans sur l'étude hydrologique de zones arides (Tchad, Algérie, Mongolie intérieure).

### Etudiants pré-doctorat

**2021-2022** Georges EDDE (Master 2 nanomatériaux, Université Libanaise, Beyrouth) : Étude numérique des écoulements d'air et d'eau dans une cavité souterraine possédant un puit ouvert. Encadrement à 33 % avec Hyam Abboud (Université Libanaise, Beyrouth) et Ionut Danaïla (Université de Rouen-Normandie).

**2021-2022** Olivier Thérain (DUT Génie Civil, IUT du Havre) : Détermination de la précision de modèles photogrammétriques en fonction du nombre de cibles posées au sol. Encadrement à 50 % avec Vincent Guilbert.

**2020-2021** Ayoub Rabeh (première année du cursus ingénieur de l'INSA de Rouen en mathématiques appliquées). Sujet : Influence du sol et de la végétation sur les températures de surface mesurées par drone : application au glissement des Vaches Noires. Encadrement à 50 % avec Philippe Foucher.

**2020-2021** Arthur Leconte (seconde année DUT Mesures Physiques, Mont Saint Aignan). Sujet : Utilisation du code d'inversion PyLGRIM pour l'imagerie électrique 3D d'un terril en combustion interne. Encadrement à 50 % avec Vincent Guilbert.  
Martin Dumoulin (seconde année DUT Mesures Physiques, Mont Saint Aignan). Sujet : Utilisation d'un prototype d'imageur électrique en conditions expérimentales (50 % avec Vincent Guilbert).

**2019-2020** Astrid Legrand (DUT Mesures Physiques) : Imagerie électrique sur un champ d'Éoliennes. Encadrement à 50 % avec Vincent Guilbert.

Sarah Desfontaines (CPGE MPSI, Lycée Corneille). Sujet : Imagerie électrique d'une zone côtière, théorie et expérimentation en laboratoire. Encadrement à 100 %.

**2018-2019** Ayoub Saydy (Master 2 GEHYD de l'Université de Normandie. Sujet : « Imagerie électrique sur pilier de carrière ». Encadrement à 50 % avec Cyrille Fauchard.

**2017-2018** Kamila Azzoug (Master 2 Science de la Terre et des Planètes, parcours Terre et Géorressources, Université de Toulouse). Sujet : « Apport des données infrarouges thermiques pour comprendre l'évolution hydrogéologique en contexte sismique ». Encadrement à 50 % avec Téolodolina Lopez de l'ISSI de Bern (Suisse).

Melissa Pragassam (dernière année à Polytech Sorbonne, spécialité Sciences de la Terre). Sujet : « Hydrogéologie de la carrière de Saint-Martin-Le-Noeud à partir de données acquises dans l'infrarouge thermique et géophysiques ». Encadrement à 50 % avec Cyrille Fauchard.

**2016-2017** Adrien Lebeau (dernière année du parcours Mathématiques Appliquées de l'INSA de Rouen). Sujet : « Détection automatique d'anomalies thermiques par méthodes neuronales. Encadrement à 50 % avec Carole Le Guyader de l'INSA de Rouen.

Encadrement de TPE : Tidjan Diallo (CPGE PCSI, Lycée d'Evreux. Sujet : imagerie électrique 3D d'une cavité souterraine par méthode électrique, Travail Personnel Encadré des classes préparatoire PC du Lycée Corneille (Rouen), encadrement à 50 % avec Vincent Guilbert.

**2015-2016** Encadrement de TPE : Rémi Agricola/Emma Bely/Paco Iglesias/Milan Reigner (CPGE BCPST, Lycée Corneille). Sujet : Modélisation 3D pour l'étude des relations entre le système karstique de Caumont et la micro-topographie de surface,

Normandie, Travail Personnel Encadré en classes préparatoire BCPST, encadrement à 100 %.

**2013-2014** Azziz Djibrilasalley (dernière année à Polytech Sorbonne, spécialité Sciences de la Terre). Sujet : Mesures géophysiques pour l'imagerie de subsurface de l'abbaye Notre Dame du Bec (27). Encadrement à 50 % avec Cyrille Fauchard.

**2012-2013** Hassen Baoueb (Master 2 Sciences de l'eau, parcours hydrologie, risques, environnement). Sujet : Combinaison des approches hydrogéophysiques et thermiques pour l'identification des points d'infiltration rapide des eaux dans le contexte karstique de la Haute-Normandie. Encadrement à 50 % avec Abdel Jardani.

Paul Lethuillier (seconde année DUT Mesures Physiques). Sujet : Photogrammétrie appliquée aux Sciences de la Terre et au Génie Civil. Encadrement à 100 %.

**2010-2011** Hiroshi Matsuoka (Master 2 Earth and Planetary Science, Université de Tokyo). Sujet : Caractérisation d'un panache thermique et des potentiels électriques associés en milieu poreux expérimental. Encadrement à 50 % avec Kei Kurita.

## 2.8 Activité d'expertise, de valorisation et de transfert

J'ai coordonné ou participé à 13 projets régionaux/nationaux/industriels/internes depuis 2009.

- trois projets région
- six projets nationaux
- deux projets industriels
- quatre projets de recherche interne ou participation à un programme de recherche

### Projets Région

**2022-2025** Porteur du projet Région RIN Tremplin DEFHY3GEO sur la caractérisation de la fracturation des falaises de Normandie (Evaluation par l'ANR) (885 k€). Consortium Cerema/M2C/INSA Rouen/LETG Caen.

**2019-2022** Partenaire du projet Région RIN FONDEOL sur la caractérisation des interactions entre fondations d'éoliennes on-shore et leur environnement. Consortium Université Le Havre Normandie/INSA Rouen/Cerema/Université Franche-Comté.

**2017-2019** Partenaire du projet Région RIN TELEDETAC (caractérisation de glissement de terrain grâce à la télédétection). Montant alloué à l'équipe : 200 k€. Coconsortium Cerema/INSA Rouen/LETG Caen. Ce projet a donné lieu à quatre articles de rang A ([44], [50], [52], [54], [58])

### Projets nationaux

**2022-2024** Partenaire du projet ANR Scan4volc dont l'objectif est d'imager le système hydrothermal du volcan Piton de la Fournaise à partir de mesures géophysiques et drone. Montant alloué à l'équipe : 10 k€. Porteuse : Lydie Gailler, Physicien adjointe Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand. Consortium : Université Clermont-Auvergne/IPGP/Université Savoie Mont Blanc/Cerema.

**2016-2019** Partenaire du projet ANR Slidevolc (caractérisation thermique d'un glissement de flanc en domaine volcanique. Montant alloué à l'équipe : 10 k€. Université Clermont-Auvergne/IPGP/Université Savoie Mont Blanc/Cerema. Ce projet a été valorisé dans un article de rang A [47].

**2018-2019** Partenaire du Projet INSU EC2CO [99]. Consortium Cerema/Université Paris-Sorbonne.

**2013-2016** Partenaire du projet CNES-TOSCA « THERSYA » sur la faisabilité d'utilisation de l'infrarouge thermique embarqué pour la caractérisation des ressources en eau autour du lac Tchad (obtention d'un postdoc). Consortium GET Toulouse/Cerema. Ce projet a donné lieu à deux articles de rang A ([36], [43]).

**2012-2014** Partenaire du projet de recherche TERREAU (financement d'un post-doctorat par le RTRA STAE<sup>20</sup> de Toulouse). Consortium GET Toulouse/Cerema.

**2007-2010** Partenaire de l'ANR Volcarisk durant ma thèse. Financement : 10 k€ par an pour du fonctionnement et des frais de mission. Le projet a été valorisé dans deux articles de rang A ([31], [38]). Consortium LDTP/CEREGE/IPGP/Université de Clermont-Ferrand.

### Projets en partenariat avec des industriels

**2014-2016** Partenaire du projet de recherche pour un grand industriel portuaire (montant : 100 k€). Consortium Cerema/Altran/Geolite/Geocarta. Le projet a donné lieu à une publication de rang A [49].

**2016-2019** Responsable de deux workpackages « Observations multi-spectrales » et « étude expérimentale digue » dans le cadre du projet FUI DiDRO (Développement d'un démonstrateur drone pour le diagnostic, la surveillance des digues et l'intervention en cas de crise). Montant du projet : 2.7 M€. Consortium Ifsttar/inrae/Cerema/Ign/Geomatys/Survey Copter/Atechsys. Ce projet a donné lieu à plusieurs communications [126], [113], dont 1 internationale [47].

### Programmes nationaux et opérations de recherche internes Cerema

**2021-** Participation au montage du défi quadriennal Cerema-Inria ROAD-AI portant sur les thématiques de l'acquisition de données géophysiques par tandem de drones et sur la fusion de données de la surface terrestre grâce à des données issues des drones et des satellites. Il s'agit d'un projet quadriennal avec mise en commun de financements de la part du Cerema et de l'Inria (2 thèses + 1 post-doctorat + 1 ingénieurs d'étude), dont la thèse de Diego Navarro. [Description du projet ici](#).

**2013-2018** Responsable du projet de recherche interne HYDROGEO (financé par la DGPR et DGALN à hauteur de 80 k€ à 100 k€ euros/an).

**2012-2016** Partenaire de l'opération de Recherche PRECAS financée par l'IFSTTAR (2012-2016). Tâche : Caractérisation thermique et géophysique (méthodes électriques) de cavités souterraines naturelles et anthropiques.

**2012-2016** Partenaire de l'opération de Recherche DOFEAS financée par l'IFSTTAR (2012-2016). Tâche : Caractérisation de zones de perméabilité élevées dans les digues à partir de méthodes thermiques et géophysique. Modélisation des écoulements et des potentiels électriques dans ces structures. Le projet a donné lieu à une publication de rang A ([35]).

## 2.9 Activité internationale

### Participation à des projets internationaux

**2022** Participation à la rédaction du projet européen ECO4BRIDGE dans le cadre du CALL-HORIZON-CL5 portant sur le contrôle non destructif d'ouvrage d'art. Consortium BAM (Allemagne), BOKU (Autriche), WUST (Belgique), UNIZA (Slovaquie), CEREMA (France).

**2019-2023** Participation au projet franco-africain WACA qui est un programme d'investissement de résilience des zones côtières en Afrique de l'ouest. Ce projet intervient dans six pays africains (Mauritanie, Sénégal, Bénin, Togo, Côte d'Ivoire, Sao Tomé-et-Principe) pour mettre en place des stratégies de veille et de lutte contre l'érosion côtière. Le projet WACA financé par la Banque Mondiale soutient techniquement les pays dans la mise en œuvre de leurs plans de travail. J'interviens dans ce programme en tant que formateur pour faire monter en compétences les pays sur la mise en œuvre des drones pour l'observation du littoral. [Description du projet ici](#).

---

20. Fondation Sciences et Technologie pour l'Aéronautique et l'Espace

- 2020-2023** Partenaire du projet européen Interreg POLDER2C's (<https://polder2cs.eu/>) Adaptation des ouvrages hydrauliques au changement climatique [ACL3]. Consortium France, Belgique, Hollande et Grande Bretagne. Dans ce cadre, collaboration étroite avec le Department of Mobility and Public Works belge ([51]). [Description du projet ici](#).
- 2017-2019** Partenaire du projet européen SAFER-LC project, H2020, CORDIS Europa ([128]). [Description du projet ici](#).
- 2016-2019** Responsable du work-package « Observations géophysiques » dans le cadre du projet franco-péruvien Huayruro (financé par l'équivalent de l'ANR au Pérou CONCYTEC, 120000 \$, ([53]). Consortium IPGP/Ingemmet/Igp/Cerema/Université Clermont-Auvergne.
- 2013-2016** Partenaire du projet européen MEDSUV « MEDiterranean SUPersites Volcanoes » - 7th Framework Programme on Research, Technological Development and Demonstration ([74], [82]). [Description du projet ici](#).

### Collaborations internationales suivies

- Depuis 2020** En partenariat avec Yu-Jun Cui de l'ENPC, constitution d'une équipe franco-chinoise dans le cadre de mes travaux en hydrologie en Afrique (Lac Tchad) et en Mongolie (Désert du Badain Jaran). L'objectif des travaux est de faire le lien entre données satellite, données géotechniques et hydrologiques. Le consortium est constitué de Heijun Hu (Northwest Agriculture and Forestry University, Xianyang, Chine), de Weikang Song (Zhengzhu University, Chine), de Ni An (Cardiff University), de Téodolina Lopez (Pole Satellitaire de Toulouse, Cerema) et de Yu-Jun Cui (ENPC). La collaboration a déjà fait l'objet d'un papier soumis ([57]) et d'une communication en congrès international ([94]). Nous cherchons en ce moment à donner un cadre à cette collaboration fructueuse.
- 2016** - Collaboration internationale suivie avec l'INGEMMET et l'IGP du Pérou, notamment autour du projet franco-péruvien Huayruro, qui a donné lieu à la rédaction de plusieurs actes et d'un article de rang A ([53]).
- 2013**- Collaborations pérennes avec l'INGV de Rome et notamment Tullio Ricci, chercheur au département de Géophysique de l'institut. Cette collaboration a permis le financement par EIFER de la thèse de Cécile Mézon et la réalisation de missions d'envergure à Stromboli, sur le Vésuve et l'Etna (dans le cadre du projet MED-SURV).

## 2.10 Activité d'administration et d'animation de la Recherche

### Direction de laboratoire ou d'équipes, gestion de personnel

- Janvier 2021** - responsable-adjoint de l'équipe ENDSUM-Rouen, intégré au nouveau département Géosciences et Infrastructures (DGI) de la Direction Territoriale Normandie-Centre :
- représentation du Chef de groupe et intérim en cas d'absence ;
  - management de quatre chargés d'études scientifiques/chargés d'essai, ainsi que du personnel non permanent (ingénieurs, étudiants, stagiaires, vacataires) ;
  - suivi fonctionnel et financier des activités du groupe
  - participation aux instances décisionnelles et aux groupes de travail ;
  - contribution à la définition de la stratégie de positionnement en matière de recherche en géophysique ;
  - participation à l'activité opérationnelle du département ;
  - participation aux actions de formation du groupe.
- Depuis 2018** Responsable Axe 1 de l'équipe ENDSUM : « Caractérisation physique et géométrique des sols et des matériaux".

**Depuis 2016** À l'initiative de l'équipe inter-département DRONE, dont la mission est de mettre en œuvre des drones dans le cadre de projets de recherche et d'activités opérationnelles du Cerema Normandie-Centre. Cette équipe a été créée en 2016 pour intervenir dans le cadre d'applications variées (risques naturels, aménagement, ouvrages ou infrastructures). Mon rôle consiste en :

- la définition de la stratégie scientifique et opérationnelle de l'équipe ;
- le suivi fonctionnel et financier de l'activité de l'équipe ;
- le management de quatre télé pilotes.

### **Animation de réseau**

Depuis 2020, je m'implique beaucoup dans l'animation de la communauté Drone du MTES. L'objectif de cette communauté est de mettre en relation l'ensemble des acteurs du drone présents au MTE (établissements publics et de recherche, services déconcentrés notamment) afin de 1) partager leurs connaissances sur l'usage de ces outils et des méthodologies de traitements de données et 2) homogénéiser les pratiques concernant les drones volants dans le cadre de la réglementation aéronautique européenne mise en place début 2021.

### **Participation à des instances en lien avec la vie des chercheurs ou des établissements.**

**2019-2023** Membre élu du bureau de la Commission nationale d'Évaluation des Chercheurs du MTES (Comeval). Cette commission a pour mission d'évaluer et de recruter les chercheurs des établissements sous tutelle du ministère de l'Écologie (UGE, ENPC, ENTPE, IGN, ENSG, Cerema, Météo-France, ESTB et ENSM) ;

**2014-2018** Premier mandat en tant que membre élu à la Comeval ;

**2017** Membre du Comité Scientifique des Projets de Thèse du Cerema.

## **2.11 Rayonnement scientifique et diffusion de l'information et de la culture scientifique**

### **Participation à des réseaux de recherche**

Participation au réseau d'observation DYNALIT (OSU) ;

Participation au réseau national PIREN-SEINE ;

Participation au réseau régional Normandie Aerospace.

### **Participation à des comités éditoriaux et expertise d'articles**

Je participe régulièrement aux reviews de différentes revues de rang A, parmi lesquelles : - Scientific Data (Nature.com, IF : 4.19), Near Surface Geophysics (1.2), Journal of Geophysical Research (IF : 3.4), Engineering Geology (IF : 1.7), Advances in Geosciences (IF=0.8).

### **Organisation de colloques ou de journée scientifiques**

**2019 à 2022** Participation au comité d'organisation du colloque « Usage des drones pour l'appui aux territoires » ouvertes aux établissements publics du ministère et aux collectivités. Dans ce cadre, organisateur de la session « Drone pour la Recherche et l'Innovation ». [URL du colloque ici](#)

### Participation à des comités scientifiques, d'évaluation

**2022-2027** Membre nommé au Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel de Normandie (CSRPN). Cette instance, placée auprès du Préfet de région et du Président du Conseil Régional, peut être consultée pour des questions relatives à la connaissance, la conservation et la gestion du patrimoine naturel régional. Le CSRPN a également la capacité de s'autosaisir. Le CSRPN rend des avis et pour cela il s'appuie sur des commissions thématiques et territoriales.

- inventaire et conservation du patrimoine naturel régional,
- classement et gestion des réserves naturelles nationales et régionales, autorisations portant sur des espèces protégées,
- proposition de listes régionales d'espèces protégées,
- mise en œuvre du réseau Natura 2000,
- volet général du Système d'Information sur la Nature et les Paysages.

**2020** Evaluation scientifique du projet franco-singapourien BIPOS. Session ANR AAPG2020.

### Activités d'expertise

**2011** Depuis 2011, de nombreuses expertises ont été réalisées pour le compte de collectivités ou de services déconcentrés.

### Activités de vulgarisation

Communications sur le projet Région Defhy3geo :

- [Article de presse sur les mesures réalisées sur la falaise de Sainte-Marguerite-sur-Mer en septembre 2022.](#)
- [Vidéo sur les mesures de Sainte-Marguerite-sur-Mer.](#)

Communications sur le projet franco-africain WACA :

- [Article du Cerema sur la mission Sao Tome et Principe](#)

Communications françaises sur le projet Huayruro :

- [Interview dans la série de films "Volcanologues du bout du monde"](#)
- [Une du journal quotidien Paris -Normandie](#)
- [Interview dans l'émission Un jour en France sur France Bleu national](#)
- [Nombreux articles et films sur le projet diffusés sur le site de la société de production 4scienceprod](#)
- [Prix du meilleur film scientifique pour Huayruro lors du congrès Cities on Volcanoes 9 qui a eu lieu en 2016 au Chili](#)

Communications péruviennes sur le projet Huayruro :

- [Communiqué de presse sur la visite du président de la République du Pérou sur le site du projet](#)
- [Page de l'Ingemmet sur le projet](#)
- [Page internet sur l'impact du projet Huayruro sur le tourisme](#)
- [Article d'inforegion.pe](#)
- [Article du quotidien national La Republica](#)
- [Article du site Andina.pe](#)

Communications sur le projet Didro (projet FUI) :

- [Explication du concept de Didro lors des Assises Nationales des Risques Naturels 2016](#)
- [Film de présentation du projet réalisé par la Compagnie Nationale du Rhône](#)
- [Article du Pôle Safe Cluster sur le projet](#)

Communications sur l'imagerie électrique profonde de l'Etna (Projet européen MED-SURV) :

- [Film de 26 minutes sur l'expédition Etna](#)
- [Reportage de la chaine italienne RAI italienne sur l'expédition](#)
- [Article du Cerema sur le projet](#)

Communications sur les projets TERREAU et THERSYA (projets CNES) :

- [Article du site Earth Observations \(NASA\) sur notre travail sur le lac Tchad](#)
- Communications sur le projet interne HYDROGEO :
- [Article de la Voix du Nord sur la mission d'imagerie géophysique du terril en combustion interne d'Haveluy \(Hauts de France\)](#)

### 3 Activité de recherche

Les cycles d'évolution de notre planète, les variations de sa morphologie, les fluctuations océanographiques et climatiques sont intimement liés aux processus profonds, quelle que soit l'échelle de temps et d'espace considérées. Les surfaces continentales interagissent avec l'atmosphère et l'océan, ce qui induit des modifications qui conditionnent notre activité anthropique. Caractériser notre planète Terre passe donc par la compréhension de ce lien entre phénomènes profonds et de surface, qui nécessite une approche multi-disciplinaire et multi-échelle. C'est ce qui m'anime en tant que chercheur depuis une dizaine d'années maintenant. La thématique principale de mes recherches porte sur la caractérisation du sous-sol et des structures du génie civil à partir de données de surface et profondes. Je m'intéresse plus particulièrement aux phénomènes intervenant entre le premier kilomètre de profondeur et la surface. Mes travaux sont tournés vers les risques naturels (étude de systèmes volcaniques, falaises, cavités souterraines), les ressources en eau (notamment en milieu aride) et la caractérisation d'ouvrages (ponts, routes, digues). Pour ce faire, j'utilise des outils d'imagerie optique (satellitaire, aéroporté, sol dans le visible et l'infrarouge), des méthodes géophysiques (méthodes électriques, radar) et la modélisation numérique (physique des écoulements en milieu poreux, inversion géophysique et photogrammétrique). Ces outils permettent de faire le lien entre les processus de surface observées à différentes échelles de temps et d'espace et des phénomènes plus profonds (notamment hydrodynamiques). Dans cette section, je présente mon parcours de recherche en trois parties consacrées à la caractérisation des milieux, aux méthodologies que j'ai développées et aux moyens de mesures que j'ai pu mettre en place.

#### 3.1 Imagerie optique et géophysique appliquée à la caractérisation des milieux

##### 3.1.1 Un début de carrière en volcanologie planétaire

Ma thèse a consisté à caractériser les échanges entre les sols volcaniques et l'atmosphère en contexte planétaire. Celle-ci s'est focalisée d'abord sur le volcan Piton de la Fournaise (Ile de La Réunion) et plus particulièrement sur le cratère inactif Formica Leo, pour lequel une suspicion d'anomalie thermique existait déjà. Pour documenter ce signal thermique et le relier aux interactions sol-atmosphère à l'échelle du cône, j'ai développé une méthodologie basée sur l'utilisation conjointe de plusieurs outils :

- des caméras exploitant les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique et du visible pour observer les températures et l'état de surface ;
- des méthodes géophysiques (Imagerie de résistivité électrique ou IRE, potentiel spontané ou PS, microgravimétrie, radar) pour caractériser la structure du cratère Formica Leo ;
- des données micro-météorologiques (anémométrie ultrasonique) pour quantifier les vitesses et direction des entrées/sorties d'air dans le sol ;
- la modélisation numérique des écoulements convectifs en milieu poreux ;
- des données géologiques disponibles dans la littérature ou obtenues sur le terrain.

Cette approche a permis de montrer que dans un contexte volcanique constitué de matériaux non consolidés (scories, sables, cendres) et/ou fissurés, les échanges avec l'atmosphère sont induits au premier ordre par une ventilation convective de l'air humide à l'intérieur du milieu poreux [31]-[33]. Dans le cône inactif Formica Leo, ces circulations génèrent une anomalie thermique de 4 à 5°C, observable en surface et qui est la conséquence d'un réchauffement ou d'un refroidissement du milieu. L'air atmosphérique froid est aspiré par le fond des cratères (au nombre de deux dans Formica Leo), en les refroidissant pendant la nuit. Celui-ci se réchauffe dans le milieu poreux grâce au gradient géothermique du volcan, remonte les pentes stratifiées pendant un quart de journée, puis ressort plus chaud de quelques degrés au niveau des crêtes des cratères, créant ainsi un véritable effet cheminée. Les gradients de température observés en sur-

face sont induits par un transfert de chaleur efficace, évalué à jusqu'à dix fois le flux conductif dans ces zones ( $200 \text{ mW m}^{-2}$ ). Ce phénomène est rendu possible grâce aux vitesses du fluide élevées (de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$  à  $10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ ) dans le milieu perméable, constitué de lapilli et de bombes volcaniques de diamètre pluri-centimétriques (perméabilités estimées de  $10^{-8} \text{ m}^2$  à  $10^{-5} \text{ m}^2$ , correspondant à des tailles de grains/blocs de  $10^{-2} \text{ m}$  à  $10^{-1} \text{ m}$ ). L'anomalie de température observée sur Formica Leo a d'abord été suggérée, puis documentée grâce à une caméra thermique. Elle a par la suite été confirmée par des mesures de température à 30 cm de profondeur. L'air aspiré dans le fond des cratères a par ailleurs pu être observée grâce à un anémomètre ultrasonique 3D prêté par Météo France et posé sur la surface. Cela montre à quel point les techniques de télédétection combinées à la modélisation numérique peuvent être puissantes pour étudier les échanges sol-atmosphère. Enfin, cette circulation d'air à l'intérieur des cratères induit des processus électriques très intéressants et qui sont rarement mis en évidence en milieu non saturé. En effet, des anomalies de potentiel spontané atteignant 300 mV et corrélées aux anomalies thermiques se développent sur quelques dizaines de mètres. J'explique cette observation par la circulation d'air humide dans le réseau poreux, venant draguer des ions des films d'eau présents autour des grains.

Si de nombreuses études ont par le passé traité de ces échanges entre le sol et l'atmosphère [18], jamais à notre connaissance une anomalie thermique de faible ampleur n'avait été caractérisée de façon aussi complète sur un volcan. Au fil de ma thèse, je me suis servi du cône Formica Leo comme d'un véritable laboratoire à ciel ouvert, ce qui m'a permis de développer et d'éprouver mes outils d'observation et de modélisation et de bien cerner les phénomènes en jeu. Je me suis ensuite appuyé sur ces connaissances pour étendre mon étude à l'ensemble du Piton de la Fournaise et une zone volcanique récente de Mars, Cerberus Fossae. Dans le cas du Piton de la Fournaise, je propose qu'à l'instar de Formica Leo 1) l'air froid entrant à la base du cône terminal 2) se réchauffe et remonte à l'intérieur des couches stratifiées perméables pour 3) ressortir plus chaud autour du cratère sommital de Dolomieu, avec une différence de température observée de  $10\text{-}15^\circ\text{C}$  par rapport à l'air atmosphérique. La figure 2 présente le concept de cette circulation à grande échelle dans le Piton de la Fournaise. Il est à noter que plusieurs sorties d'air ont été détectées autour du cratère sommital Dolomieu entre 2007 et 2012, avec des vitesses de sorties pouvant avoisiner les  $10^{-1} \text{ m s}^{-1}$  en période calme (sans vent) [69]. Ce modèle impliquant des écoulements pluri-kilométriques dans un milieu poreux non consolidé ou fracturé a déjà été proposé par plusieurs auteurs sur des volcans ou dans la zone de stockage nucléaire souterraine expérimentale de Yucca Mountain dans le Nevada aux Etats-Unis ([6], [8]-[10]).

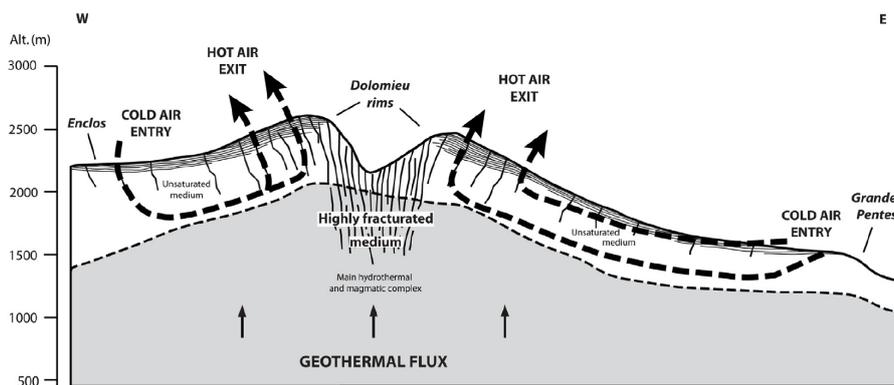


FIGURE 2 – Modèle conceptuel des circulations d'air internes dans le Piton de la Fournaise obtenus à partir de données de terrain au sommet du volcan et de la théorie de la convection [38].

Sur la planète Mars, de nombreuses anomalies thermiques ont été retrouvées ces

dernières années à l'intérieur de zones d'effondrement appelées pit craters, dont certaines de  $50^{\circ}\text{C}$  [21]. Mes travaux ont montré, qu'à l'instar de la Terre, des phénomènes de convection d'air atmosphérique (du  $\text{CO}_2$  en l'occurrence) sont possibles dans des sols perméables de la planète. Encore plus que pour la Terre, de fortes perméabilités sont nécessaires pour un transfert de chaleur efficace permettant l'apparition d'une anomalie thermique en surface, du fait de la faible capacité calorifique de l'atmosphère martienne (au moins  $10^{-6} \text{ m}^2$ , correspondant à un diamètre de blocs de  $10^{-1} \text{ m}$ ). Ces transferts semblent possibles dans des pierriers tels que ceux des fractures pluri-kilométriques de Cerberus Fossae [32] ou à l'intérieur de pit craters du volcan Tharsis Mons [33]. Ces résultats sont appuyés par les travaux récents de [21] sur l'influence de la géométrie des pits craters d'Arsia Mons sur leurs températures de surface. Ils permettent de jeter un regard nouveau sur les processus d'échanges entre la subsurface et l'atmosphère en contexte planétaire. Ces interactions peuvent en effet être particulièrement dynamiques dans les milieux poreux perméables, transporter du gaz en profondeur et participer au façonnement du champ thermique de surface. Enfin, la détection indirecte des entrées/sorties via les températures de surface ouvre une nouvelle voie pour appréhender la perméabilité du milieu qui permet une circulation efficace du fluide.

### 3.1.2 A la recherche de l'eau dans les zones arides et les volcans

Après cette expérience en contexte planétaire, je me suis intéressé à l'hydrologie des zones arides (sur financements CNES), en collaboration avec le GET<sup>21</sup>, l'ISSI<sup>22</sup> de Bern (Suisse) et le laboratoire Hydrosience Montpellier. La possibilité d'utiliser des données thermiques pour la localisation de nappes d'eau peu profondes a été évoquée dans les années 70 ([1], [3]). Ces résultats montrent que les nappes souterraines se comportent comme des puits de chaleur en été et comme des sources de chaleur en hiver, car les eaux souterraines ont une inertie thermique intra-annuelle plus forte que les eaux de surface [16]. Une étude réalisée par [11] a montré une corrélation entre les températures obtenues à partir des données dans l'infrarouge thermique du satellite METEOSAT, et des anomalies piézométriques de la nappe libre du Quaternaire dans le bassin du lac Tchad. Celles-ci correspondent à des dômes -avec une profondeur de  $\approx 10 \text{ m}$  sous la surface- et dépressions piézométriques fermés -avec une profondeur de  $\approx 60 \text{ m}$ . Nous avons complété cette étude grâce à des observations satellitaires, géologiques et la modélisation numérique des circulations dans le bassin ([36], [43]). Bien que performants, les codes de convection "in house" utilisés dans les précédentes études ne permettaient pas de modéliser les circulations sous le lac Tchad du fait de la géométrie du bassin sédimentaire. J'ai donc pris l'initiative de réaliser les simulations via le logiciel commercial Comsol Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis et plus flexible pour la résolution des EDP en milieu complexe. Cette étude a favorisé des développements notables en modélisation numérique 2D par rapport à mes travaux précédents, avec notamment la prise en compte de la géométrie des couches sédimentaires et de leurs caractéristiques physiques en fonction de la température (conductivité thermique effective, viscosité, ou coefficient d'expansion thermique ou encore perméabilité anisotrope). Les résultats montrent qu'il existe un courant d'eau convectif à grande échelle (plusieurs dizaines de kilomètres) dans le bassin sédimentaire du Lac Tchad et qui implique plusieurs couches géologiques, comme le montre le champ de température de la figure 3. Une multitude de petites cellules convectives est présente dans la couche de grès en base du bassin, induisant une descente de fluide sous le Kadzell et une remontée à droite de la figure sous le Kanem. Les dépressions et dômes piézométriques sont donc liées respectivement à la présence d'un courant convectif descendant (sous le Kadzell) et ascendant (sous le Kanem). Cette circulation induit une baisse de température au niveau du courant descendant (flux de chaleur de  $40 \text{ mW m}^{-2}$ ), alors que le flux montant réchauffe la surface de  $5$  à  $10^{\circ}\text{C}$  en générant un flux de plus de  $100 \text{ mW m}^{-2}$ , important pour la région. Avec ceux de [11], ces travaux mettent en exergue l'influence

21. Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse

22. International Space Science Institute

1) des variations spatiales de conductivité thermique dans le bassin pour la génération de la convection, 2) de la perméabilité des couches et de la présence de discontinuités structurales (failles) dans la migration des fluides vers la surface et 3) de la topographie à l'intérieur du bassin qui facilite la circulation.

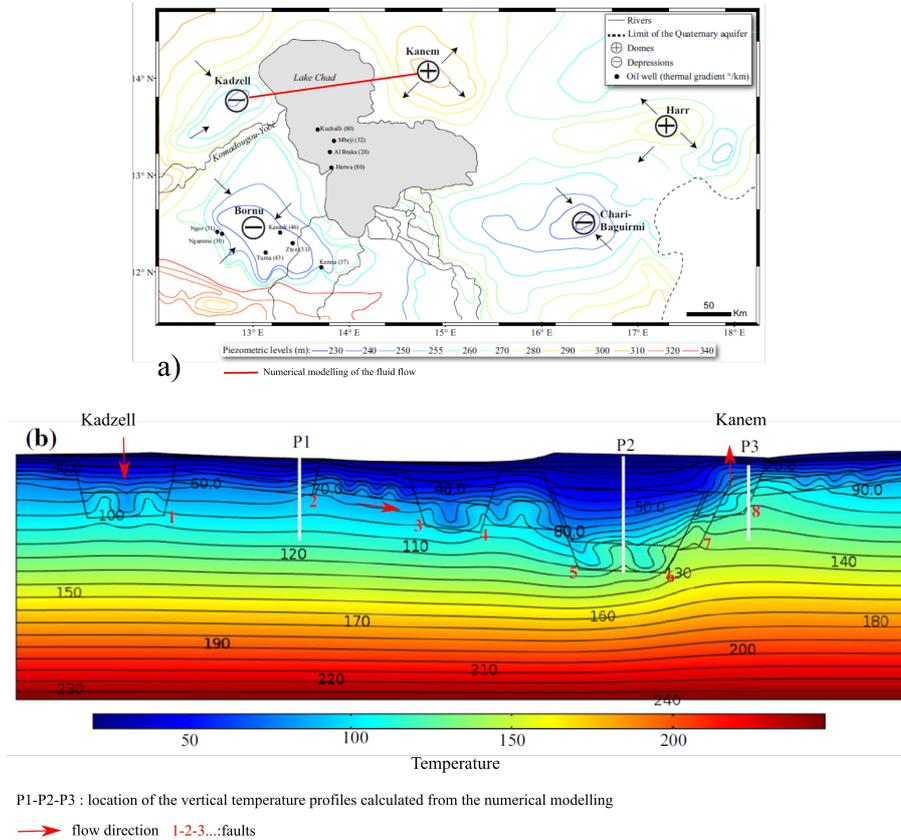


FIGURE 3 – Simulation numérique de la température à l'intérieur du bassin du lac Tchad présentant la morphologie de la circulation convective d'eau dans les couches géologiques les plus perméables [36].

Ces écoulements profonds impliquent des phénomènes similaires à ceux présents dans les systèmes hydrothermaux des volcans. Ces processus ont pu être indirectement caractérisés grâce à l'imagerie géophysique, et notamment aux mesures électriques basse fréquence, dont j'ai contribué à la mise en œuvre avec Anthony Finizola du Laboratoire Géosciences Réunion sur le Vésuve, l'Etna ou encore le Stromboli entre 2014 et 2018 ([74], [85], [87], [45], [107]). Plusieurs missions de grande ampleur (financées grâce au projet du 7<sup>ème</sup> PCRD Medsuv) ont permis d'établir les premières inversions d'IRE à grande profondeur de ces systèmes ( $\approx 900$  m sur l'Etna). Elles ont été complétées par des mesures de potentiels spontanés, de CO<sub>2</sub> et de températures à 30 cm de profondeur, donnant des informations sur l'hydrodynamique du système hydrothermal. Au delà de l'important défi technique que représentent ces expéditions sur le terrain (une vingtaine de personnes pendant 20 jours), le déploiement de mesures de résistivité grande profondeur a permis de caractériser la présence de fluides hydrothermaux à une échelle pluri-kilométrique sur l'Etna et le Vésuve, en relation avec les discontinuités structurales des édifices (failles, fissuration). La figure 4 présente une compilation de données de terrain obtenues sur le Vésuve sur six kilomètres de distance. Elle met en évidence la corrélation entre plusieurs types de données (température, potentiels spontanés) et une zone conductrice (visible sur la carte de résistivité électrique) permettant de localiser le système hydrothermal du volcan. Elle montre aussi l'influence des discontinuités

structurales (failles, fractures...) liées au cratère de 1906 et accueillant potentiellement des circulations de fluides sur les données de températures, de potentiels spontanés et de résistivité électrique.

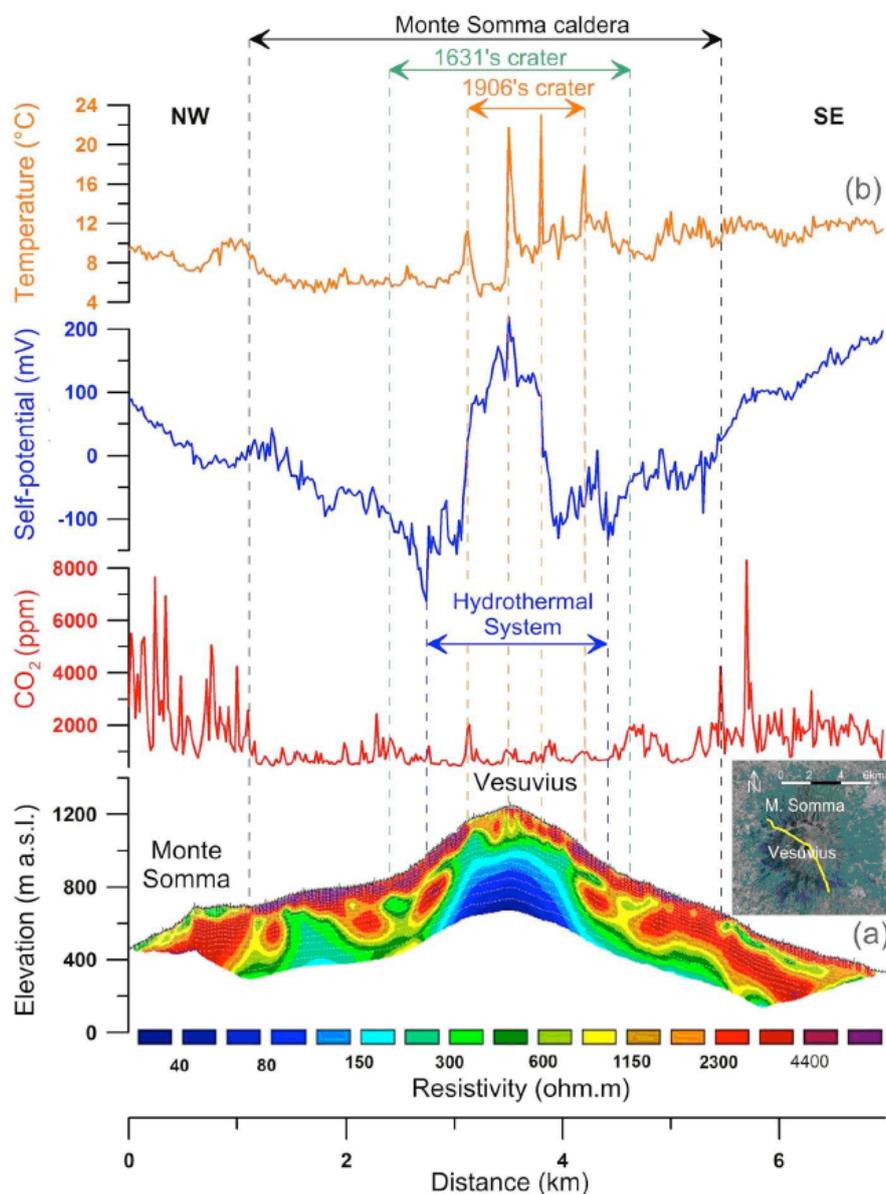


FIGURE 4 – a) Localisation du profil géoelectrique de 7 km de long traversant le Vésuve; (b) De haut en bas : Tomographie de résistivité électrique, potentiels électriques, Température à 30 cm de profondeur et concentration de CO<sub>2</sub> le long du profil NO-SE montré en a) [107].

A une échelle plus petite (hectométrique), la thèse de Cécile Mezon (financée par EDF R&D) s'est focalisée sur la caractérisation des circulations de fluides dans une zone fracturée du sommet du système hydrothermal du volcan Stromboli (Pizzo) grâce à ces méthodes, ainsi que sur le développement d'un modèle convectif en présence de fractures ([81], [86], [45]). L'objet étudié dans cette thèse est la remontée hydrothermale située au niveau de la limite supérieure de l'effondrement de Rina Grande, au sommet du volcan Stromboli. L'approche géophysique de sub-surface comprend une cartographie spatiale (à l'échelle métrique) en IRE, PS et température et un suivi tempo-

rel des signaux PS et thermique. La cartographie spatiale nous renseigne sur l'extension spatiale du système hydrothermal grâce à l'IRE 3D et le caractère actif des circulations (méthodes PS et température). Le traitement des données de surveillance montre qu'une relation linéaire lie le signal thermique et le signal PS, une relation qui ne peut être purement thermo-électrique. Le jeu de données temporel met l'accent sur la dynamique du système convectif et notamment la probable dépendance de la vigueur du système convectif avec les variations saisonnières de température atmosphérique. Le second volet vise à quantifier l'énergie évacuée par des systèmes thermo-convectifs à l'aide d'une approche numérique. Cette approche géophysique met en évidence le fait que les zones endommagées telles que des limites structurales favorisent la circulation des fluides hydrothermaux. Ceci s'explique par le fait que fractures, failles ouvertes, zones d'altération etc. changent à petite échelle la perméabilité du milieu. L'approche numérique se focalise sur la simulation 3D de l'écoulement et du transfert de chaleur dans des milieux poreux fracturés. Le travail s'est basé sur un code d'écoulement en milieux poreux fracturé pré-existant dans l'équipe de Pierre Adler de Sorbonne Université. Ce code a été adapté afin de résoudre le problème thermique. L'étude théorique vise à quantifier l'influence des paramètres du réseau de fractures sur l'énergie dissipée. L'influence de la densité de fractures, de la transmissivité de fractures et l'anisotropie du réseau de fractures sont évaluées. L'étude compare également les flux de chaleur dégagés par des modèles où les fractures sont insérées de manière discrète avec des modèles homogènes et de même propriétés macroscopiques (approche effective). Les résultats montrent que la validité de l'approche effective est fortement dépendante des paramètres du réseau de fracture (figure 5). Enfin, à l'échelle du laboratoire, j'ai pu faire le lien entre températures du milieu et écoulements d'eau en condition expérimentales. J'ai notamment pu 1) caractériser l'évolution d'un panache convectif d'eau en milieu poreux déclenché par chauffage par le bas grâce à des thermocouples et des mesures de potentiels électriques dans le cadre de mon post-doctorat à l'Université de Tokyo [66] et 2) proposer une méthode de quantification de la perméabilité d'un milieu poreux grâce à l'envoi d'un pulse d'eau chaude dans le cadre de la thèse d'Azziz Saley [37]. Ces travaux ont été réalisées avec des laboratoires divers comme le LGSR<sup>23</sup>, l'INGV<sup>24</sup>, le Volcano Research Center de l'Université de Tokyo ou le Laboratoire M2C de l'Université de Rouen.

---

23. Laboratoire Géoscience Environnement de La Réunion

24. Institut National de Géophysique et de Volcanologie

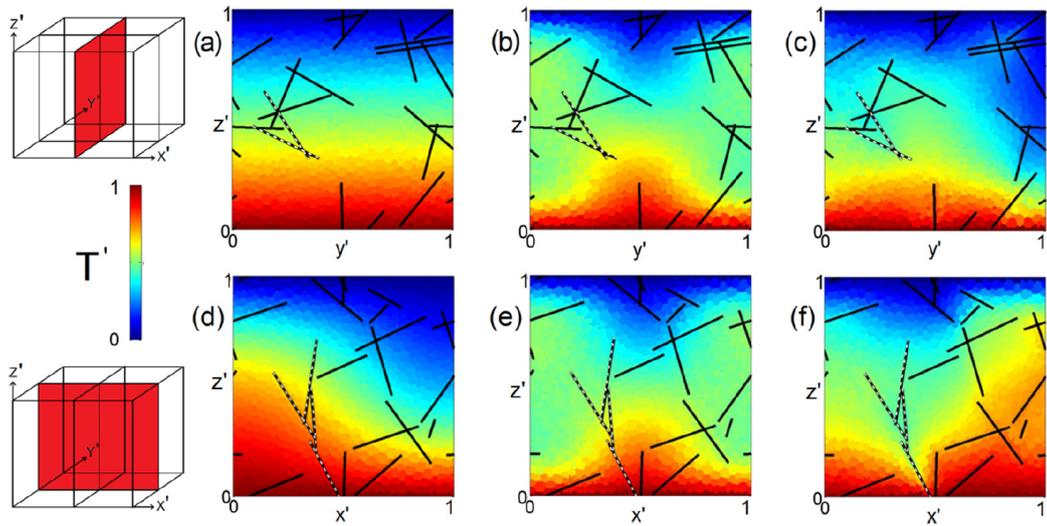


FIGURE 5 – Champ de température stationnaire simulé pour deux plans verticaux orthogonaux verticaux pour trois transmissivités de fracture adimensionnées différentes (a), (d)  $\sigma'=0.1$ ; (b), (e) 1; et (c), (f) 5. Simulations réalisées pour une densité de fracture par unité de volume adimensionnée  $\rho'=4$  et un nombre de Rayleigh  $Ra=41.5$ [45].

Tiré-à-part ACL17 : Thermal infrared image analysis of a quiescent cone on Piton de la Fournaise volcano : Evidence of convective air flow within an unconsolidated soil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Rang Q1, IF=2.7.

### 3.1.3 Vers la caractérisation des structures du génie civil

Ces études en science de la Terre ont apporté des connaissances solides que j'utilise pour la caractérisation de structures du génie civil. Les expertises à laquelle je participe régulièrement au Cerema sont tout à fait propices à ces travaux. En 2014, j'ai mené une étude sur deux quais de Haropa Port Le Havre mettant en évidence i) des dépressions de surface au droit de cavités souterraines grâce à la modélisation 3D photogrammétrique par drone et ii) des anomalies thermiques de 2 à 4°C observées sur les flancs de ces dépressions, grâce à un suivi temporel réalisé par une caméra thermique embarquée [49]. Ces observations montrent des zones froides apparaissant pendant la journée sur les flancs des dépressions avec des contrastes maximums en milieu d'après-midi. Après avoir étudié l'influence potentielle des propriétés de surface (inertie thermique, émissivité, albedo), de la micro-topographie des quais et de la présence de cavités souterraine sur le champ thermique, j'explique cette corrélation entre température et déformations par une infiltration d'eau météorique. Ce processus est plus efficace (i.e. une vitesse de Darcy plus élevée) au niveau des flancs des dépressions qui sont en extension mécanique et donc plus perméables (via des fissures) que leurs centres. Dans ces zones, la pluie induit une anomalie thermique capable de se maintenir pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours par rapport aux zones saines comme le montre les travaux expérimentaux de [2]. Ces contrastes sont alors détectables grâce à un suivi temporel par caméra thermique. Il est à noter que les seules méthodes ayant apporté des résultats dans cette étude sont les techniques optiques, les observations géophysiques (électromagnétiques et radar géologique 3D) étant inexploitable du fait de la présence d'armatures dans les quais générant un bruit important dans les signaux. En l'absence de ces perturbations électromagnétiques, les fortes perméabilités peuvent aussi induire des signaux remarquables dans les données obtenues par radar. En 2014, j'ai dirigé une expertise utilisant le radar géologique sur une digue de protection contre les inondations localisées à Saint Firmin dans le Loiret (45). Ces mesures ont mis en évidence des contrastes de permittivité diélectriques importants, liées à des zones remaniées ou de porosité élevée dans la digue et sujettes à des fuites. L'originalité de l'étude réside dans la combinaison d'une méthode géophysique et d'une méthode hydraulique afin de mettre en évidence des zones de fuites. Elle montre la relation qualitative entre les signaux radar, la perméabilité du milieu mesurée grâce au système PERMEAFOR [15] et les observations de fuites en pied de digue ([129], [109], [35]). Du point de vue opérationnel, l'étude géophysique permet ainsi de compléter les observations visuelles réalisées par les gestionnaires sur le terrain et d'optimiser le diagnostic de l'ouvrage. Par ailleurs, ces travaux valorisent le Perméafor au niveau international, outil développé par l'UGE et le Cerema et donnant accès à des informations directes sur les perméabilités de la subsurface.

La caractérisation des structures du génie civil passe aussi par l'imagerie du bâti ancien, notamment en archéologie. Ces dernières années ont été l'occasion de caractériser de nombreux sites patrimoniaux ou archéologiques en France ou à l'international ([68], [34], [41], [53]). Deux projets présentent un intérêt particulièrement important dans ma vie de chercheur. Le premier est l'Abbaye du Bec Hellouin (Eure, 27), pour laquelle j'ai participé aux mesures radar et électriques, et où nous avons découvert par hasard l'emplacement de l'église romane originelle [41]. Le second est le projet franco-péruvien Huayruro, que j'ai intégré grâce aux résultats du Bec Hellouin. L'objectif est de mettre en évidence l'importance culturelle et touristique de vestiges Incas dans la région de Moquegua (sud Pérou) au travers d'études en histoire, géologie, géophysique, archéologie et paléoclimatologie [53]. Ces villages ont été enfouis lors de l'explosion gigantesque du volcan péruvien Huaynaputina en l'an 1600. Cette explosion est une des plus importantes qu'ait connue la planète ces cinq cents dernières années. Ayant produit plusieurs km<sup>3</sup> de cendres et des coulées pyroclastiques recouvrant une trentaine de villages Incas, cette explosion a abaissé la température de la Terre de 1.2°C. Le projet, mené en collaboration avec l'Ingemmet et l'IGP<sup>25</sup> péruviens a eu un impact national au Pérou : Huayruro a été

25. Institut de Géophysique du Pérou

proclamé d'intérêt régional par la Région de Moquegua et présenté au congrès (l'équivalent du parlement français) en 2018. Dans ce projet, j'ai participé au déploiement de méthodes radar, électromagnétique (EM31), magnétique, visible et infrarouge thermique pour la cartographie des vestiges, dont une synthèse est fournie sur la figure 6. Notre investissement est allé au-delà de la géophysique, avec une implication active dans la valorisation géologique, historique et touristique du site. Enfin, ces périodes passées au Pérou ont été l'occasion d'un investissement important dans l'enseignement prodigué dans plusieurs universités, ainsi que dans la formation des chercheurs/ingénieurs aux techniques géophysiques et embarquées sur drone.

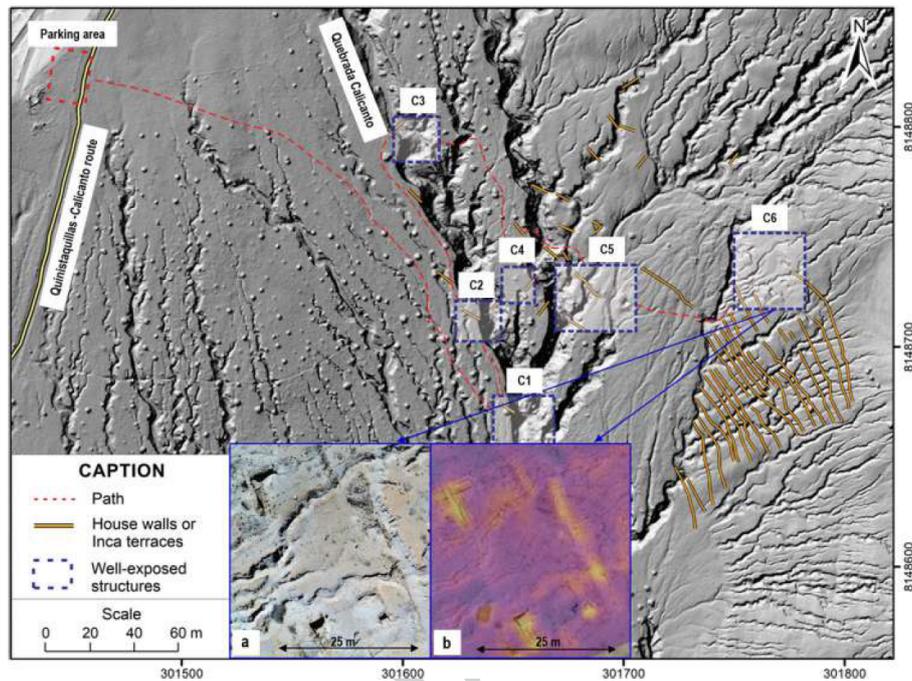


FIGURE 6 – Modèle ombré (8.27 cm/pixel) montrant la zone archéologique de Calicanto étudiée dans le cadre du projet Huayruru. Les vestiges enterrés ou semi-enterrés détectés grâce à l'infrarouge thermique et au radar géologique sont replacés sur la carte. L'image a) montre une vue de drone d'un bâtiment semi-enterré. L'image b) montre le même bâtiment détecté grâce à une caméra thermique à bas coût FLIR One branchée sur smartphone et embarquée sur le drone [53].

Tiré-à-part ACL35 : Permeability and voids influence on the thermal signal, as inferred by multitemporal UAV-based infrared and visible images. *Journal of Hydrology, Rang Q1, IF=5.7.*

### 3.2 Modélisation 3D pour les géosciences

La nécessité de prise en compte de la troisième dimension a très tôt été sous-jacente dans mes travaux. Les signaux thermiques et géophysiques peuvent être dépendants de la géométrie de surface, notamment dans le cas des volcans, des falaises, des glissements de terrain ou des ouvrages du génie civil. La convection thermique naturelle est notamment dépendante de la morphologie 3D de l'environnement. Cette dernière peut en effet contrôler le déclenchement de la convection, la faciliter, influencer sa structure (nombre et dimension des cellules) et/ou son amplitude ([10], [38], [27]). En imagerie géophysique, l'absence de prise en compte de la topographie dans les inversions électriques peut mener à des résultats inexploitable dans le cas de topographies complexes [105]. Par ailleurs, la prise en compte d'une topographie a minima juste au voisinage des électrodes de mesure peut induire des artefacts et donc à une mauvaise interprétation des résultats, du fait de la résolution imprécise du problème direct. Au début de mon parcours de recherche, les modèles 3D de terrain permettant de documenter l'influence de la topographie sur le signal thermique et géophysique étaient difficiles à obtenir, voire n'existaient pas. En effet, le coût des données était élevé et les résolutions s'avéraient souvent insuffisantes pour les études. Les codes numériques permettant de réaliser des simulations prenant en compte des variations de la topographie étaient aussi difficiles à obtenir.

Peu après mon recrutement, la méthode photogrammétrique a été introduite au laboratoire, ouvrant la voie à la réalisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT) à bas coût. Cette technique exploite les lois de l'optique pour calculer la localisation de la prise de photo et ainsi reconstituer une surface en trois dimensions à partir de photographies. Une image constitue un enregistrement plan et déformé de l'environnement. Pour reconstruire notre environnement tridimensionnel, il faut au moins deux images prises de deux points de vue différents et procéder par intersection. Ce principe est analogue au fonctionnement de notre système visuel qui nous permet d'appréhender notre environnement en relief, par nos deux yeux : c'est la stéréovision. Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine (dont les points de vue sont parallèles mais décalés dans l'espace) forment un couple qui permet de retrouver la sensation de relief par photogrammétrie. Aujourd'hui, le traitement simultané de centaines de photographies grâce aux logiciels photogrammétriques permet de reconstituer en 3D un objet géologique en quelques heures, objectif encore impensable il y a une quinzaine d'années.

Étant données les potentialités majeures de cette méthode, je me suis formé à l'acquisition et au traitement de données photogrammétriques, dans le but d'implémenter cet outil dans les études thermiques et géophysiques. En 2013, nous avons intégré les résultats d'inversion électrique 2D et de données radar dans un pont<sup>26</sup> reconstitué en 3D pour faciliter sa restauration ([34], [111], [59]). Dans cet article, tout en participant à l'acquisition et à l'interprétation des données, j'ai pu combiner l'ensemble de ces observations dans un seul et même modèle 3D. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Julien Lacogne (alors architecte au Cerema) et dont un des résultats obtenu grâce au logiciel gratuit Google Sketchup est présenté dans la figure 7. Elle permet de préciser la distribution verticale et latérale de résistivité dans le pont et son environnement proche en relation avec les deux sondages réalisés sur le site. Combinées aux données radar et à l'inspection de l'ouvrage, ces résultats ont facilité la localisation des pathologies du pont (décompressions, déjointements de pierres, présence de racines d'arbres...) pour optimiser sa restauration, mais aussi pour mieux le replacer dans son contexte morpho-fluvial et archéologique [60]. Dans cette étude, les inversions électriques ont été réalisées en deux dimensions avant d'être intégrées dans un modèle géométrique du pont tridimensionnel. Une seconde publication [39] va plus loin en combinant photogrammétrie et tomographie 3D afin 1) d'obtenir une image de l'intérieur d'un pilier de carrière en réalisant des ceintures d'électrodes à trois endroits différents, 2) de décrire l'influence de la résolution du modèle photogrammétrique sur les inversions et 3) faire

26. Le Pont de Coq, classé aux monuments historiques et situé près de Ménéval (Seine-Maritime, 76)

le lien entre ces résultats et la présence de zones à forte teneur en eau. Dans ce cas, le problème direct est résolu en prenant en compte directement le modèle maillé photogrammétrique. Ces travaux ont été menés avec Yannick Fargier de l'Université Gustave Eiffel.

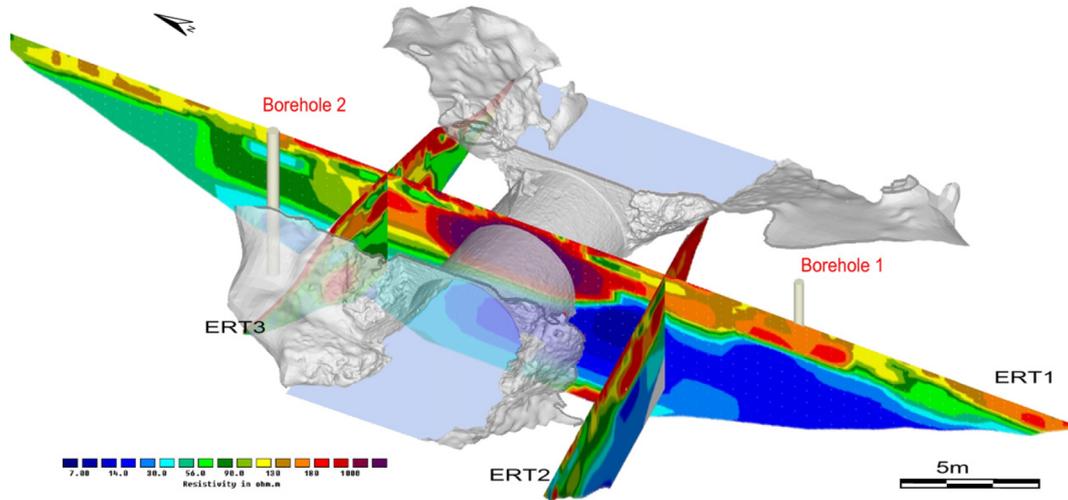


FIGURE 7 – Combinaison des observations photogrammétriques et des résultats d'inversion électrique 2D pour le Pont de Coq [34].

Les difficultés rencontrées pour inverser ces profils électriques avec des logiciels classiques (souvent payants) nous ont naturellement amené à développer un nouveau code d'inversion électrique open-source capable de traiter les données acquises dans des zones à topographies complexes. En effet, les codes d'inversion 3D actuellement disponibles sont soit payants, soit ils ne sont pas optimisés pour des inversions prenant en compte ce type de géométrie. PyLGRIM (Python Language-based Geoelectrical Resistivity Imaging and Modeling) a été écrit par Antoine Tonnoir du LMI<sup>27</sup>, en collaboration avec Yannick Fargier, Cyrille Fauchard (Cerema) et moi-même dans le cadre du projet région TélédéTAC<sup>28</sup>. Implémenté en éléments finis, le code prend en compte n'importe quel nuage de points issu de campagnes photogrammétriques ou LiDAR pour le problème direct et d'inverser les mesures en 3D [58]. Par ailleurs, il est tout à fait possible d'intégrer dans les inversions des profils orientés de façon arbitraire et qui prennent en compte le géoréférencement des électrodes. Enfin, le problème direct est optimisé grâce à des conditions aux limites originales (éléments infinis) permettant de réduire la taille du maillage et donc les temps de calcul, particulièrement longs pour ce genre de géométrie (de l'ordre de plusieurs jours sur un ordinateur possédant un processeur Core i9 avec 64 Go de RAM et une carte graphique de 11 Go). Actuellement, je participe à la définition des fonctionnalités métier de cet outil, à sa validation scientifique et à la rédaction du premier article le présentant.

Comme précisée en début de cette section, les températures de surface peuvent elles aussi être modulées de façon importante par les variations de pente de la surface observée ([4], [5]). En particulier, la topographie détermine :

- la distribution de rayonnement incident ;
- la variabilité des pentes et des orientations des surfaces ;
- la génération de zones d'ombre ;
- la proportion de ciel  $\alpha$  dans laquelle émet un point présent au niveau de la surface. Le refroidissement est en effet contrôlé par les échanges d'énergie entre la surface et les parois des vallées/crêtes vues par un point de cette surface [4].

27. Laboratoire de Mathématiques de l'INSA de Rouen

28. projet Région Normandie "TELEDEtection par drone du TrAit de Côte", porté par Cyrille Fauchard

Plus cet angle est petit, moins la surface voit de ciel, et plus celle-ci retarde son refroidissement par rapport à une surface plane ou le sommet d'une crête [31]. La surface pourra alors apparaître plusieurs degrés plus chaude que la surface plane pendant la nuit ;

- le déclenchement de la convection et son amplitude quand ce phénomène est présent.

Face à l'influence de ces variations de pente sur le signal thermique, j'ai développé une méthodologie permettant de générer des cartes de température en trois dimensions. J'ai eu l'idée d'appliquer la méthode photogrammétrique aux données d'imagerie acquises dans l'infrarouge thermique. Cette technique permet d'obtenir l'information de température directement en 3D sur le modèle. En effet, de la même façon qu'une caméra visible, une caméra thermique possède un objectif avec une focale bien déterminé et un capteur matriciel et donc un modèle optique rendant possible la stéréovision. A l'instar de la photogrammétrie dans le visible, le résultat est un modèle 3D mais dont le pixel est une température, obtenu à partir d'images thermiques orientées avec un certain taux de recouvrement (au moins 70 % en longitudinal et 30 pourcent en latéral). L'obtention de cartes de températures en trois dimensions que j'appelle "thermogrammétriques" permet ainsi de caractériser spatialement les températures de surface en fonction de la topographie du terrain (cassures de pentes, etc...). Fusionné aux données visibles 3D, l'influence du type de sol (grossier, fin, consolidé ou non) et de la végétation sur le signal thermique peuvent être aussi appréhendés. La figure 8 montre la richesse des informations obtenues en présence d'un modèle 3D visible couplé à un modèle thermogrammétrique dans le cas du glissement littoral des Vaches Noires [50]. *In fine*, la méthodologie mise en place facilitera la détection de signaux thermiques (par exemple associée à l'eau) non induits par les propriétés intrinsèques de la surface ou par la végétation. Ce travail est réalisé en collaboration avec Vincent Guilbert, technicien dans l'équipe ENDSUM.

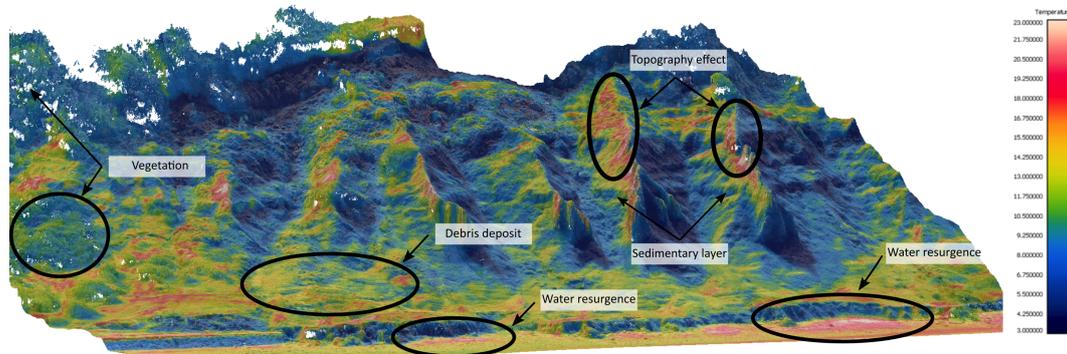


FIGURE 8 – Modèle 3D de température du glissement des Vaches Noires obtenu en été et fusionné au modèle acquis dans le visible [50]. Les deux acquisitions ont été réalisées simultanément grâce à un drone.

Mes projets proposent aujourd'hui des méthodologies combinant/fusionnant plusieurs types de données d'imagerie optiques et géophysiques sur des glissements littoraux (Vaches Noires), des falaises de craie (Sainte-Marguerite-mer), des volcans (Etna, Vésuve, Stromboli) ou des ouvrages actuels ou anciens ([71], [47], [50], [51], [54]). Ces modèles peuvent contenir des nuages de points 3D reconstituant la surface observée, des cartes de température de surface tridimensionnelles, des orthophotographies, des cartes de différences de hauteur pour le suivi diachronique des milieux et bien sûr des données géophysiques (imagerie électrique, électromagnétique, polarisation spontanée ou radar). Enfin, les modèles sont réalisés avec des outils de visualisation et d'analyse open-source (Paraview, Cloud Compare, Meshlab, QGIS...) et très souvent interfacés avec Python. Ces travaux sont menés en collaboration étroite avec Cyrille Fauchard,

directeur de l'équipe, Vincent Guilbert et Cyril Ledun, techniciens à ENDSUM.

La combinaison de différents types de données dans un seul et même modèle constitue une avancée majeure par rapport à mes travaux de début de carrière. Au fil du temps, je me suis rendu compte qu'elle améliore considérablement nos interprétations : 1) les inversions géophysiques sont mieux contraintes pour des géométries complexes [105]; 2) cet outil permet de mieux caractériser les phénomènes en jeu du fait d'une meilleure spatialisation de l'information et 3) il rend les résultats beaucoup plus lisibles pour les gestionnaires. En ce sens, ces travaux facilitent la diffusion des résultats de géophysique de subsurface et de télédétection au plus grand nombre. Aujourd'hui, ce savoir-faire est utile aux projets d'expertise de l'équipe (pour le compte des collectivités et du tissu industriel) et est transféré dans les services opérationnels du Cerema. Les connaissances acquises en photogrammétrie ont fait l'objet de plusieurs formations en interne pour les ingénieurs/techniciens s'occupant d'ouvrages ou de risques naturels. Ces transferts concourent à l'enrichissement des études pour la caractérisation ou le suivi d'ouvrages et d'infrastructures. La figure 9 présente un résultat issu de ces transferts opérationnels dans le cadre d'un phare. Il s'agit d'une carte de différence de distance obtenue par comparaison entre deux modèles photogrammétriques à un an d'intervalle. Celle-ci met en évidence un gonflement central important et rapide au niveau de la structure. Ce type de rendu montre les potentialités de cette méthodologie pour la réalisation de diagnostic de l'ensemble de l'ouvrage avec une précision de quelques centimètres et cela sans intervenir physiquement.

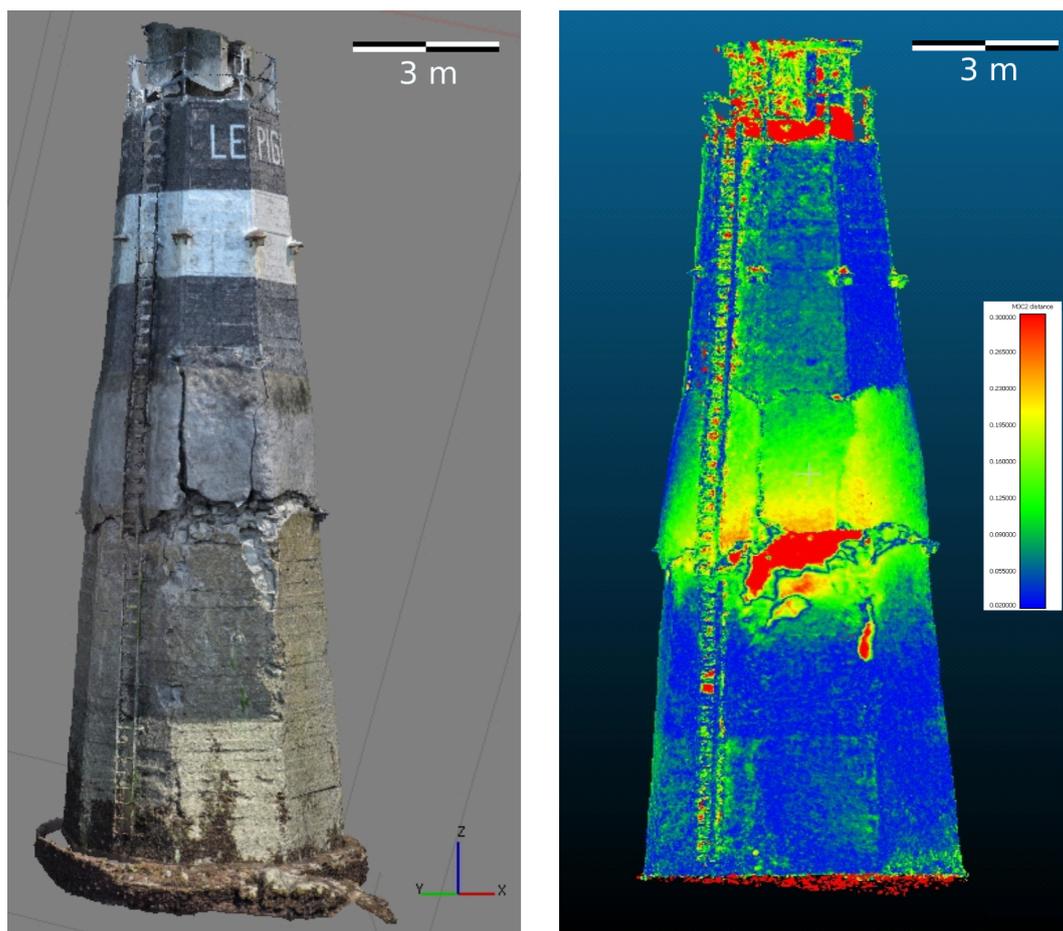


FIGURE 9 – A gauche : modèle photogrammétrique de la tourelle du Pignon obtenu grâce à des prises de vue circulaires par bateau ; à droite : carte de distance montrant l'évolution de la tourelle de Pignon située au large des îles Chausey (50) entre 2018 et 2019. Elle est issue de la comparaison entre deux modèles 3D de l'ouvrage grâce au logiciel Cloud Compare. Cette carte a été obtenue par le Département Mobilité, Sécurité Ouvrages d'arts (DMSOA) du Cerema Normandie-Centre.

Tiré-à-part ACL25 : 3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods. *Geophysics*, Rang Q1, IF=2.9.

### 3.3 Le drone, un moyen d'observation révolutionnaire

Le drone volant ouvre l'accès à des observations optiques et/ou géophysiques de manière autonome. Depuis cinq ans, ce système est en plein essor dans de nombreux domaines, du fait de sa flexibilité, de sa miniaturisation rapide et de son coût abordable [47]. Cependant, il s'avère très exigeant en terme de rigueur d'acquisition, de réglementation et de maintenance. Dès mon arrivée au Cerema, je me suis naturellement tourné vers ce système d'acquisition afin de réaliser des observations à petite échelle. J'ai donc monté une collaboration avec Jean-Luc Sorin, ingénieur d'étude à l'Ifsttar<sup>29</sup> et pionnier dans l'acquisition de données par drone. J'utilisais les données acquises dans le visible et l'infrarouge thermique pour réaliser des observations optiques sur le site karstique de Bouville (76) comportant de nombreuses dolines<sup>30</sup> et pour traquer les résurgences d'eau sur le glissement des Vaches Noires dans le Calvados (figure 8) ([50], [54]). Ces premières observations ont par exemple été à la base des réflexions qui ont mené à la thèse expérimentale d'Aziz Saley sur le traçage des écoulements en milieu poreux par méthode infrarouge thermique [37] avec le laboratoire M2C de l'Université de Rouen (Jean-Paul Dupont et Abdel Jardani).

Cette expérience, encore rare en 2012, a permis l'émergence de projets structurants tels que celui mené avec Haropa Port Le Havre sur l'étude du lien entre présence de cavités souterraines et données optiques [49]. N'étant pas formés au pilotage au Cerema, nous avons alors demandé à une société privée de réaliser les mesures au-dessus des structures. Par la suite, le projet national DiDRO (2015-2018) coordonné par Jean-luc Sorin a été labellisé par trois pôles de compétitivité. Celui-ci a favorisé le développement de l'activité au laboratoire en investissant dans du matériel (vecteur, caméra haute résolution), et dans la formation de l'équipe au traitement de données 3D et au télépilotage ([96], [47], figure 10). L'objectif de DiDRO était de développer un démonstrateur drone capable 1) de mener des opérations d'observation lors de l'entretien des digues afin de faciliter le travail des techniciens de terrain et 2) d'intervenir en cas d'inondations (surveillance des zones proches de la rupture et aide au sauvetage). Dans ce projet, j'étais responsable des tâches "Observations multi-spectrales" et "cibles GPS dérivantes". DiDRO a permis de combiner plusieurs types de données de surface afin d'observer finement la géométrie des ouvrages, voire de quantifier leur déformation (LiDAR et capteur photogrammétrique), de caractériser le type de végétation présent (via le proche infrarouge) et de réaliser des tests de détection de fuites à partir de mesures thermiques. Dans ce cadre, j'ai exploité le drone gros porteur de Didro afin de tester les systèmes embarqués, j'ai monté les expérimentations pour la détection de fuites dans les flancs de digues en eau et j'ai collaboré avec la société Geomatys pour la valorisation des données 3D thermiques obtenus. La figure 11 montre les drones utilisés dans le cadre de DiDRO, tous permettant d'embarquer plusieurs capteurs et sélectionnés pour leur fiabilité. Ces deux types de drones (multicoptère et hélicoptère) possèdent des autonomies allant de 30 min à 2h. Ils sont par ailleurs flexibles, permettant d'opérer des plans de vols automatiques préalablement conçus au laboratoire ou des vols stationnaires afin d'observer l'évolution d'une scène. Ils sont donc particulièrement intéressants pour le diagnostic d'ouvrage régulier.

29. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux. Il a fusionné avec l'université Paris-Est Marne-la-Vallée pour créer l'Université Gustave-Eiffel.

30. Forme caractéristique d'érosion des systèmes calcaire en contexte karstique.

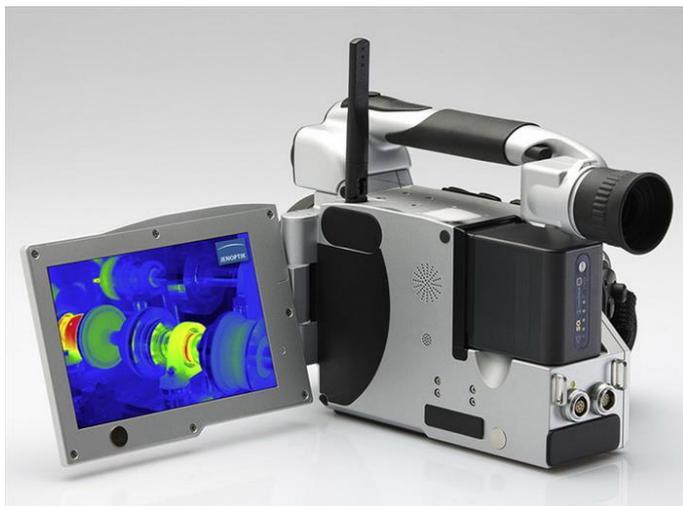


FIGURE 10 – Caméra thermique haute résolution Jenoptik Variocam HD800 (1024\*768 pixel), achetée dans le cadre du projet DiDRO et embarquée sur les drones de l'équipe.

DiDRO a mis en exergue les potentialités du drone pour la surveillance de dizaines de milliers de kilomètres de digues aujourd'hui vieillissantes en France. A vocation industriel (financé par BPI France), il fait aujourd'hui l'objet de réflexions sur la mise en place d'un service autour des résultats obtenus. Il est à noter qu'avec le projet polonais SAFEDAM, ce projet fait partie des efforts nationaux visant à offrir une solution drone pour les digues, dans une période où la fréquence des événements extrême est de plus en plus importante. Par la suite, les projets région TéléDETAC (2017-2019) et européens POLDER2Cs ont permis à l'équipe de renforcer ses compétences dans cette thématique qui allie aujourd'hui acquisition, traitement des données et interprétation des résultats ([51], [54]).

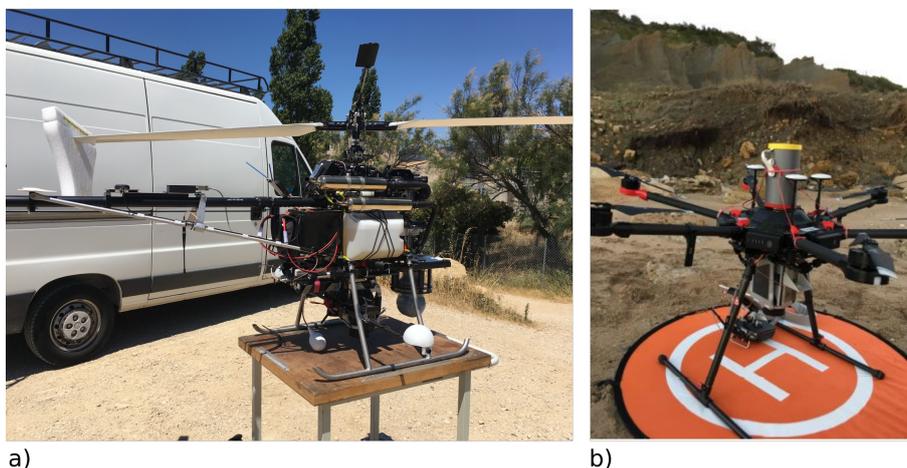


FIGURE 11 – a) Drone hélicoptère multi-capteur de la société Survey Copter utilisé dans le cadre de DiDRO. Le système embarque un capteur optique visible et infrarouge développé par l'IGN, la caméra thermique haute résolution de l'équipe, un LiDAR et une caméra thermique de surveillance. Il peut soulever jusqu'à 16 kg de matériel ; b) Drone hexacoptère acheté dans le cadre de DiDRO, embarquant un capteur visible ainsi que la caméra thermique haute résolution. Il peut embarquer jusqu'à 6 kg de charge utile.

En parallèle de ces travaux, avec Julien Lacogne et Cyrille Fauchard, j'ai impulsé

la mise en place d'un groupe de pilotes inter-département au Cerema Normandie-Centre dès 2015, dans un contexte réglementaire national encore balbutiant pour les drones. Celle-ci a mis en place 1) l'ensemble des protocoles nécessaires pour le déploiement de nos drones dans le respect de cette réglementation et 2) l'instrumentation permettant de réaliser des mesures de qualité en vol. Ces aspects sont traités avec l'aide de Bruno Beaucamp, technicien à ENDSUM Rouen. L'équipe drone mène aussi bien des acquisitions à des fins de recherche que d'ingénierie, dont certaines expertises sur plusieurs années pour le compte de collectivités comme La Rochelle [136]. Elle figure parmi les équipes pionnières du Cerema dans cette thématique et illustre bien le caractère complémentaire entre la recherche et l'ingénierie au Cerema : une recherche nourrie par le terrain et une ingénierie irriguée par la recherche. Aujourd'hui, je participe à l'animation du réseau drone du Ministère de l'Ecologie, que le Cerema a contribué à mettre en place en 2019 en relation avec le CGDD<sup>31</sup> (<https://www.cerema.fr/fr/evenements/drones-en-appui-des-territoires>). En outre, j'ai participé à la mise en place d'une formation continue en trois modules sur l'usage des drones pour les territoires labellisée en 2021 par le Cerema. Cette expérience me conduit aujourd'hui à monter des formations continues au niveau international, comme l'atteste la formation inter-ministérielle que j'ai prodiguée à Sao-Tome-et-Principe en mai 2022, dans le cadre du projet WACA<sup>32</sup> (figure 12). Elle m'a enfin conduit à la publication de [47], qui a été l'occasion de réunir des scientifiques français de domaines différents pour réaliser une des premières synthèses de l'emploi des drones pour les risques naturels au niveau international.



FIGURE 12 – Vol de drone dans le cadre de la formation continue sur l'observation du littoral à Sao-Tomé-et-Principe.

31. Commissariat Général au Développement Durable.

32. Formation continue sur l'observation du littoral par drone. WACA est le programme de gestion du littoral ouest Africain.

Tiré-à-part ACL 33 : Geoscientists in the Sky : Unmanned Aerial Vehicles Responding to Geohazards. *Survey in Geophysics*, Rang Q1, IF=6.6

## 4 Projet de recherche

Fort de l'expérience acquise suite à ces travaux ancrés dans la communauté académique et la recherche appliquée, j'envisage les thématiques suivantes afin de continuer à promouvoir l'utilisation conjointe de données optiques, géophysiques et de modélisation à toutes les échelles.

### 4.0.1 Caractérisation physique des milieux

Je souhaite poursuivre mes investigations sur l'origine des anomalies thermiques dans les bassins sédimentaires. Un sujet qui me tient particulièrement à cœur est l'accès à l'eau. A l'échelle mondiale, les eaux souterraines constituent le principal réservoir d'eau douce disponible (96,7 %). Les événements hydro-météorologiques extrêmes associés au changement climatique, telles que les sécheresses et les inondations, deviennent plus fréquents et affectent la disponibilité de l'eau. En conséquence, 38 % de la population mondiale sera exposée au stress hydrique en 2025, contre 9 % en 2008. À l'échelle régionale, l'épuisement des eaux souterraines a de graves répercussions sur la société, l'économie et l'environnement [20]. L'impact de la sécheresse sur les régions (semi-)arides est considérable : accès limité aux eaux souterraines propres, problèmes sanitaires et instabilités sociales notamment pour les aquifères transfrontaliers. En effet, les régions (semi-)arides représentent  $\approx 30$  % de la surface de la Terre où les nappes constituent une ressource importante en eau douce ; faiblement renouvelable car l'apport en eau est souvent très localisé, mais exploitable (e.g., [19]). Le Programme des Nations unies pour le développement (PNUE) prévoit une diminution des précipitations de 5 à 15 % dans la plupart des zones désertiques du monde. Étant donné l'importance croissante de ces ressources en eau spécifiques dans le monde, il est essentiel que tous les efforts soient faits pour trouver, gérer et préserver ces ressources fragiles. Le développement de méthodologies permettant de déterminer la présence de nappe dans ces zones et de suivre son évolution est donc fondamental pour la stabilité des zones arides. Ce projet vise à explorer la présence de la nappe et à étudier son évolution en utilisant une combinaison de données satellitaires, de mesures *in situ* et de modélisation numérique. Nos principales hypothèses de recherche sont les suivantes : 1) les nouvelles avancées dans la recherche satellitaire et les études d'interaction sol-atmosphère montrent qu'une nappe phréatique peut influencer l'hydrologie et le comportement thermique de la surface dans certaines zones arides [36] et 2) étant donné la première hypothèse, la combinaison des mesures *in situ* avec les données satellitaires peut aider à explorer l'aquifère.

Les mesures seront effectuées dans le désert de Badain Jaran (BJD) en Mongolie intérieure (figure 13), qui possède les plus hautes dunes immuables du monde (jusqu'à 400 m) et où la présence d'un système aquifère dans les sédiments sableux du Quaternaire et les grès du Néogène-Crétacé est bien décrite [24]. Cet aquifère s'exprime en surface par la présence de lacs permanents entre les dunes, mais la teneur en eau peut encore être très élevée à une altitude de 100 m sur les dunes. Les fluctuations saisonnières du lac sont inférieures à 0,5 m, en raison de la décharge quasi-stable des eaux souterraines (et probablement d'une alimentation permanente). De nombreux travaux ont été réalisés pour caractériser l'origine des eaux souterraines alimentant les lacs, la connexion hydrologique entre le BJD et le bassin de la rivière Heihe (HRB), la recharge par infiltration et les caractéristiques géochimiques des eaux. Récemment, un effet d'îlot de chaleur a été décrit par [26] sur la région des lacs. Ils proposent que cet excès de chaleur atmosphérique est principalement lié à la chaleur transportée par l'aquifère profond. Les nouvelles observations satellitaires Landsat et ASTER recueillies par notre équipe soutiennent clairement cette hypothèse en révélant la présence d'anomalies thermiques de surface à grande échelle, quotidiennes et saisonnières, sur le BJD, où les régions autour des lacs sont  $\approx 5^\circ\text{C}$  plus chaudes le jour et la nuit (figure 14). Ces observations suggèrent que la nappe phréatique affecte la température du sol. Elles font du BJD un laboratoire original à grande échelle adapté à l'utilisation de données

satellitaires et *in situ* pour étudier le lien entre la nappe phréatique et la surface. Ce projet fait l'objet d'une soumission à l'ANR et fait intervenir l'ENPC (Yu-Jun Cui), l'IGN (Pierre-Louis Frison) et le Cerema (Téodolina Lopez).



FIGURE 13 – Photographie du désert du Badain Jaran avec vue sur les dunes immuables et les lacs permanents (crédit photo ©chinadiscovery.com).

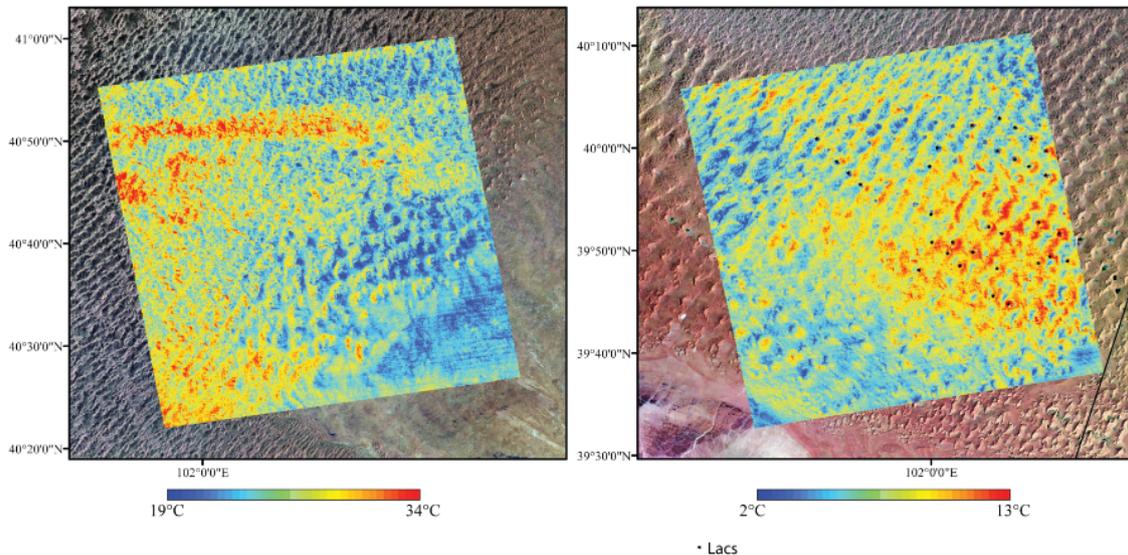


FIGURE 14 – Carte de température de jour et de nuit de la zone désertique du Badain Jaran. Certaines zones sableuses sont chaudes de jour comme de nuit et probablement associées à la nappe présente dans les sables du quaternaire, alimentée par des eaux profondes. Les lacs sont signalés par des étoiles.

Au Sahel, [36] a montré qu'une anomalie thermique peut être générée par des circulations convectives d'eau sous le Lac Tchad du fait de variations spatiales de conductivité thermique dans le bassin sédimentaire et de la présence de topographie dans les couches sédimentaires. Il est aussi bien connu que des anomalies de température

peuvent apparaître juste avant des séismes importants à l'aplomb de certains bassins sédimentaires [14]. Ces anomalies thermiques chaudes pouvant couvrir une superficie allant jusqu'à 100 000 km<sup>2</sup> ont été observées depuis une vingtaine d'années avant des séismes de magnitude supérieure à 5. Nous nous attachons plus particulièrement à étudier les anomalies thermiques qui se sont développées environ 20 jours avant le séisme de Boumerdès qui a touché l'Algérie le 21 Mai 2003 ( $M_w \approx 6,9$ ), comme le montre la figure 15. Le but de l'étude est de comprendre les processus hydro-tectoniques à l'oeuvre pour générer de telles anomalies avant un séisme, en tenant compte du contexte géologique particulier de la région algérienne. En reposant sur les hypothèses déjà existantes, nous proposons que le développement des anomalies thermiques avant le séisme de Boumerdès est induit par un relâchement catastrophique d'eau souterraine vers la surface. Ce relâchement est contrôlé par la combinaison d'un phénomène de compaction des argiles et du cycle de déshydratation-hydratation d'une couche épaisse et profonde d'argile (un mélange de smectite et d'illite) [42]. Cette combinaison de phénomènes provoque des changements dans 1) la perméabilité verticale de la séquence sédimentaire et 2) la quantité d'eau arrivant en surface et apportant de l'énergie par condensation dans la zone. La combinaison originale d'analyse de séries temporelles de température de surface (obtenues par les capteurs thermiques à bord des satellites MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), des données de précipitations (TRMM) et des estimations du stock d'eau continental (GRACE) avec des données géologiques et géophysiques (gravimétrie et tomographie sismique) permettrait de proposer une vision alternative d'un sujet peu étudié jusqu'alors. Ce sujet pourrait avoir un impact fort sur la compréhension de la physique des séismes lents et donc permettre d'améliorer la compréhension 1) de l'évolution des bassins sédimentaires en contexte de compression tectonique et 2) proposer dans le futur un outil de détection pour les très gros séismes à partir des données gratuites américaines telles que les données MODIS mais aussi en reposant sur les nouvelles constellations Copernicus comme les données Sentinel-3, la nouvelle mission TRISHNA et la future mission LSTM (Land Surface Temperature Monitoring). Ces travaux sont réalisés en collaboration avec Téodolina Lopez du Cerema de Toulouse et Michel Rabinowicz du GET.

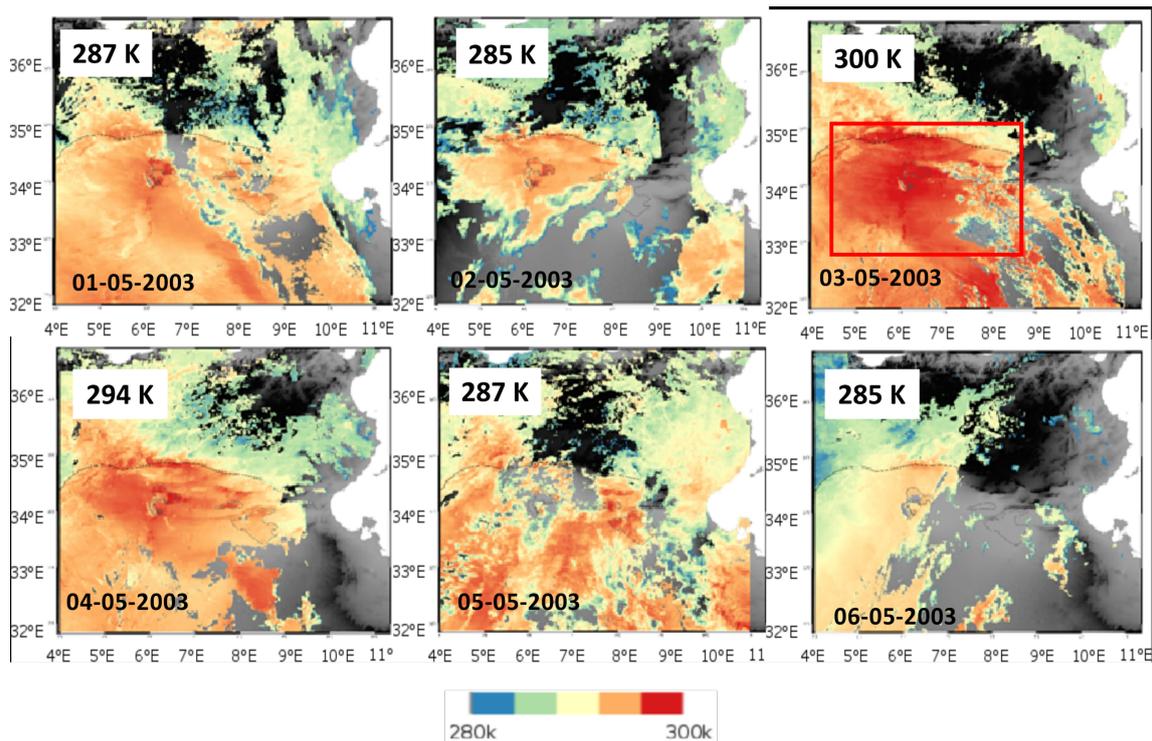


FIGURE 15 – Évolution de la température de nuit quelques jours avant le séisme de Bourmedès qui a eu lieu le 21 mai 2003. Noter le réchauffement important de la zone le 03 mai 2003. L'objectif de ce projet est d'expliquer comment une telle anomalie thermique peut être générée dans une zone aride avant un séisme.

L'eau joue un rôle prépondérant dans l'érosion des falaises. A l'ouest du bassin sédimentaire parisien, les falaises de craie et de marnes de Normandie subissent une ablation continue avec des conséquences pouvant être importante pour le bâti littoral. Si les caractéristiques mécaniques des falaises littorales de Normandie sont connues, les interactions falaises/eaux continentales/eaux marines (dont la connaissance est primordiale pour les études de stabilité) sont moins bien décrites. En particulier, les mécanismes de transfert de l'eau météorique à travers la falaise depuis le plateau limoneux jusqu'au platier carbonaté restent à préciser. Le projet Région Normandie Defhy3geo qui a commencé au 1<sup>er</sup> janvier 2022 vise à établir un modèle hydrologique de certaines falaises de Normandie (badlands littorales des Vaches Noires et falaise de craie de Sainte-Marguerite-sur-Mer) à partir de données optiques, géophysiques, géologiques et la modélisation numérique. Le projet implique un consortium constitué des Laboratoire M2C, IDEES, le LMI et le Cerema. Dans ce cadre, les premiers modèles des Vaches Noires combinant modèle infrarouge (obtenu avant le lever du soleil en hiver) et imagerie électriques 3D (obtenue grâce au code PYLGRIM) ont pu être réalisés, comme le montre la figure 16. Le calcul d'inversion 3D incorporant six profils électriques longitudinaux et transversaux a été fait en donnant plus de poids aux variations verticales de résistivité, ce qui permet de bien décrire le milieu tabulaire composé de marnes, d'argile et de calcaire constituant le glissement des Vaches Noires. Ces résultats montrent bien le lien entre la présence de zones conductrices à l'intérieur de la structure (soulignées par des tirets blancs sur la figure 16) et des sorties d'eau (11-12°C observées en hiver) à deux altitudes différentes sur le glissement. Dans ce cas, l'eau est détectée par la caméra thermique, car la température du sol est proche de 0°C en février. La végétation est de même plus chaude que le sol au petit matin (mais à peu près à la même température que les sorties d'eau), du fait de l'arrêt de l'évapotranspiration pendant la nuit. Ces zones de résurgences sont localisées dans des cassures de pentes de la falaise et sont le lieu de

coulées de boue importantes, dont la mise en place semble à certains moments décorrélée des épisodes de précipitations [56]. Je souhaite m'investir dans la compréhension de la génération de ces coulées de boue, événements qui conditionnent l'érosion du littoral des Vaches Noires et le recul du trait de côte dans cette région. En particulier, le lien entre les écoulements et le comportement rhéologique des marnes (constitué d'argiles et de calcaire) à l'intérieur du plateau en dehors des événements dits saisonniers me paraît intéressant à investiguer. Il est connu que la rhéologie des argiles dépend du volume de liquide interstitiel dans les pores. Lorsque ce volume atteint un certain seuil (appelé seuil de consolidation allant de 26% à 47%, dépendant du type d'argile), les grains ne sont plus en contact, peuvent glisser dans la suspension boueuse et s'écouler au niveau du glissement [42]. Les mécanismes à l'origine de la migration, de la concentration de l'eau et de la séparation de la boue de ces argiles (générées par la compaction) restent à décrire et c'est ce que je veux m'atteler à faire dans les années à venir. Si ce mécanisme est présent dans le plateau, l'extraction de boue devrait alors se traduire par une subsidence locale. Des travaux récents de TU Delph montrent qu'il semble possible de détecter des variations verticales associées au retrait-gonflement des argiles à partir de données InSAR ([17], [22]). Je souhaite donc tester l'apport potentiel de données interférométriques fournies par le satellite Sentinel 1 pour répondre aux questions suivantes 1) Peut-on observer des variations verticales de hauteur saisonnière du plateau du fait de l'humidification/compaction des argiles dans le milieu?; 2) Peut-on détecter des phénomènes de subsidence du fait de l'expulsion de matière à l'intérieur du plateau? et 3) si oui, existe-t-il des phénomènes de subsidence intra-saisonniers non corrélés aux événements pluvieux? Ces données disponibles via l'European Ground Motion Service (<https://egms.land.copernicus.eu/>) seront complétées par des mesures réalisées au GPS et photogrammétriques, des observations infrarouge, des mesures *in situ* de teneur en eau jusqu'à 1 m de profondeur dans le sol, des mesures géophysiques et météorologiques.

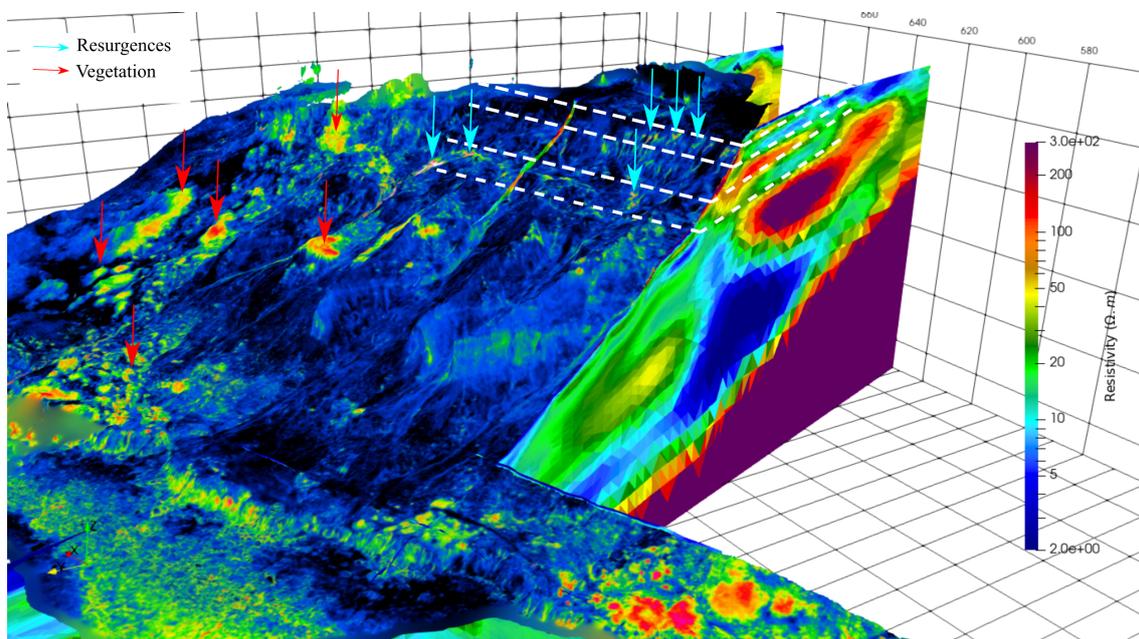


FIGURE 16 – Modèle de température 3D des Vaches Noires obtenu en hiver combiné au résultats d'imagerie électrique pour six profils inversés ensemble. Les flèches rouges et vertes localisent les résurgences d'eau et la végétation, respectivement.

Enfin, à petite échelle, je souhaite continuer à promouvoir l'utilisation de l'infrarouge thermique pour les risques associés aux cavités. Les déstabilisations des cavités souter-

raines constituent un aléa important pour l'aménagement du territoire. En Normandie, des dizaines de milliers de cavités anthropiques (appelées marnières) ont été creusées (au XIXe siècle) pour l'extraction de la craie servant à l'amendement des sols. Celles-ci se distinguent d'autres cavités artificielles par un volume réduit par rapport à leur profondeur (jusqu'à 50 m) et par le fait qu'elles sont souvent oubliées, ignorées ou mal localisées. Les marnières sont reliées à la surface par un puits de diamètre métrique souvent mal rebouché et recouvert de sol agraire (figure 17). L'effondrement de ces objets, souvent brutal et parfois léthal, est un réel problème en Normandie et constitue une préoccupation majeure pour les pouvoirs publics et les citoyens [25]. Leur détection est donc primordiale, en particulier du fait du réchauffement climatique, dont les manifestations de plus en plus fréquentes peuvent accélérer les effondrements. Dans les années 2000, des données thermiques aériennes ont permis de détecter la signature thermique de surface de puits de plusieurs marnières (figure 18), faisant apparaître cette méthode comme prometteuse, mais sans en comprendre les mécanismes à l'origine de ces observations [12].

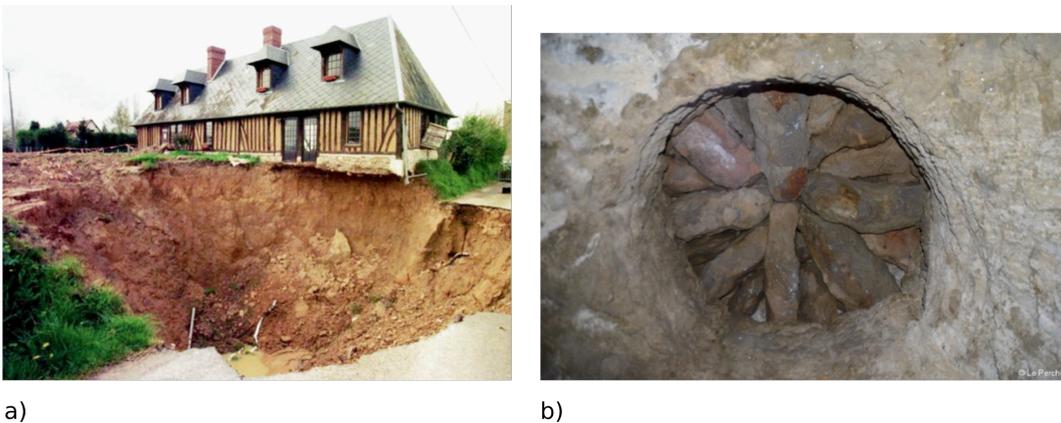


FIGURE 17 – a) Photographie d'un effondrement de marnière en Normandie et b) Photographie d'un puits bouché par des galets prise de l'intérieur de la marnière et montrant une perméabilité très importante.

Les travaux que j'ai menés sur les cavités souterraines à partir de 2015 mettent en évidence le lien potentiel entre températures et déformations de surface [49]. Ces subsidences sont souvent générées à un stade avancé de la migration de la cavité vers la surface [49]. Je souhaite donc me focaliser sur leur détection précoce, en me basant sur la caractérisation quantitative des échanges d'air et d'eau entre les marnières et l'atmosphère. L'objectif est de modéliser les circulations convectives et les transferts de chaleur en 3D dans ces objets pour comprendre comment sont générées les anomalies thermiques observées en surface. Pour un milieu fluide (e.g. vide), le nombre de Rayleigh  $Ra$  donnant la vigueur de la convection est donnée par la formule suivante :

$$Ra = \frac{g\alpha H^3 \Delta T}{\nu \kappa} \quad (1)$$

avec  $g$ , l'accélération de la gravité ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ );  $\alpha$  le coefficient d'expansion thermique du fluide ( $3.7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ );  $H$  la hauteur de la cavité (2 m),  $\Delta T$  la différence de température entre le haut et le bas de la cavité (1 K);  $\nu$  la viscosité du fluide ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$ ) et  $\kappa$  la diffusivité thermique du fluide ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}$ ). Ainsi, en prenant en compte ces valeurs pour une cavité totalement vide, le nombre de Rayleigh  $Ra$  est d'environ  $3 \cdot 10^9$ , donc très largement au dessus du nombre de Rayleigh critique ( $10^3$ ). Cette valeur montre que la convection peut être extrêmement active dans ce milieu avec la création de plusieurs cellules comme l'atteste les résultats obtenus pour la marnière de Barcq (figure 18). La topographie réaliste de la cavité a été obtenue par photogrammétrie avec des photos

acquises par le groupe Risques Naturels du Cerema de Rouen. Il est à noter que cette valeur calculée de  $Ra$  constitue plutôt un maximum pour les modèles, car les marnières intègre un milieu poreux, qui diminue drastiquement ce nombre. Nous comparerons ces modèles aux observations thermiques et géophysiques obtenues sur plusieurs sites en Normandie. La thèse de Georges EDDE qui débutera au dernier trimestre 2022 portera sur cette thématique. La thèse permettra de répondre aux questions suivantes :

- Quelles doivent être les caractéristiques du sol pour que de la convection d'air se déclenche dans des cavités souterraines et interagissent avec l'atmosphère ?
- Comment se font les interactions entre le rayonnement de surface, par définition évolutif, et le système convectif ?
- Quelles sont les anomalies de température générées en surface par ces circulations d'air ?
- Quelles sont les modifications du champ thermique lorsque de l'eau est ajoutée au système ?

Le projet sera réalisé en collaboration avec Ionut Danaila de l'Université de Rouen Normandie. Le code 3D du LMRS écrit en éléments finis est capable de décrire des phénomènes de convection en milieu "fluide" (vide) et en milieu poreux. Il permettra donc de s'adapter aux configurations géologiques complexes rencontrées dans ces marnières. Une collaboration pourra être par ailleurs développée avec le BRGM qui possède des données géophysiques récentes de plusieurs sites en Normandie.

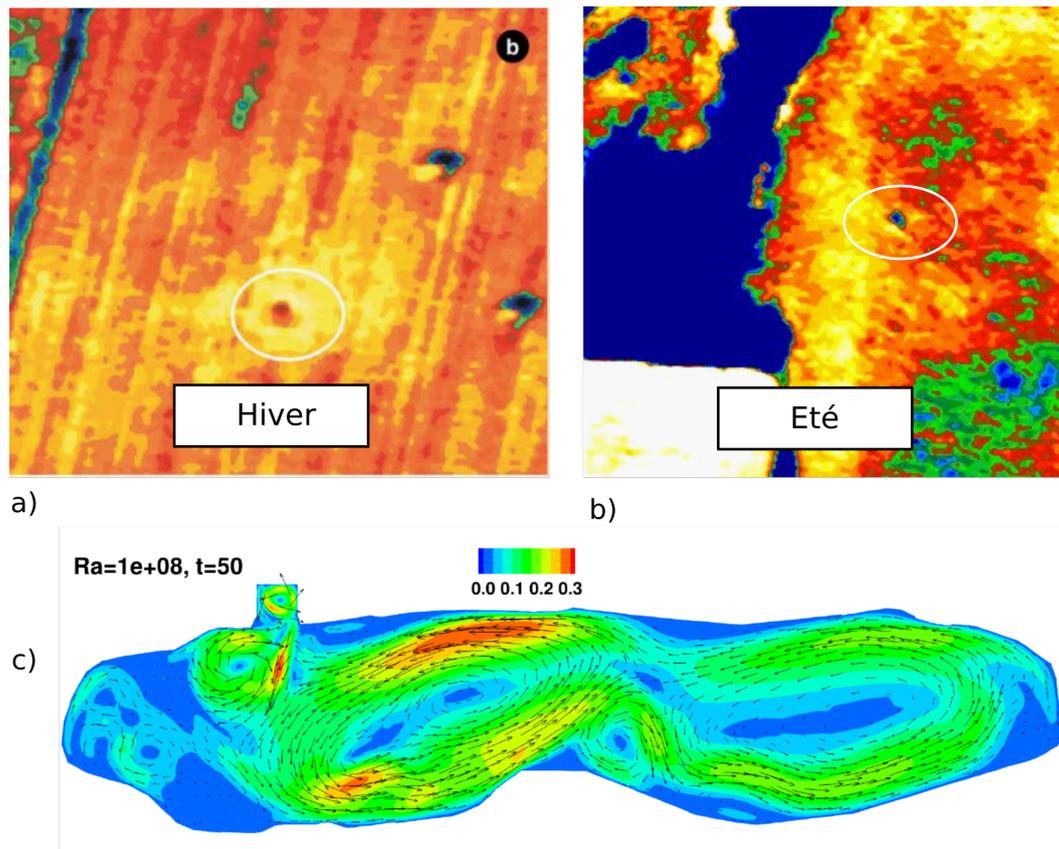


FIGURE 18 – a) Anomalie thermique au droit d'un puits invisible en surface générée en hiver (contraste de 2 à 4°C entre le puits et l'encaissant), b) anomalie thermique induite en été (même type de contraste) et c) Champ de vitesse 2D adimensionné de l'air issu du couplage entre l'équation de Navier-Stokes et de la chaleur pour un nombre de Rayleigh de  $10^8$  sous FreeFEM++. Il montre la formation de plusieurs cellules de convection dans une marnière refroidie par le haut et ayant un puits non bouché (connecté à l'atmosphère). La cavité est la marnière de Barcq. Sa morphologie est réaliste, ayant été obtenue par photogrammétrie. Résultats obtenus pendant le stage de Georges EDDE.

#### 4.0.2 Développement de méthodologie d'observations et de traitement de données

Le développement d'outils de détection des puits de marnières me semble particulièrement primordial pour la région Normandie. La thèse de Georges EDDE se concentrera sur la compréhension du comportement thermique des structures grâce à la modélisation numérique et à la confrontation de ces modèles à des observations thermiques, géologiques et géophysiques (disponibles dans la bibliographie historique des laboratoires des Ponts et Chaussées et plus récemment suite à nos mesures). Elle décrira les configurations optimales géologiques, météorologiques et temporelles favorisant la génération des anomalies thermiques, mettra en exergue les avantages et les limitations de l'infrarouge thermique et finalement permettra de définir les premiers contours d'une méthodologie de détection. Il n'existe en ce moment aucune méthode à grand rendement capable de détecter ces petits objets, notamment en contexte de couverture argileuse. La micro-gravimétrie, seul outil capable de détecter des défauts de masse dans les sols a certes fait de gros progrès (sensibilité multipliée par 10 en 20 ans), mais elle n'est pas adaptée pour le grand rendement du fait des temps d'acquisition longs en chaque point. Le drone (et l'avion) sont des outils capables de faire du grand rendement (10 min/Ha pour le drone) et permettent de plus l'emport de plusieurs capteurs complémentaires.

Même si la thèse menait à une capacité de détection de 10 % à 20 % des marnières grâce à l'infrarouge thermique, cela constituerait une avancée considérable et un vivier de plusieurs dizaines de milliers de cavités à traiter. Enfin, les résultats obtenus dans ce cadre pourront servir à d'autres types de cavités comme les catiches du Nord de la France, les carrières possédant des fontis ou même les dolines naturelles interagissant avec l'atmosphère.

La détection visuelle de singularités thermiques, qu'elles soient associées à des puits de cavités souterraines ou à des circulations d'eau est très fastidieuse, sinon impossible à réaliser lorsque l'on parcourt des surfaces importantes. Dans toutes nos études, la détection de ces signaux nécessite l'intervention humaine, en comparant données acquises dans l'infrarouge, le visible et des observations météorologiques. Elle requiert souvent une analyse dynamique (saisonnnière et/ou journalière) afin de détecter l'anomalie à proprement dit. Dans les prochaines années, je souhaite m'investir dans la détection de ces signaux à partir de méthodologies de classification automatiques. Les falaises des Vaches Noires constituent un terrain de jeu idéal pour tester différentes méthodes de détection des résurgences d'eau. Un premier stage réalisé en 2021 en collaboration avec Philippe Foucher (Endsum Strasbourg) a permis de montrer qu'il est tout à fait possible de détecter automatiquement les anomalies thermiques associées aux sorties d'eau sans végétation présentées sur la figure 16. Cette détection se base sur le fait que les sorties d'eau et la végétation sont chauds par rapport au sol en hiver. L'orthoimage thermique possède donc deux classes qui sont les zones chaudes et froides. Pour supprimer la contribution thermique de la végétation et ne détecter que les sorties d'eau, on effectue une classification de la végétation et du sol nu sur les données visibles (obtenue à partir du nuage de point dense). La soustraction des deux orthoimages classifiées fournit alors la localisation des résurgences d'eau, comme le montre la figure 19.

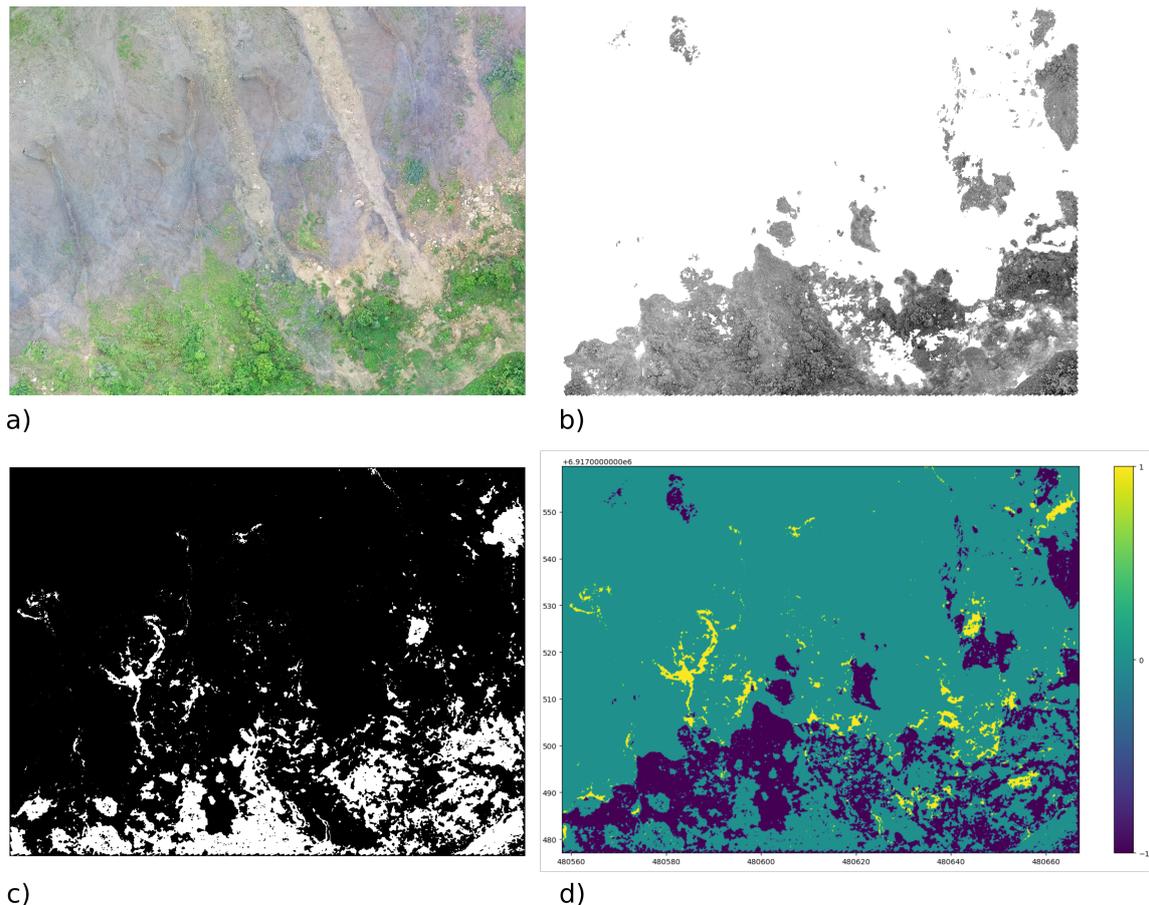


FIGURE 19 – a) orthoimage visible d'une zone des Vaches Noires ; b) classification de la végétation sur l'orthoimage visible ; c) orthoimage binarisée montrant les zones chaudes et froides sur l'orthoimage thermique et d) résultat de la soustraction entre les orthoimages thermiques et visible classifiées. Le chiffre 1 (jaune) signifie qu'on a de l'eau chaude s'écoulant sur un sol nu ; le chiffre 0 (vert) signifie que la végétation est chaude ou que le sol nu est froid et le chiffre -1 (violet) signifie qu'une partie de la végétation est froide. La détection se fait donc grâce à la localisation de la valeur 1.

#### 4.0.3 Développement de prototypes et de moyen de recueil de données

Si les caméras sont classiquement utilisées sur les drones, j'envisage pour les années à venir de m'investir dans l'emploi de l'imagerie géophysique embarquée. Le matériel géophysique est par définition relativement fastidieux à mettre en oeuvre notamment dans les zones avec de la topographie marquée. Par conséquent, les observations géophysiques réalisées grâce à un drone obéissant à un plan de vol automatisé sont en plein développement et prennent de l'ampleur. Les méthodes magnétiques [28], électromagnétiques basse fréquence [23] et géoradar [30] sont maintenant commercialisées sur ces systèmes et de nouvelles méthodologies comme la gravimétrie quantique embarquée sont en cours de développement [29]. Dans le cadre de Defhy3geo, j'ai fait l'acquisition d'un radar géologique embarqué possédant trois fréquences (75 MHz, 120 MHz, 200 MHz) et présenté sur la figure 20. Celui-ci est couplé à un système d'asservissement laser maintenant le drone à une hauteur constante par rapport au sol, ce qui facilite le traitement de l'arrivée directe de l'onde dans l'air. Cette combinaison d'outils permettra de réaliser des mesures radar dans des environnements inaccessibles pour un opérateur. Elle ouvrira une nouvelle voie de recherche exploitant ce type de données dans des environnements divers (infrastructures, piles de ponts, digues, etc...) et apportera

son lot de nouvelles méthodologies pour les équipes opérationnelles du Cerema. Nous prévoyons par exemple des essais de faisabilité au droit des falaises verticales de craie de Sainte-Marguerite-sur-Mer qui font entre dix et vingt mètres de hauteur. La profondeur d'investigation pour un tel matériau avoisine les dix mètres de profondeur. Dans le cas de ce type de scans verticaux, un des challenges majeurs réside dans le fait de localiser correctement la mesure sur la paroi. C'est l'objectif de la thèse de Diego Navarro démarrée fin 2021 dans le cadre du Défi INRIA-Cerema en collaboration avec Ezio Malis de l'équipe ACENTAURI de l'INRIA. Celle-ci permettra de fournir une méthodologie de positionnement du drone et de la mesure (notamment lorsque les données GPS sont manquantes) grâce à la fusion de données multi-modales issues 1) de la centrale inertielle de navigation (IMU) permettant d'avoir les accélérations de l'appareil ; 2) d'une ou plusieurs caméras par odométrie visuelle et 3) d'un LiDAR grâce à la technique du Simultaneous Localisation and Mapping - SLAM). Les résultats de cette thèse permettront d'envisager à l'avenir des investigations géophysiques sur parois d'ouvrages (piles de ponts par exemple) jusqu'ici très difficiles à exécuter et finalement d'enrichir le diagnostic de ces objets.



FIGURE 20 – Photographie du nouveau drone DJI M300 RTK embarquant un radar RADSYS Zond Aero Low Frequency disponible à ENDSUM Rouen (crédits photo UGCS).

#### 4.0.4 Perspectives stratégiques et scientifiques

Ce mémoire présente mon parcours académique et de recherche. Il montre comment j'ai adapté les connaissances acquises à l'environnement de travail du Cerema qui possède une forte spécificité appliquée. Il montre aussi finalement les fortes interactions entre tous mes domaines d'études et c'est ce qui explique mon intérêt pour toutes les échelles d'observations et la pluri-disciplinarité depuis le début de ma carrière. Ma pluri-disciplinarité s'est forgée grâce à un réseau solide de laboratoires et d'écoles que j'ai su développé et pérenniser depuis mon recrutement. Ces expériences m'ont permis d'intégrer de nombreux projets de recherche nationaux et internationaux permettant des investissements importants, de me former à de nouvelles techniques ou de travailler avec de jeunes chercheurs. Cette implication se concrétise par des publications de rang A, une stabilité de l'équipe et de ses personnels permanents et par une attracti-

tivité croissante pour des chercheurs de disciplines différentes (origines des doctorant(e)s et postdoctorant(e)s variée e.g. géophysiciens, géologues, automaticiens et mathématiciens). L'obtention de l'HDR me permettra de m'impliquer dans des directions de thèses et de rayonner plus largement au niveau national/international. Ce diplôme sera par ailleurs une grande reconnaissance de mon travail et de ma persévérance qui me permet aujourd'hui de présenter un dossier équilibré entre production scientifique, activité d'encadrement/formation, de valorisation et collective. La création de l'équipe ENDSUM est le fruit d'un travail en commun que peu de chercheurs de ma génération vivent. Cet exercice à la fois exigeant et motivant doit permettre de pérenniser l'équipe et ses thématiques de recherche, tout en offrant un cadre de travail adéquat aux jeunes chercheurs et aux personnels permanents. Je souhaite que l'obtention de l'HDR puisse contribuer à son renforcement et à son développement dans les années à venir.

Du point de vue scientifique, mes études montrent bien que les échanges sol-atmosphère sont rencontrés dans divers contextes géologiques (et même planétaires) et peuvent être caractérisés en utilisant les outils que je développe depuis une dizaine d'années. Ces échanges influencent de façon fondamentale la couche limite atmosphérique via les transferts hydriques et thermiques, ce qui affecte la circulation atmosphérique. Ces interactions jouent donc un rôle important dans la modélisation météorologique. Dans les années à venir, je souhaite porter cette thématique et les enseignements issus de mes travaux au niveau international. Cette activité pourrait prendre la forme de la création d'un groupement de recherche rassemblant les acteurs de différents domaines disciplinaires (géologues, géophysiciens, atmosphériciens...) et travaillant sur la compréhension, la modélisation et la prédiction des interactions sol-atmosphère en lien avec les phénomènes météorologiques.

## Références

- [1] M. E. CHASE, « Airborne remote sensing for groundwater studies in Prairie environment, » *Canadian Journal of Earth Sciences*, t. 6, n° 4, p. 737-741, 1969. DOI : [10.1139/e69-068](https://doi.org/10.1139/e69-068). adresse : <https://doi.org/10.1139/e69-068>.
- [2] P. WIERENGA, R. M. HAGAN et D. NIELSEN, « Soil temperature profiles during infiltration and redistribution of cool and warm irrigation water, » *Water Resources Research*, t. 6, n° 1, p. 230-238, 1970.
- [3] K. CARTWRIGHT, « Tracing shallow groundwater systems by soil temperatures, » *Water Resources Research*, t. 10, n° 4, p. 847-855, 1974. DOI : <https://doi.org/10.1029/WR010i004p00847>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/WR010i004p00847>. adresse : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR010i004p00847>.
- [4] C. D. WHITEMAN, K. J. ALLWINE, L. J. FRITSCHEN, M. M. ORGILL et J. R. SIMPSON, « Deep valley radiation and surface energy budget microclimates. Part I : Radiation, » *Journal of applied meteorology and climatology*, t. 28, n° 6, p. 414-426, 1989.
- [5] R. DUBAYAH et V. VAN KATWIJK, « The topographic distribution of annual incoming solar radiation in the Rio Grande river basin, » *Geophysical Research Letters*, t. 19, n° 22, p. 2231-2234, 1992.
- [6] B. ROSS, S. AMTER et N. LU, « Numerical studies of rock-gas flow in Yucca Mountain, » Sandia National Labs., rapp. tech., 1992.
- [7] A. ROSE et W. GUO, « Thermal convection of soil air on hillsides, » *Environmental Geology*, t. 25, n° 4, p. 258-262, 1995.
- [8] N. LU, Y. ZHANG et B. ROSS, « Onset of gas convection in a moist porous layer with the top boundary open to the atmosphere, » *International Communications in Heat and Mass Transfer*, t. 26, n° 1, p. 33-44, 1999, ISSN : 0735-1933. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(98\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(98)00119-5). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193398001195>.
- [9] S. OHSAWA, Y. YUSA, K. OUE et K. AMITA, « Entrainment of atmospheric air into the volcanic system during the 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Japan, » *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, t. 96, n° 1, p. 33-43, 2000, ISSN : 0377-0273. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00134-1). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027399001341>.
- [10] E. P. WEEKS, « Effect of topography on gas flow in unsaturated fractured rock : Concepts and observations, » *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, t. 42, p. 53-59, jan. 2001. DOI : [10.1029/GM042p0053](https://doi.org/10.1029/GM042p0053).
- [11] M. LEBLANC, M. RAZACK, D. DAGORNE, L. MOFOR et C. JONES, « Application of Meteosat thermal data to map soil infiltrability in the central part of the Lake Chad basin, Africa., » *Geophysical Research Letters*, t. 30, n° 19, 2003. DOI : <https://doi.org/10.1029/2003GL018094>.
- [12] C. FAUCHARD, P. POTHÉRAT, P. CÔTE et M. MUDET, « Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques., » Laboratoire Central des Ponts et Chaussées., rapp. tech., 2004.
- [13] R. DELALOYE et C. LAMBIEL, « Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps), » *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, t. 59, n° 2, p. 194-203, 2005.
- [14] S. PANDA, S. CHOUDHURY, A. K. SARAF et J. D. DAS, « MODIS land surface temperature data detects thermal anomaly preceding 8 October 2005 Kashmir earthquake, » *International Journal of Remote Sensing*, t. 28, n° 20, p. 4587-4596, 2007.

- [15] P. REIFFSTECK, B. DORBANI, E. HAZA-ROZIER et J. J. FRY, « A new hydraulic profiling tool including cpt measurements, » in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)*, 2010.
- [16] T. SCHUETZ et M. WEILER, « Quantification of localized groundwater inflow into streams using ground-based infrared thermography, » *Geophysical Research Letters*, t. 38, n° 3, 2011. DOI : <https://doi.org/10.1029/2010GL046198>.
- [17] B. t. BRAKE, R. F. HANSSSEN, M. J. van der PLOEG et G. H. de ROOIJ, « Satellite-based radar interferometry to estimate large-scale soil water depletion from clay shrinkage : Possibilities and limitations, » *Vadose Zone Journal*, t. 12, n° 3, p. 1-13, 2013.
- [18] X. KUANG, J. J. JIAO et H. LI, « Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings, » *Water Resources Research*, t. 49, n° 10, p. 6137-6165, 2013. DOI : <https://doi.org/10.1002/wrcr.20416>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wrcr.20416>. adresse : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wrcr.20416>.
- [19] J. MARGAT et J. VAN DER GUN, *Groundwater around the world : a geographic synopsis*. Crc Press, 2013.
- [20] J. S. FAMIGLIETTI, « The global groundwater crisis, » *Nature Climate Change*, t. 4, n° 11, p. 945-948, 2014.
- [21] G. E. CUSHING, C. H. OKUBO et T. N. TITUS, « Atypical pit craters on Mars : New insights from THEMIS, CTX, and HiRISE observations, » *Journal of Geophysical Research : Planets*, t. 120, n° 6, p. 1023-1043, 2015. DOI : <https://doi.org/10.1002/2014JE004735>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014JE004735>. adresse : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JE004735>.
- [22] B. te BRAKE, *Estimation of soil water storage change from clay shrinkage using satellite radar interferometry*. Wageningen University et Research, 2017.
- [23] R. ERÖSS, B. TEZKAN, J. B. STOLL et R. BERGERS, « Interpretation of Very Low Frequency Measurements Carried Out with an Unmanned Aerial System by 2D Conductivity Models, » *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, t. 22, n° 1, p. 83-94, 2017. DOI : [10.2113/JEEG22.1.83](https://doi.org/10.2113/JEEG22.1.83). adresse : <https://doi.org/10.2113/JEEG22.1.83>.
- [24] X.-S. WANG et Y. ZHOU, « Investigating the mysteries of groundwater in the Badain Jaran Desert, China, » *Hydrogeology Journal*, t. 26, n° 5, p. 1639-1655, 2018.
- [25] P. GUIGNARD et J.-P. MORETAU, « La gestion des risques engendrés par les marnières abandonnées., » Commissariat Général au Développement Durable., rapp. tech., 2020.
- [26] X. LIANG, L. ZHAO, Z. NIU, X. XU, N. MENG et N. WANG, « Warm Island Effect in the Badain Jaran Desert Lake Group Region Inferred from the Accumulated Temperature, » *Atmosphere*, t. 11, n° 2, p. 153, 2020.
- [27] Á. TÓTH, A. GALSA et J. MÁDL-SZÓNYI, « Significance of basin asymmetry and regional groundwater flow conditions in preliminary geothermal potential assessment – Implications on extensional geothermal plays, » *Global and Planetary Change*, t. 195, p. 103344, 2020, ISSN : 0921-8181. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103344>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818120302356>.
- [28] L. GAILLER, P. LABAZUY, E. RÉGIS et al., « Validation of a new UAV magnetic prospecting tool for volcano monitoring and geohazard assessment, » *Remote Sensing*, t. 13, n° 5, p. 894, 2021.

- [29] L. EARL, J. VOVROSH, M. WRIGHT et al., « Demonstration of a Compact Magneto-Optical Trap on an Unstaffed Aerial Vehicle, » *Atoms*, t. 10, n° 1, 2022, ISSN : 2218-2004. DOI : [10.3390/atoms10010032](https://doi.org/10.3390/atoms10010032). adresse : <https://www.mdpi.com/2218-2004/10/1/32>.
- [30] J. KARUŠS, K. LAMSTERS, J. JEŠKINS, I. SOBOTA et P. DŽERIŃŠ, « UAV and GPR Data Integration in Glacier Geometry Reconstruction : A Case Study from Irene-breen, Svalbard, » *Remote Sensing*, t. 14, n° 3, p. 456, 2022.

## Articles dans des revues à comité de lecture répertoriés

- [31] R. ANTOINE, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ et al., « Thermal infrared image analysis of a quiescent cone on Piton de la Fournaise volcano : Evidence of convective air flow within an unconsolidated soil, » *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, t. 183, n° 3-4, p. 228-244, 2009. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.12.003>.
- [32] R. ANTOINE, T. LOPEZ, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ et K. KURITA, « Thermal analysis of fractures at Cerberus Fossae, Mars : Detection of air convection in the porous debris apron, » *Icarus*, t. 214, n° 2, p. 433-446, 2011. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.12.025>.
- [33] T. LOPEZ, R. ANTOINE, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ, K. KURITA et L. D'USTON, « Thermal anomalies on pit craters and sinuous rilles of Arsia Mons : Possible signatures of atmospheric gas circulation in the volcano, » *Journal of Geophysical Research : Planets*, t. 117, n° E9, 2012. DOI : <https://doi.org/10.1029/2012JE004050>.
- [34] C. FAUCHARD, R. ANTOINE, F. BRETAR et al., « Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods : Application to the Pont De Coq, France, » *Journal of Applied Geophysics*, t. 98, p. 100-112, 2013. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.009>.
- [35] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, Y. FARGIER et E. DURAND, « Detection of leakage areas in an earth embankment from GPR measurements and permeability logging, » *International Journal of Geophysics*, t. 2015, 2015. DOI : <https://doi.org/10.1155/2015/610172>.
- [36] T. LOPEZ, R. ANTOINE, Y. KERR et al., « Subsurface hydrology of the Lake Chad Basin from convection modelling and observations, » *Remote Sensing and Water Resources*, p. 281-312, 2016. DOI : [10.1007/s10712-016-9363-5](https://doi.org/10.1007/s10712-016-9363-5).
- [37] A. D. SALEY, A. JARDANI, A. S. AHMED, R. ANTOINE et J.-P. DUPONT, « Hamiltonian Monte Carlo algorithm for the characterization of hydraulic conductivity from the heat tracing data, » *Advances in Water Resources*, t. 97, p. 120-129, 2016. DOI : [10.1016/j.advwatres.2016.09.004](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.09.004).
- [38] R. ANTOINE, A. FINIZOLA, T. LOPEZ et al., « Electric potential anomaly induced by humid air convection within Piton de La Fournaise volcano, La Réunion Island, » *Geothermics*, t. 65, p. 81-98, 2017. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.003>.
- [39] Y. FARGIER, R. ANTOINE, L. DORE, S. P. LOPES et C. FAUCHARD, « 3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods, » *Geophysics*, t. 82, n° 4, E143-E153, 2017. DOI : <https://doi.org/10.1190/geo2016-0274.1>.
- [40] G. BERGER, D. BEAUFORT et R. ANTOINE, « Clay minerals related to the late magmatic activity of the Piton des Neiges (Réunion Island) : consequence for the primitive crusts, » *Clay Minerals*, t. 53, n° 4, p. 675-690, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1180/clm.2018.51>.

- [41] C. FAUCHARD, A. D. SALEY, C. CAMERLYNCK, Y. FARGIER, R. ANTOINE et P.-F. THÉRAIN, « Discovery of the Romanesque church of the Abbey of our lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods, » *Archaeological Prospection*, t. 25, n° 4, p. 315-328, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1002/arp.1711>.
- [42] T. LOPEZ, R. ANTOINE, J. DARROZES, M. RABINOWICZ et D. BARATOUX, « Development and evolution of the size of polygonal fracture systems during fluid-solid separation in clay-rich deposits, » *Journal of Earth Science*, t. 29, n° 6, p. 1319-1334, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0814-9>.
- [43] T. LOPEZ, G. RAMILLIEN, R. ANTOINE, J. DARROZES, Y.-J. CUI et Y. KERR, « Investigation of short-term evolution of soil characteristics over the Lake Chad basin using GRACE data, » *Remote Sensing*, t. 10, n° 6, p. 924, 2018. DOI : <https://doi.org/10.3390/rs10060924>.
- [44] M. MEDJKANE, O. MAQUAIRE, S. COSTA et al., « High-resolution monitoring of complex coastal morphology changes : Cross-efficiency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires cliffs, Normandy, France), » *Landslides*, t. 15, n° 6, p. 1097-1108, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0942-4>.
- [45] C. MEZON, V. MOURZENKO, J.-F. THOVERT et al., « Thermal convection in three-dimensional fractured porous media, » *Physical Review E*, t. 97, n° 1, p. 013 106, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.013106>.
- [46] S. COSTA, O. MAQUAIRE, P. LETORTU et al., « Sedimentary Coastal cliffs of Normandy : modalities and quantification of retreat, » *Journal of Coastal Research*, t. 88, n° SI, p. 46-60, 2019. DOI : <https://doi.org/10.2112/SI88-005.1>.
- [47] R. ANTOINE, T. LOPEZ, M. TANGUY et al., « Geoscientists in the sky : unmanned aerial vehicles responding to geohazards, » *Surveys in Geophysics*, t. 41, n° 6, p. 1285-1321, 2020. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09611-7>.
- [48] R. ANTOINE, I. CIOTIR, S. COSTA et al., « Coastline Erosion Study via UAV Drone Remote Sensing Using Python Modelling Electrical Resistivity Imaging (PyMERI), » in *IGARSS 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2020, p. 441-444. DOI : [10.1109/IGARSS39084.2020.9323414](https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323414).
- [49] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, J.-F. OEHLER et P. JOIGNANT, « Permeability and voids influence on the thermal signal, as inferred by multitemporal UAV-based infrared and visible images, » *Journal of Hydrology*, t. 587, p. 124 907, 2020. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124907>.
- [50] V. GUILBERT, R. ANTOINE, C. HEINKELE et al., « Fusion of thermal and visible point clouds : Application to the Vaches Noires landslide, Normandy, France, » *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, t. 43, p. 227-232, 2020. DOI : <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-227-2020>.
- [51] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, V. GUILBERT et al., « Geophysical and Uav-Based Observations Over a Flood Defense Structure : Application to the POLDER2C'S Experimental Dike, » *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, t. 43, p. 237-242, 2021. DOI : [10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-237-2021](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-237-2021).
- [52] I. HASSEN, C. FAUCHARD, R. ANTOINE et al., « 3D geological modelling of a coastal area : case study of the Vaches Noires Cliffs, Normandy, France, » *Bull Eng Geol Environ*, t. 80, n° 2, p. 1375-1388, 2021. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01955-z>.
- [53] J. MARIÑO, K. CUEVA, J.-C. THOURET et al., « Multidisciplinary Study of the Impacts of the 1600 CE Huaynaputina Eruption and a Project for Geosites and Geo-touristic Attractions, » *Geoheritage*, t. 13, n° 3, p. 1-29, 2021. DOI : <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00577-5>.

- [54] C. FAUCHARD, V. GUILBERT, R. ANTOINE et al., « Diachronic study of coastal badlands with UAV and geophysical methods in the context of accelerated erosion processes, » *Accepté dans la revue Landslide*, 2022.
- [55] P. LETORTU, N. LE DANTEC, E. AUGEREAU et al., « Experimental field study on the fatigue and failure mechanisms of coastal chalk cliffs : Implementation of a multi-parameter monitoring system (Sainte-Marguerite-sur-Mer, France), » *Geomorphology*, p. 108211, 2022, ISSN : 0169-555X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108211>.
- [56] T. ROULLAND, O. MAQUAIRE, S. COSTA et al., « Seasonal activity quantification of coast badlands by TLS monitoring over five years at the "Vaches Noires" cliffs (Normandy, France), » *Geomorphology*, p. 108083, 2022. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108083>.
- [57] W. SONG, T. LOPEZ, Y.-J. CUI et R. ANTOINE, « Investigation on the relationship between ground clay particle distribution and microclimate in the Lake Chad zone using satellite data and climate reanalysis, » *To be submitted to Journal of Hydrology*, 2022.
- [58] A. TONNOIR, Y. FARGIER, R. ANTOINE et C. FAUCHARD, « PyLGRIM : Modelling 3D-ERI with infinite elements in complex topography context, » *To be submitted to Geophysical Journal International*, 2022.

## Articles dans des revues à comité de lecture non répertoriés

- [59] M. GUYOT, P.-F. THÉRAIN, R. ANTOINE et C. MAISONNAVE, *Ménéval, Saumont-la-Poterie-Le Pont de Coq. Fouille programmée (2014)*, 2021.

## Chapitres d'ouvrage

- [60] C. FAUCHARD, J. LACOGNE et R. ANTOINE, « De l'utilisation de mesures géophysiques pour connaître un site, » in *Le pont de Coq : histoires d'une restauration*, P.-F. T. et l'Association de SAUVEGARDE DU PONT DE COQ, éd., Rouen : Éditions Point de vues, DL 2017, 2017, chap. 10, p. 79-91.
- [61] R. ANTOINE et T. LOPEZ, « Télédétection dans l'infrarouge thermique, » in *Manuel de mécanique des roches tome 5-Thermomécanique des roches*, M. GASC, V. MERRIEN-SOUKATCOFF et P. BERREST, éd., Presses de l'école des Mines, 2018, chap. 10, p. 266-290.

## Conférences internationales

- [62] R. ANTOINE, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ et al., « Convective Gas Flow in Terrestrial and Martian Volcanic Soils : Implications for the Interpretation of THEMIS-IR Data, » in *Seventh International Conference on Mars*, t. 1353, 2007, p. 3097.
- [63] R. ANTOINE, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ et al., « Thermography of volcanic areas on Piton de la Fournaise, Reunion Island : Mapping surface properties and possible detection of convective air flow within volcanic debris, » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2007, 2007, p. V11D-0813.
- [64] T. LOPEZ, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ, R. ANTOINE, F. AYOUB et L. D'USTON, « What Does Control the Thermal Behaviour of the Pits Near Arsia Mons? » in *Lunar and Planetary Science Conference*, 2009, p. 1912.

- [65] R. ANTOINE, T. L. GONZALEZ, D. BARATOUX et al., « Abnormally high night temperatures in pit craters and collapsed sinuous rilles on Arsia Mons' flanks. Interpretations in terms of subsurface air circulation along slopes., » in *EGU General Assembly 2010*, 2010.
- [66] R. ANTOINE et K. KURITA, « Thermal plumes and electric potentials generation in a porous medium locally heated from below, » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2010, 2010, V21E-2357.
- [67] T. LOPEZ GONZALEZ, D. BARATOUX, M. RABINOWICZ, R. ANTOINE, F. AYOUB et L. D'USTON, « Abnormally high night temperatures in pit craters and collapsed sinuous rilles on Arsia Mons' flanks. Interpretations in terms of subsurface air circulation along slopes., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2010, p. 6640.
- [68] R. ANTOINE et C. FAUCHARD, « Revealing the hidden structures of an historical bridge by high resolution geophysical methods : A case study of Pont de Coq, France, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2012, p. 12 781.
- [69] R. ANTOINE, N. GESHI, K. KURITA et al., « Air-cooled volcanoes? New insights on convective airflow process within Miyakejima and Piton de la Fournaise volcanoes, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2012, p. 11 421.
- [70] T. LOPEZ, D. BARATOUX, R. ANTOINE et al., « Formation of Mud Volcanoes, Giant Polygons and Chaotic Terrains on Mars as the Result of Compaction and Convection of Thick Altered Pyroclastic Deposit, » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2013, 2013, p. V53C-2815.
- [71] R. ANTOINE, D. BARATOUX, J. LACOGNE et al., « First 3D thermal mapping of an active volcano using an advanced photogrammetric method, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2014, p. 14 597.
- [72] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, B. BEAUCAMP et V. GUILBERT, « Using a new multichannel GPR and ERT method for high resolution archaeological mapping : application to a buried Gallo-Roman site in Normandy, France, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2014, p. 14 067.
- [73] R. DUVAL, C. FAUCHARD et R. ANTOINE, « Topographic effect on Radio-Magnetotelluric and Slingram signals : application to a levee along the Loire river, France., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2014, p. 14 861.
- [74] A. FINIZOLA, T. RICCI, M. PORET et al., « Fluid circulation at Somma-Vesuvius volcanic complex inferred by electrical resistivity tomography, self-potential, temperature and soil degassing, » in *MED-SUV 1th year meeting, Nicolosi (catania)*, 2014, p. 7-9.
- [75] P. GENTHON, T. LOPEZ, R. ANTOINE et al., « Detection of Groundwater from Space-Based IR Data : Application to the Lake Chad Basin., » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2014, 2014, H43C-0975.
- [76] T. LOPEZ, R. ANTOINE, P. GENTHON et al., « Detection of groundwater from space-based IR data : application to the Lake Chad basin., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2014, p. 9976.
- [77] T. LOPEZ, D. BARATOUX, R. ANTOINE et al., « Formation of mud volcanoes, giant polygons and chaotic terrains on Mars as the result of compaction and convection of altered pyroclastic deposits., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2014, p. 10 260.
- [78] P. ADLER, C. MEZON, V. MOURZENKO, J. THOVERT, R. ANTOINE et A. FINIZOLA, « Natural thermal convection in fractured porous media, » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2015, 2015, H21L-04.

- [79] Y. FARGIER, L. DORE, R. ANTOINE et al., « Contribution of SFM and ERI Methods to Assess an Underground Quarry Pillar, » in *Near Surface Geoscience 2015-21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, European Association of Geoscientists & Engineers, t. 2015, 2015, p. 1-5.
- [80] T. LOPEZ, R. ANTOINE, M. RABINOWICZ et al., « Formation of polygonal fault systems as a result of hydrodynamical instabilities in clay-rich deposits., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2015, p. 11 637.
- [81] C. MEZON, V. MOURZENKO, J.-F. THOVERT, R. ANTOINE, A. FINIZOLA et P. M. ADLER, « Natural thermal convection in fractured porous media, » in *2015 AGU Fall Meeting*, 2015.
- [82] F. ANTHONY, R. TULLIO, D. ERIC et al., « The summit part of Mount Etna revealed by High Resolution DC Electrical Resistivity Tomography coupled with complementary geophysical and soil gas techniques, » in *MED-SUV Final Meeting*, 2016.
- [83] S. ARAUJO, L. DELBREILH, R. ANTOINE, E. DARGENT et C. FAUCHARD, « Study of the dielectric properties of weathered granite, basalt and quartzite by means of broadband dielectric spectroscopy over a wide range of frequency and temperature., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2016, EPSC2016-14 232.
- [84] Y. FARGIER, L. DORE, R. ANTOINE, S. PALMA LOPES et C. FAUCHARD, « Combination of photogrammetric and geoelectric methods to assess 3d structures associated to natural hazards, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2016, EPSC2016-8628.
- [85] A. FINIZOLA, T. RICCI, R. ANTOINE et al., « The summit part of Mount Etna revealed by High Resolution DC Electrical Resistivity Tomography coupled with complementary geophysical and soil gas techniques, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2016, EPSC2016-12 963.
- [86] C. MEZON, V. MOURZENKO, J. FRANÇOIS THOVERT et al., « 3D convection in a fractured porous medium : influence of fracture network parameters and comparison to homogeneous approach., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2016, EPSC2016-4561.
- [87] R. TULLIO, G. MARCEAU, V. JEAN et al., « Hydrothermal fluid flow structures at Solfataro volcano, Somma-Vesuvius volcanic complex and Mt. Etna., » in *MED-SUV Final Meeting*, 2016.
- [88] L. DORE, Y. FARGIER, S. PALMA-LOPES, R. ANTOINE et C. FAUCHARD, « Contribution of ERI, Photogrammetry and Surface Resistivity Probe Methods for Assessing an Underground Mine Pillar, » in *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, European Association of Geoscientists & Engineers, t. 2017, 2017, p. 1-5.
- [89] A. JARDANI, A. SOUEID AHMED, A. RAPHAEL, J. P. DUPONT et al., « Hamiltonian Monte Carlo algorithm for the characterization of hydraulic conductivity from the heat tracing data, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, p. 9138.
- [90] T. LOPEZ, R. ANTOINE, D. BARATOUX et M. RABINOWICZ, « Contribution of thermal infrared images on the understanding of the subsurface/atmosphere exchanges on Earth., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, p. 11 811.
- [91] T. LOPEZ, G. RAMILLIEN, R. ANTOINE et M. RABINOWICZ, « Influence of the surface permeability on the GRACE water mass variations. Case of the Lake Chad basin., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, p. 11 769.
- [92] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, J.-F. OEHLER et P. JOIGNANT, « Characterising the surface temperatures and the deformations of a civil engineering structure by drone : application to a harbor dock, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2018, p. 14 342.

- [93] C. FAUCHARD, Y. FARGIER, O. MAQUAIRE et al., « Combination of aerial and near surface geophysical data : Badlands case study of " Les Vaches Noires" cliffs, Normandy, France., » in *Geophysical Research Abstracts*, t. 20, 2018.
- [94] T. LOPEZ, D. LEROUX, R. ANTOINE, Y. CUI et G. RAMILLIEN, « Space-based study of the mechanisms of surface fluids exchanges in the arid region of Badain Jaran., » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2018, p. 12 586.
- [95] A. PELTIER, F. J. FONTAINE, A. FINIZOLA et al., « Volcano destabilizations : from observations to an integrated model of active deformation, » in *AGU Fall Meeting Abstracts23*, 2018.
- [96] R. ANTOINE, M. TANGUY, S. PALMA LOPES et J.-L. SORIN, « Didro-An Innovative Multi-Sensor UAV System for Routine and Crisis Monitoring of Dikes, » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2019, 2019, EP11C-2123.
- [97] C. FAUCHARD, R. ANTOINE, S. TAOUM et al., « Erosion and Deposition Volumes Estimation Using a Drone and Near Surface Geophysics Methods in Coastal Badlands Context., » in *AGU Fall Meeting Abstracts*, t. 2019, 2019, H14A-01.
- [98] T. L. GONZALEZ, R. ANTOINE, D. REMY, M. GERBAULT et M. RABINOWICZ, « Thermal infrared observation of pre-seismic vertical permeability changes. The Boumerdes-Zemmouri (M= 6.8) case, » in *21st EGU General Assembly*, 2019.
- [99] R. GUÉRIN, L. BODET, M. DANGEARD et al., « Characterization of the vadose zone above an abandoned underground quarry of Chalk, using different geophysical tools., » in *Geophysical Research Abstracts*, t. 21, 2019.
- [100] T. LOPEZ, R. ANTOINE, D. RÉMY, M. GERBAULT et M. RABINOWICZ, « Thermal infrared observation of pre-seismic vertical permeability changes. The Boumerdes-Zemmouri (M= 6.8) case., » in *Geophysical Research Abstracts*, t. 21, 2019.
- [101] O. MAQUAIRE, S. COSTA, C. LISSAK et al., « Combination of aerial and near surface methods. Application at two different types of coast and landslides (Normandy cliffs, France), » in *International workshop on fluidized landslide*, 2019.
- [102] O. MAQUAIRE, S. COSTA, C. LISSAK et al., « RICOCHET project : multi-Risk assessment on Coastal territory in a global CHange context, » in *First China-France Symposium on Transportation Geotechnics*, 2019.
- [103] T. ROULLAND, O. MAQUAIRE, S. COSTA et al., « High-resolution monitoring of the " Vaches Noires" cliffs by multi-method analysis : characterization of hydrogravity processes and induced dynamics (Normandy, France)., » in *Geophysical Research Abstracts*, t. 21, 2019.
- [104] T. LOPEZ, H. HU, Y. CUI, R. ANTOINE et N. AN, « Analysis of the space-based surface temperature distribution in Badain Jaran Desert, » in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2020, p. 17 910.
- [105] Y. FARGIER, T. DEZERT, R. ANTOINE, A. TONNOIR et C. FAUCHARD, « Impact of the Dems Resolution on 2d and 3d-Eri Common Practice, » in *NSG2021 2nd Conference on Geophysics for Infrastructure Planning, Monitoring and BIM*, European Association of Geoscientists & Engineers, t. 2021, 2021, p. 1-5.
- [106] C. FAUCHARD, L. AILLAUD, A. LEGRAND et al., « Transept Foundations of a 12th Century Chapel Revealed by Geophysical and Photogrammetric Prospection, » in *NSG2021 2nd Conference on Geophysics for Infrastructure Planning, Monitoring and BIM*, European Association of Geoscientists & Engineers, t. 2021, 2021, p. 1-5.
- [107] R. ANTOINE, F. CEREMA-DTERNC, J. BERNARD et F. LMV-CLERMONT-FERRAND, « Multidisciplinary investigation (ERT, CO<sub>2</sub>, SP and T) reveals fluid circulation at Somma-Vesuvius. »
- [108] A. FINIZOLA, T. RICCI, A. SCIARRA et al., « Geochemical characterization of a High Resolution DC Electrical Resistivity Tomography crossing the summit craters of Mt Etna. »

## Conférences nationales

- [109] R. ANTOINE, C. FAUCHARD, E. DURAND et B. BEAUCAMP, « Apport du radar géologique à l'imagerie interne des digues, » in *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions-2e colloque national-Digues 2013*, Lavoisier, 2013, p. 353.
- [110] V. MOURZENKO, C. MEZON, J.-F. THOVERT et al., « 3D convection in a fractured porous medium : influence of fracture network parameters, » in *13èmes Journées d'études des Milieux Poreux 2016*, 2016.
- [111] C. FAUCHARD, V. GUIBERT, R. ANTOINE et al., « Mesures combinées d'imagerie de résistivité électrique et de photogrammétrie : étude des falaises des Vaches Noires, » in *SFPT ENSG*, 2017.
- [112] T. ROULLAND, O. MAQUAIRE, S. COSTA et al., « Suivi de l'évolution des processus hydrogravitaires des falaises des Vaches Noires par analyse multi-méthodes (Calvados, Normandie, France), » in *Journées Aléas Gravitaires*, 2017.
- [113] D. BOGGIO, J. SORIN, M. PIERROT-DESEILLIGNY et al., « DIDRO, un outil intégré pour l'auscultation des digues par drone, » in *Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations-3e colloque-Digues 2019*, 2019, p. 6.
- [114] T. ROULLAND, O. MAQUAIRE, S. COSTA et al., « Caractérisation des processus hydrogravitaires et des dynamiques saisonnières des falaises des Vaches Noires par photogrammétrie, télémétrie laser terrestre et mesure in situ, » in *Journées Aléas Gravitaires*, 2019.
- [115] R. ANTOINE, J. LACOGNE, F. BRETAR et al., « Comment obtenir des informations topographiques à partir de données d'imagerie thermique infrarouge ? Le cas du Piton de la Fournaise.. »
- [116] D. BOGGIO, J. SORIN, M. PIERROT-DESEILLIGNY et al., « DIDRO, un outil intégré pour lauscultation des digues par drone DIDRO, an integrated tool for levees survey by drone. »

## Rapports de recherche

- [117] R. ANTOINE, D. BARATOUX et M. RABINOWICZ, « Détection d'anomalies thermiques par méthode infrarouge thermique sur le cone Formica Leo, » rapp. tech., 2008.
- [118] R. ANTOINE, A. FINIZOLA, D. BARATOUX et M. RABINOWICZ, « Anomalies thermiques générées par une circulation convective d'air humide dans le cône Formica Leo, » rapp. tech., 2009.
- [119] R. ANTOINE, G. SARACCO, D. BARATOUX et M. RABINOWICZ, « Anomalies de potentiels électriques générées par une circulation d'air et d'eau dans le Piton de la Fournaise, » rapp. tech., 2010.
- [120] C. FAUCHARD et R. ANTOINE, *Mesures thermiques et géophysique sur les quais Joannes Couvert du Grand Port Maritime du Havre*, 2014.
- [121] C. FAUCHARD, R. ANTOINE, P.-F. THÉRAIN, J. LACOGNE, F. BRETAR et M. PIERROT-DESEILLIGNY, « Apport de la photogrammétrie pour la restitution de mesures géophysiques : application pour la sauvegarde du Pont De Coq, Ménerval (76), » rapp. tech., 2014.
- [122] C. FAUCHARD et R. ANTOINE, *Mesures photogrammétriques et infrarouge thermiques sur les quais Joannes Couvert du Grand Port Maritime du Havre*, 2016.
- [123] D. JACQUELINE, R. ANTOINE et E. KASSA, « Deliverable D3. 3, » rapp. tech., 2017.
- [124] R. ANTOINE et J. L. SORIN, « Validation de puces GPS de type U-Blocs pour le suivi de cible dérivantes en contexte de crise, » rapp. tech., 2018.

- [125] R. ANTOINE, G. RABATEL et J. L. SORIN, « Observations thermiques, visibles et Lidar sur ouvrage hydraulique : application à la digue de BOU dans le Loiret, » rapp. tech., 2019.
- [126] R. ANTOINE et J. L. SORIN, « Combinaison de données thermiques et visible sur un ouvrage hydraulique expérimental : application à la digue du CER dans de cadre du Projet Didro, » rapp. tech., 2019.
- [127] —, « Observations multispectrales appliquées à DIDRO : considérations finales, » rapp. tech., 2019.
- [128] A. SILLA, A. VIRTANEN, E. LEHTONEN et al., « Results of the evaluation of pilot tests. Deliverable D4. 4 of the SAFER-LC project, » rapp. tech., 2020.

## Rapports d'expertise

- [129] R. ANTOINE et B. BEAUCAMP, *Mesures radar sur le canal latéral à la Loire : application à la digue en terre de Saint-Firmin-sur-Loire (Loiret, 45)*, 2012.
- [130] R. ANTOINE, V. GUILBERT, B. BEAUCAMP et C. FAUCHARD, *Caractérisation géophysique d'un théâtre gallo-romain (Arnières Sur Iton, 27) par radar 3D et Tomographie de Résistivité Electrique (2013)*, 2013.
- [131] R. ANTOINE, *Mesures géophysique sur le terril en combustion interne de Haveluy (59)*, 2014.
- [132] R. ANTOINE et V. GUILBERT, *Observations dans infrarouge thermiques de la tranchée couverte RFF, Rive Gauche de la Ville de Rouen*, 2014.
- [133] R. ANTOINE et C. FAUCHARD, *Mesures géophysiques complémentaires (en tomographie de résistivité électrique) sur le Pont de Coq, Pays de Bray*, 2015.
- [134] C. FAUCHARD et R. ANTOINE, *Observations radar sur la digue du Val d'Orléans*, 2015.
- [135] C. FAUCHARD, V. GUILBERT, B. BEAUCAMP et R. ANTOINE, *Mesures radar 3D et imagerie électrique sur l'abbaye du Bec Hellouin*, 2015.
- [136] L. AUBIN et R. ANTOINE, *Mesures photogrammétriques sur l'épi de Port Neuf, Ville de la Rochelle*, 2021.