

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG  
THÈSE DE DOCTORAT  
en vue de l'obtention du grade de  
Docteur de l'Université de Strasbourg  
**Discipline : Géophysique**

---

Estimation et évolution des vides miniers aux  
Mines Domaniales de Potasse d'Alsace  
(MDPA) par mesures géodésiques et  
modélisation géomécanique

---

par **Guillaume MODESTE**

préparée à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516)

**Directeurs de thèse :**

|                      |   |
|----------------------|---|
| Frédéric MASSON      | Professeur à l'Université de Strasbourg           |
| François CORNET      | Physicienne adjointe à l'Université de Strasbourg |
| <b>Rapporteurs :</b> | Professeur émérite à l'Université de Strasbourg   |

|                  |   |
|------------------|---|
| Yann GUNZBURGER  | Maitre de conférences à l'Université de Lorraine, Nancy |
| Daniel RAUCOULES | Ingénieur de recherche au BRGM, Orléans                 |

**Examineurs :**

|                      |  |
|----------------------|--|
| Cécile DOUBRE        | Président d'Itasca Consultants S.A.S, Lyon                     |
| Daniel BILLAUX       | Maitre de conférences à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée |
| Bénédict SCHMITTBUHL | Directeur de recherche CNRS à l'IPG Strasbourg                 |
| FRUNEAU              |  |

Soutenance prévue le : **19 juin 2020**



*À François Cornet, parti avant la fin.  
Merci pour tes enseignements, ta patience et ta pédagogie.*

*"Au milieu de l'hiver, j'ai découvert en moi un été invincible",  
Albert Camus*



## Résumé

Les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace sont sujettes à un ennoyage tardif, conséquence de l'extraction du minerai. L'eau suinte le long des puits miniers rebouchés, remplissant les vides résiduels et perturbant la mécanique du milieu. L'estimation des vides miniers est alors d'un intérêt de premier ordre.

La technique InSAR est appliquée pour étudier l'évolution des affaissements miniers en lien avec la compaction des matériaux foudroyés. En traitant les archives d'images SAR de 1995 à 2018, les déplacements verticaux annuels passent de l'échelle centimétrique à millimétrique et les déplacements sont encore détectables près de 20 ans après la fin des travaux.

En complément, des mesures lidar sont menées dans des galeries de sel à 550 m de profondeur pour caractériser le comportement mécanique du massif.

L'ensemble des études et observations passées du bassin potassique alsacien concernant sa géologie et son champ de contraintes ambiant sont synthétisées au sein d'un modèle équivalent. En combinant ce modèle à nos données, nous estimons des vides résiduels dans certains secteurs, de l'ordre de 20% en 2020, avec une vitesse de fermeture tendant vers 0.1%/an.

## Abstract

The "Mines Domaniales de Potasse d'Alsace" are exposed to a phenomenon of flooding due to the ore extraction. The water seeps down along the closed mine shafts, filling the remaining voids and disturbing the mechanical equilibrium of the ground. The estimation of the residual voids is then of prime order.

InSAR technique is applied to study the mining subsidence evolution related to the compaction of caved materials at depth. By processing available SAR archives from 1995 to 2018, annual vertical displacements decrease from centimetric scale to millimetric one and displacements are still occurring, about 20 years after the end of activity.

Alongside those processing, lidar measurements are conducted inside salt galleries at 550 m deep to characterise the mechanical behaviour of the hosting rock.

The cumulated past observations and studies of the Alsatian potassic basin about its geology and natural stress-strain fields are synthesized within an equivalent model. By combining this model to our results and acquisitions, we estimate the residual voids at depth for specific panels, about 20% in 2020, with a closure rates decreasing to 0.1%/year.



## Remerciements

Honnêtement, je ne pensais pas faire de thèse un jour. Mais guidé par la curiosité, j'ai décidé de me lancer à l'aventure. De ces plus de trois années de travail et d'apprentissage, j'en retiens que la thèse est une épreuve hautement formatrice, détestable à souhait et tout autant enrichissante. Je reconnais et apprécie les bienfaits que m'a apporté cette épreuve : patience, autonomie, l'aptitude à se poser des questions sans cesse, rigueur. Il est donc temps de remercier tous ceux qui m'ont aidé lors de cette aventure.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Frédéric Masson, pour m'avoir offert la possibilité de conduire ces travaux de thèse, la confiance qu'il m'a accordé et surtout, l'idée d'appliquer le lidar au suivi de déformation de galeries souterraines. Cela ne faisait initialement pas partie des travaux de thèse mais j'ai pris un immense plaisir à travailler dessus.

Je tiens aussi à remercier mes co-directeurs de thèse, Cécile Doubre et François Cornet, pour les connaissances et les discussions scientifiques et surtout, la pédagogie et la patience dont ils ont fait preuve à mon égard tout au long des travaux. Ils ont formé une paire efficace et complémentaire, et m'ont apporté un enseignement scientifique rigoureux et riche.

Je tiens également à remercier les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) pour avoir financé ces travaux de thèse ainsi que le prolongement de 6 mois qui m'a permis d'achever mes travaux sereinement. Mes remerciements s'adressent à l'ensemble des responsables des MDPA et notamment au directeur technique, Romain Challamel, qui a suivi mes travaux depuis le début et m'a permis de conduire mes différentes campagnes d'acquisition lidar sur une période de 2 ans.

Je souhaite ensuite remercier mes rapporteurs, Yann Gunzburger et Daniel Raucoules, pour l'évaluation de mes travaux de thèse, les commentaires constructifs sur le manuscrit et la discussion scientifique qui a suivi la présentation de mes travaux.

Je souhaite aussi remercier mes examinateurs, Daniel Billaux, Bénédicte Fruneau et Jean Schmittbuhl, pour l'évaluation de mes travaux de thèse ainsi que la riche discussion qui a suivi la présentation orale de mes travaux de thèse.

Au sein du laboratoire, je tiens à remercier Patrice Ulrich, Laurent Rihouey et Jean-Marc Brendle pour l'aide aussi bien informatique que technique (lidar) qu'ils m'ont apportés tout au long de la thèse. Je remercie aussi l'équipe administrative de l'IPGS pour leur support au cours des travaux. Je n'oublie pas tous ceux qui m'ont accompagné sur le terrain, dans les galeries souterraines des MDPA, pour me donner un coup de main et découvrir ce lieu atypique.

En dehors des travaux de thèse, je tiens à remercier l'ensemble du personnel présent à l'EOST/IPGS pour ses années passées à Strasbourg et plus particulièrement : Mohammed, mon co-bureau, pour les discussions et les échanges culturels ; les chercheurs du 3<sup>ième</sup> étage pour toutes les pauses café passées ensemble ; les doctorants, vacataires et post-doctorants (Nolwenn, Éric, Josipa, Frédéric, Damian, Quentin, Bérénice, Myriam, Mathilde, Catalina, Léna, Alice & co) pour les discussions et les moments passés ensemble en dehors des heures de bureau.

Je remercie aussi mes amis (Marie, Daniel, Paul, André, Geoffrey, Alexandre et les Clem's) et ma famille pour leur support lors des derniers mois, surtout au vu du contexte (coronavirus et le décès de François) et leurs relectures efficaces du manuscrit ! Je n'oublie pas Pauline, pour toutes les pauses midi passées ensemble à discuter et se changer les idées ainsi que les deux descentes dans les galeries des MDPA.

Enfin, je remercie celle qui m'a rejoint à Strasbourg et accompagné au cours d'une large partie de la thèse, celle qui me changea les idées lors des bas et m'encouragea à toujours aller de l'avant, *Didi*.

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Table des figures  | xii       |
| Liste des tableaux   | xv        |
| Introduction générale  | 1         |
| <b>1 L’histoire des Mines Domaniales de Potasse d’Alsace (MDPA)</b>              | <b>9</b>  |
| 1.1 La géologie du bassin potassique . . . . .                                   | 10        |
| 1.1.1 Localisation de la potasse dans le Fossé Rhénan . . . . .                  | 10        |
| 1.1.2 La stratigraphie du bassin potassique . . . . .                            | 11        |
| 1.1.3 Le dépôt des couches de potasse . . . . .                                  | 13        |
| 1.2 La prospection dans le bassin potassique alsacien . . . . .                  | 15        |
| 1.2.1 Les forages miniers et pétroliers . . . . .                                | 15        |
| 1.2.2 La prospection géophysique . . . . .                                       | 17        |
| 1.3 L’activité souterraine aux MDPA . . . . .                                    | 18        |
| 1.4 L’après-mine aux MDPA . . . . .  | 22        |
| 1.4.1 Les affaissements résiduels . . . . .                                      | 22        |
| 1.4.2 La salinisation de la nappe phréatique . . . . .                           | 23        |
| 1.4.3 Le devenir du site de stockage et l’ennoyage des anciens travaux . . . . . | 24        |
| <b>2 Détection des déplacements de surface par interférométrie radar (InSAR)</b> | <b>25</b> |
| 2.1 Introduction . . . . .   | 26        |
| 2.2 <i>Interferometry Synthetic-Aperture Radar</i> : théorie . . . . .           | 27        |
| 2.2.1 La création d’une image SAR . . . . .                                      | 27        |
| 2.2.2 Interférométrie d’images SAR . . . . .                                     | 29        |
| 2.2.3 Traitement avec le logiciel StaMPS . . . . .                               | 31        |
| 2.3 Les archives d’images SAR . . . . .  | 34        |
| 2.4 Résultats . . . . .  | 36        |
| 2.4.1 Distribution spatiale des vitesses de la surface du sol . . . . .          | 37        |
| 2.4.2 Suivi temporel de l’affaissement minier . . . . .                          | 40        |
| 2.4.2.1 Pendant la période d’exploitation . . . . .                              | 40        |
| 2.4.2.2 Suivi de l’affaissement minier sur 24 ans par InSAR . . . . .            | 43        |
| 2.4.3 Les autres signaux . . . . .   | 48        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.4.4    | Le site de stockage . . . . .  | 50        |
| 2.5      | Discussion . . . . .   | 51        |
| 2.5.1    | Les limites de l'InSAR appliqué au bassin potassique alsacien . . . . .        | 51        |
| 2.5.2    | Les sources potentielles de déplacements . . . . .                             | 53        |
| 2.5.3    | L'affaissement résiduel . . . . .  | 56        |
| 2.5.3.1  | L'amplitude de la phase résiduelle . . . . .                                   | 56        |
| 2.5.3.2  | Les mécanismes à l'origine de la phase résiduelle . . . . .                    | 57        |
| 2.6      | Conclusion . . . . .   | 60        |
| <b>3</b> | <b>Suivi de la déformation de galeries souterraines par mesures lidar</b>      | <b>61</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .   | 62        |
| 3.2      | Présentation de la technologie . . . . .                                       | 62        |
| 3.2.1    | Méthode de mesure et sources d'erreurs . . . . .                               | 62        |
| 3.2.2    | Le lidar en milieu souterrain . . . . .  | 64        |
| 3.3      | Suivi de deux galeries de sel aux MDPA . . . . .                               | 65        |
| 3.3.1    | L'instrument de mesure . . . . .   | 65        |
| 3.3.2    | Protocole de mesure et campagnes . . . . .                                     | 67        |
| 3.3.3    | Mesures de convergence horizontale et incertitudes . . . . .                   | 69        |
| 3.3.4    | Référencement des acquisitions . . . . .                                       | 72        |
| 3.3.4.1  | Théorie . . . . .  | 72        |
| 3.3.4.2  | Application du référencement . . . . .   | 74        |
| 3.4      | Exploitation des campagnes lidar . . . . .                                     | 76        |
| 3.4.1    | La déformation horizontale au cours du temps . . . . .                         | 76        |
| 3.4.2    | Comparaison avec les mesures du site de stockage . . . . .                     | 81        |
| 3.4.3    | Calcul du déplacement aux parois . . . . .                                     | 82        |
| 3.4.4    | Estimation de la variation volumétrique . . . . .                              | 86        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .   | 89        |
| <b>4</b> | <b>Modélisation géomécanique de l'effet et des vides miniers</b>               | <b>91</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .   | 92        |
| 4.2      | <i>Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions</i> : Flac3D . . . . . | 93        |
| 4.3      | Détermination du champ de contraintes initial . . . . .                        | 95        |
| 4.3.1    | Géomatériaux d'étude . . . . .   | 95        |
| 4.3.1.1  | Définition et composition . . . . .  | 95        |
| 4.3.1.2  | Propriétés mécaniques équivalentes instantanées et asymptotiques . . . . .     | 98        |
| 4.3.1.3  | Les lois de comportement . . . . .   | 99        |
| 4.3.2    | Reconstruction des volumes géologiques . . . . .                               | 101       |
| 4.3.3    | Conditions aux limites . . . . .   | 104       |
| 4.3.4    | Champ de contraintes pré-exploitation . . . . .                                | 105       |
| 4.3.4.1  | Points de contrôle . . . . .   | 105       |

|         |  |            |
|---------|--|------------|
| 4.3.4.2 | Résultats . . . . .  | 107        |
| 4.4     | Modélisation de l'effet minier . . . . .                             | 109        |
| 4.4.1   | Adaptation de la loi de Norton aux mesures lidar . . . . .           | 109        |
| 4.4.2   | La modélisation des matériaux foudroyés . . . . .                    | 113        |
| 4.4.2.1 | Propriétés mécaniques équivalentes des matériaux foudroyés           | 113        |
| 4.4.2.2 | Loi de comportement des matériaux foudroyés . . . . .                | 114        |
| 4.4.3   | Protocole de modélisation et prise en compte de la température . . . | 115        |
| 4.4.4   | Résultats . . . . .  | 117        |
| 4.4.4.1 | Les affaissements résiduels . . . . .                                | 117        |
| 4.4.4.2 | Les vides miniers . . . . .  | 120        |
| 4.5     | Discussion . . . . .   | 121        |
| 4.5.1   | Les contraintes naturelles dans les matériaux salifères . . . . .    | 122        |
| 4.5.2   | Le fluage du sel . . . . .   | 122        |
| 4.5.3   | Les micromécanismes de déformation du sel . . . . .                  | 123        |
| 4.5.4   | Le comportement des matériaux foudroyés . . . . .                    | 126        |
| 4.6     | Conclusion . . . . .   | 127        |
|         | <b>Conclusion générale</b>   | <b>129</b> |
|         | <b>Bibliographie</b>   | <b>133</b> |

# Table des figures

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Illustration de l'affaissement minier au cours de l'exploitation . . . . .  | 2  |
| 2   | Coupe verticale schématique d'une zone foudroyée et de ses différents niveaux   | 3  |
| 3   | Courbe de contrainte-déformation pour différents éléments équivalents aux matériaux foudroyés, produites lors d'essais oedométriques . . . . .  | 4  |
| 4   | Localisation des concessions des MDPA . . . . .   | 6  |
| 1.1 | Carte topographique du Sud du Fossé Rhéna . . . . .   | 11 |
| 1.2 | Coupe résumé des formations tertiaires du bassin de Mulhouse . . . . .  | 12 |
| 1.3 | Localisation des sondages miniers (orange) et des puits pétroliers (vert) à travers les concessions des MDPA . . . . .  | 16 |
| 1.4 | Localisation des puits miniers à travers les concessions minières en fonction de leur date de fonçage . . . . .   | 19 |
| 1.5 | Schéma de la méthode d'extraction par chambres et piliers (haut) et en longues tailles (bas) . . . . .  | 21 |
| 1.6 | Affaissement minier suivi par nivellement au point 210 de Bollwiller lors de l'exploitation . . . . .   | 23 |
| 2.1 | Illustration de la géométrie d'une acquisition SAR . . . . .  | 28 |
| 2.2 | Illustration des <i>Permanent/Persistent Scatterers</i> . . . . .   | 32 |
| 2.3 | Couverture temporelle des données SAR traitées . . . . .  | 35 |
| 2.4 | Localisation des pixels d'étude retenus à travers le bassin potassique alsacien sur la période ENVISAT . . . . .  | 36 |
| 2.5 | Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS, gauche) et de leurs écart-types (droite) pour les archives ascendantes . . . . .                                | 38 |
| 2.6 | Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS, gauche) et de leurs écart-types (droite) pour les archives descendantes . . . . .                               | 39 |
| 2.7 | Séries temporelles des mesures de nivellement (vertical) et des résultats ERS (LOS) en cinq points suivis par les deux méthodes . . . . .   | 42 |
| 2.8 | Séries temporelles des mesures de nivellement et des résultats InSAR sur l'ensemble de la période d'observation avec le modèle utilisé pour les ajuster . . . . .                     | 45 |
| 2.9 | Série temporelle du nivellement accompagnée des résultats ERS à Bollwiller 193 (a) et positions des points de nivellement relatives aux secteurs exploités les plus proches . . . . . | 47 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.10 | Déplacements LOS observés à Ungerhseim (a) et à Reiningue (b) sur la période ERS en relation avec l'exploitation minière (c) . . . . .             | 48  |
| 2.11 | Série temporelle à la verticale du site de stockage pendant la période ERS . .   | 50  |
| 2.12 | Cartes des sites de pompages et des failles dans le bassin potassique alsacien.  | 54  |
| 2.13 | Coupe géologique schématique aux alentours de Staffelfelden . . . . .  | 55  |
| 3.1  | Illustration du principe d'acquisition lidar par phase . . . . .   | 63  |
| 3.2  | Acquisition lidar dans les galeries souterraines aux MDPA . . . . .  | 66  |
| 3.3  | Les réflecteurs dans les galeries . . . . .  | 68  |
| 3.4  | Convergences horizontales mesurées au niveau des réflecteurs dans les galeries pour les acquisitions centrales . . . . .                           | 71  |
| 3.5  | Déplacements calculés au niveau des réflecteurs dans la seconde moitié de la galerie 12 depuis l'acquisition centrale . . . . .                    | 75  |
| 3.6  | Déformations horizontales mesurées aux arches 3 et 7 des galeries 11 (a-b) et 12 (c-d) . . . . .   | 77  |
| 3.7  | Localisation du stot (marron) à la verticale du site de stockage . . . . .   | 79  |
| 3.8  | Comparaison des déformations horizontales mesurées dans les galeries d'étude et le site de stockage . . . . .                                      | 80  |
| 3.9  | Illustration de la méthode de calcul M3C2 . . . . .  | 83  |
| 3.10 | Déplacements calculés au niveau du toit dans la galerie 12 (gauche) avec l'incertitude associée (droite) . . . . .                                 | 84  |
| 3.11 | Déplacements calculés au niveau d'un parement dans la galerie 12 (gauche) avec l'incertitude associée (droite) . . . . .                           | 85  |
| 3.12 | Exemple du volume reconstitué sous CloudCompare d'une section de galerie   | 86  |
| 3.13 | Convergences volumétriques estimées (vert) et calculées (marron) le long des deux galeries d'étude . . . . .                                       | 88  |
| 4.1  | Élément parallélépipédique (a) découpé en tétraèdre (b) dans Flac3D. . . .   | 94  |
| 4.2  | Carte des forages et sondages utilisés lors de la modélisation des volumes géologiques . . . . .   | 102 |
| 4.3  | Emprise géographique du modèle (haut) et vue du modèle 3D avec ses différents géomatériaux (bas) . . . . .   | 103 |
| 4.4  | Schéma des conditions aux limites du modèle . . . . .  | 105 |
| 4.5  | Orientation de $\sigma_3$ (en rouge) aux alentours du puits Amélie à 800 m de profondeur . . . . .   | 108 |
| 4.6  | Valeur du ratio entre $\sigma_h$ et $\sigma_v$ le long des profils 1 (gauche) et 2 (droite) . . .  | 109 |
| 4.7  | Schéma du modèle utilisé pour l'interprétation des campagnes lidar . . . . .   | 110 |
| 4.8  | Comparaison entre les convergences horizontales mesurées lors des campagnes lidar et celles modélisées pour différentes valeurs de $A_s$ . . . . . | 112 |
| 4.9  | Schéma du processus de modélisation du phénomène de compaction . . . . .   | 116 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.10 | Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur la période ERS . . . . .  | 117 |
| 4.11 | Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur la période ENVISAT . . . . .  | 118 |
| 4.12 | Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur l'ensemble de la période d'observation InSAR . . . . .              | 119 |
| 4.13 | Estimation et évolution des vides résiduels sur la période d'observation InSAR (gauche) et pendant le siècle qui suit la dernière extraction (droite) . . . . . | 121 |
| 4.14 | Schéma des principaux mécanismes microstructuraux à l'origine des déformations dans les roches salines . . . . .  | 124 |

# Liste des tableaux

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.1  | Tonnages de pétrole extraits dans le bassin potassique en comparaison de l'exploitation alsacienne sur la même période et de celle de Pechelbronn dans son ensemble . . . . . | 17  |
| 2.1  | Résumé des fréquences et des longueurs d'onde des signaux émis par différents satellites pour la réalisation d'images SAR . . . . .   | 28  |
| 2.2  | Présentation des données satellitaires traitées . . . . .   | 34  |
| 2.3  | Paramètres temporels de la somme de deux termes exponentiels aux cinq points de nivellement . . . . .   | 46  |
| 2.4  | Amplitude de l'affaissement résiduel mesurée aux cinq points de nivellement   | 47  |
| 2.5  | Affaissements mesurés par InSAR sur les différentes périodes d'observation .  | 47  |
| 3.1  | Estimation de l'incertitude de mesure dans différents cas . . . . .   | 71  |
| 3.2  | Écart entre les distances mesurées et les distances calculées . . . . .   | 76  |
| 4.1  | Géomatériaux retenus pour les travaux de modélisation . . . . .   | 96  |
| 4.2  | Comparaison entre les masses volumiques mesurées et estimées . . . . .  | 97  |
| 4.3  | Résumé des compositions et des masses volumiques des géomatériaux retenus pour l'étude . . . . .  | 97  |
| 4.4  | Résumé des propriétés mécaniques asymptotiques et instantanées des éléments et des géomatériaux équivalents . . . . .   | 98  |
| 4.5  | Module de cisaillement perpendiculaire au plan d'anisotropie des géomatériaux anistropes . . . . .  | 99  |
| 4.6  | Paramètres de la loi de Norton déterminés pour le sel du bassin potassique alsacien . . . . .   | 100 |
| 4.7  | Synthèse des différentes observations concernant le champ de contraintes dans le bassin potassique alsacien . . . . .   | 106 |
| 4.8  | Déterminants <i>R-square</i> issus des comparaisons entre le modèle et les mesures  | 111 |
| 4.9  | Résumé des propriétés mécaniques initiales et finales des matériaux foudroyés   | 113 |
| 4.10 | Valeurs du déterminant <i>R-square</i> obtenu entre le modèle et les résultats InSAR sur les périodes ERS, ENVISAT et Sentinel-1 . . . . .                                    | 119 |



# Introduction générale

## Répercussions en surface de l'activité minière

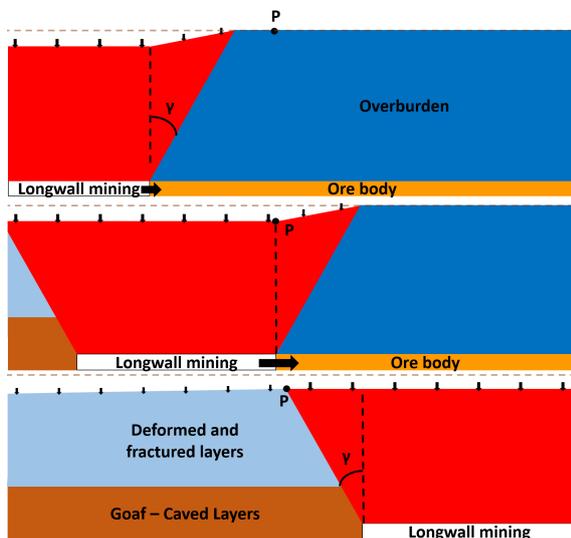
L'extraction minière engendre des déformations à la verticale du gisement exploité, altérant la topographie des lieux et occasionnant des dégâts plus ou moins importants aux infrastructures présentes dans l'aire impactée. L'amélioration continue des méthodes d'extraction vise à la fois à optimiser l'extraction du gisement et restreindre l'impact en surface de l'activité minière. Ces déplacements sont traditionnellement suivis par des mesures répétées de nivellement (Chrzanowski et al., 1997; Donnelly et al., 2001). Néanmoins, les déformations ne s'arrêtent pas avec la fin de l'activité minière. Sur le long-terme, la surveillance de ces déformations de surface permet aussi bien d'étudier le risque pour les infrastructures que l'évolution des différents processus mécaniques induits par cette activité souterraine. En tout, trois grandes familles de phénomènes sont observées à la verticale des secteurs exploités : l'effondrement, l'affaissement et le soulèvement.

L'effondrement est une déstructuration des éléments recouvrant le gisement, qui se propage jusqu'à la surface. Il apparaît essentiellement lorsque les vides miniers sont laissés en l'état. Les effondrements se produisent lorsque la profondeur du gisement est relativement faible, quelques dizaines voire une centaine de mètres au maximum (Hunt, 1981; Matheson and Eckert-Clift, 1986). À court terme, les anciens travaux sont stables. À moyen et long terme, les déformations s'accumulent et le seuil de rupture des piliers peut être dépassé. La stabilité de ces structures peut aussi être compromise par des perturbations locales des contraintes ou une variation de la rigidité des matériaux (Karfakis, 1987). Après rupture, ces structures ne remplissent plus leur fonction et s'écroulent, entraînant les roches avec elles. De manière générale, il est très difficile de prévoir le moment de rupture des soutènements. Les effondrements peuvent se produire plusieurs années, voire décennies, après la fin des travaux miniers (Chang and Hanssen, 2014). D'autant que certains phénomènes naturels peuvent les provoquer, comme les séismes et l'ennoyage (Bruhn et al., 1978; Esaki et al., 1989).

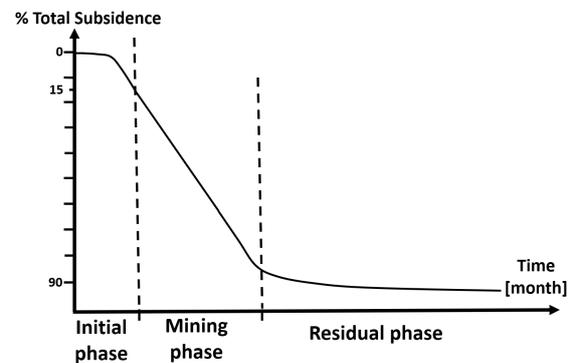
Le soulèvement se manifeste sous forme de gonflement du sol. Ces déplacements contre-intuitifs ont principalement pour origine l'ennoiement des vides miniers, intervenant soit à la fin des travaux suite à l'arrêt des pompages, soit plusieurs années plus tard à la suite d'infiltration d'eau jusqu'aux vides (Guéguen et al., 2009; Preusse et al., 2013). Ces déplacements peuvent atteindre l'échelle décimétrique (Vervoort and Declercq, 2018). Les soulèvements observés en surface dépendent des éléments géologiques environnants. Par exemple, les argiles

se gonflent au contact de l'eau, mais leur contribution au déplacement de surface est moindre que l'effet de l'augmentation de la pression de pore des matériaux (Bekendam and Pottgens, 1995). Par la suite, la pression exercée par le fluide sur le toit accélère les déplacements de surface (Cuenca et al., 2013).

L'affaissement est un abaissement de la surface. Contrairement aux effondrements, dans le cas des affaissements, la surface conserve sa continuité et aucune fracture n'apparaît. Grâce à l'accumulation des observations et aux multiples retours d'expériences, plusieurs modèles d'affaissement ont été proposés dans le but d'anticiper l'amplitude et la distribution spatiale des affaissements miniers au-dessus et au voisinage des exploitations (National Coal Board, 1966; Whittaker and Reddish, 1989; Kratzsch, 2012). Dans ces modèles, un grand nombre de paramètres sont considérés, tels que l'épaisseur de la couche extraite, la méthode de remblaiement, le rapport entre la profondeur et la largeur du secteur exploité, etc (Piguet and Wojtkowiak, 2000). D'après les mesures faites en surface, l'évolution de ces affaissements au cours du temps peut être décomposée en trois phases (figure 1) : une phase initiale à l'approche de l'exploitation en profondeur, une phase active lorsque l'exploitation est au plus proche et une phase résiduelle lorsque le point d'observation n'est plus dans la zone d'influence de l'exploitation (Al Heib et al., 2005). Ces mesures de déplacement soulignent aussi que l'essentiel de l'affaissement se produit lors de l'exploitation, la phase résiduelle étant moins importante que les phases initiale et active réunies (Orchard and Allen, 1974; Yao and Reddish, 1994).



(a) Schéma des trois phases d'affaissement



(b) Évolution de l'affaissement à travers les trois phases

**FIGURE 1 – Illustration de l'affaissement minier au cours de l'exploitation.** En haut est schématisée la phase initiale, au milieu la phase active et en bas, la phase résiduelle. L'angle  $\nu$  représente l'angle d'influence de l'exploitation. L'affaissement s'accélère lorsque le point rentre dans la zone d'influence de l'exploitation. Il est plus ou moins stationnaire lors de la phase active et commence à décélérer à la fin de celle-ci. La vitesse de l'affaissement décroît tout au long de la phase résiduelle.

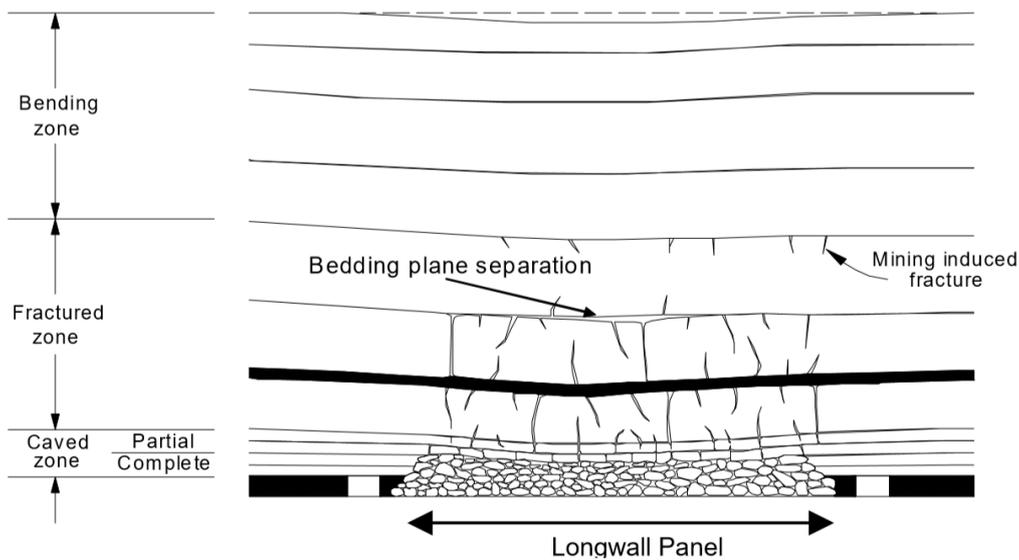


FIGURE 2 – Coupe verticale schématique d'une zone foudroyée et de ses différents niveaux (Esterhuizen et al., 2005). Les fractures, essentiellement quasi-verticales, apparaissent à l'aplomb de la zone foudroyée en raison de la rupture des matériaux sous-jacents.

Les deux premiers phénomènes, l'effondrement et le soulèvement, soulignent l'importance de la gestion des vides miniers en concomitance de l'exploitation afin de contrôler les répercussions en surface sur le long terme. En comblant les vides, les risques d'effondrement et de soulèvement diminuent. L'une des méthodes de gestion des vides miniers est le foudroyage. Contrairement au remblaiement consistant en l'apport de matériaux extérieurs ou de résidus d'exploitation, le foudroyage repose sur le foisonnement, une déstructuration des matériaux, naturel ou forcé des roches de recouvrement après extraction de la ressource. Dans le cas du foudroyage, les vides sont distribués dans l'ensemble des roches fracturées. Trois zones sont distinguables après foudroyage (figure 2) : l'amas des matériaux foudroyés, une zone fracturée et une zone de flexion (Singh and Kendorski, 1981). Lors du foudroyage, les matériaux s'effondrent sur une hauteur entre deux et douze fois la hauteur extraite (Karmis et al., 1983 ; Chekan and Listak, 1993). L'épaisseur foudroyée dépend des propriétés mécaniques du recouvrement. La zone en contact avec le sommet des matériaux foudroyés est la zone fracturée, pouvant également atteindre quelques dizaines de fois l'épaisseur de la couche extraite (Styler et al., 1984 ; Richard et al., 1990). Plusieurs fractures apparaissent dans les matériaux contenus dans cette zone et des vides se créent à l'interface entre les strates. Enfin, encore au-dessus, se trouve la zone de flexion où les couches se déforment, ne laissant aucune discontinuité apparaître (Palchik, 2002).

Malgré ce procédé, des déplacements sont toujours perceptibles en surface plusieurs années après la fin de l'exploitation. Ces déplacements différés sont en lien avec la compaction progressive des matériaux foudroyés. Cette compaction retardée s'explique par plusieurs points. D'abord, ces matériaux sont moins résistants à la compression que les matériaux naturels. Les matériaux foudroyés ont un module d'Young initial environ 1 000 fois plus petit que le terrain initial (Pappas and Mark, 1993 ; Morsy and Peng, 2002 ; Iwanec et al., 2016). Ensuite, le gradient de contraintes entre les matériaux foudroyés et l'encaissant, combiné

aux propriétés visqueuses de ce dernier, est à l'origine des déformations des matériaux de comblement. Les contraintes sont initialement faibles dans les matériaux de comblement, voire nulles, et tendent à s'homogénéiser sur l'ensemble du massif. La contrainte verticale est la première à s'équilibrer avec la zone fracturée venant appuyer sur le sommet des éléments foudroyés. Les contraintes horizontales s'équilibrent plus tardivement (Yavuz, 2004). Toutefois, la compaction ne se fait pas à vitesse constante, expliquant les observations de déplacements longtemps après la fin des travaux. Les matériaux foudroyés se consolident au cours de la compaction, devenant de plus en plus raides à mesure que leur déformation augmente. Ce comportement fut déterminé lors de tests uni-axiaux en laboratoire sur des matériaux équivalents aux éléments foudroyés (Pappas and Mark, 1993). La vitesse de déformation est ainsi très forte au début du processus, puis diminue avec l'avancement de la compaction et l'augmentation de la contrainte (figure 3). Salamon (1990) a proposé une loi hyperbolique pour relier l'évolution de la déformation à la contrainte et ainsi reproduire le comportement asymptotique du phénomène. Toutefois, même si la fermeture des vides miniers fait consensus comme source principale des affaissements résiduels, certains désaccords subsistent sur la localisation de la compaction. Pour certains, il s'agit bien de la compaction des matériaux foudroyés (Stewart et al., 1984) alors que pour d'autres, il s'agit plutôt de la compaction des couches restées en place mais perturbées lors de l'exploitation (Luo and Peng, 2000).

Après avoir décrit les différents mécanismes induits en profondeur à l'origine des déplacements de surface, le suivi des affaissements miniers est brièvement présenté.

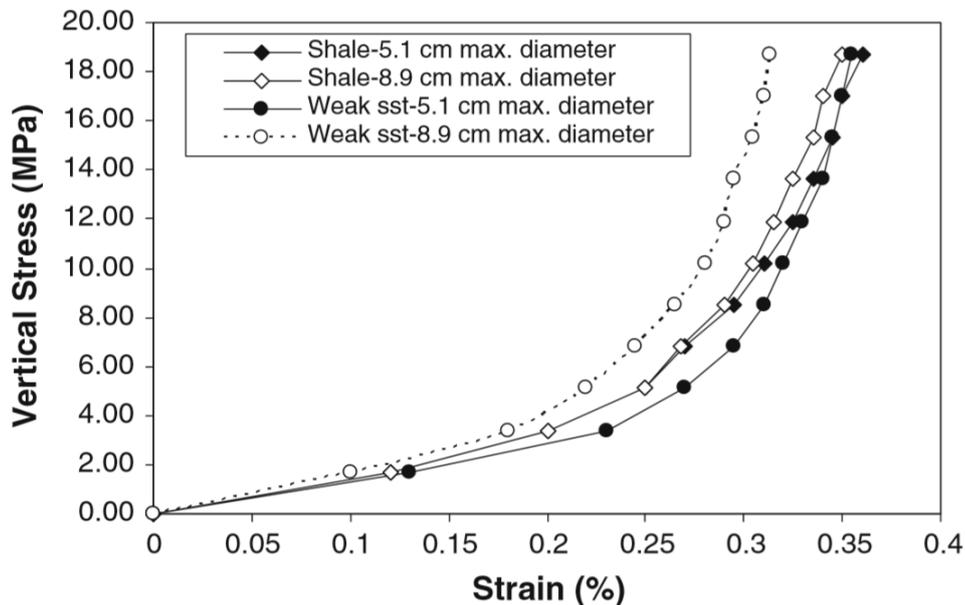


FIGURE 3 – Courbe de contrainte-déformation pour différents éléments équivalents aux matériaux foudroyés, produites lors d'essais oedométriques. Un essai oedométrique est un essai au cours duquel les déformations latérales sont fixées nulles, l'échantillon se déformant selon un seul axe. Ces essais sont assimilés aux situations de compaction au fond. La déformation tend vers une asymptote représentant l'état maximal de compaction (Karacan, 2010).

## Suivi des affaissements miniers

Dans la plupart des bassins miniers, le suivi des déplacements de surface, assuré par nivellement, est arrêté au bout de seulement quelques mois ou années après la fin de l'exploitation, les affaissements étant considérés stabilisés (Singh, 1986 ; Aissaoui, 1999). Ce faible suivi des affaissements résiduels s'explique par deux raisons majeures : le coût du suivi par nivellement et la faible amplitude annuelle de l'affaissement, passant de l'échelle métrique pendant la phase active à millimétrique pendant la phase résiduelle. De plus, les mesures réalisées ne concernent qu'un nombre restreint de points, ne permettant pas d'avoir la distribution spatiale des déplacements de surface et de pouvoir la suivre de manière régulière. Depuis le début des années 90, des images satellitaires radar à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR pour *Synthetic Aperture Radar*) sont régulièrement acquises. Le traitement de ces données par interférométrie radar (InSAR pour *Interferometric Synthetic-Aperture Radar*) permet de mesurer les déplacements de surface se produisant entre deux instants. Contrairement aux méthodes de suivi traditionnelles, l'InSAR offre l'opportunité de suivre le champ des déplacements de surface sur de larges zones et l'évolution de celui-ci avec une fenêtre temporelle régulière. Sous certaines conditions, les résultats InSAR atteignent une précision millimétrique (Ketelaar, 2009). La technique InSAR a déjà prouvé son efficacité pour suivre les affaissements miniers résiduels (Guéguen et al., 2009).

Maintenant qu'une vue d'ensemble concernant le phénomène étudié et le suivi de ses répercussions en surface est donnée, la zone d'étude est introduite.

## Les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA)

Le travail présenté ici a été établi en collaboration avec les gestionnaires des concessions des Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA), situées au nord-ouest de Mulhouse. L'histoire des MDPA remonte à l'orée du XX<sup>ième</sup> siècle, lorsque de la potasse est découverte de manière fortuite lors de forages de prospection pour du charbon et du pétrole. Les campagnes de prospection, essentiellement des forages auxquels de nouvelles méthodes s'ajoutèrent avec les avancées technologiques (électrique, sismique, gravimétrie, etc), permirent de délimiter l'étendue du gisement. Celui-ci s'étend du nord de Mulhouse jusqu'à Colmar et du pied des Vosges à la Forêt Noire. Toutefois, les concessions minières s'arrêtèrent à une quinzaine de kilomètres au nord de Mulhouse et ne franchirent pas le Rhin (figure 4). Finalement, ces concessions couvrirent quelques centaines de kilomètres carrés. Le sel de potasse est réparti en deux couches, séparées de 25 m, allant de 400 m de profondeur au sud des concessions à plus de 1 km de profondeur au nord. De 1910 à 2002, environ 568 millions de tonnes furent extraites, représentant un volume d'environ 200 000 000 m<sup>3</sup>. Au cours de cette période, les méthodes d'extraction se modernisèrent pour qu'à partir de 1980, l'exploitation ne se fasse plus qu'en longue taille couplée au foudroyage pour combler les vides miniers. Le suivi des déplacements de surface a été assuré par des campagnes répétées de nivellement, dont la

période pouvait être mensuelle. Les dernières campagnes de mesure remontent à 2005, pour une exploitation s'étant terminée en 2002.

Le bassin potassique alsacien est un parfait exemple d'ancien bassin minier exposé à un risque d'ennoyage tardif. En effet, le gisement de potasse se situe sous la nappe phréatique d'Alsace. Le gisement était initialement séparé de manière imperméable de la nappe par les différentes strates de matériaux. Mais, les nombreux forages réalisés lors de la phase de prospection ainsi que les puits de mines rebouchés suite à la fin de l'activité constituent autant de voies de communication. L'eau s'infiltré aussi bien le long des forages que des puits refermés. Des forages récents ont confirmé la présence d'eau dans certains travaux miniers profonds. Pour les anciennes exploitations susceptibles d'être exposées à des ennoissements tardifs, tout l'enjeu réside dans la capacité à estimer l'état de compaction des terrains foudroyés et l'étendu des vides miniers. Cet état des lieux permet par la suite de jauger l'impact potentiel de l'ennoyage sur les déplacements de surface et de pollution sur les réservoirs d'eau. Jusqu'à présent, la problématique des matériaux foudroyés intervient essentiellement pour l'étude de circulation de gaz (méthane) lors de l'exploitation afin d'anticiper le risque pour le personnel travaillant en profondeur (Karacan, 2010; Marts et al., 2014). Ces zones font ainsi régulièrement l'objet de modélisations géomécaniques à partir d'essais en laboratoire (Esterhuizen and Karacan, 2007; Zhang et al., 2019).

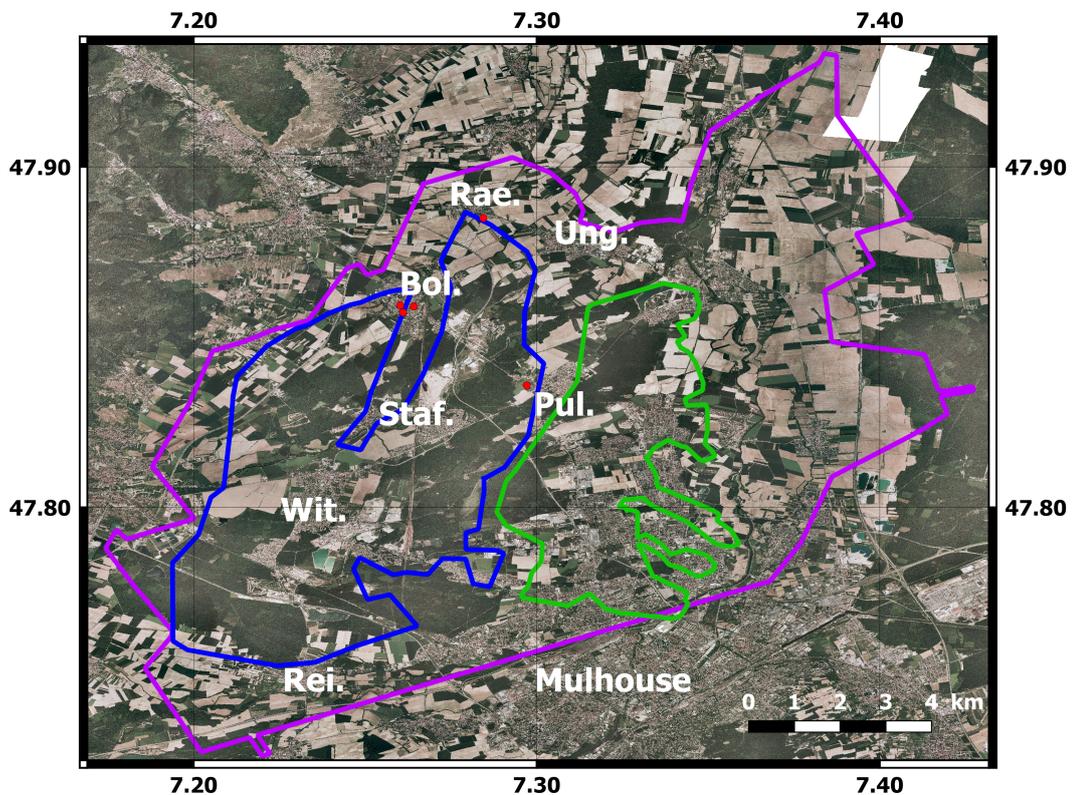


FIGURE 4 – Localisation des concessions des MDP. Le polygone violet représente les concessions des MDP, le bleu le secteur exploité ouest et le vert le secteur exploité est. Le fond de carte est composé d'orthophotographies du fossé Rhénan (IGN, 2002). Villages, Bol. : Bollwiller, Pul. : Pulversheim, Rae. : Raedersheim, Rei. : Reiningue, Staf. : Staffelfelden, Ung. : Ungersheim, Wit. : Wittelsheim.

À présent que le phénomène étudié et la zone d'intérêt sont définis, l'objectif de ces travaux de thèse est précisé et la démarche, exposée.

## Problématique de l'étude

Cette étude a pour objectif d'estimer les vides miniers résiduels dans le bassin potassique alsacien ainsi que leur évolution. Le suivi direct de l'évolution des vides miniers est complexe, et la complexité est croissante avec la profondeur du gisement. La création d'un modèle géomécanique est alors nécessaire pour estimer les vides résiduels à tout instant. Pour contraindre ce modèle, les déplacements de surface sont étudiés grâce à l'InSAR et des séries temporelles sont reconstituées sur plus de 20 ans. Ces déplacements renseignent sur la vitesse de compaction des matériaux foudroyés. En complément, des campagnes d'acquisitions lidar sont conduites pour étudier la déformation de galeries souterraines et caractériser le comportement du sel. Le comportement visco-plastique de l'encaissant est un paramètre clé influant sur la compaction. Le modèle géomécanique respecte à la fois les observations du champ de contraintes régional, les déformations suivies par campagnes lidar et les mesures de déplacements de surface obtenues par interférométrie radar. La combinaison de mesures de nivellement et de modèles géomécaniques a déjà abouti à des estimations de la porosité, ou de la proportion de vide, de zones foudroyées (Marts et al., 2014; Zhu et al., 2016). Néanmoins, la modélisation géomécanique n'a jamais été combinée aux mesures InSAR, ni aux relevés lidar pour quantifier les vides miniers.

Dans le **premier chapitre** de thèse, l'histoire des MDPA est exposée succinctement, résumant les conditions de constitution du gisement, présentant l'ensemble des données acquises par les MDPA au fil du temps. Le devenir de ce site industriel est également évoqué. Avec la fin de l'activité minière, beaucoup de données et de connaissances se sont perdues. Ce chapitre sert essentiellement à synthétiser tout ce qui a pu être retrouvé lors de ces travaux de thèse. Le **second chapitre** est consacré à l'application de la technique InSAR aux affaissements miniers du bassin potassique alsacien. La chaîne de traitement employée, adaptée aux caractéristiques surfaciques des concessions, ainsi que l'ensemble des données traitées sont présentés. La distribution spatiale des déplacements détectés sur l'ensemble de la période étudiée est comparée à la carte des travaux miniers. L'évolution temporelle des affaissements miniers est déterminée par la reconstitution de séries temporelles sur une vingtaine d'années. Avec cette reconstitution sur une longue période, les observations existantes d'affaissements miniers résiduels sont complétées. L'évolution temporelle de l'affaissement minier suit une somme de deux termes exponentiels, correspondant à des réponses distinctes du milieu qui sont discutées. Dans la continuité des observations, le **troisième chapitre** est centré sur l'utilisation du lidar pour le suivi de déformation de galeries profondes. La technologie lidar et le site des mesures accessible dans le cadre de cette thèse sont exposés. Le référencement des acquisitions en profondeur étant toujours un sujet délicat, un protocole de mise en station simple a été établi. Combiné aux faibles taux de déformations, les acquisitions sont

référencées de manière absolue. L'incertitude sur les distances mesurées s'avère relativement faible, de l'ordre de 2-3 mm. Enfin, pour répondre à la problématique sur les vides miniers, le **dernier chapitre** concerne la modélisation géomécanique de l'affaissement et des vides miniers. À partir des données de forages et d'observations géologiques, un modèle géologique équivalent est produit et "implémenté" dans le logiciel de modélisation géomécanique. En se basant sur d'anciens travaux sur la déformation et les contraintes des dépôts salifères du bassin de Mulhouse, le champ de contraintes reproduit est conforme aux observations. La loi de comportement du milieu salifère est ajustée à partir des campagnes lidar et du champ de contraintes modélisé. Une fois les exploitations modélisées géométriquement, les déplacements de surface obtenus par InSAR sont calculés pour évaluer les vides miniers et leurs évolutions. Finalement, le comportement retenu pour les matériaux, leurs impacts sur les déplacements de surface et l'évolution des vides miniers en profondeur sont discutés.

# Chapitre 1

## L'histoire des Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA)

### Sommaire

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1.1</b> | <b>La géologie du bassin potassique . . . . .</b>                  | <b>10</b> |
| 1.1.1      | Localisation de la potasse dans le Fossé Rhénan . . . . .          | 10        |
| 1.1.2      | La stratigraphie du bassin potassique . . . . .                    | 11        |
| 1.1.3      | Le dépôt des couches de potasse . . . . .                          | 13        |
| <b>1.2</b> | <b>La prospection dans le bassin potassique alsacien . . . . .</b> | <b>15</b> |
| 1.2.1      | Les forages miniers et pétroliers . . . . .                        | 15        |
| 1.2.2      | La prospection géophysique . . . . .                               | 17        |
| <b>1.3</b> | <b>L'activité souterraine aux MDPA . . . . .</b>                   | <b>18</b> |
| <b>1.4</b> | <b>L'après-mine aux MDPA . . . . .</b>                             | <b>22</b> |
| 1.4.1      | Les affaissements résiduels . . . . .                              | 22        |
| 1.4.2      | La salinisation de la nappe phréatique . . . . .                   | 23        |
| 1.4.3      | Le devenir du site de stockage et l'ennoyage des anciens travaux . | 24        |

---

### 1.1 La géologie du bassin potassique

Cette partie a pour vocation principale de décrire le bassin potassique alsacien et de résumer l'environnement de dépôt du gisement. Peu d'information présentée ici sont reprises par la suite dans les travaux. Cette partie offre avant tout une synthèse et un tour d'horizon des observations et des connaissances géologiques de la zone d'intérêt, pouvant aider à la préparation de futurs travaux concernant le bassin potassique alsacien.

#### 1.1.1 Localisation de la potasse dans le Fossé Rhénan

En 1869 et 1904, la potasse est mise au jour à l'extrémité sud de la plaine d'Alsace, au pied des Vosges, lors de forages à Dornach, aujourd'hui Mulhouse, puis à Wittelsheim ([figure 1.1](#)). Un premier forage est réalisé à la recherche de charbon, tentant de trouver le prolongement du bassin houiller de Ronchamp, au nord-ouest de Belfort et à la pointe sud des Vosges. Le charbon affleurerait près de Bourbach, à l'ouest de Mulhouse, dans les Vosges ([Vogt and Mieg, 1908](#)). Le second forage est entrepris pour détecter la présence de pétrole. Après analyse en laboratoire, le sel rose trouvé dans les forages s'avère être de la potasse. À l'époque, l'intérêt industriel et le prix élevé de cette ressource expliquent le démarrage de l'exploitation. Par la suite, 65 forages sont réalisés à travers le sud du Fossé Rhénan. En parallèle de ces forages, le 22 avril 1908 commence le fonçage du puits Amélie. Le puits est fini en février 1910, inaugurant l'exploitation de la potasse en Alsace. Suite aux deux guerres mondiales, l'extraction de la potasse est nationalisée et les diverses entreprises exploitantes réunies en une seule entité, les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA).

Malgré les deux guerres et la crise économique des années 1930, l'activité minière connaît un essor florissant grâce, entre autres, à la modernisation des méthodes de travail et à une meilleure cartographie des ressources du sous-sol. De 1904 à 1961, 250 forages sont réalisés à travers tout le bassin sud-rhénan pour circonscrire la potasse. Les données issues de ces forages ne sont que partiellement publiées ([Maïkovsky, 1941](#)). En plus des nombreux forages, les puits creusés pour l'exploitation apportent leur lot d'informations sur la disposition et la disparité des couches dans le bassin ([Wagner, 1929](#)). Au fil des inventions technologiques et des avancées scientifiques, des campagnes de prospections géophysiques ont complété les campagnes de forages. Des campagnes de prospection électrique, gravimétrique et sismique sont conduites des années 1930 à 1980.

Le gisement exploité par les MDPA est délimité par les communes de Heimsbrunn, Sausheim, Réguisheim, Soultz-Haut-Rhin, Cernay et Schweighouse-Thann, pour une superficie totale de plusieurs centaines de kilomètres carrés ([figure 1.1](#)). Cette délimitation existe également d'un point de vue géologique. Au nord, la limite est marquée par une faille plongeante dans la direction Ungersheim - Réguisheim. À l'ouest, la frontière correspond aux collines sous-vosgiennes, avec des failles parallèles aux Vosges dans la direction Soultz - Cernay. Au sud, la couche de potasse disparaît naturellement, formant un biseau, alors qu'à l'est, elle est

morcelée par de petites failles (Lagneu-Hérenger, 1965). Au final, les concessions minières couvrent une surface moins importante et ont les limites suivantes : l'Ill à l'est et les Vosges à l'ouest, Mulhouse au sud et l'axe Ungersheim - Raedersheim au nord.

### 1.1.2 La stratigraphie du bassin potassique

Les sondages réalisés par les MDPAs s'arrêtent aux profondeurs attendues des couches de potasse. En 1948, le Syndicat d'Études et de Recherches du Pétrole en Alsace (SERPA) est fondé. En 1951, un premier sondage est réalisé à Staffelfelden (Staffelfelden IV.DP.XXV) et atteint la profondeur de 1918 m. Ce sondage offre une vue d'ensemble des différents éléments géologiques constituant le bassin potassique alsacien (Lagneu-Hérenger, 1965). La stratigraphie est résumée dans le [figure 1.2](#). La composition géologique et chimique des carottes de forages et la description des minéraux ont fait l'objet d'une large analyse et synthèse dans les années 1980 (Blanc-Valleron, 1990).

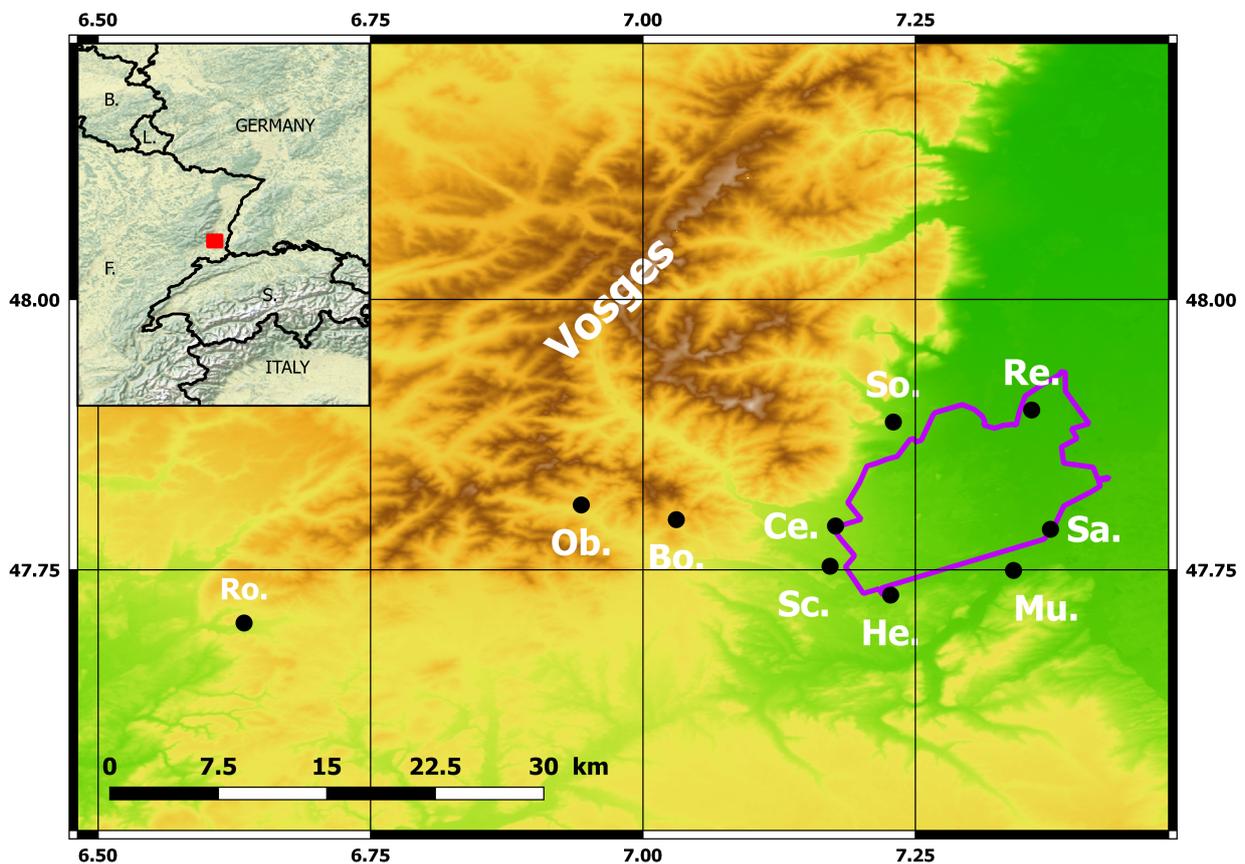


FIGURE 1.1 – Carte topographique du Sud du Fossé Rhénan. Le rectangle rouge dans l'encart indique l'emprise du bassin potassique alsacien et le polygone violet, le contour des concessions. Villes et villages, Bo. : Bourbach, Ce. : Cernay, He. : Heimsbrunn, Mu. : Mulhouse, Ob. : Oberbruck, Re. : Reguisheim, Ro. : Ronchamp, Sa. : Sausheim, Sc. : Schweighouse, So. : Sultz. Pays, B. : Belgique, F. : France, L. : Luxembourg, S. : Suisse.

La coupe issue du forage met en avant l'importance des dépôts de l'Oligocène, avec une épaisseur supérieure à 1000 m à Staffefelden, et de manière générale, supérieure à plusieurs centaines de mètres dans le bassin potassique alsacien. Par ailleurs, les deux couches de potasse appartiennent à l'étage supérieur de ces dépôts. Ces deux couches contiennent du sel de potasse (KCl), alternant entre de la sylvine et de la sylvinite, mélange entre sylvine et halite (NaCl) dû à l'isomorphisme entre les deux minéraux. Cependant, les couches divergent sur deux points (Meriaux and Gannat, 1980 ; Blanc-Valleron, 1990) :

- l'épaisseur, entre 1 et 2 m pour la couche la plus superficielle, contre entre 2 et 5.5 m pour l'autre ;
- la pureté, entre 30 et 40% de chlorure de potassium pour la plus superficielle, contre entre 23 et 32% pour la seconde.

| a  | Âge (Ma)          | b                                       | Époque                 | Subdivision   | Série ou formation                      | Acronyme                             | Compositions géologiques et épaisseurs observées |   |
|----|-------------------|---|------------------------|---|---|--------------------------------------|--|---|
| 23 | 23.5              | 30                                      | Quaternaire / Pliocène | Chattien  | Série Niederroedern (série d'eau douce) |                                      | Alluvions vosgiens, zone argileuse @ 5 à 250 m   |   |
|    |                   |   |                        |   | O L I G O C È N E                       | Série grise (série marine)           | MAC  | Marnes à Cyrènes @ 110 m  |
|    | CAM               | Couches à Mélettes @ 290 m              |                        |   |   |                                      |  |   |
|    | SAP               | Schistes à poissons (amphisiles) @ 14 m |                        |   |   |                                      |  |   |
|    | MAF               | Marnes à Foraminifères @ 6 m            |                        |   |   |                                      |  |   |
|    | F O R M A T I O N | S U P É R I E U R                       | MSS                    | Marnes sans sel avec gypse ou anhydrite @ 60 m                      |   |                                      |  |   |
|    |                   |   | SEL V                  | Marnes avec sel et anhydrite @ 260 m                                |   |                                      |  |   |
|    |                   |   | SEL IV                 | Marnes avec sel et anhydrite, 2 niveaux de potasse à la base @ 260m |   |                                      |  |   |
|    |                   | M O Y E N                               | MAH CEP                | Zone fossilifère : marnes à hydrobies, marnes en plaquette @ 80 m   |   |                                      |  |   |
|    |                   |   | S A L I F È R E        | SEL III   |   | Marnes avec sel et anhydrite @ 220 m |  |   |
|    |                   | SEL II                                  |                        | Marnes avec sel et anhydrite @ 140 m                                |   |                                      |  |   |
|    | MAL II            | Marnes vertes à Limnées 2 @ 170 m       |                        |   |   |                                      |  |   |
|    | 33 (35.7)         | 36.5                                    | É O C È N E            | P R I A B O N I E N   |   |                                      | SEL I  | Marnes avec sel et anhydrite Dont le grand banc de sel massif à la base @ 390 m |
|    |                   |   |                        |   |   |                                      | MAL I  | Marnes vertes à Limnées 1 @ 160m  |
|    |                   |   |                        |   |   |                                      |  | Argile basale, calcaire lacustre, dépôts sidérolithiques @ 0 à 100 m            |
| 37 | 40                | Jurassique                              |                        |   |   |                                      | Grande Oolithe (Dogger)                          |   |

FIGURE 1.2 – Coupe résumé des formations tertiaires du bassin de Mulhouse (repris et adapté de Blanc-Valleron, 1990). Les épaisseurs sont données à titre indicatif. La fourchette de temps est donnée par Curry and Odin (1982) (a) et Berggren et al. (1984) (b).

### 1.1.3 Le dépôt des couches de potasse

Les dépôts salifères contenant la potasse sont vieux d'environ 30-35 millions d'années (Martini, 1973; Schuler, 1990). Ces dépôts dans le Fossé Rhénan remontent au Cénozoïque, pendant l'Oligocène inférieur, au début du Rupélien. À cette époque, la superficie du Fossé Rhénan est découpée en plusieurs bassins de sédimentation. Parmi tous les bassins, la potasse est seulement présente dans celui proche de Mulhouse.

Le régime du dépôt à l'origine du bassin salifère serait de nature continentale à cause de conglomérats bloquant l'arrivée d'eaux marines supplémentaires (Düringer, 1988). Le bassin de sédimentation aurait été alimenté en eau par ruissellement et écoulement des eaux de pluie, venant notamment des Vosges voisines. Les dépôts proviendraient d'un lac salé, initialement rempli d'eau de mer, puis rempli avec le temps d'eaux moins salées. Cette idée est soutenue par deux faits : le passage d'une couche de potasse à une couche de marne de même épaisseur côté vosgien et une concentration en potassium plus forte au centre du bassin (Blanc-Valleron, 1990). La couche supérieure est moins étendue latéralement que la couche inférieure, témoignant du rétrécissement du bassin avec le temps et d'un faible approvisionnement en eau. Cette hypothèse est étayée par plusieurs indices :

- la présence de fossiles d'eau douce, voire saumâtre (Gaudant, 1981) ;
- la proportion de brome (Br) varie sur l'ensemble du dépôt ; ce différentiel traduit l'arrivée au cours du temps d'eaux moins concentrées en Br (Trauth et al., 1984) ;
- la composition isotopique des sulfates diffère de celle de l'eau de mer de l'époque (Fontes et al., 1991).

Les couches de potasse sont incluses dans le "Salifère supérieur" (figure 1.2) et l'origine de cet étage reste en discussion. Par exemple, l'interprétation de données géochimiques sur l'oxygène de certains dépôts permet de définir deux origines des sels : continentale (Fontes et al., 1991) et marine (Poutoukis, 1991). Des travaux plus récents tendent à montrer qu'il y a une proportion à hauteur de 40% de sel marin et 60% de sel continental pour aboutir au dépôt du Salifère supérieur dans le bassin de Mulhouse (Cendón et al., 2008).

D'après l'étude des différents sondages et couches géologiques, la potasse se serait déposée de manière régulière, cyclique (Blanc-Valleron, 1990). De plus, les couches de potasse ne viendraient pas du lessivage de couches plus anciennes. La proportion de Br mesurée dans la potasse est conforme à un dépôt primaire à partir d'eau de mer (Kiihn, 1968; Lutz, 1975). En outre, la concentration en rubidium (Rb) est bien trop importante pour des dépôts provenant des eaux marines, indiquant un approvisionnement d'eaux externes (ruissellement par exemple, Braitsch, 1966). Les modélisations du dépôt tendent à démontrer le rôle crucial d'un apport de saumure extérieure (Holser, 1966; Tucker and Cann, 1986). Les couches appelées "potasse" sont une succession, de bas en haut, de :

- pellicule ou filet d'argile, de carbonate et d'anhydrite ;
- sel gemme gris, jaunâtre ou blanc ;
- filet ou couche de sylvinite ou sylvine rose, couleur provenant d'atome de fer présent

dans la roche ;

- carnalite, uniquement présente au centre du bassin.

Pour la couche inférieure, ces dépôts sont ponctuellement interrompus par de minces couches de marnes. Les dépôts entre deux couches de marnes sont appelés sillons et en tout, cinq sillons sont distinguables pour la couche inférieure. La couche supérieure forme un unique sillon.

La précipitation de ces sels dépend de deux paramètres : la concentration des éléments chimiques dans la solution et la température. D'une part, les sels ne précipitent que quand la concentration des éléments est supérieure à la solubilité. D'autre part, la température impacte le produit de solubilité d'un composé, comme le prédit la loi de Van't Hoff. Dans ce bassin sédimentaire, une température faible favorise la précipitation du sel de potasse alors qu'une température plus élevée favorise sa mise en solution et la précipitation de la halite. Ainsi, les couches retrouvées dans le Fossé Rhéna peuvent s'expliquer par les changements climatiques au cours du temps (Blanc-Valleron et al., 1989). L'argile est apportée des Vosges par le ruissellement des eaux de pluie et se dépose avec les carbonates et les anhydrites. La halite précipite ensuite pendant la saison chaude avant de laisser place au sel de potasse quand les températures baissent et que la concentration de potassium est maximale dans la saumure. Le mur du dépôt de potasse est rugueux, traduisant une imbrication des deux sels, provenant de phénomènes de métamorphisme et de solution (Borchert and Muir, 1964). À l'opposé, le toit est lisse, témoignant d'une dissolution partielle du sel avant l'arrivée des dépôts suivants. Une cinquantaine de ces alternances est observée dans la couche inférieure contre environ vingt-six pour la couche supérieure. Ces alternances sont par ailleurs homogènes spatialement. Des cycles de dolomies accompagnées de marnes et d'anhydrites sont présents dans certains sédiments. Ces éléments se seraient déposés lorsque l'année n'était pas assez sèche pour permettre aux sels de potasse de précipiter.

La cyclicité du dépôt ne serait en revanche pas annuelle. Une carotte réalisée au puits MAX a permis d'envisager une étude temporelle de la sédimentation évaporitique. Il a été estimé que la couche inférieure se serait constituée en 2 500 ans contre 600 ans pour la couche supérieure. Les deux couches auraient environ 20 000 ans d'écart (Blanc-Valleron, 1990).

Enfin, l'épaisseur des deux couches est homogène à travers le bassin, les couches se seraient déposées dans un bassin à fond plat et relativement peu profond. Le sel étant un matériau déformable, l'affaissement continu du bassin, lié à l'accumulation sédimentaire, génère des affaissements graduels et progressifs dans le bassin. Ces courbures sont syn-sédimentaires alors que les failles sont en partie post-sédimentaires et en partie syn-sédimentaires, apparues au cours de l'effondrement du fossé rhéna. L'effondrement du fossé rhéna est en lien avec l'épisode de rifting, se produisant en parallèle des dépôts (Hinsken et al., 2007). À cause de ce dernier, les dépôts sont comprimés, plissés et faillés. Ces mouvements ont généré une hétérogénéité dans la disposition de la ressource, avec des sels de potasse allant de 400 m de profondeur au sud et jusqu'à plus de 1 km au nord. Des diapirs de sel se sont formés, notamment à l'est des concessions, parallèlement au Rhin actuel. Des inclinaisons sont apparues ;

les couches de potasse sont horizontales à très peu d'endroit. Mais, ce pendage n'excède pas les 20° sur l'ensemble du bassin. Ces mouvements post-sédimentaires ont pour conséquence la séparation de la ressource en plusieurs bassins. C'est l'une des raisons à l'origine de la création d'une zone exploitation est, et d'une seconde ouest (MDPA and Cesame, 2008).

## 1.2 La prospection dans le bassin potassique alsacien

Afin d'optimiser l'exploitation, plusieurs méthodes de prospection sont employées pour cartographier le sous-sol, adaptées à la ressource recherchée. Ces campagnes d'exploration servent d'abord à localiser la ressource minière avant que les ressources pétrolières ne soient découvertes. Les campagnes les plus récentes sont réalisées pour une troisième activité : le stockage de gaz dans les diapirs de sel. Avec le temps, et surtout l'arrêt de l'activité, les données acquises à travers les époques ont tendance à être oubliées, voire à se perdre. Des mémoires techniques ont été rédigés par les MDPAs en 2008 pour conserver une trace concernant les sondages, les puits, les méthodes d'exploitation, les affaissements, les terrils et la nappe phréatique.

Outre le fait d'introduire les données exploitées plus loin dans le manuscrit, cette partie a pour vocation de résumer l'ensemble des campagnes de prospection conduites dans le bassin potassique alsacien. Comme pour la partie précédente, celle-ci vise à aider à la préparation de futurs travaux concernant le bassin potassique alsacien en indiquant l'ensemble des données à disposition.

### 1.2.1 Les forages miniers et pétroliers

Afin de cartographier la ressource minière et de comprendre sa répartition dans le bassin potassique, plusieurs forages ont été réalisés à travers les concessions (figure 1.3), mais aussi au-delà pour s'assurer ou non de la présence de la potasse. Les premiers d'entre eux sont antérieurs à 1910 et d'autres ont été conduits dans les années 1950. À la fin de l'exploitation, plusieurs centaines ont été forées. L'objectif principal de ces sondages était la détection des couches de potasse, expliquant leur faible profondeur (quelques centaines de mètres). Une attention particulière a été portée sur les épaisseurs, la composition chimique des couches ainsi que les sillons rencontrés localement. Pour les forages les plus récents, ceux-ci ont été couplés à des diagraphies. Les diagraphies opérées avec un Gamma-ray neutron ont aidé à la reconstitution lithologique des couches traversées avec une excellente précision (Blanc-Valleron, 1990). Ces campagnes de forage ont notamment permis de mettre en exergue l'augmentation de la profondeur du gisement vers le nord ainsi que la remontée d'un diapir de sel massif à quelques centaines de mètres de profondeur. Les archives des forages sont consultables dans les locaux du BRGM Alsace et partiellement en ligne<sup>1</sup>.

---

1. [www.infoterre.bgrm.fr](http://www.infoterre.bgrm.fr)

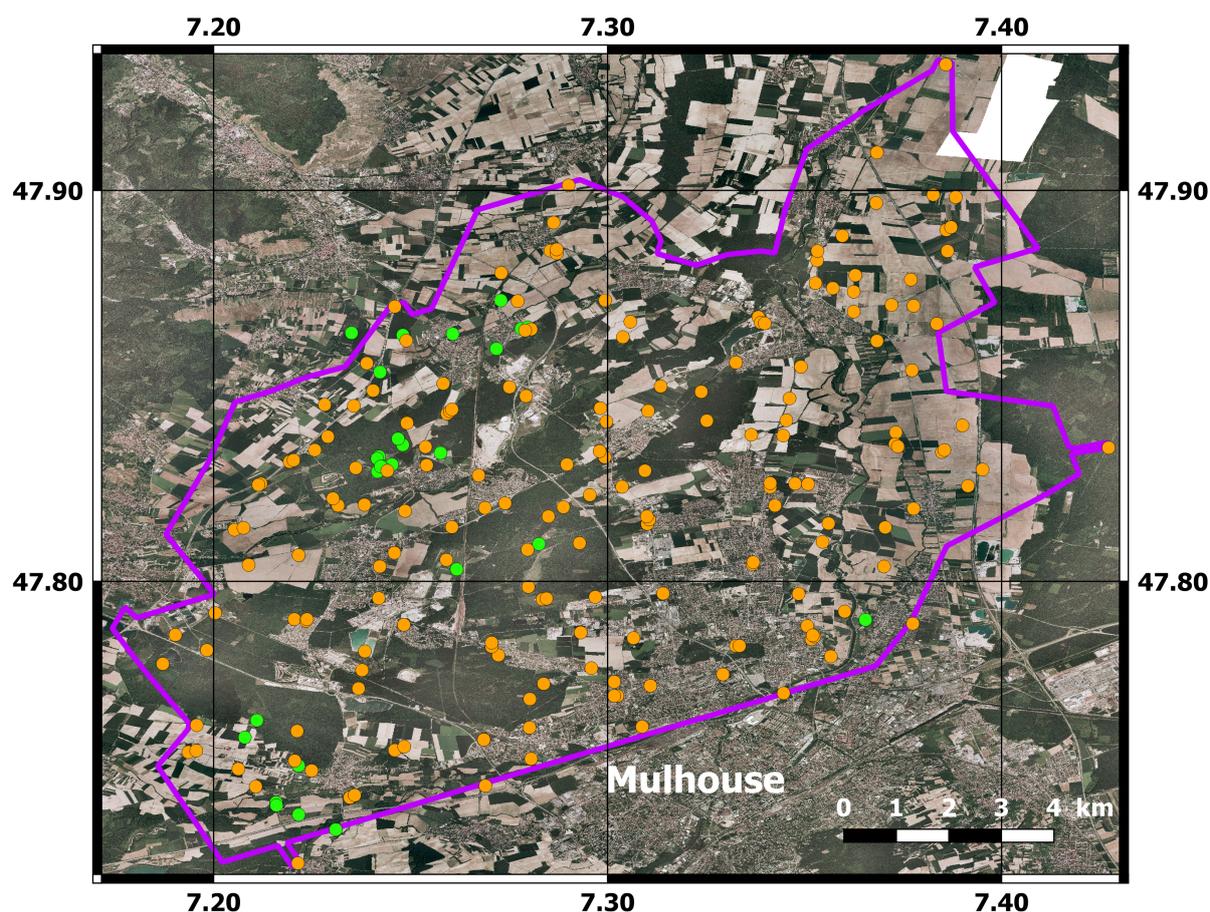


FIGURE 1.3 – Localisation des sondages miniers (orange) et des puits pétroliers (vert) à travers les concessions des MDPA. La couverture des sondages miniers est assez homogène à travers les concessions alors que les sondages pétroliers sont concentrés sur l'Ouest seulement aux abords des réservoirs détectés.

Sous l'impulsion du SERPA, des campagnes de forages ont été conduites pour la recherche de pétrole. Le forage DPXXV, réalisé à Staffelfelden, en a détecté à environ 1 900 m de profondeur. L'extrémité du forage était enduite d'huiles pétrolières. Plusieurs forages se montrant fructueux, l'exploitation pétrolière est lancée dans le bassin potassique au début des années 1950 à Staffelfelden, puis élargie à Reiningue et Bollwiller, où deux autres réservoirs sont caractérisés. En 1968, toutes les exploitations pétrolières sont arrêtées, les gisements n'étant plus rentables et des problèmes liés à la perméabilité des roches profondes sont rencontrés. Au final, l'exploitation pétrolière n'a eu lieu que dans la partie ouest des concessions. Les exploitations de Reiningue et Bollwiller n'ont extrait qu'une faible quantité de pétrole par rapport à celle de Staffelfelden, elle-même faible par rapport à Pechelbronn (tableau 1.1). En tout, 24 forages pétroliers sont effectués à travers les concessions (figure 1.3). Au début des années 1970, de nouvelles prospections sont menées sous l'impulsion du groupe pétrolier Shell. Les campagnes se sont arrêtées en 1990 sans grands résultats.

| Exploitation            | Période d'activité | Production totale [t] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| Staffelfelden           | 1954-1963          | 55 475                |
| Reiningue               | 1955-1968          | 18 165                |
| Bollwiller              | 1958-1963          | 695                   |
| Alsace hors Pechelbronn | 1954-1968          | 432 714               |
| Pechelbronn             | 1740-1970          | 3 300 000             |
| Potasse (Est)           | 1913-1986          | 144 728 300           |
| Potasse (Ouest)         | 1910-2002          | 422 996 700           |

TABLE 1.1 – Tonnages de pétrole extraits dans le bassin potassique en comparaison de l'exploitation alsacienne sur la même période et de celle de Pechelbronn dans son ensemble. Les tonnages de l'exploitation minière sont rappelés à titre indicatif (Sittler, 1972).

Des carottes des forages sont également conservées à la carothèque de Merkwiller-Pechelbronn située à Preusdorf, dans le nord de l'Alsace. Ces échantillons de roche sont exploitables lors de tests en laboratoire. Les caractéristiques mécaniques des matériaux du bassin potassique pourraient ainsi être déterminées de manière spécifique. Par exemple, les propriétés et caractéristiques mécaniques du sel du bassin potassique alsacien ont été étudiées à plusieurs reprises en laboratoire (Vigier, 1983; Pouya, 1991; Vouille, 1992; Kazan, 1994; Thorel, 1994; Cosenza, 1996). Ces échantillons sont ponctuellement utilisés pour étudier d'autres aspects du Fossé Rhénan. Par exemple, à l'EOST, des échantillons de marnes provenant du bassin potassique sont utilisés pour étudier les flux de chaleur et estimer la capacité thermique de bancs de marnes dans la partie nord du Fossé Rhénan (Harlé et al., 2019).

### 1.2.2 La prospection géophysique

La première campagne électrique est conduite au milieu des années 1920 par les frères Schlumberger. Leur étude est la première à montrer l'existence de crêtes salines d'origine diapirique dans le bassin potassique, notamment près de Meyenheim. Suite à cela, des forages sont réalisés aux alentours. Au milieu des années 1950, de nouvelles campagnes électriques sont commandées à la CGG pour étudier les phénomènes diapiriques. L'objectif était alors de permettre l'identification de la base des alluvions, l'épaisseur des marnes oligocènes et le toit du premier sel massif. Ces travaux sont résumés dans un rapport de stage à l'EOST (Alvarez, 1982).

À partir des années 1950, des campagnes de sismique réflexion sont entreprises à travers le bassin potassique alsacien. Celles-ci avaient trois objectifs : délimiter les diapirs, suivre les niveaux potassiques et cerner les réservoirs pétroliers. Lors des investigations du groupe Shell, de nouveaux profils sont acquis dans les années 1970 et 1980 (Lutz and Cleintuar, 1999). Une cartographie complète des profils sismiques est disponible au BRGM. Les archives sont réparties entre le BRGM et l'EOST. Le traitement et l'interprétation de données sismiques

dans des couches de sel ont toujours constitué un véritable challenge à cause des propriétés mécaniques du sel. Depuis, les outils se sont développés et permettent de caractériser des réservoirs pétroliers sous plusieurs centaines de mètres de sel. Dans le cas du bassin potassique alsacien, des travaux récents ont été conduits sur les vieilles données de sismique pour caractériser le réservoir pétrolier proche de Staffelfelden (Roussé et al., 2016).

La présence avérée de banc de sel gemme, révélée par la prospection électrique et les sondages, attirent l'attention de certains industriels (Jung et al., 1936). Les couches de sel sont régulièrement utilisées pour stocker des fluides (Staudtmeister and Rokahr, 1997 ; Evans, 2009). Dans les années 1970, Gaz de France a commencé à utiliser cet encaissant pour ses réservoirs et se lance à la recherche de potentiels réservoirs. Le diapir de sel au nord-est des concessions est alors retenu comme site potentiel.

Pour ces activités de stockage, les réservoirs proviennent du lessivage de sel gemme massif. Le sel est dissout par l'injection d'eau sous pression, puis est évacué sous forme de saumure. Le gaz est ensuite injecté dans la cavité ainsi excavée. La connaissance des caractéristiques du sous-sol est alors primordiale. Des campagnes gravimétriques ont été menées près d'Ensisheim pour caractériser le diapir. Des mesures ont été réalisées le long du diapir, ainsi que perpendiculairement à celui-ci. Ces travaux ont été combinés aux mesures faites par les MDPA lors de différentes prospections à travers le bassin potassique entre 1947 et 1951 et à d'autres travaux antérieurs. La description des mesures, le traitement des données, les résultats et leur interprétation sont consultables dans les rapports de stage ingénieur de l'EOST (Alvarez, 1982; Lutz, 1999; Robreau, 2004). Une partie de ces résultats est publiée (Edel et al., 2002). Par la suite, les données sont de nouveau employées pour l'étude structurale du Fossé Rhéan (Rotstein et al., 2006). Le diapir d'Ensisheim est modélisé en couplant les résultats des campagnes de sismique réflexion et de gravimétrie (Robreau, 2004). Malgré un décret paru au journal officiel autorisant la création du réservoir de gaz dans le bassin potassique alsacien, l'activité ne se mit jamais en place.

### 1.3 L'activité souterraine aux MDPA

Avec quasiment un siècle d'existence, les MDPA illustrent l'évolution et la modernisation des méthodes d'extraction des minerais. L'extraction débute aux environs de Wittelsheim dans la partie ouest des concessions, dans laquelle neuf puits sont foncés, contre huit dans la partie est des concessions (figure 1.4, cercle bleu clair). La multiplicité des puits s'explique par deux points essentiels : la superficie du gisement et la présence de deux exploitants sur les concessions, un allemand et un alsacien, plus tard fusionné pour former les MDPA. En 1931, quatre autres puits sont foncés, trois à l'est et un à l'ouest, et de 1960 à 1973, les trois derniers puits sont forés à l'ouest (figure 1.4). Un total de vingt-quatre puits sont creusés pour l'extraction de la potasse. L'essentiel des puits destinés à l'extraction est en place en 1921, à l'exception d'Ungersheim (1931) et Staffelfelden (1971). Les secteurs exploités les plus anciens sont situés au pied des puits et l'exploitation s'est étendue à partir de ces puits.

À partir de 1990, les secteurs exploités se situent aux extrémités des concessions, au sud et au nord, ainsi qu'au centre.

Au début des années 1910, seule la couche inférieure est exploitée, car ayant une plus forte épaisseur. Du fait de la dureté du minerai, l'explosif est utilisé pour l'abattage afin de récupérer le minerai (MDPA, 2008b). Toutefois, en procédant de la sorte, la couche supérieure devient inexploitable. Par ailleurs, le taux de récupération initial est faible, inférieur à 50%. Suite à l'effondrement de piliers et de galeries, des dégagements de méthane provenant des intercalaires de marnes se produisent. En tenant compte de ces diverses observations, les procédés et les méthodes sont repensés avec notamment l'extraction de la couche supérieure en premier. Ces changements traduisent la volonté d'augmenter le rendement, la sécurité au fond et de diminuer la perte de ressources. L'extraction s'organise en tailles, l'exploitation est orientée selon la largeur du gisement et avance perpendiculairement à cette dernière.

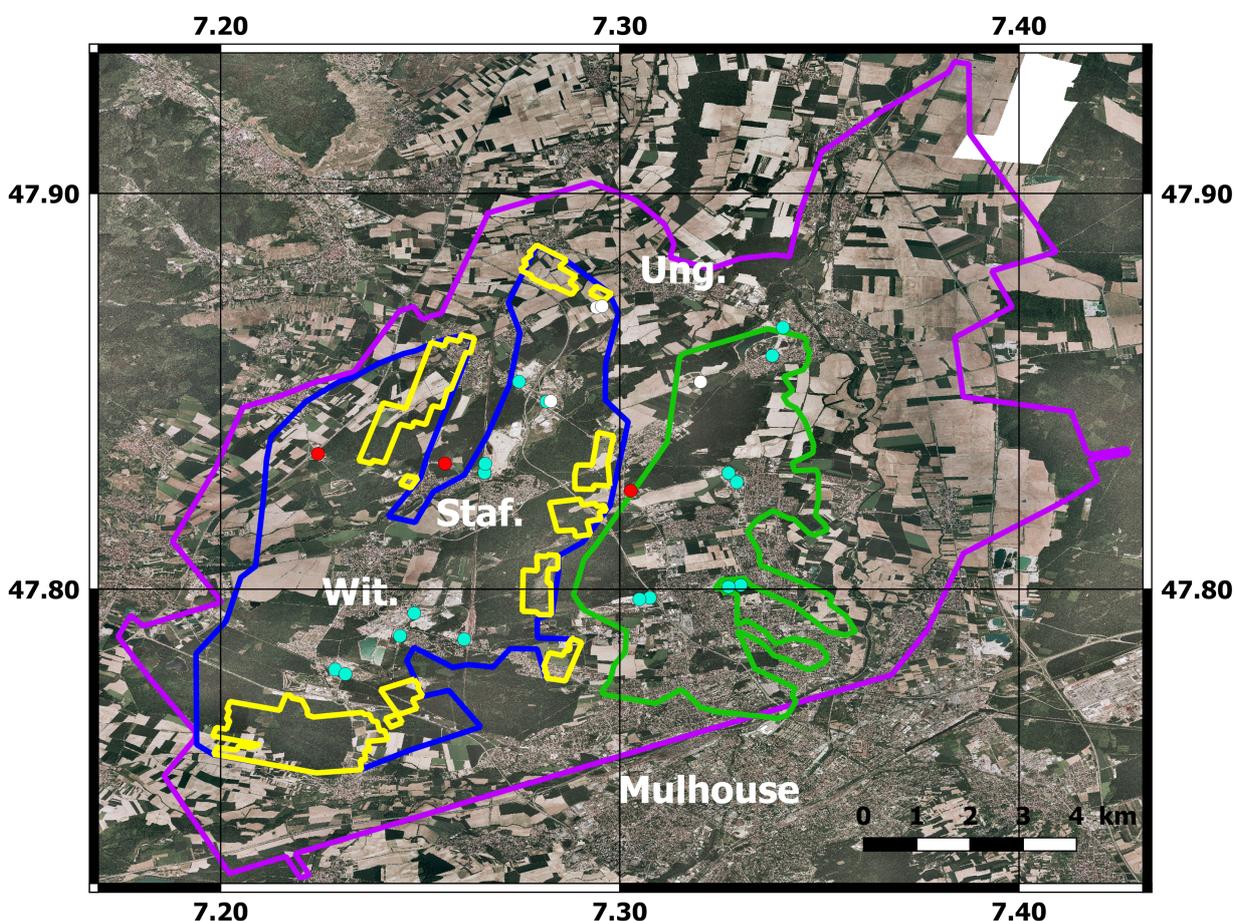
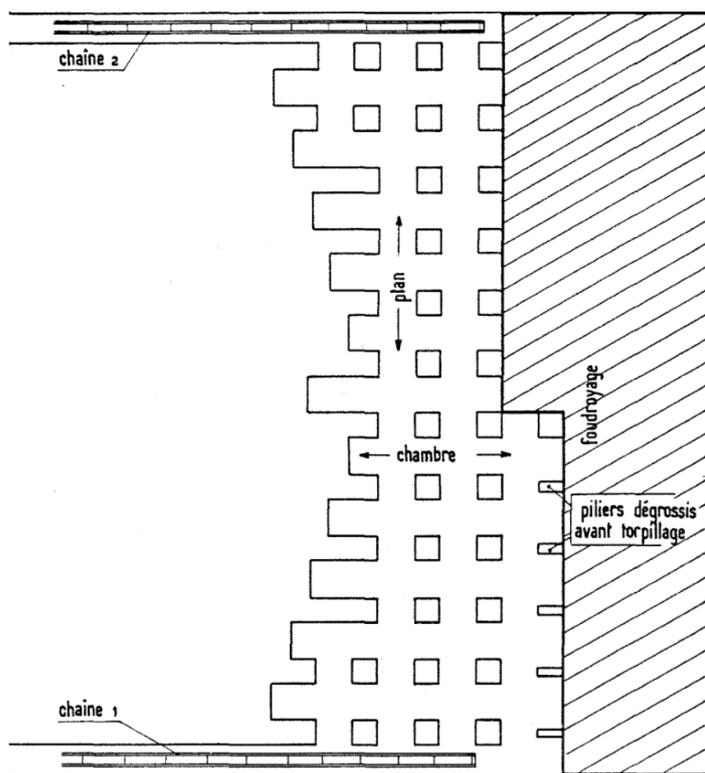


FIGURE 1.4 – Localisation des puits miniers à travers les concessions minières en fonction de leur date de fonçage. Les cercles en bleu clair indiquent les puits creusés avant 1921, en blanc ceux creusés à la fin des années 1920 et en rouge, après 1960. Le polygone bleu représente le secteur exploité ouest, le vert le secteur exploité est et les polygones jaunes les contours des secteurs exploités à partir de 1990.

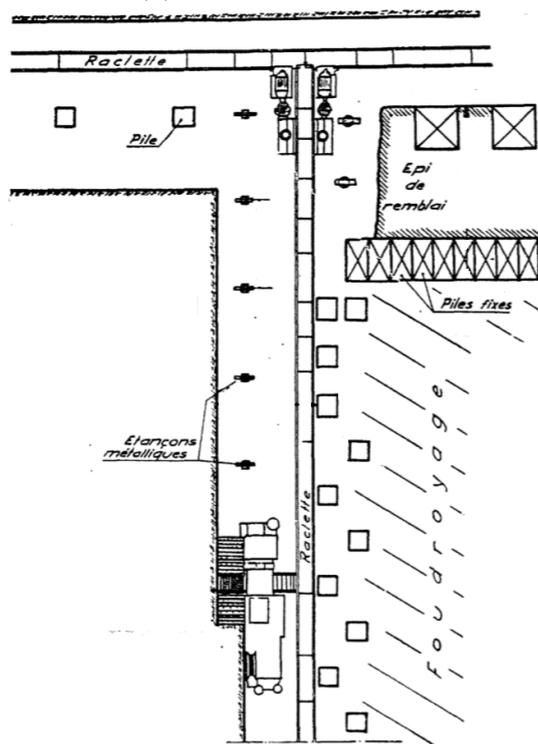
L'extraction évolue vers deux grandes familles de méthodes : les chambres et piliers, et les longues tailles. Dans la première, des piliers sont laissés à intervalle régulier afin d'assurer le maintien des galeries pendant l'exploitation. Ces piliers sont ensuite dégrossis et s'effondrent sous le poids des terrains ([figure 1.5a](#)). À la différence des chambres et piliers, avec la méthode des longues tailles, aucun pilier n'est laissé et des structures de soutènement mobiles sont déplacées pour assurer le maintien des galeries lors des opérations ([figure 1.5b](#)). Pendant l'après-guerre, ces deux méthodes se mécanisent avec le développement de machines spécifiques. Par exemple, l'invention de la haveuse optimise le temps d'extraction. La machine excave la couche d'intérêt pour extraire la ressource. L'automatisation du travail augmente le rendement tout en limitant la perte des ressources exploitables. Vers la fin des années 1970, après une vingtaine d'années de développement, la méthode des chambres et piliers est écartée. La faible productivité de la méthode par rapport aux longues tailles, combinée à la perte d'efficacité face à un pendage supérieur à  $10^\circ$ , justifient cet arrêt. Sur la même période, les haveuses sont perfectionnées et adaptées. La hauteur maximale d'extraction passe de 2.3 m à 3.5 m, permettant l'extraction de la couche inférieure en un seul passage. Cette hauteur atteint 4 m en 1985. À partir de 1980, le havage intégral en longue taille devient la seule méthode d'extraction employée aux MDPA.

En parallèle de l'extraction de la potasse, les vides miniers sont gérés. Durant la première trentaine d'années, les vides miniers sont comblés par remblaiement. Cette technique consiste à descendre des matériaux inertes pour remplacer le minerai. Ces matériaux proviennent soit de la surface, soit des insolubles de traitement. À partir des années 1930, le foudroyage se développe essentiellement pour des raisons financières. Cette méthode s'accompagne aussi d'un gain de productivité. Il n'est alors plus nécessaire de descendre d'autres matériaux pour combler les vides. D'après les estimations internes, le foudroyage concerne 90% des secteurs exploités et est employé de manière systématique à partir des années 1980.

Dans les années 1980, des expérimentations sont entreprises pour appliquer l'extraction par dissolution aux couches de potasse. Avec cette technique, la ressource est dissoute directement en profondeur par fracturation hydraulique avant d'être traitée en surface pour séparer les différents composants. Cette méthode est envisagée pour exploiter la ressource profonde au nord d'Ensisheim et Ungersheim, le gisement dépassant les 1 100 m de profondeur. À ces profondeurs, l'exploitation est complexe pour les mineurs à cause des fortes températures, supérieures à  $50^\circ\text{C}$ . Cependant, les contraintes locales ne permettent pas d'appliquer la méthode de manière optimale. À petite échelle et dans les couches de sel, les résultats montrent que l'orientation des fractures hydrauliques est aussi bien horizontale que verticale, dans des directions différentes, traduisant un champ de contraintes isotrope ([Cornet et al., 1988](#)). Dans les couches de marnes anhydritiques et à grande échelle, les fractures hydrauliques sont verticales et orientée selon le nord ([Cornet and Burlet, 1992](#)), traduisant un champ de contraintes anisotrope. Au milieu des années 1980, la couche supérieure n'est plus exploitée et vers la fin de la décennie, l'activité du secteur est s'arrête, la ressource exploitable étant épuisée.



(a) Chambres et piliers



(b) Longue taille

FIGURE 1.5 – Schéma de la méthode d'extraction par chambres et piliers (haut) et en longue tailles (bas) (modifiés d'après MDPA, 2008b). L'exploitation se dirige vers la gauche dans les deux schémas. Les matériaux sont évacués au niveau soit des chaînes, soit des raclettes. Les piliers mesurent 3 m sur 3 m, et les chambres sont larges de 4.5 m. Les piles et les étançons métalliques sont les structures de soutènement amovibles.

Au début des années 1990, les MDPA anticipent la raréfaction de la ressource et envisagent une fin d'exploitation pour 2005-2006. Afin de préserver ce bassin d'emploi et maintenir une activité de grande échelle, une reconversion est considérée (Giovanetti, 2010). La possibilité de la création d'un site de stockage de déchets est alors envisagée. La mine Amélie a par ailleurs servi de site test à l'ANDRA pour un projet de stockage de déchets radioactifs dans d'autres couches salifères (Raynal et al., 1993 ; Slimane et al., 1996 ; Kazan and Ghoreychi, 1997). Au final, un projet de stockage de déchets ultimes non-radioactifs dans la couche de halite, 25 m sous la couche inférieure de potasse, est retenu. Des essais en laboratoire et *in situ* sont menés pour caractériser physiquement la roche (Cosenza et al., 1999) et proposer le dessin du réseau de galeries pour le site. Le stockage se fait par blocs, creusés au fur et à mesure en fonction de l'apport des déchets. Un bloc est constitué de trois galeries longues de 220 m, large de 5.5 m et haute de 2.8 m, recoupées tous les 20 m par des galeries de 70 m de long, formant des piliers de 20 m sur 20 m. L'activité est lancée avec le creusement du premier bloc en 1998 et les premiers déchets stockés en 1999.

### 1.4 L'après-mine aux MDPA

L'arrêt de l'activité minière ne signifie pas la fin du travail pour l'exploitant. Dans la période d'après-mine, il incombe au gestionnaire de gérer le devenir des sites et les problèmes engendrés par l'activité souterraine. Dans le cas des MDPA, trois dossiers sont toujours en cours de traitement : les affaissements résiduels, la désalinisation de la nappe phréatique et, le devenir du site de stockage et l'ennoyage des vides miniers.

#### 1.4.1 Les affaissements résiduels

À travers les concessions des MDPA comme dans d'autres bassins miniers, le suivi des "niveaux" de surface est assuré par des mesures répétées de nivellement. Des campagnes de nivellement sont supervisées en parallèle de l'exploitation. Les mesures peuvent être mensuelles lorsque l'exploitation au fond est proche des points suivis en surface, mais la période de mesure varie d'un point à l'autre. Une fois l'exploitation passée, les mesures sont plus éparées avec une mesure tous les trois à quatre mois. Il semble aussi que seulement une à deux mesures soient réalisées avant l'arrivée de l'exploitation. Ainsi, l'évolution complète n'est que rarement suivie. Néanmoins, les mesures dépeignent les trois phases d'affaissement minier (figure 1.6). Les résultats de ces campagnes révèlent que les affaissements miniers atteignent l'échelle métrique au cours de la phase active. Les mémoires techniques révèlent un grand nombre de points de mesure à travers tout le bassin potassique (MDPA, 2008a). Cependant, les données récentes se résument en six courbes dans le rapport et quelques grilles de mesures en annexes. Par ailleurs, ces grilles de mesures se limitent à une donnée avant l'exploitation puis quelques mesures ne couvrant pas plus d'une année pendant la phase résiduelle. À ce jour, les archives de nivellement antérieures à 1990 se trouvent aux archives

départementales de Colmar. Les archives complètes couvrant la période de 1990 à 2005 n'ont pas été retrouvées.

Depuis 2014, des mesures de nivellement semestrielles sont de nouveau effectuées dans six villages : Reiningue, Wittelsheim, Staffelfelden, Bollwiller, Feldkirch et Raedersheim. Ces nouvelles campagnes visent à quantifier les déplacements résiduels en lien avec l'exploitation. Elles ne concernent que la partie ouest des concessions, lieu des exploitations les plus récentes, et sont réalisées tous les six mois. Ces campagnes révèlent l'occurrence d'affaissement de l'ordre de quelques millimètres par an.

### 1.4.2 La salinisation de la nappe phréatique

Un autre risque majeur en lien avec l'exploitation minière est la contamination du sous-sol par les matériaux remontés en surface et non exploités. Dans le cas du bassin potassique, cette pollution s'est manifestée par la salinisation de la nappe phréatique rhénane (Lucas et al., 2008). Il s'agit de l'une des plus grandes réserves d'eau souterraine d'Europe mais dont la profondeur est faible, de quelques centimètres à une vingtaine de mètres.

Cette infiltration de sel dans le sous-sol est la conséquence directe de la création de terrils, des amas en surface de matériaux profonds. Aux MDPAs, seuls le KCl et le brome, et ponctuellement la halite, contenus dans le sel de potasse sont valorisés. Deux procédés existent pour séparer les différents éléments :

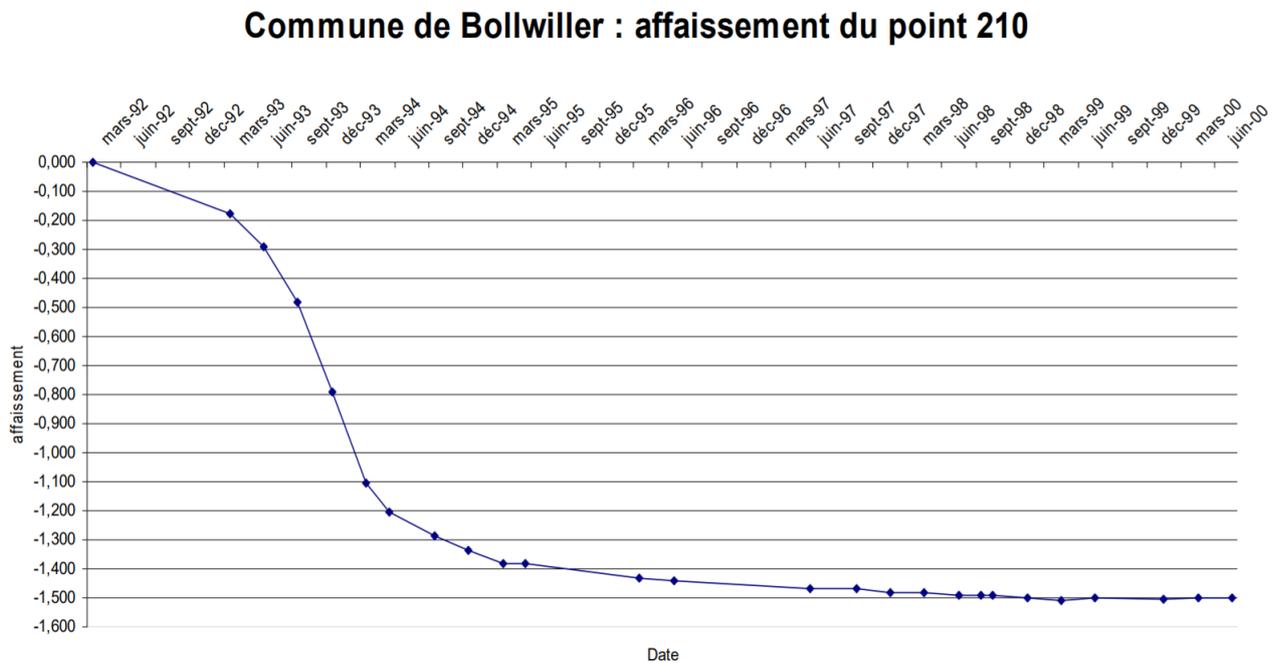


FIGURE 1.6 – Affaissement minier suivi par nivellement au point 210 de Bollwiller lors de l'exploitation (MDPA, 2008a). La phase initiale a lieu jusqu'au début de l'année 1993, puis la phase active jusqu'à la fin de l'année 1995 et enfin, la phase résiduelle à partir de 1996.

- un traitement thermique avec dissolution à chaud et recristallisation à froid. Cette méthode s'appuie sur la différence de solubilité des minéraux ;
- un traitement par flottation à froid. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un réactif spécifique aux cristaux de KCl.

Le KCl ainsi récupéré est commercialisé et le reste, notamment les insolubles et la saumure, laissé en surface dans les différents terrils. Avec le temps, des éléments, comme le NaCl, pénètrent dans le sous-sol et atteignent la nappe phréatique.

Pour lutter contre cette pollution, les MDPA ont construit un SAUMODUC à destination du Rhin pour évacuer la saumure pompée de la nappe. Ce rejet massif d'eau salée dans le Rhin provoque un incident diplomatique international ([Dieperink, 2011](#)). Depuis les années 1990, pour prévenir de la pollution future des terrils, les MDPA les imperméabilisent et végétalisent, ou les dissolvent de manière accélérée ([Fischer et al., 2016](#)). En complément, le pompage est maintenu pour évacuer la saumure restante de la nappe. Par ailleurs, cette activité est connue pour induire des déformations de surface aux abords des sites de pompage. Cette source de déformation peut potentiellement se superposer à l'affaissement minier et compliquer le suivi de ce dernier par la technique d'interférométrie radar. Les sites de pompage sont arrêtés au fur et à mesure de la désalinisation. En 2008,  $7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  de  $\text{Cl}^-$  sont déversés dans le Rhin par le SAUMODUC, contre  $114.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  en 1987.

### 1.4.3 Le devenir du site de stockage et l'ennoyage des anciens travaux

En 2002, un incendie se déclenche dans les galeries souterraines du site de stockage. Cet incendie a mis un terme à l'activité de stockage ainsi qu'à l'exploitation de la potasse. Les galeries de stockages ainsi que celles aux alentours sont encore accessibles aussi bien pour la réalisation de mesures que pour le prélèvement d'échantillons géologiques. Par ailleurs, l'avenir du site est incertain à cause de l'ennoyage constaté des anciens travaux miniers, l'eau s'infiltrant le long des puits rebouchés. De par ce risque, le site fait l'objet d'un suivi particulier et multidisciplinaire, allant de mesures de convergences de galeries à la réalisation de modèles géomécaniques. Concernant le site, à ce jour, la direction s'oriente vers une mise en place de bouchons en béton pour sceller les accès au site. Concernant les terrains foudroyés, avec les gestionnaires, nous avons collaboré pour produire un état des lieux des vides miniers quelques décennies après l'arrêt des travaux.

# Chapitre 2

## Détection des déplacements de surface par interférométrie radar (InSAR)

### Sommaire

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.2</b> | <b><i>Interferometry Synthetic-Aperture Radar</i> : théorie</b> | <b>27</b> |
| 2.2.1      | La création d'une image SAR                                     | 27        |
| 2.2.2      | Interférométrie d'images SAR                                    | 29        |
| 2.2.3      | Traitement avec le logiciel StaMPS                              | 31        |
| <b>2.3</b> | <b>Les archives d'images SAR</b>                                | <b>34</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Résultats</b>  | <b>36</b> |
| 2.4.1      | Distribution spatiale des vitesses de la surface du sol         | 37        |
| 2.4.2      | Suivi temporel de l'affaissement minier                         | 40        |
| 2.4.3      | Les autres signaux  | 48        |
| 2.4.4      | Le site de stockage   | 50        |
| <b>2.5</b> | <b>Discussion</b>   | <b>51</b> |
| 2.5.1      | Les limites de l'InSAR appliqué au bassin potassique alsacien   | 51        |
| 2.5.2      | Les sources potentielles de déplacements                        | 53        |
| 2.5.3      | L'affaissement résiduel   | 56        |
| <b>2.6</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>60</b> |

---

## 2.1 Introduction

Le Radar à Synthèse d'Ouverture, ou *Synthetic Aperture Radar* (SAR), a été adapté aux satellites pour l'observation de la surface terrestre par télédétection (Massonnet and Adragna, 1990). Les images SAR peuvent être utilisées pour étudier et suivre l'évolution du sol terrestre (Tronin, 2006) incluant la topographie et la déformation, la végétation (Hyypä et al., 2008), les glaces (Bamber and Rivera, 2007) et l'eau (Mohammadimanesh et al., 2018), mais aussi la topographie et la déformation de la surface terrestre à partir de l'interférométrie radar (*Interferometry Synthetic Aperture Radar* ou InSAR).

Les images SAR satellitaires sont acquises et enregistrées régulièrement depuis le début des années 1990, constituant des archives importantes permettant un suivi de zones sur des périodes de plusieurs années, voire plusieurs décennies (Bonì et al., 2015; Declercq et al., 2017; Aslan et al., 2018). Pour les MDPA, l'archive de données SAR couvre une période de 26 ans et les données proviennent de plusieurs missions d'observation.

L'InSAR est une technique de traitement des images SAR permettant la détermination du champ de déplacement de surface du sol, mais aussi du suivi de ces déplacements dans le temps. Cette méthode a été principalement appliquée à l'étude de la déformation du sol d'origine naturelle comme les tremblements de terre, la déformation des édifices volcaniques, les glissements de terrain (Massonnet and Feigl, 1998; Bürgmann et al., 2000), mais aussi à la déformation d'origine anthropique (Amelung et al., 1999; Bawden et al., 2001). Particulièrement, elle a également été utilisée pour le suivi d'affaissements miniers aussi bien sur de grandes zones (de l'ordre de plusieurs kilomètres carrés, par exemple la mine de sel à Vauvert, France (Raucoules et al., 2003) et les bassins houillers au Luxembourg (Samsonov et al., 2013)) que pour de petites exploitations (de l'ordre du kilomètre carré, par exemple la mine de charbon à Gardanne, France (Carnec and Delacourt, 2000) et les bassins ferrifères dans le Nord-Est de la France (Colesanti et al., 2005)). Au Nouveau Mexique (États-Unis), les déplacements de surface aux alentours d'une mine de potasse ont été suivis sur des périodes courtes de deux ans (Rucker et al., 2013), et plus longues, sur plusieurs années (Zhang et al., 2018). Plusieurs études basées sur l'utilisation de la technique InSAR se sont intéressées aux affaissements résiduels. Guéguen et al. (2009) détectent et quantifient les affaissements résiduels de 1992 à 2007 dans les bassins houillers du Nord/Pas-de-Calais, France, soit 16 ans après la fin de l'exploitation. Une étude précédente des affaissements miniers dans le bassin potassique alsacien (Raymond and Rudant, 1997) avait été menée au début de la période du satellite ERS, mais les auteurs avaient conclu que l'InSAR n'était pas efficace pour quantifier et suivre les déplacements de surface en relation avec l'exploitation. Néanmoins, leur étude se basait sur un trop faible nombre de données pour que les résultats aient pu être significatifs. Dans des travaux portant sur le Fossé Rhénan et combinant plusieurs types de données géodésiques (GPS, INSAR, nivellement) acquises sur des périodes de temps plus longues, Fuhrmann (2016) a détecté un signal significatif localisé dans le bassin potassique alsacien, principalement déduit des résultats SAR.

Le travail présenté dans ce chapitre est une étude de l'évolution du champ de déplacement de la surface du sol dans le bassin potassique alsacien à partir des résultats InSAR. L'utilisation de trois archives d'images SAR acquises par les satellites européens SAR permet de suivre la déformation sur une période de temps incluant à la fois la période d'exploitation de 1995 à 2000 et l'après-mine de 2004 à 2018. Les résultats sont comparés à d'autres mesures disponibles. Par ailleurs, ces mesures indiquent que les déplacements annuels sont pluri-décimétriques, voire métriques, lors de l'exploitation et millimétriques au cours de la phase résiduelle. En comparaison et sous certaines conditions, la précision des résultats InSAR peut atteindre l'échelle millimétrique (Ketelaar, 2009). Puis, une attention particulière est portée au comportement long terme du signal dans le but de caractériser la phase résiduelle d'un affaissement minier. Enfin, les signaux observés en surface sont corrélés aux potentiels mécanismes sources. L'un de ces mécanismes, la compaction des matériaux foudroyés, commence après le foudroyage du toit de l'exploitation et se poursuit au cours de la phase résiduelle de l'affaissement minier.

Dans ce chapitre, l'évolution temporelle des déplacements de surface sur plus de 20 ans obtenue par InSAR, notamment au cours de la phase résiduelle, renseigne de manière indirecte sur l'avancement de la compaction en profondeur.

## 2.2 *Interferometry Synthetic-Aperture Radar* : théorie

Dans un premier temps, les points clés concernant l'obtention d'une image SAR sont rappelés. Dans un second temps, après la présentation des principes théoriques de l'interférométrie radar (InSAR), les différentes chaînes de traitement utilisées pour cette étude sont présentées.

### 2.2.1 La création d'une image SAR

Les satellites radar suivent des orbites quasi-polaires. Le radar est une source mobile, active et cohérente. Ainsi, l'avantage de l'imagerie radar est que les données peuvent être acquises de jour comme de nuit sur de larges surfaces et par temps nuageux. Pour réaliser une acquisition, le radar émet à partir d'une antenne directive des impulsions de signaux électromagnétiques, dans des bandes de fréquence comprises entre 1 et 12 GHz, pour une longueur d'onde  $\lambda$  comprise entre 1 cm et quelques dizaines de centimètres en fonction du satellite (tableau 2.1). À l'exception des satellites Sentinel-1, les ondes sont émises quasi-perpendiculairement à la trajectoire du satellite selon la ligne de visée du satellite, ou *Line Of Sight* (LOS), représentée par l'angle de visée  $\alpha$  (figure 2.1). Sa valeur varie entre 20 et 50° en fonction du satellite et aussi au sein d'une même image, entre la partie de l'image proche du satellite (portée proximale) et la partie éloignée (portée distale). Les ondes sont renvoyées au satellite après réflexion à la surface selon un angle d'incidence distinct de  $\alpha$  à

cause de la courbure de la surface terrestre. La couverture spatiale d'une impulsion dépend directement de la taille de l'antenne, mais est en général longue de quelques centaines de kilomètres et large de quelques kilomètres. Plus l'antenne est petite, plus la zone couverte est grande et plus l'impulsion est diffuse, et inversement (Curlander and McDonough, 1991). Une même zone est illuminée à plusieurs reprises au cours d'une même acquisition à cause de la largeur de la couverture spatiale de l'impulsion. Une image SAR d'une même région peut être acquise de deux manières : en passage ascendant, le satellite allant du sud vers le nord, et en passage descendant, du nord vers le sud.

| Bande d'acquisition | Fréquence [GHz] | Longueur d'onde [cm] | Constellations  |
|---------------------|-----------------|----------------------|---|
| L                   | 1 - 2           | 15 - 30              | SEASAT, JERS-1, <b>ALOS-PALSAR</b>                        |
| S                   | 2 - 4           | 7.5 - 15             | HJ-1  |
| C                   | 4 - 8           | 3.75 - 7.5           | <b>ERS</b> , RADARSAT, <b>ENVISAT</b> , <b>Sentinel-1</b> |
| X                   | 8 - 12          | 2.5 - 3.75           | COSMO-Skymed, TerraSAR-X, Tandem-X                        |

TABLE 2.1 – Résumé des fréquences et des longueurs d'onde des signaux émis par différents satellites pour la réalisation d'images SAR. En vert, les satellites associés aux archives traitées.

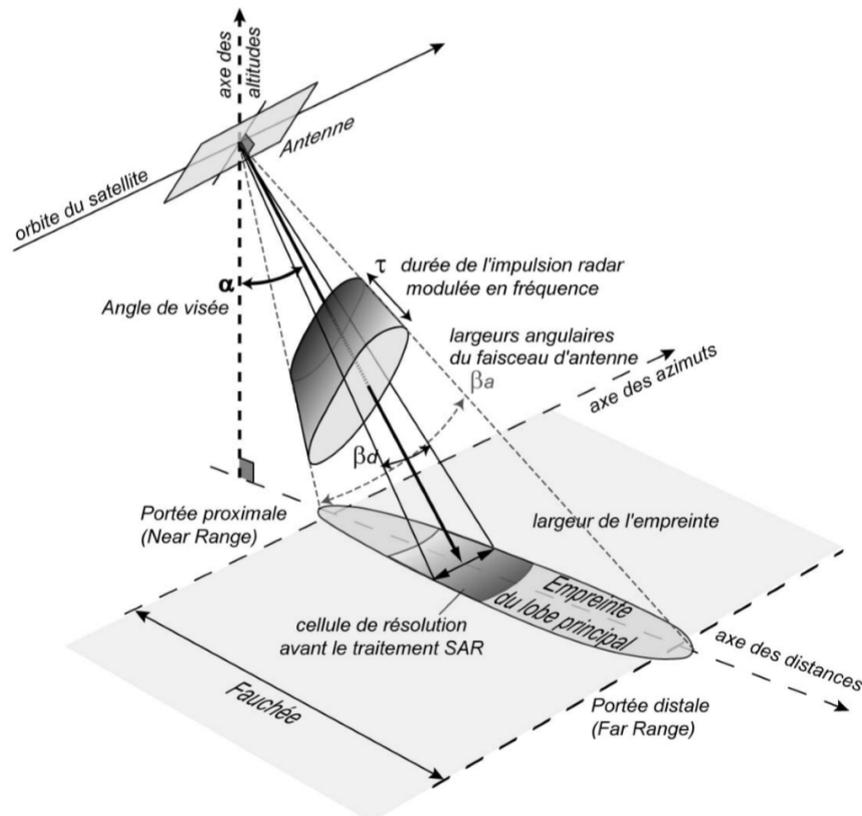


FIGURE 2.1 – Illustration de la géométrie d'une acquisition SAR (Pathier, 2003). Le dessin n'est pas à l'échelle. Le satellite observe la surface terrestre en regardant vers la droite. La fauchée représente la bande scannée par l'acquisition et est large de quelques centaines de kilomètres. La surface couverte par l'impulsion d'onde est dite illuminée. Ces zones illuminées se superposent à plusieurs reprises au cours d'une même acquisition.

Les coordonnées des pixels au sein de l'image sont définies selon les axes *azimuth* et *range*, en lien avec la géométrie d'acquisition. L'axe *azimuth* représente la direction suivie par le satellite alors que l'axe *range*, la perpendiculaire à la direction suivie (figure 2.1). Toutefois, la dimension des pixels n'est pas la même selon l'*azimuth* et le *range*. La résolution en *range* est comprise entre un et quelques dizaines de mètres en fonction du satellite. Cette résolution est permise grâce aux caractéristiques physiques du signal émis par le radar, modulé linéairement sur une courte fenêtre de temps. Il est à noter que la résolution en *range* varie entre la fauchée proximale et la distale puisque l'angle d'incidence varie selon cette direction. La résolution en azimuth peut être améliorée car une même zone est illuminée par plusieurs impulsions au cours d'une même acquisition, simulant ainsi une antenne de grande taille. La Synthèse à Ouverture Radar permet donc de trier les échos d'une même zone en fonction des fréquences Doppler. À l'image de la technique de migration utilisée lors du traitement de données sismiques (Ferretti, 2014), les réponses aux différentes impulsions enregistrées sont rassemblées au sein d'un même pixel.

À chaque pixel de l'image radar, le signal électromagnétique renvoyé par le sol est caractérisé par un nombre complexe, avec une valeur d'amplitude et une valeur de phase. L'amplitude correspond au ratio entre l'amplitude de l'onde reçue et celle de l'onde émise. Elle dépend de l'énergie électromagnétique réfléchie, et donc des propriétés physiques de la surface de réflexion telles que sa géométrie et sa nature. La phase est le déphasage entre les deux signaux, et dépend donc de la distance entre la surface réfléchie et le satellite. Elle varie dans un intervalle de 0 à  $2\pi$ , et est donc connue modulo  $2\pi$ .

### 2.2.2 Interférométrie d'images SAR

Plusieurs auteurs présentent et résument les différents aspects théoriques et pratiques du traitement (Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al., 1998; Ferretti et al., 2007; Ferretti, 2014).

Avant toute chose, les deux images doivent être recalées très précisément les unes par rapport aux autres, en général par cross-corrélation des valeurs d'amplitude des deux images SAR (Gabriel and Goldstein, 1988; Lin et al., 1992). Le recalage peut être réalisé en tenant également compte de la topographie de la zone couverte (Adam et al., 2003). Deux images ne sont jamais exactement acquises depuis le même point de vue, leur référentiel est donc différent. L'idée est d'associer proprement chaque pixel de l'image *slave*, ou esclave, à son équivalent dans le référentiel de l'image *master*, ou maître ou de référence, en rééchantillonnant spatialement l'image esclave. Un interférogramme est créé en calculant le produit conjugué du signal radar pour chaque pixel. La phase interférométrique correspond à la différence des valeurs de phases de chaque pixel des deux images radar recalées. Cette phase interférométrique  $\Delta\phi$  est reliée à la variation de distance satellite-sol  $\Delta R$  par  $\Delta\phi = 4\pi\Delta R/\lambda$ . Elle varie à travers l'image mais dépend aussi de la géométrie d'acquisition, de la topographie et d'éventuels déplacements du sol. En plus, un déphasage peut avoir lieu si la propagation de l'onde est ralentie dans l'atmosphère. Ainsi, la phase interférométrique résulte de cinq

contributions :

- orbitale : le déphasage lié à la différence de position d'observation du satellite lors des deux passages du satellite ;
- topographique : le déphasage lié à la topographie observée depuis les deux points de vue distincts ;
- atmosphérique : la variation de retards dus aux changements des conditions atmosphériques et ionosphériques entre les deux dates d'acquisition ;
- bruit : un ensemble de différents facteurs (instruments, traitements, surface de réflexion, etc) ([Zebker and Villasenor, 1992](#)) ;
- déplacement : le déphasage lié au mouvement éventuel de la surface du sol entre les deux dates des images.

Deux caractéristiques sont associées à un interférogramme : les lignes de base perpendiculaires et temporelles. La première renseigne sur la distance entre les positions du satellite alors que la seconde, sur le temps séparant les deux acquisitions. En complément, une carte de cohérence est produite pour un interférogrammes. La cohérence est définie comme l'amplitude de la corrélation croisée des nombres complexes associés aux pixels de chaque image. La corrélation est calculée sur une fenêtre de pixels afin d'améliorer son estimation. La valeur de la cohérence retourne une information sur la stabilité de la phase interférométrique et sur le niveau de bruit du pixel. Plus la cohérence est élevée, plus la phase interférométrique est stable, meilleur est le ratio signal sur bruit, et inversement. Avec ces cartes de cohérence, les zones affectées par des décorrélation sont mises en évidence. Elles peuvent être de deux natures : spatiale et temporelle. La décorrélation spatiale dépend à la fois de la valeur de la ligne de base perpendiculaire et de la topographie : pour une topographie importante, les deux images seront d'autant plus différentes que la ligne de base perpendiculaire sera grande. Si la ligne de base perpendiculaire excède la valeur critique, l'interférogramme sera inexploitable. Cette valeur seuil varie d'un satellite à l'autre et est d'environ 1 300 m pour les satellites ERS et ENVISAT. En présence de forts reliefs, la décorrélation est aggravée, diminuant la ligne de base critique. La décorrélation temporelle caractérise les variations de la surface du sol avec le temps, comme l'arrivée d'un manteau neigeux, un changement de végétation ou une moisson, une érosion importante, une inondation ...

Une fois l'interférogramme produit, tout l'enjeu réside dans l'estimation des différentes contributions pour ne conserver que celle désirée. Pour étudier les déformations de surface, la composante de déplacement est à déterminer. L'estimation de la composante de déplacement, qui nous intéresse ici, se fait aussi précisément que possible par modélisation et filtrage des autres composantes. Les contributions orbitales et topographiques sont modélisées et soustraites en utilisant, respectivement, les données orbitales distribuées par les agences spatiales et un modèle numérique de terrain précis. Le bruit est soit filtré, soit modélisé ([Agram and Simons, 2015](#)). Quant à la contribution atmosphérique, les retards de phase peuvent être dus à deux phénomènes distincts : les interactions électroniques dans la haute atmosphère, la ionosphère, particulièrement visible lors du traitement des images acquises

en bande L ( $\lambda > 15$  cm, [tableau 2.1](#)) ou la variation du contenu de vapeur d'eau dans les basses couches de l'atmosphère, la troposphère, particulièrement visible lors du traitement des images acquises en bande C ou X ( $\lambda < 15$  cm). Les phénomènes atmosphériques sont corrélés spatialement et non-corrélés temporellement. Les contributions atmosphériques et ionosphériques sont modélisées puis retirées soit à partir de mesures de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère ([Li et al., 2012](#)), soit à partir de modèles météorologiques ([Doin et al., 2009](#); [Jolivet et al., 2011](#)) ou mathématiques ([Bekaert et al., 2015](#)).

Le déplacement n'est pas mesuré de manière absolue mais relative. La phase variant dans un intervalle de  $2\pi$ , la variation de distance satellite-sol résultant du déplacement est comprise entre 0 et  $\lambda/2$ . Une étape complexe du traitement interférométrique, appelée déroulement, est nécessaire pour estimer un déplacement supérieur à  $\lambda/2$  ([Massonnet and Feigl, 1998](#); [Rosen et al., 1998](#), [tableau 2.1](#)). La plupart des algorithmes de déroulement supposent que la différence de phase déroulée entre deux pixels voisins n'excède pas  $\pi$ . Le déroulement s'effectue en se propageant à partir d'un point sélectionné à tous les pixels et se résout progressivement en considérant des pixels voisins. En cas de déroulement incorrect ou si des problèmes surviennent, d'autres algorithmes parviennent à résoudre les problèmes rencontrés en se basant, par exemple, sur la fréquence du signal ([Trouve et al., 1998](#)) ou les phases résiduelles de déroulement ([Doin et al., 2011](#)). Néanmoins, en l'absence de contraintes sur le résultat final, une infinité de déroulements existent, satisfaisant tous les données. Après le déroulement, la phase obtenue est proportionnelle à la variation de distance satellite-pixel entre les deux acquisitions. Le déplacement ainsi obtenu est orienté selon la ligne de visée du satellite. Pour des angles de visée inférieurs à  $45^\circ$ , comme c'est le cas pour les satellites ERS et ENVISAT, les mesures sont plus sensibles aux déplacements verticaux qu'horizontaux. Cette sensibilité aux déplacements verticaux est similaire aussi bien en passage ascendant que descendant. La projection dans la ligne de visée du satellite des déplacements horizontaux dépend de la géométrie d'acquisition et de l'orientation du déplacement. Par exemple, un déplacement vers l'est est négatif pour une géométrie ascendante alors qu'il sera positif pour une géométrie descendante. Les acquisitions en passage ascendant et descendant sont sensibles de la même manière à un déplacement orienté selon l'axe Nord-Sud. La détermination complète des trois composantes d'un déplacement avec l'InSAR n'est donc pas possible sauf dans certains cas particuliers ([Hu et al., 2014](#)).

En déroulant un seul interférogramme, le déplacement entre les deux dates d'acquisition des images radar est obtenu. En répétant ce procédé avec les différentes combinaisons d'images possibles, une série temporelle représentant l'évolution du déplacement de la surface du sol est réalisable.

### 2.2.3 Traitement avec le logiciel StaMPS

Plusieurs méthodes ([Mora et al., 2003](#); [Rosen et al., 2004](#); [Prati et al., 2010](#); [Rosen et al., 2012](#)) et chaînes de traitement ([Arnaud et al., 2003](#); [Doin et al., 2011](#); [Ferretti et al., 2011](#)) ont été développées depuis le lancement du premier satellite SAR. De nos jours, les défis

proviennent du suivi du déplacement de surface au cours du temps sur une large surface. L'une des principales limites de l'InSAR est la décorrélation entre deux images empêchant le bon déroulement de la phase. Dans le cas des concessions minières des MDPA, la surface est essentiellement végétale, avec une grande majorité de champs et forêts, et ainsi non cohérente. D'après les cadastres des différentes communes, les surfaces agricoles et forestières couvrent environ 70% des concessions minières. Des décorrélations temporelles et volumétriques affecteront ces surfaces. À l'opposé, les infrastructures humaines, telles que les bâtiments et les voies de communications, sont des surfaces cohérentes non affectées par les décorrélations temporelles, avec une réflectivité stable et un fort ratio signal à bruit (figure 2.2). En s'appuyant sur ces surfaces cohérentes, un déplacement significatif est recouvrable au milieu d'une surface non cohérente. C'est le principe de la méthode des *Persistent Scatterer*, dérivée des *Permanent Scatterer* développés par Ferretti et al. (2001), implémentée dans le logiciel *Stanford Method for Persistent Scatterer* (StaMPS, Hooper et al., 2012). Toutefois, les interférogrammes sont tous calculés à partir d'une même image radar de référence, conduisant à des interférogrammes avec de fortes lignes de base spatiales et temporelles. En travaillant avec des interférogrammes aux faibles lignes de base, les décorrélations spatiales et temporelles sont diminuées. C'est le principe de la méthode *Small Baseline*, implémentée dans StaMPS pour s'appliquer conjointement avec la méthode des *Persistent Scatterer* (Berardino et al., 2002).

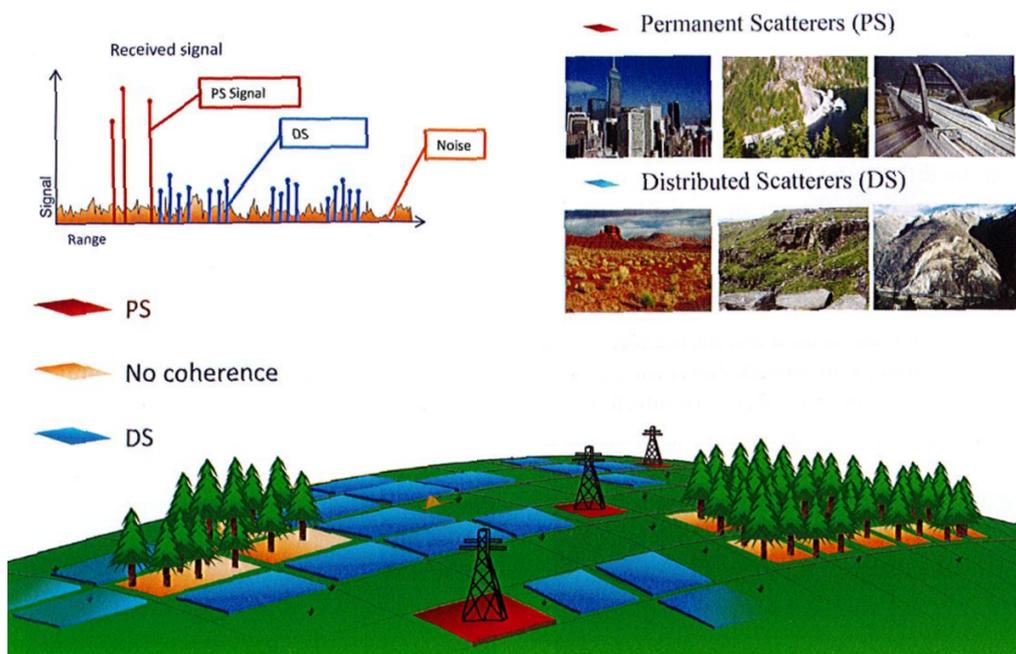


FIGURE 2.2 – Illustration des *Permanent/Persistent Scatterers* (Ferretti, 2014). Les infrastructures humaines renvoient un signal fort, leurs surfaces étant plus aptes à réfléchir un signal. À l'opposé, les forêts renvoient un signal faible et diffus, l'onde se réfléchissant sur les multiples branches. Entre ces deux catégories, les champs peuvent être retenus comme un PS si le signal est réfléchi de manière forte et stable par la surface. Sinon ils sont considérés comme une forêt, en raison des ressources cultivées jouant sur la stabilité de la réflexion au cours du temps.

Pour les satellites ERS, ALOS et ENVISAT, les interférogrammes sont générés à partir d'une image commune de référence ou maître, avec le logiciel Doris (Kampes et al., 2003). Une chaîne de traitement est en place sur la *Sentinel Application Platform* (SNAP) pour traiter spécifiquement les données Sentinel (Foumelis et al., 2018). Une fois tous les interférogrammes calculés pour chacune des archives, une première sélection des pixels est basée sur la dispersion en amplitude. Ce paramètre évalue la stabilité de l'amplitude du signal réfléchi. Les pixels ayant une forte dispersion en amplitude sont écartés. Une deuxième sélection s'effectue à partir du niveau de bruit dans les valeurs de phases enroulées à chacun des pixels (Hooper et al., 2007). Une fois la sélection terminée, l'étape de déroulement sur les pixels sélectionnés commence. Le déroulement est fait en trois dimensions, deux spatiales et une temporelle, pour reconstituer l'évolution du pixel au cours du temps et optimiser la résolution du résultat (Hooper and Zebker, 2007).

Dans StaMPS, plusieurs étapes de filtrage interviennent pour diminuer le bruit dans les données. Les composantes orbitales et topographiques sont modélisées. La zone d'intérêt étant plate, ne mesurant pas plus de  $15 \times 15 \text{ km}^2$ , et les images provenant de radar à bande C, les composantes atmosphériques et ionosphériques sont considérées négligeables (Hanssen, 2001). Dans cette étude, les séries temporelles sont réalisées avec les moyennes des pixels présents dans un rayon de 100 à 150 m autour du point considéré. L'incertitude est représentée par l'écart-type des valeurs associées à chaque pixel (Hooper, 2006).

L'estimation de l'incertitude des résultats InSAR est encore l'objet de projets de recherches actifs du fait de la complexité et de la multitude des étapes de traitement et des sources de signaux significatifs. Ketelaar (2009) s'est intéressé à la précision des résultats InSAR, notamment après traitement avec des *Persistent Scatterer*. Ses travaux reposent sur la comparaison entre les résultats InSAR et le déplacement suivi en certains points par nivellement. Ces résultats montrent que la précision des résultats dépend du nombre d'images utilisées et de la densité finale de pixels, la précision variant de quelques millimètres dans les zones bien couvertes et augmentant avec la décroissance de la couverture spatiale. Néanmoins, les résultats restent assujettis à la qualité des images SAR et aucune mesure autre que l'InSAR n'est disponible dans de nombreux cas. Ainsi, des modèles de variance-covariance sur les résultats s'élaborent à partir de variance-covariance des données, pour estimer une incertitude plus proche et représentative des données. Ces modèles de variance-covariance se retrouvent appliqués pour mieux incorporer l'anisotropie de la contribution atmosphérique (Knospe and Jonsson, 2009) ou l'évolution spatiale et temporelle du bruit (Agram and Simons, 2015). González and Fernández (2011) posent le problème sous forme de modèle Gauss-Markov et les modèles de variance-covariance sont redéfinis après rééchantillonnage, aboutissant à un meilleur affinage des incertitudes. La méthode *Jackknife* est appliquée par moment. Elle consiste en  $n$  résolutions du problème, en omettant à chaque fois une donnée différente ; l'incertitude est l'écart-type des valeurs obtenues lors des  $n$  traitements (Agram et al., 2012). Dans certaines situations, les incertitudes s'expriment à partir des erreurs résiduelles atmosphériques et de fermeture issue de l'étape de déroulement (Henrion, 2019).

## 2.3 Les archives d'images SAR

Les archives des images en bande C provenant de trois satellites de l'*European Space Agency* (ESA) sont analysés, chacune couvrant une période distincte. Les données des satellites *European Remote-Sensing* (ERS), *ENVironment SATellite* (ENVISAT) et Sentinel-1 couvrent les périodes de 1992 à 2001, de 2003 à 2010 et de 2014 à 2018, respectivement (tableau 2.2). La période d'acquisition était de 35 jours pour ERS et ENVISAT, de 12 jours de novembre 2014 à septembre 2016, puis de 6 jours d'octobre 2016 à décembre 2018 pour les satellites Sentinel-1. La période d'acquisition est divisée par deux sur la période Sentinel-1 grâce à la mise en orbite d'un deuxième satellite identique au premier (Sentinel-1A et Sentinel-1B). Les images en bande L du satellite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), ayant une période d'acquisition de 46 jours, ont été accessibles. Parmi les quatre satellites, un seul couvre la période d'exploitation (ERS), les trois autres suivent la période de l'après-mine (figure 2.3).

Sur l'ensemble des douze archives traitées, le traitement a pu aboutir pour neuf d'entre elles, avec des résultats consistants entre eux et avec les données externes (nivellement) à disposition. Pour ALOS, le nombre d'images était clairement insuffisant pour étudier la zone par la méthode des *Persistent Scatterer*. Les images radar seraient à traiter par une autre méthode. Pour ERS, le nombre limite d'images présentes dans l'archive 258 et la mauvaise répartition temporelle de celles-ci combinée aux forts déplacements attendus ne permirent pas d'obtenir des résultats convenables, similaires aux autres résultats à disposition. Pour les satellites ERS, ENVISAT et Sentinel-1, le traitement a abouti pour des données acquises aussi bien suivant les passages ascendants que descendants. Cependant, à chaque fois, les archives ascendantes et descendantes n'ont pas la même quantité de données.

| Mission    | Track | Direction | Angle de visée | Angle d'incidence | Nombre d'image | Période   |
|------------|-------|-----------|----------------|-------------------|----------------|-----------|
| ERS        | 29    | Asc.      | 21.5           | 24.3              | 32             | 1995-2001 |
|            | 65    | Des.      | 17.8           | 20.1              | 65             | 1992-2001 |
|            | 258   | Asc.      | 18.2           | 20.5              | 22             | 1993-2000 |
|            | 294   | Des.      | 21.2           | 24                | 73             | 1992-2001 |
| ENVISAT    | 29    | Asc.      | 21.4           | 24.2              | 27             | 2004-2010 |
|            | 65    | Des.      | 18.5           | 20.9              | 35             | 2003-2010 |
|            | 258   | Asc.      | 18.9           | 21.4              | 27             | 2004-2010 |
|            | 294   | Des.      | 21.4           | 24.3              | 42             | 2003-2010 |
| ALOS       | 647   | Asc.      | 34             | 38.4              | 11             | 2007-2010 |
|            | 648   | Asc.      | 35.6           | 40.2              | 14             | 2007-2010 |
| Sentinel-1 | 66    | Des.      | 39.9           | 43.7              | 145            | 2015-2018 |
|            | 88    | Asc.      | 36.1           | 38.9              | 186            | 2014-2018 |

TABLE 2.2 – **Présentation des données satellitaires traitées.** "Asc." signifie ascendant et "Des.", descendant. Un numéro d'archive en vert signifie que le traitement a pu aboutir alors qu'en rouge, le traitement a échoué. Le nombre d'image varie d'une archive à l'autre pour un même satellite et se répercute sur la période d'observation des archives.

Le traitement des archives a été réalisé avec la méthode des *Small Baseline* pour les satellites ERS et ENVISAT. Pour les données Sentinel-1, seule la partie des *Persistent Scatterer* du logiciel StaMPS était disponible au moment des travaux. Afin d'estimer la contribution topographique lors du traitement, le modèle numérique de terrain provenant de la mission *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) avec une résolution de 30 m est utilisé (Farr and Kobrick, 2000). Pour le traitement avec la méthode des *Small Baseline*, un critère de sélection d'une paire d'images ( $\rho$ ) est calculé à partir des lignes de base spatiales ( $B_p$ ) et temporelles ( $B_t$ ) entre deux images relativement à des lignes de base spatiales ( $B_{pmax}$ ) et temporelles ( $B_{tmax}$ ) seuil (2.1) :

$$\rho = \left(1 - \frac{B_p}{B_{pmax}}\right) \times \left(1 - \frac{B_t}{B_{tmax}}\right) \quad (2.1)$$

Ce critère représente la viabilité *a priori* d'un interférogramme basée sur les lignes de base. Pour ERS, la corrélation minimale est de 0.18 pour chaque paire d'images et les lignes de base spatiales et temporelles seuil sont de 700 m et 210 jours. La topographie relativement plane du bassin potassique alsacien justifie de prendre une grande ligne de base perpendiculaire. Les faibles valeurs de corrélation et de ligne de base temporelle retenues sont dues aux forts déplacements de surface sur la période d'étude, décimétriques à métriques d'après les archives de nivellement, induisant erreur et décorrélation temporelle et spatiale. Pour ENVISAT, une corrélation minimale de 0.35, une ligne de base temporelle de 3 ans et une perpendiculaire de 700 m sont retenues, en tenant compte du fait que les déplacements attendus de la surface pendant cette période sont plus faibles. Pour Sentinel-1, la ligne de base temporelle est environ de 2 ans et la spatiale, inférieure à 200 m. Pour ces données, tous les interférogrammes sont créés à partir d'une même date de référence.

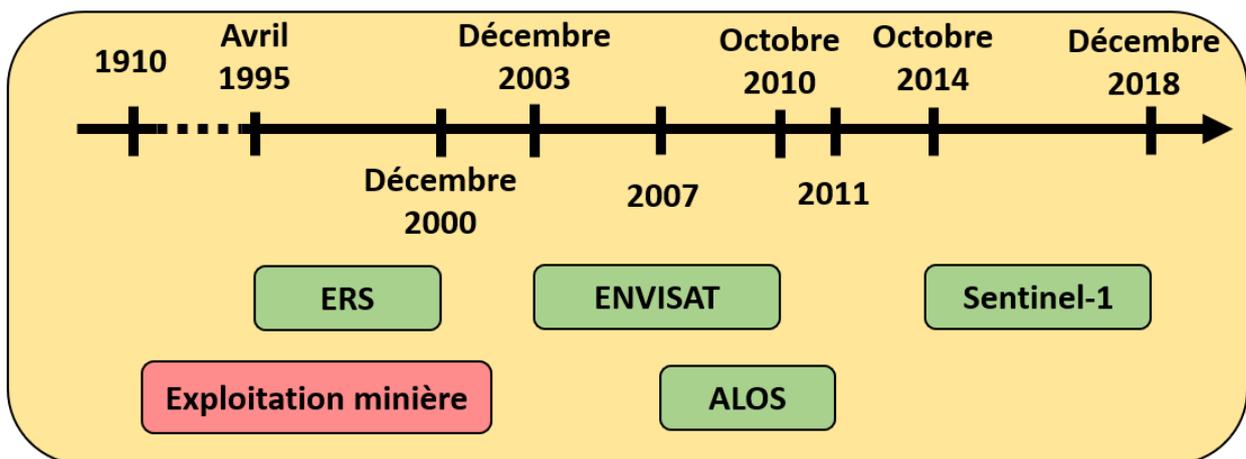


FIGURE 2.3 – Couverture temporelle des données SAR traitées. Une période trois ans sépare les données ERS et ENVISAT, et une de quatre ans entre ENVISAT et Sentinel-1.

## 2.4 Résultats

Dans cette partie, les résultats provenant des archives descendantes et ascendantes les mieux résolues, celles constituées du plus grand nombre d'images, pour chacun des satellites sont d'abord présentés sous forme de carte de vitesse moyenne dans la ligne de visée du satellite, pour étudier la distribution spatiale du champ de vitesse de la surface du sol. Ensuite, des séries temporelles sont réalisées à des points clés et comparées aux mesures de nivellement. L'amplitude des déplacements de surface se produisant sur les périodes d'observations est déduite des séries temporelles.

L'analyse et le suivi des déplacements de surface sont circonscrits aux pixels sélectionnés lors du traitement. Ces pixels sont situés au niveau des zones urbanisées et des infrastructures humaines telles que les habitations, les routes et les voies ferrées (figure 2.4). Toutes les surfaces végétalisées sont faiblement, voire absolument pas couvertes. La couverture spatiale des résultats InSAR correspond environ à un tiers des concessions minières et demeure la même pour les différentes archives. Cependant, seule une petite surface des exploitations les plus récentes est couverte par les résultats InSAR. Cela restreint l'étude détaillée de l'affaissement minier lors des phases initiales ou du début de la phase résiduelle.

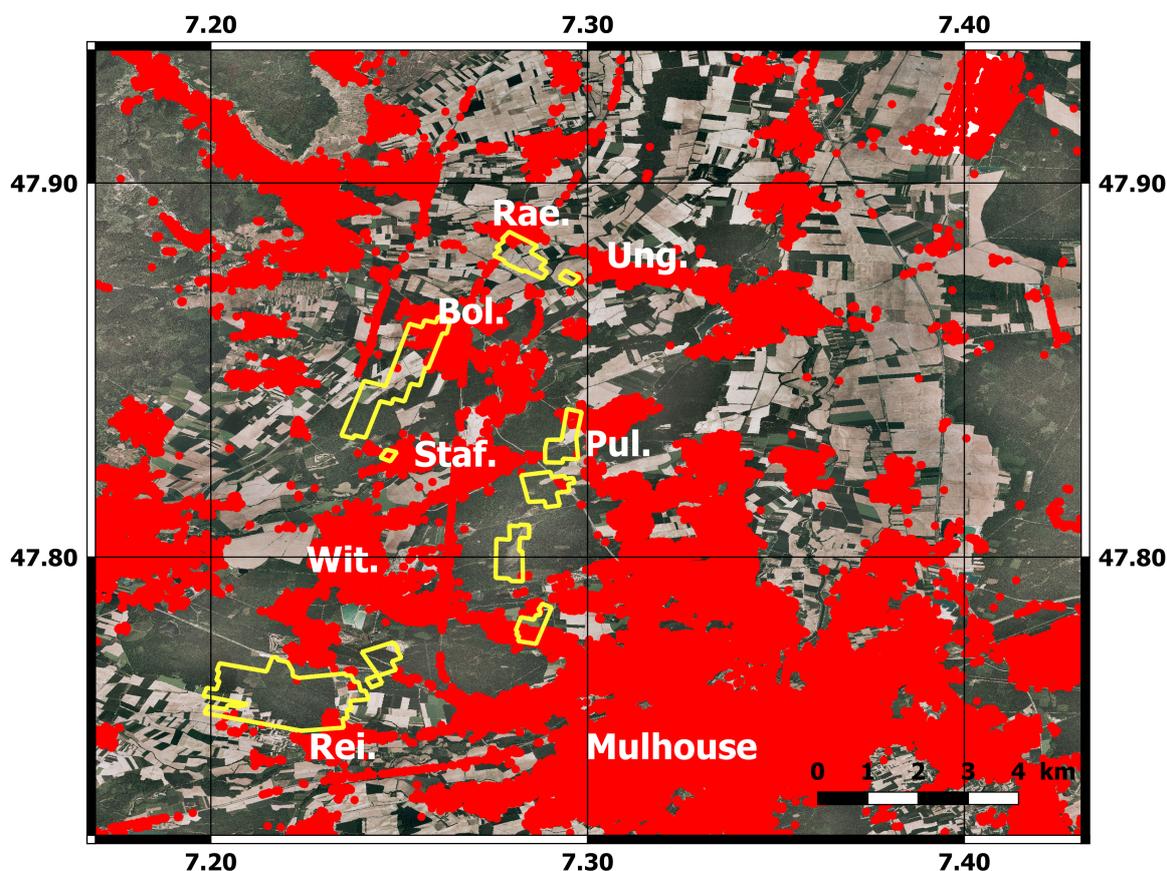


FIGURE 2.4 – Localisation des pixels d'étude retenus à travers le bassin potassique alsacien sur la période ENVISAT. Les polygones jaunes représentent les exploitations minières les plus récentes, de 1990 à 2002.

### 2.4.1 Distribution spatiale des vitesses de la surface du sol

La distribution spatiale des vitesses de surface est analysée grâce aux cartes de vitesse moyenne dans la ligne de visée du satellite (LOS). Celle-ci est déterminée par régression linéaire du déplacement cumulé au cours du temps, sur les trois périodes correspondant aux trois archives d'images SAR (figures 2.5 et 2.6). Pour chacun des satellites, les résultats provenant d'une archive ascendante et d'une archive descendante sont présentés.

Dans un premier temps, les mouvements du sol correspondent majoritairement à des déplacements s'éloignant du satellite, qui peuvent être interprétés comme des affaissements. Ces mouvements se sont produits à toutes les périodes étudiées, y compris la période récente couverte par les satellites Sentinel-1 (2015-2018, figures 2.5e et c). Ceci suggère que les affaissements résiduels sont toujours en cours plus de 12 ans après la fin de l'exploitation. De plus, aucune zone ne se met en mouvement après la fin de l'exploitation. Dans un deuxième temps, les champs de vitesse révèlent que les zones affectées par ses déformations sont localisées sur des surfaces couvrant moins de 1 km<sup>2</sup>. On les retrouve principalement au niveau des villages situés au-dessus des exploitations récentes tels que Bollwiller, Pulverschheim, Reiningue, Staffelfelden et Wittelsheim (figures 2.5a et c). L'amplitude de la vitesse moyenne décroît significativement au cours du temps. La comparaison des résultats issus des mesures des trois satellites doit cependant être faite avec précaution du fait de la différence de géométrie d'acquisition. Les vitesses moyennes LOS pour ERS et ENVISAT sont directement comparables, l'azimut et l'angle de visée étant similaires, ce qui n'est pas le cas pour les satellites Sentinel-1 (tableau 2.2). Au niveau du village de Bollwiller, la vitesse moyenne maximale en LOS atteint  $84.4 \pm 9.5$  mm.an<sup>-1</sup> pour la période ERS (1995-2000, figures 2.6a) en passage descendant contre  $60.5 \pm 9.5$  mm.an<sup>-1</sup> en passage ascendant (figures 2.5a). Ces valeurs chutent à  $15.0 \pm 1.3$  mm.an<sup>-1</sup> sur la période ENVISAT (2004-2010, figures 2.5c et c) aussi bien en passage ascendant que descendant. Enfin, les différences entre les résultats en passage ascendant et descendant tendent à disparaître avec le temps. L'existence de déplacements horizontaux impacte différemment les déplacements LOS mesurés en passage descendant ou ascendant. Ainsi, des valeurs similaires obtenues à partir des deux passages indiquent que l'amplitude des déplacements horizontaux peut être considérée négligeable par rapport à celle des déplacements verticaux.

En complément de ces observations, une autre zone attire l'attention. À Staffelfelden, l'amplitude de la vitesse moyenne LOS est supérieure à  $7.5 \pm 0.3$  mm.an<sup>-1</sup> sur l'ensemble des périodes considérées, y compris Sentinel-1, alors que l'activité de la mine en profondeur a pris fin en 1990. Sur les périodes ENVISAT (figures 2.5c et c) et Sentinel-1 (figures 2.5e et c), Staffelfelden est la zone où l'amplitude de vitesse moyenne est maximale. Sur la période ERS (figures 2.5a et c), cette zone ressort moins nettement, ce qui est en partie due aux vitesses pluri-centimétriques au niveau de Bollwiller.

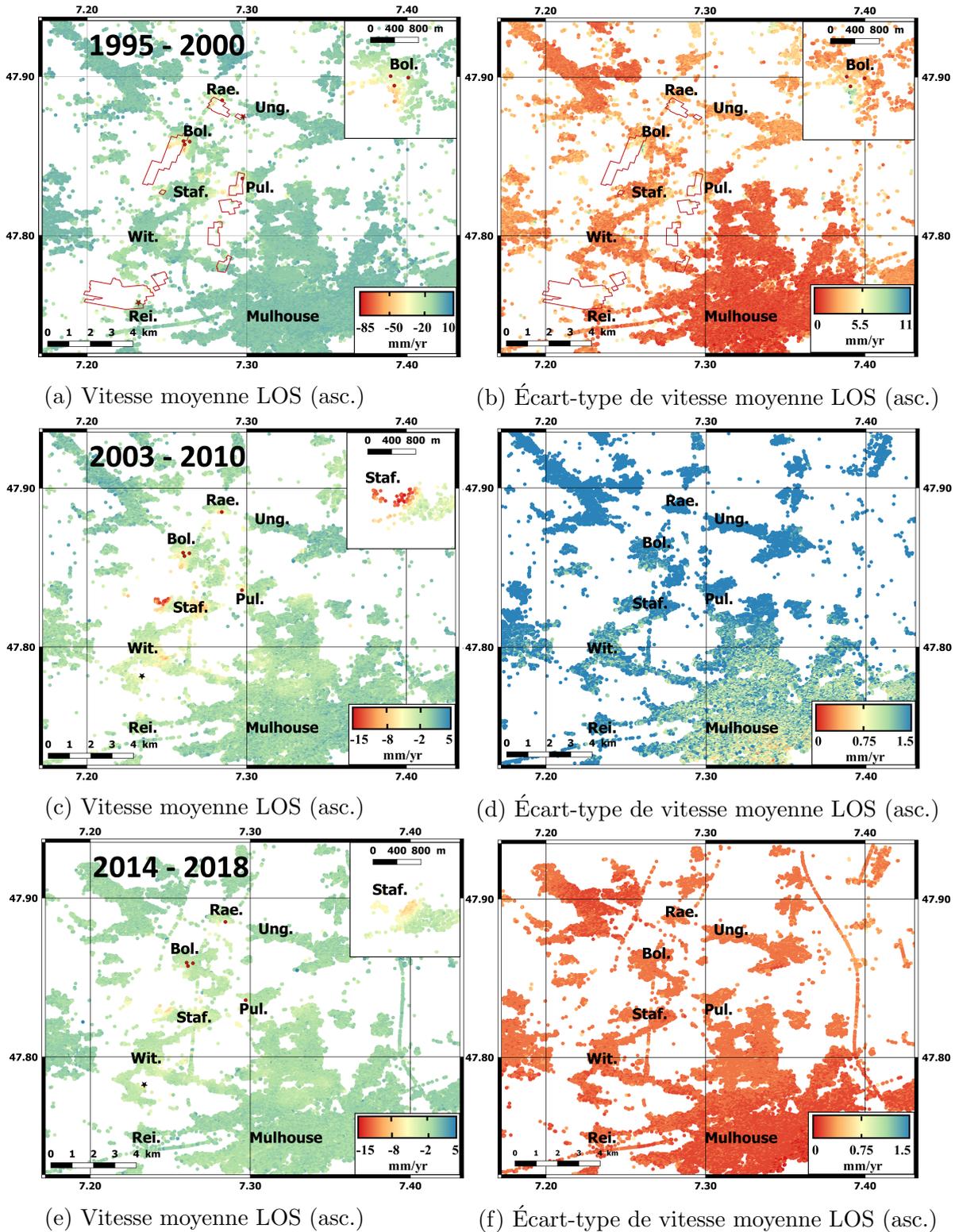


FIGURE 2.5 – Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS, gauche) et de leurs écart-types (droite) pour les archives ascendantes. Pour les périodes ERS et ENVISAT, les résultats proviennent de l'archive 29 et pour la période Sentinel-1, 88.

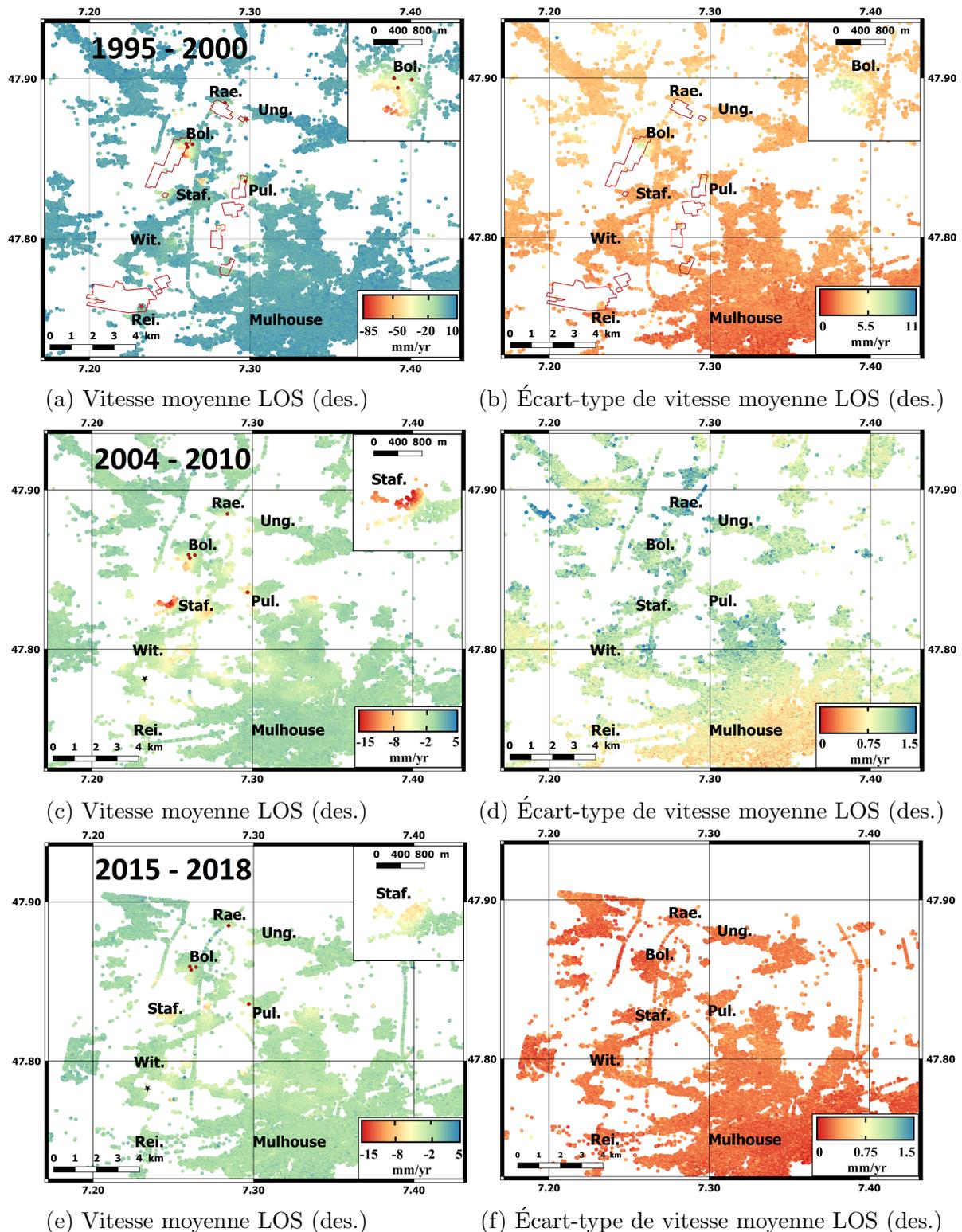


FIGURE 2.6 – Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS, gauche) et de leurs écart-types (droite) pour les archives descendantes. Pour les périodes ERS et ENVISAT, les résultats proviennent de l'archive 294 et pour la période Sentinel-1, 66.

Les figures 2.5b, d et f, et 2.6b, d et f montrent la distribution spatiale de l'écart-type de la vitesse moyenne LOS. Une faible valeur de l'écart-type confirme un déplacement linéaire alors qu'une forte valeur suggère un déplacement non linéaire et que des déplacements transitoires sont susceptibles d'avoir eu lieu. En certains points localisés des concessions, l'amplitude de l'écart-type est supérieure à  $9 \text{ mm.an}^{-1}$ , sur la période ERS, impliquant des déplacements non-linéaires à des endroits tels que Bollwiller et Pulversheim (figures 2.5b et 2.6b). Comme pour les vitesses, ces forts écart-types sont localisés sur des zones restreintes. Une seconde observation est que l'amplitude de l'écart-type décroît devenant de plus en plus homogène au sein de la zone d'étude au cours des trois périodes. Cette décroissance suggère une linéarisation de l'évolution temporelle du déplacement pour l'ensemble de la zone. Afin d'analyser l'évolution du déplacement avec le temps et de contraindre la réponse en surface à l'exploitation en profondeur, une analyse des séries temporelles des déplacements LOS est conduite dans la partie suivante.

### 2.4.2 Suivi temporel de l'affaissement minier

#### 2.4.2.1 Pendant la période d'exploitation

Pour valider les résultats pendant la période d'exploitation, les séries temporelles du déplacement dans la ligne de visée du satellite (LOS), obtenues de manière indépendante pour chacune des archives ERS, sont comparées. Ces résultats sont ensuite comparés aux mesures de nivellement réalisées à cinq points différents de 1992 à 2000. La valeur zéro des séries temporelles a été choisie au 3 Septembre 1997, la date de référence de l'archive ascendante.

Comme suggéré par les fortes valeurs d'écart-type des vitesses moyennes LOS, l'évolution temporelle du déplacement LOS n'est pas linéaire sur l'ensemble de la période ERS (figure 2.7). Toutes les séries temporelles montrent une nette décroissance du taux de déplacement LOS. Les angles de visée et d'incidence étant similaires, la forte ressemblance entre les deux jeux de données descendants valide le traitement. Les trois séries temporelles InSAR sont cohérentes entre elles. Cette bonne cohérence indique que les déplacements de surface sont principalement orientés selon l'axe vertical. À partir de 1999, de petites différences apparaissent entre les deux types d'archive à Pulversheim et Raedersheim (figures 2.7d et e). Toutefois, pour la période 1999-2000, l'archive ascendante est moins bien résolue que les descendantes avec un nombre d'images à disposition plus faible. De 1995 à mi-1996, à l'exception de Pulversheim, les résultats déduits des données acquises en passage descendant montrent un déplacement plus important que celui obtenu à partir des données acquises en passage ascendant (figures 2.7a, b, c et d). Cela pourrait provenir de la faible résolution temporelle de ces dernières, de déplacements horizontaux importants et/ou d'erreurs de déroulement liées aux forts gradients de déplacements latéraux.

La comparaison entre les résultats InSAR et les mesures de nivellement (figure 2.7) ne peut pas se faire directement, les mesures de nivellement étant selon l'axe vertical alors que

les résultats InSAR selon leur direction LOS respective. Néanmoins, les ordres de grandeur et l'évolution des déplacements au cours du temps renseignent sur la cohérence des jeux de données. Pour améliorer leur visualisation, les mesures de déplacement vertical issues du nivellement sont elles aussi représentées par rapport à la date de référence, le 3 Septembre 1997. Au début de la période étudiée (figure 2.7), les séries temporelles de déplacements issues des résultats InSAR et des mesures de nivellement sont significativement différentes. Ces différences sont très marquées aux points de nivellement 143 de Bollwiller, Pulversheim et Raedersheim où les écarts atteignent quelques dizaines de centimètres (figures 2.7a, d et e). L'évolution et l'amplitude des déplacements mesurés par InSAR et par nivellement sont similaires à partir de 1996 aux points de nivellement 193 et 210 de Bollwiller (figures 2.7b et c), et 1997 pour les trois autres (figures 2.7a, d et e). À partir de ces dates, les déplacements cumulés verticaux (nivellement) et LOS (InSAR) évoluent de la même façon aux points de nivellement. En supposant que la déformation observée ne résulte que de mouvements verticaux du sol, le déplacement obtenu par InSAR augmenterait de 8% ( $1/\cos(\theta)$ ) avec  $\theta$  l'angle d'incidence compris entre 20 et 24 pour les données ERS, tableau 2.2) après projection sur l'axe vertical. Ainsi, en tenant compte d'une incertitude de 1 cm sur les mesures de nivellement, les déplacements mesurés par InSAR sont cohérents à des déplacements verticaux.

Les différences significatives entre le nivellement et l'InSAR sur la période 1995-1996 ne s'expliquent pas seulement par l'orientation des mesures : verticale pour le nivellement et ligne de visée pour l'InSAR. En effet, les différences centimétriques entre les résultats InSAR obtenus pour des données acquises en passage ascendant et descendant (figure 2.7) pourraient se traduire par de faibles déplacements ( $<10$  cm) selon l'axe Est-Ouest. Ce déplacement horizontal ne serait alors pas suffisant pour expliquer les différences décimétriques entre les résultats InSAR et les mesures de nivellement à Bollwiller (143), Pulversheim et Raedersheim (figures 2.7a, d et e). Des déplacements métriques selon l'axe Nord-Sud seraient donc nécessaires pour combler ces différences. Or, dans ce cas, les déplacements horizontaux seraient bien supérieurs aux déplacements verticaux mesurés par nivellement, ce qui ne serait pas réaliste. Ainsi, ces différences soulignent une des principales limites de la technique InSAR, qui n'est pas forcément adaptée pour suivre des déplacements de forte amplitude, surtout s'ils affectent de petites zones avec des gradients latéraux importants. Comme les résultats le montrent, cela se vérifie pour des données avec une période d'acquisition mensuelle ou supérieure. Pour une longueur d'onde de 5.6 cm et en considérant que le déplacement est vertical, un déplacement vertical d'environ 1.5 cm maximum est recouvrable entre deux acquisitions. À titre comparatif, c'est la moitié de l'amplitude du déplacement mensuel au point de nivellement de Pulversheim sur la période 1995-1996 (figures 2.7e).

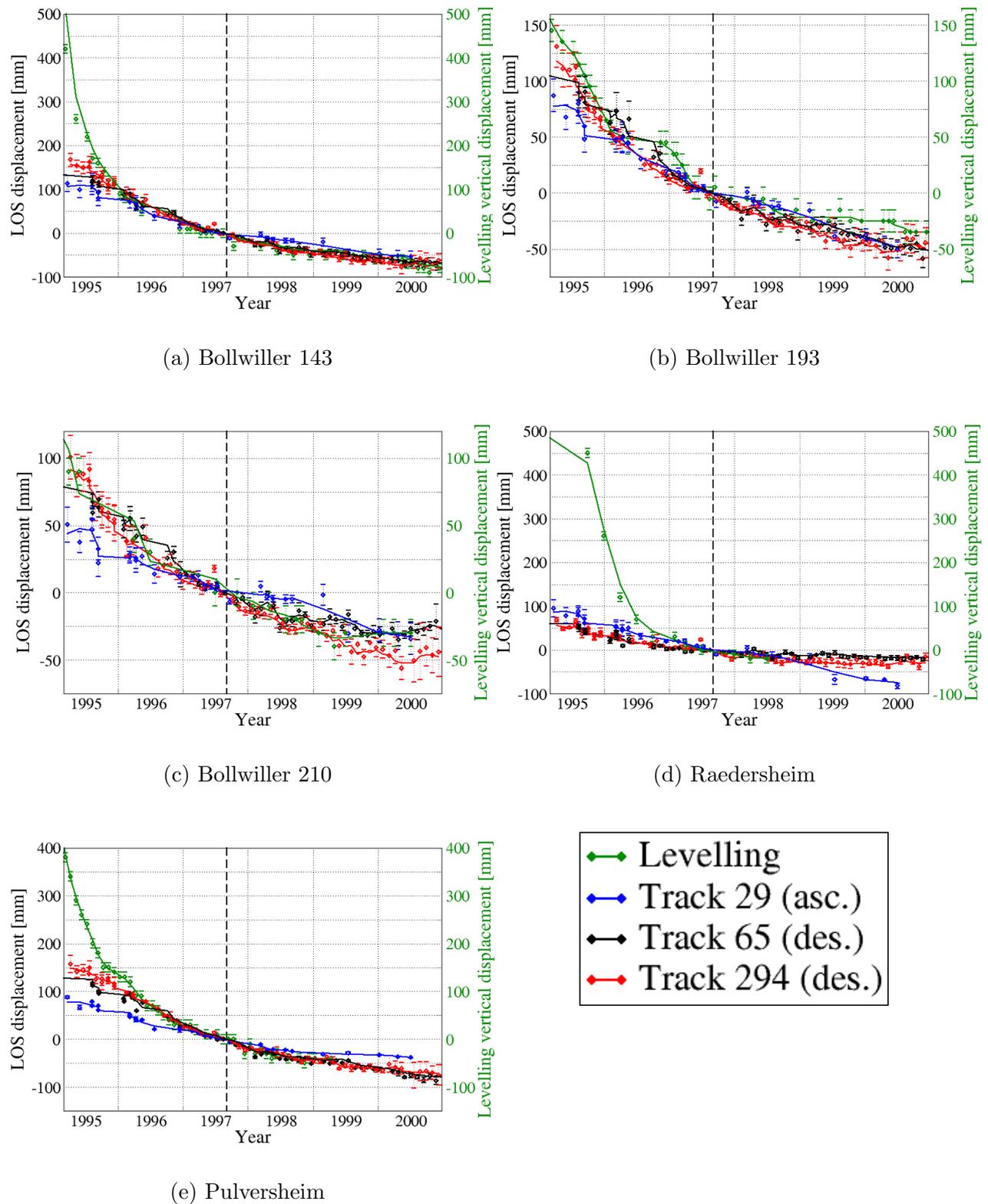


FIGURE 2.7 – Séries temporelles des mesures de nivellement (vertical) et des résultats ERS (LOS) en cinq points suivis par les deux méthodes. Le trait continu représente les données lissées avec une fenêtre temporelle glissante de 2 mois. Le trait en pointillé noir indique la date de référence du calage, le 3 septembre 1997.

Pour la suite, les séries temporelles InSAR ne sont pas considérées fiables pour les années 1995 et 1996 pour Bollwiller (143), Pulversheim et Radersheim et seulement 1995 pour les deux autres points. Les analyses des déplacements de surface sur ces périodes et avant celles-ci se basent principalement sur les données de nivellement. Après ces périodes, les séries temporelles des données ascendantes et descendantes étant cohérentes entre elles ainsi qu'aux mesures de nivellement, les déplacements de surface se produisant en ces lieux sont majoritairement verticaux. Entre 1996/1997 et 2000, aux points de nivellement présentés, les déplacements verticaux représenteraient entre 46 mm à Raedersheim et 108 mm à Pulversheim, soit une vitesse moyenne comprise entre 11 et 27 mm.an<sup>-1</sup>.

### 2.4.2.2 Suivi de l'affaissement minier sur 24 ans par InSAR

Les résultats précédents montrent que l'affaissement est toujours en cours deux décennies après la fin des travaux. Les déplacements détectés sur les périodes ENVISAT (2004-2010, figures 2.5c et 2.6c) et Sentinel-1 (2015-2018, figures 2.5e et 2.6e) ont une faible amplitude et sont localisés près des travaux miniers. Pendant la période ERS, la comparaison entre le nivellement et l'InSAR a montré que les déplacements sont principalement verticaux. Sur les périodes ENVISAT et Sentinel-1, les similitudes des séries temporelles issues des archives ascendantes et descendantes permettent également de considérer que les déplacements de surface sont orientés selon l'axe vertical. Ainsi, les valeurs des séries temporelles réalisées sur les différentes périodes à ces points sont projetées verticalement.

À l'exception du nivellement et des résultats ERS couvrant la même époque, les résultats ENVISAT et Sentinel-1 sont déconnectés entre eux et des autres jeux de données. De ce fait, un modèle est nécessaire pour ajuster les données. À partir de l'observation d'affaissements miniers se produisant dans les bassins houillers polonais et tchèques, un premier modèle associe l'évolution temporelle d'un affaissement minier à un simple terme exponentiel, en lien avec la décroissance naturelle du phénomène (Knothe, 1953). À partir d'observations complémentaires provenant de bassins houillers chinois, le paramètre temporel de l'exponentielle peut aussi être estimé à partir des caractéristiques de l'exploitation (Cui et al., 2001). En calculant le facteur temporel ( $\xi_e$ , tableau 2.3) pour les exploitations du bassin potassique alsacien à partir de la profondeur et de la vitesse d'avancement (calculs détaillés ultérieurement dans ce chapitre), les déplacements auraient dû s'arrêter au bout de 10 ans alors que les affaissements sont toujours en cours au bout de 20 ans dans le bassin potassique alsacien. Par ailleurs, l'amplitude des déplacements annuels décroît continuellement, de manière plus importante sur la période 1995-2000 (ERS) que sur la période 2015-2018 (Sentinel-1). C'est pourquoi, un second terme exponentiel est ajouté au modèle afin de mieux contraindre l'évolution des déplacements sur le long terme (2.2) :

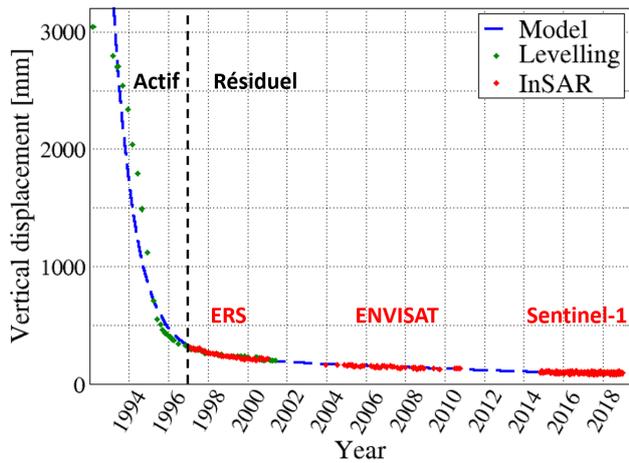
$$S(t) = B_1 \times \exp(-\xi_1 t) + B_2 \times \exp(-\xi_2 t) \quad (2.2)$$

avec S l'affaissement,  $B_1$  et  $B_2$  des constantes en m,  $\xi_1$  et  $\xi_2$  les deux constantes temporelles en

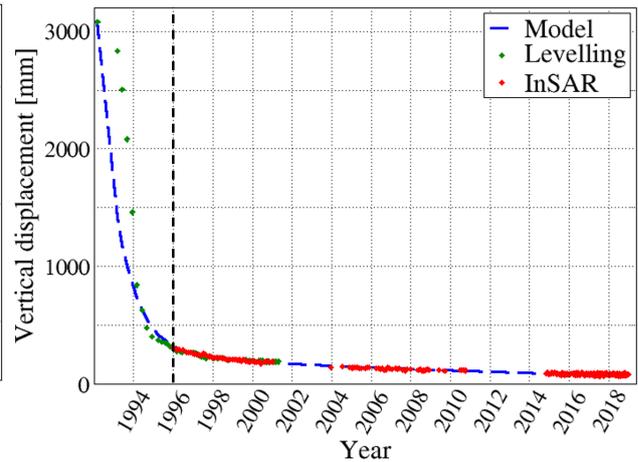
$\text{an}^{-1}$ . Le premier terme exponentiel correspond à l'affaissement en phase active d'exploitation et le second, à la compaction progressive des terrains foudroyés en phase résiduelle. D'autres modèles s'appuient sur la somme de deux termes exponentiels pour caractériser l'évolution temporelle de l'affaissement minier (Sroka et al., 2011), mais peu de ces modèles sont publiés.

L'ensemble des séries temporelles de nivellement et des mesures InSAR faites avec les données ERS à partir de 1997 (1996 pour Bollwiller 193 et 210), et toutes les données ENVISAT et Sentinel-1, est utilisé. En abscisse, la date de référence est choisie au 1<sup>er</sup> janvier 1992, les données de nivellement débutant peu après. En ordonnée, la série temporelle ERS commence à 8% de l'épaisseur extraite. À Raedersheim, l'épaisseur exploitée est de 3.05 m contre 3.90 m à Bollwiller et 4.00 m à Pulversheim. Les données de nivellement sont ajustées par rapport aux résultats ERS. Un premier jeu de paramètres est estimé avec le nivellement et les résultats ERS pour chacun des points de nivellement. Les paramètres sont déterminés en minimisant la somme des carrés des résidus (la différence entre le modèle et la donnée). Avec ces paramètres, la série temporelle ENVISAT est ajustée en calculant la position du premier point de la série ENVISAT. De nouveaux paramètres sont estimés avec le nivellement, les résultats ERS et ENVISAT. Enfin, avec ces nouveaux paramètres, la série temporelle Sentinel-1 est ajustée. Les séries temporelles sont présentées dans les figures 2.8a, b, c, d et e avec en fond, le modèle. Les paramètres temporels à chacun des points sont indiqués dans le tableau 2.3.

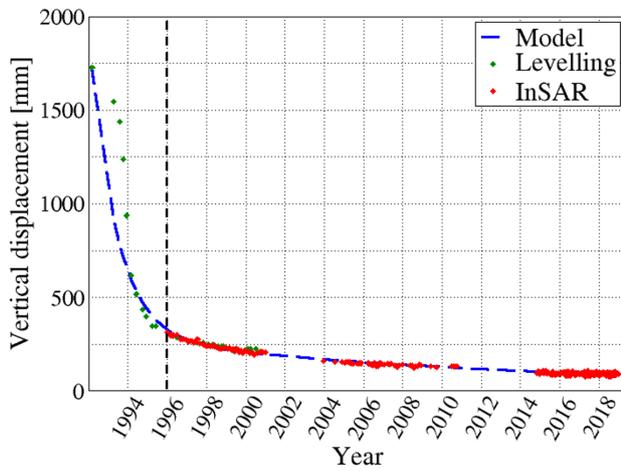
Pour caractériser l'affaissement résiduel dans le bassin potassique alsacien, le début de la phase résiduelle a besoin d'être déterminé. Comme présenté dans l'introduction générale, la phase résiduelle commence lorsque le point en surface n'est plus sous l'influence directe de l'extraction en cours ou en d'autres termes, lorsque le point en surface est sorti de la zone d'influence de l'extraction en cours. Pour déterminer le début de cette phase, la distance d'influence de l'extraction au fond est à déterminer. Elle est calculée à partir de la profondeur de la couche extraite et de l'angle d'influence. L'angle d'influence est défini comme l'angle formé entre la verticale au bord de la zone exploitée et les points en surface où aucun affaissement n'est détecté. Sa valeur est traditionnellement obtenue en croisant les cartes d'exploitation aux cartes d'affaissement. En connaissant l'année d'extraction des panneaux et en prenant un angle d'influence de  $35^\circ$  estimé par les MDPA, la phase résiduelle commence en 1996 à Bollwiller (193 et 210), et 1997 à Bollwiller 143, Pulversheim et Raedersheim. Ces dates coïncident au moment où le nivellement et les résultats InSAR des données ERS se superposent (figure 2.7). Les déplacements tendent à devenir majoritairement verticaux avec le début de la phase résiduelle. Ainsi, les déplacements verticaux mesurés par InSAR sont les affaissements résiduels.



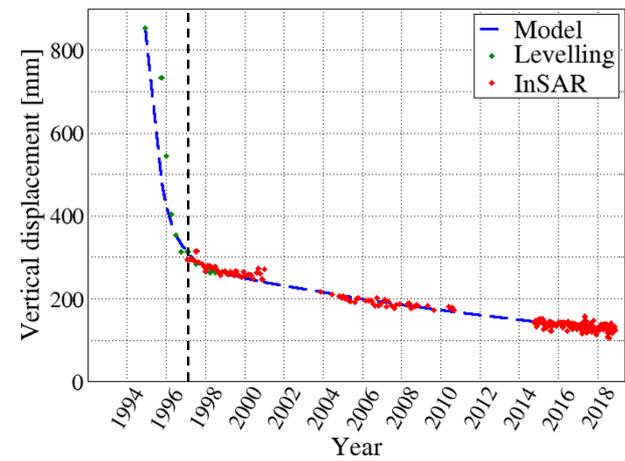
(a) Bollwiler 143



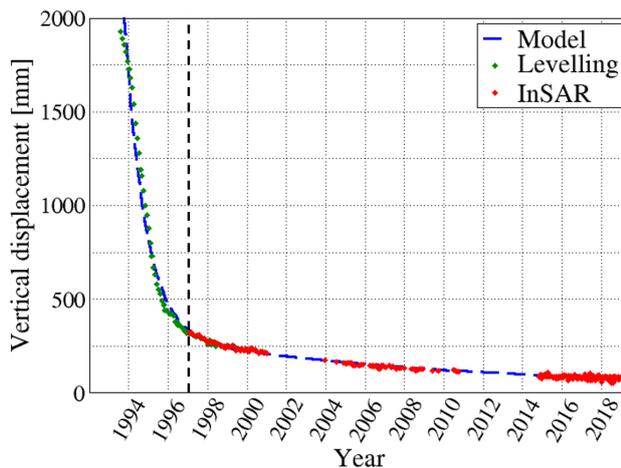
(b) Bollwiler 193



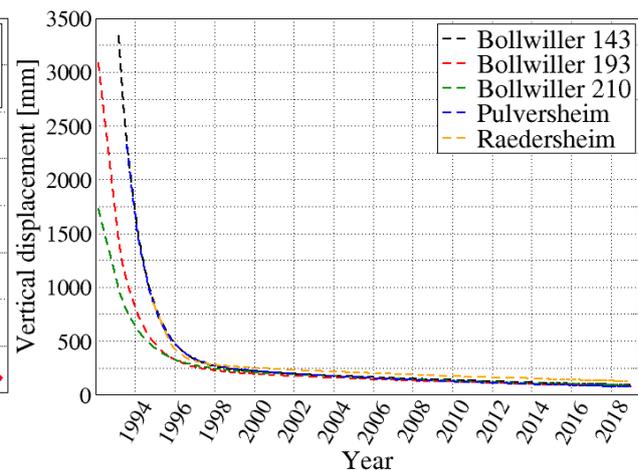
(c) Bollwiler 210



(d) Raedersheim



(e) Pulversheim



(f) Modèles

FIGURE 2.8 – Séries temporelles des mesures de nivellement et des résultats InSAR sur l'ensemble de la période d'observation avec le modèle utilisé pour les ajuster. La ligne pointillée noire marque la séparation entre les phases actives et résiduelles de l'affaissement. Les différents modèles obtenus sont comparés sur la dernière figure.

| Point de nivellement | $B_1$ [m] | $\xi_1$ [an <sup>-1</sup> ] | $\xi_e$ [an <sup>-1</sup> ] | $B_2$ [m] | $\xi_2$ [an <sup>-1</sup> ] |
|----------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| Bollwiller 143       | 8.87      | $0.92 \pm 0.02$             | 0.78-0.91                   | 0.30      | $0.045 \pm 0.002$           |
| Bollwiller 193       | 3.24      | $0.88 \pm 0.03$             | 0.78-0.91                   | 0.28      | $0.048 \pm 0.003$           |
| Bollwiller 210       | 1.62      | $0.74 \pm 0.02$             | 0.78-0.91                   | 0.29      | $0.046 \pm 0.002$           |
| Pulversheim          | 9.07      | $0.95 \pm 0.01$             | 0.84-0.98                   | 0.34      | $0.057 \pm 0.001$           |
| Raedersheim          | 0.55      | $1.30 \pm 0.04$             | 1.48-1.73                   | 0.30      | $0.037 \pm 0.001$           |

TABLE 2.3 – Paramètres temporels de la somme de deux termes exponentiels aux cinq points de nivellement.  $\xi_e$  correspond au facteur temporel estimé à partir de l’encadrement de Cui et al. (2001).

Les séries temporelles combinées révèlent une décroissance importante de la vitesse avant le début de la phase résiduelle, en 1994 à Bollwiller (193 et 210), en 1995 à Bollwiller 143 et Pulversheim, en 1996 à Raedersheim. À Bollwiller 143, la vitesse chute en 1995, après l’extraction sous-jacente proche et lorsque l’exploitation s’éloigne (figure 2.9b). Une fois la phase résiduelle débutée, la décélération continue mais à un taux plus lent (figure 2.9a). La vitesse d’affaissement est comprise entre  $4.0 \pm 1.0$  mm.an<sup>-1</sup> à Bollwiller 210 et  $8.3 \pm 1.0$  mm.an<sup>-1</sup> à Pulversheim sur la période ENVISAT (2004-2010), et sous les  $4.5 \pm 0.3$  mm.an<sup>-1</sup> sur la période Sentinel-1 (2015-2018). Ainsi, les déplacements verticaux mesurés diminuent à chaque période (tableau 2.5).

À la fin de la période Sentinel-1, le déplacement vertical total mesuré par InSAR pendant la phase résiduelle aux cinq points de nivellement est indiqué dans le tableau 2.5. Dans le tableau 2.4, les déplacements verticaux se produisant sur l’ensemble de la période 1996/1997-2018 sont considérés et les valeurs cumulées sont arrondies. Aussi bien les MDPA que d’autres auteurs expriment l’affaissement résiduel relativement à l’affaissement total se produisant en surface et une valeur de 10% est estimée dans le bassin potassique alsacien (Yao and Reddish, 1994; Al Heib et al., 2005; MDPA, 2008a). Toutefois, à Raedersheim et à Bollwiller 210, le taux est plus important que l’estimation (tableau 2.4). Par ailleurs, les valeurs de ce taux sont assez hétérogènes. Ces observations suggèrent que l’affaissement total n’est pas une référence fiable pour quantifier l’affaissement résiduel. Toutefois, il est à garder à l’esprit que les mesures de nivellement ne représentent que la borne inférieure de l’affaissement actif, une partie de l’affaissement pouvant ne pas avoir été mesurée à cause d’un suivi tardif. En comparant l’affaissement résiduel mesuré par InSAR à la puissance de la couche extraite au fond, le taux est homogène pour les différents points et une valeur moyenne de 5.7% est obtenue (tableau 2.4). Ces résultats suggèrent une certaine corrélation entre la phase résiduelle et la puissance de la couche extraite.

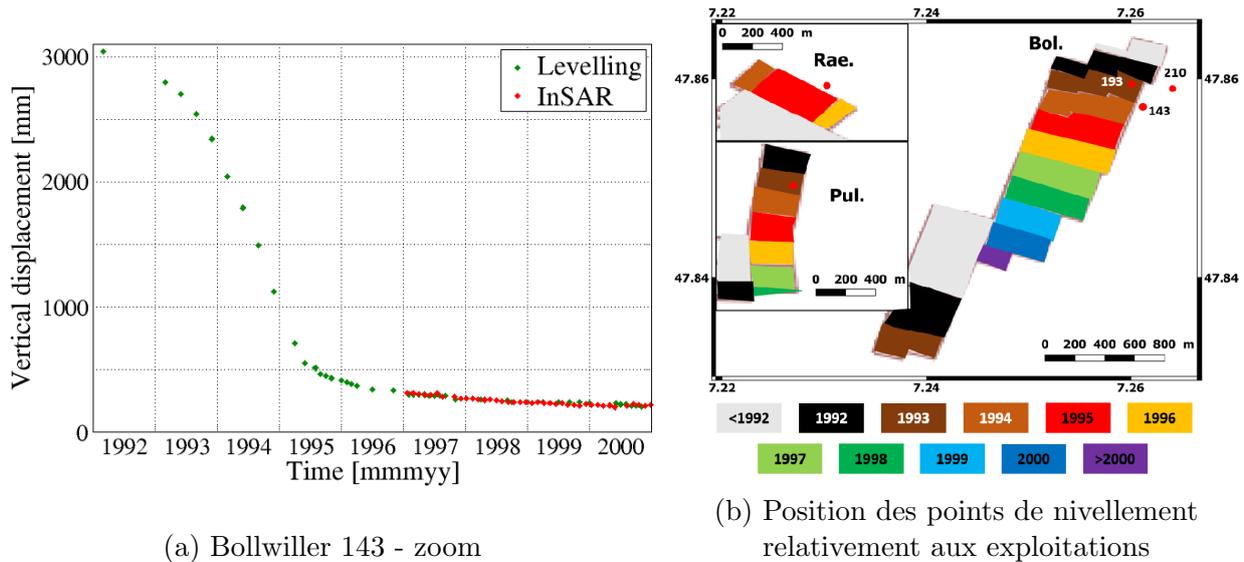


FIGURE 2.9 – Série temporelle du nivellement accompagnée des résultats ERS à Bollwiller 193 (a) et position des points de nivellement relatifs aux secteurs exploités les plus proches. Les points de nivellement sont représentés par les points rouges. À chaque période d'exploitation est associée une couleur.

| Point de nivellement | $A_{act}$ (niv.) [cm] | $A_{résid}$ (InSAR) [cm] | Profondeur D [m] | Puissance H (W) [m] | $A_{résid} / A_{tot}$ [%] | $A_{résid} / W$ [%] | $A_{act} / H$ [%] | $A_{act} / D$ [%] |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Bollwiller 143       | 273                   | 22                       | 900              | 3.9                 | 7.5                       | 5.6                 | 70                | 0.30              |
| Bollwiller 193       | 278                   | 24                       | 900              | 3.9                 | 7.9                       | 6.2                 | 71                | 0.31              |
| Bollwiller 210       | 141                   | 22                       | 900              | 3.9                 | 13.9                      | 5.6                 | 36                | 0.16              |
| Pulversheim          | 234                   | 25                       | 1000             | 4                   | 9.7                       | 6.3                 | 59                | 0.23              |
| Raedersheim          | 54                    | 15                       | 850              | 3.05                | 21.7                      | 4.9                 | 18                | 0.06              |

TABLE 2.4 – Amplitude de l'affaissement résiduel mesurée aux cinq points de nivellement. Le déplacement cumulé mesuré par InSAR est arrondi au centimètre entier le plus proche. L'affaissement total est obtenu en additionnant les mesures de nivellement aux résultats InSAR. Abréviations,  $A_{act}$  : Affaissement actif ;  $A_{résid}$  : Affaissement résiduel ;  $A_{tot}$  : Affaissement total.

| Point de nivellement | Déplacement vertical ERS [cm] | Déplacement vertical ENVISAT [cm] | Déplacement vertical Sentinel-1 [cm] | Déplacement vertical cumulé [cm] |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Bollwiller 143       | $9.4 \pm 2.5$                 | $3.2 \pm 1.2$                     | $1.1 \pm 0.6$                        | 13.7                             |
| Bollwiller 193       | $12.0 \pm 2.5$                | $2.9 \pm 1.3$                     | $1.0 \pm 0.6$                        | 15.9                             |
| Bollwiller 210       | $10.5 \pm 3.5$                | $2.8 \pm 1.4$                     | $0.9 \pm 0.6$                        | 14.2                             |
| Pulversheim          | $10.8 \pm 2.4$                | $5.8 \pm 1.2$                     | $1.2 \pm 0.4$                        | 17.8                             |
| Raedersheim          | $4.7 \pm 1.0$                 | $4.4 \pm 1.5$                     | $1.7 \pm 0.7$                        | 10.8                             |

TABLE 2.5 – Affaissements mesurés par InSAR sur les différentes périodes d'observation. La période ERS couvre une durée de 4 à 5 ans en fonction du point, la période ENVISAT 7 ans et Sentinel-1 4 ans.

### 2.4.3 Les autres signaux

Après la réalisation de séries temporelles proches des exploitations récentes, deux sites attirent l'attention, Ungersheim et Reiningue (figures 2.5a et 2.6a, étoiles marrons). Ces deux points présentent un déplacement particulier pendant la période ERS. Dans les deux cas, les séries temporelles obtenues en direction ascendante et descendante sont différentes (figures 2.10a et b). Pour Reiningue, plusieurs secteurs étant exploités en simultanément, il est alors pertinent de s'intéresser à la progression de l'exploitation (figure 2.10c).

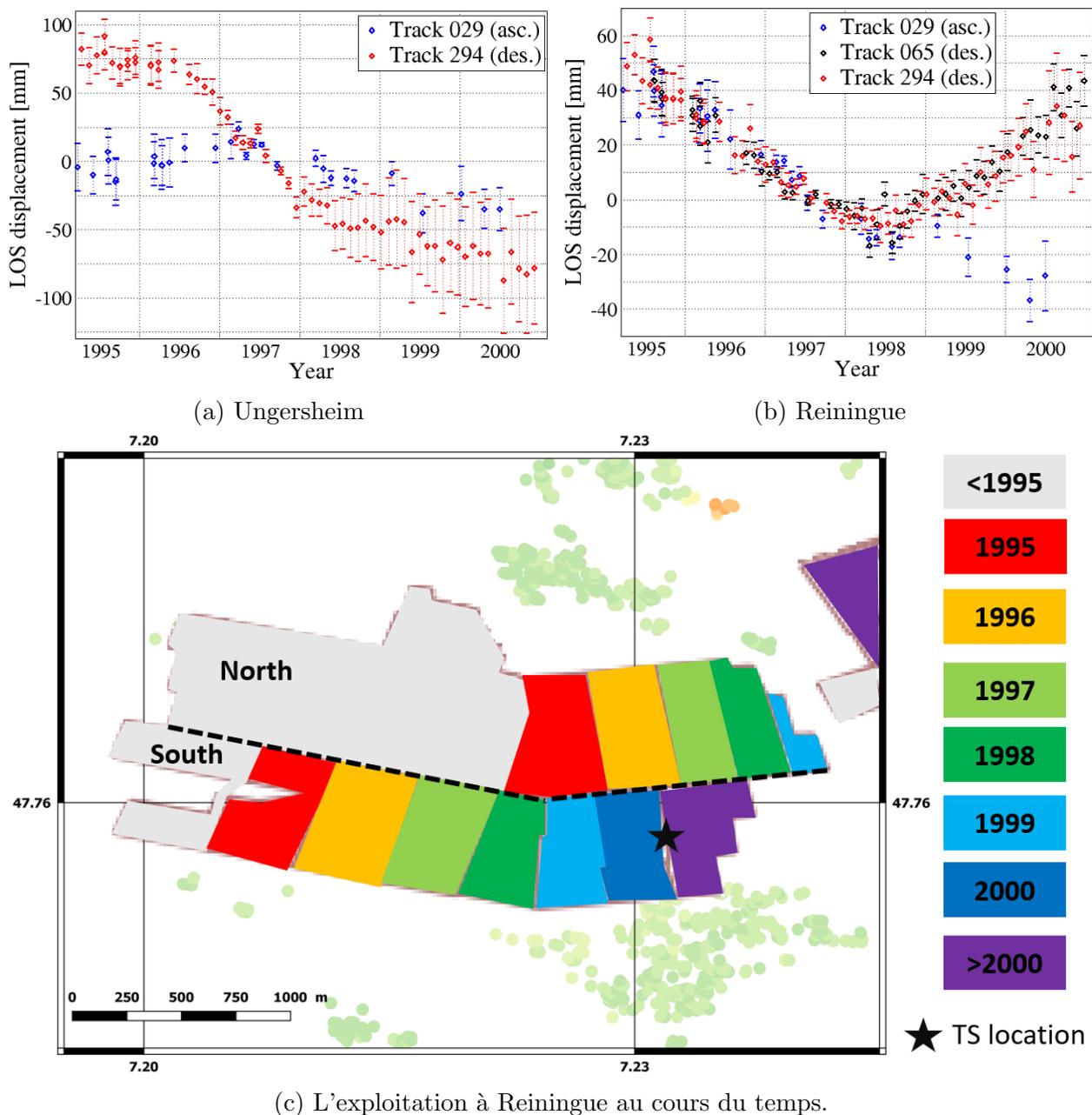


FIGURE 2.10 – Déplacements LOS observés à Ungersheim (a) et à Reiningue (b) sur la période ERS en relation avec l'exploitation minière (c). À chaque période d'exploitation est associée une couleur et l'étoile noire indique la position de la série temporelle présentée.

À Ungersheim, entre 1996 et 1997, la couche inférieure est exploitée sur une petite surface à 800 m de profondeur (figures 2.5a et 2.6a). Des mesures ont pu être réalisées sur des pixels stables avant, pendant et après l'exploitation. Le point est stable avant l'arrivée de l'exploitation en profondeur, puis commence à accélérer à partir de mi-1996 et décélère au début de 1998 quand l'exploitation est terminée (figure 2.10a). La forme de la courbe présentée dans l'introduction générale est retrouvée pour les résultats InSAR descendants. Concernant les résultats InSAR ascendants, la forme de la courbe est bien différente. Parmi les trois composantes du déplacement et de la vitesse, la composante nord est la moins bien résolue, due à la direction azimutale quasi-polaire et la faible différence angulaire des lignes de visées ( $<5^\circ$ , tableau 2.2) entre acquisition ascendante et descendante (Wright et al., 2004). En négligeant la composante nord, les déplacements selon l'axe vertical et l'axe Est-Ouest peuvent être estimés. Sur la période mi-1996 à mi-1997, en considérant un déplacement de 1 mm en ascendant et -5 mm en descendant (figures 2.10a), un déplacement vertical de -2.2 mm (affaissement) et un déplacement horizontal de 9.8 mm vers l'ouest sont obtenus. Les déplacements verticaux obtenus sont faibles, surtout compte tenu de la position du point suivi par rapport à l'exploitation sous-jacente (figures 2.5a et 2.6a). Comme pour la comparaison entre les séries temporelles InSAR et de nivellement, la différence entre les deux courbes résulterait de deux causes : les déplacements horizontaux et des erreurs de déroulement dues aux fortes vitesses. À ces causes s'ajoutent la mauvaise résolution temporelle de l'archive ascendante et spatiale des résultats des deux archives. Les fortes barres d'erreurs sont dues à des pixels voisins ne retrouvant pas la même amplitude de déplacement. Une observation additionnelle (nivellement, InSAR) serait utile pour la caractérisation du signal. Cette série temporelle souligne une limite de l'InSAR, où les zones retenues ne sont pas strictement identiques d'une archive à l'autre, limitant les analyses croisées à certains points.

À Reiningue, deux phases sont discernables dans la série temporelle. La première, se déroulant de 1995 à mi-1998, est caractérisée par un mouvement s'éloignant du satellite à une vitesse d'environ  $20 \text{ mm.an}^{-1}$  en LOS (figure 2.10b). La forte ressemblance entre les données des archives ascendantes et descendantes suggère soit un déplacement purement vertical, soit un déplacement vertical avec une composante horizontale orientée vers le nord. La seconde phase, de mi-1998 à 2001, est caractérisée par une nette différence entre les séries temporelles LOS. Les données ascendantes indiquent un mouvement s'éloignant du satellite d'environ  $15 \text{ mm.an}^{-1}$  en LOS alors que les données descendantes indiquent l'opposé, un mouvement se rapprochant du satellite d'environ  $20 \text{ mm.an}^{-1}$  en LOS (figure 2.10b). Le point observé est de 1996 à 1997 dans la zone d'influence de l'exploitation nord, se dirigeant vers l'est et se situant à 450 m de profondeur (figure 2.10c). L'exploitation la plus proche est à environ 350 m du point en 1996. À partir de 1999, le point observé est dans la zone d'influence de l'exploitation au sud, se dirigeant vers l'est et se situant à 450 m de profondeur. L'exploitation est passée sous le point en 2000. De manière plus concise, le point est :

- sous l'influence directe de l'exploitation Nord en 1996 et 1997 ;
- sous l'influence résiduelle de l'exploitation Nord en 1998 ;

- sous l'influence directe de l'exploitation Sud à partir de 1999, en plus de l'influence résiduelle.

L'année 1998 représente donc une année pivot. Toutefois, la différence entre les archives peut provenir de multiples sources, comme expliqué précédemment, et une simple analyse des résultats InSAR n'est pas suffisante pour retrouver l'évolution temporelle des composantes du déplacement. L'idéal serait de disposer des observations complémentaires telles que le nivellement, données non retrouvées à ce jour.

### 2.4.4 Le site de stockage

Enfin, une attention particulière est portée au site de stockage. Cette activité a officiellement démarré en 1998 et le premier déchet y est entreposé en 1999. D'après les archives, 18 mois sont nécessaires au creusement d'un bloc de stockage. Le creusement du site débute ainsi au début de l'année 1998. Le creusement des galeries et du site de stockage est donc couvert par les données ERS. Quelques infrastructures se situant à sa verticale correspondent à des pixels stables sélectionnés par le traitement InSAR permettant de réaliser des séries temporelles sur les différentes périodes. Celle obtenue sur la période ERS est la plus intéressante (figure 2.11). Les données commençant en avril 1995, la zone est ainsi observée pendant deux ans avant le creusement du site de stockage. Cette dernière est relativement stable avec un léger affaissement. Cet affaissement s'accélère après le début du creusement du site, c'est-à-dire pendant l'année 1998. Ce signal n'est cependant visible qu'avec les archives descendantes puisque la couverture temporelle de l'archive ascendante est trop diffuse sur la période d'intérêt.

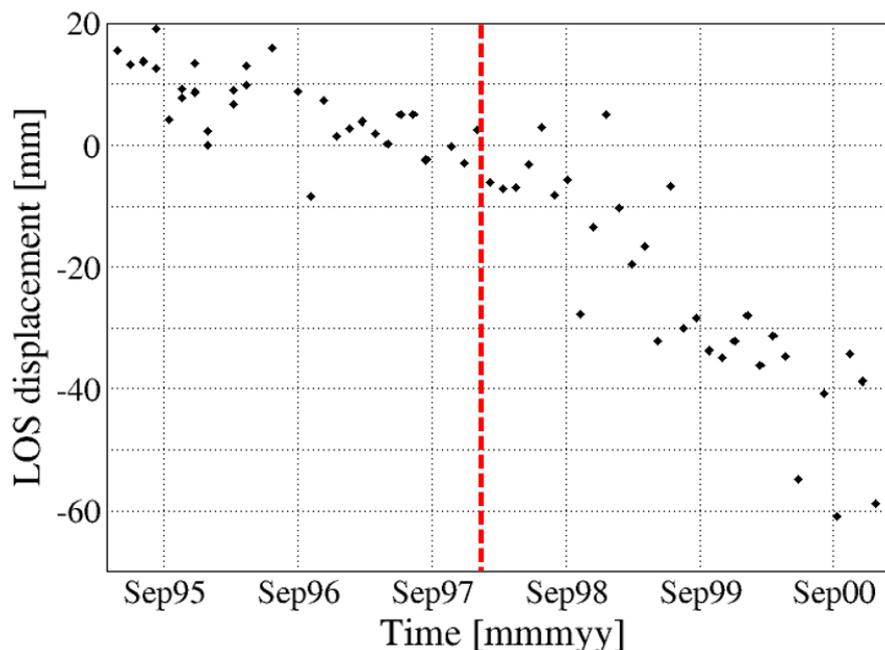


FIGURE 2.11 – Série temporelle à la verticale du site de stockage pendant la période ERS. Le trait rouge indique la date approximative du début de creusement des galeries du site de stockage.

Pendant les périodes ENVISAT et Sentinel-1 (figures 2.5c et 2.6c, 2.5e et 2.6e, étoile noire), un déplacement est également détecté avec les résultats InSAR ascendants et descendants aux alentours du site de stockage. Sur ces périodes, il est possible de s'intéresser aux vitesses horizontales. La même démarche qu'à Ungersheim est appliquée, mais avec les vitesses ; c'est-à-dire, la vitesse selon l'axe Nord-Sud est négligée et les vitesses selon l'axe vertical et l'axe Est-Ouest sont estimées. Sur la période Sentinel-1, en prenant une vitesse LOS de  $7.5 \text{ mm.an}^{-1}$  issue d'acquisition en passage ascendant et  $3.5 \text{ mm.an}^{-1}$  en descendant, des vitesses de  $-7.5 \text{ mm.an}^{-1}$  en vertical et  $2.7 \text{ mm.an}^{-1}$  vers l'est sont obtenues. De ces estimations découlent que les déplacements horizontaux ne sont pas négligeables sur les périodes Sentinel-1 et ENVISAT, leur amplitude est de l'ordre de 30% de celle des verticaux. Sur la période ERS, en l'absence de résultats issus du traitement des données acquises en passage ascendant, l'occurrence ou l'absence de déplacements horizontaux ne peut être démontrée. Sur les périodes ENVISAT et Sentinel-1, l'apport de données externes, comme le nivellement ou le GPS par exemple, permettrait de déterminer les trois composantes de la vitesse et du déplacement.

De manière similaire aux exploitations minières, le creusement des galeries du site de stockage causerait la mise en place d'une cuvette d'affaissement en surface, impliquant des déplacements horizontaux orientés vers le site de stockage. Toutefois, l'étude de ces déplacements de surface ne fait pas partie des objectifs de ces travaux de thèse. Suite à ses résultats, de nouveaux travaux de modélisation géomécanique du site de stockage ont été réalisés par Itasca, confirmant l'impact du site de stockage sur les déplacements de surface (Camusso and Billaux, 2018).

## 2.5 Discussion

Après l'analyse des résultats et la réalisation de séries temporelles InSAR combinées aux mesures de nivellement, les avantages et inconvénients de l'application de la technique InSAR dans le bassin potassique pour le suivi des déplacements de surface du sol sont discutés. Il est aussi vérifié que les signaux observés aux points suivis ne sont pas influencés par d'autres sources. Dans un dernier temps, l'amplitude de la phase résiduelle et les facteurs temporels de la somme des deux termes exponentiels sont analysés.

### 2.5.1 Les limites de l'InSAR appliqué au bassin potassique alsacien

L'un des défis dans le traitement InSAR est le suivi de déplacements forts et localisés à travers des zones faiblement corrélées. La difficulté est d'autant plus grande que les images ne sont pas nombreuses et/ou que les acquisitions n'ont pas été régulières. Dans le suivi d'affaissements miniers, il est rare que la couverture urbaine au-dessus des gisements soit importante (Perski et al., 2009). L'utilisation de données acquises en bande L, plus adaptée

pour les forts déplacements, aiderait également à étendre la zone exploitable, puisque que la cohérence serait meilleure même dans les zones agricoles (Wegmuller et al., 2004). Cependant, les satellites ont une période d'acquisition plus longue, 46 jours pour le satellite ALOS ce qui peut tout de même entraîner de la décorrélation temporelle. Dans le bassin potassique alsacien, l'affaissement résiduel est détecté aussi bien pour les exploitations récentes que plus anciennes au niveau des infrastructures humaines. Néanmoins, ces affaissements sont également attendus dans les champs et les forêts, qui surplombent une large partie du gisement enfoui. La NASA programme la mise en orbite du satellite NiSAR, dédié à l'acquisition d'images radar pour l'InSAR. Les données seront acquises en bande L, avec une période d'acquisition de 12 jours, permettant un suivi plus fréquent.

Un des principaux résultats de cette étude est que les déplacements en surface ont toujours lieu plusieurs décennies après la fin de l'exploitation. Mais la durée de vie d'un satellite dépasse rarement une dizaine d'années. Ainsi, pour les phénomènes lents comme le suivi des affaissements miniers, ces courtes durées de vie des satellites conduisent à un suivi avec des jeux de données discontinus, et qui sont difficiles à recalcr les uns aux autres. Des modèles sont alors nécessaires pour recalcr les séries temporelles. Dans le cas de déplacements multidirectionnels, ces ajustements sont irréalisables sans apport d'informations externes sur le phénomène suivi.

Ensuite, la phase active de l'affaissement n'est pas retrouvée à cause de déplacements forts et localisés. Bien que le satellite ait été en orbite constamment, les acquisitions n'étaient pas systématiques, engendrant des archives de données plus fournies pour les sens descendants qu'ascendants pour ERS et ENVISAT. Ces inégalités de suivi restreignent les interprétations et les analyses croisées des résultats, surtout dans le cas de déplacements forts et multidirectionnels. Ces archives disparates combinées aux déplacements forts et localisés ne sont alors que partiellement exploitables. Ainsi, les limites de l'étude se résument en trois points : le sous-échantillonnage temporel des données, les surfaces non-cohérentes de la zone d'étude et les forts déplacements 3D s'y produisant. Les travaux précédents sur le bassin potassique alsacien tirent les mêmes conclusions : les surfaces faiblement cohérentes associées aux déplacements forts et localisés limitent toutes mesures fiables d'affaissement (Raymond and Rudant, 1997).

Dans le cas général, avec les satellites plus récents, tel que Sentinel-1, l'absence de quelques images sera moins problématique grâce à une période d'acquisition plus courte. Par exemple, le satellite ENVISAT propose jusqu'à 11 images maximum par an et par archive, contre 61 pour la paire de satellites Sentinel-1. Ensuite, la présence de zones faiblement corrélées n'aboutit pas nécessairement à des échecs lors du traitement. En acceptant une perte de précision, d'autres chaînes de traitement telle que SqueeSAR arrivent à travailler avec ces surfaces. De nos jours, les efforts sont orientés sur l'extraction précise des informations contenues dans ces zones délicates (Ferretti et al., 2011; Spaans and Hooper, 2016). Enfin, l'amélioration des couvertures spatiales et temporelles aide à suivre et estimer des déplacements de surface plus complexes (Przyłucka et al., 2015; Ilieva et al., 2019). La réussite

d'un traitement réside dans la sélection d'une chaîne de traitements appropriée à la surface d'étude. La méthode à employer dépend aussi de la précision désirée sur les résultats (Hu et al., 2014). Dans certaines études, les auteurs recourent à l'utilisation de modèles *a priori* pour améliorer les résultats InSAR. Leurs utilisations permettent de récupérer un déplacement vertical issu d'un déplacement 3D (Samieie-Esfahany et al., 2009) et de reconstituer des déplacements métriques en l'incorporant dans la phase interférométrique (Walter et al., 2005). Dans les travaux de Walter et al. (2005), la surface couvrant l'exploitation minière est similaire à celle du bassin potassique alsacien.

Dans cette étude, les larges archives d'images SAR acquises par les différents satellites sont exploitées. Les résultats InSAR mettent en lumière plusieurs caractéristiques intéressantes de l'affaissement résiduel. La combinaison des archives descendantes et ascendantes aide à montrer que l'affaissement résiduel est dominé par les déplacements verticaux, vers le bas. L'affaissement minier est encore actif plus de 20 ans après le début de la phase résiduelle alors qu'il est traditionnellement considéré terminé après une telle période (Lane and Roberts, 1929 ; Al Heib et al., 2005). Les affaissements étant verticaux et les résultats InSAR indépendants, les résultats sont à ajuster précautionneusement pour produire une série temporelle complète. L'utilisation d'un modèle adapté à partir des observations aide à construire une série temporelle InSAR de 24 ans. Enfin, l'amplitude de la phase résiduelle suivie semble être corrélée à la puissance extraite. Ce résultat pourrait aider à mieux anticiper l'amplitude finale des affaissements résiduels.

## 2.5.2 Les sources potentielles de déplacements

Jusqu'à présent, l'analyse des résultats InSAR met en avant une bonne corrélation entre l'activité minière en profondeur et les déplacements de surface. L'amplitude des déplacements mesurés est corrélée à l'épaisseur de la couche extraite. Les faibles déplacements mesurés quelques dizaines d'années après l'arrêt des travaux miniers sont clairement dus à l'activité minière sur des arguments principalement de localisation de la déformation par rapport aux anciens secteurs exploités en profondeur. Cette déformation post-exploitation, étalée dans le temps, peut être liée à la réponse visco-plastique des couches supérieures et de la zone foudroyée. Néanmoins, comme les résultats aux alentours de Staffelfelden le suggèrent, d'autres sources peuvent être à l'origine de déplacements se produisant à travers le bassin potassique alsacien. Il ressort de l'analyse des activités passées et de la littérature que deux catégories de sources sont à envisager : anthropique incluant les terrils, le pompage d'eau souterraine et les réservoirs pétroliers, et naturelle avec la tectonique.

Lors de l'exploitation, la gestion des insolubles et autres déchets miniers est opérée en surface par la mise en place d'une dizaine de terrils. Pendant la période ERS, une partie d'entre eux était encore en cours d'utilisation alors que l'autre partie était en cours de traitement (imperméabilisation, végétalisation, dissolution accélérée, etc) (Fischer et al., 2016). Dans les deux cas, leur topographie se retrouve modifiée au cours de la période, induisant des déplacements de surface. Des vitesses fortes et localisées sont ainsi détectées au niveau

des terrils Marie-Louise et Joseph-Else Ouest seulement pendant la période ERS.

Ensuite, à cause de la présence de sel dans les terrils, la nappe phréatique alsacienne a connu un épisode de salinisation (Lucas et al., 2008). Les MDPA ont donc installé plusieurs sites de pompages dans les années 70 afin d' "évacuer" la saumure de la nappe. Pendant la période d'activité, les MDPA utilisèrent également l'eau souterraine pour extraire la potasse des roches remontées en surface. La méthode InSAR s'est déjà montrée efficace pour suivre et détecter les déplacements de surface en lien avec des activités de pompage (Motagh et al., 2008). Par contre, les résultats dans la région des MDPA ne montrent pas de corrélation spatiale claire entre les principales zones de déformation et la localisation des sites de pompage comme illustré dans la figure 2.12. Même si l'effet du pompage sur les déplacements de surface ne peut être complètement exclu, il semble que sa contribution reste mineure.

En plus de l'exploitation minière, trois réservoirs pétroliers furent exploités dans le bassin potassique alsacien de 1954 à 1968 (Sittler, 1972). Ces réservoirs sont localisés au Sud-Ouest de Reiningue et sous Bollwiller et Staffelfelden. Un signal atypique est seulement détecté à Staffelfelden, puisque les vitesses restent élevées, supérieure à  $7.5 \pm 0.3 \text{ mm.an}^{-1}$  sur plus de 20 ans.

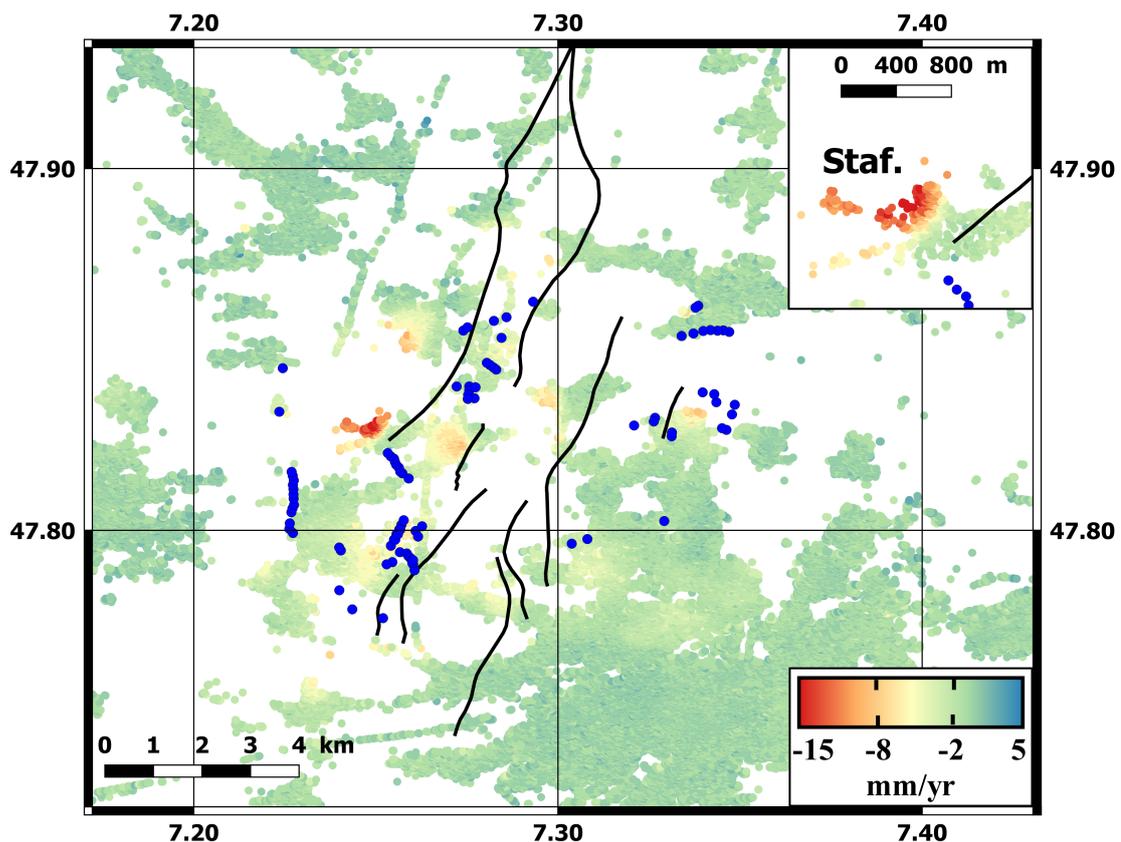


FIGURE 2.12 – Cartes des sites de pompages et des failles dans le bassin potassique alsacien. Les cercles bleus représentent les sites de pompage et les traits noirs, les failles majeures.

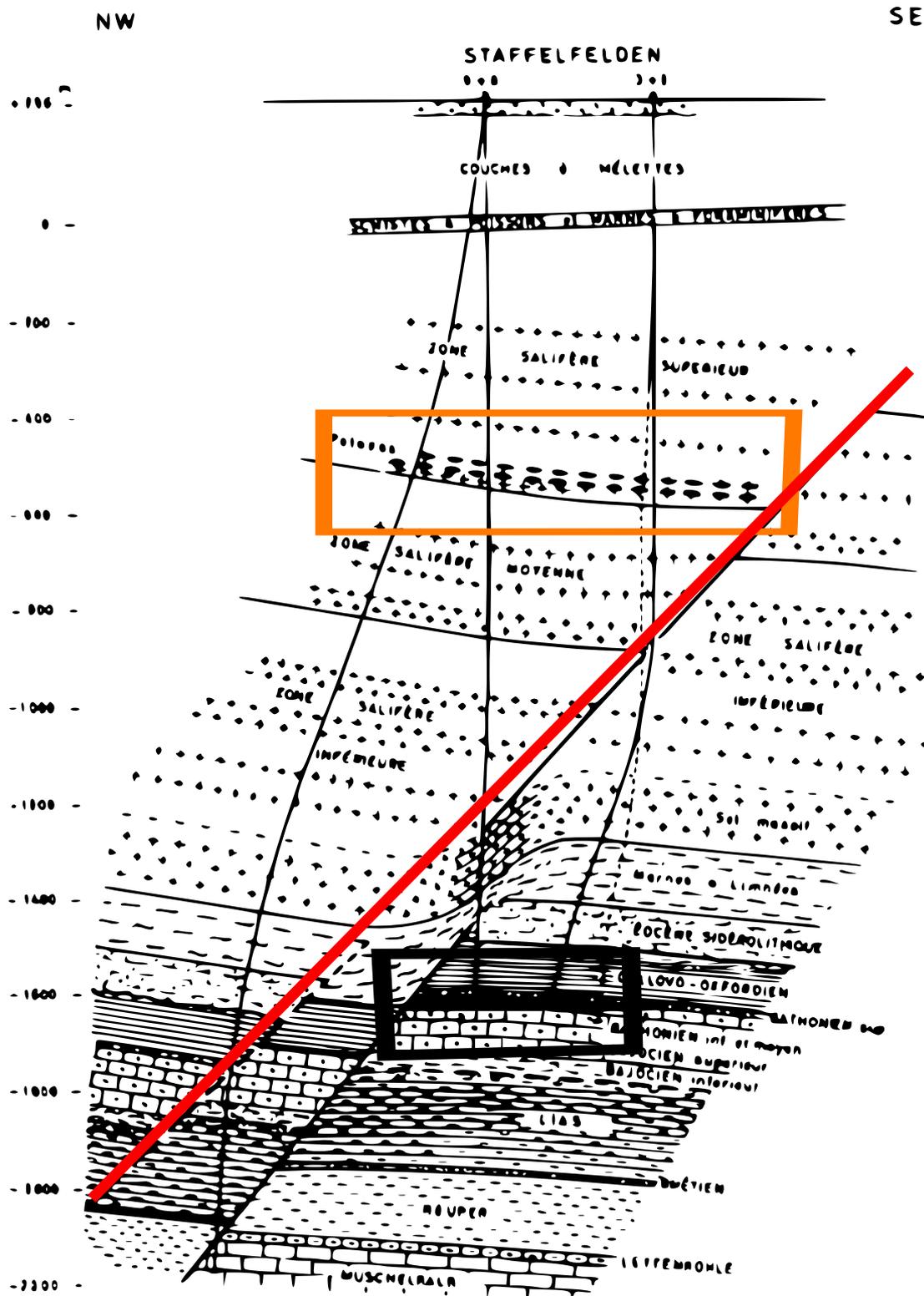


FIGURE 2.13 – Coupe géologique schématique aux alentours de Staffelfelden. Les couches de potasse se situent à environ -400 m et le réservoir pétrolier à -1600 m (Sittler, 1972). Le rectangle orange indique la position des couches de potasse exploitées, le rectangle noir la position du réservoir pétrolier et la droite l'orientation de la faille.

Le Fossé Rhénan fut étudié à plusieurs reprises par un grand nombre de méthodes géophysiques, débouchant sur une cartographie des failles régionales (Cardozo et al., 2005). En complément, les MDPA ont aussi cartographié les failles à l'échelle du bassin sédimentaire à partir de leurs propres campagnes de mesures. La réactivation de faille induite par l'activité minière est susceptible de se produire dans les bassins sédimentaires (Sainoki and Mitri, 2014). À l'exception de Staffelfelden, aucune relation ne peut être faite entre les failles et les zones de déformation (figure 2.12). Dans le cas de Staffelfelden, l'orientation de la faille est parallèle à l'axe formé par les zones stables et celles s'affaissant (figure 2.12, encart), suggérant un lien entre les deux. Sous Staffelfelden, sur une même verticale sont localisées les deux couches de potasse extraites, une faille avec un rejet de 300 m et le réservoir pétrolier (figure 2.13). Les présences du réservoir pétrolier et des secteurs exploités aux abords de la faille peuvent être à l'origine des déplacements observés en surface. Néanmoins, une étude approfondie et complémentaire est nécessaire pour déterminer l'effet et les interactions de chacune de ces discontinuités sur les déplacements mesurés.

En résumé, à l'exception des terrils et de Staffelfelden, les déplacements mesurés par InSAR sont essentiellement en lien avec l'activité minière.

### 2.5.3 L'affaissement résiduel

#### 2.5.3.1 L'amplitude de la phase résiduelle

Le terme d'affaissement résiduel est apparu au cours des années 1970, décrivant la part de l'affaissement se produisant en surface après que la zone n'est plus soumise à l'effet de l'exploitation en cours (Orchard and Allen, 1974). Cet affaissement résiduel est d'abord exprimé relativement à l'affaissement maximal, qui est le produit entre l'épaisseur extraite et un coefficient dépendant de la méthode de remblaiement (0.9 pour le foudroyage, 0.5 pour le remblaiement pneumatique et 0.2 pour le remblaiement hydraulique) (Brauner, 1973). Dans des publications plus récentes ainsi que dans l'industrie minière, l'affaissement résiduel est exprimé relativement à l'affaissement total. L'utilisation de l'affaissement total comme référentiel est délicat dans la mesure où son utilisation implique que l'affaissement ait été correctement suivi et quantifié depuis le début. Par ailleurs, dans le cas d'exploitations rapprochées se réalisant en simultané, cela implique de savoir distinguer l'effet de chacune des exploitations sur le signal mesuré. Par moment, son emploi mène à de larges intervalles de valeurs, compris entre 8% et 45% pour une même zone (Fercari, 1997). Toutefois, dans un cas comme dans l'autre, le choix du référentiel n'est pas clairement justifié ou expliqué.

La comparaison des résultats entre eux permet de vérifier si l'affaissement résiduel et l'affaissement total dépendent des mêmes paramètres. Par retour d'expérience, l'amplitude de l'affaissement minier dépend de la distance au secteur exploité et du ratio entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur entre autres (Whittaker and Reddish, 1989, Kratzsch, 2012). Bollwiller 193 et Pulversheim sont situés au-dessus de l'exploitation sous-jacente alors que Bollwiller 143 et Raedersheim sont situés 50 m à côté, 250 m pour Bollwiller 210 (figure

2.9b). À l'exception de Raedersheim où seule la couche inférieure de potasse est extraite, les deux couches sont extraites aux alentours des points de nivellement. À Pulversheim, la couche supérieure est extraite 10 ans avant la couche inférieure, cet écart grimpe à 13 ans pour Bollwiller. Dans le cas de Bollwiller, les points 193 et 210 sont en dehors de la zone d'influence pendant toute la période d'extraction de la couche supérieure. Le point 143 est dans la zone d'influence, mais plus proche de la limite que de l'exploitation. Dans le cas de Pulversheim, le point est au-dessus des deux couches extraites. Ainsi, les résultats obtenus à Pulversheim ne sont pas pris en compte pour éviter toute interférence avec les déplacements résiduels en lien avec l'extraction de la couche supérieure.

Bollwiller et Raedersheim illustrent l'effet du ratio et de la distance à l'exploitation. Bollwiller 193 est plus proche du secteur exploité que Bollwiller 210 et l'affaissement est près de deux fois plus important à Bollwiller 193 (tableau 2.4). Bollwiller 143 et Raedersheim ont une distance similaire à leur secteur exploité sous-jacent respectif alors que l'affaissement minier est cinq fois plus important à Bollwiller que Raedersheim (tableau 2.4). L'épaisseur extraite est similaire dans les deux cas, 3.05 m à Raedersheim contre 3.90 m à Bollwiller, alors que le rapport entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur est de 0.4 à Raedersheim contre 1.0 à Bollwiller.

Les déplacements verticaux se produisant pendant la phase résiduelle sont maintenant considérés pour vérifier si les mêmes paramètres influencent l'amplitude de l'affaissement résiduel. Les ratios entre le déplacement vertical et l'épaisseur exploitée sont similaires à Bollwiller et Raedersheim compte tenu de l'incertitude sur les déplacements mesurés (tableau 2.4). Ainsi, l'impact de la position relative à l'exploitation sous-jacente n'est pas clair. Toutefois, le taux similaire à Bollwiller 143 et Raedersheim suggère que le rapport entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur n'affecte pas l'affaissement résiduel.

Avec ces comparaisons simples, les affaissements résiduels et totaux ne reposent pas sur les mêmes paramètres considérés. Ainsi, l'emploi de l'épaisseur extraite pour exprimer l'affaissement résiduel semble plus précis. Un nombre de comparaisons plus important aurait été utile pour appuyer ou contredire cette conclusion. Des observations complémentaires auraient permis de vérifier l'effet d'autres paramètres tels que l'épaisseur extraite et la méthode de remblaiement.

### 2.5.3.2 Les mécanismes à l'origine de la phase résiduelle

Concernant les exploitations en longue taille avec foudroyage, l'affaissement minier est induit par trois sources : la fermeture instantanée des vides miniers, la réponse inélastique des couches supérieures et la fermeture des fractures et des vides miniers résiduels sous le poids des terrains (Pasamehmetoglu, 1972). Le remblai du foudroyage est composé d'agrégats de matériaux provenant des couches supérieures, sur une hauteur de quelques fois l'épaisseur extraite, et remplit le vide laissé par l'extraction. Cependant, la porosité du milieu est relativement importante au début. Des fractures et des décollements de banc de matériaux se produisent également dans les couches supérieures. En revanche, le volume total de ces

hétérogénéités est difficile à quantifier dans la mesure où il dépend de plusieurs paramètres dont notamment la profondeur et la géologie des matériaux supérieurs (Palchik, 2005). Un autre effet du foudroyage est la relaxation temporaire des contraintes dans les matériaux supérieurs. L'extension de cette zone de relaxation dépend de la géologie et de la méthode d'extraction (Majdi et al., 2012). Par la suite, le champ de contraintes évolue vers un nouvel équilibre alors que dans le même temps, la contrainte verticale contrôle la compaction des matériaux foudroyés en profondeur (Marts et al., 2014).

Les mécanismes précédemment discutés commencent tous en même temps, juste après le foudroyage. L'affaissement suivi par nivellement contient les déplacements liés aux réponses élastiques et différées. Par ailleurs, il est compliqué de discerner la part de chacune des sources (figure 2.9a). D'un côté, pour estimer proprement l'amplitude des déplacements dus aux sources différées, la contribution élastique doit être proprement retirée du signal. D'un autre côté, la contribution élastique n'affecte pas le temps caractéristique des sources différées. Avec la somme de deux exponentielles, l'attention est portée sur la durée de l'affaissement minier. C'est pourquoi essentiellement les paramètres temporels sont discutés. Dans le cas d'un simple terme exponentiel, le paramètre temporel est estimé à partir de la vitesse d'avancement et de la profondeur de l'exploitation, et est utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux supérieurs. L'encadrement empirique du facteur temporel  $\xi_1$  est (2.3, Cui et al., 2001) :

$$-\frac{V * \ln(0.02)}{1.4 * H_0} \leq \xi_1 \leq -\frac{V * \ln(0.02)}{1.2 * H_0} \quad (2.3)$$

avec  $H_0$  la profondeur de l'exploitation en m et  $V$  la vitesse d'avancement de l'exploitation en  $\text{m.an}^{-1}$ . Pour une profondeur de 1 km et une vitesse d'avancement de  $250 \text{ m.an}^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 0.84 et 0.98 à Pulversheim. Pour une profondeur de 900 m et une vitesse d'avancement de  $300 \text{ m.an}^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 0.78 et 0.91 à Bollwiller. Pour une profondeur de 850 m et une vitesse d'avancement de  $450 \text{ m.an}^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 1.48 et 1.73 à Raedersheim. Les valeurs ainsi obtenues sont resumées dans le tableau 2.3. À l'exception de Raedersheim, il est à noter une bonne concordance entre les estimations et le facteur temporel  $\xi_1$  (tableau 2.3). Après 10 ans, ce terme exponentiel devient négligeable. Le second facteur temporel  $\xi_2$  est un ordre de grandeur inférieur au précédent, avec des valeurs homogènes entre  $0.03$  et  $0.06 \text{ an}^{-1}$ . Après un siècle, ce second terme exponentiel devient négligeable. Ainsi, la somme de deux termes exponentiels proposée n'est pas une toute nouvelle loi, mais une adaptation avec l'ajout d'un second terme exponentiel d'une loi connue, la loi de Knothe, basée sur des observations d'affaissements miniers sur une plus longue période de temps.

Enfin, le facteur temporel  $\xi_1$  dépend des propriétés mécaniques des matériaux supérieurs et  $\xi_2$  est en lien avec la fermeture des vides résiduels incluant la compaction des matériaux foudroyés. Le premier facteur temporel caractérise la réponse visco-plastique des matériaux supérieurs tandis que le second représente le temps nécessaire à la fermeture complète des

vides et fractures. Dans le cas d'un simple terme exponentiel, les deux processus ont une période caractéristique similaire. L'ajout d'un second terme exponentiel permet de distinguer les deux phénomènes. Un autre modèle distingue deux sources ([Hejmanowski and Sroka, 2000](#)). Les auteurs considèrent un premier terme pour la fermeture des vides et un deuxième terme pour la réponse différée du recouvrement, similaire à la théorie de Knothe qui associe son terme exponentiel à la même source. Cette proposition repose sur la constatation que le déplacement mesuré en surface est la réponse du système à la fermeture des vides ([Sroka et al., 2011](#)). Ainsi, le second terme exponentiel du modèle utilisé serait relié à plusieurs sources, incluant la fermeture des vides. La création d'un modèle géomécanique à l'échelle du bassin potassique mènerait à une interprétation propre du signal observé et des sources associées.

## 2.6 Conclusion

Sur les quatre archives à disposition, le traitement a abouti pour trois d'entre elles. Les déplacements de surface à travers le bassin potassique alsacien sont suivis de 1995 à 2018, soit une période de 24 ans. Le début de cette période couvre une partie de l'exploitation. Malheureusement, comme anticipé, la couverture spatiale se limite aux infrastructures humaines, ne couvrant qu'une faible partie des zones exploitées en profondeur.

Les déplacements détectés s'étendent sur de faibles surfaces, inférieures à 1 km<sup>2</sup>. Ces déplacements ont de fortes amplitudes, pluri-centimétriques par an, pendant la période d'exploitation et s'atténuent rapidement, avec des amplitudes inférieures à 1 cm.an<sup>-1</sup> sur la période ENVISAT (2004-2010). Les déplacements sont essentiellement suivis pendant la phase résiduelle. L'amplitude de l'affaissement résiduel est traditionnellement exprimée relativement à l'affaissement total. Cependant, les résultats InSAR montrent qu'il serait plus intéressant de l'exprimer relativement à l'épaisseur extraite. Comme le montre la comparaison avec le nivellement, la phase active est mal retrouvée à cause de la fréquence d'acquisition trop large des satellites et de forts gradients latéraux dans le champ de déplacement du sol. La phase initiale n'est observée qu'à un site de mesure, Ungersheim. À Reiningue, le suivi pendant la période d'exploitation montre que les déplacements sont complexes, difficilement interprétables, notamment lorsque plusieurs secteurs proches sont exploités en simultanément.

Les résultats InSAR ont également permis de détecter des signaux d'origine non-minière. À Staffelfelden, les déplacements observés semblent en partie dus à l'exploitation minière mais aussi probablement à des failles et un ancien réservoir pétrolier. À Wittelsheim, des déplacements sont détectés à la verticale du site de stockage et ce, depuis la création du site. Les déplacements, toujours en cours, semblent être aussi bien verticaux qu'horizontaux.

Une somme de deux termes exponentiels est proposée pour suivre les affaissements miniers au cours du temps. Le premier terme correspond aux réponses inélastiques des couches sus-jacentes et les paramètres obtenus satisfont d'autres observations d'affaissements miniers provoqués par foudroyage. Le deuxième terme est en lien avec la fermeture des vides miniers, beaucoup plus lente. L'apport des données satellitaires permet de mieux contraindre cette phase résiduelle, peu ou pas envisagée à l'époque des premiers modèles.

Dans ce chapitre, des séries temporelles d'une vingtaine d'années recoupant certaines données existantes ont été reconstituées. Cependant, les mesures de surface ne sont pas suffisantes pour estimer les vides miniers et cerner précisément leur vitesse de fermeture. L'élaboration d'un modèle géomécanique à l'échelle de l'exploitation est nécessaire. Les mesures de déplacements de surface à Pulversheim et à Bollwiller, où nivellement et InSAR sont disponibles, contraindront l'évolution des vides en profondeur.

# Chapitre 3

## Suivi de la déformation de galeries souterraines par mesures lidar

### Sommaire

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Introduction</b>                                | <b>62</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Présentation de la technologie</b>              | <b>62</b> |
| 3.2.1      | Méthode de mesure et sources d'erreurs             | 62        |
| 3.2.2      | Le lidar en milieu souterrain                      | 64        |
| <b>3.3</b> | <b>Suivi de deux galeries de sel aux MDPA</b>      | <b>65</b> |
| 3.3.1      | L'instrument de mesure                             | 65        |
| 3.3.2      | Protocole de mesure et campagnes                   | 67        |
| 3.3.3      | Mesures de convergence horizontale et incertitudes | 69        |
| 3.3.4      | Référencement des acquisitions                     | 72        |
| <b>3.4</b> | <b>Exploitation des campagnes lidar</b>            | <b>76</b> |
| 3.4.1      | La déformation horizontale au cours du temps       | 76        |
| 3.4.2      | Comparaison avec les mesures du site de stockage   | 81        |
| 3.4.3      | Calcul du déplacement aux parois                   | 82        |
| 3.4.4      | Estimation de la variation volumétrique            | 86        |
| <b>3.5</b> | <b>Conclusion</b>                                  | <b>89</b> |

---

### 3.1 Introduction

Le lidar, pour *LIght Detection And Ranging*, s'est développé dans les années 60. À partir d'un laser, il est devenu possible, à distance, de reconstruire la topographie d'une surface ou de déterminer la composition d'un nuage atmosphérique (Strauch et al., 1971). Son utilisation s'est répandue dans le suivi de phénomènes naturels superficiels comme les glissements de terrain (Jaboyedoff et al., 2012), d'ouvrages architecturaux (Tallon, 2012) et archéologiques (Schindling and Gibbes, 2014), de sites agricoles et forestiers (Wulder et al., 2012) et un large éventail de disciplines des sciences de la Terre comme la sismologie et la glaciologie (Telling et al., 2017). Depuis, le lidar est devenu un outil incontournable de la télédétection et de la modélisation 3D. Ses domaines d'application ne cessent de se diversifier et de s'adapter aux besoins (Eitel et al., 2016).

Dans ces travaux, l'utilisation de la technique d'interférométrie radar (InSAR) permet d'accéder aux déplacements de la surface du sol en lien avec la compaction des matériaux foudroyés, "contraignant" les travaux de modélisation géomécanique. La réalisation de mesures à partir de la technologie lidar éclaire sur le comportement du sel *in situ*, pour paramétrer la loi de comportement du milieu. Pour cela, le suivi régulier et précis de la déformation est nécessaire. Dans les galeries à 550 m de profondeur, un protocole de 'mise en station' relatif est élaboré permettant d'observer les galeries de manière similaire lors de chaque campagne. Des réflecteurs spécifiques sont fixés aux parois pour aider au suivi des déformations. Les déformations sont calculées à partir des variations de distances entre les réflecteurs, distances mesurées avec une précision millimétrique. À partir d'un suivi temporel régulier, avec une campagne d'acquisitions tous les deux à trois mois, les variations de distances entre les parois sont suivies au cours du temps. La comparaison avec d'autres données acquises aux alentours des galeries atteste de la qualité des résultats. Parce que les déformations observées restent faibles, il est possible de mettre les acquisitions dans un même référentiel. Ainsi, en complément des calculs de déformation, des mesures de déplacements aux parois et de convergences volumétriques sont réalisées, illustrant les applications multiples du lidar pour étudier des galeries souterraines.

Dans ce chapitre, l'évolution temporelle des déformations de galeries souterraines sur une période de deux ans suivie par des campagnes d'acquisitions lidar répétées renseigne sur la rhéologie du sel, contrôlant le processus de compaction des matériaux foudroyés.

### 3.2 Présentation de la technologie

#### 3.2.1 Méthode de mesure et sources d'erreurs

Une acquisition lidar, ou *laser scanning* ou scan, réalise un échantillonnage d'une surface grâce à la technologie laser. À partir de la propagation d'un signal électromagnétique dans l'infrarouge proche, soit une fréquence comprise entre 200 et 400 THz, le lidar mesure la dis-

tance entre un point de l'espace et l'appareil. En accumulant les mesures, l'appareil situe les points les uns par rapport aux autres, constituant un nuage de points. Avec une acquisition, un objet ou une structure est reconstituée en 3D à partir des données collectées. À ce jour, deux principales méthodes d'acquisition ont été développées :

- par *pulse* ou écho. Une impulsion lumineuse est émise par le laser. Ce signal, en se réfléchissant sur une surface, génère un écho. Cet écho est ensuite enregistré par l'appareil. À partir du temps d'arrivée et de la vitesse de la lumière, tout en associant proprement chaque écho à son impulsion d'origine, un nuage de point représentant la cible est créé. La haute énergie contenue dans l'impulsion constitue le point fort de cette méthode, à l'origine d'un ratio signal sur bruit suffisamment fort pour réaliser des acquisitions précises. Cependant, sa précision dépend de l'exactitude de la mesure du temps d'arrivée de l'écho ;
- par phase. Un signal continu et modulé par oscillateur est généré. La valeur de phase retour est enregistrée. Cette mesure est répétée avec différentes fréquences afin d'estimer le nombre de cycles à ajouter et retrouver une distance (figure 3.1). Cette méthode est essentiellement utilisée lorsque les distances à mesurer sont faibles, inférieures à 100 m. Elle présente une vitesse d'acquisition plus rapide ainsi qu'une meilleure résolution et précision (Pfeifer and Briese, 2007). Les mesures dépendent de la qualité et de la stabilité de la modulation ainsi que de la variation atmosphérique entre le lidar et la cible, pouvant potentiellement ralentir la propagation de l'onde et ainsi créer des retards de phase.

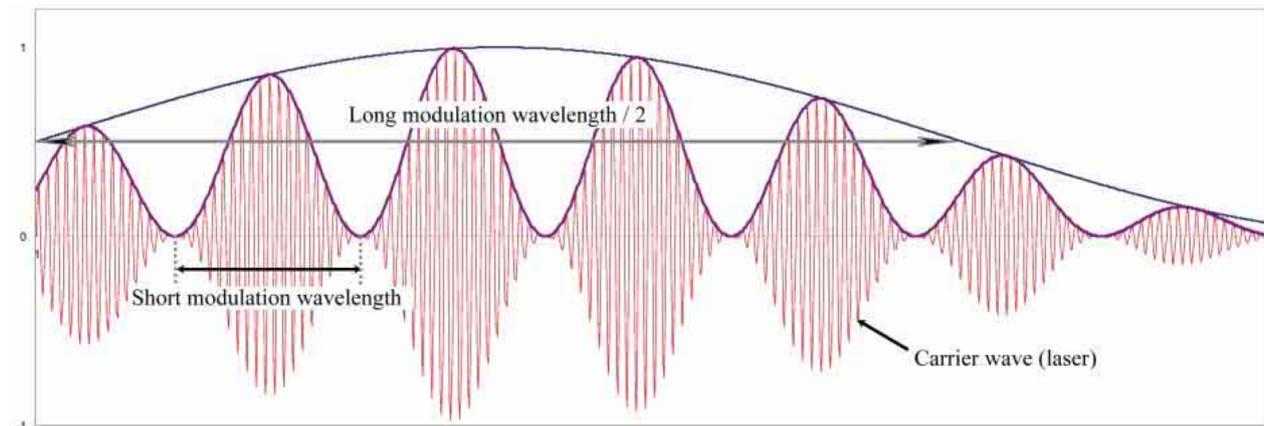


FIGURE 3.1 – **Illustration du principe d'acquisition lidar par phase.** La fréquence la plus petite, la longueur d'onde la plus grande, détermine la distance maximale de mesure et la fréquence la plus grande, la longueur d'onde la plus petite, établit la précision que peut atteindre la mesure (Pfeifer and Briese, 2007).

Dans les deux cas, une acquisition a les avantages d'être rapide, précise et de récolter une grande quantité d'informations 3D en une seule exécution. Ces avantages découlent directement des propriétés physiques du signal émis par un laser : une forte cohérence spatiale et temporelle. Le signal électromagnétique conserve ses caractéristiques physiques sur une durée et une distance relativement longue. Cette méthode de mesure se sert d'une source

active. Comme pour l'acquisition d'images radar SAR, ces caractéristiques permettent l'utilisation du lidar dans un large éventail de conditions atmosphériques et météorologiques. La fréquence de répétition des impulsions varie entre 1 kHz et un peu plus de 1 MHz, soit environ un nombre de mesures entre  $10^3$  et  $10^6$  par seconde. La fréquence d'acquisition dépendra de la distance entre l'appareil et l'objet ou la structure étudié. Plus l'objet ou la structure est éloigné, plus la fréquence sera faible et inversement. Enfin, le scan se fait dans la ligne de visée de l'instrument, ainsi plusieurs acquisitions sont parfois nécessaires pour couvrir l'ensemble d'un élément.

Malgré les efforts réalisés pour développer un instrument précis, les acquisitions lidar restent sujettes à des erreurs systématiques et aléatoires (Delaloye et al., 2011). La première catégorie est intrinsèque à l'appareil (mesure temporelle imprécise, perturbation de l'électronique) alors que la deuxième est en lien avec l'acquisition (conditions du milieu, objet d'étude). Parmi les sources d'erreurs systématiques, nous trouvons : la divergence du faisceau laser (variation de l'épaisseur du faisceau lumineux), les mesures de distance dépendant de la qualité de l'horloge interne de l'appareil, les mesures d'angle dues à l'agencement des miroirs montés dans l'appareil, le référentiel d'acquisition (définition des axes X, Y et Z) propre à l'appareil et la température émise par l'appareil. Parmi les sources d'erreurs aléatoires, nous trouvons : la réflexion à la surface de l'objet étudié, les conditions atmosphériques influençant le trajet et la célérité des ondes, les éventuelles vibrations reçues par l'appareil lors des acquisitions, les fréquences de répétition sélectionnées pour la mesure (risquant la saturation de l'appareil lors de l'acquisition) et le mode d'acquisition retenu pour l'étude, jouant sur le niveau de bruit et la précision.

À la lumière de ces éléments, il est nécessaire de s'assurer de la qualité et de la répétabilité des mesures lidar. Il faut ainsi veiller à ce que la contribution de toutes ces sources d'incertitude soit inférieure à l'amplitude du signal suivi.

### 3.2.2 Le lidar en milieu souterrain

L'application du lidar aux nombreux domaines des géosciences, incluant le suivi de la déformation de galeries souterraines, s'est répandue au cours des deux dernières décennies (Wang et al., 2014; Telling et al., 2017). Contrairement à d'autres outils tels que l'extensomètre, le lidar fournit une mesure sur une plus grande étendue spatiale. Leur utilisation est justifiée par la précision millimétrique que peut atteindre une acquisition lidar (Schulz et al., 2005; Lichti and Licht, 2006). Slaker (2015) a travaillé sur le développement de la photogrammétrie et des acquisitions lidar pour suivre la déformation de galeries souterraines. Ces méthodes sont moins encombrantes et offrent des informations moins ponctuelles que les outils de suivi habituels.

Cependant, le principal défi pour l'application du lidar en milieu souterrain est le référencement des acquisitions. Avec un tunnel ou une galerie proche de la surface, les outils de géoréférencement comme le GPS sont accessibles (Grenon et al., 2017). Cela n'est pas le cas pour des sites plus profonds, comme les galeries dans lesquelles les campagnes de mesure

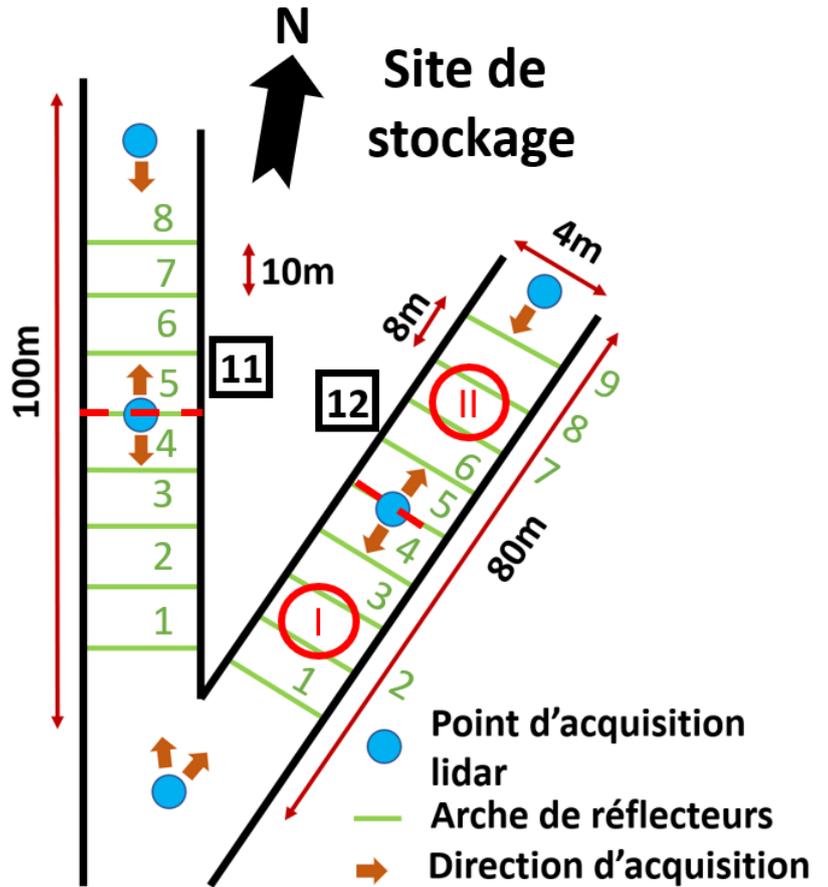
sont conduites. Lorsque l'appareil ne peut être laissé dans les galeries pour réaliser des acquisitions en continu (Cecchetti et al., 2017), le référencement des acquisitions est primordial pour travailler avec les nuages de points et ne pas restreindre l'exploitation des données. Depuis, plusieurs méthodes et outils ont été développés pour recalibrer les acquisitions, pour les mettre dans un même référentiel. Zacherl (2016) a élaboré une méthode de référencement des acquisitions lidar en passant les coordonnées dans un repère sphérique équivalent qui sert de transition vers un repère commun. Dans certaines études, des cibles réfléchissantes ou optiques ont été installées pour servir de point de recalage (Pejić, 2013; Kukutsch et al., 2015) ou pour étudier la déformation de certaines zones (Kontogianni and Stiros, 2005; Stiros and Kontogianni, 2009). Dans d'autres études, les nuages de points sont recalés par cross-corrélation; la répartition 3D d'un premier nuage est comparée à celle d'un second. De ces corrélations croisées ressortent les zones stables, permettant par la suite de déduire les zones s'étant déformées entre les deux acquisitions (Errington et al., 2010; Han et al., 2013; Lynch et al., 2017). Certaines méthodes ont été développées (Besl and McKay, 1992; Ripperda and Brenner, 2005) ou adaptées (Lowe, 2004) spécialement à cet effet. Dans d'autres études, la déformation d'une galerie est obtenue en étudiant la variation de la forme de son ouverture, passant par exemple de circulaire à ellipsoïdale (Van Gosliga et al., 2006; Delaloye et al., 2012; Delaloye et al., 2015).

En plus du référencement, les mesures en milieu souterrain sont susceptibles d'être perturbées par la présence de particules en suspension. Ceci est d'autant plus important avec l'utilisation de lidar mobile (Argüelles-Fraga et al., 2013), car dans le cas d'acquisitions statiques, le nombre de particules mises en suspension est plus faible (Slaker and Westman, 2014).

## 3.3 Suivi de deux galeries de sel aux MDPAs

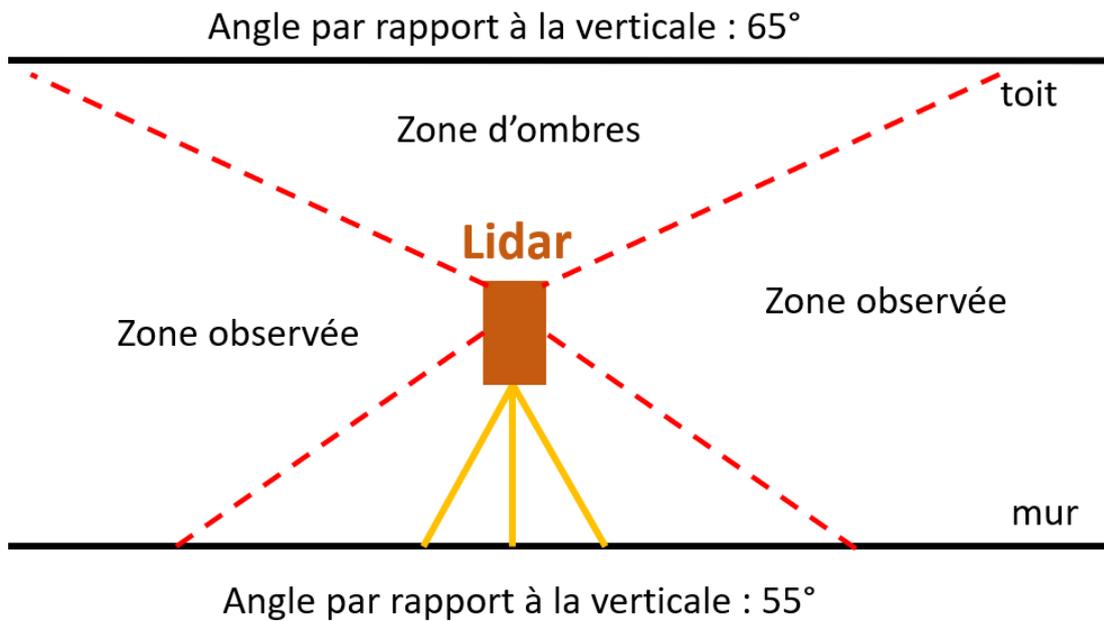
### 3.3.1 L'instrument de mesure

L'appareil utilisé pour les mesures est un Riegl VZ-2000 (Toth and Petrie, 2018, figure 3.2a). Cet appareil est capable de scanner des cibles à partir de 2.5 m jusqu'à 2 km de distance, et de réaliser 400 000 mesures par seconde sur une fenêtre d'observation de 100° par 360°. Il est également en mesure de détecter plusieurs cibles en simultané et ce, même en cas d'environnement défavorable tel que la pluie, la neige ou la poussière. Le pas d'échantillonnage peut descendre à 0.0015° en vertical et 0.0024° en horizontal. L'outil est également équipé de capteurs internes pour la mise en station de l'appareil et d'un périphérique de stockage de 50 Go. D'après les données du constructeur, les mesures ont une exactitude de 8 mm et une précision de 5 mm. L'instrument utilise la méthode des échos pour réaliser les acquisitions. Pour améliorer la vitesse d'acquisition, le lidar est équipé de la technologie *Multiple-time-around*, de nouveaux pulses peuvent être émis avant que tous les échos ne soient revenus.



(a) Photo du dispositif d'acquisition

(b) Schéma d'une campagne lidar



(c) Schéma d'une campagne lidar

FIGURE 3.2 – Acquisition lidar dans les galeries souterraines aux MDPAs. En haut à gauche, le lidar réalisant l'acquisition simultanée des deux galeries. En haut à droite, un schéma récapitulatif d'une campagne lidar avec les points de mesure et la disposition des arches. La numérotation des arches est en vert et en rouge, la distinction entre première et seconde moitié. En bas, un schéma de la géométrie d'acquisition.

#### 3.3.2 Protocole de mesure et campagnes

Une demande d'autorisation a été déposée auprès de la DREAL afin de réaliser les mesures car le site expérimental est périodiquement exposé à des épisodes de grisou, dégagement ponctuel de méthane de l'encaissant. L'appareil utilisé n'étant pas fabriqué selon les normes ATEX, prévenant contre les risques d'explosion dû à la présence de gaz explosifs, son utilisation dans les galeries s'accompagne d'un protocole d'urgence, arrêt de l'appareil et dépôt dans un caisson hermétique en cas de détection de méthane.

Les acquisitions lidar sont réalisées dans deux galeries souterraines à 550 m de profondeur, reliées entre elles et connectées par une extrémité au site de stockage (figure 3.2b). Une haveuse a creusé ces galeries dans l'un des étages de sel du salifère supérieur, environ 25 m sous la couche inférieure de potasse. Par ailleurs, cette dernière est partiellement exploitée à la verticale des galeries. L'une des galeries (12) est longue de 80 m, horizontale et orientée N040°E, l'autre (11) est longue de 100 m, orientée N008°W, légèrement inclinée avec une pente de quelques pourcents. Les deux galeries sont larges de 3.5 à 4 m pour une hauteur comprise entre 2.2 et 3 m. Dans les deux galeries, un gradient de température de 3°C est constaté entre leurs deux extrémités, en lien avec la circulation d'air forcée dans les galeries.

Les campagnes lidar se déroulant sur une journée, les acquisitions se devaient d'être rapides et la mise en station tout autant. Aucune station totale ni d'autres méthodes pour référencer les acquisitions n'ont été utilisées. Environ 150 cubes de réflecteurs ont été installés de manière permanente dans les deux galeries, répartis sur les toits (les plafonds des galeries) et les parements (les parois), pour suivre le mouvement des parois en réduisant l'incertitude liée à leur installation répétée à chaque campagne. La forte réflectance de ces cibles réfléchissantes leur permet de renvoyer le signal lumineux reçu avec une forte amplitude. Cette propriété est caractéristique d'une surface. L'appareil mesure la réflectance d'une surface lors de l'acquisition à partir de l'amplitude de l'écho. Les dimensions de ces cibles sont pré-enregistrées dans l'appareil ainsi que dans un programme de reconnaissance. Ce programme facilite le tri entre les cibles et les autres surfaces réfléchissantes. En effet, dans les galeries des MDP, la signalétique est indiquée avec des matériaux réfléchissants. Les réflecteurs installés sont des disques de 5 cm de diamètre montés sur les cubes en aluminium (figure 3.3a, b et c). Cependant, les réflecteurs ne sont détectés que s'ils sont face au lidar ; certaines orientations entre la surface du disque et le lidar ne permettent pas au signal d'être rétrodiffusé vers le lidar. Les réflecteurs sont ainsi perpendiculaires à la paroi pour être visibles depuis les deux extrémités de la galerie. Les cubes sont disposés par arches de neuf : trois sur le toit et trois sur chacun des deux parements (figure 3.3d). À chaque fois, ils sont installés à un quart, mi et trois quarts de hauteur ou largeur. L'arche 1 correspond à la plus proche de l'entrée de la galerie et les arches 8 et 9 aux plus proches du site de stockage (figure 3.2b).

Cependant, aucun de ces réflecteurs n'était stable, puisque tous fixés au sel, soumis lui-même à une déformation qui est à estimer. Pour chaque acquisition, les données sont dans

des référentiels distincts. Pour répéter les acquisitions, le lidar est installé le long d'une même verticale et à distance constante du toit au cours du temps. Cette distance au toit varie d'un point d'acquisition à l'autre, l'ouverture des galeries variant le long de celles-ci. Cinq crochets ont ainsi été disposés sur le toit des galeries pour marquer les différents points d'acquisition. Avec un fil à plomb, ils permettent d'installer le lidar sur une même verticale. Le lidar est monté sur un trépied et une embase pour faciliter la mise à plat et à la verticale (figure 3.2a). Si le lidar n'est pas positionné de manière analogue à chaque acquisition, alors le centre des cibles ne sera pas comparable. Certaines cibles exposeront une plus grande surface au lidar alors que d'autres, une plus petite. Ainsi, l'objectif de la procédure de mise en station est d'observer les réflecteurs de manière similaire au cours du temps. La méthode de suivi est basée sur l'estimation automatique du centre des cibles (logiciel RiScan) et des distances calculées entre les réflecteurs à partir de ces points.



(a) Photo d'un réflecteur fixé à un cube



(b) Photo d'un cube fixé au fond



(c) Photo du cube de support



(d) Photo des arches installés dans la galerie 11.

**FIGURE 3.3 – Les réflecteurs dans les galeries.** En haut, des photos d'un support cubique en aluminium de deux réflecteurs installés sur un même support fixé à la roche. Il a été vérifié que les supports en aluminium utilisés ont une faible réflectance et ne perturbent pas la détection des cibles. En bas, une photo des arches de réflecteurs fixées à la galerie 11.

Une acquisition est constituée d'un scan régulier puis d'un scan plus fin au niveau des réflecteurs détectés grâce à leur réflectance. Afin que l'appareil détecte les réflecteurs, un pas angulaire horizontal et vertical de  $0.0055^\circ$  est choisi pour mesurer un point tous les 1 mm à 10 m. Le scan précis des réflecteurs a un pas d'échantillonnage encore plus fin, avec un pas angulaire vertical de  $0.003^\circ$ , résultant en une meilleure résolution des réflecteurs ainsi qu'un niveau de bruit restreint.

Enfin, deux paramètres sont pris en compte à chaque acquisition : la température et l'humidité de l'air. La température est mesurée grâce à un thermomètre dans les galeries et l'humidité est estimée à partir des entrées et sorties d'air aux puits d'aération. Ces paramètres impactent en effet le fonctionnement de l'appareil s'ils sont mal estimés, allant jusqu'à l'arrêt de l'appareil lors de l'acquisition des données.

Pour suivre l'ensemble des deux galeries, sept acquisitions sont faites lors de chaque campagne : une à l'extrémité commune des deux galeries, une à l'autre extrémité de chaque galerie et deux au centre des galeries, une dans chaque direction ([figure 3.2b](#)). Pour chaque acquisition, un angle de  $65^\circ$  est formé entre le premier point du toit, le lidar et l'axe vertical (haut) ([figure 3.2c](#)). Cet angle est de  $55^\circ$  entre le premier point du mur, le lidar et l'axe vertical (bas). Les nuages de points collectés au centre des galeries ne sont donc pas continus. Par ailleurs, des acquisitions à  $360^\circ$  ne sont pas réalisables au centre des galeries à cause de la proximité des parements, à moins de 2.5 m de l'appareil. Une acquisition avec des éléments aussi proches entrainerait une saturation de l'appareil lors de l'acquisition. À titre indicatif, la mesure commune dure 12 min lors du scan global, puis 45 min lors du scan spécifique des cibles alors que les acquisitions centrales prennent environ 6 min lors du scan global, puis 15 min lors du scan spécifique. Le nuage de points d'une demie galerie représente 1.2 Go de données. Dix campagnes ont été menées entre avril 2017 et avril 2019 à intervalle régulier de deux à trois mois. Seule une campagne ne put se faire en août 2018, le lidar étant indisponible.

#### 3.3.3 Mesures de convergence horizontale et incertitudes

Une fois une campagne complétée, les scans spécifiques des réflecteurs sont extraits de l'appareil. Les coordonnées du centre des réflecteurs sont calculées et les distances entre les points sont ensuite déduites. Avec les acquisitions répétées, les variations de distances entre les réflecteurs sont suivies. En prenant des réflecteurs sur des parements opposés et à hauteur similaire, la déformation, ou convergence, horizontale des galeries est déduite. Les résultats présentés sur la [figure 3.4](#) correspondent aux convergences horizontales obtenues lors des différentes campagnes au niveau des points d'acquisition centraux. Tous les réflecteurs sur les parements de la galerie 11 sont observés alors qu'il en manque quatre pour la 12 : trois sont cachés par des renflements locaux des parements et le quatrième a été détruit par un véhicule minier. Dans la galerie 11, cette convergence n'atteint pas plus de 0.3% en deux ans. En comparaison, dans la galerie 12, la convergence atteint 0.6-0.7% sur la même période. La convergence horizontale est donc plus rapide dans la galerie 12 que 11. De plus, dans la

première moitié de la galerie 12, la convergence horizontale diminue de 0.6% à 0.3% vers l'entrée de la galerie, soit environ la valeur obtenue pour la galerie 11.

Pour estimer l'incertitude sur les distances calculées entre les réflecteurs, la première acquisition, celle commune aux deux galeries, lors de la première campagne a été répétée, une fois en début de journée et une deuxième fois en toute fin, appelée "acquisition de contrôle". Il est supposé que la déformation se produisant entre les deux acquisitions est négligeable et ainsi, que le lidar réalise deux scans similaires. L'évolution des variations de longueur au cours du temps montre qu'à l'échelle d'une journée, la variation de longueur est en effet négligeable ( $< 0.1$  mm). Parmi les sept acquisitions, l'acquisition commune est choisie car elle scanne les deux galeries, offrant un maximum de données. Les distances entre les réflecteurs sont calculées pour les deux jeux de données et comparées. Dans un premier temps, toutes les cibles ont été prises en compte, puis dans un second temps seulement les cibles situées à moins de 40 m du lidar, comme cela est le cas pour les acquisitions au centre des galeries. Les résultats des comparaisons sont résumés dans le [tableau 3.1](#). L'incertitude retenue est telle qu'environ 90% des différences observées sont inférieures à la valeur choisie. L'incertitude est donc de 2.1 mm pour les distances entre les cibles à moins de 40 m et de 2.9 mm pour l'ensemble des cibles. La différence entre les deux valeurs provient de la décroissance de la résolution des cibles avec la distance. Dans les deux cas, l'incertitude retenue est inférieure aux variations de distances mesurées. Enfin, lors des déplacements dans les galeries, des poussières sont mises en suspension, provenant du sel disposé sur le mur (le sol de la galerie). Cependant, l'impact de ces particules en suspension semble négligeable aux vues de l'incertitude obtenue.

Lors de la campagne suivante, le même procédé a été appliqué pour démontrer l'importance de la mise en station ; c'est-à-dire, si le lidar doit toujours être mis approximativement de manière similaire ou non. La première acquisition est réalisée selon le protocole prédéfini et la seconde, en posant le lidar grossièrement à côté du point de mesure. À titre indicatif, d'après les paramètres de recalage, le lidar était à 45 cm de la position de référence. L'incertitude sur les distances obtenue pour ce second test est environ trois fois supérieure à l'incertitude retenue pour la première campagne ([tableau 3.1](#)). La mise en station est donc une étape cruciale de l'acquisition.

Enfin, lors de la dernière campagne, une seconde acquisition de contrôle est conduite afin de s'assurer que la précision de l'appareil n'ait pas varié au fil des campagnes. Les incertitudes obtenues lors de la dernière campagne d'acquisition sont semblables à celles issues de la première campagne ([tableau 3.1](#)). L'incertitude est donc considérée constante au cours du temps.

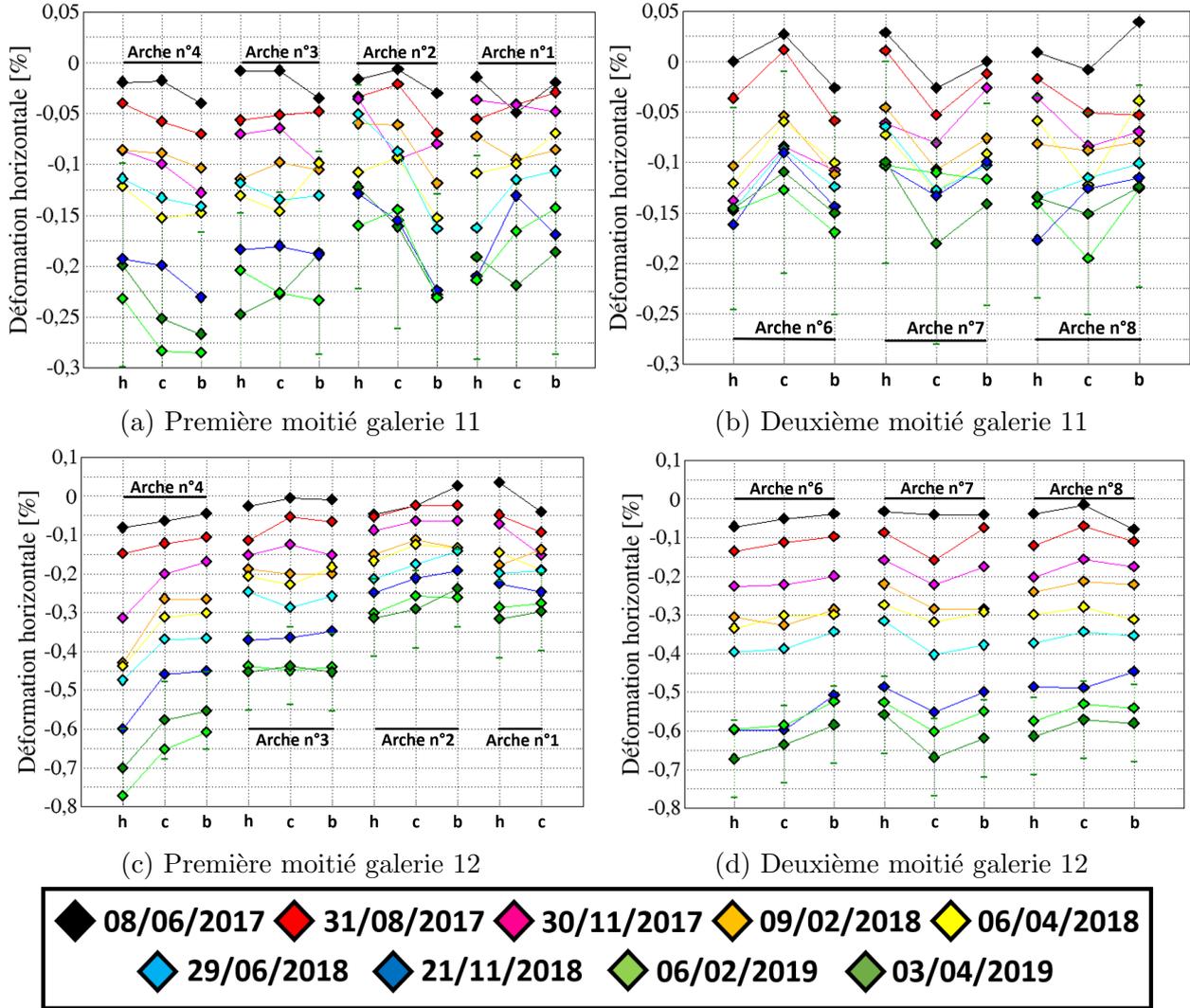


FIGURE 3.4 – Convergences horizontales mesurées au niveau des réflecteurs dans les galeries 11 (a-b) et 12 (c-d) pour les acquisitions centrales. Les données issues de la campagne du 3 avril 2019 sont représentés avec une barre d'erreurs de 0.1%, la valeur est justifiée ultérieurement dans ce chapitre. L'incertitude se révèle donc inférieure au signal suivi. "h" (haut) est associé à la paire de réflecteurs fixée aux trois quarts de hauteur, "c" (centre) à mi-hauteur et "b" (bas) à un quart de hauteur.

| Cas          | Nombre de distance | Écart-type [mm] | Incertitude retenue [mm] | Taux [%] |
|--------------|--------------------|-----------------|--------------------------|----------|
| Cas 1        | 9316               | 1.7             | 2.9                      | 90.8     |
| Cas 1 (<40m) | 1953               | 1.0             | 2.1                      | 90.8     |
| Cas 2        | 8646               | 4.1             | 9.1                      | 91.1     |
| Cas 2 (<40m) | 1770               | 2.6             | 5.8                      | 90.3     |
| Cas 3        | 4932               | 2.5             | 2.8                      | 90.5     |
| Cas 3 (<40m) | 1891               | 3.2             | 1.9                      | 91.2     |

TABLE 3.1 – Estimation de l'incertitude dans différents cas. Le cas 1 correspond aux incertitudes estimées lors de la première campagne. Le cas 2 est associé aux acquisitions lorsque le lidar n'est pas mis rigoureusement en station lors de la seconde campagne. Le cas 3 présentent l'incertitude obtenue lors de la dernière campagne.

### 3.3.4 Référencement des acquisitions

#### 3.3.4.1 Théorie

Pour les raisons expliquées précédemment, chacune des acquisitions est dans un référentiel qui lui est propre. Plusieurs méthodes ont été développées pour recaler différentes acquisitions au sein d'un même référentiel. Cependant, ces méthodes sont relativement complexes à mettre en application, nécessitant de travailler avec l'ensemble du nuage de points (Zacherl, 2016). Les réflecteurs étant installés pour le suivi de la déformation des galeries, les variations de distances entre ces derniers sont utilisées pour proposer une nouvelle méthode pour obtenir les paramètres de passage d'un référentiel à un autre.

Dans cette partie, à chaque acquisition réalisée à l'instant  $t_i$  est associé le référentiel  $i$ . L'équation de passage d'un point du référentiel  $i$  à  $j$  s'écrit :

$$M_j = s \times Rot \times M_i + T \quad (3.1)$$

avec  $M_i$  et  $M_j$  le point  $M$  dans le référentiel initial et final,  $Rot$  la rotation,  $T$  la translation et  $s$  un facteur d'échelle. L'équation 3.1 se met aussi sous forme de produit matriciel :

$$\begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{pmatrix} = s \times \begin{pmatrix} R_{\theta\theta} & R_{\theta\phi} & R_{\theta\omega} & \frac{T_x}{s} \\ R_{\phi\theta} & R_{\phi\phi} & R_{\phi\omega} & \frac{T_y}{s} \\ R_{\omega\theta} & R_{\omega\phi} & R_{\omega\omega} & \frac{T_z}{s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

avec  $(x_j, y_j, z_j)$  les coordonnées du point  $(x_i, y_i, z_i)$  dans le référentiel final,  $(T_x, T_y, T_z)$  les composantes de la translation,  $R_{ij}$  les composantes de la matrice de rotation,  $\theta$  l'angle de rotation autour de l'axe  $X$ ,  $\phi$  autour de l'axe  $Y$  et  $\omega$  autour de l'axe  $Z$ .

En choisissant des référentiels orthonormés similaires, nous avons  $s = 1$ . Une valeur similaire de  $1.0003 \pm 0.0010$  fut obtenue lors de tests sur la précision d'acquisition lidar (Habib, 2018). La translation et la rotation sont des transformations géométriques conservant les distances entre deux points. Grâce à ces propriétés, les variations de distances entre les réflecteurs sont mesurées, et la déformation au cours du temps est déduite.

La distance entre deux points s'exprime sous la forme :

$$(AB)_j = \sqrt{(x_{bj} - x_{aj})^2 + (y_{bj} - y_{aj})^2 + (z_{bj} - z_{aj})^2} \quad (3.3)$$

avec  $(AB)_j$  la distance entre le point  $A$  et  $B$  à l'instant  $t_j$ ,  $(x_{aj}, y_{aj}, z_{aj})$  les coordonnées du point  $A$  dans le référentiel  $j$  à l'instant  $t_j$  et  $(x_{bj}, y_{bj}, z_{bj})$  celles du point  $B$  dans  $j$  à l'instant  $t_j$ . Avec la conservation des distances entre deux points, l'équation 3.3 s'écrit d'une seconde

manière, afin de faire apparaître les composantes du vecteur déplacement :

$$(AB)_j = \sqrt{\frac{(x_{bi} - x_{ai} + dx_{bij} - dx_{aij})^2 + (y_{bi} - y_{ai} + dy_{bij} - dy_{aij})^2}{+ (z_{bi} - z_{ai} + dz_{bij} - dz_{aij})^2}} \quad (3.4)$$

avec  $d\mu_{mij}$  la composante de déplacement dans l'axe  $\mu$  du point M entre les instants  $t_i$  et  $t_j$ . Or, les déformations n'excèdent pas 0.7% en 2 ans pour la galerie 12 et 0.3% pour la galerie 11 (figure 3.4). Ainsi, à partir des mesures lidar, les déplacements observés au niveau des réflecteurs sont faibles, de l'ordre du millimètre. Ainsi :

$$(d\mu_{mij} - d\mu_{nij})^2 \simeq 0 \quad (3.5)$$

En utilisant et développant les équations 3.4 et 3.5 :

$$\begin{aligned} (AB)_j^2 &= (x_{bi} - x_{ai})^2 + 2(x_{bi} - x_{ai})(dx_{bij} - dx_{aij}) + (dx_{bij} - dx_{aij})^2 \\ &\quad + (y_{bi} - y_{ai})^2 + 2(y_{bi} - y_{ai})(dy_{bij} - dy_{aij}) + (dy_{bij} - dy_{aij})^2 \\ &\quad + (z_{bi} - z_{ai})^2 + 2(z_{bi} - z_{ai})(dz_{bij} - dz_{aij}) + (dz_{bij} - dz_{aij})^2 \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2}[(AB)_j^2 - (AB)_i^2] &= (x_{bi} - x_{ai})(dx_{bij} - dx_{aij}) + (y_{bi} - y_{ai})(dy_{bij} - dy_{aij}) \\ &\quad + (z_{bi} - z_{ai})(dz_{bij} - dz_{aij}) + o[(d\mu_{bij} - d\mu_{aij})^2] \end{aligned} \quad (3.6)$$

L'expression 3.6 se met sous forme matricielle :

$$\left(\frac{1}{2}[(AB)_j^2 - (AB)_i^2]\right) = \begin{pmatrix} -\Delta x_{abi} & -\Delta y_{abi} & -\Delta z_{abi} & \Delta x_{abi} & \Delta y_{abi} & \Delta z_{abi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dx_{aij} \\ dy_{aij} \\ dz_{aij} \\ dx_{bij} \\ dy_{bij} \\ dz_{bij} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

avec  $\Delta\mu_{abi}$  la différence de coordonnées  $\mu$  entre les points A et B dans le référentiel i. La manipulation est répétée pour chaque combinaison de réflecteurs et les matrices sont

concaténées. Ainsi, à partir de l'équation 3.7 et pour un total de M points :

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{2}[(AB)_j^2 - (AB)_i^2] \\ \vdots \\ \frac{1}{2}[(LM)_j^2 - (LM)_i^2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Delta x_{abi} & -\Delta y_{abi} & -\Delta z_{abi} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \Delta x_{lmi} & \Delta y_{lmi} & \Delta z_{lmi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dx_{aij} \\ dy_{aij} \\ dz_{aij} \\ \vdots \\ dx_{mij} \\ dy_{mij} \\ dz_{mij} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Le problème est du type :  $D = GM$ , avec D les données, G la matrice de passage et M le modèle. M représente le déplacement des réflecteurs à estimer. Suivant la méthode développée par Tarantola (2005), on peut écrire :

$$M = M_0 + (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1}) G^T C_D^{-1} (D + G M_0) \quad (3.9)$$

avec  $M_0$  le modèle *a priori*,  $C_D$  la matrice de covariance des données et  $C_M$  celle du modèle *a priori*. En résolvant l'équation 3.9, nous obtenons le déplacement entre les deux acquisitions des réflecteurs dans le référentiel de notre choix; ici, le déplacement dans le référentiel i. En appliquant le déplacement aux réflecteurs à l'instant  $t_i$ , nous obtenons leur position à l'instant  $t_j$  dans le référentiel i. Nous avons ainsi, dans deux référentiels différents, des points que nous savons identiques. En élargissant l'équation 3.2 à l'ensemble des réflecteurs, nous obtenons l'équation 3.10 :

$$\begin{pmatrix} x_{aj} & x_{mj} \\ y_{aj} & \cdots & y_{mj} \\ z_{aj} & z_{mj} \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\theta\theta} & R_{\theta\phi} & R_{\theta\omega} & T_x \\ R_{\phi\theta} & R_{\phi\phi} & R_{\phi\omega} & T_y \\ R_{\omega\theta} & R_{\omega\phi} & R_{\omega\omega} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{ai} + dx_{aij} & x_{mi} + dx_{mij} \\ y_{ai} + dy_{aij} & \cdots & y_{mi} + dy_{mij} \\ z_{ai} + dz_{aij} & z_{mi} + dz_{zmij} \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

En résolvant ce système d'équations par la méthode des moindres carrés, nous obtenons la matrice de passage entre les deux référentiels. En incorporant la matrice de transfert aux données, nous mettons les deux nuages de point dans le même référentiel.

### 3.3.4.2 Application du référencement

La méthode de recalage est appliquée sur les données acquises au niveau des quatre points d'acquisitions centraux, pour lesquels tous les réflecteurs sont situés à moins de 40 m du lidar, c'est-à-dire où l'incertitude sur les distances est de 2.1 mm. Pour avoir un signal significatif, les données de la première campagne, datant du 06/04/2017, et celles de la dernière, datant

du 03/04/2019, sont utilisées.

La matrice de covariance des données correspond à une matrice diagonale avec en termes diagonaux les incertitudes sur les longueurs au carré, soit  $4.41 \text{ mm}^2$ .

La matrice de covariance du modèle *a priori* est aussi diagonale et les termes diagonaux correspondent aux valeurs attendues pour les trois composantes du déplacement. Ces valeurs dépendent de la position du réflecteur : les réflecteurs fixés sur les parements se déplacent selon l'axe y et les réflecteurs au toit, selon l'axe z. Ainsi, pour un réflecteur fixé au toit, les termes en x et y valent 1 mm contre 6 mm pour z. Pour un réflecteur fixé sur l'un des parements, les termes en x et z valent 1 mm contre 6 mm pour y. La valeur de 1 mm est arbitraire. Après une déformation horizontale de 0.3%, une galerie initialement large de 4 m s'est refermée de 12 mm. La valeur de 6 mm est la moitié de cette variation de largeur. Il est supposé que chacun des deux parements et le toit se sont déplacés de la même manière. Cette valeur monte à 12 mm pour la seconde moitié de la galerie 12, la déformation atteignant 0.6% (figure 3.4). Le référentiel choisi pour le calcul est celui de la première acquisition.

La figure 3.5 illustre les résultats pour la seconde moitié de la galerie 12. Les vecteurs déplacements sont orientés vers l'intérieur de la galerie.

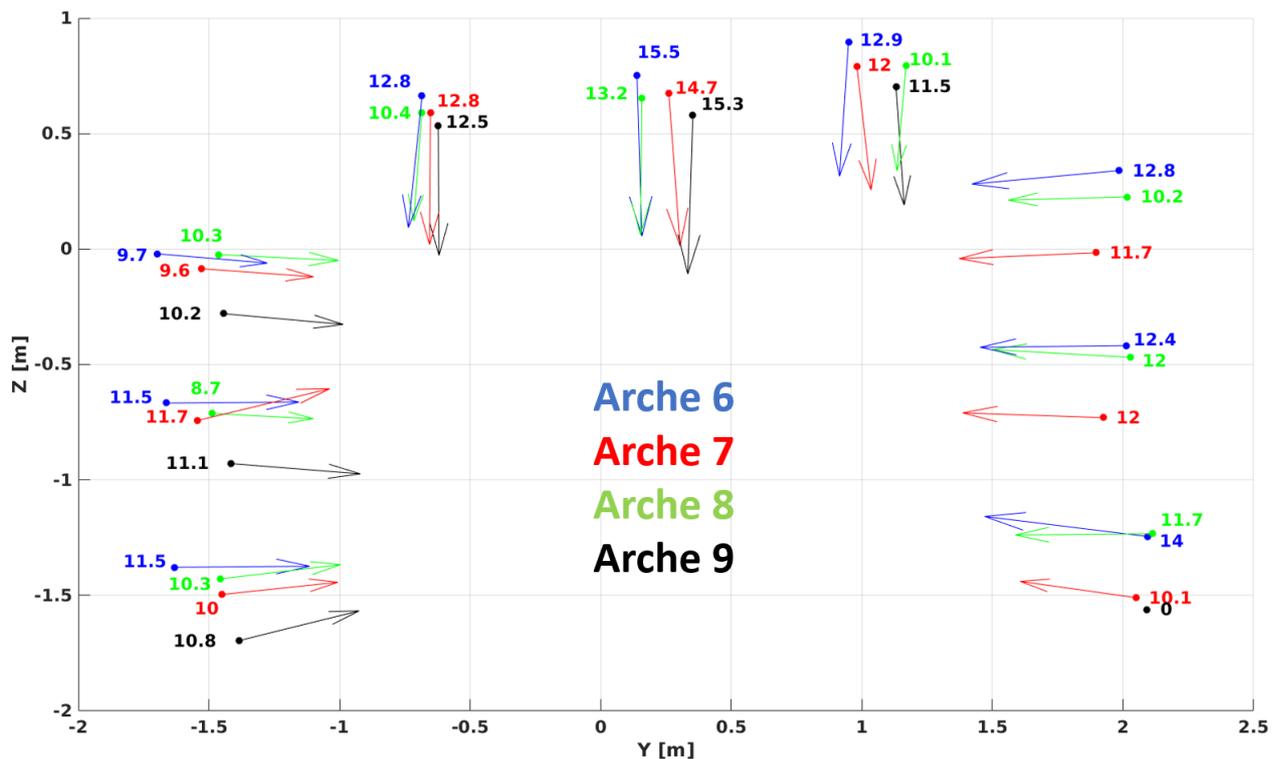


FIGURE 3.5 – Déplacements calculés au niveau des réflecteurs dans la seconde moitié de la galerie 12 depuis l'acquisition centrale (figure 3.2b). Pour simplifier la représentation, les vecteurs sont projetés dans un repère 2D avec les axes Z la verticale et Y la largeur de la galerie. Les chiffres indiqués représentent la norme du vecteur déplacement obtenu pour chacun des réflecteurs.

| Point de mesure | Nombre de distance | Écart-type [ $\mu\text{m}$ ] | Écart maximal [ $\mu\text{m}$ ] | Écart minimal [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 11 - I          | 630                | 10.5                         | 48.3                            | -75.6                           |
| 11 - II         | 351                | 15.9                         | 95.2                            | -102                            |
| 12 - I          | 528                | 29.6                         | 258                             | -128                            |
| 12 - II         | 528                | 31.2                         | 146                             | -198                            |
| Total           | 2037               | 24.6                         | 258                             | -198                            |

TABLE 3.2 – **Écart entre les distances calculées et les distances modélisées.** Les premières proviennent de l’acquisition de référence (avril 2019) et les secondes, de l’acquisition initiale (avril 2017) combinée aux déplacements. Le point de mesure ’11-I’ indique l’acquisition ayant scanné la première moitié de la galerie 11 (figure 3.2b).

Enfin, pour vérifier la qualité des résultats, les déplacements sont appliqués aux coordonnées initiales pour déterminer la distance entre les nouvelles positions. Ces nouvelles distances sont ensuite comparées aux distances issues de la campagne d’avril 2019. Le [tableau 3.2](#) présente les résultats de ces comparaisons. Les différences obtenues sont très faibles, de l’ordre de quelques dizaines de micromètres, et atteignent ponctuellement un quart de millimètre. Ces valeurs sont bien inférieures aux incertitudes sur les distances, validant ainsi la méthode.

## 3.4 Exploitation des campagnes lidar

Dans cette partie, les séries temporelles de la déformation horizontale des galeries sont présentées. Ces séries temporelles sont ensuite comparées à celles réalisées dans le site de stockage par les MDPA. Avec des nuages de points dans un même référentiel, le déplacement au niveau des parois est également calculé et la convergence volumétrique des galeries est estimée. Ces deux derniers points sont réalisés avec le logiciel CloudCompare ([Girardeau-Montaut, 2011](#)).

### 3.4.1 La déformation horizontale au cours du temps

Après avoir estimé le déplacement des parements et du toit des galeries au niveau des réflecteurs à partir des mesures de distances, l’évolution temporelle de la déformation horizontale est considérée. La déformation horizontale est obtenue en suivant la variation de distance entre deux réflecteurs sur chacun des parements au sein d’une même arche et situés à une même hauteur. Ainsi, pour chaque arche, trois séries temporelles sont disponibles, une pour chaque paire de réflecteurs opposés. La déformation verticale n’est pas étudiée dans cette thèse due à l’absence de réflecteurs fixés aux murs. La [figure 3.6](#) représente la déformation horizontale mesurée au cours du temps dans les galeries 11 et 12. Ces mesures proviennent des arches 3 et 7 observées par les acquisitions centrales. Pour estimer l’incertitude sur la déformation, l’approximation en série de Taylor ([JCGM, 1995, 3.11](#)) est utilisée :

$$\epsilon(L_f, L_i) = 1 - \frac{L_f}{L_i} \mapsto \Delta\epsilon(L_f, L_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial\epsilon(L_f, L_i)}{\partial L_f} \times \Delta L_f\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon(L_f, L_i)}{\partial L_i} \times \Delta L_i\right)^2} \quad (3.11)$$

avec  $\epsilon$  la déformation,  $L_f$  et  $L_i$  les longueurs finales et initiales,  $\Delta$  indiquant l'incertitude. L'incertitude sur les distances est supposée constante au cours du temps. L'incertitude sur la déformation s'écrit ainsi (3.12) :

$$\Delta\epsilon(L_f, L_i) = \frac{\Delta L_f}{L_i} \times \sqrt{1 + \frac{L_f^2}{L_i^2}} \quad (3.12)$$

L'incertitude sur la déformation est comprise entre 0.05 et 0.1%.

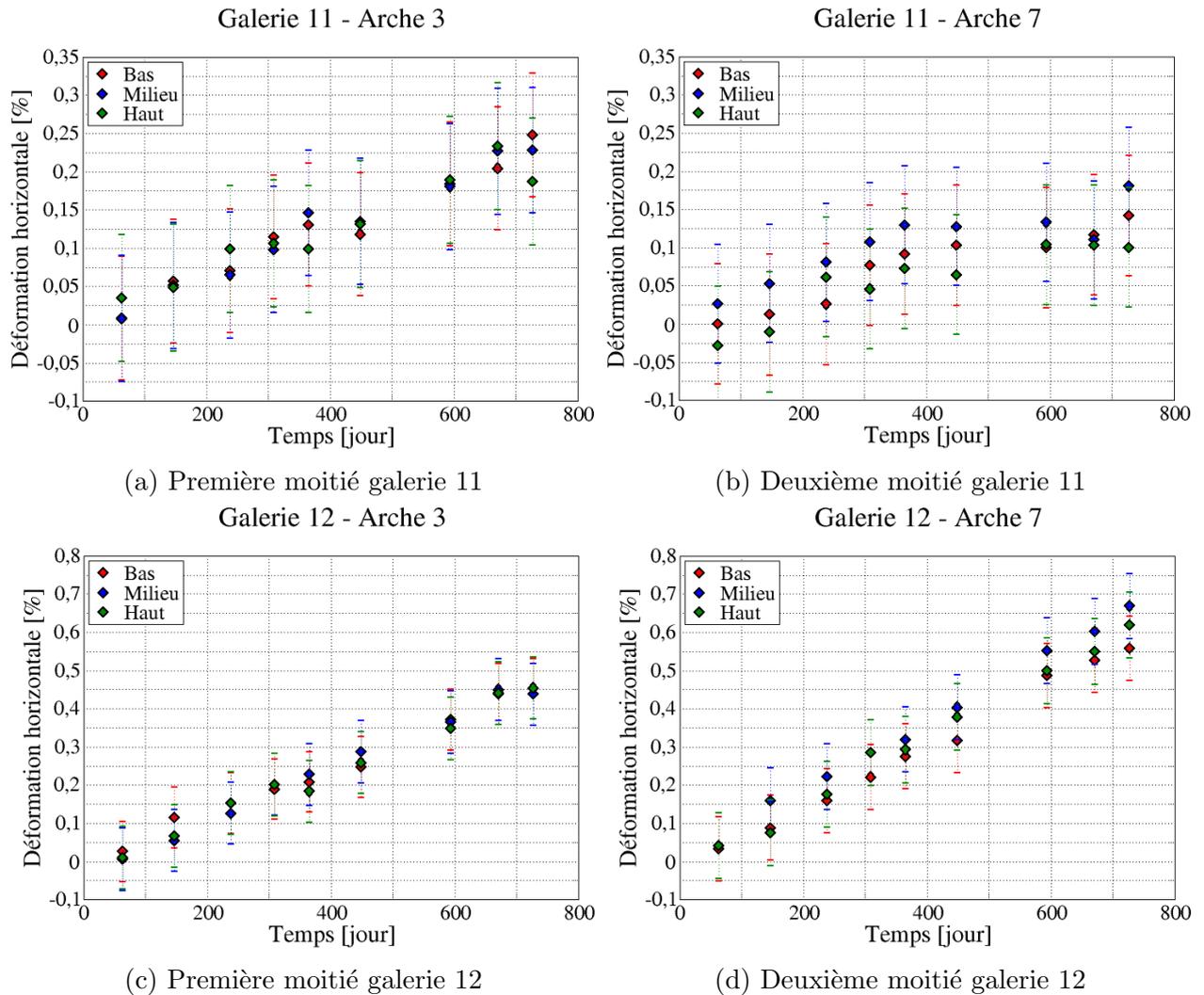


FIGURE 3.6 – Déformations horizontales mesurées aux arches 3 et 7 des galeries 11 (a-b) et 12 (c-d). La déformation est obtenue en suivant la variation de distance entre les réflecteurs de chaque arche au sein d'une même arche et situés à la même hauteur. La série temporelle "Bas" est associée à la paire de réflecteurs située à un quart de hauteur, "Milieu" à celle à mi-hauteur et "Haut" à celle à trois quarts de hauteur.

Comme observé sur les précédents graphiques, la déformation est plus forte dans la galerie 12 que dans la galerie 11, avec un facteur compris entre 2 et 4. Dans la galerie 12, la déformation atteint 0.6% en 2 ans pour la moitié située à côté du site de stockage contre 0.45% dans l'autre moitié. Dans la galerie 11, la déformation atteint entre 0.2 et 0.25% en 2 ans (figure 3.6). Après 2 ans d'observation, pour les paires de réflecteurs opposés d'une même arche, la déformation horizontale est similaire.

Les matériaux dans lesquels sont creusées les galeries 11 et 12 sont similaires. Pourtant, il existe une nette différence au niveau des taux de déformation horizontale. L'une des explications à ces résultats résiderait dans la présence d'un stot résiduel situé au-dessus du site de stockage (figure 3.7). Un stot désigne une partie du gisement laissé en place afin d'assurer la sécurité et la stabilité des installations de surface et/ou en profondeur. Au niveau de la couche de potasse, les contraintes sont plus importantes dans le stot que dans les matériaux de comblement, induisant une perturbation dans le champ de contraintes local. Cet état des contraintes s'explique par la croissance progressive des contraintes dans les matériaux de comblement au cours du temps, en lien avec leur compaction. Une étude récente du site de stockage confirme l'impact du stot sur les contraintes locales (Laouafa et al., 2010). Les perturbations induites par le stot peuvent s'étendre jusqu'aux galeries étudiées.

L'orientation des galeries, relativement au champ de contraintes régional (figure 3.8a), pourrait être à l'origine des différences avec notamment des contraintes cisailantes plus importantes dans l'une des galeries. L'orientation des contraintes régionales est justifiée ultérieurement, dans le chapitre suivant.

En analysant les séries temporelles issues des autres arches, chaque moitié de galerie semble avoir un taux de déformation spécifique (figure 3.8a). Pour la galerie 11, le taux semble constant autour de 0.1%. Pour la galerie 12, le taux est dégressif en passant du centre à l'entrée de la galerie alors qu'il est constant, environ 0.3%/an, dans l'autre moitié. Toutefois, les incertitudes dans la galerie 11 représentent environ la moitié de l'amplitude de la déformation suivie. Pour cette galerie, les faibles taux de déformation horizontale observés, associés à une forte incertitude relative, ne permettent pas de cerner le taux sans ambiguïté (figure 3.6b). D'autres campagnes d'acquisitions semblent ainsi nécessaires pour proprement estimer le taux dans la galerie 11.

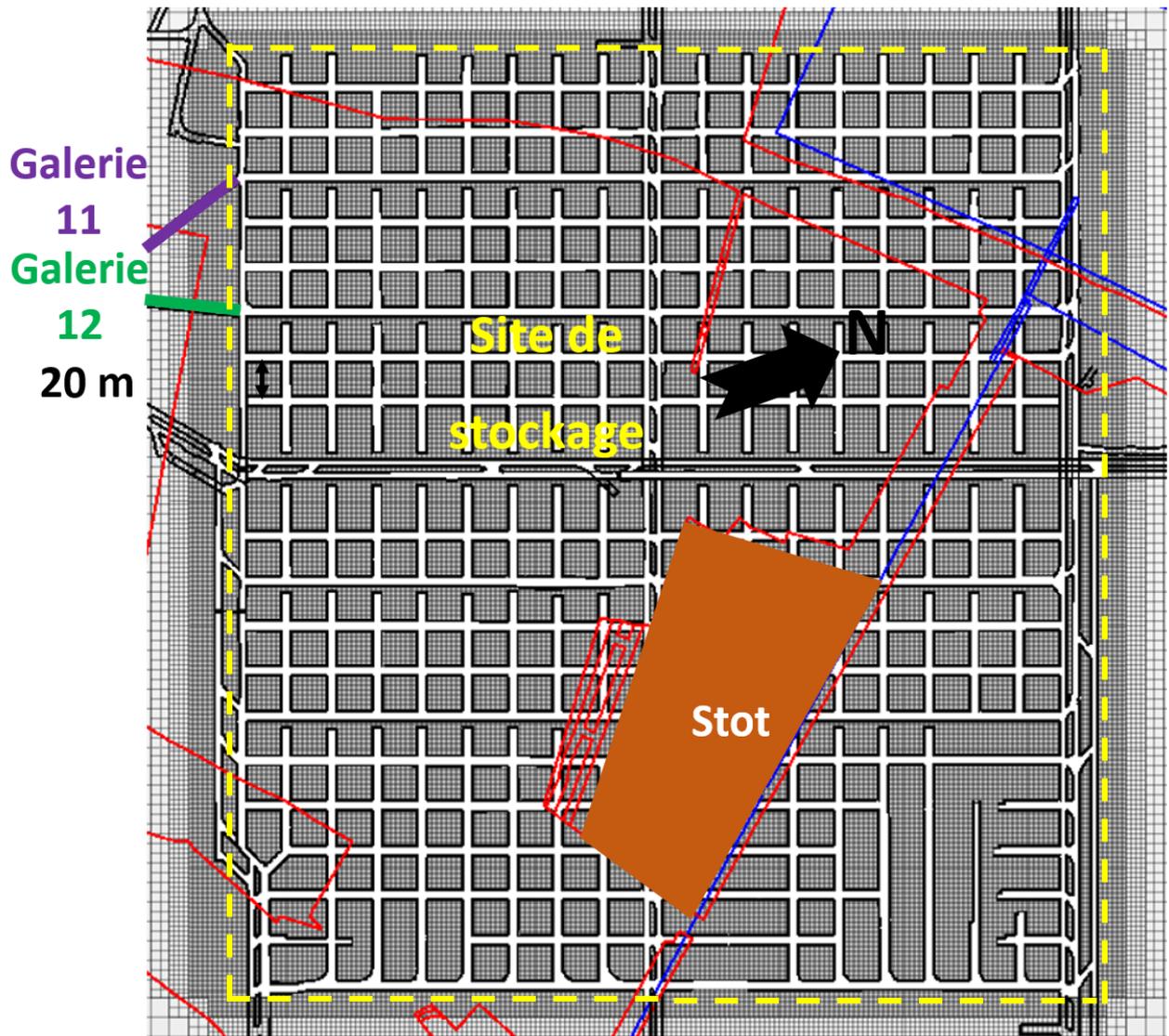
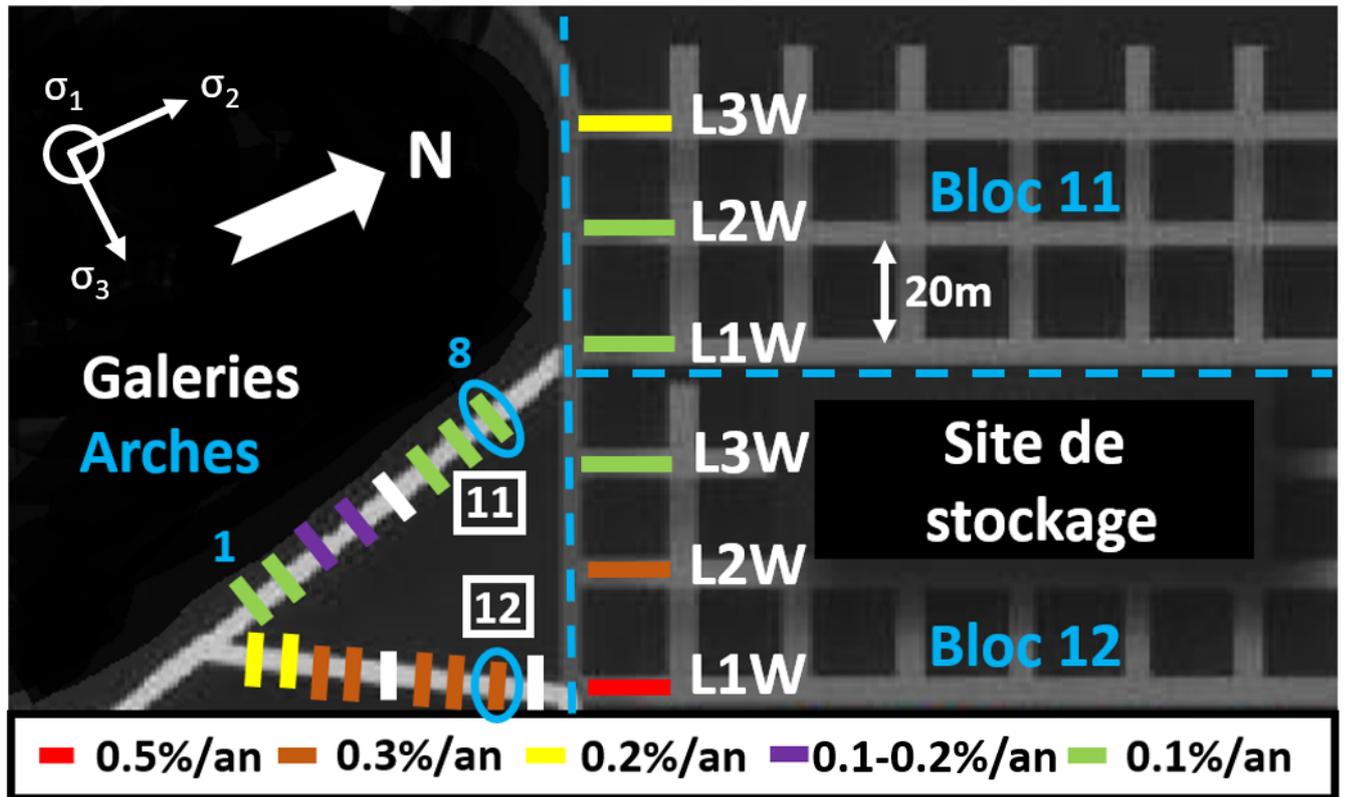
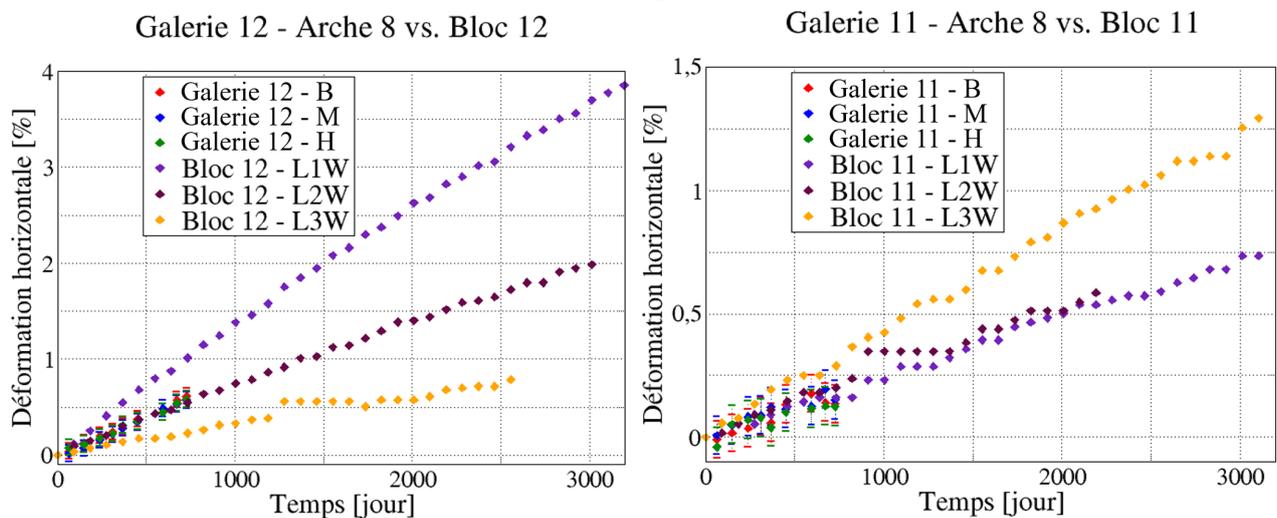


FIGURE 3.7 – Localisation du stot (marron) à la verticale du site de stockage. Les lignes jaunes pointillées délimitent le site de stockage. Les polygones bleus représentent les contours de l'exploitation de la couche supérieure et les rouges, ceux de l'exploitation de la couche inférieure. Les piliers du site de stockage mesurent 20 m sur 20 m. La figure est adaptée d'un rapport de travaux de modélisation du site de stockage réalisés par Itasca.



(a) Cartographie des taux de déformation horizontale obtenus au niveau des arches et du site de stockage.



(b) Comparaison de la déformation horizontale entre le bloc 12 et la galerie 12.

(c) Comparaison de la déformation horizontale entre le bloc 11 et la galerie 11.

FIGURE 3.8 – Comparaison des déformations horizontales mesurées dans les galeries d'étude et le site de stockage. En haut est présentée une cartographie des tendances observées après deux ans de suivi. Une couleur blanche indique une absence de valeur. Les cercles bleus indiquent les arches utilisées pour la comparaison aux données du site de stockage des figures sous-jacentes. Le trait bleu pointillé vertical marque la séparation entre les galeries et le site de stockage, et l'horizontal, entre les blocs de stockage 11 et 12. En bas sont présentées les comparaisons directes entre la déformation horizontale des arches 8 des galeries et le bloc le plus proche. La date de référence est le 1<sup>er</sup> juin 2007 pour les mesures du site et le 6 avril 2017 pour les galeries.

### 3.4.2 Comparaison avec les mesures du site de stockage

Depuis le début du suivi du site de stockage en 1999, des mesures de la largeur et de la hauteur sont conduites tous les deux à trois mois aux extrémités de chacune des galeries de stockage à l'aide d'une règle coulissante. Les mesures sont réalisées entre des points de repère marqués par des clous et la précision des mesures est millimétrique. Avec ces dimensions, l'INERIS calcule les déformations horizontales et verticales, sans fournir d'incertitudes associées. La déformation horizontale de l'arche 8 de la galerie 11 est comparée aux mesures du bloc 11 et la comparaison est répétée entre l'arche 8 de la galerie 12 et le bloc 12 (figure 3.8a, cercles bleus). Afin de faciliter la comparaison, la référence est prise au 1<sup>er</sup> juin 2007 pour les mesures du site et les mesures s'étendent jusqu'au 1<sup>er</sup> juin 2013. La déformation horizontale de l'arche 8 de la galerie 12 suit la même tendance que celle de la ligne L2W du bloc 12 (figure 3.8b). L'arche 8 de la galerie 11 a un comportement, quant à elle, proche des galeries L3W et L2W du bloc 11 (figure 3.8c). Les déformations horizontales calculées dans les galeries 11 et 12 sont ainsi similaires à d'autres mesures réalisées aux alentours des galeries, dans le site de stockage.

La cartographie des taux de déformation horizontale est complétée avec les mesures réalisées dans le site de stockage (figure 3.8a). Après une période de deux ans, les taux de déformation horizontale de plusieurs arches sont similaires aux valeurs provenant des mesures dans le site de stockage. D'autres similitudes entre les résultats et les mesures du site de stockage sont à remarquer. La déformation horizontale est nettement linéaire au cours du temps à certains points, comme L2W et L1W du bloc 12 (figure 3.8b) et la galerie 12 (figure 3.6c et d), mais elle l'est moins pour les autres points de mesure, comme L1W et L2W du bloc 11 (figure 3.8c) et à certaines arches de la galerie 11 (figure 3.6b). Les sauts observés dans les séries temporelles du site de stockage correspondent à des moments où les clous servant de repère ont disparu. Les mesures ont été poursuivies en prenant de nouveaux points de repère proche des précédents.

Cette cartographie représente spatialement le taux de déformation horizontale (figure 3.8a). Un pilier du site de stockage mesure 20 m sur 20 m et chaque galerie du site de stockage est séparée par un pilier. Le long du bloc 12, le taux de déformation passe de 0.5%/an à 0.1%/an, en 40 m (de L1W à L3W). Dans la direction de la galerie 12, le taux de déformation est compris entre 0.2%/an et 0.3%/an, à 60 m de la galerie L1W. Il existe donc un gradient du taux de déformation et celui-ci est plus fort le long du site de stockage (N040°W) que le long de la galerie 12 (N040°E). Avec seulement la déformation horizontale, la cause (la présence du stot, l'orientation des galeries ou autre) des différences observées ne peut être déterminée. Par ailleurs, comme il le sera exposé dans le chapitre suivant, le sel est un matériau complexe avec plusieurs mécanismes de déformation possibles qui dépendent de plusieurs paramètres.

De ces comparaisons et observations, il est à retenir qu'à ce stade, l'hétérogénéité des déformations observées dans la galerie 12 n'est pas expliquée, tout comme la différence entre

la galerie 11 et 12. Les pistes concernant le stot, le champ de contraintes ou les mécanismes de déformation du sel sont à explorer. À l’opposé, l’homogénéité des déformations de la galerie 11 dénote l’absence de perturbation. De ce fait, pour l’estimation des paramètres de la loi de comportement du sel, la galerie 11 sera utilisée plutôt que la galerie 12.

### 3.4.3 Calcul du déplacement aux parois

Plusieurs méthodes de calcul ont été développées pour estimer le déplacement entre deux nuages de points :

- *DEM of difference* (DoD) : les deux nuages sont maillés afin de générer deux MNT distincts. Un déplacement vertical est déduit en calculant la différence de hauteur point par point. Cette méthode est rapide et essentiellement employée lorsque la zone étudiée est plane. Mais, elle atteint rapidement ses limites en cas d’étude 3D ou de forte rugosité à la surface des données ;
- *Cloud to Cloud* (C2C, [Girardeau-Montaut et al., 2005](#)) : le déplacement est calculé directement à partir des nuages de points. Un point du premier nuage est associé à un point équivalent dans le second. La distance euclidienne entre les deux points est ensuite calculée. Cette méthode permet de travailler directement avec les données et en un temps relativement faible. En revanche, la précision des résultats dépend de la rugosité de la surface, de l’éventuelle présence d’une anomalie dans un nuage (perturbation locale du nuage de points), de l’espacement entre les points. Cette méthode est plus appropriée à la détection rapide de changement de surface qu’à l’estimation précise du déplacement ;
- *Cloud to Mesh* (C2M, [Cignoni et al., 1998](#)) : le déplacement est calculé entre le nuage de points et une surface 3D, issue d’une autre acquisition ou théorique. Cette méthode est efficace et rapide dans le cas de surface plane mais demande plus de temps dans le cas de surface rugueuse. La création d’une surface devient plus complexe et nécessite des vérifications manuelles pour s’assurer du réalisme de la surface. Les incertitudes augmentent avec l’apparition de trou dans le nuage, comme des zones d’ombres liées à la topographie.
- *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2, [Lague et al., 2013](#)) : le déplacement est calculé le long de normales locales à la surface du nuage de points de référence. En prolongeant cette normale, la distance entre les deux jeux de données est obtenue à l’intersection avec le second nuage de points ([figure 3.9](#)). Les normales sont calculées à travers le nuage de points pour s’adapter au mieux aux aspérités de la zone étudiée. Cette méthode est efficace aussi bien lorsque les surfaces sont rugueuses qu’en cas de nuage plus diffus.

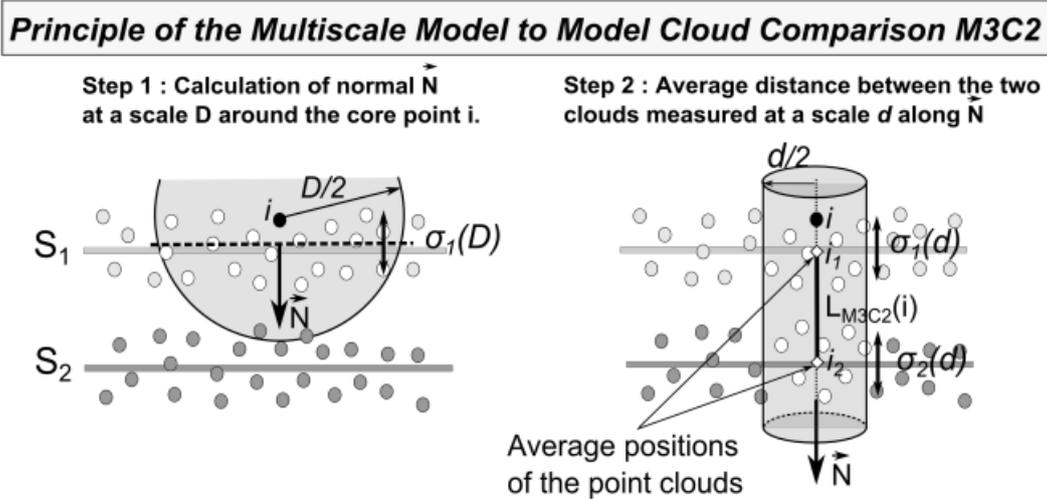


FIGURE 3.9 – Illustration de la méthode de calcul M3C2 (Lague et al., 2013). Dans un premier temps, une normale au nuage de point est calculée localement dans le nuage de points de référence. Dans un second temps, un cylindre est créé le long de cette normale. La distance entre les deux nuages de points est calculée à l'intersection entre le cylindre et le second nuage de points. La position moyenne des points dans le cylindre est utilisée pour le calcul de la distance. Le processus est répété à l'échelle du nuage de points.

Dans cette étude, la dernière méthode, M3C2, est employée, étant plus adaptée aux données et offrant une estimation de l'incertitude sur les résultats. Comme pour les mesures de déformation, l'incertitude est paramétrique et basée sur des statistiques gaussiennes issues du nombre de points et de l'orientation des normales utilisés. L'intervalle de confiance retenu par la méthode est de 95%.

Pour le calcul des déplacements avec M3C2, la galerie 12, celle ayant les plus forts taux de déformation horizontale, est sélectionnée. Il s'agit aussi de la galerie dans laquelle le taux de déformation horizontale varie le plus. L'idée est de vérifier si cette variation est retrouvée dans les déplacements. Aussi, la méthode offre la possibilité d'obtenir le déplacement tout au long de la galerie et non pas ponctuellement. Le déplacement est calculé au niveau du toit de la galerie et de l'un des deux parements. Les résultats ainsi que leurs incertitudes sont présentés dans les figures 3.10 et 3.11. Un sous-échantillonnage du nuage de points à 1 mm est réalisé pour diminuer la quantité de points, notamment aux abords du lidar. Le diamètre du cylindre est de 100 mm. Ces deux paramètres permettent de garder un nombre significatif de points et minimiser l'incertitude sur le déplacement entre les nuages de points.

Du fait de la rugosité de la surface, causée par la haveuse lors de la création des galeries, toute la surface du toit et des parements ne sont pas observables (figures 3.10 et 3.11). Les ondulations génèrent des zones d'ombre pour le lidar. Par exemple, pour les parements, les données ne sont présentes que sur les crêtes à partir d'une certaine distance. Un plus grand nombre de points d'acquisition aurait été nécessaire afin de couvrir proprement l'ensemble de la galerie.

Les valeurs de déplacements obtenues sont globalement similaires à celles estimées au niveau des réflecteurs, entre quelques millimètres à l'entrée de la galerie et une dizaine de

millimètres à côté du site de stockage (figures 3.10 et 3.11). Enfin, concernant l'incertitude, celle-ci est majoritairement inférieure à 1 mm aussi bien pour les parements que pour les toits, soit inférieure au signal observé. Elle est particulièrement faible pour les points proches du lidar. Elle tend à augmenter avec la distance, en lien avec la perte de points.

Pour les toits (figure 3.10), le déplacement est plus important au centre que sur les bords. Le déplacement est nettement dégressif pour la première partie du toit, passant de 12 mm vers le lidar à 1-2 mm à l'entrée de la galerie. Le déplacement de la seconde partie du toit varie moins le long de la galerie et reste supérieur à 8 mm sur toute la longueur. L'amplitude du déplacement est environ 20% plus importante dans la moitié côté site de stockage que dans l'autre.

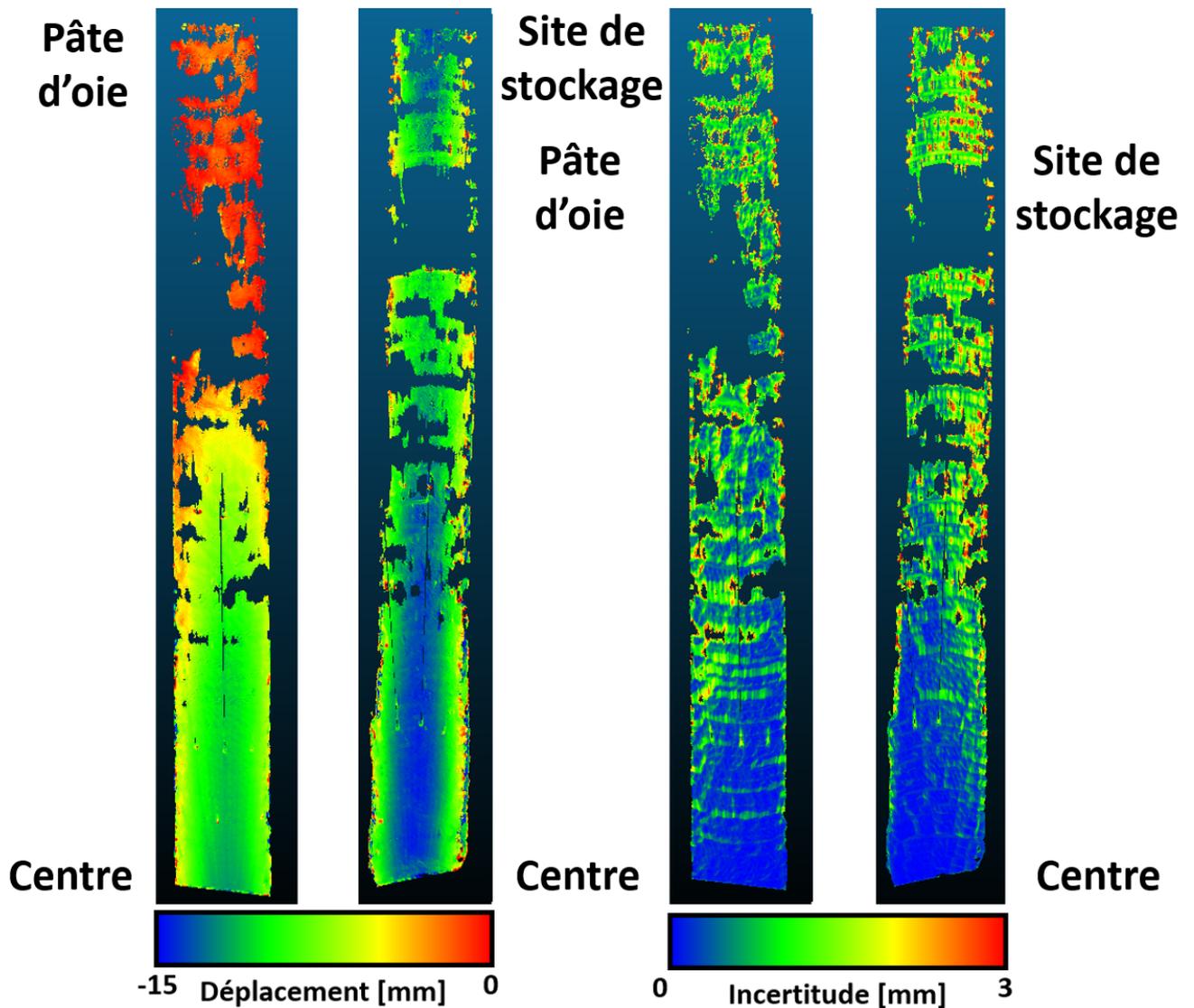


FIGURE 3.10 – Déplacements calculés au niveau du toit dans la galerie 12 (gauche) avec l'incertitude associée (droite). Pour chaque paire, l'image de gauche est associée à la portion entre le centre et l'entrée de la galerie, et l'image de droite, entre le centre et le site de stockage (figure 3.2b). Pour rappel, les nuages de points ne se raccordent pas du fait de la géométrie d'acquisition (figure 3.2c).

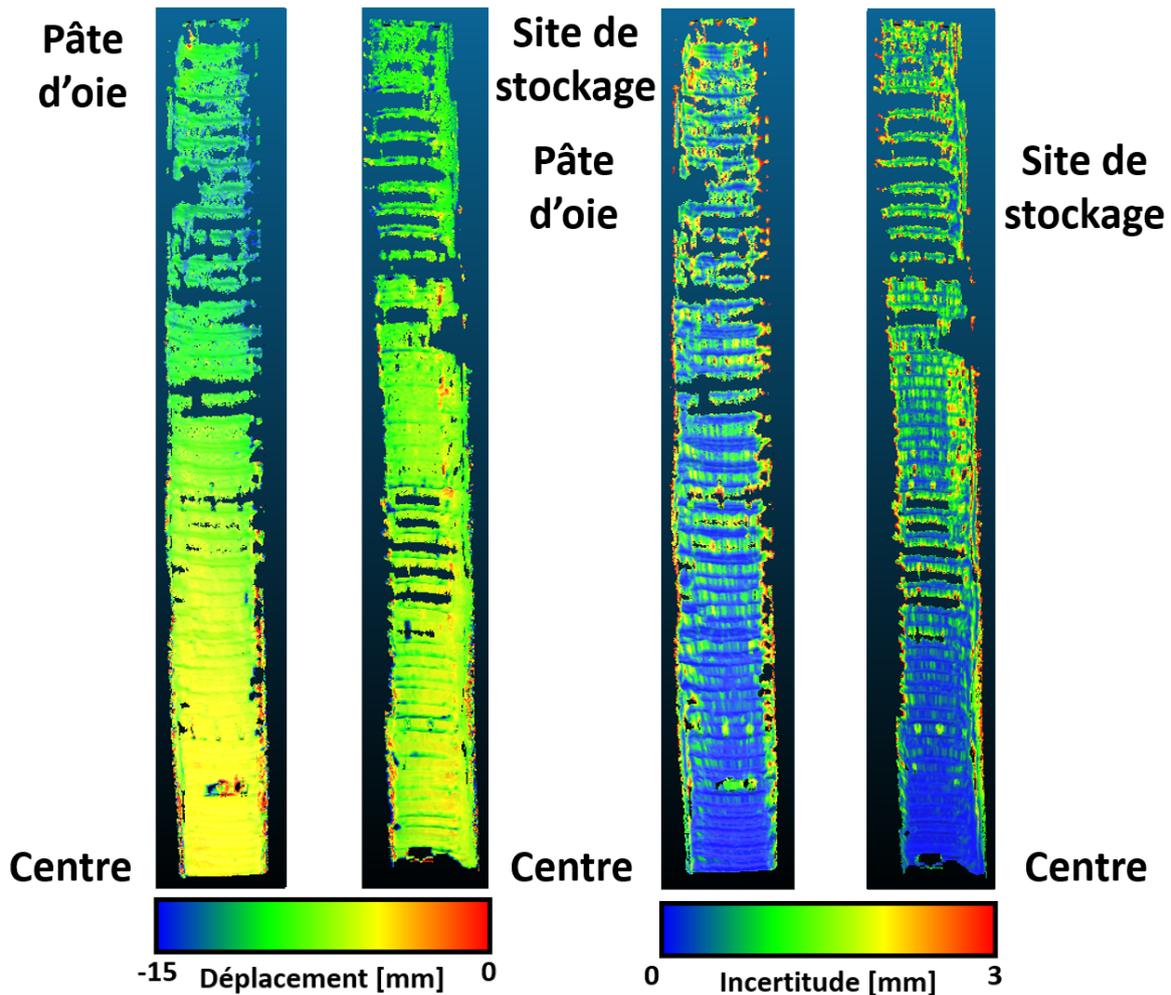


FIGURE 3.11 – Déplacements calculés au niveau d'un parement dans la galerie 12 (gauche) avec l'incertitude associée (droite). Pour chaque paire, l'image de gauche est associée à la portion entre le centre et l'entrée de la galerie, et l'image de droite, entre le centre et le site de stockage (figure 3.2b). Pour rappel, les nuages de points ne se raccordent pas du fait de la géométrie d'acquisition (figure 3.2c).

Pour les parements (figure 3.11), le déplacement est homogène sur toute la hauteur. Le déplacement est dégressif le long de la première partie, passant de 10 mm vers le lidar à 1-2 mm à l'entrée de la galerie. Il faut remarquer la forte perturbation proche du lidar sur cette première moitié. Cette hétérogénéité peut être aussi bien due à une chute de matériaux du parement qu'à un déplacement de matériel (plan des galeries). Le déplacement calculé dans l'autre moitié est aussi décroissant en allant du centre vers le site de stockage, passant de 9.5 mm à 6 mm, et est plus homogène.

Aussi bien pour le parement (figure 3.11) que pour le toit (figure 3.10), des valeurs extrêmes apparaissent sur le bord des nuages de points. Cela correspond aux zones de transition toit-parement et parement-mur. Ces coins sont connus pour être des zones où les déformations sont importantes mais aussi, celles que les mineurs purgent pour des raisons de sécurité (toit-parement) ou celles où les matériaux se décrochant s'accumulent (parement-mur). Elles apparaissent si les nuages de points ne sont pas proprement préparés en retirant ces zones de bruit.

### 3.4.4 Estimation de la variation volumétrique

Grâce au référencement des acquisitions entre elles, il est possible de découper deux nuages de points ayant la même emprise spatiale. La convergence volumétrique, ou la variation de volume de l'ouverture, de la galerie peut ainsi être estimée sur différentes sections. L'obtention de la mesure d'un volume avec CloudCompare se fait en cinq étapes :

- Sélection des deux sections d'étude ;
- Calcul des normales des points en utilisant un modèle de surface local quadratique afin de mieux suivre les variations de surface ;
- Alignement de toutes les normales vers le centre de la galerie ;
- Création de deux plans verticaux aux deux extrémités de la section pour fermer le volume, découpage des deux plans obtenus pour correspondre à la forme de la galerie et orientation des normales vers le centre de la section. Cette étape est nécessaire pour limiter les erreurs lors de la création du volume ;
- Construction d'un maillage triangulaire 3D par résolution d'équation de Poisson (Kazhdan et al., 2006). L'algorithme génère un volume détaillé à partir de scan 3D bruité. Le niveau de détail est gouverné par le niveau d'*octree*, correspondant au niveau de discrétisation de l'espace (Popinet, 2003). Le paramètre choisi pour l'étude est 10.

Une fois le maillage créé, un volume est généré à partir des nuages de points et des plans verticaux, représentant une section de galerie (figure 3.12).

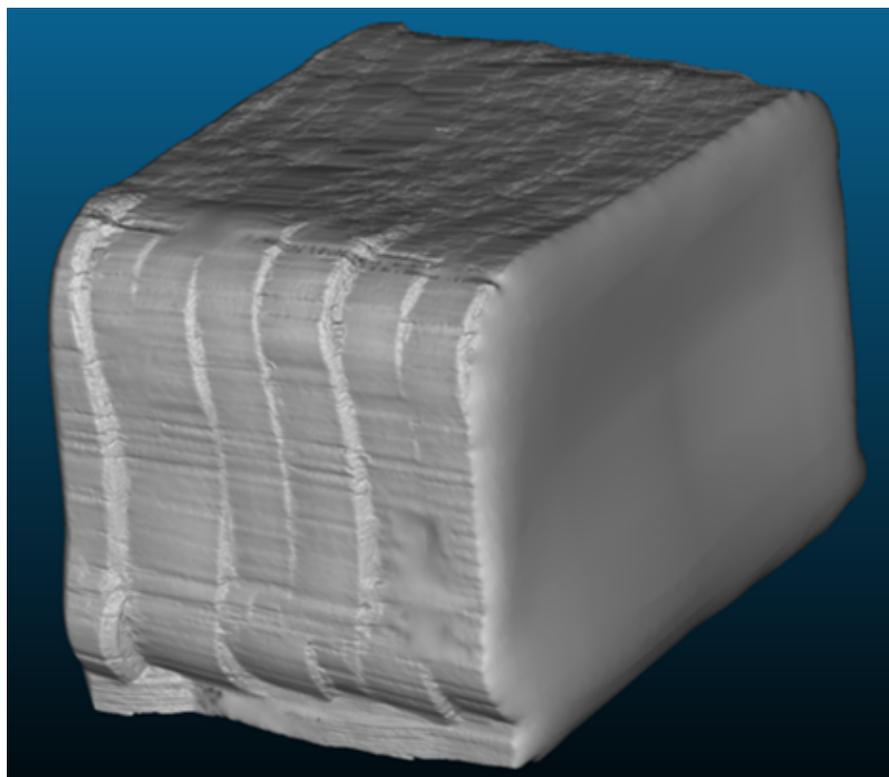


FIGURE 3.12 – Exemple du volume reconstitué sous CloudCompare d'une section de galerie. Les stries observées en surface sont caractéristiques de l'utilisation de la haveuse.

Dans cette partie, le travail se porte sur les deux galeries. À chaque fois, une portion de la galerie est découpée entre deux arches de réflecteurs. Cela permet de sélectionner des nuages de points continus et d'avoir des mesures le long des galeries. Comme précisé précédemment, les nuages de points ne sont pas continus et à partir d'une certaine distance du lidar, les données se concentrent essentiellement sur les crêtes. Il devient alors difficile de reconstruire un volume circulaire. Après plusieurs tests, une "distance seuil" est alors déterminée, distance au-delà de laquelle les données ne sont plus exploitables. Cette distance est de 25 m. Cependant, même à moins de 25 m, un volume ne peut être reconstruit par endroit. La variation volumétrique est ensuite comparée à des estimations réalisées au niveau des arches de réflecteurs. Cette estimation provient de la hauteur et de la largeur des galeries au niveau des arches auxquelles la moyenne des déplacements des réflecteurs est retranchée. La longueur est identique dans les deux cas. Les résultats de ces mesures et estimations sont présentés dans la [figure 3.13](#).

Pour la galerie 11, celle-ci a une dimension constante tout au long, soit environ 2.5 m de haut pour 3.9 m de large. Les déplacements calculés au niveau des réflecteurs sont approximativement égaux le long de la galerie. Il est ainsi retenu un déplacement horizontal de 8 mm pour un déplacement vertical de 10 mm dans la première moitié de la galerie 11 contre 7 mm en horizontal et 8 mm en vertical dans la seconde moitié. Pour la galerie 12, la largeur est considérée constante à 3.7 m mais la hauteur varie de 2.6 m à 3 m. Les déplacements sont différents pour chacune des arches et sont issues des déplacements calculés aux réflecteurs.

De manière générale, les taux estimés et les taux calculés sont similaires à 0.2% près dans la galerie 12 et 0.1% dans 11 ([figure 3.13](#)). Le gradient observé dans la seconde moitié de la galerie 12 est bien suivi. Dans la galerie 12, la convergence volumétrique est 3 à 4 fois plus importante que dans la galerie 11. Ce rapport tend entre 1 et 2 en se rapprochant de l'entrée de la galerie 12.

Par rapport aux valeurs obtenues, plusieurs paramètres influent sur les estimations à des degrés divers :

- Le référencement des acquisitions, impactant la similitude entre les deux sections de galerie. Moins le référencement sera précis, plus il sera difficile de sélectionner la même section dans les deux nuages de points. Un mauvais référencement complexifie le suivi d'un même volume au cours du temps ;
- L'estimation des normales au nuage de points affectant la reconstruction du volume. Les volumes sont créés à partir de ces normales, calculées dans l'ensemble du nuage de points. La mauvaise orientation d'une normale, par exemple opposée à celle des normales voisines, sera à l'origine d'un gonflement ou d'un rétrécissement artificiel du volume. Cette normale mal orientée peut être présente dans un nuage de points mais pas dans l'autre ;
- La couverture spatiale des points affectant aussi la reconstruction du volume. Pour calculer les normales, des points sont nécessaires et la densité des normales est reliée

à celle des points. La robustesse de la reconstruction du volume repose sur le nombre de points, mais surtout leur présence continue dans le nuage. En l'absence de points, le volume est reconstruit par extrapolation, variant d'un nuage de points à l'autre.

- Les plans de fermeture des sections de galerie, modifiant la valeur finale du volume. Comme expliqué précédemment, l'absence de points conduit par moment à des reconstructions variables. Pour diminuer cet effet, des points distribués selon un plan sont ajoutés à chaque extrémité de la section pour "refermer le volume". Néanmoins, ces nuages de points planaires ne sont pas parfaitement accolés au nuage de point initial, entraînant une augmentation du volume. Cette augmentation artificielle est la même pour les deux volumes à comparer, mais influera les variations de volume puisque les calculs sont relatifs ;
- Le niveau d'*octree* définissant la résolution du volume. Avec un niveau d'*octree* faible, la résolution est grossière. En augmentant ce niveau, le volume est affiné et se rapproche de la réalité mais, plus de poids est ainsi donné aux points mal situés spatialement par l'appareil lors de l'acquisition.

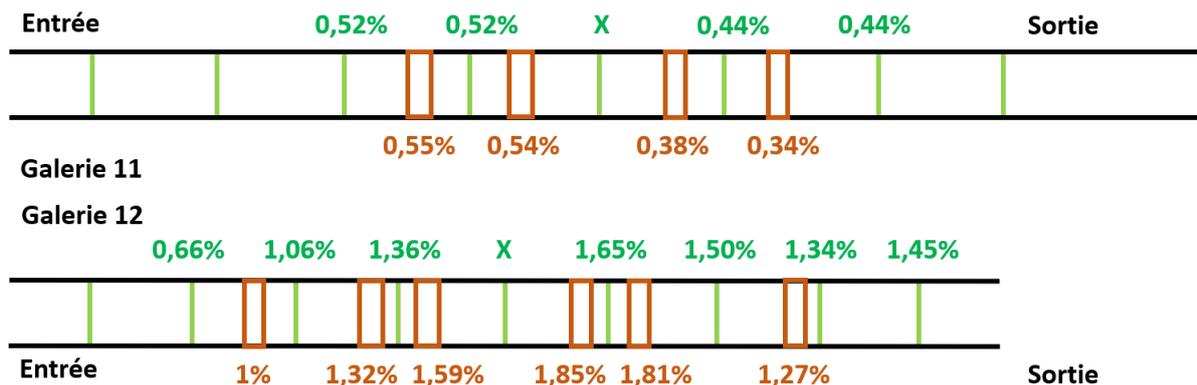


FIGURE 3.13 – Convergences volumétriques estimées (vert) et calculées (marron) le long des deux galeries d'étude. Les valeurs en vert indiquent les estimations faites à partir des dimensions des galeries et des déplacements et en marron, les mesures réalisées sous CloudCompare. Les rectangles marrons indiquent l'emprise approximative de la section utilisée. Une valeur positive représente une fermeture de la galerie.

## 3.5 Conclusion

Par la répétition de campagnes d'acquisitions lidar tous les deux à trois mois, la déformation de deux galeries de sel souterraines à 550 m de profondeur est suivie. Des réflecteurs spécifiques sont installés de manière permanente dans les galeries, servant de points de repère pour les mesures de distances entre les parements. L'incertitude sur les mesures de distance est estimée à 2.1 mm pour des réflecteurs à moins de 40 m de l'appareil. Sans cheminement ni référencement direct des acquisitions, les distances entre les réflecteurs sont utilisées pour mettre les différents nuages de points dans un même référentiel.

Au bout de deux ans, l'exploitation des données lidar acquises met en exergue une déformation horizontale de 0.2-0.3% dans la galerie orientée N008°W (11) contre 0.6-0.7% pour celle orientée N040°E (12). La déformation est approximativement constante le long de la première galerie alors qu'elle décroît en s'éloignant du site de stockage dans la seconde. La comparaison avec d'autres mesures réalisées dans le site de stockage voisin atteste la qualité des résultats. Toutefois, en l'absence de réflecteurs fixés aux murs des galeries, la déformation verticale des galeries n'a pu être suivie. La mise dans un même référentiel des données permet de travailler directement avec les nuages de points. Les déplacements au niveau des parements et des toits sont ainsi calculés pour la galerie 12 et mettent en évidence une diminution de ceux-ci en s'éloignant du site de stockage. La déformation volumétrique est aussi calculée dans les deux galeries, atteignant près de 2% dans la galerie 12 contre seulement 0.5% dans la galerie 11 après deux ans d'observation. Ces différents résultats suggèrent l'effet probable soit d'un stot résiduel dans la couche de potasse inférieure, soit de l'orientation des galeries relativement au champ de contraintes régional sur les déformations obtenues.

Ces résultats encourageants démontrent l'utilité du lidar pour le suivi de galeries souterraines. Des acquisitions lidar répétées au cours du temps offrent l'opportunité d'étudier la déformation d'une galerie sous plusieurs aspects. Une meilleure distribution spatiale des réflecteurs permettrait de suivre la déformation verticale des galeries. Néanmoins, le procédé appliqué dans ces travaux nécessite la mise en place de points de repère permanents, ce qui n'est pas toujours possible.

Dans cette partie, la qualité des résultats est démontrée, en atteste la comparaison avec les données externes. Toutefois, la déformation n'est pas suffisante pour obtenir une loi de comportement. La modélisation du champ de contraintes local est indispensable à l'aboutissement du lidar d'un point de vue mécanique. Il reste à exploiter les données dans un modèle géomécanique à l'échelle des galeries d'étude. Pour cette étape, seule la galerie 11 est retenue, la déformation horizontale étant homogène le long de cette dernière.



# Chapitre 4

## Modélisation géomécanique de l'effet et des vides miniers

### Sommaire

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>4.1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>92</b>  |
| <b>4.2</b> | <b><i>Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions</i> : Flac3D</b> | <b>93</b>  |
| <b>4.3</b> | <b>Détermination du champ de contraintes initial</b>                        | <b>95</b>  |
| 4.3.1      | Géomatériaux d'étude  | 95         |
| 4.3.2      | Reconstruction des volumes géologiques                                      | 101        |
| 4.3.3      | Conditions aux limites  | 104        |
| 4.3.4      | Champ de contraintes pré-exploitation                                       | 105        |
| <b>4.4</b> | <b>Modélisation de l'effet minier</b>                                       | <b>109</b> |
| 4.4.1      | Adaptation de la loi de Norton aux mesures lidar                            | 109        |
| 4.4.2      | La modélisation des matériaux foudroyés                                     | 113        |
| 4.4.3      | Protocole de modélisation et prise en compte de la température              | 115        |
| 4.4.4      | Résultats   | 117        |
| <b>4.5</b> | <b>Discussion</b>   | <b>121</b> |
| 4.5.1      | Les contraintes naturelles dans les matériaux salifères                     | 122        |
| 4.5.2      | Le fluage du sel  | 122        |
| 4.5.3      | Les micromécanismes de déformation du sel                                   | 123        |
| 4.5.4      | Le comportement des matériaux foudroyés                                     | 126        |
| <b>4.6</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>127</b> |

---

### 4.1 Introduction

Dans la partie sur l'interférométrie radar, les déplacements de la surface du sol en lien avec la compaction des matériaux foudroyés en profondeur sont suivis. Toutefois, une estimation de la vitesse de compaction à partir seulement de ces résultats reste délicate, puisque le signal mesuré en surface contient aussi la réponse du milieu à la compaction. Dans la partie sur les campagnes d'acquisitions lidar, les déformations de deux galeries de sel souterraines sont suivies. Néanmoins, sans la connaissance des contraintes locales, la détermination d'une loi de comportement ne peut être parachevée. Dans un cas comme dans l'autre, le passage par des travaux de modélisation géomécanique est nécessaire.

Le besoin d'outils prédictifs pour anticiper l'évolution d'une structure ou comprendre certains phénomènes a conduit au développement des modèles numériques. À travers ces modèles, des structures complexes sont surveillées et suivies comme les réservoirs profonds dans le cadre d'exploitations géothermales (Vallier, 2019) ou pétrolières (Jafarpour, 2008). Dans le secteur minier, les modèles anticipent les risques en lien avec l'exploitation concernant aussi bien les répercussions en surface de l'extraction (Keilich, 2009 ; Iwanec, 2014) que la circulation de gaz au fond (Karacan, 1998). L'essor des outils numériques de modélisation s'appuie sur les avancées technologiques et les travaux de modélisation ont pris le pas sur les essais en laboratoire et les mesures de terrain (Starfield and Cundall, 1988). Holling (1978) a cerné quatre types de modèle, définis selon la compréhension du phénomène à caractériser et la quantité de données à disposition. Les quatre familles de modèle peuvent se résumer ainsi : une mauvaise compréhension du phénomène avec ou sans données, une bonne compréhension du phénomène avec ou sans données. Par retour d'expériences, il s'avère que le cas idéal est celui où la compréhension du phénomène rencontre la richesse des données. Dans les autres cas, la modélisation se retrouve complexifiée (Starfield and Bleloch, 1986). Néanmoins, l'abondance de données ne doit pas se transformer en piège en cherchant à inclure tous les détails (Hammah and Curran, 2009). Dans cette thèse, le suivi de la compaction de matériaux foudroyés, dont la mécanique est présentée dans l'introduction générale, est le phénomène à modéliser. Dans les trois chapitres suivants, une grande partie des données et observations concernant la géologie du bassin sédimentaire, l'impact de la compaction en surface et la déformation de galeries de sel souterraines est résumée. Ces trois chapitres constituent la base de données sur laquelle s'appuie les travaux de modélisation.

Dans un premier temps, le logiciel utilisé pour les travaux de modélisation, Flac3D, est présenté. Dans un deuxième temps, les données concernant la géologie du bassin sédimentaire sont synthétisées au sein d'un volume géologique équivalent. D'anciens travaux et observations sur le champ de contraintes dans le bassin potassique alsacien aident à initialiser les contraintes dans ce modèle. Les paramètres de la loi de comportement du sel sont adaptés pour retrouver les déformations mesurées *in situ* avec le lidar. Le phénomène de compaction des matériaux foudroyés est reproduit conformément aux observations de surface. Une estimation des vides miniers et de leurs taux de fermeture est réalisée. Contrairement aux

précédents travaux de modélisation, un phénomène de fluage est considéré dans ces matériaux. Par la suite, les caractéristiques mécaniques du sel sont discutées.

Dans ce chapitre, l'évolution temporelle des vides miniers profonds est reproduite à partir des archives géologiques, du suivi des déplacements de surface par la technique d'interférométrie radar (InSAR) et du suivi des déformations de galeries souterraines par lidar pour répondre à la problématique de cette thèse.

## 4.2 *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* : Flac3D

Les travaux de modélisation se basent sur le logiciel Flac3D pour *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* développé par le groupe Itasca (Itasca, 2012). Ce logiciel, initialement développé pour réaliser des analyses géotechniques, s'est imposé comme un outil majeur dans la résolution de problématiques minières. Le logiciel offre la possibilité d'étudier *a priori* les répercussions en surface de l'extraction (Xu et al., 2013) comme *a posteriori*, une fois celles-ci constatées (Sainsbury et al., 2010). La construction des modèles participe à l'anticipation de l'évolution du champ de contraintes au cours de l'extraction, afin de mieux cerner ce phénomène (Yasitli et al., 2005; Xie et al., 2009; Basarir et al., 2015). Le logiciel permet d'anticiper les déformations long-termes des structures de soutènement, notamment les piliers, aussi bien en complément d'observations (Bai et al., 2017) que pour anticiper en surface l'impact de la rupture de ces structures (Salmi et al., 2017). Par exemple, Lawrence (2009) a mis au point une méthode de dimensionnement des voix d'accès lors de l'exploitation via ce logiciel. Enfin, Flac3D est aussi régulièrement utilisé pour l'évaluation de l'état de compaction et la perméabilité des matériaux foudroyés (Esterhuizen et al., 2005; Marts et al., 2014; Zhang et al., 2016).

Le logiciel utilise les différences finies explicites, combinées à une implémentation numérique et des formulations mathématiques spécifiques. À chaque itération, les équations du mouvement (4.1) et les équations constitutives sont résolues (4.2) :

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (4.1)$$

$$\frac{D\sigma}{Dt} = H(\sigma, \dot{\epsilon}, \kappa) \quad (4.2)$$

avec  $\sigma_{ij}$  les composantes du tenseur de contraintes,  $\rho$  la densité,  $\vec{b}$  la force de volume par unité de masse,  $\vec{v}$  la vitesse,  $\dot{\epsilon}$  le tenseur de vitesse de déformation et  $\kappa$  un paramètre prenant en compte l'histoire de chargement.

Son implémentation s'appuie sur trois principes clés : la discrétisation spatiale du milieu, les différences finies et les solutions dynamiques.

Le premier point signifie que toutes les forces impliquées sont concentrées aux noeuds

du modèle. Du deuxième point découle que les dérivées spatiales et temporelles de premier ordre d'une variable sont approximées par une variation linéaire à travers un espace et un temps fini. En combinant ces deux premiers points et les équations précédentes, un pas de calcul est déterminé. En résolvant l'équation du mouvement, la vitesse et le déplacement sont calculés à partir des forces aux noeuds, et ainsi, le taux de déformation est déduit. En résolvant l'équation constitutive, le tenseur des contraintes est incrémenté.

En complément, la discrétisation est dite mixée : chaque élément est subdivisé en plusieurs tétraèdres. Dans un parallélépipède, cinq tétraèdres équivalents sont définis (figure 4.1). La déformation d'un élément s'accompagne d'une variation de volume, incompatible avec certaines hypothèses de plasticité. L'intérêt de la discrétisation mixée est d'améliorer la flexibilité volumétrique des éléments en ajustant "proprement" le premier invariant du tenseur de la vitesse de déformation de chacun des tétraèdres. La déformation volumétrique d'un élément est ainsi gérée par plusieurs tétraèdres, permettant notamment à l'élément de se déformer à volume constant.

Ensuite, le troisième principe de l'implémentation numérique implique que les termes inertiels de l'équation du mouvement sont incorporés afin d'atteindre l'équilibre du système modélisé. Pour prendre en compte ces termes inertiels, un problème statique équivalent est considéré en exprimant l'équation du mouvement aux noeuds du tétraèdre (4.3) :

$$\sigma_{ij,j} + \rho B_i = 0 \quad (4.3)$$

où

$$B_i = \rho(b_i - \frac{dv_i}{dt}) \quad (4.4)$$

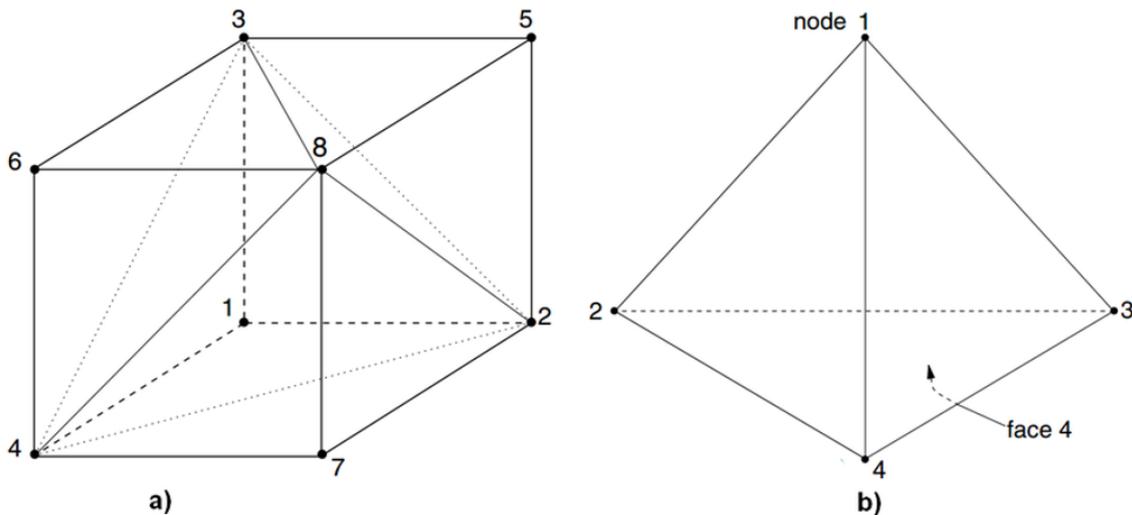


FIGURE 4.1 – Élément parallélépipédique (a) découpé en tétraèdre (b) dans Flac3D (Tran Manh, 2014).

Par la suite, une vitesse nodale virtuelle est attribuée au système. D'après le théorème des travaux virtuels, le taux de travail des forces internes est égal au taux de travail des forces externes (nodales et volumiques) pour n'importe quelle vitesse virtuelle. Ainsi, une

force de déséquilibre  $F$  au noeud  $l$  est estimée par (4.5) :

$$F_i^{(l)} = \left[ \left[ \frac{\sigma_{ij} n_j^{(l)} S^l}{3} + \frac{\rho b_i V}{4} \right] \right]^{(l)} + P_i^{(l)} \quad (4.5)$$

Cette force n'est jamais nulle. En définissant une valeur seuil, le milieu est considéré à l'équilibre lorsque la valeur de  $F$  passe en-dessous du seuil. La valeur traditionnellement retenue est  $10^{-5}$  (Itasca, 2012). Afin de parvenir à l'équilibre mécanique, les équations de mouvements sont amorties.

## 4.3 Détermination du champ de contraintes initial

Dans cette partie, le champ de contraintes initial, avant le début de l'activité minière, dans le bassin potassique alsacien est modélisé. La compaction des géomatériaux foudroyés dépendant directement des contraintes du milieu, il est alors primordial de reproduire les contraintes ambiantes. Pour l'aboutissement de cette première étape, un modèle équivalent à l'échelle du bassin potassique est élaboré, modèle partiellement repris pour la modélisation de l'effet minier. Or, la construction d'un modèle nécessite trois étapes : la définition des géomatériaux et de leurs lois de comportement associées, leurs volumes équivalents et les conditions aux limites.

### 4.3.1 Géomatériaux d'étude

#### 4.3.1.1 Définition et composition

Comme introduit dans le chapitre 1 de la thèse, les dépôts salifères sont stratifiés, avec la superposition de couches de sels et de marnes anhydritiques (Blanc-Valleron, 1990, figure 1.2). Le salifère supérieur est constitué de trois formations (de bas en haut) : le sel IV, le sel V et les marnes sans sel (MSS). Pour rappel, les couches de potasse se situent à la base du sel IV. Pour sa part, le salifère moyen est formé par le sel III et les marnes fossilifères (MAH, CEP). Enfin, le salifère inférieur contient les marnes vertes à Limnées I (MAL I), le sel I, les marnes vertes à Limnées II (MAL II) et le sel II. Dans un premier temps, de l'étude géologique du bassin et à défaut d'avoir autres données (vitesses acoustiques) à disposition, six géomatériaux équivalents sont retenus pour la modélisation (tableau 4.1). Ces géomatériaux sont constitués en fonction des éléments présents mais aussi de leurs âges. Les dépôts superficiels, les marnes, le sel et l'anhydrite sont les principaux éléments ayant servi à la constitution de ces géomatériaux équivalents.

Dans un second temps, les proportions en marne, en anhydrite et en sel (MAS) des géomatériaux III à VI sont à déterminer, la composition des géomatériaux I et II étant triviale. L'estimation de la proportion de ces éléments est nécessaire à l'estimation des propriétés mécaniques équivalentes des géomatériaux ainsi définis. Pour estimer leurs proportions, l'es-

timation se base sur l'étude des formations paléogènes évaporitiques (Blanc-Valleron, 1990). Les marnes anhydritiques dans le sel IV sont composées en moyenne à 62% de marnes pour 38% d'anhydrite. Les dépôts de sels sont, quant à eux, composés à 85% de sel, 10% de marnes et 5% d'anhydrite. Cependant, aucune donnée précise sur la composition des couches plus anciennes n'a été retrouvée. En conséquence, l'hypothèse est faite que les compositions des dépôts de marnes anhydritiques et de sel sont similaires pour tous les dépôts à travers le bassin. Par ailleurs, des cartes d'isopourcentages de halite et d'isopaques sont disponibles pour les différentes formations (Blanc-Valleron, 1990). La halite est contenue uniquement dans le sel. En combinant les isopaques et les isopourcentages, la hauteur équivalente de sel est déduite. En utilisant les proportions précédemment citées et les isopaques, les proportions finales de MAS sont estimées pour les géomatériaux en trois points différents : le puits Max, le sondage minier DP206 (Pulversheim) et le sondage pétrolier Feldkirch (Bollwiller).

Afin de s'assurer de la viabilité des résultats, la densité moyenne des dépôts est utilisée comme point de contrôle. Alvarez (1982) présente dans son rapport la valeur moyenne de densité de certaines couches, mesurées lors de diagraphies de forage. Ainsi, des mesures directes sont disponibles pour les géomatériaux I et II. Heitz and Hicher (2002) donnent également une valeur de densité pour des marnes provenant du site ayant servi de zone test pour le site de stockage nucléaire. À ce niveau de profondeur et à cette localisation géographique, les marnes sont anhydritiques. Par conséquent, la valeur mesurée par Heitz and Hicher (2002) est associée au géomatériau III. Concernant les géomatériaux IV à VI, des mesures ont été réalisées au puits Max et aux sondages DP206 et Feldkirch. Pour chaque géomatériau et à chacun des points, une estimation de la masse volumique est réalisée. Cette estimation est une combinaison linéaire de la masse volumique du sel, de l'anhydrite et de la marne. Pour le sel, Vouille (1992) a réalisé une mesure en laboratoire à partir d'échantillon provenant du bassin potassique et a obtenu une valeur de  $2.16 \text{ g.cm}^{-3}$ . Pour l'anhydrite, une valeur moyenne de  $2.94 \text{ g.cm}^{-3}$  issue d'une dizaine d'échantillons provenant de la mer Adriatique et des Alpes est retenue (Trippetta et al. 2013). Pour la marne, la valeur de  $2.07 \text{ g.cm}^{-3}$  est déduite du géomatériau III et de ces proportions en marne et anhydrite. Les valeurs ainsi obtenues sont présentées dans le [tableau 4.2](#).

| Géomatériaux | Géologie  | Formations                       |
|--------------|---|----------------------------------|
| I            | Alluvions et argiles (Quaternaire)  | X                                |
| II           | Marnes (schisteuses, gréseuse, calcaire à mélette, à foraminifères, à amphisile, etc) | Série grise (MAF, SAP, CAM, MAC) |
| III          | Marnes avec anhydrite et/ou gypse   | MSS                              |
| IV           | Marnes avec anhydrite et sel  | Sel IV, Sel V                    |
| V            | Marnes avec anhydrite et sel  | Sel III, CEP, MAH                |
| VI           | Marnes avec anhydrite et sel  | MAL I, Sel I, MAL II, Sel II     |

TABLE 4.1 – **Géomatériaux retenus pour les travaux de modélisation.** Les sigles des formations sont ceux utilisés dans la [figure 1.2](#).

| Lieu (géomatériau) | Composition MAS | Masse volumique mesurée [g.cm <sup>-3</sup> ] | Masse volumique estimée [g.cm <sup>-3</sup> ] | Différence [%] |
|--------------------|-----------------|---|---|----------------|
| Feldkirch (IV)     | 42.5-25-32.5    | 2.36  | 2.31  | -2.1           |
| Max (IV)           | 40-24-36        | 2.31  | 2.31  | 0              |
| DP206 (IV)         | 48-19.5-32.5    | 2.31  | 2.28  | -1.3           |
| Feldkirch (V)      | 53-32.5-14.5    | 2.36  | 2.36  | 0              |
| DP206 (V)          | 32.5-19-48.5    | 2.34  | 2.28  | -2.6           |
| Feldkirch (VI)     | 37-22-41        | 2.23  | 2.3   | 3.1            |
| DP206 (VI)         | 41-24.5-34.5    | 2.24  | 2.31  | 3.1            |

TABLE 4.2 – Comparaison entre les masses volumiques mesurées et estimées.

Pour les géomatériaux IV et V, la différence entre les estimations et les mesures sont faibles, validant les hypothèses pour ces géomatériaux. Cependant, pour le géomatériau VI, la valeur est surestimée dans les deux cas. Cette différence proviendrait d'une teneur en anhydrite plus faible dans le géomatériau VI. En effet, d'après les rapports de forages, du gypse est présent dans le géomatériau VI. D'après les analyses des échantillons d'anhydrite de cet étage, le coeur de ceux-ci seraient gypseux (Blanc-Valleron, 1990), traduisant une évaporation incomplète de l'eau contenue. Pour conserver la continuité des éléments et éviter d'introduire le gypse, la teneur en anhydrite des marnes anhydritiques est diminuée de 38% à 27% pour le géomatériau VI exclusivement. De cette manière, les mesures sont retrouvées à 0.5% près. Pour la suite, les proportions moyennes MAS sont fixées à 44 - 26 - 30 pour les géomatériaux IV et V, et à 44 - 16 - 40 pour le géomatériau VI. En procédant ainsi, une masse volumique similaire à celle sélectionnée pour les travaux de modélisation gravimétrique au niveau du diapir lors des études de faisabilité de stockage de gaz est obtenue (tableau 4.3).

| Géomatériaux | Composition    | Masse volumique estimée [g.cm <sup>-3</sup> ] | Masse volumique modélisée [g.cm <sup>-3</sup> ] |
|--------------|----------------|---|---|
| I            | Alluvions      | 2.25  | 2.22  |
| II           | Série Grise    | 2.4   | 2.4   |
| III          | MAS (62-38-0)  | 2.4   | X   |
| IV           | MAS (44-26-30) | 2.33  | 2.31  |
| V            | MAS (44-26-30) | 2.33  | 2.30  |
| VI           | MAS (44-16-40) | 2.24  | 2.25  |

TABLE 4.3 – Résumé des compositions et des masses volumiques des géomatériaux retenus pour l'étude. Les valeurs de masses volumiques modélisées proviennent de Robreau (2004).

## 4.3.1.2 Propriétés mécaniques équivalentes instantanées et asymptotiques

Le problème étant visco-élastique, les propriétés mécaniques des géomatériaux équivalents sont déterminées dans un premier temps, puis leurs lois de comportement respectives sont définies dans un second temps. Deux catégories de paramètres sont distinguées, les paramètres asymptotiques et les instantanés. La première catégorie reflète le comportement long-terme des géomatériaux, à l'échelle des temps géologiques, alors que la seconde, caractérise la réponse des géomatériaux suite à une stimulation sur une courte échelle de temps, à l'échelle de l'extraction d'un panneau minier. Comme pour la masse volumique, le module d'Young et le coefficient de Poisson des géomatériaux III à VI sont déterminés à partir de leurs proportions respectives en MAS.

Blanc-Valleron (1990) décrit des dépôts sédimentaires stratifiés, traduisant une anisotropie planaire dont le plan est horizontal. Salamon (1968) a explicité la relation entre les propriétés mécaniques de chacun des éléments constitutifs et les propriétés équivalentes dans le cas de milieux anisotropes horizontaux. Ces relations sont rappelées ici (4.6,4.7,4.8,4.9) :

$$\nu_1 = \frac{\sum \frac{\phi_i \nu_{1i} E_{1i}}{1 - \nu_{1i}^2}}{\sum \frac{\phi_i E_{1i}}{1 - \nu_{1i}^2}} \quad (4.6)$$

$$\nu_2 = (1 - \nu_1) \sum \frac{\phi_i \nu_{2i}}{1 - \nu_{1i}} \quad (4.7)$$

$$E_1 = (1 - \nu_1^2) \sum \frac{\phi_i E_{1i}}{1 - \nu_{1i}^2} \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{E_2} = \sum \frac{\phi_i}{E_{1i}} \left( \frac{E_{1i}}{E_{2i}} - \frac{2\nu_{2i}^2}{1 - \nu_{1i}} \right) + \frac{2\nu_2^2}{(1 - \nu_1)E_1} \quad (4.9)$$

avec  $\nu_1$  le coefficient de Poisson et  $E_1$  le module d'Young du géomatériau équivalent dans le plan d'anisotropie,  $\nu_2$  et  $E_2$  perpendiculaire au plan,  $\phi_i$  la proportion du géomatériau  $i$  dans le milieu équivalent,  $\nu_{1i}$  le coefficient de Poisson et  $E_{1i}$  le module d'Young du géomatériau  $i$  dans le plan d'anisotropie,  $\nu_{2i}$  et  $E_{2i}$  perpendiculaire au plan.

| Géomatériau / Éléments | $\nu_{asy.}$ | $E_{asy.}$ [GPa]    | $\nu_{ins.}$ | $E_{ins.}$ [GPa]    |
|------------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| Anhydrite              | 0.35         | 31                  | 0.25         | 61                  |
| Marnes                 | X            | X                   | X            | 5.9 (V) - 7 (H)     |
| Sel                    | 0.35         | 30                  | 0.25         | 25                  |
| I                      | 0.35         | 0.1                 | 0.25         | 0.1                 |
| II                     | 0.35         | 6.5                 | 0.25         | 6.5                 |
| III                    | 0.35         | 9.0 (V) - 16.1 (H)  | 0.25         | 9.8 (V) - 30.2 (H)  |
| IV                     | 0.35         | 11.5 (V) - 20.3 (H) | 0.25         | 28.3                |
| V                      | 0.35         | 11.5 (V) - 20.3 (H) | 0.25         | 28.3                |
| VI                     | 0.35         | 11.5 (V) - 20.2 (H) | 0.25         | 11.3 (V) - 21.8 (H) |

TABLE 4.4 – Résumé des propriétés mécaniques asymptotiques et instantanées des éléments et des géomatériaux équivalents. H signifie Horizontal et V, Vertical. À défaut d'études et d'observations spécifiques, le sel et l'anhydrite sont supposés isotropes.

Ensuite, pour chaque élément, des propriétés mécaniques propres leur sont associées. Dans le meilleur des cas, les valeurs proviennent de mesures réalisées sur des échantillons locaux. Vouille (1992) a mesuré les propriétés instantanées du sel du bassin potassique. Nguyen-Minh and Bergues (1995) ont étudié le fluage des marnes du bassin potassique et ont déterminé le module d'Young instantané de cet élément. Deux valeurs sont retenues, les auteurs ayant remarqué une anisotropie dans l'échantillon. Le reste des valeurs proviennent de la littérature. Trippetta et al. (2013) ont mesuré les propriétés instantanées de l'anhydrite et en ont déduit les propriétés asymptotiques. Les propriétés asymptotiques du sel proviennent de la moyenne des propriétés d'une dizaine d'échantillons différents (Senseny et al., 1992). Après des recherches approfondies, aucune autre information n'a été trouvée concernant les marnes du Fossé Rhéna. Par simplification, les coefficients de Poisson du sel et de l'anhydrite est attribué aux marnes, soit 0.25 en instantané et 0.35 en asymptotique. Il est supposé aussi que le module d'Young instantané est égal à l'asymptotique. Pour simplifier encore le modèle et à défaut d'études et d'observations spécifiques, il est supposé que le sel et l'anhydrite sont isotropes, à la différence des marnes. Les valeurs retenues et calculées sont résumées dans le [tableau 4.4](#). En raisonnant par équivalence, l'estimation des paramètres mécaniques est simplifiée alors que ces derniers semblent complexes à déterminer à cause des propriétés visco-plastiques des éléments de base (Liang et al., 2007). Concernant le géomatériau I, les valeurs proviennent de graviers compacts et sont utilisées dans les études antérieures.

Pour les géomatériaux anisotropes, un cinquième paramètre indépendant est nécessaire, correspondant au module de cisaillement perpendiculaire au plan d'anisotropie. À défaut d'avoir une mesure directe de ce paramètre, Lekhnitskii (1963) en a déterminé son expression empirique (4.10) :

$$G_2 = \frac{E_1 E_2}{E_1(1 + 2\nu_2) + E_2} \quad (4.10)$$

avec  $G_2$  le module de cisaillement perpendiculaire au plan. Les valeurs obtenues pour les différents géomatériaux sont résumées dans le [tableau 4.5](#).

| Géomatériaux | $G_{2asy.}$ [GPa] | $G_{2ins.}$ [GPa] |
|--------------|-------------------|-------------------|
| III          | 4.0               | 5.4               |
| IV/V         | 5.1               | X                 |
| VI           | 5.1               | 5.1               |

TABLE 4.5 – Module de cisaillement perpendiculaire au plan d'anisotropie des géomatériaux anisotropes.

### 4.3.1.3 Les lois de comportement

Pour la modélisation de l'effet minier lié à l'évolution des vides miniers, les géomatériaux I à III sont laissés élastiques. Malgré la présence du sel dans le géomatériau VI, ce dernier est seulement considéré élastique et il est supposé que ce géomatériau n'impacte pas le phénomène étudié. Les paramètres asymptotiques sont remplacés par les paramètres instantanés.

Concernant les géomatériaux IV et V, une loi de comportement élasto-visco-plastique leur est associée. [Pouya \(1991\)](#) a déterminé expérimentalement, en laboratoire, que la vitesse de déformation du sel du bassin potassique alsacien suivait une loi de Norton ([Norton, 1929](#)). Le tenseur de vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$  est calculé par la relation suivante (4.11) :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_{cr} \left( \frac{\sigma_{ij}^d}{\bar{\sigma}} \right) \quad (4.11)$$

où

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A \bar{\sigma}^n \quad (4.12)$$

avec

$$A = \frac{A_s \exp(-\frac{B}{T})}{\sigma_0^n} \quad (4.13)$$

avec  $\dot{\epsilon}_{cr}$  la vitesse de fluage,  $\sigma_{ij}^d$  le déviateur de contraintes,  $\bar{\sigma}$  la contrainte de von Mises,  $n$  l'exposant des contraintes,  $A_s$  la vitesse de référence (homogène à une déformation par an),  $T$  la température,  $B$  un paramètre en lien avec l'énergie d'activation et  $\sigma_0$  un paramètre de normalisation. Les valeurs expérimentales obtenues pour les paramètres sont présentées dans le [tableau 4.6](#). Les expériences aboutissant à ces valeurs sont décrites ultérieurement.

| Paramètre                    | Abréviations | Valeur                  |
|------------------------------|--------------|-------------------------|
| Exposant de contraintes      | n            | 4.0                     |
| Vitesse de références        | $A_s$        | 0.005 %.j <sup>-1</sup> |
| -                            | B            | 4700 K                  |
| Température                  | T            | 308 K                   |
| Contraintes de normalisation | $\sigma_0$   | 1.0 MPa                 |

TABLE 4.6 – Paramètres de la loi de Norton déterminés pour le sel du bassin potassique alsacien ([Ghoreychi, 1991b](#)).

En appliquant la loi de Norton à l'ensemble du géomatériau, il est implicitement supposé que le sel contrôle le comportement visco-plastique du géomatériau. Pour les géomatériaux IV et V, le module d'Young et le coefficient de Poisson équivalents utilisés sont des combinaisons linéaires des propriétés des éléments de base (MAS) ([tableau 4.4](#)). En plus de ces paramètres, une contrainte déviatorique seuil est à définir, limite au-delà de laquelle le fluage intervient. Ce seuil est fixé à 0 Pa. Cette valeur signifie que le fluage des couches de sel se produit dès l'apparition d'un déviateur ([Carter et al., 1982](#); [Bérest et al., 2005](#)). Aussi, en choisissant la loi de comportement de Norton, deux autres hypothèses complémentaires sont faites. D'abord, la déformation des géomatériaux salifères n'est due qu'à un seul mécanisme alors que plusieurs d'entre eux semblent intervenir ([Cornet et al., 2018](#)). Puis, un seul régime de déformation affecte le sel alors qu'il est notoirement connu que le fluage du sel se décompose en trois phases ([Carter et al., 1993](#)). Ces différents points sont discutés ultérieurement.

### 4.3.2 Reconstruction des volumes géologiques

Après avoir défini les caractéristiques des géomatériaux équivalents, leurs volumes dans le bassin potassique alsacien est reconstitué. Comme présenté dans le chapitre 1, nombre de données sont disponibles pour dessiner un volume géologique. L'objectif est de reconstruire la géologie du bassin, du nord de Mulhouse à Raedersheim, du pied des Vosges au diapir d'Ensisheim. Les travaux se basent sur l'interpolation des horizons de forage et de puits pour obtenir les surfaces de transition entre les géomatériaux. Les données sont réparties en plusieurs lieux : le bureau du BRGM à Lingolsheim et les travaux de [Wagner \(1929\)](#). Ces derniers contiennent spécifiquement les coupes géologiques des puits miniers. Les archives des campagnes de sondage, aussi bien pétrolières que minières, sont partiellement numérisées et toutes disponibles au BRGM Alsace.

La profondeur des interfaces est relevée à plusieurs sites et les points géoréférencés, représentés en [figure 4.2](#). Les données sont projetées à la verticale des sondages. Dans certains cas, les forages dévient de la verticale du point en surface en raison soit du champ de contraintes en profondeur soit des objectifs. Par exemple, certains forages pétroliers du bassin potassique sont horizontaux sur la fin pour atteindre le réservoir. Les données ainsi cumulées sont chargées dans le logiciel Petrel, produit par Schlumberger. Petrel est un logiciel développé pour la modélisation géologique 3D à partir d'un large éventail de données géophysiques telle que la sismique réflexion. Il est également possible de modéliser des surfaces à partir d'informations ponctuelles. Plusieurs méthodes sont disponibles, celle respectant les données et la continuité des interfaces est sélectionnée. En d'autres termes, les horizons modélisés passent par tous les points et ils ne se coupent pas entre eux. Ainsi, à partir des interfaces entre les géomatériaux, les volumes des géomatériaux sont obtenus à travers le bassin sédimentaire.

Les sondages ne sont pas suffisants pour reconstruire proprement les volumes. Les informations sont ponctuelles et la couverture spatiale des sondages est hétérogène comme en atteste la carte des points utilisés ([figure 4.2](#)). La combinaison des points de sondage avec les coupes de sismique réflexion et des mesures de gravimétrie permettrait d'atteindre un niveau de précision supérieur. Toutefois, dans l'optique d'une modélisation simplifiée de la géologie, l'utilisation des données de forages suffit. Par ailleurs, dans cette étude, il est possible de recouper le modèle produit avec d'autres informations. L'épaisseur obtenue pour le géomatériau II, correspondant à la Série Grise, respecte l'intervalle de valeur publiée ([Düringer, 1999](#)). La variation de profondeur de l'interface entre les géomatériaux IV, contenant les couches de potasse, et V suit celle des couches de potasses exploitées ([MDPA and Cesame, 2008](#)). En revanche, les épaisseurs des dépôts salifères excèdent par endroit les intervalles répertoriés ([Düringer, 1999](#)). Cet écart provient notamment de la perte de résolution spatiale avec la profondeur. Les sondages minières se sont entrepris à la recherche des couches de potasse et ont atteint l'interface entre les géomatériaux IV et V dans le meilleur des cas, mais jamais celle entre le V et VI. La profondeur de cette interface n'est renseignée que par les forages pétroliers, couvrant moins de surface que les données minières ([figure 4.2](#)). Le diapir

n'est pas reproduit avec la seule utilisation des sondages. Le faible nombre de sondages à ses alentours explique cet échec. Pour le représenter, les résultats des travaux de modélisation gravimétrique ainsi que des coupes de sismique réflexion sont utilisés (Robreau, 2004).

Après cette étape de reconstruction, ces surfaces de transition sont exportées de Pétrel vers Flac3D. La zone dessinée dans Flac3D s'étend du pied des Vosges au diapir d'Ensisheim, du puits Amélie au nord de Raedersheim (figure 4.3). Les zones de Reiningue et Raedersheim ne sont pas incluses dans le modèle réduit. Pour Raedersheim, la faible couverture spatiale des données de forage explique cette décision. Pour Reiningue, ce choix se justifie par la décision de modéliser les zones où les résultats InSAR et les mesures de nivellement sont disponibles. La zone retenue couvre 12 km selon l'axe Est-Ouest et Nord-Sud. En vertical, le modèle descend à 1.5 km de profondeur. En surface, la topographie est laissée plane. Le modèle est composé de cubes de 100 m d'arêtes, les petites variations latérales et locales ne sont ainsi pas reproduites. À chaque cube est associé le géomatériau majoritaire.

Suite à cette modélisation géologique, une hypothèse supplémentaire est faite pour les géomatériaux équivalents. Par simplification, le plan d'anisotropie des géomatériaux III à VI est conservé horizontal à l'échelle du bassin sédimentaire. En réalité, ce plan devrait suivre la variation d'orientation des surfaces de transition entre les géomatériaux.

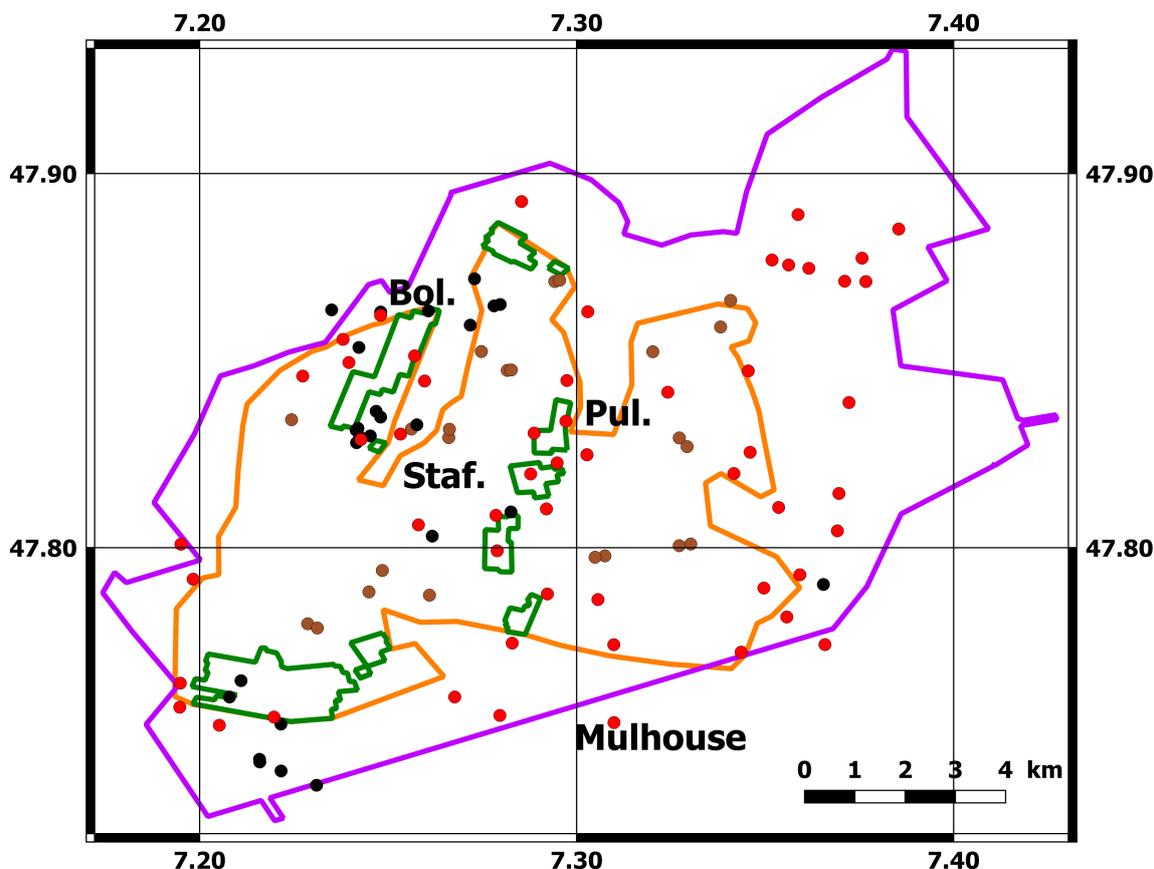
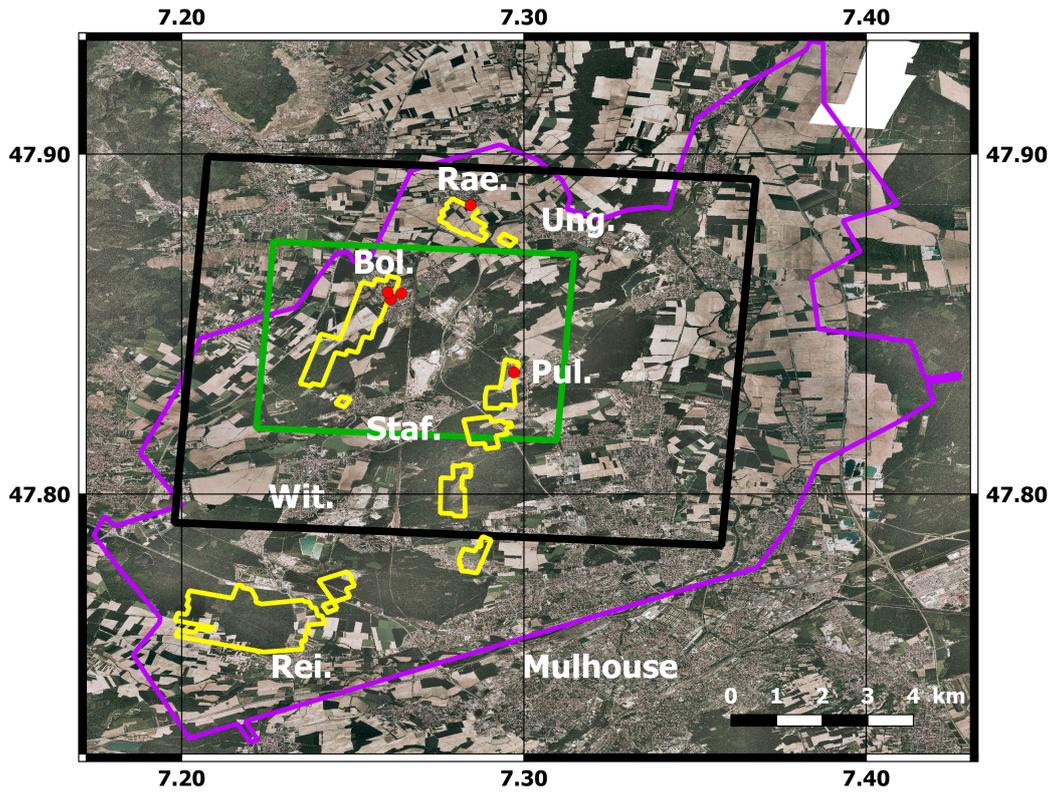
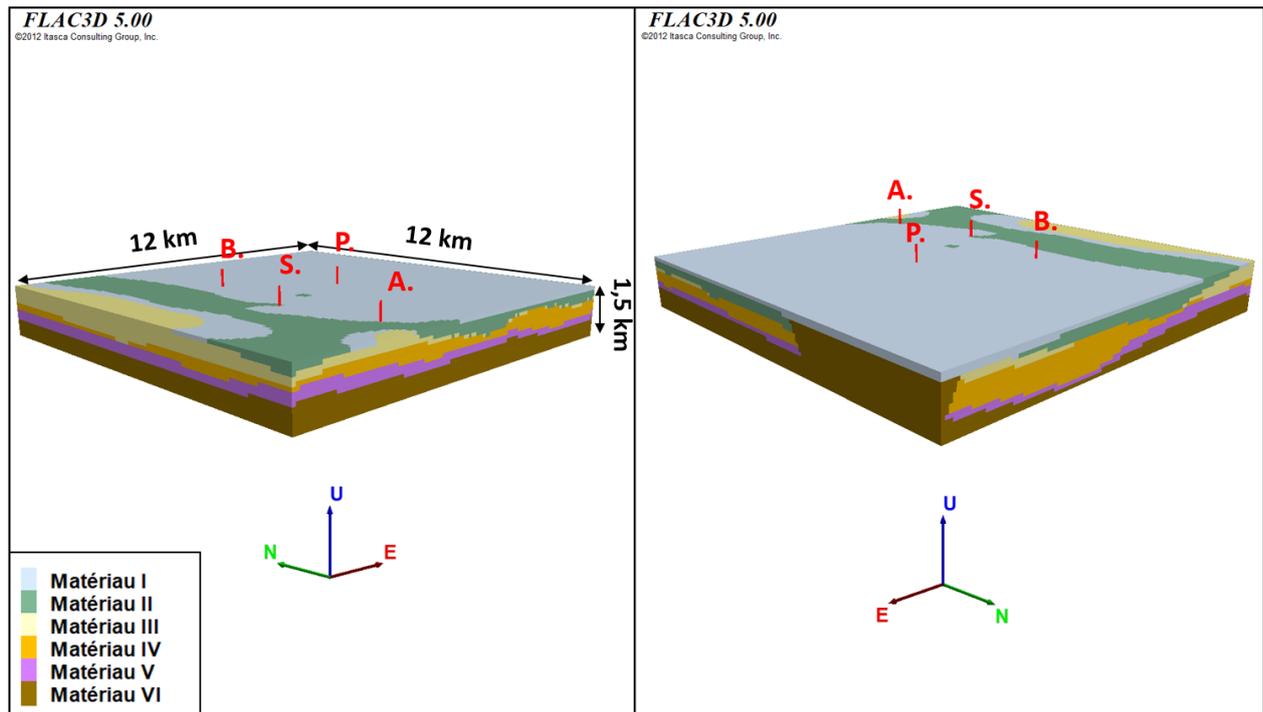


FIGURE 4.2 – Carte des forages et sondages utilisés lors de la modélisation des volumes géologiques. Les points rouges indiquent les sondages miniers, les points marrons, les puits miniers et les points noirs, les forages pétroliers. Les polygones verts représentent les exploitations minières les plus récentes, de 1990 à 2002.



(a) Emprise géographique du modèle



(b) Vue du modèle 3D

FIGURE 4.3 – Emprise géographique du modèle (haut) et vue du modèle 3D avec ses différents géomatériaux (bas). Le rectangle noir couvre l'emprise du modèle initial et le rectangle vert, l'emprise du modèle retenue pour la modélisation de l'effet minier. Les contours jaunes indiquent les exploitations remontant jusqu'à 1990 et les points rouges, les points de nivellement suivis. La remontée de géomatériau VI dans la vue de droite correspond au diapir. Lieux, A. : Amélie, B. : Bollwiller, P. : Pulversheim, S. : Staffelfelden.

### 4.3.3 Conditions aux limites

Dans ces travaux de modélisation géomécanique, le champ de contraintes dans le bassin potassique alsacien induit par la tectonique extensive de l'oligocène est reproduit. Il est supposé que ce champ de contraintes n'a pas évolué de manière significative depuis. Avant de passer à la modélisation du champ de contraintes, un point crucial reste à déterminer, les conditions aux limites du modèle. Les travaux de thèse de Larroque (1987) orientent leurs sélections. Larroque (1987) a étudié la déformation des séries salifères du bassin potassique de Mulhouse. Son étude repose sur l'analyse des variations de longueurs des couches de sel par rapport aux couches de marnes anhydritiques. De par ses propriétés ductiles, le sel flue en cas d'extension alors que des éléments plus rigides, comme les marnes et l'anhydrite, rompent. Un allongement horizontal d'environ 8% selon l'axe Est-Ouest est estimée à partir des dépôts, alors que selon l'axe Nord-Sud, aucune déformation horizontale n'est constatée. En complément, une compression verticale des couches d'environ 8% est estimée. Ces différentes observations s'expliquent par l'histoire géologique du bassin. Le dépôt successif des couches est à l'origine de l'augmentation du poids des terrains, provoquant une compaction graduelle des couches sédimentaires. En parallèle de l'accumulation des dépôts, le bassin subit l'épisode de rifting du Fossé Rhénan provoquant son extension selon l'axe Est-Ouest.

Ainsi, ces informations sont traduites par une frontière à vitesse nulle au nord et au sud du modèle, les couches ne s'étant pas déformées selon cet axe (figure 4.4). La frontière est à vitesse nulle et non à déplacement nul, puisque les déplacements n'interviennent pas dans la résolution des équations dans Flac3D. Avec des déplacements initiaux nuls à chaque noeud, fixer une vitesse nulle équivaut à fixer un déplacement nul. À l'ouest, la présence des Vosges aux abords du modèle se traduit par une troisième frontière à vitesse nulle. À la base du modèle, une frontière à vitesse nulle est aussi imposée. À l'est, la frontière est en pression. Au niveau du diapir, la contrainte appliquée vaut  $\rho_{sel}gz$ . Dans Flac3D, en imposant une contrainte sur une surface, le logiciel convertit la contrainte en force appliquée aux noeuds. Dans l'autre partie, la contrainte sélectionnée est de  $0.95\rho_{sel}gz$ , soit une contrainte inférieure à la contrainte horizontale des terrains à l'équilibre. Le choix de cette contrainte appliquée est expliquée ultérieurement.

Toutefois, le choix de ces conditions aux limites impose quelques ajustements du modèle. Afin que les frontières en vitesse nulle n'impactent pas directement la zone d'étude, les limites sont placées à 12 km. Pour combler cet espace, le niveau des géomatériaux est prolongé jusqu'à la nouvelle limite, toujours avec des cubes de 100 m d'arêtes. Il ne s'agit donc pas d'une extension de la zone modélisée, mais d'une méthode numérique pour éloigner l'effet des limites.

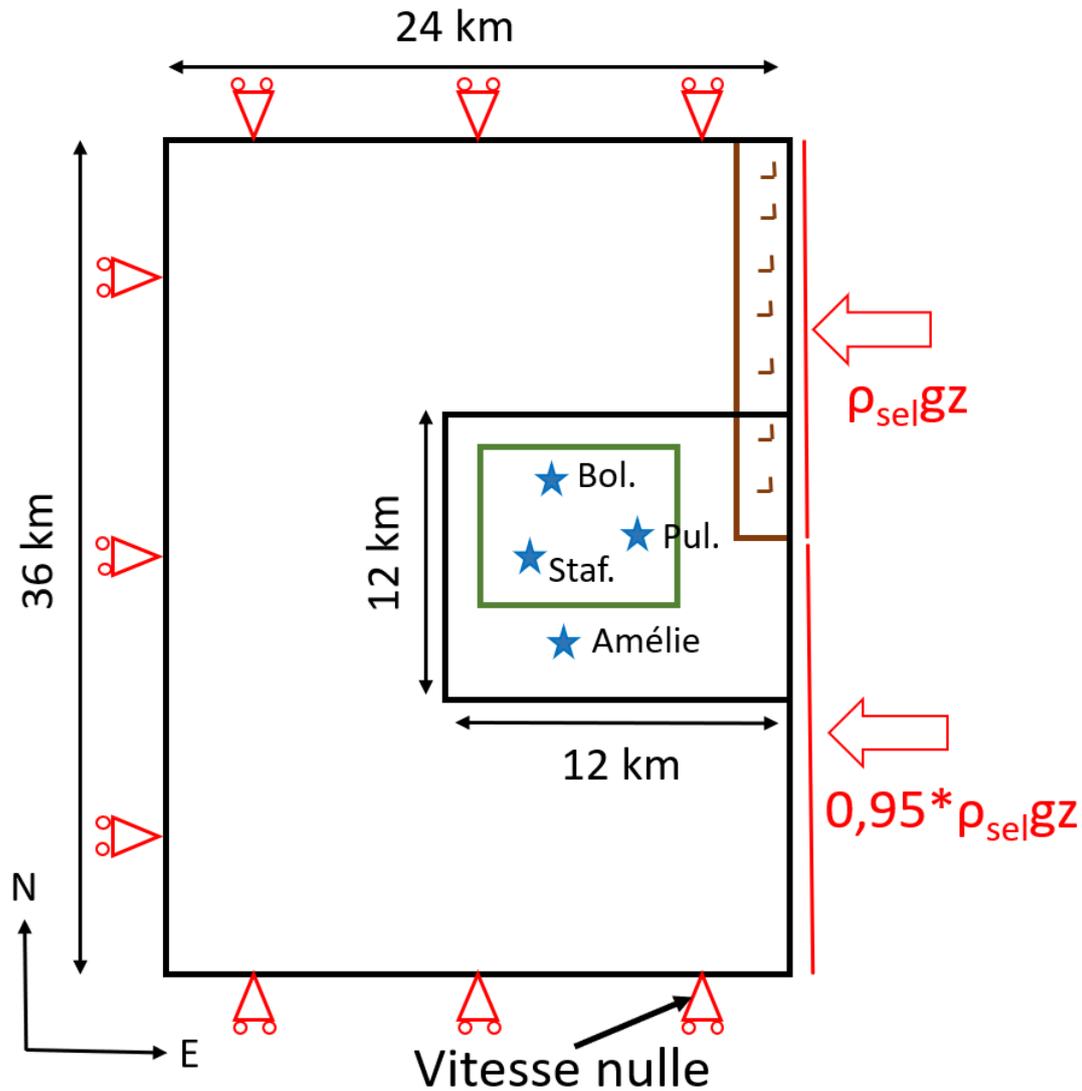


FIGURE 4.4 – Schéma des conditions aux limites du modèle. Le carré noir central indique le modèle initial et le rectangle vert, le modèle utilisé dans le second volet. Les frontières sont éloignées de 12 km lorsque la vitesse nulle est imposée. Le diapir est indiqué en marron. Les étoiles indiquent les points d'intérêt du modèle (Bol. : Bollwiller ; Pul. : Pulversheim ; Staf. : Staffelfelden).

### 4.3.4 Champ de contraintes pré-exploitation

#### 4.3.4.1 Points de contrôle

Le Fossé Rhénan a fait l'objet de nombreuses observations du champ de contraintes. Certaines de ces observations sont localisées dans le bassin potassique alsacien. L'ensemble des observations retrouvées à ce jour est d'abord résumé. Ces informations servent ensuite de points de validation dans la modélisation.

Baumann and Illies (1983) synthétisent l'orientation des contraintes horizontales le long du Fossé Rhénan afin d'étudier l'impact de la poussée alpine sur l'orientation des contraintes. La méthode dite *doorstopper* est appliquée pour déterminer l'orientation des contraintes (Leeman, 1964), consistant à mesurer la déformation à l'intérieur de petits forages puis d'en

déduire les contraintes par la loi de Hooke. Les mesures sont réalisées dans du calcaire provenant du Dévonien et l'une des mesures se situe juste au sud des concessions minières. Les résultats indiquent que la contrainte horizontale maximale  $\sigma_H$  est selon l'axe Nord-Sud et la contrainte horizontale minimale  $\sigma_h$ , selon l'axe Est-Ouest. Larroque (1987) a aussi étudié les contraintes dans les séries salifères du bassin de Mulhouse et leurs évolutions au cours des temps géologiques. De l'observation des microfailles ressort une contrainte  $\sigma_h$  selon l'axe Est-Ouest. La déduction des tenseurs de contraintes à l'origine des microfailles des macles de calcite laisse penser à un changement d'orientation de la contrainte principale maximale  $\sigma_1$ . Dans le sud du Fossé Rhénan, aux abords des Alpes,  $\sigma_1$  est distensive (horizontale), orientée vers le nord, alors que plus au nord,  $\sigma_1$  est compressive (verticale). Le bassin potassique constitue la zone de transition, conduisant à  $\sigma_H \approx \sigma_v$ . À la même époque, les MDPA commencent des essais pour extraire la potasse par dissolution dans les couches profondes. Un test conduit à grande échelle, supposé aux alentours des puits Amélie et Max, aboutit à la création d'une fracture hydraulique verticale orientée selon l'axe Nord-Sud. Les fractures hydrauliques se propageant perpendiculairement à la contrainte principale minimale,  $\sigma_3$  est horizontale et orientée Est-Ouest. L'orientation de la fracture hydraulique renseigne sans ambiguïté sur l'orientation de  $\sigma_3$ , et ainsi l'état anisotropique du champ de contraintes (Wawersik and Stone, 1989). En complément, des estimations de  $\sigma_3$  basées sur des mesures *in situ* sont réalisées dans des galeries à 800 m de profondeur et suffisamment éloignées de l'exploitation pour négliger l'effet de cette dernière sur le champ de contraintes. Pour chaque essai de fracturation hydraulique,  $\sigma_3$  est estimée à partir de la contrainte normale à la fracture, de la pression de fermeture instantanée et de la pression de réouverture mesurée. La contrainte verticale est calculée avec le poids des terrains. Les résultats montrent que le rapport entre  $\sigma_v$  et  $\sigma_3$  varie entre 0.84 dans les couches de marnes anhydritiques et 1.0 dans les couches de sel (Cornet and Burlet, 1992; Cornet et al., 1988). L'hypothèse de contraintes horizontales isostatiques n'est pas viable lorsque l'ensemble des couches est pris en compte. L'ensemble de ses observations sont synthétisées dans le [tableau 4.7](#)

Ainsi, de l'ensemble de ces observations, la modélisation du champ de contraintes doit respecter deux points essentiels aux alentours du puits Amélie à 800 m de profondeur :  $\sigma_3$  horizontale et orientée Est-Ouest, et le ratio entre  $\sigma_3$  et  $\sigma_v$  compris entre 0.9 et 0.95.

| Auteurs                   | Données                                      | Déduction  |
|---------------------------|--|--|
| Baumann and Illies (1983) | Déformation de forages                       | $\sigma_H$ orientée selon l'axe Nord-Sud<br>$\sigma_h$ orientée selon l'axe Est-Ouest                  |
| Larroque (1987)           | Microfailles d'éléments géologiques          | $\sigma_h$ selon l'axe Est-Ouest<br>$\sigma_H \approx \sigma_v$  |
| Cornet and Burlet (1992)  | Fractures hydrauliques à 800 m de profondeur | $\sigma_3/\sigma_v = 0.84$ dans les bancs de marnes<br>$\sigma_3/\sigma_v = 1.0$ dans les bancs de sel |

TABLE 4.7 – Synthèse des différentes observations concernant le champ de contraintes dans le bassin potassique alsacien.

### 4.3.4.2 Résultats

Deux aspects sont abordés dans cette section. D'abord, la vérification que le modèle satisfait les différentes observations précédemment résumées. Puis, les contraintes aux abords du rectangle vert ([figure 4.4](#)) sont déterminées. La modélisation de l'effet minier est par la suite conduite sur ce volume restreint et l'intérêt de son utilisation est double. Le nombre de cube dans le modèle est réduit, passant de plus d'un million à quelques dizaines de milliers, et les conditions aux limites sont exactes, devenant des forces appliquées aux noeuds.

Pour modéliser le champ de contraintes, tous les géomatériaux sont définis élastiques avec leurs propriétés mécaniques asymptotiques respectives ([tableau 4.4](#)). Puis, la pesanteur est appliquée et le système est mis à l'équilibre sous le seul poids des terrains. Dans ces conditions, le ratio  $R_{eq}$  entre les contraintes horizontales et la contrainte verticale dépend à la fois des coefficients de Poisson et des modules d'Young des géomatériaux anisotropes ([Amadei and Pan, 1992](#)). Néanmoins, la modélisation ainsi réalisée n'est pas oedométrique, les géomatériaux se déformant (extension) selon l'axe Est-Ouest. Cette déformation est permise grâce à la contrainte appliquée sur le bord Est en dehors du diapir, inférieure au produit entre  $R_{eq}$  et la contrainte verticale. Par cette astuce, il est alors possible d'orienter préférentiellement les contraintes horizontales à l'équilibre selon la direction souhaitée. La valeur de la contrainte appliquée est par la suite fixée de telle sorte à satisfaire les observations concernant le ratio entre  $\sigma_v$  et  $\sigma_3$ .

Pour s'assurer de la validité du champ de contraintes obtenu, une coupe horizontale au niveau du puits Amélie, à 800 m de profondeur, et de ses alentours est réalisée. L'orientation de  $\sigma_3$  est en accord avec les observations ([figure 4.5](#)). Puis, des profils horizontaux du ratio entre  $\sigma_3$  et  $\sigma_v$  sont produits. Les valeurs du ratio sont dans l'intervalle désiré ([figure 4.6](#)). Le modèle obtenu est ainsi validé.

Ensuite, le modèle est découpé pour ne garder que la zone couverte par le rectangle vert. Ce dernier a une emprise de 6.7 km selon l'axe Est-Ouest et 6.1 km selon l'axe Nord-Sud, et toujours épais de 1.5 km. Cette zone couvre les villages de Bollwiller, Pulversheim et Staffelfelden. Ce nouveau modèle a des conditions aux limites en pression. Les pressions sont déduites des contraintes des zones en bordure du modèle.

Enfin, la viabilité du procédé est vérifiée. Les pressions exercées aux bords sont définies et les contraintes du modèle sont réinitialisées. Un calcul asymptotique est de nouveau réalisé pour obtenir les contraintes et les nouvelles contraintes ainsi obtenues sont comparées à celles du modèle initial. Les termes des tenseurs de contraintes sont comparés et une similitude de l'ordre du kPa ressort de l'analyse, validant ainsi le procédé.

Ainsi, dans cette première partie, un modèle équivalent au bassin potassique alsacien a été construit. Une attention particulière a été portée au respect des différentes observations du bassin sédimentaire, conciliant réalisme et simplification. Ces étapes ont permis d'aboutir à un modèle considéré réaliste et exploité dans la seconde partie pour modéliser l'effet minier.

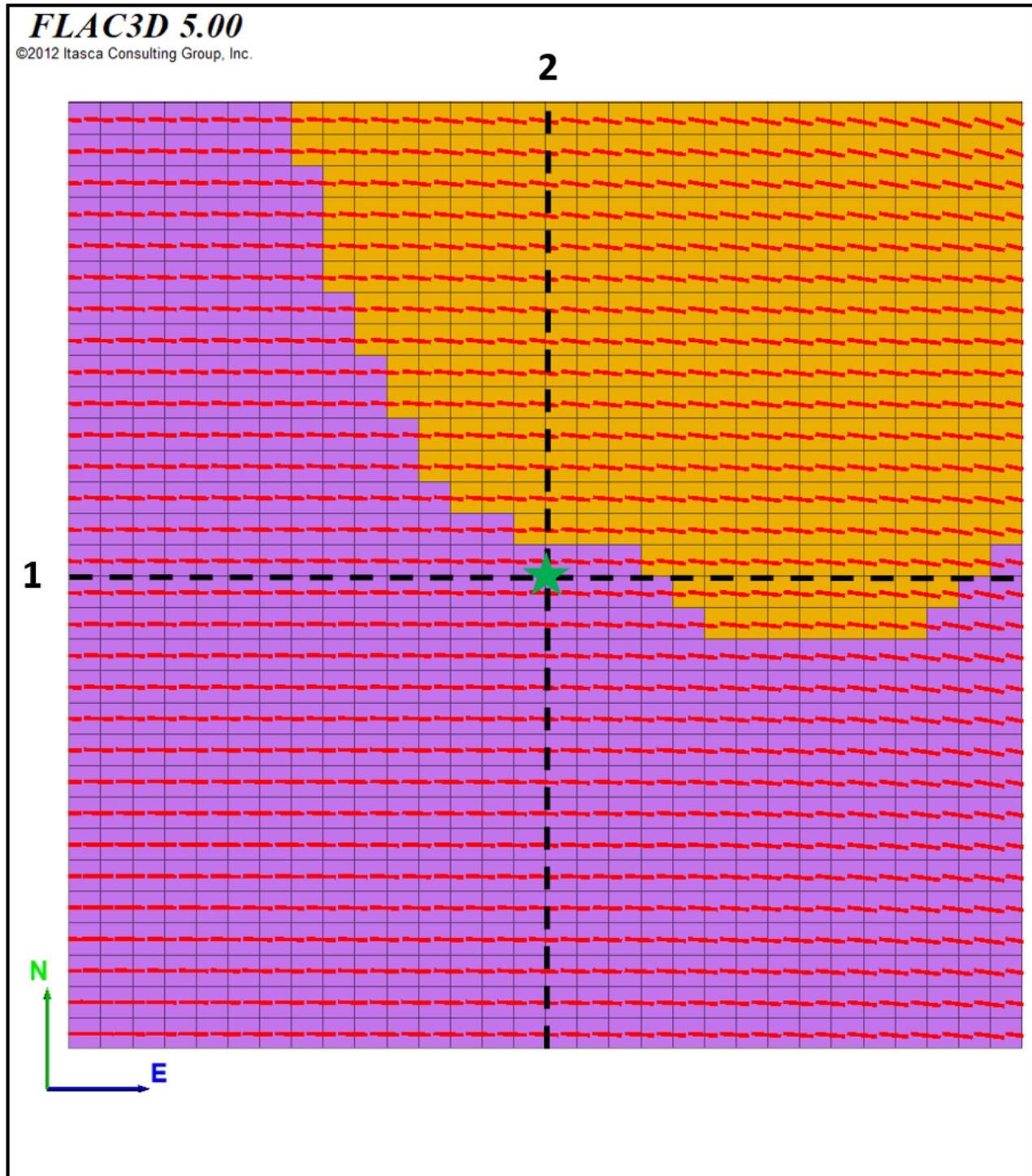


FIGURE 4.5 – Orientation de  $\sigma_3$  (en rouge) aux alentours du puits Amélie à 800 m de profondeur.  $\sigma_3$  est horizontale. L'étoile verte indique la position du puits Amélie, la zone est longue et large de 3 km. La couleur orange correspond au géomatériau IV et la couleur violette, au géomatériau V. Les lignes pointillées 1 et 2 représentent les profils le long desquels le ratio entre  $\sigma_h$  et  $\sigma_v$  est calculé.

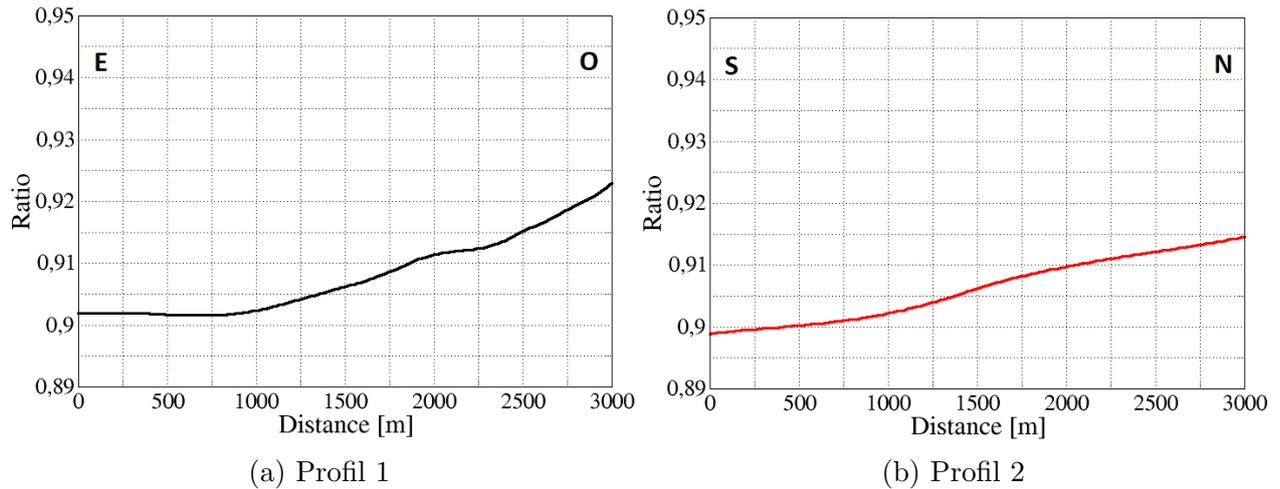


FIGURE 4.6 – Valeur du ratio entre  $\sigma_h$  et  $\sigma_v$  le long des profils 1 (gauche) et 2 (droite).

## 4.4 Modélisation de l'effet minier

Dans cette seconde partie, les diverses observations et modélisations menées jusqu'à présent sont combinées. Dans un premier temps, ayant à disposition le champ de contraintes ambiant, les paramètres de la loi de Norton sont adaptés aux mesures de déformations horizontales de la galerie 11 obtenues par la répétition de campagnes d'acquisitions lidar. Ensuite, le géomatériau équivalent associé aux matériaux foudroyés ainsi que le processus retenu pour modéliser l'effet minier sont introduits. Dans un dernier temps, les déplacements de surface modélisés sont comparés aux résultats InSAR et, l'état et l'évolution des vides miniers sont estimés à certains secteurs clés.

### 4.4.1 Adaptation de la loi de Norton aux mesures lidar

Suite aux diverses études concernant le site de stockage, plusieurs paramètres de la loi de Norton (4.11) sont proposés. En laboratoire, Ghoreychi (1991b) suggère une valeur de  $0.005 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$  pour  $A_s$ , la vitesse de référence, alors qu'Itasca et l'INERIS avancent des valeurs de  $0.015$  et  $0.022 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$ , respectivement, pour retrouver les déformations mesurées *in situ*. En laboratoire, la déformation de deux échantillons de sel est suivie sur plusieurs mois pour caler les paramètres. Pour le premier échantillon, la température est constante à 293 K et la contrainte déviatorique augmente par palier tous les deux mois. Les paliers sont progressifs, commençant à 5 MPa puis évoluant à 10, 15, 20 et enfin 10 MPa. Le dernier palier a pour but de vérifier que les propriétés du sel sont conservées malgré la déformation continue. L'expérimentation dure dix mois environ. Pour le second échantillon, la contrainte déviatorique est fixée à 10 MPa et la température progresse aussi par palier tous les deux mois. La température croît de 50 K à chaque nouveau palier, passant de 298 K à 348 K puis 398 K. Cette seconde expérimentation dure sept mois environ.

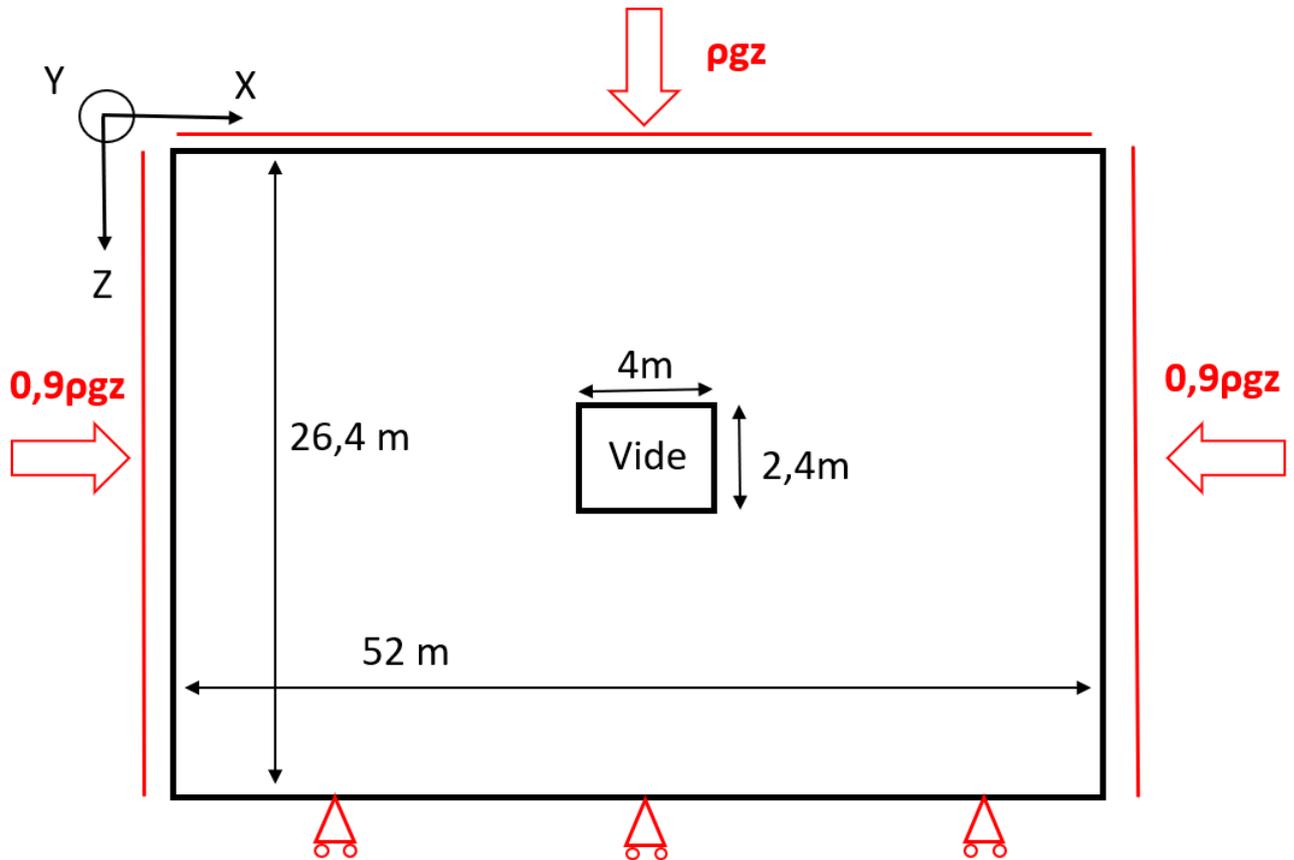


FIGURE 4.7 – Schéma du modèle utilisé pour l'interprétation des campagnes lidar. Le vide est rempli de géomatériau IV lors de l'équilibrage des contraintes du modèle. Les bords X du modèle sont à une distance de 6 fois la largeur de la galerie. Pour les bords Z, cette distance est de 5 fois la hauteur.

*In situ*, la convergence des galeries du site de stockage est surveillée de 1999 à 2013. Les mesures sont uniquement opérées aux extrémités des galeries et toutes les galeries sont orientées dans la même direction, N040°E comme la galerie 12. Toutefois, la couverture temporelle n'est pas homogène entre chaque galerie. Les contraintes horizontales utilisées pour reproduire les mesures sont isotropes.

Dans cette section, seules les observations de la galerie 11 sont utilisées. Concernant la galerie 12, pour expliquer les observations, les contraintes sont supposées hétérogènes le long de la galerie même si la raison justifiant une telle hétérogénéité de contrainte n'est pas cernée. Dans tous les cas, l'origine du gradient de déformation observé est indéterminée. Pour la galerie 11, il est supposé que le champ de contraintes à l'origine des déformations est le champ de contraintes ambiant du bassin sédimentaire. Pour modéliser l'effet de la convergence d'une galerie, un parallélépipède rectangle haut de 26.4 m, large de 24 m et long de 52 m est dessiné. Ce parallélépipède est constitué d'éléments parallélépipédiques longs et larges de 0.8 m, et hauts de 0.6 m, pour avoir quatre zones et trois noeuds en hauteur dans la galerie.

Dans un premier temps, le modèle est initialisé. Les propriétés mécaniques asymptotiques équivalentes du géomatériau IV sont attribuées à tous les éléments (tableau 4.4). Les condi-

tions aux limites sont aussi définies (figure 4.7). À la base du modèle, les vitesses  $v_z$  sont fixées nulles et au toit du modèle, une contrainte de  $\rho_{eq}gz$  est exercée, correspondant au poids des terrains et avec  $\rho_{eq}$  la masse volumique équivalente des terrains, soit  $2.35 \text{ g.cm}^{-3}$ . Selon l'axe X, approximativement l'axe Est-Ouest et l'orientation de  $\sigma_3$ , la frontière est aussi en pression et la contrainte appliquée est de  $0.9\rho_{eq}gz$ . La valeur du coefficient provient du champ de contraintes modélisé au Sud-Est du puits Amélie (figure 4.6), non loin de la position des galeries de mesure. Selon l'axe Y, approximativement l'axe Nord-Sud, les vitesses sont fixées nulles. Un calcul asymptotique pour équilibrer les contraintes est réalisé.

Dans un second temps, la fermeture de la galerie est modélisée. Une galerie au centre du modèle est excavée, haute de 2.4 m, large de 4 m et longue de 24 m. Une loi de Norton (4.11) est associée aux éléments avec différentes valeurs de  $A_s$ . La température est fixée à 298 K, valeur provenant des mesures faites lors des campagnes lidar. Les paramètres B et K sont laissés à 4 700 K et 4.0, respectivement. Une période de vingt ans est d'abord simulée, soit environ le temps entre la création de la galerie et le début des campagnes d'acquisitions. Puis, la simulation est reconduite sur une période de deux ans. La déformation suivie est celle des noeuds centraux de la galerie à 0.6, 1.2 et 1.8 m de hauteur. Ces hauteurs correspondent approximativement à celles des réflecteurs installés dans les galeries souterraines. Il a été également vérifié que les bords X et Y du modèle n'impactent pas les valeurs obtenues. Ensuite, les résultats du modèle sont comparés aux mesures, pour les arches 1 à 4 et 6 à 8, toutes les arches sauf la centrale. Pour chaque comparaison, les mesures sont associées à la paire de noeuds équivalente pour différentes valeurs de  $A_s$ . Les comparaisons pour les arches 3 et 7 de la galerie 11 sont présentées dans la figure 4.8. Enfin, pour chacune des comparaisons, un coefficient de détermination est calculé pour attester ou non de la qualité de la ressemblance entre les deux jeux de données. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau 4.8. Les résultats concernant les figures 4.8a, b, c, d, e et f ainsi que la valeur moyenne issue des vingt-et-une comparaisons possibles, trois pour chacune des sept arches retenues, sont présentés.

| Réflecteurs \ $A_s$ | 0.004 j <sup>-1</sup> | 0.005 j <sup>-1</sup> | 0.006 j <sup>-1</sup> |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Arche 3 - haut      | 0.51                  | 0.85                  | 0.89                  |
| Arche 3 - milieu    | 0.50                  | 0.83                  | 0.97                  |
| Arche 3 - bas       | 0.47                  | 0.82                  | 0.96                  |
| Arche 7 - haut      | 0.37                  | 0.0                   | 0.0                   |
| Arche 7 - milieu    | 0.48                  | 0.56                  | 0.07                  |
| Arche 7 - bas       | 0.86                  | 0.46                  | 0.0                   |
| Moyenne             | 0.54                  | 0.62                  | 0.51                  |

TABLE 4.8 – Déterminants *R-square* issus des comparaisons entre le modèle et les mesures.

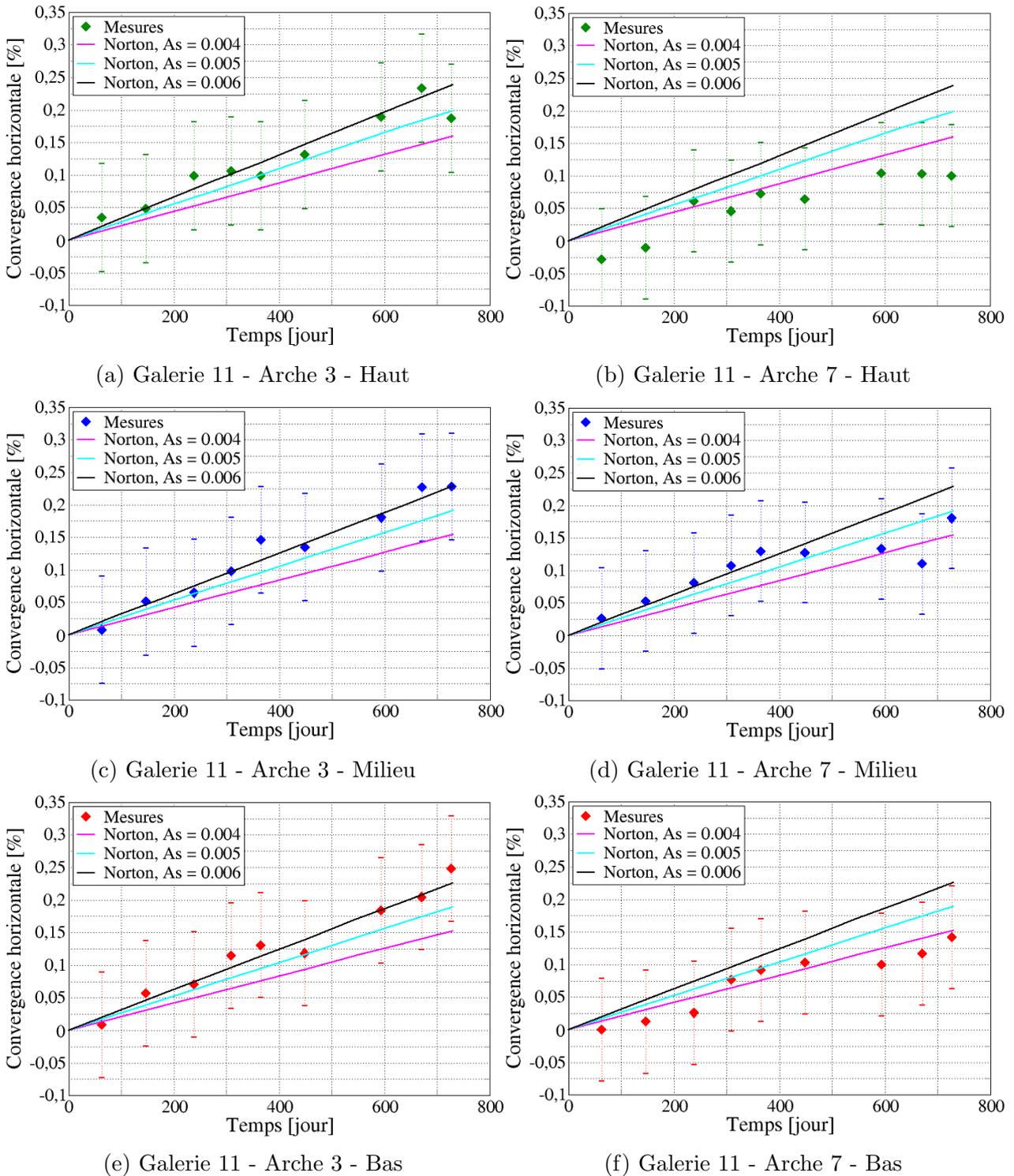


FIGURE 4.8 – Comparaison entre les convergences horizontales mesurées lors des campagnes lidar et celles modélisées pour différentes valeurs de  $A_s$ . La série temporelle "Bas" est associée à la paire de réflecteurs située à un quart de hauteur, "Milieu" à celle à mi-hauteur et "Haut" à celle à trois quarts de hauteur.

Sur l'ensemble des comparaisons, la valeur de  $0.005 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$  semble satisfaire au mieux l'ensemble des observations ([tableau 4.8](#)). L'estimation issue des expériences en laboratoire est ainsi retrouvée.

#### 4.4.2 La modélisation des matériaux foudroyés

Dans cette section, un nouveau géomatériau associé aux matériaux foudroyés est introduit. Puis, ses propriétés mécaniques sont résumées avant d'amener la loi de comportement retenue pour l'étude. Enfin, le protocole de modélisation pour modéliser la compaction de ces matériaux est détaillé.

##### 4.4.2.1 Propriétés mécaniques équivalentes des matériaux foudroyés

Pour modéliser les matériaux foudroyés, un nouveau géomatériau équivalent est défini. Ce géomatériau a quelques caractéristiques précises. Comme présenté dans l'introduction générale, ce géomatériau devient plus raide au fur et à mesure qu'il se déforme (compacte). Aussi, il voit sa masse volumique augmenter. Ce géomatériau a donc des propriétés évolutives et deux types de paramètres lui sont associés : initiaux et finaux. Les premiers sont associés au géomatériau avant que la compaction ne débute et les seconds sont atteints lorsque la compaction est totale. Les paramètres retenus sont présentés dans le [tableau 4.9](#). Pour le module d'Young initial, une valeur issue de tests réalisés sur des matériaux équivalents est retenue ([Pappas and Mark, 1993](#)). Le coefficient de Poisson est supposé nul initialement, les matériaux foudroyés ne se déformant pas latéralement.

Toutefois, un problème d'échelle se manifeste. Les hauteurs extraites n'excèdent pas 4 m et la hauteur de la zone foudroyée est fixée à deux fois et demie la hauteur extraite, valeur retenue lors des précédentes études et proche de la borne inférieure des estimations ([Karmis et al., 1983](#)). Cette valeur est déduite du coefficient de foisonnement, estimée à 1.4 pour l'exploitation des MDPA. La hauteur cumulée est donc de 14 m dans ce cas, soit sept fois plus petite que la taille des cubes du modèle. Or, les valeurs initiales proposées ne sont valables que sur les 14 m. Les valeurs sont donc à homogénéiser à l'ensemble du cube.

| Valeurs             | $\nu$ | $E$ [MPa]       | $K$ [MPa]         | $G$ [MPa]        | $\rho$ [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] |
|---------------------|-------|-----------------|-------------------|------------------|--|
| Initiales           | 0.0   | 5               | 1.7               | 2.5              | 1.66                                       |
| Initiales homogènes | 0.0   | 35.7            | 11.9              | 17.9             | 2.24                                       |
| Finales             | 0.35  | $20 \cdot 10^3$ | $22.2 \cdot 10^3$ | $7.4 \cdot 10^3$ | 2.33                                       |

TABLE 4.9 – **Résumé des propriétés mécaniques initiales et finales des matériaux foudroyés.** Les propriétés mécaniques initiales sont associées au géomatériau avant que la compaction ne débute et les propriétés mécaniques finales sont atteintes lorsque la compaction est totale. Les propriétés initiales corrigées sont celles mises à l'échelle d'un cube de 100 m à partir des essais oedométriques.

Pour déterminer ces nouvelles valeurs, une modélisation en condition oedométrique sans pesanteur est réalisée. Une modélisation en condition oedométrique signifie que les déformations latérales sont fixées nulles. Un cube de 98 m d'arêtes est généré, constitué d'éléments cubiques de 14 m. Aux éléments se situant à mi-hauteur du cube, les propriétés initiales (tableau 4.9) leur sont données alors qu'aux autres, ce sont les propriétés asymptotiques du géomatériau IV (tableau 4.4). Les vitesses dans la direction X sur les faces X, Y sur les faces Y et Z à la base du modèle sont fixées nulles. À la surface, une contrainte selon Z de 1 MPa est appliquée et le système est mis à l'équilibre. Un cube équivalent homogène de 100 m doit reproduire le déplacement vertical obtenu par ce modèle. Grâce à ces résultats le module d'Young  $E_{eq}$  et le module d'incompressibilité  $K_{eq}$  équivalents sont déterminés avec les formules 4.14 et 4.15 :

$$\sigma_z = E_{eq}\epsilon_z = E_{eq}\frac{d_z}{l} \Leftrightarrow E_{eq} = \frac{\sigma_z l}{d_z} \quad (4.14)$$

$$\sigma_v = K_{eq}\epsilon_v = K_{eq}\epsilon_z = K_{eq}\frac{d_z}{l} \Leftrightarrow K_{eq} = \frac{\sigma_z l}{3d_z} \quad (4.15)$$

avec  $d_z$  le déplacement selon z et  $l$ , la dimension du cube. La contrainte volumétrique utilisée est celle de la zone centrale du modèle oedométrique, soit un tiers de la contrainte appliquée en surface. Le déplacement de surface modélisé est de 2.80 m. Les paramètres équivalents ainsi obtenus sont inclus dans le tableau 4.9. La masse volumique initiale est aussi modifiée, le vide engendré par l'extraction étant distribué sur 100 m.

Par ailleurs, les matériaux foudroyés provenant des dépôts supérieurs, leur composition est similaire à celle retenue pour le géomatériau IV compte tenu de la stratigraphie. Ainsi, le module d'Young et le coefficient de Poisson final (tableau 4.9) sont des combinaisons linéaires des modules d'Young et des coefficients de Poisson asymptotiques des éléments de base (MAS) constituant le géomatériau IV (tableau 4.4). À l'échelle du cube de 100 m, le plan d'anisotropie n'est plus considéré, ayant disparu suite au foudroyage.

#### 4.4.2.2 Loi de comportement des matériaux foudroyés

Dans ces travaux de thèse, une loi de comportement empirique mise au point par [Sjaardema and Krieg \(1987\)](#) pour l'étude de la compaction de sels broyés, puis adaptée par [Callahan and DeVries \(1991\)](#) avec l'ajout d'un terme déviatorique, est utilisée. Cette loi est implémentée dans le logiciel Flac3D sous le nom de *Crushed-salt*. Dans ce modèle, les tenseurs du taux de variation de contrainte et déformation élastique sont reliés par la loi de Hooke (4.16) :

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2G \left[ \dot{\epsilon}_{ij}^e - \frac{\dot{\epsilon}_{kk}^e}{3} \delta_{ij} \right] + K \dot{\epsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \quad (4.16)$$

où

$$K = K_f e^{K_i(\rho - \rho_f)} \quad (4.17)$$

$$G = G_f e^{G_i(\rho - \rho_f)} \quad (4.18)$$

avec  $K_f$ ,  $G_f$  et  $\rho_f$  les propriétés finales des matériaux foudroyés (tableau 4.9),  $K_i$  et  $G_i$  les modules initiaux (homogénéisés, tableau 4.9).

Les relations 4.17 et 4.18 sont empiriques ; où  $K$  et  $G$  évoluent progressivement avec la densité, associée à l'avancée de la compaction. Le tenseur du taux de déformation élastique  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$  s'exprime aussi en fonction des tenseurs du taux total de déformation  $\dot{\epsilon}_{ij}$ , de compaction  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$  et de fluage  $\dot{\epsilon}_{ij}^v$  (4.19) :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^c - \dot{\epsilon}_{ij}^v \quad (4.19)$$

où

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \frac{B_0}{\rho} \left[ 1 - e^{-B_1 \sigma} \right] e^{B_2 \rho} \left[ \frac{\delta_{ij}}{3} - \frac{\sigma_{ik}^d \delta_{kj}}{\bar{\sigma}} \right] \quad (4.20)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^v = A_s e^{-\frac{B}{T}} \left( \frac{\rho_f \bar{\sigma}}{\rho \sigma_0} \right)^n \quad (4.21)$$

avec  $\sigma_{ik}^d$  le tenseur des contraintes déviatoriques,  $\sigma = \sigma_{kk}/3$  la contrainte moyenne, et  $B_0$ ,  $B_1$  et  $B_2$  des paramètres déterminés expérimentalement.  $B_0$  et  $B_2$  sont en lien avec la vitesse de variation de masse volumique du matériau en fonction de sa masse volumique. Il s'agit des paramètres de la droite reliant le logarithme de la vitesse de variation de masse volumique à la masse volumique. Leurs valeurs expérimentales sont conservées dans l'étude, soit  $1.3 \cdot 10^5 \text{ g.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  pour  $B_0$  et  $-17.3 \text{ g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$  pour  $B_2$ .  $B_1$  dépend de la vitesse de variation de masse volumique en fonction de la pression de confinement lors des tests. Suite aux essais de modélisation, ce paramètre est modifié, passant de  $8.2 \cdot 10^{-7}$  à  $1.7 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ . Dans le cas expérimental, la vitesse de variation volumétrique à 1.72 MPa est égale à 45% de celle à 2.52 MPa. Dans ces travaux, la première représenterait 64% de la seconde. Cette valeur reste raisonnable et traduit une augmentation plus faible de la vitesse de variation de masse volumique avec la pression de confinement.

Dans cette thèse,  $\dot{\epsilon}_{ij}^v$  suit une loi similaire à celle de Norton. Les paramètres  $A_s$  et  $B$  utilisés sont les mêmes que ceux retenus pour le sel (tableau 4.6).

Dans Flac3D, les équations incrémentales contrôlant la déformation volumétrique sont linéarisées et résolues, fournissant  $\dot{\epsilon}_{ij}$ .  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$  et  $\dot{\epsilon}_{ij}^v$  sont ensuite calculés, permettant d'obtenir  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$  et de mettre à jour  $\dot{\sigma}_{ij}$ .

### 4.4.3 Protocole de modélisation et prise en compte de la température

Pour reproduire l'effet de la compaction des matériaux foudroyés en surface, un processus relativement simple est appliqué. Les zones équivalentes aux secteurs exploités sont d'abord dessinées avec des cubes de 100 m. Le pendage des secteurs exploités n'est ainsi pas reproduit. Ces dessins concernent les exploitations de 1990 à 2001 aux alentours de Bollwiller et 1987 à 1997 aux environs de Pulversheim. Ensuite, les propriétés mécaniques asymptotiques sont

remplacées par les propriétés instantanées (tableau 4.4). La permutation des paramètres se justifie par la perturbation induite par l'extraction sur une courte échelle de temps. La loi de Norton (4.11) précédemment introduite est associée aux géomatériaux IV et V. Enfin, à défaut de connaître la progression de l'exploitation au cours de l'année, la modélisation des exploitations se fait à l'échelle annuelle. Les secteurs sont tour à tour excavés puis immédiatement remplacés par le géomatériau équivalent aux matériaux foudroyés. Cette excavation par secteur signifie que l'extraction d'un secteur se fait d'un seul coup et au même moment. Une simulation d'une période d'un an sépare chaque excavation (figure 4.9). L'intérêt de l'excavation est d'annuler les contraintes présentes dans les zones. Ces contraintes se rééquilibrent par la suite au cours de la compaction.

Les paramètres mécaniques instantanés sont conservés tant que l'extraction de la potasse en profondeur a lieu, soit jusqu'en 2001 inclus. Ces paramètres sont ensuite remplacés par les paramètres asymptotiques (figure 4.9). Après 2001, la compaction des matériaux foudroyés se poursuit lentement et aucune perturbation importante ne se produit. La loi de Norton reste associée aux géomatériaux IV et V, le coefficient de Poisson et le module d'Young sont adaptés, passant de 0.25 à 0.35 et de 28.3 GPa à 20 GPa.

Comme introduit précédemment, le comportement des matériaux salifères dépend de la température. La vitesse de fluage est d'autant plus sensible à la température que cette dernière intervient dans la partie exponentielle de l'équation. Dans le bassin potassique, le gradient géothermique est de  $0.037 \text{ K.m}^{-1}$ , soit une augmentation de 3.7 K tous les 100 m de profondeur. La température est fixée à 299 K pour les cubes situés entre 200 et 300 m de profondeur. En choisissant cette valeur, une température proche des 308 K relevée dans le site de stockage est obtenue pour des cubes entre 500 et 600 m de profondeur.

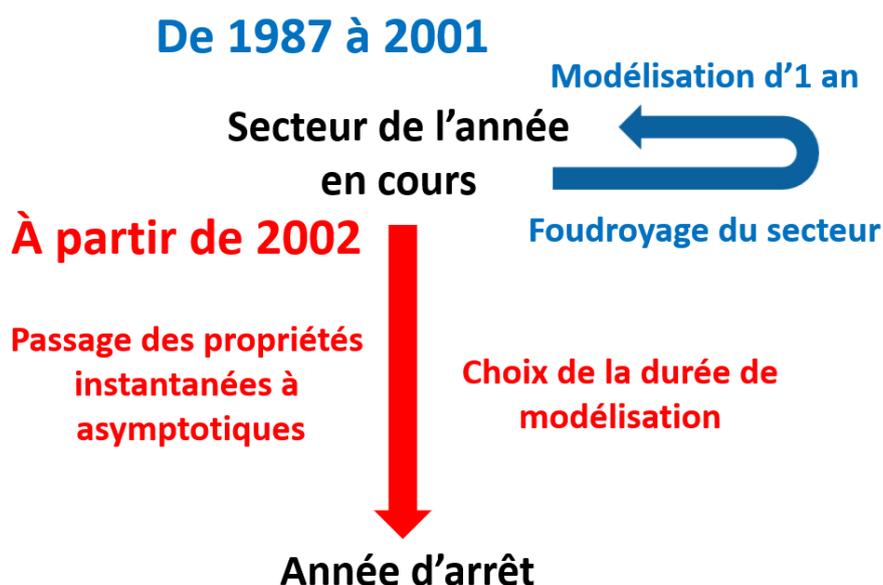


FIGURE 4.9 – Schéma du processus de modélisation du phénomène de compaction. L'étape de foudroyage consiste en l'annulation des contraintes dans les secteurs exploités, puis la loi de comportement et les propriétés mécaniques des matériaux foudroyés sont associés aux zones des secteurs exploités.

#### 4.4.4 Résultats

Dans cette section, deux résultats sont analysés : les déplacements verticaux de surface survenant lors de la phase résiduelle et l'évolution des vides miniers résiduels dans certains secteurs exploités. Les vides miniers résiduels désignent le vide généré par l'extraction de la potasse et partiellement comblé lors du foudroyage et de la compaction des matériaux foudroyés. Le premier contraint le modèle alors que le second répond à la problématique initiale.

##### 4.4.4.1 Les affaissements résiduels

Les résultats sont d'abord présentés sur la période 1996/1997 - 2001, soit la période ERS (figure 4.10). Sur cette période, le modèle est comparé à l'InSAR et au nivellement. Les trois séries temporelles sont initiées à la même hauteur à chacun des points : 2.74 m à Bollwiller 143, 2.78 m à Bollwiller 193, 1.42 m à Bollwiller 210 et 2.27 m à Pulversheim. Pour le modèle, les déplacements annuels sont équitablement répartis sur l'année, avec un point par mois.

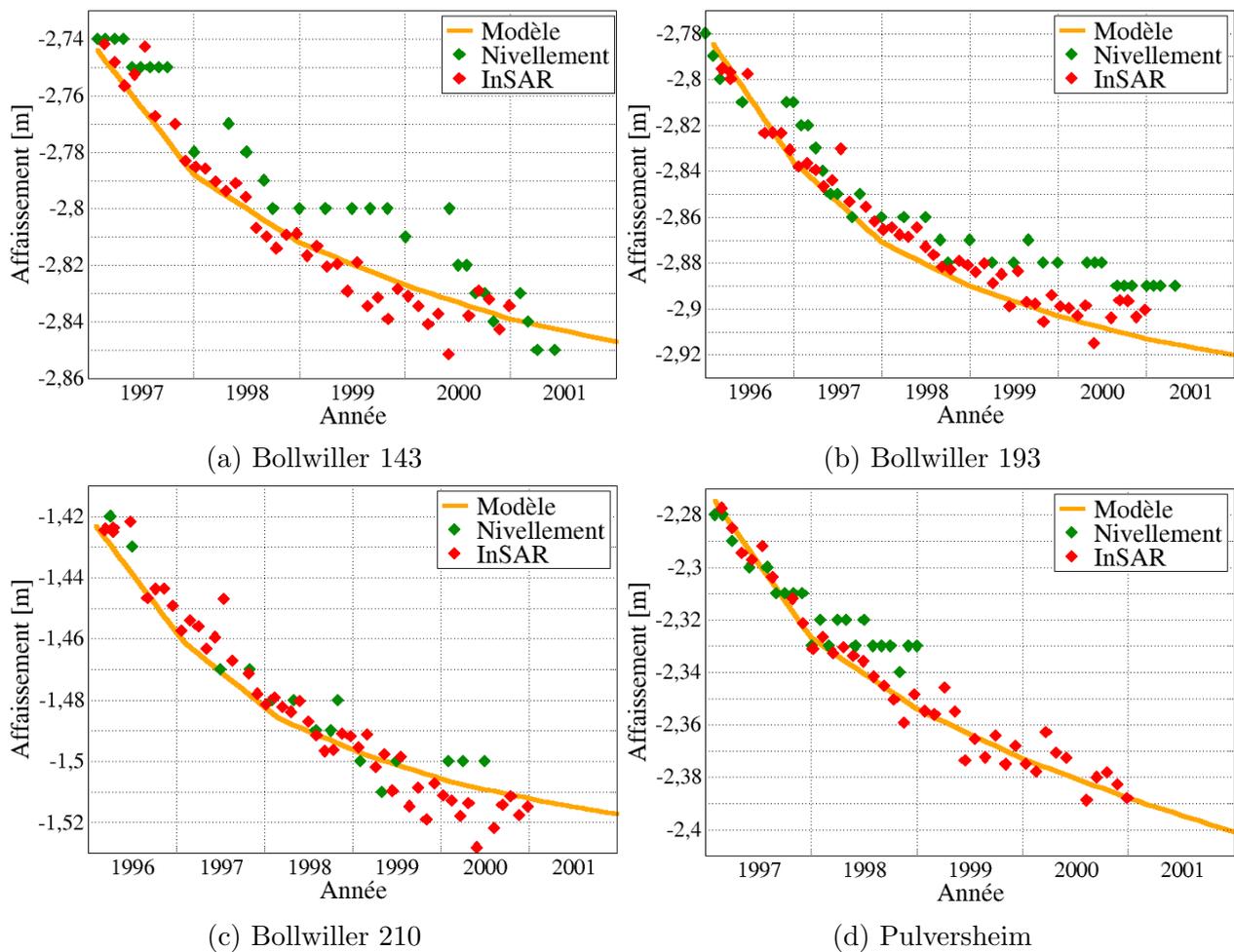


FIGURE 4.10 – Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur la période ERS.

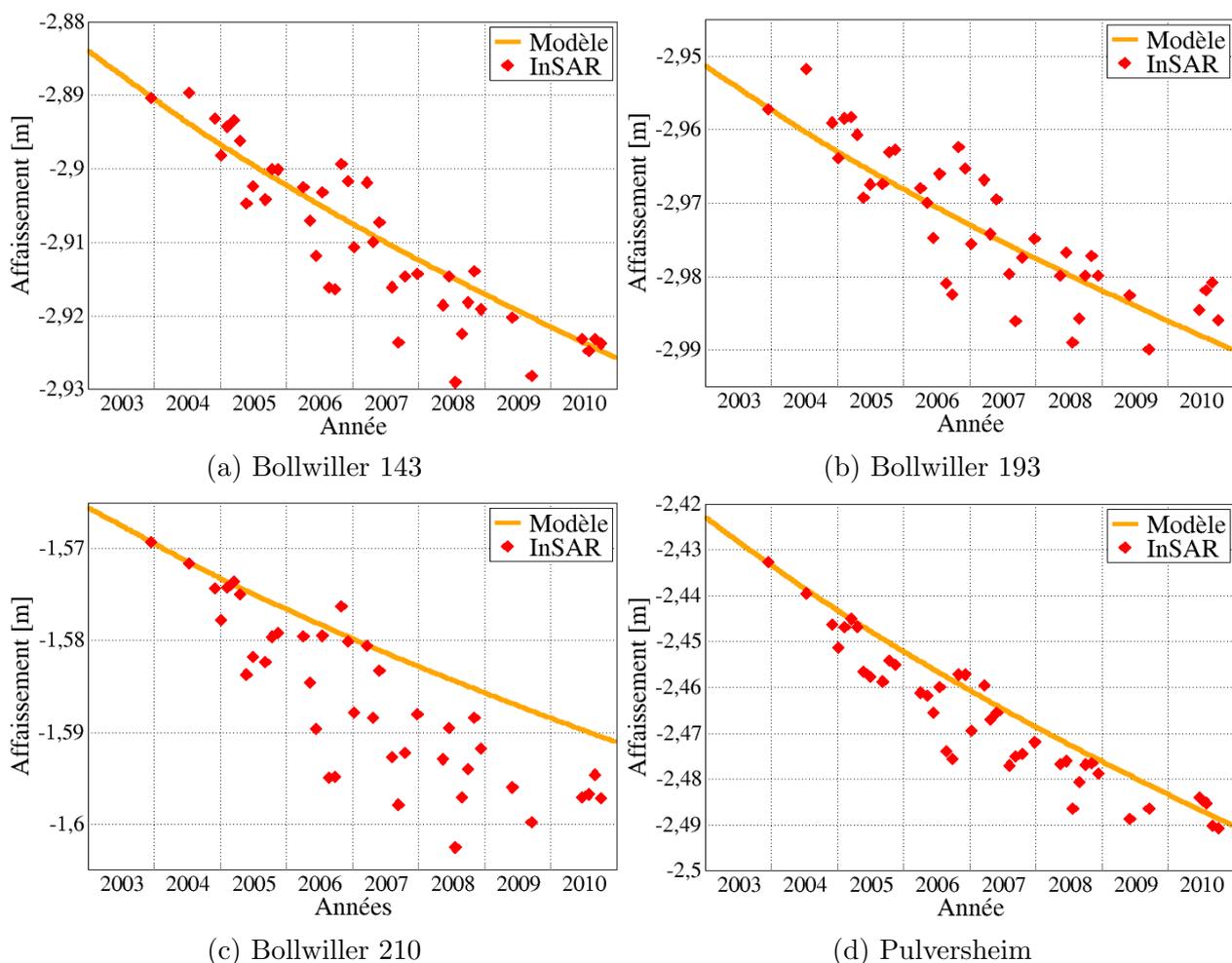


FIGURE 4.11 – Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur la période ENVISAT.

La comparaison est répétée pour les résultats ENVISAT. Les résultats du modèle sont ajustés de tel sorte à ce qu'ils passent par le premier point de la série ENVISAT (figure 4.11). Contrairement aux courbes de la période ERS, un point du modèle est obtenu quotidiennement. Pour les trois périodes d'observation, le déterminant *R-square* est calculé entre les résultats InSAR et le modèle (tableau 4.10). Les valeurs indiquent une très bonne corrélation sur la période ERS entre les résultats InSAR et le modèle, avec des déterminants supérieurs à 0.75 pour l'ensemble des points étudiés. Cette bonne corrélation s'observe aussi visuellement, les données et le modèle ayant les mêmes tendances (figure 4.10). Les résultats sur la période ENVISAT sont très bons aussi avec un déterminant compris entre 0.7 et 0.8, à l'exception de Bollwiller 210. Pour ce point, le modèle ne reproduit pas assez bien la tendance obtenue par InSAR, avec notamment un tiers du déplacement cumulé manquant (figure 4.11c). Pour les autres points, la tendance est retrouvée (figures 4.11a, b et d). Toutefois, concernant la période Sentinel-1, les valeurs calculées sont nulles, traduisant une absence de corrélation. Ce résultat s'explique par la forte dispersion des séries temporelles de Sentinel-1. Le traitement de cette dispersion est indispensable en vue d'une discussion qualitative des résultats.

En se basant sur l'analyse des comparaisons entre les déplacements modélisés et ceux issus du traitement des images radar acquises par les satellites ERS et ENVISAT, le modèle proposé reproduit les déplacements de surface sur la période 1996/1997-2010, validant ainsi le modèle.

| Points de nivellement | ERS (1996/1997-2000) | ENVISAT (2003-2010) | Sentinel-1 (2014-2018) |
|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| Bollwiller 143        | 0.86                 | 0.71                | 0                      |
| Bollwiller 193        | 0.79                 | 0.78                | 0                      |
| Bollwiller 210        | 0.81                 | 0.20                | 0                      |
| Pulversheim           | 0.96                 | 0.79                | 0                      |

TABLE 4.10 – Valeurs du déterminant  $R$ -square obtenu entre le modèle et les résultats InSAR sur les sur les périodes ERS (figure 4.10), ENVISAT (figure 4.11) et Sentinel-1.

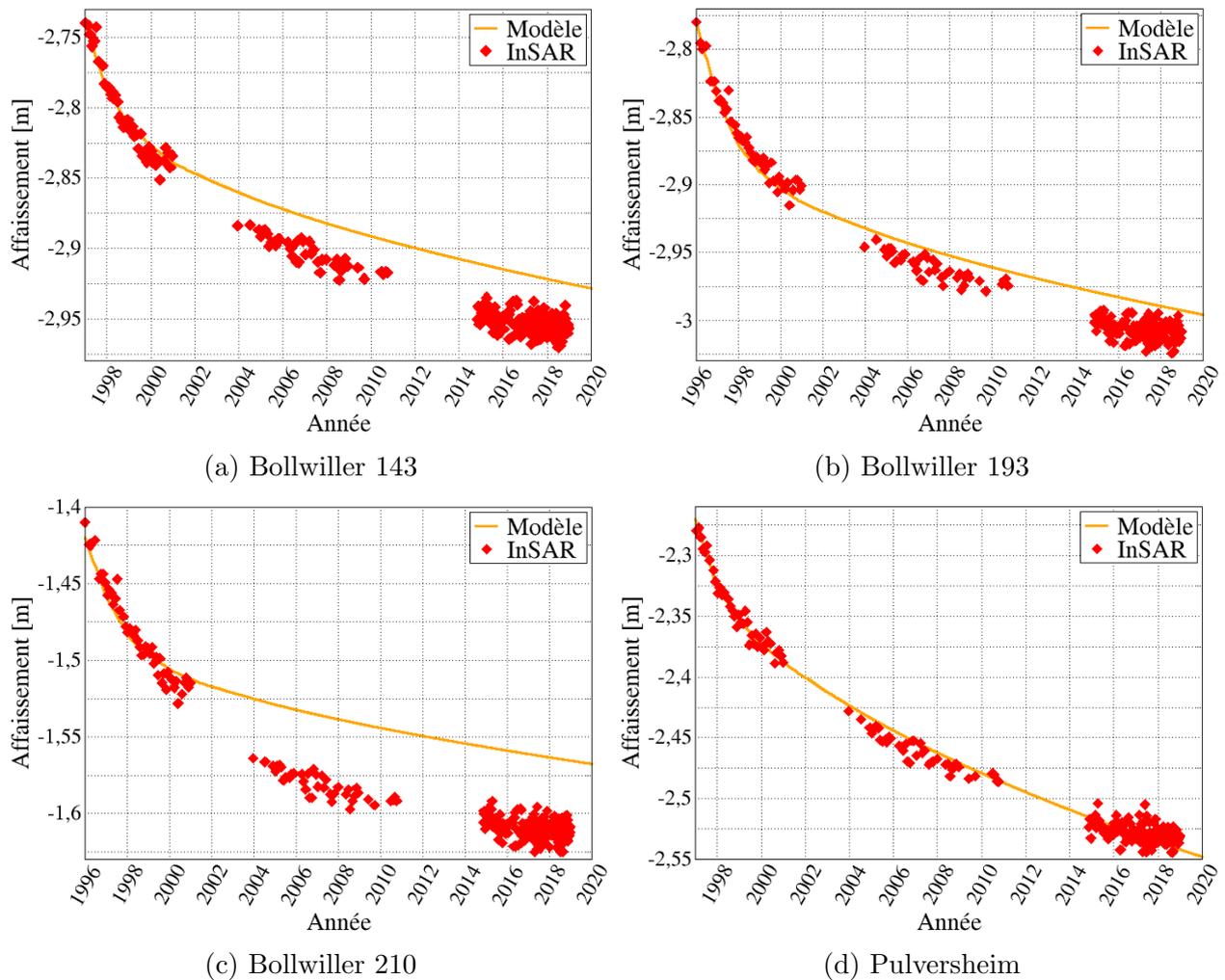


FIGURE 4.12 – Comparaison des déplacements verticaux mesurés et modélisés à Bollwiller et Pulversheim sur l'ensemble de la période d'observation InSAR.

Avant de passer au suivi des vides miniers, les séries temporelles complètes sont comparées (figure 4.12). Pour rappel, les archives provenant de chacun des satellites ne couvrent pas la même période et les résultats InSAR sont recalés par un modèle d'affaissement. Il s'agit ainsi de comparer la méthode de recalage au modèle tridimensionnel. À Pulversheim, le recalage est en accord avec le modèle (figure 4.12d). Cependant, pour les autres points, le recalage est trop important en comparaison aux prédictions du modèle (figures 4.12a, b et c). Le modèle d'affaissement prévoit plus de déplacement vertical que le modèle tridimensionnel.

Concernant Staffelfelden, environ un tiers seulement du déplacement vertical cumulé est retrouvé sur la période ERS (1995-2000) en considérant seulement le secteur exploité le plus proche. Ce résultat confirme qu'une autre origine est à rechercher pour expliquer l'amplitude des résultats InSAR à Staffelfelden.

Enfin, ces travaux de modélisation pourraient être complétés par une étude de sensibilité sur les nombreuses caractéristiques mécaniques (paramètres élastiques des géomatériaux équivalents, paramètres de la loi de comportement des matériaux foudroyés) du modèle numérique, pour savoir si une variation raisonnable de celles-ci permettrait d'améliorer l'adéquation entre le modèle et les mesures.

### 4.4.4.2 Les vides miniers

Les vides miniers sont modélisés sur deux périodes, la période de suivi InSAR et une autre, longue d'un siècle après la dernière exploitation (figure 4.13). Trois secteurs sont considérés, ceux exploités à Bollwiller en 1993 et 1994, et celui à Pulversheim en 1993. Ces secteurs sont les plus proches des points suivis en surface. Le volume de vide est calculé par le ratio entre d'une part, la différence entre la densité finale et la densité du cube à l'instant  $t$ , et d'autre part, la différence entre la densité finale et la densité initiale. Chaque secteur étant constitué de plusieurs cubes, les valeurs des vides proviennent d'une moyenne pratiquée sur ces cubes.

Sur la période InSAR (figure 4.13a), la proportion de vide évolue de la même manière pour les trois secteurs retenus. Les secteurs de Bollwiller se referment un peu plus rapidement, passant de 43 et 44% en 1995 à 27.5 et 26.5%, respectivement, en 2022, contre 34.7% à 20.2% pour celui de Pulversheim. De 1995 à 2001, les taux de fermeture annuels sont élevés et diminuent rapidement, entre 3.3 et 2.2%.an<sup>-1</sup> en 1996 contre 0.7 à 0.9%.an<sup>-1</sup> en 2001. Après 2001, ces taux continuent de diminuer mais plus progressivement, atteignant entre 0.2 et 0.3%.an<sup>-1</sup> en 2022. Le phénomène de rigidification des matériaux avec l'avancement de la compaction est ainsi retrouvé. En 2018, lors d'un forage réalisé à Pulversheim, le volume de vide minier est estimé dans les matériaux foudroyés par imagerie de paroi (diagraphie). Cette mesure fournit un volume de vide de 13.9%. Le modèle indique une valeur de 21.4%, environ 50% plus élevée que la mesure. Néanmoins, la mesure est ponctuelle alors que la valeur avancée est une moyenne des cubes inclus dans les secteurs exploités.

À la fin du siècle suivant la dernière exploitation dans les environs, les proportions de vide s'établissent entre 5 et 6% à Pulversheim et, entre 14 et 15% à Bollwiller (figure 4.13b). La vitesse de fermeture décroît plus lentement à Pulversheim qu'à Bollwiller. En considérant

les variations de vides miniers sur des durées de 10 ans, ces variations passent de 4.2% au début du siècle à 1.1% à la fin du siècle à Pulversheim. À Bollwiller, ces variations passent de 4.6 et 4.8% à 1.0 et 0.9%, respectivement. Les taux de vides plus importants à Bollwiller s'expliquent par un gisement moins profond, les contraintes étant moins fortes.

Les vitesses de fermetures modélisées sont similaires à d'autres valeurs proposées dans le bassin potassique. Par retour d'expérience, les MDPA retiennent une vitesse de 0.6 à 0.8%.an<sup>-1</sup>. Par analyse des courbes d'affaissement issues des mesures de nivellement, l'INERIS propose une vitesse comprise entre 0.1 et 0.2%.an<sup>-1</sup>. Ces valeurs fournissent un bon encadrement des résultats. En début de période, les vitesses sont similaires à celles suggérées par les MDPA, voire légèrement supérieures. Puis, au fil de la compaction, les vitesses tendent vers les valeurs avancées par l'INERIS.

Les résultats sur l'état et la vitesse de fermeture des vides miniers sont les résultats majeurs de la modélisation géomécanique. Ces résultats sont par la suite exploités, dans une étude indépendante de ces travaux de thèse, pour affiner les scénarii d'ennoyage des anciens travaux miniers et l'impact du phénomène sur le site de stockage de déchets.

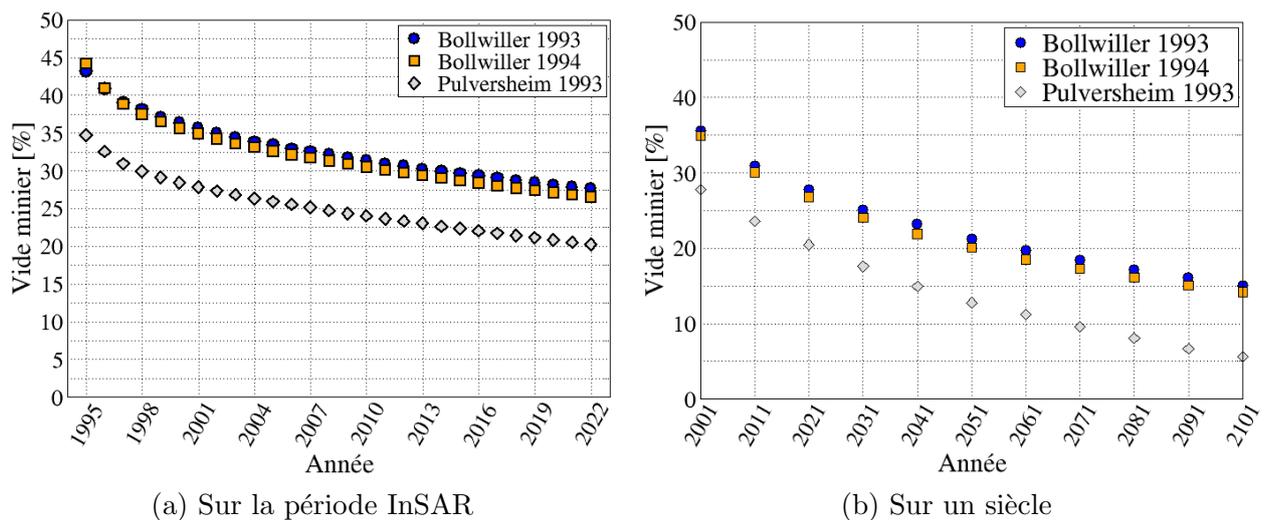


FIGURE 4.13 – Estimation et évolution des vides résiduels sur la période d'observation InSAR (gauche) et pendant le siècle qui suit la dernière extraction (droite). Les secteurs suivis sont ceux exploités à Bollwiller en 1993 et 1994, et à Pulversheim en 1993.

## 4.5 Discussion

Dans cette dernière section, plusieurs aspects de la mécanique du sel sont abordés, intervenant aussi bien dans la fermeture des galeries que la compaction. D'abord, l'existence d'une contrainte déviatorique naturelle dans les matériaux salifères est toujours l'objet de débats. Ensuite, le fluage du sel se décompose en trois phases alors qu'une seule est considérée dans la modélisation. Puis, la déformation des roches salines repose sur un ensemble de mécanismes difficiles à discerner. Pour clore cette section, le comportement des sels broyés est comparé au comportement des matériaux foudroyés.

### 4.5.1 Les contraintes naturelles dans les matériaux salifères

Traditionnellement, dans nombres d'études, le cisaillement est considéré négligeable dans le sel. Cette hypothèse repose sur les propriétés visqueuses du sel, associé à un fluide Newtonien lorsqu'une longue période temporelle est considérée. Ainsi, les contraintes déviatoriques dans le sel sont relâchées à l'échelle des temps géologiques (Bérest et al., 2001).

Toutefois, les couches de sel étant de plus en plus plébiscitées pour les activités de stockage (fluide et déchets), les observations *in situ* se multiplient. Ces observations tendent à prouver l'existence de contraintes déviatoriques naturelles dans les matériaux salifères (Carter and Hansen, 1983). Par ailleurs, des contraintes de cisaillement de l'ordre de 1 à 5 MPa sont mesurées dans les roches salines, selon s'il s'agit de couches de sel continues (Schoenherr et al., 2010) ou excavées (Desbois et al., 2010). Dans d'autres situations, les composantes du cisaillement sont si faibles qu'elles sont seulement mises au jour lors de modélisation pour reproduire les observations, notamment dans le cadre de glaciers salins (Wenkert, 1979). Le sel constitue l'une des principales roches réservoirs *off shore*, formant une couche imperméable et empêchant le pétrole de migrer vers les couches supérieures. Lors de forages pour atteindre la ressource, un phénomène d'ovalisation s'est manifesté sur un site, rendant l'extraction de la ressource plus complexe (Poiate Jr et al., 2006). Ce phénomène atteste la présence de contraintes déviatoriques dans des massifs salins. Enfin, dans le cadre de diapirisme, certaines études s'appuient sur la présence de contraintes cisailantes dans le sel pour expliquer la genèse de discontinuités (Nalpas and Brun, 1993). Par la suite, le développement d'un diapir participe à la mise en place et au maintien d'un déviateur de contraintes dans le milieu (Nikolinakou et al., 2014).

Entre les propriétés visqueuses du sel et l'ensemble de ces observations, il est impossible de préjuger de l'état du champ de contraintes de couches salines. Toute étude mécanique d'un massif salifère doit ainsi commencer par un inventaire des différentes observations réalisées, et à défaut, conduire des mesures de contraintes pour attester ou non de la présence d'un déviateur dans le milieu. Dans le bassin potassique alsacien, la présence d'un déviateur est attestée dans les marnes anhydritiques, présence qui est moins marquée dans le sel (Cornet and Burlet, 1992). De par leur raideur, les marnes anhydritiques maintiennent un déviateur sur de très longues périodes. Les différentes couches de marnes anhydritiques établissent ainsi un déviateur dans l'ensemble de la structure sédimentaire. La transition dans la couche de sel est graduelle, avec un déviateur plus fort aux abords des interfaces qu'au coeur des couches de sel. Par ailleurs, la contrainte de Von Mises obtenue pour la modélisation du bassin potassique est comprise entre 0.6 et 0.7 MPa, proche de valeurs publiées (Schoenherr et al., 2010).

### 4.5.2 Le fluage du sel

Suite à la multiplicité des études pour les potentiels sites de stockage dans le sel, le nombre d'expérimentations en laboratoire est croissant. Ces essais sont traditionnellement

effectués dans des conditions mécaniques extrêmes (haute température, fortes contraintes déviatoriques), causant des taux de déformation importants, afin de mesurer un signal significatif et étudier la sensibilité du sel au paramètre imposé. Ces expériences ont mis en avant l'aptitude du sel au fluage. Du suivi de la déformation des échantillons, trois phases sont identifiées : primaire ou transitoire, secondaire ou stationnaire, tertiaire ou de rupture (Carter et al., 1993).

Le fluage primaire est caractérisé par une décroissance logarithmique de la vitesse de déformation, tendant vers une valeur constante marquant ainsi le début du fluage secondaire (Carter and Hansen, 1983). Le fluage est essentiellement induit par dislocation. Cette phase du fluage n'est pas considérée dans les travaux de modélisation aussi bien pour la compaction que la galerie. Sa durée caractéristique est de l'ordre de quelques jours (Yang et al., 1999) à quelques semaines (Carter et al., 1993) en fonction de la contrainte déviatorique et de la pression de confinement.

Le fluage tertiaire est marqué par une accélération de la déformation. Il apparaît si les contraintes appliquées excèdent les frontières de la dilatance et surpassent les capacités de cicatrisation de la roche, engendrant des fissures intra-cristallines et la rupture du matériau (Hou, 2003 ; Gunther et al., 2010). Cette phase n'est pas non plus considérée dans ces travaux. Pour les galeries, aucune fissure visible n'est apparue lors des campagnes lidar.

Entre ces deux phases se trouve le fluage secondaire, correspondant au régime de déformation stationnaire de la roche. De nombreux exemples sont disponibles dans la littérature déterminant les caractéristiques de cette phase. La vitesse de déformation est reliée à la pression de confinement par une loi exponentielle et à la contrainte déviatorique par une loi puissance (Yang et al., 1999). Les essais en laboratoire ont aussi souligné la forte dépendance de la vitesse de déformation à la température (Evans and Langdon, 1976), dépendance exprimée par la loi d'Arrhenius. D'autres paramètres interviennent mais ne sont pas régulièrement pris en compte comme la taille des grains. Ces particularités justifient la sélection d'une loi de Norton pour modéliser cette phase. Contrairement à d'autres lois complexes élaborées pour reproduire le fluage du sel lors des trois phases (Cristescu, 1993; Gunther et al., 2010), la loi de Norton est une loi simple avec un nombre restreint d'inconnues. Par ailleurs, son emploi est répandu lors des études des roches salines.

### 4.5.3 Les micromécanismes de déformation du sel

Toutefois, les conditions auxquelles sont soumises les échantillons ne sont que rarement rencontrées en réalité. Ainsi, l'extrapolation fiable des équations de fluage obtenues en laboratoire aux faibles taux de déformation n'aboutit qu'en se basant sur les micromécanismes de déformation (Langer, 1984). La prise en compte de ces micromécanismes participe à l'élaboration de nouvelles lois de comportement (Li et al., 2017). Dans le cas contraire, de fortes divergences entre les extrapolations des expériences en laboratoire et la déformation *in situ* peuvent se manifester (Bérest et al., 2015). À partir de la multiplication des observations et des études, trois grandes familles de mécanismes à l'origine des déformations des roches

salines sont distinguées. La pression solution est un phénomène de dissolution-précipitation d'éléments se situant à la surface des cristaux de sel et permettant le coulissage et le réarrangement des cristaux entre eux (Spiers et al., 1990, figure 4.14). Ce phénomène est en grande partie permis par la présence naturelle d'eau dans les sels (Urai, 1983), et se produit même si la quantité d'eau présente est très faible (eau absorbée aux points de contact). Le fluage par dislocation correspond à une subdivision des grains par dislocation, assistée par une recristallisation dynamique (Urai et al., 1986, figure 4.14). Ce mécanisme est considéré comme le principal acteur de la phase transitoire. La déformation plastique et la microfracturation conduisent au morcellement des grains, à la rotation de ceux-ci et à des glissements intergranulaires provoquant une augmentation de la porosité et de la perméabilité (Peach and Spiers, 1996, figure 4.14). D'autres mécanismes semblent intervenir dans la déformation des roches salines, notamment dans le cas de faibles contraintes déviatoriques, compliquant l'extrapolation des mesures en laboratoire à grande échelle (Munson and Dawson, 1981). Cependant, ces mécanismes interviennent à des températures bien supérieures à celles des zones d'intérêts, justifiant leur mise à l'écart pour la suite.

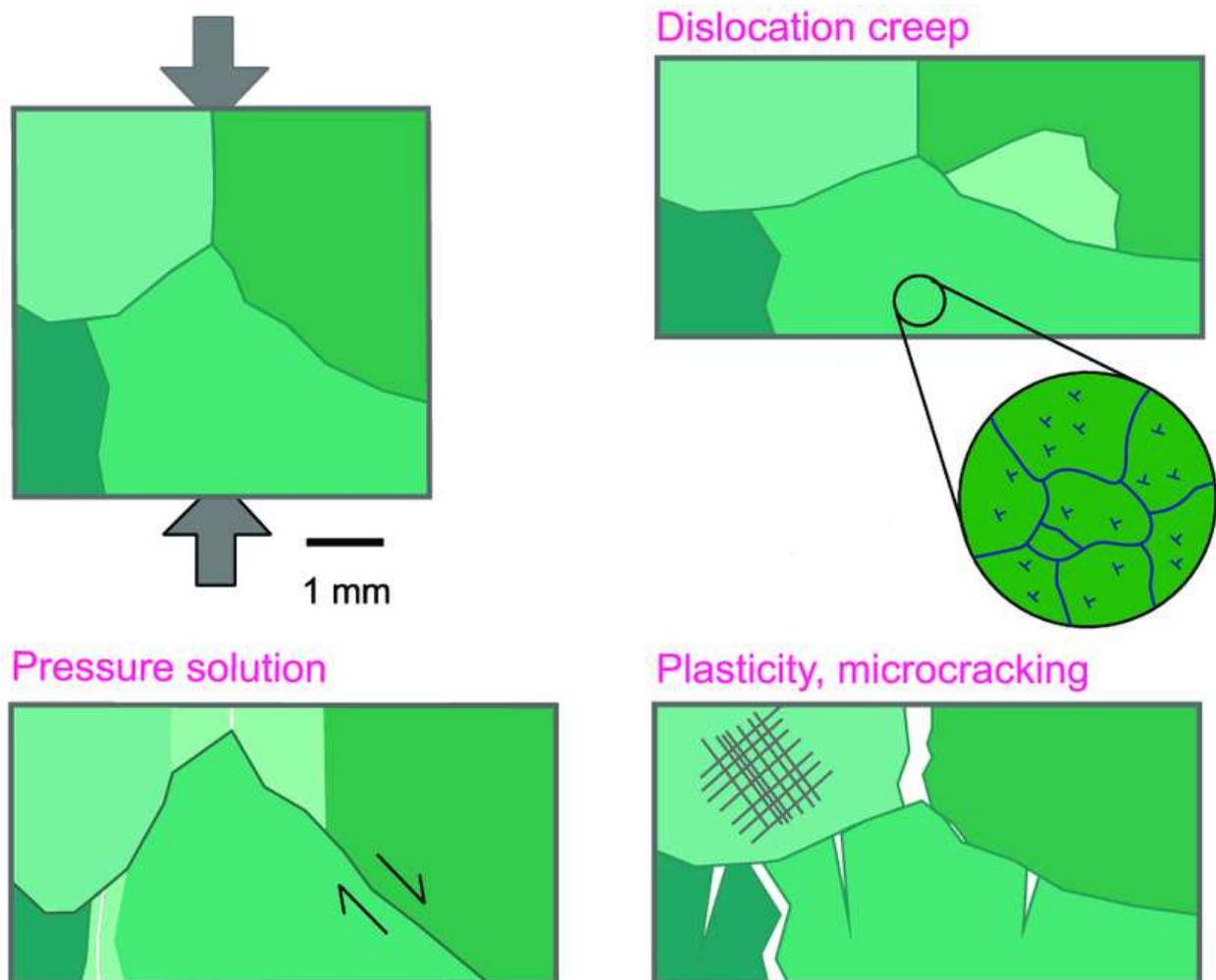


FIGURE 4.14 – Schéma des principaux mécanismes microstructuraux à l'origine des déformations dans les roches salines (Urai et al., 2008). Les différentes nuances de verts représentent des cristaux avec différentes orientations.

Les mécanismes précédemment décrits n'interviennent pas dans les mêmes conditions. Cinq paramètres influencent l'apparition de ces mécanismes au cours de la déformation : la taille des grains, la température, les contraintes déviatoriques, la pression de confinement et le type de sel. Des contraintes déviatoriques très supérieures à la pression de confinement facilitent la plasticité et le développement des microfractures (Urai et al., 2008). Une faible température et des grains fins favorisent la pression solution, alors qu'inversement, des fortes températures et des grains grossiers induisent préférentiellement le fluage par dislocation (Cornet et al., 2018). Toutefois, la zone de transition et de cohabitation des deux mécanismes est spécifique à chaque sel. En complément, lors d'essais quasi-statiques, Wawersik and Hannum (1980) ont montré qu'en cas de forte température, une pression de confinement élevée et/ou un faible déviateur de contraintes, le comportement ductile du sel prédomine, entraînant une déformation presque isovolumétrique.

Dans le cas du bassin potassique, par retour d'expérience, la variation de température avec la profondeur est connue grâce au gradient géothermique. La taille des grains, estimée à 1 mm, provient des tests réalisés lors de l'étude de faisabilité du site de stockage nucléaire dans les couches de sel (Ghoreychi, 1991a). La pression de confinement et la contrainte déviatorique sont apportées par les travaux de modélisation précédents. Pour la modélisation des galeries de sel, en considérant une taille de grain de 1 mm, une température de 298 K, une contrainte de Von Mises entre 0.6 et 0.7 MPa, une pression de confinement de l'ordre 12 MPa, l'occurrence à la fois de la pression solution et du fluage par dislocation est probable. Dans la galerie 11, quasiment alignée avec la direction de  $\sigma_3$ , la fermeture de la galerie semble gouvernée par la pression solution alors que dans la galerie 12, aussi bien la pression solution que le fluage par dislocation semblent se produire. Une simple loi de Norton ne serait donc pas suffisante pour expliquer les mesures provenant des deux galeries.

Néanmoins, à ce jour, il n'est possible ni d'infirmier ni de confirmer ces suppositions car de trop nombreuses inconnues subsistent. Jusqu'à présent, les études en laboratoires se sont concentrées sur la détermination des paramètres mécaniques du sel du bassin potassique alsacien, sans s'intéresser aux mécanismes associés. Ni le domaine de prédominance, ni de cohabitation des deux mécanismes ne sont connus pour le sel du bassin potassique alsacien. Par ailleurs, certains paramètres estimés localement varient fortement en réalité au sein d'une même structure. Par exemple, la taille des grains n'est généralement pas homogène dans les couches de sel (Cornet et al., 2018). Enfin, d'après les autres études menées sur le site de stockage, les anciens travaux miniers situés 25 m au-dessus du site, notamment un stot large 20-30 m, semblent perturber les contraintes au niveau du site de stockage. Cette perturbation pourrait induire la différence de déformation observée, la galerie 12 étant plus proche du stot que la galerie 11.

L'estimation d'une loi de comportement à partir de mesures *in situ* demeure un exercice délicat devant allier précision de mesures, compréhension du phénomène suivi et connaissance de l'environnement.

### 4.5.4 Le comportement des matériaux foudroyés

La multiplication des sites d'extraction minière à travers le monde engendre un nombre croissant de sites d'étude pour la caractérisation et la compréhension de la compaction des matériaux foudroyés. Ce besoin est d'autant plus fort qu'il devient nécessaire pour l'anticipation des conséquences d'après-mine en lien avec des phénomènes d'engorgement (Veschkens et al., 2005).

L'une des premières lois proposées relie de manière hyperbolique la contrainte à la déformation (Ryder and Wagner, 1978). Cette première proposition est par la suite reformulée et confirmée par Salamon (1990). Cette relation illustre le comportement asymptotique de la déformation volumétrique au cours de la compaction : le taux de déformation décroît avec l'augmentation de la contrainte en lien avec les processus de densification des matériaux. Ce comportement est ultérieurement illustré par des essais uniaxiaux en laboratoire sur des matériaux équivalents (Pappas and Mark, 1993). Plus tard, Yavuz (2004) apporte des modifications pour prendre en compte des paramètres complémentaires tels que l'affaissement de surface et l'expansion verticale de la zone foudroyée. D'autres lois de comportement sont proposées et issues de tests en laboratoire avec des matériaux équivalents à ceux foudroyés (Moreno et al., 1981). Des modèles conceptuels sont également développés pour caractériser et reproduire le comportement des roches foudroyées lors de la compaction (Fan and Liu, 2017). Cependant, l'essentiel de ces propositions proviennent d'observations conduites dans des bassins houillers où marnes et schistes constituent majoritairement les matériaux foudroyés.

La transposition de ces lois à notre situation n'est pas triviale. La déformation des roches salines est gouvernée par des mécanismes particuliers. Or, les lois empiriques mentionnées ne considèrent en général que la déformation visco-plastique en lien avec la compaction. Dans le cas de sels broyés, un premier terme doit en effet caractériser la déformation visco-plastique occasionnée par la compaction. Mais, un second terme est à ajouter pour tenir compte du fluage, notamment lié à la stabilisation des contraintes (Olivella and Gens, 2002). Par exemple, certains auteurs se tournent vers la pression solution pour expliquer ce fluage (Spiers and Brzesowsky, 1993). De plus, un mécanisme de cicatrisation est mis en évidence lors de la compaction de sels broyés (Miao et al., 1995). Ce mécanisme conduit à la fermeture progressive des vides et des fractures, reconstituant lentement un sel intact. Toutefois, les mécanismes intervenant dans la compaction des sels broyés semblent dépendre des contraintes du milieu, de la température et de l'humidité (Olivella and Gens, 2002).

Dans notre cas, les matériaux foudroyés ont une composition similaire à celle des géomatériaux équivalents retenus pour la modélisation. La présence de sel dans les terrains éboulés est certaine, une couche de sel étant à l'aplomb direct de la couche de potasse. Ainsi, le choix de la loi de comportement pour les matériaux foudroyés se révèle particulièrement délicat. Les marnes et le sel, les deux principaux constituants des matériaux foudroyés, se déforment différemment lors de la compaction et de possibles interactions sont à envisager au cours du

phénomène. Toutefois, dans notre étude, une loi de comportement empirique issue d'essais de compaction sur des sels broyés s'est révélée suffisante pour reproduire les observations de surface.

## 4.6 Conclusion

À partir des observations et des campagnes de prospections accumulées dans le bassin potassique alsacien à travers les époques, un modèle géologique équivalent est produit couvrant plus d'une centaine de kilomètres carrés. Un champ de contraintes ambiant est reproduit conformément à d'anciens travaux sur le massif salifère de Mulhouse et à des essais de fracturation hydraulique. La loi de comportement du sel, principal acteur des déformations visco-plastiques, est ajustée par la déformation de la galerie 11 suivie par des campagnes répétées d'acquisitions lidar. En associant une loi de comportement empirique déterminée pour la compaction de sels broyés aux matériaux foudroyés, les déplacements de surface obtenus par InSAR sont reproduits.

En surface, les comparaisons des déplacements verticaux issus du modèle et des résultats InSAR sur les périodes ERS (1996/1997-2000) et ENVISAT (2004-2010) sont très bonnes. Toutefois, la comparaison avec les résultats InSAR sur la période Sentinel-1 (2015-2018) est inexploitable du fait de la trop grande dispersion dans la série temporelle. Par ailleurs, à l'exception de Pulversheim, les séries temporelles complètes divergent des résultats du modèle. La corrélation entre le modèle et les résultats InSAR sur chaque période est jugée satisfaisante pour valider le modèle développé. En complément, des pistes autres que l'extraction de la potasse sont à explorer pour tenter d'expliquer les observations InSAR à Staffelfelden, la modélisation n'ayant pas permis de retrouver l'amplitude des déplacements

En profondeur, la variation de volume des vides miniers est conforme aux estimations jusqu'à présent considérées. La vitesse de fermeture aux environs de Bollwiller et Pulversheim est comprise entre 0.7 et 0.9%.an<sup>-1</sup> juste après la fin de la période d'exploitation et tend vers la valeur asymptotique de 0.1%.an<sup>-1</sup>. D'après le modèle, les vides miniers ne sont toujours pas refermés plus d'un siècle après la fin de l'exploitation. En 2101, les vides miniers seraient compris entre 15% à Bollwiller et 5% à Pulversheim. Des déplacements de surface, de l'ordre de quelques millimètres par an, sont ainsi à prévoir sur les prochaines décennies. Cependant, ces estimations sur le long terme sont à prendre avec précaution dans la mesure où le suivi des déplacements de surface s'arrête en 2018.

De la discussion ressort que le sel est un matériau complexe dont les spécificités varient d'un site à un autre. Ces travaux requièrent ainsi aussi bien la compréhension de la dynamique des affaissements miniers, que celle des mécanismes à l'origine des déformations des roches salines. Les observations provenant d'autres bassins miniers sont ainsi à adapter pour prendre en compte les particularités du sel.

En effectuant plusieurs simplifications dans le modèle (volume géologique, géométrie des exploitation, loi de comportement du sel), une estimation des vides et de leur vitesse de ferme-

ture est proposée, répondant ainsi à la problématique de départ. Néanmoins, ces estimations se cantonnent aux alentours de Pulversheim et de Bollwiller, alors que la problématique concerne l'ensemble des anciens travaux miniers. La transposition de ces résultats encourageants à une plus grande échelle reste à accomplir. Dans ces futurs travaux, l'incorporation des failles et des réservoirs pétroliers serait à envisager pour tenter d'expliquer certaines observations InSAR.

# Conclusion générale

Dans cette thèse, une estimation des vides miniers résiduels et de leur évolution est avancée à partir des déplacements de surface et de la déformation de galeries souterraines. Les premières données sont la manifestation en surface du processus de compaction en profondeur alors que les secondes données renseignent sur le comportement mécanique du milieu.

Pour mener à bien ces travaux, une première étape cruciale est la synthèse de toutes les informations concernant le bassin potassique alsacien. Cette étape est d'autant plus importante que ces données ont tendance à se perdre, surtout suite à l'arrêt de l'activité minière. L'ensemble des campagnes de prospection sont résumées, même si pour certaines, les données brutes ne sont pas disponibles. Néanmoins, les informations essentielles issues de ces prospections demeurent accessibles.

Pour retrouver les déplacements passés et actuels sur une longue période, la technique d'interférométrie radar (InSAR) est employée pour traiter les archives d'image radar SAR couvrant la période 1995-2018. Compte tenu des spécificités de la zone et des signaux - fort couvert végétal (champs, forêts) avec des déplacements annuels métriques et localisés - les méthodes de traitement *Persistent Scatterer* et *Small Baseline* sont retenues pour améliorer la qualité des résultats. En traitant l'ensemble des archives, des déplacements de surface du sol sont détectés plus de 10 ans après l'arrêt de l'activité minière. Ces résultats confirment que la compaction des matériaux foudroyés est toujours en cours. Les comparaisons avec des mesures de nivellement attestent la qualité des résultats InSAR. Ces comparaisons montrent que les affaissements, notamment au cours de la phase résiduelle, deviennent verticaux. Sur la période la plus récente (Sentinel-1, 2015-2018), les taux de déplacement vertical sont inférieurs à  $4.5 \pm 0.3 \text{ mm.an}^{-1}$  aux points étudiés, proches des panneaux exploités le plus récemment. Un modèle temporel d'affaissement reconnu est adapté afin de recalibrer les différentes archives et ainsi, constituer des séries temporelles longues de 24 ans. L'étude spatiale conduite par InSAR met en lumière deux zones où les déplacements sont significatifs. À Staffelfelden, les déplacements verticaux annuels excèdent les  $7.5 \pm 0.3 \text{ mm}$  sur l'ensemble de la période d'étude alors que le secteur exploité le plus proche date de 1990. Contrairement aux hypothèses initiales concernant le site de stockage, les résultats tendent à montrer son impact en surface.

Pour paramétrer la loi de comportement du massif salifère, la déformation de deux galeries souterraines de sel est surveillée par des campagnes d'acquisitions lidar régulières, tous les deux à trois mois. Plusieurs dizaines de réflecteurs sont fixés sur les parois comme support

pour les mesures. La profondeur de ces galeries, environ 550 m, complexifie le suivi de ces structures. Pour parvenir à référencer les acquisitions les unes par rapport aux autres, une nouvelle méthodologie est développée basée sur les variations de distances entre les réflecteurs. L'incertitude sur les distances mesurées est de 2.1 mm, inférieure aux variations de longueurs observées. La déformation horizontale annuelle est homogène et de 0.1-0.15%.an<sup>-1</sup> dans la galerie orientée N008°W, alors qu'elle est graduelle et atteint 0.3%.an<sup>-1</sup> dans celle orientée N040°E. Ces résultats soulignent soit l'importance de l'orientation des galeries, soit la perturbation locale du champ de contraintes. Par ailleurs, la comparaison avec les mesures du site de stockage proche atteste de la qualité des résultats et apporte une vue étendue de la variation spatiale de la vitesse de déformation. En complément, grâce au recalage des acquisitions, les données acquises lidar fournissent un suivi du déplacement des parois et une estimation de la vitesse de fermeture des galeries.

Pour répondre à la problématique, un modèle équivalent à l'échelle du bassin potassique alsacien est construit. Ce modèle s'appuie sur l'ensemble des informations et des mesures synthétisées précédemment. Le champ de contraintes est reproduit conformément aux observations répertoriées dans la littérature. Les paramètres de la loi de comportement du massif salifère sont ajustés selon un modèle de fermeture de galerie souterraine avec le champ de contraintes modélisé. La déformation de la galerie modélisée reproduit les mesures lidar et les paramètres ainsi retenus sont égaux à ceux obtenus en laboratoire. Une loi de comportement provenant de l'étude de la compaction de sels broyés est associée aux matériaux foudroyés pour prendre en compte les spécificités mécaniques du sel présent. En surface, la modélisation de l'extraction minière et de la compaction des matériaux foudroyés aux alentours de Pulversheim et Bollwiller produisent des déplacements de surface similaires à ceux issus du traitement InSAR sur les périodes ERS (1996/1997-2000) et ENVISAT (2004-2010). La forte dispersion des résultats InSAR sur la période Sentinel-1 (2015-2018) empêche toute comparaison qualitative. Au fond, le modèle indique que les vides miniers résiduels sont compris entre 20 et 28% en 2020 à Pulversheim et Bollwiller, respectivement. Ces vides tendent vers 5 et 15% à leurs alentours en 2100, soit un siècle après la fin des travaux. La vitesse de fermeture décroît sur l'ensemble de la période modélisée, passant de quasiment 1%.an<sup>-1</sup> vers la fin de la période d'extraction à 0.1%.an<sup>-1</sup> un siècle plus tard. Ce résultat est à relier à la rigidification continue des matériaux avec l'augmentation de la déformation volumétrique des matériaux foudroyés.

De manière plus concise, les apports de cette thèse se résument en quatre points essentiels :

- la synthèse de l'ensemble des connaissances et des données disponibles concernant le bassin potassique alsacien ;
- le suivi d'affaissement minier, essentiellement lors de la phase résiduelle, et la reconstitution de séries temporelles longues de 24 ans avec la technique InSAR par l'adaptation d'un modèle d'affaissement existant ;
- le développement d'une méthodologie pour le suivi de la fermeture de cavités souter-

raines avec un lidar ;

- la combinaison des déplacements de surface, des déformations de galeries souterraines et des outils de modélisation géomécanique pour parvenir à estimer le volume des vides miniers résiduels et leur évolution dans un massif salifère.

Malgré les avancées réalisées dans cette thèse, les travaux s’achèvent alors que plusieurs points intéressants restent à approfondir. Aussi, certaines méthodes spécifiques ont été considérées dans le cadre de cette thèse pour répondre à la problématique des vides miniers, avant d’être écartées.

Concernant l’interférométrie radar, la composante atmosphérique est considérée négligeable et les séries temporelles sur la période Sentinel-1 exposent une forte dispersion. Par ailleurs, certains auteurs ont souligné l’apparition de phénomènes physiques sur les données Sentinel-1, absents des précédents satellites, en lien avec la courte période d’acquisition offerte par les satellites Sentinel-1 (De Zan et al., 2019). Ces phénomènes physiques parasitent les résultats de traitement InSAR. Néanmoins, des solutions sont élaborées pour écarter et traiter rigoureusement ces signaux et cette dispersion (Henrion, 2019). Le traitement des archives avec une autre chaîne de traitements et en prenant en compte la composante atmosphérique améliorerait certainement les résultats obtenus à ce jour, notamment pour les données acquises par les satellites Sentinel-1.

Grâce à la couverture spatiale des résultats InSAR, des zones avec des vitesses d’affaissement anormales sont détectées. Les résultats de la modélisation confirment que les déplacements de surface ne sont pas liés uniquement à la fermeture des vides miniers. D’autres pistes sont à envisager telles que la tectonique et l’exploitation pétrolière. En complément, au cours du mois d’octobre 2019, deux séismes de magnitude 1.4 et 1.7 se sont produits aux alentours de Staffelfelden, probablement en lien avec la faille sous-jacente. Cette étude ainsi que d’autres travaux (Guéguen et al., 2009; Perski et al., 2009) démontrent la pertinence de l’emploi de l’InSAR pour étudier les déplacements de surface à travers les concessions minières, où l’activité minière n’est pas forcément l’unique source de déplacement. De plus, pour les concessions les plus récentes, l’application de la technique InSAR offrirait une vue d’ensemble des déplacements de surface pré-exploitation.

Contrairement au suivi du site de stockage, les campagnes d’acquisitions lidar se sont déroulées dans deux galeries souterraines avec des orientations distinctes. Par ailleurs, l’une des galeries est approximativement orientée selon l’une des directions principales du champ de contraintes. Les résultats des mesures lidar et la discussion de la modélisation suggèrent de nouvelles pistes, notamment le champ de contraintes ambiant et les micro-mécanismes de déformation du sel, pour expliquer les forts taux de déformation observés au niveau du site de stockage. Toutefois, le site de stockage n’est pas étudié dans cette thèse, ne faisant pas partie de la problématique d’étude et n’ayant pas le temps nécessaire.

Pour aboutir à l’estimation des vides miniers et de leur évolution, seuls les affaissements résiduels ont été pris en compte. Les affaissements se manifestant lors de la phase active

ne sont pas reproduit par le modèle. L'une des raisons est le manque d'information sur le comportement plastique des matériaux superficiels du bassin potassique alsacien. Ces paramètres sont pourtant nécessaires à l'obtention d'affaissement forts et localisés (Iwanec et al., 2016). L'étude en laboratoire d'échantillons issus des carottes de sondage aiderait à les cerner et compléterait les observations de Nguyen-Minh and Bergues (1995). Aussi, les estimations avancées le sont pour des exploitations relativement similaires (hauteur et méthode d'extraction, profondeur). L'extension de la modélisation à des secteurs aux caractéristiques sensiblement différentes, tel que Reiningue, est à conduire pour discuter des paramètres des lois de comportement retenues. De plus, les résultats encourageants de ces travaux sont obtenus dans le cadre d'un massif salifère, où les propriétés visqueuses du sel ne sont pas négligeables. Afin de vérifier l'universalité de ces travaux, la transposition de l'étude à des bassins houillers, dans lesquels la viscosité du milieu est moins prononcée, est nécessaire.

Enfin, ces travaux s'inscrivent dans une démarche d'estimation indirecte des vides miniers, les déplacements observés en surface étant en lien avec la fermeture des vides en profondeur. Néanmoins, certaines méthodes offrent la possibilité de mesurer directement les volumes résiduels. Comme présentés dans la partie modélisation, l'imagerie de paroi lors de forage donne une mesure des vides, mais celle-ci est ponctuelle temporellement et spatialement. En suivant les variations de la pesanteur au cours du temps, la gravimétrie s'est montrée efficace pour suivre l'évolution de cavité appliquée à la problématique minière (Branston and Styles, 2003; Pringle et al., 2012). Toutefois, dans le cas du bassin potassique alsacien, la profondeur des exploitations complexifie la mise en application de la méthode, complexité accrue par la présence de la nappe phréatique, dont les variations de niveau parasiteraient les mesures en surface, à quelques mètres de profondeur dans le Fossé Rhéna.

# Bibliographie

- N. Adam, B. K. M. E. J. Worawattanamateekul, and M. Kircher. The development of a scientific permanent scatterer system, paper presented at isprs hannover workshop, inst. for photogramm. *And Geoinf., Hannover, Germany*, 2003.
- P. Agram and M. Simons. A noise model for insar time series. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 120(4) :2752–2771, 2015.
- P. Agram, R. Jolivet, and M. Simons. Generic insar analysis toolbox (giant). *User Guide, ed*, 2012.
- K. Aissaoui. *Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques*. PhD thesis, 1999.
- M. Al Heib, M. Nicolas, J. Noirel, and F. Wojtkowiak. Residual subsidence analysis after the end of coalmine work. example from lorraine colliery, france. In *Proceedings of the symposium Post mining 2005*, 2005.
- F. Alvarez. Le bassin tertiaire de colmar-mulhouse - modélisation gravimétrique. Technical report, 1982.
- B. Amadei and E. Pan. Gravitational stresses in anisotropic rock masses with inclined strata. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, volume 29, pages 225–236. Elsevier, 1992.
- F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Laczniaik. Sensing the ups and downs of las vegas : Insar reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6) :483–486, 1999.
- R. Argüelles-Fraga, C. Ordóñez, S. García-Cortés, and J. Roca-Pardiñas. Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning. *Automation in construction*, 31 :1–9, 2013.
- A. Arnaud, N. Adam, R. Hanssen, J. Inglada, J. Duro, J. Closa, and M. Eineder. Asar ers interferometric phase continuity. In *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*, volume 2, pages 1133–1135. IEEE, 2003.

- G. Aslan, Z. Cakır, S. Ergintav, C. Lasserre, and F. Renard. Analysis of secular ground motions in istanbul from a long-term insar time-series (1992–2017). *Remote Sensing*, 10 (3) :408, 2018.
- Q. Bai, S. Tu, F. Wang, and C. Zhang. Field and numerical investigations of gateroad system failure induced by hard roofs in a longwall top coal caving face. *International Journal of Coal Geology*, 173 :176–199, 2017.
- J. L. Bamber and A. Rivera. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59(1-4) :138–148, 2007.
- H. Basarir, I. F. Oge, and O. Aydin. Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3d numerical analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76 :88–97, 2015.
- H. Baumann and J. Illies. Stress field and strain release in the rhenish massif. In *Plateau Uplift*, pages 177–186. Springer, 1983.
- G. W. Bawden, W. Thatcher, R. S. Stein, K. W. Hudnut, and G. Peltzer. Tectonic contraction across los angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 412(6849) :812–815, 2001.
- D. Bekaert, A. Hooper, and T. Wright. A spatially variable power law tropospheric correction technique for insar data. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 120(2) :1345–1356, 2015.
- R. Bekendam and J. Pottgens. Ground movements over the coal mines of southern limburg, the netherlands, and their relation to rising mine waters. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 234 :3–12, 1995.
- P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential sar interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11) :2375–2383, 2002.
- P. Bérest, J. Bergues, B. Brouard, J. Durup, and B. Guerber. A salt cavern abandonment test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(3) :357–368, 2001.
- P. Bérest, P. Antoine Blum, J. Pierre Charpentier, H. Gharbi, and F. Valès. Very slow creep tests on rock samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42 (4) :569–576, 2005.
- P. Bérest, J. Béraud, H. Gharbi, B. Brouard, and K. DeVries. A very slow creep test on an avery island salt sample. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6) :2591–2602, 2015.
- W. Berggren, D. Kent, and J. Flynn. Paleogene geochronology and chronostratigraphy, geochronology and the geological record. *Spec. Pap. Geol. Soc. London*, 1984.

- P. J. Besl and N. D. McKay. Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor Fusion IV : Control Paradigms and Data Structures*, volume 1611, pages 586–607. International Society for Optics and Photonics, 1992.
- M.-M. Blanc-Valleron. *Les formations paléogènes évaporitiques du bassin potassique de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d’Alsace*. PhD thesis, Strasbourg, 1990.
- M.-M. Blanc-Valleron, A. Foucault, and E. Gannat. Le contrôle climatique, orbital, et solaire de la sédimentation évaporitique : exemple de la base du salifère supérieur (oligocène inférieur) du bassin de mulhouse (sud du fossé rhénan, france). *Comptes rendus de l’Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l’univers, Sciences de la Terre*, 308(4) :435–441, 1989.
- R. Bonì, G. Herrera, C. Meisina, D. Notti, M. Béjar-Pizarro, F. Zucca, P. J. González, M. Palano, R. Tomás, J. Fernández, et al. Twenty-year advanced dinsar analysis of severe land subsidence : The alto guadalentín basin (spain) case study. *Engineering geology*, 198 : 40–52, 2015.
- H. Borchert and R. O. Muir. *Salt deposits : the origin, metamorphism and deformation of evaporites*. Van Nostrand, 1964.
- O. Braitsch. Bromine and rubidium as indicators of environment during sylvite and carnallite deposition of the upper rhine valley evaporites. In *2nd Symposium on Salt. Edited by JL Rau. Northern Ohio Geological Society*, volume 1, pages 293–301, 1966.
- M. W. Branston and P. Styles. The application of time-lapse microgravity for the investigation and monitoring of subsidence at northwich, cheshire. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36(3) :231–244, 2003.
- G. Brauner. Calculation of ground movements in european coalfields. *Australian Inst. Min. Metall., Illawarra Branch*, 10 :10–1, 1973.
- R. W. Bruhn, M. Magnuson, and R. Gray. Subsidence over the mined-out pittsburgh coal. In *Coal Mine Subsidence Session, American Society of Civil Engineers Spring Convention : ASCE Preprint*, volume 3293, 1978.
- R. Bürgmann, P. A. Rosen, and E. J. Fielding. Synthetic aperture radar interferometry to measure earth’s surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1) :169–209, 2000.
- G. Callahan and K. DeVries. *Analyses of backfilled transuranic wastes disposal rooms*. Sandia National Laboratories, 1991.
- M. Camusso and D. Billaux. Étude de l’évolution de la subsidence en surface au-dessus du stockage. Technical report, 2018.

- G. L. Cardozo, J. Edel, and M. Granet. Detection of active crustal structures in the upper rhine graben using local earthquake tomography, gravimetry and reflection seismics. *Quaternary Science Reviews*, 24(3-4) :337–344, 2005.
- C. Carnec and C. Delacourt. Three years of mining subsidence monitored by sar interferometry, near gardanne, france. *Journal of applied geophysics*, 43(1) :43–54, 2000.
- N. Carter, S. Horseman, J. Russell, and J. Handin. Rheology of rocksalt. *Journal of Structural Geology*, 15(9-10) :1257–1271, 1993.
- N. L. Carter and F. D. Hansen. Creep of rocksalt. *Tectonophysics*, 92(4) :275–333, 1983.
- N. L. Carter, F. D. Hansen, and P. E. Senseny. Stress magnitudes in natural rock salt. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 87(B11) :9289–9300, 1982.
- M. Cecchetti, M. Rossi, F. Coppi, A. Bicci, N. Coli, N. Boldrini, and C. Preston. A novel radar-based system for underground mine wall stability monitoring. In *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, pages 431–443, 2017.
- D. Cendón, C. Ayora, J. Pueyo, C. Taberner, and M.-M. Blanc-Valleron. The chemical and hydrological evolution of the mulhouse potash basin (france) : Are "marine" ancient evaporites always representative of synchronous seawater chemistry? *Chemical Geology*, 252(3-4) :109–124, 2008.
- L. Chang and R. F. Hanssen. Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series. *Remote Sensing of Environment*, 147 :56–64, 2014.
- G. Chekan and J. Listak. Design practices for multiple-seam longwall mines. information circular/1993. Technical report, Bureau of Mines, Pittsburgh, PA (United States). Pittsburgh Research Center, 1993.
- A. Chrzanowski, C. Monahan, B. Roulston, and A. Szostak-Chrzanowski. Integrated monitoring and modelling of ground subsidence in potash mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4) :55–e1, 1997.
- P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. Metro : Measuring error on simplified surfaces. In *Computer Graphics Forum*, volume 17, pages 167–174. Wiley Online Library, 1998.
- C. Colesanti, S. L. Mouelic, M. Bennani, D. Raucoules, C. Carnec, and A. Ferretti. Detection of mining related ground instabilities using the permanent scatterers technique - a case study in the east of france. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1) :201–207, 2005.
- F. Cornet and D. Burel. Stress field determinations in france by hydraulic tests in boreholes. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 97(B8) :11829–11849, 1992.

- F. Cornet et al. Two examples of stress measurements by the htpf method. In *The 29th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, pages 615–623. American Rock Mechanics Association, 1988.
- J. S. Cornet, M. Dabrowski, and D. W. Schmid. Long term creep closure of salt cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103 :96–106, 2018.
- P. Cosenza. *Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme*. PhD thesis, Paris 6, 1996.
- P. Cosenza, M. Ghoreychi, B. Bazargan-Sabet, and G. De Marsily. In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(4) :509–526, 1999.
- N. Cristescu. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, volume 30, pages 125–140. Elsevier, 1993.
- M. C. Cuenca, A. J. Hooper, and R. F. Hanssen. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in limburg, the netherlands observed by satellite radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 88 :1–11, 2013.
- X. Cui, J. Wang, and Y. Liu. Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7) :1057–1063, 2001.
- J. C. Curlander and R. N. McDonough. *Synthetic aperture radar : systems and signal processing*. 1991.
- D. Curry and G. Odin. Dating of the paleogene. *Numerical dating in stratigraphy*, 1982.
- F. De Zan, H. Ansari, G. Gomba, R. Brcic, and A. Parizzi. The impact of closure phases on insar processing. *AGUFM*, 2019 :G21A–05, 2019.
- P.-Y. Declercq, J. Walstra, P. Gérard, E. Pirard, D. Perissin, B. Meyvis, and X. Devleeschouwer. A study of ground movements in brussels (belgium) monitored by persistent scatterer interferometry over a 25-year period. *Geosciences*, 7(4) :115, 2017.
- D. Delaloye, J. Hutchinson, and M. Diederichs. Accuracy issues associated with lidar scanning for tunnel deformation monitoring. In *Proceedings of the 2011 Pan-AM CGS Geotechnical Conference*, pages 1–6, 2011.
- D. Delaloye, J. Hutchinson, M. Diederichs, et al. Using terrestrial lidar for tunnel deformation monitoring in circular tunnels and shafts. In *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012.

- D. Delaloye, M. S. Diederichs, G. Walton, and J. Hutchinson. Sensitivity testing of the newly developed elliptical fitting method for the measurement of convergence in tunnels and shafts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(2) :651–667, 2015.
- G. Desbois, P. Závada, Z. Schléder, and J. L. Urai. Deformation and recrystallization mechanisms in actively extruding salt fountain : Microstructural evidence for a switch in deformation mechanisms with increased availability of meteoric water and decreased grain size (qum kuh, central iran). *Journal of Structural Geology*, 32(4) :580–594, 2010.
- C. Dieperink. International water negotiations under asymmetry, lessons from the rhine chlorides dispute settlement (1931–2004). *International Environmental Agreements : Politics, Law and Economics*, 11(2) :139–157, 2011.
- M.-P. Doin, C. Lasserre, G. Peltzer, O. Cavalié, and C. Doubre. Corrections of stratified tropospheric delays in sar interferometry : Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1) :35–50, 2009.
- M.-P. Doin, S. Guillaso, R. Jolivet, C. Lasserre, F. Lodge, G. Ducret, and R. Grandin. Presentation of the small baseline nsbas processing chain on a case example : The etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using envisat data. In *Proceedings of the Fringe symposium*, pages 3434–3437. ES, 2011.
- L. Donnelly, H. De La Cruz, I. Asmar, O. Zapata, and J. Perez. The monitoring and prediction of mining subsidence in the amaga, angelopolis, venecia and bolombolo regions, antioquia, colombia. *Engineering Geology*, 59(1-2) :103–114, 2001.
- P. Düringer. *Les conglomérats de bordures du rift cénozoïque rhénan : dynamique sédimentaire et contrôle climatique*. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Institut de géologie, 1988.
- P. Düringer. Anatomie, faciés et dynamique d’un fan-delta en contexte de rift intracratonique (rift oligocène-fossé rhénan-alsace). *ASF Association des sédimentologistes français*, pages 1–52, 1999.
- J. Edel, H. Lutz, and P. Elsass. Le socle varisque et les tectoniques rhénanes dans le fossé rhénan méridional : traitement et interprétation de la carte gravimétrique du fossé à partir du levé haute densité des mdpa. *Geol. Fr*, 3 :43–59, 2002.
- J. U. Eitel, B. Höfle, L. A. Vierling, A. Abellán, G. P. Asner, J. S. Deems, C. L. Glennie, P. C. Joerg, A. L. LeWinter, T. S. Magney, et al. Beyond 3-d : The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, 186 : 372–392, 2016.
- A. F. Errington, B. L. Daku, and A. Prugger. Closure monitoring in potash mines using lidar. In *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2823–2827. IEEE, 2010.

- T. Esaki, T. Kimura, K. Shikata, et al. Subsidence and environmental impacts in Japanese coal mining. In *The 30th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1989.
- G. Esterhuizen and C. Karacan. A methodology for determining gob permeability distributions and its application to reservoir modeling of coal mine longwalls. Technical report, 2007.
- G. Esterhuizen, C. Karacan, et al. Development of numerical models to investigate permeability changes and gas emission around longwall mining panel. In *Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 2005.
- A. G. Evans and T. Langdon. Structural ceramics. *Progress in Materials Science*, 21(1-2) : 171–425, 1976.
- D. Evans. A review of underground fuel storage events and putting risk into perspective with other areas of the energy supply chain. *Geological Society, London, Special Publications*, 313(1) :173–216, 2009.
- L. Fan and S. Liu. A conceptual model to characterize and model compaction behavior and permeability evolution of broken rock mass in coal mine gobs. *International Journal of Coal Geology*, 172 :60–70, 2017.
- T. G. Farr and M. Kobrick. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(48) :583–585, 2000.
- C. Fercari. Residual coal mining subsidence-some facts. *Mining Technology*, 79(911) :177–182, 1997.
- A. Ferretti. *Satellite InSAR data : reservoir monitoring from space*. EAGE publications, 2014.
- A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1) :8–20, 2001.
- A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation, tm-19. *The Netherlands : ESA Publications*, 2007.
- A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci. A new algorithm for processing interferometric data-stacks : SqueesAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9) :3460–3470, 2011.

- R. Fischer, C. Clement, T. Pirrion, J. Ouvry, and N. Touze-Foltz. Les terrils salés du bassin potassique alsacien : évolution et devenir d'ouvrages étanchés par géomembrane. Technical report, 2016.
- J.-C. Fontes, A. Filly, J. Gaudant, and P. Durringer. Origine continentale des évaporites paleogenes de haute alsace ; arguments paleoecologiques, sedimentologiques et isotopiques. *Bulletin de la Société géologique de France*, 162(4) :725–737, 1991.
- M. Foumelis, J. M. D. Blasco, Y.-L. Desnos, M. Engdahl, D. Fernández, L. Veci, J. Lu, and C. Wong. Esa snap-stamps integrated processing for sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 1364–1367. IEEE, 2018.
- T. Fuhrmann. *Surface Displacements from Fusion of Geodetic Measurement Techniques Applied to the Upper Rhine Graben Area*. PhD thesis, Karlsruhe, 2016.
- A. K. Gabriel and R. M. Goldstein. Crossed orbit interferometry : theory and experimental results from sir-b. *International Journal of Remote Sensing*, 9(5) :857–872, 1988.
- J. Gaudant. Nouvelles recherches sur l'ichthyofaune des zones salifères moyenne et supérieure (oligocène inférieur) du bassin potassique alsacien. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 34(4) :209–218, 1981.
- M. Ghoreychi. Behavior of crushed salt under heat source in boreholes in a salt mine (amelie mine, alsace potash mines, france). Technical report, Commission of the European Communities, 1991a.
- M. Ghoreychi. Comportement du sel broyé sous l'effet d'une source de chaleur dans des sondages réalisés dans une mine de sel. *EUR(Luxembourg)*, 1991b.
- R. Giovanetti. Land remediation and workforce redeployment resulting from the ending of potash mining in france. In *Proceedings-International Fertiliser Society*, number 667, pages 1–24. International Fertiliser Society, 2010.
- D. Girardeau-Montaut. Cloudcompare-open source project. *OpenSource Project*, 2011.
- D. Girardeau-Montaut, M. Roux, R. Marc, and G. Thibault. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(part 3) :W19, 2005.
- P. J. González and J. Fernández. Error estimation in multitemporal insar deformation time series, with application to lanzarote, canary islands. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 116(B10), 2011.
- M. Grenon, P. Caudal, S. Amoushahi, D. Turmel, and J. Locat. Analysis of a large rock slope failure on the east wall of the lab chrysotile mine in canada : back analysis, impact of

- water infilling and mining activity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(2) :403–418, 2017.
- Y. Guéguen, B. Deffontaines, B. Fruneau, M. Al Heib, M. de Michele, D. Raucoules, Y. Guise, and J. Planchenault. Monitoring residual mining subsidence of nord/pas-de-calais coal basin from differential and persistent scatterer interferometry (northern france). *Journal of Applied Geophysics*, 69(1) :24–34, 2009.
- R.-M. Gunther, K. Salzer, T. Popp, et al. Advanced strain-hardening approach constitutive model for rock salt describing transient, stationary, and accelerated creep and dilatancy. In *44th US rock mechanics symposium and 5th US-Canada rock mechanics symposium*. American Rock Mechanics Association, 2010.
- A. Habib. Accuracy, quality assurance, and quality control of light detection and ranging mapping. In *Topographic Laser Ranging and Scanning*, pages 291–312. CRC Press, 2018.
- R. E. Hammah and J. H. Curran. It is better to be approximately right than precisely wrong : why simple models work in mining geomechanics. In *International Workshop on Numerical Modeling for Underground Excavation Design*, pages 55–61. Dept. of Health and Human Services Washington, DC, 2009.
- J.-Y. Han, J. Guo, and Y.-S. Jiang. Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-d lidar point clouds. *Tunnelling and underground space technology*, 33 :186–192, 2013.
- R. F. Hanssen. *Radar interferometry : data interpretation and error analysis*, volume 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- P. Harlé, A. R. Kushnir, C. Aichholzer, M. J. Heap, R. Hehn, V. Maurer, P. Baud, A. Richard, A. Genter, and P. Düringer. Heat flow density estimates in the upper rhine graben using laboratory measurements of thermal conductivity on sedimentary rocks. *Geothermal Energy*, 7(1) :1–36, 2019.
- J.-F. Heitz and P.-Y. Hicher. The mechanical behaviour of argillaceous rocks—some questions from laboratory experiments. In *Proc. Int. Symp. Hydromechanical and Thermohydromechanical Behaviour of Deep Argillaceous Rock*, pages 99–108, 2002.
- R. Hejmanowski and A. Sroka. Time-space ground subsidence prediction determined by volume extraction from the rock mass. In *Proc. 6th Int. Symp. Land Subsidence*, pages 1–9, 2000.
- É. Henrion. *Suivi géodésique des réservoirs souterrains*. PhD thesis, Strasbourg, 2019.
- S. Hinsken, K. Ustaszewski, and A. Wetzel. Graben width controlling syn-rift sedimentation : the palaeogene southern upper rhine graben as an example. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6) :979–1002, 2007.

- C. S. Holling. *Adaptive environmental assessment and management*. John Wiley & Sons, 1978.
- W. T. Holser. Bromide geochemistry of salt rocks. In *Second symposium on salt, Cleveland*, volume 1, 1966.
- A. Hooper. *Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. PhD thesis, Stanford, 2006.
- A. Hooper and H. A. Zebker. Phase unwrapping in three dimensions with application to insar time series. *JOSA A*, 24(9) :2737–2747, 2007.
- A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcán alcedo, galápagos. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 112(B7), 2007.
- A. Hooper, D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arikian. Recent advances in sar interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514 :1–13, 2012.
- Z. Hou. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5) :725–738, 2003.
- J. Hu, Z. Li, X. Ding, J. Zhu, L. Zhang, and Q. Sun. Resolving three-dimensional surface displacements from insar measurements : A review. *Earth-Science Reviews*, 133 :1–17, 2014.
- S. R. Hunt. *Surface subsidence due to coal mining in Illinois*. PhD thesis, 1981.
- J. Hyypä, H. Hyypä, D. Leckie, F. Gougeon, X. Yu, and M. Maltamo. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5) :1339–1366, 2008.
- M. Ilieva, P. Polanin, A. Borkowski, P. Gruchlik, K. Smolak, A. Kowalski, and W. Rohm. Mining deformation life cycle in the light of insar and deformation models. *Remote Sensing*, 11(7) :745, 2019.
- Itasca. *User's Guide*. 2012.
- A. M. S. Iwanec. *The Geomechanics of Single-Seam and Multi-Seam Longwall Coal Mining*. PhD thesis, University of Newcastle, Australia, 2014.
- A. S. Iwanec, J. Carter, and J. Hambleton. Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3) : 304–313, 2016.

- M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, A. Abellán, M.-H. Derron, A. Loye, R. Metzger, and A. Pedrazzini. Use of lidar in landslide investigations : a review. *Natural hazards*, 61(1) :5–28, 2012.
- B. Jafarpour. *Oil reservoir characterization using ensemble data assimilation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- JCGM. Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. *Genève, Suisse*, page 105, 1995.
- R. Jolivet, R. Grandin, C. Lasserre, M.-P. Doin, and G. Peltzer. Systematic insar tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters*, 38(17), 2011.
- J. Jung, C. Schlumberger, and M. Schlumberger. Soulèvement des alluvions du rhin par les intrusions salines diapires de la haute alsace (planche iv et iv bis). *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 3(1) :77–86, 1936.
- B. M. Kampes, R. F. Hanssen, and Z. Perski. Radar interferometry with public domain tools. In *Proceedings of FRINGE*, volume 3, 2003.
- C. Ö. Karacan. *Modeling of sorption and investigation of flow mechanisms of coalbed gas*. PhD thesis, 1998.
- C. Ö. Karacan. Prediction of porosity and permeability of caved zone in longwall gobs. *Transport in porous media*, 82(2) :413–439, 2010.
- M. G. Karfakis. Mechanism of chimney subsidence over abandoned coal mines. In *Proceedings of the 6th International conference on Ground Control in Mining*, pages 9–11, 1987.
- M. Karmis, T. Triplett, C. Haycocks, G. Goodman, et al. Mining subsidence and its prediction in the appalachian coalfield. In *The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1983.
- Y. Kazan. *Comportement thermoelasto-viscoplastique des ouvrages souterrains dans le sel gemme*. PhD thesis, Paris, ENMP, 1994.
- Y. Kazan and M. Ghoreychi. An in situ test on near field of waste repositories experimentation, results and interpretation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4) :152–e1, 1997.
- M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe. Poisson surface reconstruction. In *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, volume 7, 2006.
- W. Keilich. *Numerical modelling of mining subsidence, upsidence and valley closure using UDEC*. PhD thesis, University of Wollongong, 2009.

- V. G. Ketelaar. *Satellite radar interferometry : Subsidence monitoring techniques*, volume 14. Springer Science & Business Media, 2009.
- R. Kiihn. Geochemistry of the german potash deposits. *Saline deposits : Geological Society of America Special Paper*, 88 :427–504, 1968.
- S. Knospe and S. Jonsson. Covariance estimation for dinsar surface deformation measurements in the presence of anisotropic atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4) :2057–2065, 2009.
- S. Knothe. Time influence on shaping of subsidence trough. *Archives of Mining Science*, 1 (1) :21–30, 1953.
- V. A. Kontogianni and S. C. Stiros. Induced deformation during tunnel excavation : evidence from geodetic monitoring. *Engineering geology*, 79(1-2) :115–126, 2005.
- H. Kratzsch. *Mining subsidence engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.
- R. Kukutsch, V. Kajzar, P. Konicek, P. Waclawik, and J. Ptacek. Possibility of convergence measurement of gates in coal mining using terrestrial 3d laser scanner. *Journal of sustainable mining*, 14(1) :30–37, 2015.
- L. Lagneu-Hérenger. *Géologie du bassin potassique d'Alsace*. 1965.
- D. Lague, N. Brodu, and J. Leroux. Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the rangitikei canyon (nz). *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 82 :10–26, 2013.
- W. T. Lane and J. H. Roberts. *The Principles of Subsidence and the Law of Support in Relation to Colliery Undertakings*. AA Knopf, Limited, 1929.
- M. Langer. The rheological behaviour of rock salt. In *Proc. 1<sup>st</sup> Conf. Mech. Beh. of Salt*, 1984.
- F. Laouafa, J. Pinte, and M. Ghoreychi. Étude géomécanique du stockage de stocamine. Technical report, 2010.
- J.-M. Larroque. *Analyse de la déformation de la série salifère du bassin potassique de Mulhouse, et évolution du champ de contraintes dans le sud du fossé rhénan au tertiaire et à l'actuel*. PhD thesis, Montpellier 2, 1987.
- W. Lawrence. A method for the design of longwall gateroad roof support. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4) :789–795, 2009.
- E. Leeman. The measurement of stress in rock : Part i : The principles of rock stress measurements. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 65 (2) :45–81, 1964.

- S. G. Lekhnitskii. *Theory of elasticity of an anisotropic elastic body*. Holden-day, 1963.
- W. Li, Y. Han, T. Wang, and J. Ma. Dem micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 46 :38–46, 2017.
- Z.-W. Li, W. Xu, G. Feng, J. Hu, C. Wang, X. Ding, and J. Zhu. Correcting atmospheric effects on insar with meris water vapour data and elevation-dependent interpolation model. *Geophysical journal international*, 189(2) :898–910, 2012.
- W.-g. Liang, C.-h. Yang, Y.-s. Zhao, M. Dusseault, and J. Liu. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(3) :400–411, 2007.
- D. D. Lichti and M. G. Licht. Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 36(5) :155–160, 2006.
- Q. Lin, J. F. Vesecky, and H. A. Zebker. New approaches in interferometric sar data processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(3) :560–567, 1992.
- D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2) :91–110, 2004.
- Y. Lucas, M. Haushalter, A. Clement, B. Fritz, and F. Chabaux. Hydrogeochemical modelling of the alsace groundwater pollution by the potash mine spoil heaps. In *Post-Mining 2008 Conference, Nancy, France*, 2008.
- Y. Luo and S. Peng. Long-term subsidence associated with longwall mining-its causes, development and magnitude. *MINING ENGINEERING-NEW YORK THEN LITTLETON COLORADO-*, 52(10) :49–54, 2000.
- F. Lutz. *Die Verteilung von Bromid in gezüchteten und natürlichen chloridischen Salzminen*. na, 1975.
- H. Lutz. Cartographie, traitement et interprétation des données gravimétriques du fossé rhénan méridional. Technical report, 1999.
- M. Lutz and M. Cleintuar. Geological results of a hydrocarbon exploration campaign in the southern upper rhine graben (alsace centrale, france). *Bulletin für angewandte Geologie*, 4 :3–80, 1999.
- B. K. Lynch, J. Marr, J. A. Marshall, and M. Greenspan. Mobile lidar-based convergence detection in underground tunnel environments. *Queen’s University Online*, 2017.
- V. Maïkovsky. *Contribution à l’étude paléontologique et stratigraphique du bassin potassique d’Alsace*, volume 6. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 1941.

- A. Majdi, F. P. Hassani, and M. Y. Nasiri. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 98 : 62–72, 2012.
- E. Martini. Nannoplankton-massenvorkommen in den mittleren pechelbronner schichten (unter-oligozän). *Oberrhein. Geol. Abh.*, 22(3) :1–12, 1973.
- J. Marts, R. Gilmore, J. Brune, G. Bogin Jr, J. Grubb, and S. Saki. Dynamic gob response and reservoir properties for active longwall coal mines. *Mining Engineering*, 66(12) :59–66, 2014.
- D. Massonnet and F. Adragna. Synthetic aperture radar : New processing concepts. In *10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, pages 1323–1326. IEEE, 1990.
- D. Massonnet and K. L. Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface. *Reviews of geophysics*, 36(4) :441–500, 1998.
- G. M. Matheson and A. Eckert-Clift. Characteristics of chimney subsidence and sink hole development from abandoned underground coal mines along the colorado front range. In *Proceedings of the 2nd Workshop on Surface Subsidence due to Underground Mining*, pages 204–214, 1986.
- MDPA. Affaissements et dégâts de surface. Technical report, 2008a.
- MDPA. Historique des méthodes d’exploitation du fond aux mines domaniales de potasse d’alsace. Technical report, 2008b.
- MDPA and Cesame. L’ennoyage des mines de potasse. Technical report, 2008.
- M. Meriaux and E. Gannat. Connaissances actuelles sur la potasse en france. In *Annales des Mines*, volume 186, pages 167–76, 1980.
- S. Miao, M. L. Wang, and H. L. Schreyer. Constitutive models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt. *Journal of Engineering Mechanics*, 121 (10) :1122–1129, 1995.
- F. Mohammadimanesh, B. Salehi, M. Mahdianpari, B. Brisco, and M. Motagh. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (insar) : A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(4) :247–262, 2018.
- O. Mora, J. J. Mallorqui, and A. Broquetas. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric sar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10) :2243–2253, 2003.

- O. Moreno, W. Hustrulid, and A. Harack. Support capabilities of rock fill - an experimental study. In *Proceedings of the conference on the application of rock mechanics to cut and fill mining*, pages 119–127, 1981.
- K. Morsy and S. Peng. Numerical modeling of the gob loading mechanism in longwall coal mines. In *Proc. of the 21st International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia*, pages 58–67, 2002.
- M. Motagh, T. R. Walter, M. A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn, and J. Zschau. Land subsidence in iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16), 2008.
- D. Munson and P. Dawson. Salt-constitutive modeling using mechanism maps. Technical report, Sandia National Labs., 1981.
- T. Nalpas and J.-P. Brun. Salt flow and diapirism related to extension at crustal scale. *Tectonophysics*, 228(3-4) :349–362, 1993.
- G. B. National Coal Board. *Subsidence Engineers' Handbook*. 1966.
- D. Nguyen-Minh and J. Bergues. A global approach to the short term response of a hard marl. In *8th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1995.
- M. A. Nikolinakou, P. B. Flemings, and M. R. Hudec. Modeling stress evolution around a rising salt diapir. *Marine and Petroleum Geology*, 51 :230–238, 2014.
- F. Norton. Creep of steel at high temperature, 1929.
- S. Olivella and A. Gens. A constitutive model for crushed salt. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 26(7) :719–746, 2002.
- R. Orchard and W. Allen. Time dependence in mining subsidence : In minerals and the environment, paper 26. figs, refs. instrn. min. metall. 1974, 17p. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 11, page A227. Pergamon, 1974.
- V. Palchik. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines. *Environmental Geology*, 42(1) :92–101, 2002.
- V. Palchik. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden : field measurements and prediction. *Environmental Geology*, 48(1) :68–80, 2005.
- D. Pappas and C. Mark. Behavior of simulated longwall gob material. Technical report, United States. Bureau of Mines., 1993.

- A. Pasamehmetoglu. *An investigation into time-dependent aspects of mining subsidence*. PhD thesis, Ph. D. Thesis, University of Nottingham, p 190, 1972.
- E. Pathier. *Apports de l'interférométrie RADAR différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan*. PhD thesis, Marne-la-Vallée, 2003.
- C. J. Peach and C. J. Spiers. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock. *Tectonophysics*, 256(1-4) :101–128, 1996.
- M. Pejić. Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection. *Tunnelling and underground space technology*, 37 :199–206, 2013.
- Z. Perski, R. Hanssen, A. Wojcik, and T. Wojciechowski. Insar analyses of terrain deformation near the wieliczka salt mine, poland. *Engineering Geology*, 106(1-2) :58–67, 2009.
- N. Pfeifer and C. Briese. Laser scanning—principles and applications. In *GeoSiberia 2007-International Exhibition and Scientific Congress*. Citeseer, 2007.
- J.-P. Piguet and F. Wojtkowiak. Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. In *Journée technique CdF, Hombourg-Haut, France*, 2000.
- E. Poiate Jr, A. Maia, J. L. Falcao, et al. Well design for drilling through thick evaporite layers. In *IADC/SPE Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- S. Popinet. Gerris : a tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 190(2) :572–600, 2003.
- D. Poutoukis. *Hydrochimie, teneurs isotopiques et origine des saumures associées aux gisements de potasse d'Alsace*. PhD thesis, Paris 11, 1991.
- A. Pouya. *Comportement rhéologique du sel gemme. Application à l'étude des excavations souterraines*. PhD thesis, Marne-la-vallée, ENPC, 1991.
- C. Prati, A. Ferretti, and D. Perissin. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne sar observations. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4) :161–170, 2010.
- A. Preusse, H. Kateloe, and A. Sroka. Subsidence and uplift prediction in german and polish hard coal mining. *Das Markscheidewesen*, 120 :23–34, 2013.
- J. K. Pringle, P. Styles, C. P. Howell, M. W. Branston, R. Furner, and S. M. Toon. Long-term time-lapse microgravity and geotechnical monitoring of relict salt mines, marston, cheshire, uk long-term time-lapse subsidence study. *Geophysics*, 77(6) :B287–B294, 2012.

- M. Przyłucka, G. Herrera, M. Graniczny, D. Colombo, and M. Béjar-Pizarro. Combination of conventional and advanced dinsar to monitor very fast mining subsidence with terrasars-x data : Bytom city (poland). *Remote Sensing*, 7(5) :5300–5328, 2015.
- D. Raucoules, C. Maisons, C. Carnec, S. Le Mouelic, C. King, and S. Hosford. Monitoring of slow ground deformation by ers radar interferometry on the vauvert salt mine (france) : Comparison with ground-based measurement. *Remote sensing of environment*, 88(4) : 468–478, 2003.
- D. Raymond and J.-P. Rudant. Ers-sar interferometry : Potential and limits for mining subsidence detection. *European Space Agency-Publications-ESA SP*, 414 :541–544, 1997.
- M. Raynal, J. Laurens, and R. AndréJehan. In situ tests on backfilling and surrounding host-rock in the case of a radioactive waste disposal in a layered salt formation. *Engineering geology*, 34(3-4) :281–293, 1993.
- R. Richard, J. Randolph, and D. Zipper. High extraction mining, subsidence, and virginia’s water resources, chapter 4. subsidence effects on water resources. *Virginia Center for Coal & Energy Research. Virginia Polytechnic Institute and state University, Virginia*, pages 17–20, 1990.
- N. Ripperda and C. Brenner. Marker-free registration of terrestrial laser scans using the normal distribution transform. *Proceedings of the ISPRS working group*, 4, 2005.
- V. Robreau. étude gravimétrique d’un dôme de sel dans la région d’ensisheim. Technical report, 2004.
- P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, and R. M. Goldstein. *Synthetic aperture radar interferometry*. 1998.
- P. A. Rosen, S. Hensley, G. Peltzer, and M. Simons. Updated repeat orbit interferometry package released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(5) :47–47, 2004.
- P. A. Rosen, E. Gurrola, G. F. Sacco, and H. Zebker. The insar scientific computing environment. In *EUSAR 2012 ; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pages 730–733. VDE, 2012.
- Y. Rotstein, J.-B. Edel, G. Gabriel, D. Boulanger, M. Schaming, and M. Munschy. Insight into the structure of the upper rhine graben and its basement from a new compilation of bouguer gravity. *Tectonophysics*, 425(1-4) :55–70, 2006.
- S. Roussé, P.-Y. Filleaudeau, G. C. Mermy, A. Letteron, and M. Schaming. Integrated stratigraphic and petroleum system modeling study of the southern upper rhine graben. In *International Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 3-6 April 2016*, pages 35–35. Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum, 2016.

- M. L. Rucker, B. B. Panda, R. A. Meyers, and J. C. Lommler. Using insar to detect subsidence at brine wells, sinkhole sites, and mines. *Carbonates and Evaporites*, 28(1-2) : 141–147, 2013.
- J. Ryder and H. Wagner. 2d analysis of backfill as a means of reducing energy release rates at depth. *Unpublished research report, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg*, 1978.
- A. Sainoki and H. S. Mitri. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 66 :19–29, 2014.
- D. P. Sainsbury, B. L. Sainsbury, and L. Lorig. Investigation of caving induced subsidence at the abandoned grace mine. *Mining Technology*, 119(3) :151–161, 2010.
- M. Salamon. Elastic moduli of a stratified rock mass. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 5, pages 519–527. Elsevier, 1968.
- M. Salamon. Mechanism of caving in longwall coal mining. In *Rock mechanics contributions and challenges : Proceedings of the 31st US symposium*, pages 161–168. Golden, Colorado, 1990.
- E. F. Salmi, M. Nazem, and M. Karakus. The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 91 :59–71, 2017.
- S. Samieie-Esfahany, R. Hanssen, K. van Thienen-Visser, and A. Muntendam-Bos. On the effect of horizontal deformation on insar subsidence estimates. In *Proceedings of the Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy*, volume 30, 2009.
- S. Samsonov, N. d'Oreye, and B. Smets. Ground deformation associated with post-mining activity at the french–german border revealed by novel insar time series method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23 :142–154, 2013.
- J. Schindling and C. Gibbes. Lidar as a tool for archaeological research : a case study. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6(4) :411–423, 2014.
- J. Schoenherr, Z. Schléder, J. L. Urai, R. Littke, and P. A. Kukla. Deformation mechanisms of deeply buried and surface-piercing late pre-cambrian to early cambrian ara salt from interior oman. *International Journal of Earth Sciences*, 99(5) :1007–1025, 2010.
- M. Schuler. *Environnements et paléoclimats paléogènes : palynologie et biostratigraphie de l'Eocène et de l'Oligocène inférieur dans les fossés rhénan, rhodanien et de Hesse*, volume 190. Editions du BRGM, 1990.

- T. Schulz, F. Lemy, and S. Yong. Laser scanning technology for rock engineering applications. *Optical 3-D Measurement Techniques VII (Eds. : Grün, Kahmen), Austria*, pages 50–59, 2005.
- P. Senseny, F. Hansen, J. Russell, N. Carter, and J. Handin. Mechanical behaviour of rock salt : phenomenology and micromechanisms. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, volume 29, pages 363–378. Elsevier, 1992.
- M. M. Singh. Mine subsidence. Technical report, Society of Mining Engineers of AIME, Littleton, CO, 1986.
- M. M. Singh and F. S. Kendorski. Strata disturbance prediction for mining beneath surface water and waste impoundments : Proc 1st conference on ground control in mining. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 20, pages 76–89. Pergamon, 1981.
- C. Sittler. Le pétrole dans le département du haut-rhin. bilan d'un siècle et demi de recherches et d'exploitations. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 25(2) :151–161, 1972.
- G. Sjaardema and R. D. Krieg. *A constitutive model for the consolidation of WIPP crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations*. Sandia National Laboratories, 1987.
- B. A. Slaker. *Monitoring underground mine displacement using photogrammetry and laser scanning*. PhD thesis, Virginia Tech, 2015.
- B. A. Slaker and E. C. Westman. Identifying underground coal mine displacement through field and laboratory laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1) :083544, 2014.
- K. Slimane, A. Cournot, J.-F. Durand-Smet, and C. Trentesaux. In situ study and modeling of the mechanical behavior of a large diameter vertical blind hole in marl. In *Proceedings of the 1996 international conference on deep geological disposal of radioactive waste*, 1996.
- K. Spaans and A. Hooper. Insar processing for volcano monitoring and other near-real time applications. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 121(4) :2947–2960, 2016.
- C. Spiers and R. Brzesowsky. Densification behaviour of wet granular salt : Theory versus experiment. In *Seventh Symposium on salt*, volume 1, pages 83–92. Elsevier Amsterdam, 1993.
- C. Spiers, P. Schutjens, R. Brzesowsky, C. Peach, J. Liezenberg, and H. Zwart. Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1) :215–227, 1990.

- A. Sroka, K. Tajdus, and A. Preusse. Calculation of subsidence for room and pillar and longwall panels. In *2011 Underground Coal Operators' Conference*, 2011.
- A. M. Starfield and A. L. Bleloch. *Building models for conservation and wildlife management*. Macmillan, 1986.
- A. M. Starfield and P. Cundall. Towards a methodology for rock mechanics modelling. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, pages 99–106. Elsevier, 1988.
- K. Staudtmeister and R. Rokahr. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4) : 300–e1, 1997.
- D. Stewart, R. Rein, and D. Firewick. Surface subsidence at henderson mine. *Geomechanics applications in underground hardrock mining*. New York : Society of Mining Engineers, pages 203–12, 1984.
- S. Stiros and V. Kontogianni. Mean deformation tensor and mean deformation ellipse of an excavated tunnel section. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8) :1306–1314, 2009.
- R. Strauch, V. Derr, and R. Cupp. Atmospheric water vapor measurement by raman lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2 :101–108, 1971.
- N. Styler et al. Prediction of inter-strata movements above longwall faces. In *The 25th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1984.
- A. Tallon. La technologie 3d au service de notre-dame. *Notre-Dame de Paris*, 2012.
- A. Tarantola. *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*, volume 89. siam, 2005.
- J. Telling, A. Lyda, P. Hartzell, and C. Glennie. Review of earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169 :35–68, 2017.
- L. Thorel. *Plasticité et endommagement des roches ductiles. Application au sel gemme*. PhD thesis, 1994.
- C. K. Toth and G. Petrie. Terrestrial laser scanners. In *Topographic Laser Ranging and Scanning*, pages 29–88. CRC Press, 2018.
- H. Tran Manh. *Comportement des tunnels en terrain poussant*. PhD thesis, Paris Est, 2014.
- N. Trauth, E. Gannat, J. Schlund, and G. Truc. Évaporites et faciès associés au paléogène. In *Synthèse géologique du Sud-Est de la France*, volume 125, chapter Paléogène, pages 456–462. Mém. Bur. Rech. géol. min., Orléans, 1984.

- F. Trippetta, C. Collettini, P. Meredith, and S. Vinciguerra. Evolution of the elastic moduli of seismogenic triassic evaporites subjected to cyclic stressing. *Tectonophysics*, 592 :67–79, 2013.
- A. Tronin. Remote sensing and earthquakes : A review. *Physics and Chemistry of the Earth, parts A/B/C*, 31(4-9) :138–142, 2006.
- E. Trouve, J.-M. Nicolas, and H. Maitre. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36 (6) :1963–1972, 1998.
- R. M. Tucker and J. Cann. A model to estimate the depositional brine depths of ancient halite rocks : implications for ancient subaqueous evaporite depositional environments. *Sedimentology*, 33(3) :401–412, 1986.
- J. Urai, Z. Schléder, C. Spiers, and P. Kukla. Flow and transport properties of salt rocks. *Dynamics of complex intracontinental basins : The central European basin system*, pages 277–290, 2008.
- J. L. Urai. Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline bischofite. *Tectonophysics*, 96(1-2) :125–157, 1983.
- J. L. Urai, C. J. Spiers, H. J. Zwart, and G. S. Lister. Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature*, 324(6097) :554–557, 1986.
- B. Vallier. *La modélisation thermo-hydro-mécanique de l'exploitation d'un réservoir profond dans le Fossé Rhénan*. PhD thesis, Strasbourg, 2019.
- R. Van Gosliga, R. Lindenbergh, and N. Pfeifer. *Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning*. na, 2006.
- A. Vervoort and P.-Y. Declercq. Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(1) :53–59, 2018.
- M. Veschkens, W. Unland, and H. Kories. Development of tools for managing the impacts on surface due to changing hydrological regimes surrounding closed underground coal mines (ecsc coal rtd programme, contract 7220-pr-136). In *Post-Mining 2005, Nancy, France, November 16-17*. 2005.
- G. Vigier. *Contribution à l'analyse du comportement des roches et des bancs en conditions minières. Le cas des formations salifères*. PhD thesis, Strasbourg, 1983.
- J. Vogt and M. Mieg. *Note sur la découverte des sels de potasse en Haute-Alsace*. Bader, 1908.

- G. Vouille. Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine amélie. aspects mécaniques du problème. Technical report, Ecole des Mines de Paris, 1992.
- W. Wagner. *La géologie des puits des mines de potasse de la Haute-Alsace (avec un Atlas de 42 planches)*, volume 1. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 1929.
- D. Walter, J. Hoffmann, B. Kampes, and A. Sroka. Radar interferometric analysis of mining induced surface subsidence using permanent scatterers (45). In *Envisat & ERS Symposium*, volume 572, 2005.
- W. Wang, W. Zhao, L. Huang, V. Vimarlund, and Z. Wang. Applications of terrestrial laser scanning for tunnels : a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(5) :325–337, 2014.
- W. Wawersik and C. Stone. A characterization of pressure records in inelastic rock demonstrated by hydraulic fracturing measurements in salt. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 26, pages 613–627. Elsevier, 1989.
- W. R. Wawersik and D. W. Hannum. Mechanical behavior of new mexico rock salt in triaxial compression up to 200 c. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 85(B2) :891–900, 1980.
- U. Wegmuller, C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann. Monitoring mining induced surface deformation. In *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 3, pages 1933–1935. IEEE, 2004.
- D. D. Wenkert. The flow of salt glaciers. *Geophysical Research Letters*, 6(6) :523–526, 1979.
- B. N. Whittaker and D. J. Reddish. *Subsidence : Occurrence, prediction, and control*, volume 528. Elsevier Amsterdam, 1989.
- T. J. Wright, B. E. Parsons, and Z. Lu. Toward mapping surface deformation in three dimensions using insar. *Geophysical Research Letters*, 31(1), 2004.
- M. A. Wulder, J. C. White, R. F. Nelson, E. Næsset, H. O. Ørka, N. C. Coops, T. Hilker, C. W. Bater, and T. Gobakken. Lidar sampling for large-area forest characterization : A review. *Remote Sensing of Environment*, 121 :196–209, 2012.
- G. Xie, J. Chang, and K. Yang. Investigations into stress shell characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1) :172–181, 2009.
- N. Xu, P. H. Kulatilake, H. Tian, X. Wu, Y. Nan, and T. Wei. Surface subsidence prediction for the wutong mine using a 3-d finite difference method. *Computers and Geotechnics*, 48 :134–145, 2013.

- C. Yang, J. Daemen, and J.-H. Yin. Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(2) :233–242, 1999.
- X. Yao and D. Reddish. Analysis of residual subsidence movements in the uk coalfields. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 27(1) :15–23, 1994.
- B. Yasitli et al. 3-d numerical modelling of stresses around a longwall panel with top coal caving. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 105(5) : 287–300, 2005.
- H. Yavuz. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2) :193–205, 2004.
- W. D. Zacherl. *Method for registering lidar data in restrictive, tunnel-like environments*. PhD thesis, 2016.
- H. A. Zebker and J. Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5) :950–959, 1992.
- A. Zhang, J. Lu, and J.-W. Kim. Detecting mining-induced ground deformation and associated hazards using spaceborne insar techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1) :211–223, 2018.
- C. Zhang, S. Tu, L. Zhang, Q. Bai, Y. Yuan, and F. Wang. A methodology for determining the evolution law of gob permeability and its distributions in longwall coal mines. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(2) :181, 2016.
- C. Zhang, S. Tu, and Y. Zhao. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf : a review. *Environmental earth sciences*, 78(1) :27, 2019.
- X. Zhu, G. Guo, and Q. Fang. Coupled discrete element–finite difference method for analyzing subsidence control in fully mechanized solid backfilling mining. *Environmental Earth Sciences*, 75(8) :683, 2016.





**Guillaume MODESTE**

**Estimation et évolution des vides miniers aux Mines  
Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) par mesures  
géodésiques et modélisation géomécanique**

École doctorale



Sciences de la terre

et de l'environnement | ED 413

Université de Strasbourg

**Résumé :**

Les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace sont sujettes à un ennoyage tardif, conséquence de l'extraction du minerai. L'eau suinte le long des puits miniers rebouchés, remplissant les vides résiduels et perturbant la mécanique du milieu. L'estimation des vides miniers est alors d'un intérêt de premier ordre.

La technique InSAR est appliquée pour étudier l'évolution des affaissements miniers en lien avec la compaction des matériaux foudroyés. En traitant les archives d'images SAR de 1995 à 2018, les déplacements verticaux annuels passent de l'échelle centimétrique à millimétrique et les déplacements sont encore détectables près de 20 ans après la fin des travaux.

En complément, des mesures lidar sont menées dans des galeries de sel à 550 m de profondeur pour caractériser le comportement mécanique du massif.

L'ensemble des études et observations passées du bassin potassique alsacien concernant sa géologie et son champ de contraintes ambiant sont synthétisées au sein d'un modèle équivalent. En combinant ce modèle à nos données, nous estimons des vides résiduels dans certains secteurs, de l'ordre de 20% en 2020, avec une vitesse de fermeture tendant vers 0.1%/an.

Mots clés : InSAR, lidar, modélisation géomécanique, affaissement résiduel, vides miniers, mine de sel

**Abstract :**

The "Mines Domaniales de Potasse d'Alsace" are exposed to a phenomenon of flooding due to the ore extraction. The water seeps down along the closed mine shafts, filling the remaining voids and disturbing the mechanical equilibrium of the ground. The estimation of the residual voids is then of prime order.

InSAR technique is applied to study the mining subsidence evolution related to the compaction of caved materials at depth. By processing available SAR archives from 1995 to 2018, annual vertical displacements decrease from centimetric scale to millimetric one and displacements are still occurring, about 20 years after the end of activity.

Alongside those processing, lidar measurements are conducted inside salt galleries at 550 m deep to characterise the mechanical behaviour of the hosting rock.

The cumulated past observations and studies of the Alsatian potassic basin about its geology and natural stress-strain fields are synthesized within an equivalent model. By combining this model to our results and acquisitions, we estimate the residual voids at depth for specific panels, about 20% in 2020, with a closure rates decreasing to 0.1%/year.

Keywords : InSAR, lidar, geomechanical modeling, residual subsidence, mining voids, salt mine