



Modélisation des phénomènes thermo-hydrauliques dans des réservoirs fracturés sur des maillages non structurés : application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe

Margaux Raguenel

► To cite this version:

Margaux Raguenel. Modélisation des phénomènes thermo-hydrauliques dans des réservoirs fracturés sur des maillages non structurés : application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe. Géologie appliquée. Université de Lorraine, 2019. Français. NNT : 2019LORR0338 . tel-02939370

HAL Id: tel-02939370

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02939370>

Submitted on 15 Sep 2020

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Modélisation des phénomènes thermo-hydrauliques dans des réservoirs fracturés sur des maillages non structurés : application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 septembre 2019
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Margaux RAGUENEL

Composition du jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Prof. Dr. Eva SCHILL	TU Darmstadt, Allemagne
	Prof. Dr. Andrea MOSCARIELLO	Université de Genève, Suisse
<i>Examineurs :</i>	Dr. Christelle LOISELET	BRGM, France
	Dr. Dominique BRUEL	Armines, France
<i>Directrice de thèse :</i>	Prof. Dr. Judith SAUSSE	Université de Lorraine, France
<i>Co-directeur de thèse :</i>	Dr. François BONNEAU	Université de Lorraine, France
<i>Invités :</i>	Prof. Dr. Guillaume CAUMON	Université de Lorraine, France
	Prof. Dr. Thomas DRIESNER	ETHZ, Suisse

GeoRessources - UMR 7359

Université de Lorraine - ENSG / CNRS / CREGU

2 rue du Doyen Marcel Roubault - BP 10162

54505 Vandœuvre-lès-Nancy, FRANCE

Remerciements

Tout d'abord un grand merci à mes directeurs de thèse, qui m'ont accompagnée et guidée tout au long de ces années : Judith, pour ta confiance, ton optimisme et tes encouragements permanents ; François, pour ton énergie quotidienne, ton investissement et toutes tes idées, et Thomas, each time we discussed, you helped me go further with your inputs and expertise.

Merci aux membres du jury d'avoir évalué ce travail, et apporté leurs remarques et questions pour l'enrichir et l'améliorer.

Merci à tous les membres du programme GEOTREF et aux sponsors du consortium RING pour le financement de cette thèse ainsi que les échanges et discussions constructifs lors des différentes réunions, meetings et autres discussions informelles.

Thanks also to the ETHZ team for welcoming me twice, and supporting me remotely during all my CSMP++ adventures. Thanks also to Stephan Matthäi, for sharing your knowledge with me, and giving me keys to work with CSMP++.

Une transition toute naturelle entre la partie professionnelle et la partie amicale des remerciements se fait grâce à l'équipe RING. Cette équipe est plus qu'une équipe de travail, c'est une bande de copains, des échanges, du partage, de la convivialité, une vraie famille ! Merci donc à toute la famille RING, proche et éloignée. Un grand merci à Guillaume, pour m'avoir permis d'intégrer cette famille et pour ta bienveillance avec tous, à Pauline (et Benoît, un voisin au top) pour toutes les discussions engagées autour de la machine à café et tout le reste, à Paul pour les débriefs des résultats sportifs, à Christine, car je suis ta Margaux du labo, à Fifi, pour tout ce que tu apportes à l'âme de l'équipe, à Christophe pour toute ton aide, même sous Windows, à Mustapha, pour ses conseils avisés, et à toutes les générations de thésards que j'ai cotoyés, des plus anciennes : Jeanne (vive l'Allemagne), Charline, Jérémy, Guillaume, Arnaud (où sont les Geomag ?), Benjamin (partant pour un japonais ?), Jon (punk au grand coeur), Gabi (approved !), Antoine (et tes fameuses playlists), Marion (hummmm, les muffins) ; aux petits nouveaux : Nico (ahah, le petit jeune), Coco (on se met YouTube variétés française ?), Yves (je vais continuer à découvrir les mangas), Melchior (l'artiste), Paul (vive les gauchiasses), Zoé (la tentation était trop forte, elle revient un an après !) et Capucine (merci pour le soutien dans la dernière ligne droite), en passant par mes compagnons de promo : Pierre (dieu des triangles et

de la course), Modeste (un exemple) et Julien (que de chemin parcouru depuis ABZ). Merci également à Fatima, Sophie, Nageoi, Maryse et Armelle pour leur aide, qui rendent la thèse plus légère.

Merci à tous les amis du lycée, de la prépa et de Géol, pour ces moments de retrouvailles et de flashbacks qui aident à avancer.

Cette thèse n'aurait pas été la même sans l'équilibre et le soutien apportés par mes différentes activités nancéiennes. Tout d'abord le sport, un grand merci aux Cheminots du Badminton, Gabi (te revoilà) et Faustine et en particulier Marvin et Céline, notamment pour les trajets vers les urgences orthopédiques ! Les soirées jeux et autres avec l'équipe du Ventron, Joséphine, Quentin, Claire, Cécile et Sylvain (et surtout, vive la pédagogie dans les Vosges !). Le partage culturel, avec les équipes de bénévoles du FIFN et du NJP. Et enfin, le partage tout court, et tellement d'autres découvertes, avec les Amis de Poa.

Je ne peux pas écrire ces lignes sans penser à ceux qui ont accompagné le début de mon parcours en Normandie, à l'âge où notre personnalité se forge grâce à quelques figures emblématiques, et qui ne sont plus là pour que je leur dise merci de vive voix... Laure, Christian, merci.

Et bien sûr, un grand merci à mes parents et à toute ma famille pour leur soutien et leur accompagnement. Il est classique de dire que je ne serai pas là sans vous, mais c'est tellement vrai !

L'aventure de la thèse se termine, avec il faut l'avouer un brin de nostalgie. Je vais terminer par un merci généralisé à tous mes compagnons de route, passés et présents, quotidiens ou plus ponctuels, et rendez-vous à tous ici ou ailleurs pour la prochaine aventure !

Résumé

La quantification des ressources géologiques naturelles (huile, gaz, eau, dépôts minéraux, énergie géothermique, *etc*) nécessite une compréhension et une description précises des hétérogénéités géologiques et des processus physico-chimiques qui contrôlent leur formation, leur mise en place, leur préservation et leur récupération. Pour caractériser le comportement physique des réservoirs, des modèles géologiques en 2D, 3D et 4D servent de base aux simulations numériques. Un modèle numérique requiert l'intégration et l'homogénéisation de nombreuses données obtenues à différentes échelles. Cela exige hypothèses, choix et simplifications pour représenter la complexité des objets géologiques et des processus physiques avec un nombre limité de paramètres. Dans le cas des études de réservoirs géothermiques haute température, il faut faire face à la complexité géométrique et structurale liée aux environnements volcaniques et à la résolution de processus physiques couplés. Cela demande l'utilisation de recherches effectuées dans différents domaines, avec différents outils. L'interopérabilité entre ces outils théoriques et numériques est un défi. Ces travaux de thèse proposent de pallier ce problème en réalisant des modèles géologiques dont la complexité est préservée à l'aide de maillages non structurés et d'outils permettant de réaliser des simulations de processus physiques couplés réalistes.

Des stratégies de conservation de l'intégrité d'un modèle structural sont proposées, respectant les données et l'organisation des structures géologiques. Différents outils ont été élaborés pour identifier et préserver ces structures jouant un rôle particulier dans les processus physiques, comme les couches, les failles ou les frontières d'un modèle. Une représentation numérique adaptée à la géologie (permise par la librairie RINGMesh utilisant les concepts géologiques dans la description du modèle numérique) préserve ces différents éléments depuis le géomodeleur (SKUA-GocadTM) jusqu'aux simulations physiques (CSMP++). Les outils créés sont inclus dans une chaîne intégrative, allant de la modélisation géologique aux simulations physiques, *i.e.* de la caractérisation de la géométrie des structures vers la quantification des ressources.

Les méthodologies développées sont d'abord validées grâce à des solutions analytiques et appliquées sur des cas synthétiques. Elles sont ensuite utilisées pour comprendre l'évolution des processus thermo-hydrauliques dans le réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe (cadre du programme GEOTREF).

Une première étude menée en 2D compare le réalisme physique de différents scénarios géologiques possibles selon les données de terrain (profils de température et campagne magnétotellurique). Cette étude reproduit les profils de température observés pour deux scénarios étudiés, et semble exclure l'hypothèse de transferts latéraux de chaleur à l'échelle de l'île.

Une seconde étude réalisée en 3D, avec une complexification progressive du modèle géologique, quantifie l'impact des structures sur le comportement physique du réservoir. Il apparaît que le comportement thermique du modèle réalisé est principalement influencé par la topographie de la zone, malgré l'ajout d'hétérogénéités plus perméables telles des corridors de failles. Cependant, des hétérogénéités imperméables comme les surfaces de glissements n'ont pas été incluses, et des incertitudes majeures concernant la position, la taille et la forme de la source de chaleur pourraient être étudiées.

Ces travaux de thèse ont ainsi permis (1) de mettre en place un environnement numérique propice pour tester l'impact des hétérogénéités géologiques sur le comportement physique des réservoirs, (2) d'ouvrir la voie vers une meilleure compréhension et caractérisation du comportement hydraulique et thermique d'un réservoir géothermique, et particulièrement vers la quantification de l'influence de la géométrie et de la connectivité des hétérogénéités sur les processus physiques.

Abstract

The quantification of natural geological resources (oil, gas, water, ore deposits, geothermal energy, etc) calls for a precise understanding and description of the geological heterogeneities and physical and chemical processes that influence their formation, their settings, their preservation and their recovery. In order to understand the physical behavior of subsurface reservoirs, 2D, 3D and 4D geological models must be developed as basis for numerical simulations. A numerical model needs the integration and homogenization of various and multi-scale data. This implies hypothesis, choices and simplifications to represent the complexity of geological objects and physical processes with a limited number of parameters. In the case of high temperature geothermal studies, one must face both the geometric and structural complexity of volcanic environments and the resolution of coupled physical processes. This calls for the use of several developments made in different research domains, with different tools. However, interoperability between all these theoretical and numerical tools remains a challenge. This work tackles this issue by preserving the geometrical complexity of geological models thanks to unstructured grids and tools which allows realistic physical simulations.

New strategies are proposed to preserve the geological characteristics of the model, by honoring field data and the organization of geological structures during physical simulations. Several tools have been developed to identify and represent these structures that play a fundamental role in physical processes, such as layers, faults or model boundaries. An adapted numerical representation (allowed by the RINGMesh library which focuses on using geological concepts in the model description) preserves these elements from the geomodeler (SKUA-GocadTM) to the physical simulator (CSMP++). These tools are part of an integrated workflow, going from geological modeling to physical simulations, i.e. from geometrical characterization of the main geological structures to the quantification of reservoir resources.

The developed methodologies are first benchmarked with analytical solutions and applied on synthetic cases. They have then been used in a case study to understand the evolution of thermo-hydraulic processes in the geothermal reservoir of Basse-Terre, Guadeloupe (in the frame of the GEOTREF project). A first study has been led in 2D to assess the physical realism of three possible geological scenarios designed in regard of the available field data, such as temperature pro-

files and MT survey. This study reproduces the observed temperature profiles in two of the studied scenarios and seems to exclude the hypothesis of strong lateral heat transfers at the island scale.

A second study has then been realized in 3D, using a progressive model complexification approach to test the impact of heterogeneities on the global physical behavior of the reservoir. It appears that the thermal behavior of the designed model is mainly influenced by the topography of the area, rather than the introduction of permeable heterogeneities, such as fault corridors. However, impermeable features such as sliding surfaces have not been added and a major uncertainty about the heat source position, shape and size remains and could be further studied.

These works have allowed (1) to build of a numerical environment that facilitates the tests regarding the impact of geological heterogeneities on the physical behavior of reservoirs, (2) to open the path toward a better understanding and characterization of the thermo-hydraulic behavior of a geothermal reservoir, and especially toward the quantification of the influence of the geometry and connectivity of heterogeneities on physical processes.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Introduction	1
I Modélisation du comportement thermo-hydraulique d'un réservoir géothermique : état de l'art	13
I.1 Mise en place du modèle géologique : la transcription des connaissances géologiques à l'ordinateur	16
I.1.1 Interprétation et intégration des données	16
I.1.2 Création d'un modèle géologique	17
I.1.3 Outils de géomodélisation	20
I.2 La discrétisation du problème : étape clé entre la modélisation géologique et physique	21
I.2.1 La discrétisation de l'espace	21
I.2.2 La transformation des équations grâce à différents schémas de discrétisation numériques	22
I.3 Mise en place du modèle physique : équations et conditions initiales et aux limites	25
I.3.1 Présentation des phénomènes physiques impliqués en géothermie	25
I.3.2 Les conditions initiales et aux limites	27
I.3.3 Différents outils de simulation	27
I.4 Application à la géothermie : bilan et problématiques principales .	30
I.4.1 Éléments nécessaires à une simulation physique sur un modèle géologique	30
I.4.2 Les verrous présents lors du processus intégratif de modélisation	31
I.4.3 Exemples d'études réalisées sur des systèmes géothermiques	31

II Contexte géologique de l'île de Basse-Terre, Guadeloupe	33
II.1 Contexte géodynamique régional	34
II.1.1 Les îles des Petites Antilles, au cœur d'une zone de subduction	34
II.1.2 Un arc volcanique actif	34
II.1.3 Des événements tectoniques majeurs	35
II.2 Éléments de géologie de l'île de Basse-Terre	35
II.2.1 Un archipel au cœur de nombreux systèmes de failles . . .	36
II.2.2 Histoire volcanique de l'île de Basse-Terre	38
II.2.3 La Soufrière, volcan au coeur de l'île	41
II.3 Les zones de subduction, un environnement propice à la géothermie	43
II.3.1 Le champ de Bouillante	43
II.3.2 L'archipel des Antilles, un ensemble d'analogues de réservoirs	46
II.4 Nouvelles données acquises dans le cadre du projet GEOTREF . .	47
III Méthodologie de reconstruction, transfert et conservation des informations géologiques lors des simulations physiques.	49
III.1 Reconstruction des informations topologiques d'une coupe 2D dans un modèle géologique	50
III.1.1 Description du workflow et des outils utilisés	50
III.1.2 Conservation de l'intégrité des informations lors des transferts	52
III.2 Methodology to ensure the conservation of geological information during transfer from geological modeller to physical simulation tool	59
III.3 Benchmark on the estimation of the stress near a borehole	62
III.3.1 Model set up	62
III.3.2 Results	63
III.4 Application to a complex geological model	65
III.5 Conclusion	67
IV Évaluation de différents modèles conceptuels du comportement thermo-hydraulique du réservoir de Basse-Terre	69
IV.1 Introduction	73
IV.2 Thermo-Hydrology of high-enthalpy systems	74
IV.3 Geological and geothermal context	75
IV.3.1 General context	75
IV.3.2 Geologic elements of geothermal relevance	75
IV.3.3 Constraints on the geothermal reservoir of the south of Basse-Terre Island	76
IV.4 From geology to numerical simulations	79
IV.4.1 Choice of the simulator	79
IV.4.2 Parametrization of the model	80
IV.4.3 Sensitivity study with a sub-model for a separate magmatic heat source under Bouillante	81

IV.5 Results	82
IV.6 Discussion	84
IV.7 Conclusion and perspectives	86
V Complexification progressive des hétérogénéités prises en compte dans la modélisation : méthodologie et application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe	89
V.1 Présentation du cadre général de la modélisation	90
V.2 Observations sur un cas synthétique	91
V.2.1 Motivations	91
V.2.2 Étapes de complexification	92
V.2.3 Résultats	92
V.3 Application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe	94
V.3.1 Description du processus physique et de la méthodologie de résolution	94
V.3.2 Description de la méthodologie de complexification mise en place	97
V.3.3 Résultats	100
V.4 Conclusion	103
Conclusions générales	105
Annexes	109
Résumé étendu correspondant au poster présenté lors de la conférence de l'EAGE Paris 2017, portant sur une analyse de sensibilité lors de la modélisation des transferts de fluides et de chaleur dans le réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe	109
Article correspondant au poster présenté lors du RING Meeting 2016, portant sur la découpe de maillages tétraédriques à partir de fonctions implicites	114
Liste des Figures	123
Liste des Tableaux	125
Liste des Algorithmes	126

Introduction

Les géosciences sont les sciences de l’observation et de l’étude de la Terre. Elles se basent sur des hypothèses concernant la genèse des roches, permettant d’expliquer les agencement et organisations observables. Ces hypothèses reposent sur la connaissance de concepts globaux à différentes échelles, sur la globalité de la planète ou plus régionalement. Elles s’appuient également sur des observations plus ponctuelles, comme des affleurements ou des forages.

Comprendre l’organisation en trois dimensions des roches dans le sous-sol est indispensable dans des domaines comme la prospection, l’exploitation, la protection des ressources naturelles minérales ou énergétiques, mais aussi la prévision des risques naturels (séismes, éruptions...). En effet, les roches présentent des hétérogénéités structurales et sédimentaires qui vont impacter leur comportement physique. La construction de modèles tridimensionnels statiques, représentant ces hétérogénéités à plusieurs échelles, est l’objet d’étude de la géomodélisation. Ces modèles sont ensuite la base de simulations dynamiques mettant en jeu des modèles de processus physiques comme les écoulements de fluides ou les transferts thermiques. Les résultats de ces simulations permettent de quantifier à la fois les ressources et les risques géologiques, et de prévoir l’évolution d’un système dans le temps.

Le(s) modèle(s) statique(s) et dynamique(s) ainsi créé(s) permet(tent) à la fois de valider les interprétations et hypothèses émises, mais également de supporter les décisions d’exploitation des ressources. Ce sont donc des outils puissants en géologie appliquée, permettant une aide à la décision et ainsi une meilleure gestion des risques.

Modèles géologiques : intégration de l’information dans des modèles numériques

La création de modèles géologiques nécessite l’intégration d’informations recueillies par des disciplines variées des géosciences (géophysique, géologie structurale, géomécanique, diagraphie...). Cette approche s’appuie sur la notion d’un modèle de Terre commun (*Shared Earth Model*), qui incite à la création de modèles intégrés, complets et interdisciplinaires [Perrin et Rainaud, 2013].

Dans cette thèse, nous allons distinguer les modèles statiques structuraux, qui s’attachent à la représentation des grandes structures du sous-sol, et les modèles physiques, qui représentent les phénomènes ayant lieu dans le sous-sol.

La construction d'un modèle structural est réalisée à partir de données ponctuelles et précises, comme des forages, des mesures d'affleurements, des diagraphies, ou de données plus étendues et moins précises, comme les données sismiques (*e.g.* Caumon et al. [2013], Collon et al. [2016]). Ce modèle structural est alors la base de la représentation du comportement des roches au travers leurs propriétés pétrophysiques, puis de la modélisation des phénomènes physiques (écoulements fluides, transferts thermiques...).

La modélisation du sous-sol est donc basée sur la réalisation de modèles statiques (géométrie et propriétés des roches) mettant en avant les grandes structures et hétérogénéités présentes dans le sous-sol, mais également de modèles dynamiques, s'appuyant sur les processus physiques ayant lieu en subsurface, notamment les écoulements de fluides.

Les processus physiques sont quant à eux modélisés grâce à leur description à l'aide d'équations mathématiques.

Ces équations étant complexes, il est généralement impossible de calculer leur solution analytiquement. Des méthodes de calcul numérique, s'appuyant sur des développements mathématiques et les technologies informatiques, ont ainsi été développées (*e.g.* Zienkiewicz et Taylor [2000], Hinkelmann [2006]).

Discrétisation et maillages en géologie

Ces méthodes numériques s'appuient sur une discrétisation du problème. Les équations sont ainsi résolues localement, sur des éléments discrets (triangles, quadrilatères, tétraèdres, hexaèdres...) qui découpent l'espace d'étude. L'ensemble de ces éléments discrets constitue un maillage. Ces éléments, qui représentent donc une certaine partie du sous-sol, sont ainsi le support, à la fois des méthodes numériques de résolution, mais également des propriétés transcrivant la nature et le comportement des roches. Le maillage est un élément-clé, puisqu'il est le support du modèle géologique et du modèle physique. Il doit respecter des critères numériques qui assurent la convergence vers une solution proche du comportement réel du sous-sol. Un élément du maillage (une cellule), peut être considéré comme un volume élémentaire représentatif (*Representative Elementary Volume* ou REV, Bear [1988]), dans lequel les propriétés sont homogènes et statistiquement stationnaires.

Différents types de maillages sont utilisés en géomodélisation, selon les applications et les moyens à disposition, la taille du modèle à représenter et la résolution voulue. Les principaux maillages utilisés sont : les voxels (maillages structurés composés d'hexaèdres réguliers), les grilles stratigraphiques ou *corner-point grids* (maillages structurés composés d'hexaèdres irréguliers alignés avec certaines structures géologiques) ou les maillages irréguliers, composés d'éléments mixtes. Les maillages structurés permettent d'utiliser des schémas de discrétisation plus connus, notamment pour la modélisation des écoulements. En revanche, les maillages hybrides permettent une plus grande flexibilité géométrique, ce qui permet de mieux représenter les géométries et connectivités des objets géologiques.

De nouvelles méthodologies de création de maillages adaptés à la géologie ont été développées récemment (*e.g.* Pellerin et al. [2014], Botella [2016]). Ces maillages permettent notamment de mieux prendre en compte la géométrie des structures géologiques.

Intégration de ces étapes clés dans une chaîne de modélisation

La modélisation du sous-sol suit classiquement, notamment dans l'industrie pétrolière, une séquence de plusieurs étapes permettant d'assurer la cohérence entre les données, les modèles géologiques et les modèles physiques (*e.g.* Ringrose et Bentley [2015]). Ainsi, pour chaque nouvelle étude, quel que soit son objectif (analyse de risques face à des séismes, suivi de la pollution du sol, exploitation de ressources minières...), différents spécialistes sont impliqués dans la chaîne de modélisation.

L'étude à grande échelle du comportement physique d'un réservoir implique ainsi des réflexions et des décisions conjointes prises à chacune des étapes de la géomodélisation. La complémentarité des différents acteurs de cette chaîne est un élément essentiel pour assurer la compatibilité entre les observations de terrain, les connaissances théoriques et les compétences pratiques à l'origine des modèles. Cependant, des verrous sont encore présents dans l'utilisation de cette chaîne et de nombreuses améliorations sont constamment proposées (*e.g.* Garner et al. [2013], Görz et al. [2017]).

Un des verrous lié à la mise en place de cette chaîne de modélisation est en particulier la communication entre les différentes spécialités, et l'intégration de manière cohérente de toutes les données. En effet, les spécialistes acquérant les données ne sont pas toujours les mêmes que ceux qui les interprètent, ni qui les intègrent dans les logiciels de modélisation. L'utilisation d'un vocabulaire, de concepts et d'outils communs apparaît comme nécessaire pour permettre cette communication et concilier les progrès réalisés dans les différents domaines.

Application à la géothermie

La géothermie s'intéresse à la fois à l'étude des processus thermiques ayant lieu sous terre, et à leur exploitation. La compréhension des structures géologiques et des processus physiques sont primordiaux pour caractériser et exploiter des réservoirs de chaleur qui sont souvent très localisés.

Différents types d'exploitation géothermique existent (voir par exemple Antics et Sanner [2007] pour un bilan en Europe) :

- la géothermie peu profonde à basse température, qui utilise la température quasi constante toute l'année avec des forages à moins de 150 mètres de profondeur. Il s'agit du type d'exploitation le plus développé.
- la géothermie profonde à haute température, avec des forages à quelques kilomètres de profondeur. Un projet de recherche avec usine pilote a notamment été

réalisé à Soultz-sous-Forêts depuis 1987, permettant de développer le système de l'EGS (*Enhanced Geothermal System*).

► la géothermie très profonde à très haute température, dans des systèmes bénéficiant d'un gradient thermique élevé, comme les régions volcaniques ou les zones de rifts.

Ces différents types de systèmes géothermiques ne mettent pas en œuvre la même complexité, à la fois dans les processus physiques impliqués, les structures géologiques rencontrées, et les moyens techniques à développer. La géothermie peu profonde est peu chère et peu risquée. En revanche, les deux autres méthodes sont plus incertaines. Les ressources moins accessibles et plus localisées nécessitent la mise en place d'infrastructures plus développées. Dans ce contexte, des études plus poussées et des modélisations sont réalisées en amont de l'exploitation pour minimiser les risques liés à l'exploration.

Les études précédemment réalisées dans le cadre de réservoirs géothermiques profonds mettent généralement en place l'une des simplifications suivantes : étude d'une zone réduite ciblée sur les puits d'exploitation, simplification des structures géologiques, ou simplification du processus physique d'écoulement de fluides et de transfert de chaleur, en omettant par exemple les changements de phase et en ne considérant que l'eau sous sa forme liquide (*e.g.* Kohl et al. [2000], Blöcher et al. [2015], Dolejš [2015]).

Ces études sont principalement focalisées sur l'étude spécifique de certains champs (*e.g.* Ingebritsen et al. [2016]). Cependant, des études plus générales s'intéressant au comportement global des réservoirs géothermiques et non aux spécificités de certains champs, notamment dans les systèmes à haut enthalpie résultants d'intrusions magmatiques, ont récemment été réalisées (*e.g.* Weis et al. [2014], Scott et al. [2015, 2016]).

Problématique

Dans cette thèse, nous nous attacherons à la mise en place de la chaîne de géomodélisation sur l'exemple particulier du réservoir géothermique de l'île de Basse-Terre, en Guadeloupe. Cela passe par la levée de certains des verrous techniques et scientifiques, notamment concernant la modélisation de processus physiques dans des réservoirs géologiques aux géométries complexes.

Différentes problématiques apparaissent pour l'application de la chaîne de modélisation à un réservoir géothermique complexe :

- Quelle est l'influence des structures complexes sur les processus d'écoulement et thermiques ?
- Comment conserver la complexité des structures géologiques tout au long de la modélisation des processus physiques ?
- Quel degré de complexité doit-on considérer ?

Contributions de cette thèse

Résumé des contributions

Dans cette thèse, nous présentons les contributions suivantes :

► le développement d'un workflow intégré permettant d'effectuer des simulations de processus physiques sur des modèles géologiques présentant des structures complexes. Cette méthodologie, développée en 2D et en 3D, permet une représentation explicite de la géométrie et de la topologie des structures géologiques, du géomodelleur jusqu'à la simulation de processus physiques, grâce à l'utilisation de maillages non structurés. Ce workflow est à la base de plusieurs présentations lors de conférences internationales et de l'article *in prep*, présenté Chapitre III.

► l'analyse du comportement thermo-hydrigue du réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe. Différentes simulations ont été réalisées pour tester de possibles scénarios géologiques expliquant le contexte de Basse-Terre.

Publications

^(a) *article à comité de lecture*, ^(o) *présentation orale*, ^(p) *poster*, ^(c) *article de conférence*, * *présentateur*

Articles à comité de lecture

^(a) **M. Raguanel***, T. Driesner, F. Bonneau (2019) *Numerical Modeling of the Geothermal Hydrology of the Volcanic Island of Basse-Terre, Guadeloupe*, Geothermal Energy Journal 7, 28. doi : 10.1186/s40517-019-0144-5

Résumés étendus pour conférences internationales

^(o,c) **M. Raguanel***, A. Mazuyer, F. Bonneau, T. Driesner (2018) *Physical simulations on unstructured meshes with an integrative tool - First results*, IAMG 2018, Olomouc, Czech Republic

^(o,c) **M. Raguanel***, A. Mazuyer, F. Bonneau, T. Driesner (2017) *Physical simulations on unstructured meshes with an integrative tool - Methodology*, EGW 2017, Karlsruhe, Germany

^(p,c) **M. Raguanel***, F. Bonneau, T. Driesner (2017) *Sensitivity analysis on the modeling of flows and heat transfers in the geothermal field of Basse-Terre, Guadeloupe*, 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 Proceedings, Paris, France. doi : 10.3997/2214-4609.201701124

Articles pour le RING Meeting

^(o,c) **M. Raguanel***, F. Bonneau, T. Driesner, J. Sausse, G. Caumon (2018) *Assessing geological scenarios with the modeling of heat transfers and fluid flows in the geothermal reservoir of Basse-Terre, Guadeloupe*, 2018 RING Meeting, Nancy, France

^(o,c) **M. Raguene***, A. Mazuyer, F. Bonneau, T. Driesner (2017) *Physical simulations on unstructured meshes with an integrative tool linking RINGMesh and CSMP++ - State of the art on numerical simulation*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

^(p,c) **M. Raguene***, F. Bonneau, T. Driesner (2017) *Sensitivity analysis on the modeling of flows and heat transfers in the geothermal field of Basse-Terre, Guadeloupe*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

^(o,c) **M. Raguene***, F. Bonneau, T. Driesner (2016) *Heat and fluid flows in the geothermal reservoir of Vieux-Habitants, Basse-Terre, Guadeloupe*, 2016 RING Meeting, Nancy, France

Autres contributions résultant de travaux parallèles

^(o,c) F. Bonneau*, **M. Raguene**, L. Scholtès, P. Cupillard (2017) *Simulating micro-seismic activity with a discrete geomechanical model*, 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 Proceedings, Paris, France. doi : 10.3997/2214-4609.201701223

^(p,c) L. Bouard*, F. Bonneau, L. Scholtès, **M. Raguene** (2017) *Generation of DEM packings from RingMesh geological models*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

^(p,c) M. Vergnaud*, **M. Raguene**, F. Bonneau, J. Sausse (2017) *Heat flow simulation for the case of Soultz-sous-Forêts and evaluation of geothermal potential*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

^(p,c) **M. Raguene***, G. Caumon, A. Botella (2016) *Cutting a tetrahedral mesh by implicit surfaces*, 2016 RING Meeting, Nancy, France

Codes développés

Les travaux présentés dans cette thèse s'appuient sur le développement de différents outils :

- la librairie RINGcsmp : cette librairie C++, dépendante de RINGMesh [Pellerin et al., 2017] et de CSMP++ [Matthäi et al., 2007], permet de faire le transfert de toutes les informations nécessaires à la simulation physique à partir d'un modèle géologique.
- un workflow intégratif en 2D sous la forme de scripts regroupant plusieurs outils développés en collaboration avec Pierre Anquez. Ces outils élémentaires permettent de conserver et de recréer les informations géologiques (noms, entités géologiques) nécessaires aux simulations physiques.



FIGURE 1 – Cadre de recherche de la thèse.

Cadre de la thèse

Cadre administratif et scientifique

Cette thèse a été réalisée au sein du laboratoire GeoRessources¹, Unité Mixte de Recherche en Géosciences sous la tutelle de l'Université de Lorraine (UL) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

L'activité de recherche s'est déroulée au sein de l'équipe RING² (Research for Integrative Numerical Geology). La recherche de cette équipe s'organise autour de quatre axes : (1) la modélisation structurale et stratigraphique stochastique, (2) la simulation d'objets sédimentaires et diagénétiques, (3) le maillage adaptatif et la gestion des échelles, et (4) la simulation de processus physiques. Cette thèse s'articule principalement autour de ce dernier axe et de l'intégration des différents axes entre eux. La thèse a été réalisée en collaboration avec l'École Polytechnique Fédérale de Zürich (*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, ETHZ*). Plusieurs séjours de plusieurs semaines au sein de l'équipe *Mineral Resource Systems and Ore Fluids*³ ont été réalisés. Une collaboration a également été réalisée avec le Professeur Stephan Matthai et son équipe⁴ du Peter Cook Centre for Carbon Capture and Storage Research, à l'Université de Melbourne. Plusieurs rencontres ont eu lieu en soutien technique, en Suisse, en France, et en Australie.

Cette thèse a été majoritairement financée au travers du programme GEOTREF⁵ (Plate-forme pluridisciplinaire d'innovation et de démonstration pour l'exploration et le développement de la GEOThermie haute énergie dans les REservoirs Fracturés), complété par une participation du Consortium RING-Gocad. Ce projet, piloté par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) au travers de financements Investissements d'Avenir, vise à améliorer la compréhension des réservoirs géothermiques fracturés de haute enthalpie. Les objectifs de GEOTREF sont ainsi de réduire le risque géologique pour optimiser les coûts d'exploration, et de garantir une exploitation durable du réservoir lors de la phase de production. Un transfert de connaissances et de technologies de l'exploration pétrolière est mis en avant. Dans le cadre du projet, 16 doctorats et post-doctorats sont financés sur différents aspects : géologique, géophysique,

1. <http://georessources.univ-lorraine.fr>

2. <https://www.ring-team.org>

3. <https://mineralsystems.ethz.ch/>

4. <https://infrastructure.eng.unimelb.edu.au/matthai/>

5. <https://geotref.com>



(a) Le projet GEOTREF est financé via le programme Investissements d'Avenir et piloté par l'ADEME.



(b) Entreprises privées en charge de la coordination du projet.



(c) Laboratoires impliqués dans le programme de recherche.

FIGURE 2 – Partenaires impliqués dans le projet GEOTREF.

de modélisation, sociétaux...

Le projet est coordonné par deux entreprises privées, et neuf laboratoires sont impliqués dans le programme de recherche (Figure 2).

Cette thèse m'a donné l'opportunité d'effectuer des présentations orales lors de trois conférences internationales, de trois journées scientifiques organisées dans le cadre du projet GEOTREF, et de trois éditions du meeting organisé annuellement à Nancy par l'équipe RING pour présenter ses travaux aux sponsors du consortium RING-GOcad qui regroupe académiques et industriels autour de la recherche en Géologie Numérique. J'ai également pu présenter mes travaux lors de deux visites à l'ETH de Zürich. À une échelle locale, j'ai présenté mon travail de manière plus vulgarisée à des non spécialistes lors des journées des doctorants du laboratoire GeoRessources (que j'ai co-organisées), d'un séminaire de l'OSU Otelot et de la journée de l'École Doctorale (Sirena, ex-RP2E).

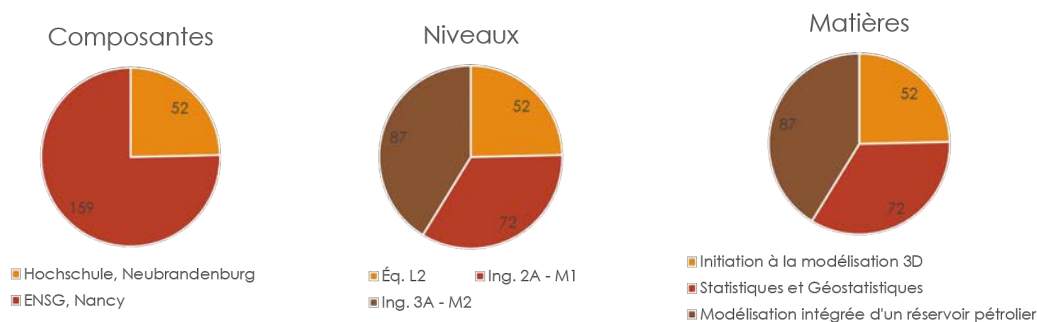


FIGURE 3 – Résumé des enseignements dispensés durant la thèse.

Cadre académique et encadrements

Cette thèse a également été l'occasion d'être pleinement intégrée dans une structure d'enseignement : l'École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG). Cela m'a donné l'opportunité d'assurer différents cours dans la formation, mais également d'encadrer des étudiants pour des projets de recherches inclus dans leur cursus. Les enseignements dispensés sont résumés Figure 3. Les étudiants encadrés lors de projets de recherche sont listés Table 1.

Dans le cadre de mon contrat doctoral et de ma charge d'enseignement, j'ai été amenée à suivre des formations à la pédagogie. L'ensemble de ce parcours d'enseignement et de formations m'a permis d'obtenir le label Enseignement Supérieur décerné par l'Université de Lorraine dans le cadre d'une thèse.

Année Scolaire	Étudiant	Niveau	Sujet
2016-2017	Maëlle Vergnaud	3A ENSG - M2	Simulation of thermal flow, case study of the geothermal power plant of Soutz-sous-Forêts
	Lauriane Bouard	3A ENSG - M2	Generating DEM packings from RINGMesh geological models
	Agathe Carbonié	3A ENSG - M2	Cutting a tetrahedral mesh by implicit surfaces
	Zoé Renat	2A ENSG - M1	Modélisation du réseau de failles du Sud de Basse-Terre, Guadeloupe
	Martin Letourneur	2A ENSG - M1	Extraction of temperature profiles along wells from numerical simulations
2017-2018	Vincent Payet	2A ENSG - M1	Automatisation d'un workflow de modélisation et de simulation des réservoirs géothermiques
	Guillaume Peyssard	2A ENSG - M1	Conception d'une interface utilisateur pour la modélisation et la simulation de réservoirs géothermiques
2018-2019	Matthieu Landré	3A ENSG - M2	Partial cut of a tetrahedral mesh by implicit surfaces
	Anaïs Capy	3A ENSG - M2	Retetrahedralization of an hybrid mesh after a cut by implicit surfaces

TABLE 1 – Étudiants co-encadrés lors de projets de recherche.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est composé de cinq chapitres.

Le premier décrit l'état de l'art sur la modélisation du comportement thermohydraulique d'un réservoir géothermique.

Le deuxième propose une revue des connaissances géologiques de l'île de Basse-Terre, Guadeloupe. Ces connaissances ont été acquises grâce à des études menées depuis plusieurs décennies sur l'île, mais également avec les nouvelles informations apportées par les campagnes menées dans le cadre du projet GEOTREF. Elles sont à la base des modèles développés durant la thèse.

Le troisième chapitre propose une méthodologie permettant de conserver la complexité géologique d'un modèle lors de la simulation physique grâce à l'utilisation de grilles non structurées.

Le quatrième chapitre présente une étude numérique du comportement du réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe, effectuée en deux dimensions à partir de

scénarios géologiques.

Le cinquième chapitre présente une méthodologie de complexification progressive d'un modèle géologique, destinée à incorporer progressivement de l'information géologique pour étudier l'impact des différentes structures sur le comportement du réservoir. Cette méthodologie est appliquée en trois dimensions dans le cadre du réservoir de Basse-Terre, Guadeloupe.

Finalement, des conclusions sur l'ensemble de ces travaux sont présentées et des perspectives sont évoquées.

Chapitre I

Modélisation du comportement thermo-hydraulique d'un réservoir géothermique : état de l'art

Sommaire

I.1	Mise en place du modèle géologique : la transcription des connaissances géologiques à l'ordinateur	16
I.1.1	Interprétation et intégration des données	16
I.1.2	Création d'un modèle géologique	17
I.1.3	Outils de géomodélisation	20
I.2	La discrétisation du problème : étape clé entre la modélisation géologique et physique	21
I.2.1	La discrétisation de l'espace	21
I.2.2	La transformation des équations grâce à différents schémas de discrétisation numériques	22
I.3	Mise en place du modèle physique : équations et conditions initiales et aux limites	25
I.3.1	Présentation des phénomènes physiques impliqués en géothermie	25
I.3.2	Les conditions initiales et aux limites	27
I.3.3	Différents outils de simulation	27
I.4	Application à la géothermie : bilan et problématiques principales	30
I.4.1	Éléments nécessaires à une simulation physique sur un modèle géologique	30
I.4.2	Les verrous présents lors du processus intégratif de modélisation	31
I.4.3	Exemples d'études réalisées sur des systèmes géothermiques .	31

Résumé La modélisation du comportement thermo-hydrique d'un réservoir géothermal nécessite la mise en action d'un processus intégratif, impliquant différents domaines des géosciences et faisant appel à différents spécialistes. Ce processus intégratif, couramment appelé chaîne de modélisation, est utilisé classiquement dans différents secteurs de l'exploitation des ressources en géologie, notamment dans l'industrie pétrolière. Dans ce chapitre, nous présenterons l'ensemble de cette chaîne de modélisation, en mettant l'accent sur certaines spécificités liées au contexte de la géothermie. Ce chapitre introduit également de nombreuses définitions qui seront réutilisées tout au long de cette thèse.

Les simulations numériques de processus physiques s'appuient sur une représentation à la fois de la géométrie des structures du sous-sol, et des propriétés impliquées dans le comportement physiques des roches. Pour s'assurer de la bonne intégration de toutes les informations et de la cohérence du modèle, la construction de cette représentation suit classiquement la chaîne de géomodélisation présentée Figure I.1. Ainsi, après une intégration et une interprétation de différents types de données, une modélisation géométrique du réseau de faille est réalisée. En conservant ce réseau de failles, les horizons géologiques sont ensuite représentés. A partir de ce modèle structural complet (failles et horizons), une grille est obtenue. Elle servira de support pour la représentation des propriétés pétrophysiques des roches. C'est également sur cette grille qu'est défini et résolu le problème physique qui est étudié.

Cette chaîne de modélisation a principalement été développée par les industries pétrolières et minières [Ringrose et Bentley, 2015], dans un souci d'uniformisation des procédures à l'échelle industrielle. L'évolution historique de cette chaîne de modélisation et des différents outils qui sont utilisés peut être retrouvée dans l'ouvrage de Perrin et Rainaud [2013]. Cet ouvrage décrit également certains des challenges actuels en modélisation, et notamment celui de l'intégration, de la compatibilité et des échanges entre les différents outils impliqués à différentes étapes de la modélisation, ce qui est une des problématiques de cette thèse.

Cette chaîne peut être adaptée dans un contexte géothermique, ce qui est un autre volet des travaux réalisés. En plus des problématiques usuelles en modélisation, d'autres liées au contexte vont apparaître, notamment concernant la nature des données et des objets à modéliser. Cette partie revient sur les éléments clés de la chaîne de modélisation classique, qui vont devoir être adaptés ou transposés pour une application géothermique.

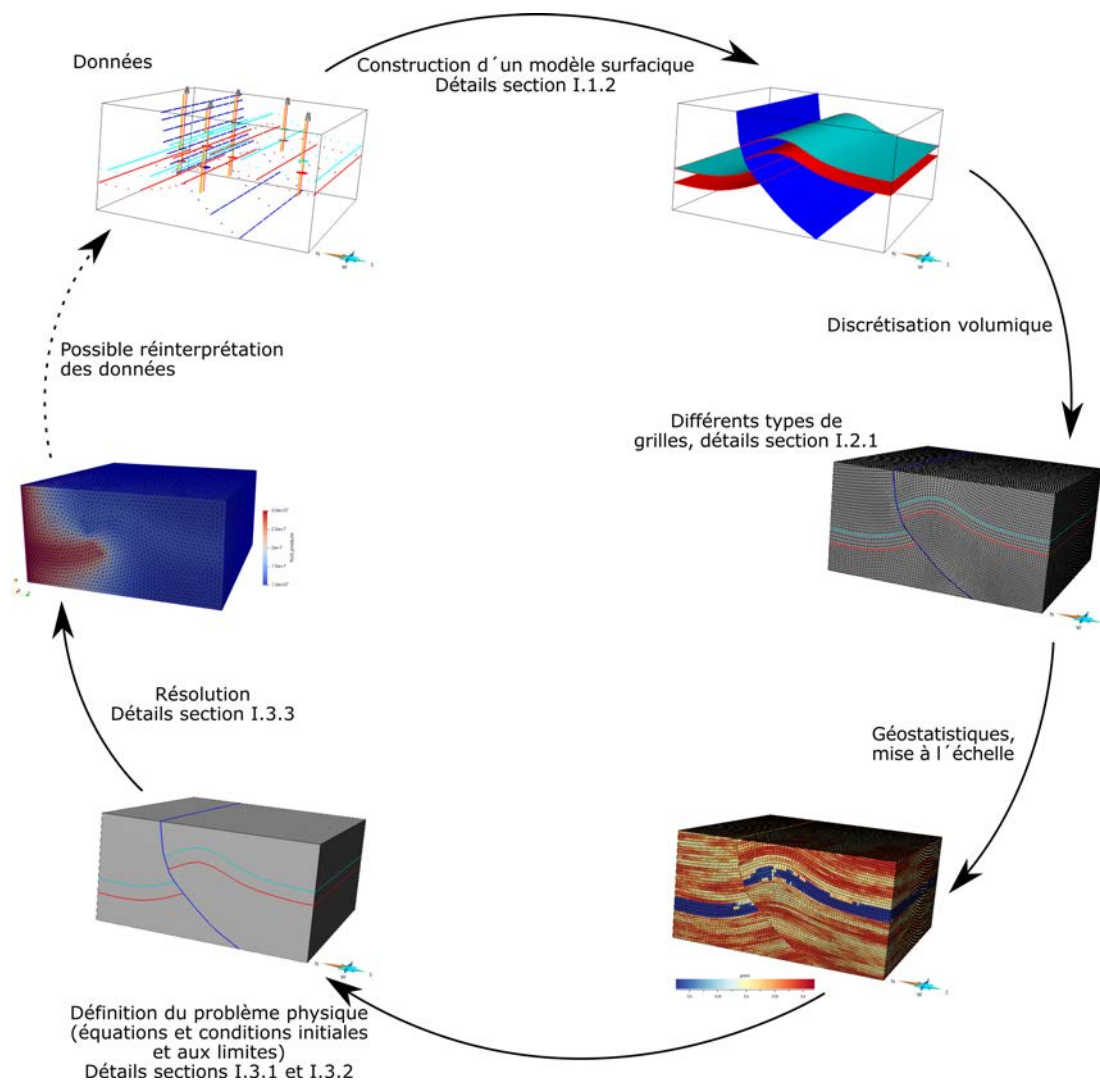


FIGURE I.1 – Chaîne intégrative de modélisation. Cette chaîne comprend plusieurs étapes imposant chacune différents choix, qui seront détaillés tout au long de ce chapitre.

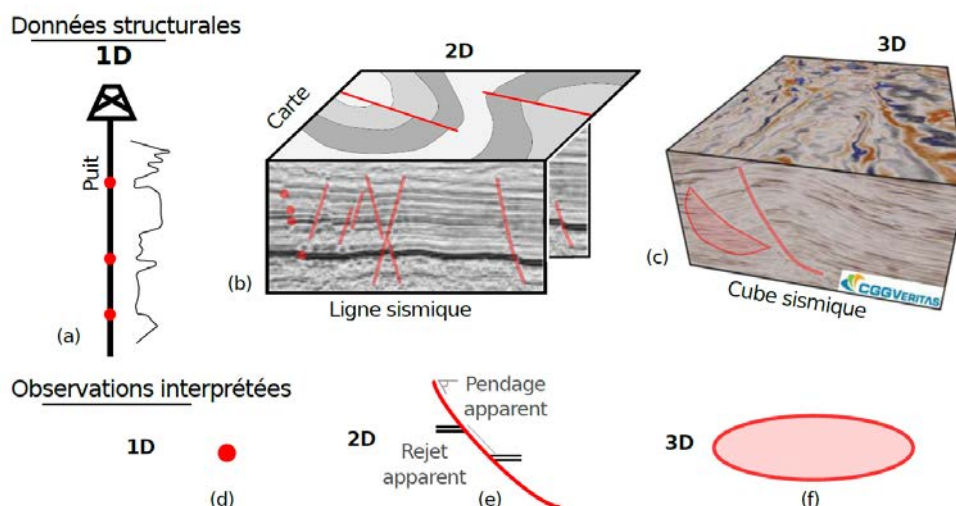


FIGURE I.2 – Exemple de différents types de données brutes et interprétées (en 1D, 2D et 3D) permettant la construction de failles (d'après Godefroy [2018]).

I.1 Mise en place du modèle géologique : la transcription des connaissances géologiques à l'ordinateur

La première étape de la chaîne de modélisation consiste en l'interprétation de toutes les données acquises et en leur intégration, en considérant les incertitudes qui y sont associées et les variations d'échelles. Nous détaillons ici l'origine de ces données et les méthodes mises en œuvre pour la création d'un modèle géologique 3D, qui va permettre à la fois de visualiser les structures majeures, de représenter les hétérogénéités à différentes échelles, et de valider la cohérence des interprétations entre elles.

I.1.1 Interprétation et intégration des données

Différentes données peuvent intervenir dans le processus de caractérisation du sous-sol. Certaines de ces données peuvent être intégrées directement pour la construction du modèle géologique, tandis que d'autres doivent tout d'abord être interprétées et transformées pour permettre leur utilisation (Figure I.2). La nature de ces données, directes ou indirectes, dépend notamment de leur échelle et de leur résolution.

Données conceptuelles et analogues Les modèles conceptuels et analogues peuvent guider les géologues dans la compréhension et la modélisation des structures. Ces modèles sont obtenus par l'observation d'affleurements dans des contextes similaires à la zone d'étude ou par des expériences numériques ou analogiques. Ces observations constituent des bases de données qui peuvent servir de référence et guider lors de l'interprétation d'autres données ou la création de modèles [Howell et al., 2014]. L'observation des affleurements sur le terrain permet une observation directe des structures et de leurs conséquences à différentes échelles. Cependant, elle ne donne pas d'information directe

sur la situation et l'évolution de ces structures en profondeur, où sont généralement localisées les zones d'intérêt.

Données géophysiques Selon la nature des sols étudiés, différentes techniques de mesures géophysiques peuvent être appliquées, telles que l'imagerie sismique, l'acquisition magneto-tellurique ou l'électromagnétisme. Ces différentes méthodes d'acquisition sont basées sur l'enregistrement de signaux physiques liés aux propriétés des roches. Ainsi, ce ne sont pas les structures qui sont directement enregistrées, mais les réponses liées à la variation des propriétés dans le sous-sol. Les données géophysiques sont recueillies en 3D, mais, du fait du processus particulier d'acquisition, elles subissent plusieurs traitements et conversions et entraînent des incertitudes (pour plus d'informations, voir Chapitre 4 de Perrin et Rainaud [2013]).

Données de puits Les puits sont la seule source d'observation *in situ* du sous-sol. Des informations peuvent être obtenues directement, en analysant des échantillons remontés des forages (carottes et *cuttings*), ou indirectement grâce à des mesures pétrophysiques indirectes (diagraphies). Cela permet de détecter des structures à différentes échelles, mais sans avoir de connaissances sur l'extension latérale de ces structures. Autre inconvénient, les données acquises grâce aux forages de puits sont très précises mais éparpillées, car les puits sont éloignés les uns des autres et peu nombreux, et la corrélation d'un puits à l'autre difficile [Edwards, 2017].

Un hiatus entre la résolution et la couverture des données Une des difficultés en géomodélisation réside en l'intégration de toutes les données acquises. L'obstacle majeur est le manque d'information continue à toutes les échelles. En effet, alors que les images sismiques vont permettre de définir de grandes structures sur l'ensemble du volume 3D, avec de fortes incertitudes, les données de puits vont apporter des informations précises très ponctuelles. Ce problème est illustré par la Figure I.3.

I.1.2 Création d'un modèle géologique

Pour représenter les structures géologiques à grande échelle, deux principales méthodologies sont utilisées, la modélisation explicite et la modélisation implicite. Ces deux approches se distinguent par la méthode de définition des surfaces qui représentent les structures géologiques (Figure I.4).

Modélisation explicite Pour la modélisation explicite, les surfaces représentant les structures géologiques (failles, horizons, dômes de sel...) sont transcrites par des objets numériques, par exemple des B-splines rationnelles non uniformes (ou *NURBS*, *Non-Uniform Rational Basis Splines*) [Ruiu et al., 2016, Jacquemyn et al., 2019] ou des surfaces triangulées, ensemble de noeuds, arêtes et triangles (*e.g.* Caumon et al. [2009]). Cette approche est classique en modélisation assistée par ordinateur, ce qui permet d'avoir accès à de nombreux algorithmes pour créer, améliorer, optimiser ou visualiser

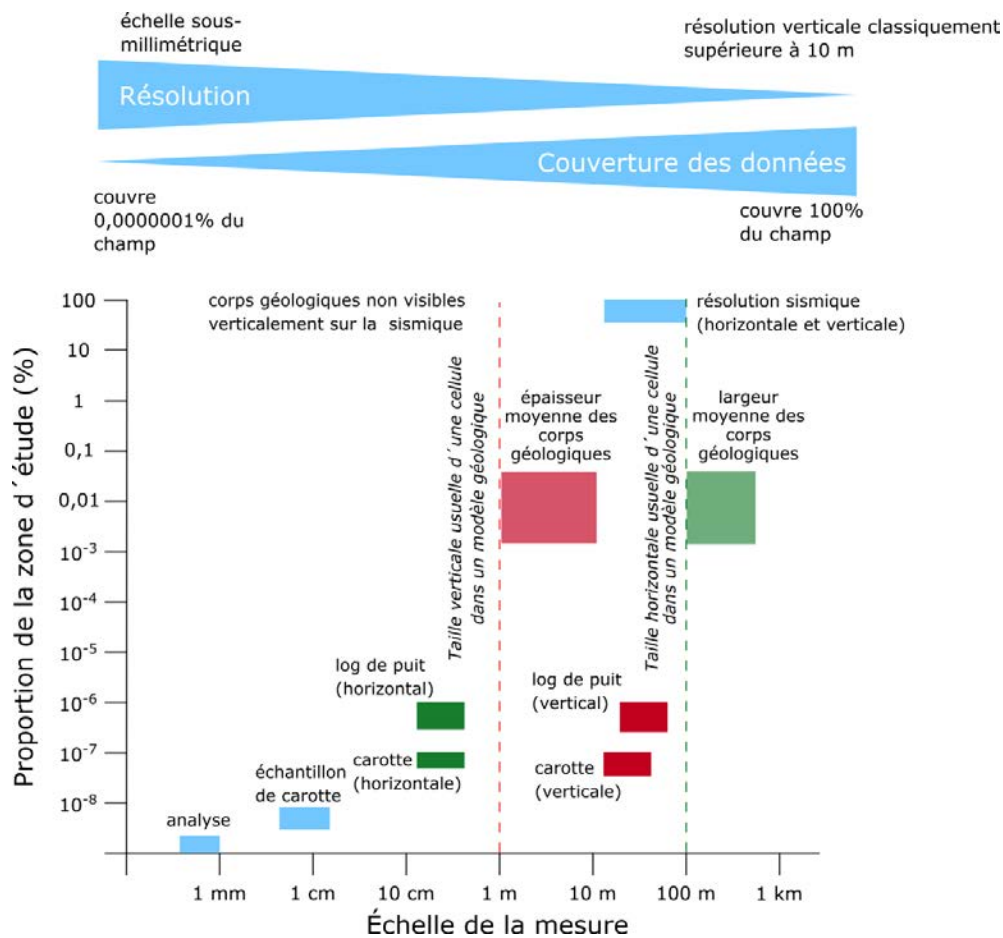


FIGURE I.3 – Résolution et couverture des données, montrant le challenge de l'intégration de données collectées à différentes échelles et différentes résolutions (modifiée d'après Howell et al. [2014]).

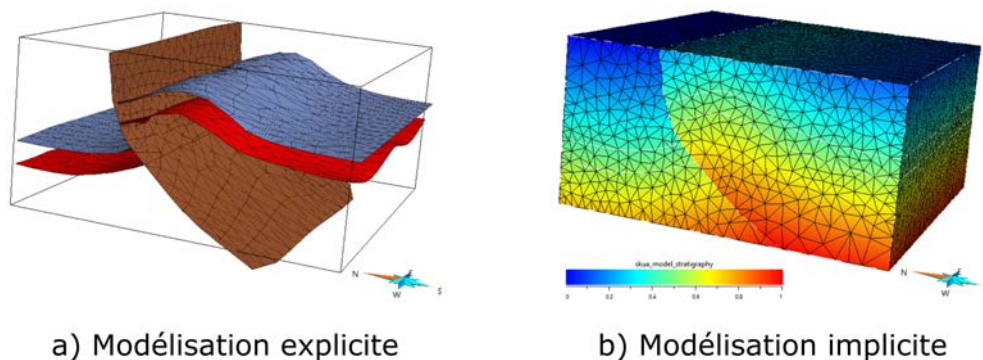


FIGURE I.4 – Présentation des méthodes de modélisation des structures géologiques à grande échelle. (a) Modélisation explicite des hétérogénéités (horizons et faille) avec des surfaces triangulées. (b) Modélisation implicite des horizons après construction explicite de la faille.

ces surfaces. Cependant, ces représentations sont peu adaptées pour l'édition ou la modification rapide du modèle. En effet, lors de la modification d'un noeud, il faut s'assurer de la conservation de la cohérence globale du modèle (*e.g.* de sa topologie, si le noeud appartient à plusieurs surfaces).

Modélisation implicite Pour la modélisation implicite, les structures géologiques sont représentées grâce à une isovaleur e d'un champ scalaire $\varepsilon(x, y, z)$ [Frank et al., 2007, Calcagno et al., 2008, Guillen et al., 2008]. Ce champ scalaire est calculé de façon analytique sur un maillage et est porté par les noeuds du maillage. Plusieurs interpolateurs peuvent être utilisés pour calculer ce champ scalaire, comme par exemple l'interpolateur DSI (*Discrete Smooth Interpolation*, Mallet [1992, 2014]), qui génère le champ ε en contraignant sa géométrie à partir des observations structurales géologiques et de la minimisation de la rugosité des surfaces (voir Renaudeau et al. [2019] pour plus de détails).

La modélisation implicite présente un avantage considérable pour la modélisation des horizons, en permettant de représenter une succession stratigraphique grâce à un unique champ scalaire, tout en assurant une épaisseur constante des couches et en évitant leur intersection. L'utilisation de ce champ scalaire facilite également l'édition du modèle, car la modification du champ permet d'agir sur l'ensemble des surfaces [Caumon et al., 2009].

Approches hybrides Ces approches combinent une représentation explicite pour les surfaces géométriquement complexes (*e.g.* failles, structures salifères), et une représentation implicite des horizons dans les volumes découpés par la représentation explicite [Collon et al., 2015, 2016]. Dans ce cas, le maillage support de l'interpolation doit être conforme à la surface explicite, ce qui constitue une des difficultés pratiques de cette méthode [Zehner et al., 2015].

Représentation par frontières Quelle que soit la méthode utilisée, le modèle structural modélisé, comprenant divers objets géologiques à grande échelle (*e.g.* failles, horizons) doit être cohérent et suivre différentes règles géologiques, comme la non-intersection entre les surfaces ou l'absence de bords libres pour les horizons [Caumon et al., 2009]. Pour exprimer cette cohérence, le modèle final peut être représenté grâce à une représentation par frontières (*Boundary-Representation* ou *B-Rep* en anglais [Requicha, 1980, Mäntylä, 1988, Hoffmann, 1989]). Cette représentation est à la base de la structure de donnée définie par Pellerin et al. [2017], qui sera utilisé dans cette thèse. Dans cette structure de données, un géomodèle est défini par différentes entités, géologiques et topologiques, qui sont associées à une description géométrique (Figure I.5). Les entités topologiques sont les régions, les surfaces, les lignes et les coins. Des relations d'incidences et de bordures sont définies entre ces entités, pour assurer la cohérence du modèle. La représentation géométrique de chacune de ces entités est définie par une discrétisation, appelée maillage, composée d'un ou plusieurs éléments de base (point,

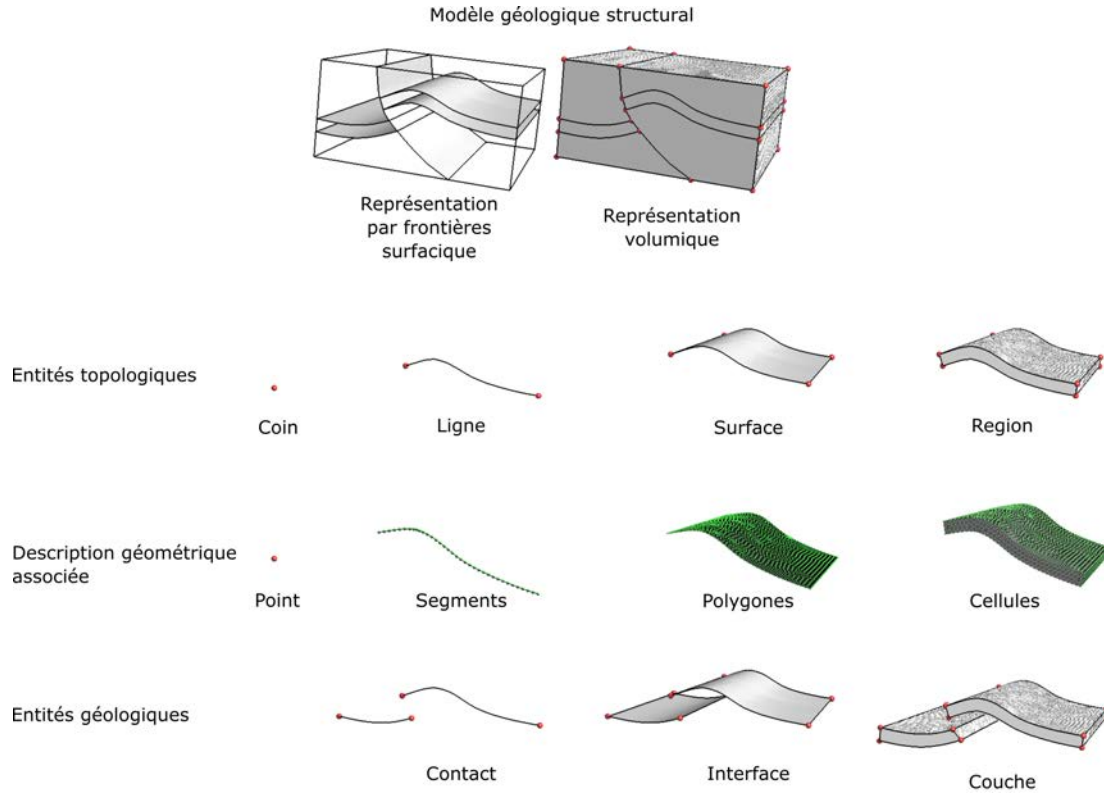


FIGURE I.5 – Description des entités de base, géométriques et topologiques dans un modèle géologique (modifié d'après Pellerin et al. [2017]).

segments, polygones ou cellules). Le regroupement d'entités topologiques de base selon une signification géologique forme des entités géologiques telles que les contacts, interfaces et couches. Ces différentes entités seront à la base des méthodes de transfert définies dans cette thèse.

I.1.3 Outils de géomodélisation

Différents outils et logiciels sont spécialisés dans la géomodélisation, et utilisent une ou plusieurs des méthodes décrites ci-dessus. Les plus répandus, développés commercialement et utilisés dans l'industrie, sont les suivants :

- Petrel [Schlumberger, 2019b], une plateforme logicielle très répandue dans l'industrie pétrolière, avec notamment un module de modélisation implicite, *VBM* (*Volume-Based Modeling*, Schlumberger [2015]).
- SKUA-GocadTM [Emerson E&P Software, 2019], un logiciel contenant différents modules d'interprétation de données, de modélisation explicite (Gocad) et de modélisation implicite (SKUA), pour des applications pétrolières et minières principalement.
- Leapfrog [Seequent, 2019], un logiciel utilisant la modélisation implicite utilisé industriellement pour des applications minières, d'ingénierie civile et de géothermie.
- GeoModeller [Intrepid Geophysics, 2019], un logiciel utilisant la modélisation

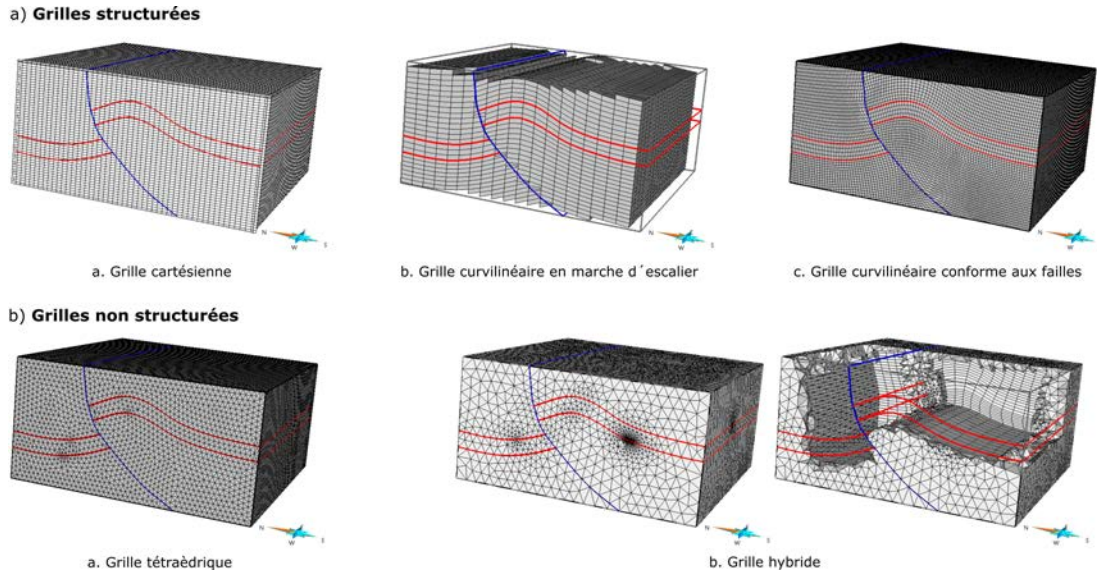


FIGURE I.6 – Différents types de grilles pouvant être utilisés en modélisation.

implicite pour différentes applications, avec une attention particulière portée au lien entre la géologie et la géophysique.

D'autres outils sont développés dans le cadre de la recherche pour améliorer la construction de modèles géologiques, voir par exemples les travaux de Godefroy [2018], Renau-deau et al. [2019], de la Varga et al. [2019].

I.2 La discrétisation du problème : étape clé entre la modélisation géologique et physique

Les processus physiques sont des problèmes continus. Cependant, pour la plupart des applications, il est impossible de les résoudre analytiquement. Pour résoudre numériquement les équations représentant ces processus, ils doivent être remplacés par des problèmes discrets. Il faut alors à la fois discrétiser l'espace en éléments pour résoudre les équations localement, et adapter les équations à résoudre à cette nouvelle représentation. Pour des processus transitoires, cette discrétisation fera également apparaître une discrétisation temporelle.

I.2.1 La discrétisation de l'espace

L'objectif de la discrétisation de l'espace est de découper l'espace en un ensemble d'éléments, comme des triangles, des tétraèdres, des quadrilatères, des hexaèdres... Le résultat de cette discrétisation spatiale est un maillage (Figure I.6).

Par des maillages structurés Un maillage est dit structuré s'il a une connectivité régulière entre tous ses éléments constitutifs, *i.e.* si tous ses sommets (points du maillage) ont le même nombre de voisins (Figure I.6a). Ils sont généralement composés d'éléments

rectangulaires en 2D et d'hexaèdres en 3D, qui ont des propriétés numériques meilleures que les maillages triangulés ou tétraédriques du même ordre pour les calculs [Benzley et al., 1995, Blacker, 2000, Puso et Solberg, 2006, Yamakawa et al., 2011]. Ces maillages permettent également un accès rapide aux cellules et un stockage facilité, mais n'assurent pas une représentation précise de géométries complexes.

Par des maillages non structurés Un maillage est dit non structuré lorsque sa connectivité est quelconque. Dans ce cas, il peut être composés d'éléments quelconques, comme par exemple des tétraèdres. Ces maillages peuvent s'adapter plus facilement aux géométries particulières des structures géologiques, mais présentent des caractéristiques moins favorables aux calculs numériques.

Par des maillages hybrides Un maillage est dit hybride lorsqu'il combine l'utilisation de différents éléments. C'est par exemple le cas pour les maillages adaptatifs hex-dominants proposés par Botella [2016]. L'objectif est alors de combiner des éléments réguliers pour faciliter les calculs et des éléments irréguliers plus flexibles géométriquement pour respecter les structures géologiques.

Problématique de mise à l'échelle Pour représenter au mieux le comportement des roches, le modèle volumique est le porteur de différentes propriétés intervenant dans les processus physiques. Les valeurs de ces propriétés sont établies à partir de données très localisées, comme les données de puits, et de techniques d'interpolation géostatistiques. Pour faire face à la différence de résolution entre les données et l'échelle globale du modèle, il peut être nécessaire d'utiliser différentes grilles à différentes résolutions. Le passage d'une grille à l'autre nécessite alors une mise à l'échelle (*upscaling*) des différentes propriétés utilisées [Durlfisky, 2005]. L'enjeu est alors de s'approcher d'un volume élémentaire représentatif (*REV*, *Representative Elementary Volume*) lors de la définition de la taille des cellules. Dans ce REV, les propriétés d'intérêt sont considérées comme homogènes et statistiquement stationnaires [Bear, 1988, Eaton, 2006].

I.2.2 La transformation des équations grâce à différents schémas de discrétisation numériques

Sur un maillage, différents schémas numériques peuvent être utilisés pour discrétiser les équations mathématiques représentant les processus physiques. Le choix de l'utilisation d'une de ces méthodes est lié au type d'équation, ainsi qu'au type de maillage utilisé. Cette section revient sur certaines de ces méthodes.

La méthode des différences finies classique (*FDM*) Cette méthode est basée sur la discrétisation de l'opérateur différentiel de l'équation aux dérivées partielles (EDP) à résoudre. Les dérivées sont remplacées par leur approximation par différence. Elle est utilisée sur des grilles cartésiennes régulières, avec une solution décrite sur les points nodaux [Faust et Mercer, 1979].

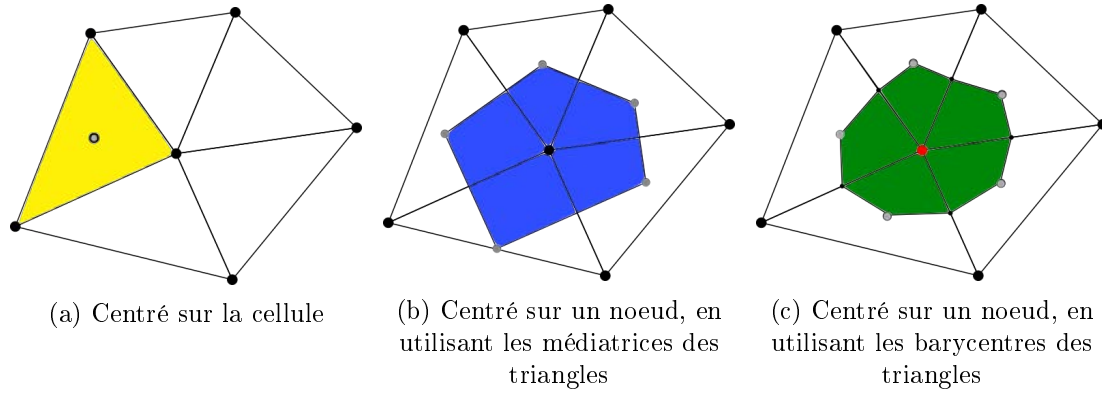


FIGURE I.7 – Les différentes procédures pour définir un volume fini, d’après Hinkelmann [2006].

La méthode des différences finies intégrées (*IFDM*) Cette méthode est une adaptation des différences finies classiques pour les grilles non structurées, avec une intégration au niveau des faces des éléments [Narasimhan et Witherspoon, 1976]. D’après Ingebritsen et al. [2010], cette méthode est formellement équivalente à la méthode des volumes finis décrite ci-après, mais avec une discrétisation volumique différente.

La méthode des éléments finis (*FEM*) Cette méthode se base sur une formulation dite faible de l’EDP à résoudre. Cette formulation fait apparaître des intégrales sur tout le domaine d’étude. En introduisant une loi d’intégration et une base de fonctions de dimension finie sur chaque élément du maillage qui discrétise le domaine, on obtient un système linéaire dont la résolution donne le champ qui nous intéresse sur un nombre fini de points (points du maillage pour des éléments linéaires) [Zienkiewicz et Taylor, 2000].

La méthode des volumes finis (*FVM*) Dans le cas de la méthode des volumes finis, la résolution se base directement sur la formulation dite forte de l’équation à résoudre. Dans les termes de flux (*e.g.* divergence) de l’équation, les intégrales de volume sont transformées en intégrales de surface. Pour une loi de conservation (*e.g.* divergence nulle), le flux entrant dans un volume est égal au flux sortant, et la méthode est conservatrice [Eymard et al., 2000]. Différentes procédures peuvent être utilisées pour définir le volume considéré, autour des points du maillage initial ou non (Figure I.7, Hinkelmann [2006]). Nous utiliserons dans cette thèse la méthode des volumes finis telle que décrite par Geiger et al. [2004], construite selon la méthodologie utilisant les barycentres des éléments du maillage, présentée Figure I.7c).

La combinaison des méthodes des éléments finis et des volumes finis (*FEFVM*)

Il s’agit de la combinaison des schémas décrits ci-dessus, chacun d’eux étant préférentiellement utilisé là où il est le plus adapté pour la résolution de processus physiques couplés. Ainsi, cette approche est utilisée par la librairie CSMP++ [Matthäi et al., 2007]. La méthode FEM est utilisée pour résoudre les parties diffusives des équations

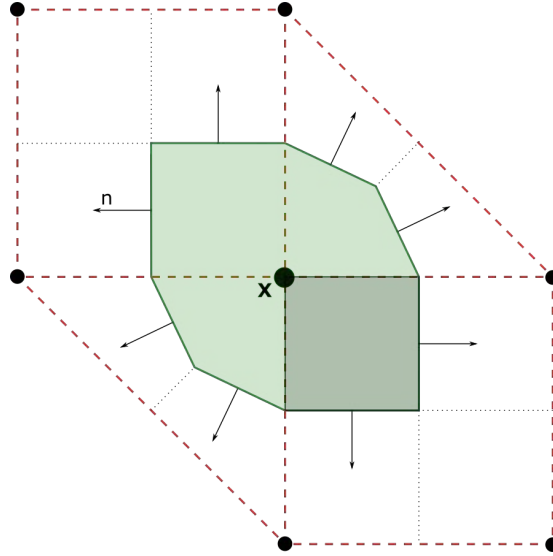


FIGURE I.8 – Représentation en 2D de la combinaison des schémas de discrétisation éléments finis et volumes finis. Le volume fini (en vert) est construit à partir des barycentres des éléments finis (en rouge) et des milieux des faces (méthode Figure I.7c). Modifié d'après Paluszny et al. [2007].

de transport de masse et de chaleur, tandis que la méthode de plus haut niveau FVM est utilisée pour les parties advectives [Ingebritsen et al., 2010]. Cette approche, dans un premier temps développée pour les maillages avec un seul type d'éléments, a été étendue aux maillages hybrides par Paluszny et al. [2007]. La superposition des deux schémas de discrétisation est expliquée en 2D Figure I.8.

Pour toutes ces méthodes, une discrétisation temporelle est également introduite pour les processus transitoires. En pratique, cette discrétisation temporelle est fortement liée à la discrétisation spatiale, puisqu'elle doit respecter le critère de Courant-Friedrichs-Lewy (condition CFL). Celui-ci est décrit par l'équation suivante en une dimension :

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (\text{I.1})$$

avec u la magnitude de la vitesse, Δt le pas de temps et Δx la taille de la discrétisation spatiale. Dans une optique conservatrice, la taille du plus petit élément du modèle est généralement considérée. La valeur de C_{max} varie selon les applications. Pour des résolutions avec un schéma temporel explicite, il est pris à 1.

Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients, selon leur complexité de mise en place, leur précision, leur adaptabilité... Elles sont utilisées par différents outils de résolution numérique qui seront présentés dans les paragraphes suivants.

I.3 Mise en place du modèle physique : équations et conditions initiales et aux limites

Les processus physiques sont modélisés par des équations et des conditions initiales et aux limites. Les équations choisies pour modéliser les processus physiques étudiés influencent le choix d'une ou de plusieurs des méthodes présentées précédemment. Dans cette partie, les phénomènes physiques à considérer pour la modélisation d'un réservoir géothermique, leur mise en équations et les conditions initiales et aux limites couramment utilisées sont détaillées.

I.3.1 Présentation des phénomènes physiques impliqués en géothermie

Les phénomènes physiques se déroulant dans un réservoir géothermique sont majoritairement des phénomènes de transport, qui concernent les échanges de masse, d'énergie et de moment. Ces phénomènes partagent tous un cadre mathématique similaire, qui va permettre d'appliquer des opérations identiques lors de leur résolution.

Chaque aspect des phénomènes de transport est gouverné par deux concepts principaux :

- les lois de conservation, qui sont formulées dans le cadre des phénomènes de transport comme des équations continues décrivant comment la quantité observée doit être conservée ;
- les équations constitutives, qui décrivent comment cette quantité est impactée par différents stimuli lors du transport.

Les transferts de fluides

La loi de Darcy est couramment utilisée pour décrire les écoulements dans un milieu poreux d'un fluide monophasique (*e.g.* Coumou et al. [2006]) :

$$\boldsymbol{\nu} = -\frac{k}{\mu_f}(\nabla p - \rho_f \mathbf{g}) \quad (\text{I.2})$$

avec $\boldsymbol{\nu}$ la vitesse du fluide, k la perméabilité de la roche, μ_f la viscosité dynamique du fluide, p la pression du fluide, ρ_f la densité du fluide, et $\mathbf{g}$ le vecteur d'accélération gravitationnel. Cette loi peut être étendue pour les écoulements multiphasiques (*e.g.* Ingebritsen et Sanford [1998]) :

$$\boldsymbol{\nu}_i = -\frac{k k_{ri}}{\mu_i}(\nabla p - \rho_i \mathbf{g}) \quad i = v, l \quad (\text{I.3})$$

avec $\boldsymbol{\nu}_i$ la vitesse de Darcy de la phase i (vapeur v ou liquide l) et k_{ri} sa perméabilité relative.

La conservation de masse d'un fluide monophasique dans un milieu poreux peut être

exprimée comme une équation de continuité (*e.g.* Coumou et al. [2006]) :

$$\frac{\partial(\phi\rho_f)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) + q \quad (\text{I.4})$$

avec ϕ la porosité et q un terme source.

Cette équation de continuité peut également être exprimée pour des fluides multiphasiques (*e.g.* Weis et al. [2014]) :

$$\frac{\partial(\phi(S_l\rho_l + S_v\rho_v))}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) - \nabla \cdot (\rho_v \mathbf{v}_v) + q \quad (\text{I.5})$$

avec S la saturation volumique.

La combinaison des équations I.2 et I.4, avec la décomposition de la dérivée de ρ_f et l'utilisation de la compressibilité de la roche β_r et du fluide β_f , conduit à l'équation de pression de fluide transitoire [Geiger et al., 2006, Yapparova et al., 2014] suivante :

$$\rho_f((1-\phi)\beta_r + \phi\beta_f)\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\rho_f \frac{k}{\mu_f} (\nabla p - \rho_f \mathbf{g}) \right) - \phi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} \Big|_{p=\text{const}} \quad (\text{I.6})$$

avec ϕ la porosité, β_r la compressibilité du fluide, β_r la compressibilité de la roche, et ρ_r la densité de la roche.

La même procédure peut être appliquée pour obtenir une équation décrivant la pression de fluide transitoire pour des fluides multiphasiques [Weis et al., 2014] :

$$\rho_f [\phi\beta_f + (1-\phi)\beta_r] \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left[k \left(\frac{k_{rl}\rho_l}{\mu_l} + \frac{k_{rv}\rho_v}{\mu_v} \right) \nabla p \right] - k \left(\frac{k_{rl}\rho_l^2}{\mu_l} + \frac{k_{rv}\rho_v^2}{\mu_v} \right) \mathbf{g} + q \quad (\text{I.7})$$

Les transferts thermiques

Les transferts de chaleur consistent en un échange d'énergie thermique entre des systèmes physiques. Le taux de transfert de chaleur dépend des températures des systèmes et des propriétés du matériau par lequel la chaleur est transférée. Les trois modes fondamentaux de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et la radiation. Le transfert de chaleur, *i.e.* le flux d'énergie, est un processus durant lequel l'énergie interne du système est modifiée, ce qui implique son utilisation dans les applications de la première loi de la thermodynamique.

La direction du transfert de chaleur se fait de la région la plus chaude vers la région la plus froide et est gouvernée par la seconde loi de la thermodynamique.

Le transfert de chaleur cesse lorsque l'équilibre thermique est atteint, *i.e.* tous les points des corps impliqués et leur environs ont atteint la même température.

L'équation de la conservation de l'énergie est utilisée :

$$((1-\phi)\rho_r c_{pr} + \phi\rho_f c_{pf}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) - \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho_f h_f) \quad (\text{I.8})$$

avec ρ_r la densité de la roche, c_{pr} la capacité calorifique spécifique de la roche, c_{pf} la capacité calorifique spécifique du fluide, K la conductivité thermique, et h_f l'enthalpie spécifique du fluide.

Cette équation est généralisée pour le transport de chaleur dans un milieu contenant un fluide multiphasique avec un seul composant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\phi (S_l \rho_l h_l + S_v \rho_v h_v) + (1 - \phi) \rho_r h_r]}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\rho_l k_{rl} k h_l}{\mu_l} (\nabla P + \rho_l g \nabla z) \right] \\ - \nabla \cdot \left[\frac{\rho_v k_{rv} k h_v}{\mu_v} (\nabla P + \rho_v g \nabla z) \right] - \nabla \cdot K_m \nabla T - R_h = 0 \quad (I.9) \end{aligned}$$

I.3.2 Les conditions initiales et aux limites

La résolution du problème physique avec des méthodes numériques impose de définir des conditions initiales et aux limites du problème pour le contraindre. Ces contraintes facilitent la convergence de la solution et assurent l'obtention de valeurs réalistes ainsi qu'une solution unique. Les contraintes initiales sont des valeurs de paramètres définis au temps $t=0$ en un ou plusieurs points du modèle. Ces valeurs peuvent être amenées à changer lors de la résolution du problème. Les conditions aux limites sont des contraintes sur les valeurs aux frontières du domaine. Deux types de conditions aux limites sont traditionnellement utilisées :

- les conditions de Dirichlet, pour lesquelles les valeurs que la solution de l'équation doit vérifier sont imposées.
- les conditions de Neumann, pour lesquelles les valeurs des dérivées que la solution doit vérifier sont imposées.

Dans le cadre du problème de la géothermie, des conditions de Dirichlet sont par exemple utilisées pour imposer une température ou une pression aux bords du modèle, tandis qu'une condition de Neumann permet de contraindre un flux de chaleur.

I.3.3 Différents outils de simulation

Différents outils de simulation ont été développés pour mettre en place les méthodologies de résolution numérique des processus physiques décrits précédemment. Le tableau I.1 présente une vue synthétique de ces outils.

Chacun d'entre eux a ses spécificités, ses avantages et ses inconvénients, qui vont être détaillés dans les paragraphes suivants. Afin de catégoriser ces outils, ils seront distingués selon leur domaine d'application, soit pour la résolution spécifique d'un problème particulier, soit à vocation plus généraliste avec des applications diverses et/ou couplées.

Nom de l'outil	Références principales	Phénomènes modélisés	Tmax (° C)	Pmax (MPa)	Méthode numérique	Dimension
CSMP++	Matthäi et al. [2005, 2007], Matthäi et al. [2007], Matthäi [2014], Paluszny et al. [2007], Geiger et al. [2004], Cournou et al. [2008], Scott et al. [2015, 2016], Weis et al. [2014]	problèmes multi-physique couplés	1000	500	FE-FV	2D & 3D
Eclipse	Schlumberger [2019a]	développé pour les écoulements de fluides (eau et huile) en environnement pétrolier			FV	3D
HYDROTHERM	Hayba et Ingebritsen [1994, 1997], Ingebritsen et Sanford [1998], Ingebritsen et al. [2016], Hurwitz et al. [2003]	transfert de fluides et de chaleur	1200	1000	FD	2D & 3D
THOUGH2	Pruess [2002]	transport couplés de fluides et de chaleur and les milieux poreux et fracturés	350	100	IFD	2D & 3D
SHEMAT	Clauser [2014]	processus stationnaires et transitoires dans des réservoirs hydro-géothermaux	?	?	FD	2D & 3D
DuMux	Flemisch et al. [2011], Koch et al. [2018]	écoulements de fluides multiphasiques et phénomènes de transport	?	?	FV	2D & 3D
OpenGeoSys	Böttcher et al. [2016], Jang et al. [2018]	processus thermo-hydro-mécanico-chimique	?	?	FE	2D & 3D
FEHM	Zyvoloski et al. [1997]	transfert de masse et de chaleur pour plusieurs fluides multiphasiques	1500	?	FE	2D & 3D
FISHES	Lewis [2007], Lewis et Lowell [2009]	écoulements de fluides dans les systèmes hydrothermaux sous-marins	800	1000	FV	1D & 2D

TABLE I.1 – Récapitulatif des différents outils de simulations pouvant être utilisés dans un contexte géothermique

Des outils spécialisés

- HYDROTHERM est un outil développé par l'USGS pour simuler les écoulements multiphasiques et les transports de chaleurs associés, principalement dans les contextes magmatiques. Son avantage principale est de pouvoir prendre en compte des températures élevées, allant jusqu'à 1200 ° C
- Eclipse est un logiciel commercial utilisé quotidiennement dans l'industrie pétrolière pour simuler les écoulements d'eau et d'huile dans les réservoirs.
- FISHERS (*Fully Implicit Seafloor Hydrothermal Event Simulator*) est un code de recherche développé pour la prise en compte des fluides contenant du sel dans les environnements géothermaux.
- DuMu^x est un code de recherche développé pour la prise en compte des transferts de masse et de chaleur avec plusieurs fluides multiphasiques en milieu poreux, en se basant sur l'approche de la mécanique continue.
- THOUGH2 (*Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat*) est un ensemble de codes permettant de réaliser des modèles numériques multi-dimensionnels pour simuler le transport couplé d'eau, de vapeur, de gaz non condensés et de chaleur dans les milieux poreux fracturés.
- SHEMAT (*Simulator of HEat and MAss Transport*) est un code permettant de simuler des processus stationnaires et transitoires dans des réservoirs hydrogéothermaux en 2D et 3D. Les équations sont résolues grâce à la méthode des différences finies pour des problèmes monophasiques.

Des outils plus généralistes

- CSMP++ (*Complex Systems Modelling Platform*) est une bibliothèque de méthodes numériques dédiées aux applications géologiques sur des modèles à différentes échelles. Elle permet de simuler des processus couplés thermo-hydro-mécanico-chimiques.
- COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. Cependant, ce logiciel n'est pas prévu pour la géologie, ce qui peut entraîner des problèmes de réalisme géométrique.
- OpenGeoSys (OGS) est un projet open-source de développement de méthodes numériques pour simuler les processus couplés thermo-hydro-mécanico-chimiques en milieux poreux fracturés.

Dans cette thèse, nous utiliserons principalement deux outils de simulation. Le code HYDROTHERM, spécialisé dans la modélisation des processus d'écoulements fluides et de transferts thermiques ayant lieu dans des contextes volcaniques, et le code CSMP++, code plus générique de modélisation de processus physiques, permettant d'incorporer des

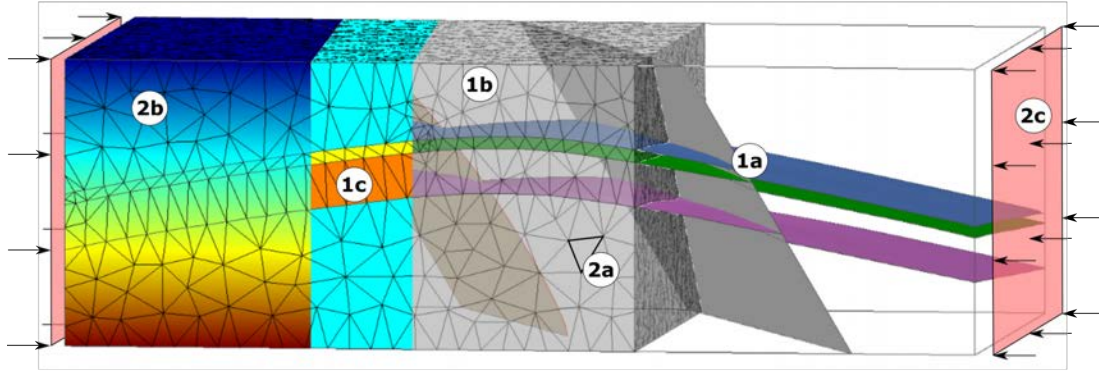


FIGURE I.9 – Éléments nécessaires pour une simulation physique sur un modèle géologique : (1) le modèle géologique, composé d'une représentation par frontière des structures géologiques (1a, ici surfaces de failles et d'horizons), le maillage conforme à ces structures en 3D (1b, ici un maillage non structuré tétraédrique) et les propriétés décrivant le comportement physique des roches (1c, ici une propriété constante par couche). (2) le modèle physique, avec la ou les équation(s) décrivant le processus physique (2a, l'équation est résolue sur chaque élément du maillage), les variables d'état impliquées dans les processus physiques (2b, ici un gradient uniforme) et les conditions initiales et aux limites (2c, ici seulement appliquées sur deux frontières).

équations plus complexes, et d'effectuer les simulations sur des grilles non structurées, représentant plus fidèlement la géométrie des réservoirs géologiques.

I.4 Application à la géothermie : bilan et problématiques principales

I.4.1 Éléments nécessaires à une simulation physique sur un modèle géologique

Tous les éléments présentés précédemment doivent être réunis pour assurer une simulation correcte d'un processus physique sur un modèle géologique (Figure I.9). En utilisant le vocabulaire défini précédemment et qui sera repris dans cette thèse, un géomodèle doit être défini, contenant des entités géologiques et des entités topologiques. La cohérence du modèle tout au long de la chaîne va être assurée grâce à ces entités. Les entités topologiques sont constituées d'entités topologiques qui sont géométriquement définies par un maillage. Sur ce maillage, des propriétés physiques, liées au comportement des roches, sont représentées. Les éléments du maillage sont également le support pour la résolution des équations représentant les processus physiques, qui sont contraintes par les conditions initiales et aux limites.

Dans notre cas, nous nous appuyons sur le géomodèle défini par Pellerin et al. [2017] pour assurer une bonne représentation des différents éléments tout le long de la chaîne de modélisation.

I.4.2 Les verrous présents lors du processus intégratif de modélisation

Différents verrous sont encore présents au sein de cette chaîne de modélisation. Au cœur de chacune des étapes, de nombreux travaux sont en cours, notamment concernant la gestion des incertitudes. Cependant, cette thèse s'attache plus particulièrement à mettre le modèle géologique au centre des différentes étapes de la chaîne. En effet, chacune des étapes est généralement gérée par un spécialiste, avec des outils spécialisés. Le transfert de l'ensemble des informations sans perte de connaissance est alors un des obstacles majeurs à un travail intégré, chaque spécialiste faisant des hypothèses ou simplifications liées à son domaine. Comment assurer l'intégrité des informations et la cohérence du modèle lors de tout le processus ? La levée de ce verrou s'appuie sur l'utilisation directe du modèle géologique incorporant les hétérogénéités structurales comme support à la modélisation physique. Cela passe par la création d'outils et de plate-forme assurant une connectivité entre les différents outils, avec un partage et une transcription des concepts issus des différentes spécialités.

I.4.3 Exemples d'études réalisées sur des systèmes géothermiques

La modélisation des systèmes géothermiques nécessite un effort à la fois sur la compréhension de la géologie, dans un environnement particulier, notamment dû au magmatisme, et sur la modélisation de processus physique pouvant être couplés. Face à la complexité de ces différents éléments, les études réalisées choisissent généralement une forme de simplification. Cette simplification peut intervenir sur différents aspects :

- en ne s'intéressant qu'à une zone d'étude précise, généralement un réservoir géothermique dont différents aspects sont déjà bien connus [Ingebritsen et al., 2016]
- en restant en deux dimensions, ce qui simplifie les schémas de discrétisation et permet de prendre en compte des particularités physiques plus spécifiques [Scott et al., 2016]
- en modélisant des cas synthétiques pour mieux comprendre les processus, sur des blocs et des objets géométriques [Yapparova et al., 2014, Patterson et al., 2018].

L'objectif de cette thèse est de tirer parti de ces différentes avancées pour proposer une modélisation réaliste des processus thermo-hydrauliques ayant lieu dans le réservoir de Basse-Terre, en Guadeloupe. Cependant, différentes simplifications ont également été réalisées, pour pouvoir étudier le réservoir de Basse-Terre selon différents aspects.

Chapitre II

Contexte géologique de l'île de Basse-Terre, Guadeloupe

Sommaire

II.1 Contexte géodynamique régional	34
II.1.1 Les îles des Petites Antilles, au cœur d'une zone de subduction	34
II.1.2 Un arc volcanique actif	34
II.1.3 Des événements tectoniques majeurs	35
II.2 Éléments de géologie de l'île de Basse-Terre	35
II.2.1 Un archipel au cœur de nombreux systèmes de failles	36
II.2.2 Histoire volcanique de l'île de Basse-Terre	38
II.2.3 La Soufrière, volcan au cœur de l'île	41
II.3 Les zones de subduction, un environnement propice à la géothermie	43
II.3.1 Le champ de Bouillante	43
II.3.2 L'archipel des Antilles, un ensemble d'analogues de réservoirs	46
II.4 Nouvelles données acquises dans le cadre du projet GEO- TREF	47

Résumé Cette thèse, en plus de définir des méthodologies générales pouvant être appliquées dans différents contextes, s'est attachée à une application spécifique pour modéliser le comportement du réservoir géothermal de Basse-Terre, en Guadeloupe, dans le cadre du projet GEOTREF. Ce chapitre précise les grands éléments de géologie nécessaires à la compréhension et à la mise en place des modélisations physiques.

II.1 Contexte géodynamique régional

II.1.1 Les îles des Petites Antilles, au cœur d'une zone de subduction

L'archipel de la Guadeloupe fait partie de l'arc des Petites Antilles (Figure II.1). Cet arc s'étend du passage d'Anegada au Nord jusqu'à la marge Vénézuélienne au Sud [Bouysse et al., 1990]. Il est issu d'une subduction localisée à la convergence des plaques Nord et Sud Américaines sous la plaque Caraïbes. Cette subduction est d'une direction générale ENE-OSO, avec une vitesse de convergence peu élevée d'environ $2 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$. Deux zones de contact peuvent être distinguées : la zone de contact des plaques Caraïbes et Amérique du Nord, de direction Ne-SO, et la zone de contact Caraïbes et Amérique du Sud, de direction NS. L'angle de plongement des plaques Nord et Sud Américaines (53°) ainsi que la structure thermique de l'arc ont été étudiés par Gutscher et al. [2013].

À l'Ouest, le bassin d'arrière-arc est marqué par le bassin de Grenade, qui longe la ride d'Aves. À l'Est, le bassin d'avant-arc est structuralement plus complexe, avec une courbure de la zone de subduction. Ainsi, au Nord de l'arc, le bassin avant-arc est affecté par de nombreux grabens, appelés rides (Figure II.1), orientés ENE-OSO, tandis qu'au Sud de la Guadeloupe, les vallées affectant l'arc ont une orientation E-O.

II.1.2 Un arc volcanique actif

La région est formée de deux arcs volcaniques. Un arc ancien, externe, actif entre l'Eocène et l'Oligocène, et un arc actuel, interne, actif depuis le Miocène supérieur [Bouysse et al., 1990]. L'origine de la migration de l'activité volcanique n'est pas encore totalement établie (voir Bouysse et Westercamp [1988], Bangs et al. [2003], Christeson et al. [2003]).

L'arc interne des Petites Antilles, issu de la subduction active actuelle, compte aujourd'hui une dizaine de volcans actifs (Figure II.2). Les trois volcans majeurs de l'archipel sont :

- la Soufrière Hills de Montserrat, entré en éruption en 1995, avec plusieurs explosions volcaniques majeures ayant conduit à l'abandon de la capitale, Plymouth.
- la Montagne Pelée en Martinique, dont l'éruption de 1902 a été l'une des plus meurtrières des Petites Antilles. La dernière éruption de La Montagne Pelée a eu lieu en 1929-1932.

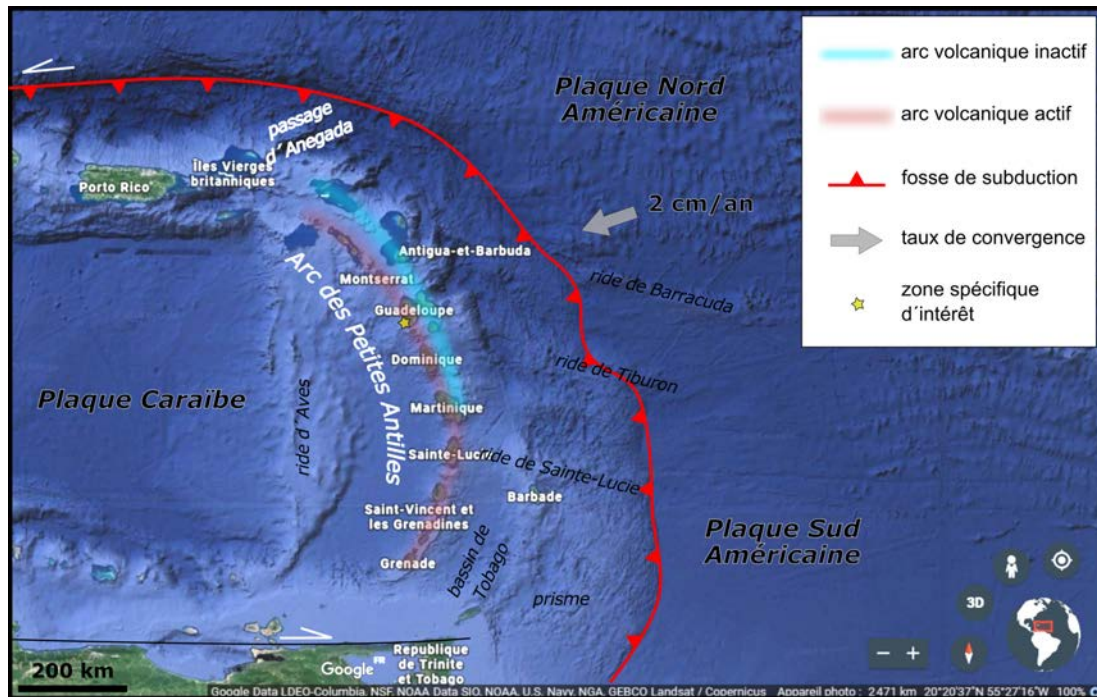


FIGURE II.1 – Carte géodynamique de l'arc des Petites Antilles.

► la Soufrière de Guadeloupe, dont l'histoire sera détaillée après.

II.1.3 Des événements tectoniques majeurs

De fait de la convergence oblique entre les plaques, un partitionnement de la déformation en trois zones peut être observé [Feuillet et al., 2002] (Figure II.3) :

- (1) la partie Nord, du passage d'Anegada au sud de l'archipel de la Guadeloupe, qui est une zone de cisaillement normal sénestre ;
- (2) la Dominique, qui constitue une zone de transition ;
- (3) la partie Sud, de la Martinique jusqu'à la Grenade, qui est une zone de compression oblique dextre.

Nous détaillons ici seulement les éléments de la zone 1, dans laquelle se situe la Guadeloupe. Dans cette zone, la déformation est accommodée à la fois par le décrochement sénestre majeur se situant au niveau de l'arc, mais également par des extensions parallèles et perpendiculaires à l'arc [Feuillet, 2000]. Cela se manifeste par des failles normales en échelons perpendiculaires à l'axe qui forment des grabens et traversent à la fois les structures sous-marines et terrestres.

II.2 Éléments de géologie de l'île de Basse-Terre

L'île de Basse-Terre fait partie de l'archipel des îles de Guadeloupe, qui comprend six îles majeures et de nombreux îlets. Outre Basse-Terre, les îles principales sont Grande-Terre, les îles des Saintes (Terre-de-Haut et Terre-de-Bas), La Désirade et Marie-Galante. Grande-Terre et Marie-Galante sont des îles calcaires qui appartiennent à l'arc

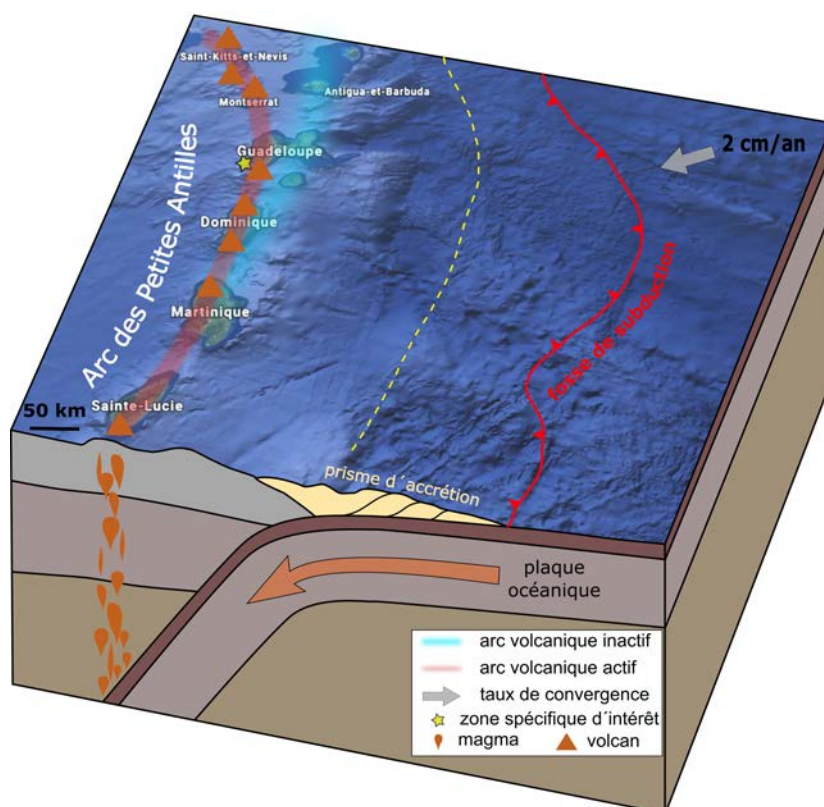


FIGURE II.2 – Schéma du mécanisme de subduction entraînant le volcanisme actif de l'arc des Petites Antilles.

volcanique inactif, tandis que les deux îles des Saintes et Basse-Terre font partie de l'arc actif [Bouysse et al., 1990].

Dans cette partie, nous nous intéressons aux connaissances géologiques de l'archipel, et plus particulièrement de la Basse-Terre.

II.2.1 Un archipel au cœur de nombreux systèmes de failles

Plusieurs études structurales ont été consacrées à l'archipel de la Guadeloupe. Nous nous appuyons ici principalement sur l'étude globale menée par Feuillet [2000]. D'autres études, combinant des observations terrestres et marines, ont été menées sur des zones plus spécifiques, sur des bassins sédimentaires ou des systèmes de failles particuliers, sur des îles ou portions d'île de l'archipel, ou sur certaines zones d'intérêt géothermique (*e.g.* Feuillet et al. [2002], Mathieu [2010], Calcagno et al. [2012], Legendre [2018]). Dans toutes ces études, cinq systèmes principaux de failles ont été identifiés au niveau de l'archipel (Figure II.4) :

- le système de l'Éperon Bertrand-Falmouth (ou Flamouth), composé de grands escarpements de failles normales orientées $N40 \pm 20^\circ$ avec des rejets verticaux de plusieurs kilomètres. Celles-ci délimitent des vallées sous-marines dans la partie Nord-Ouest de la Guadeloupe.
- le système de Karukéra, principalement constitué de failles normales NNO-SSE

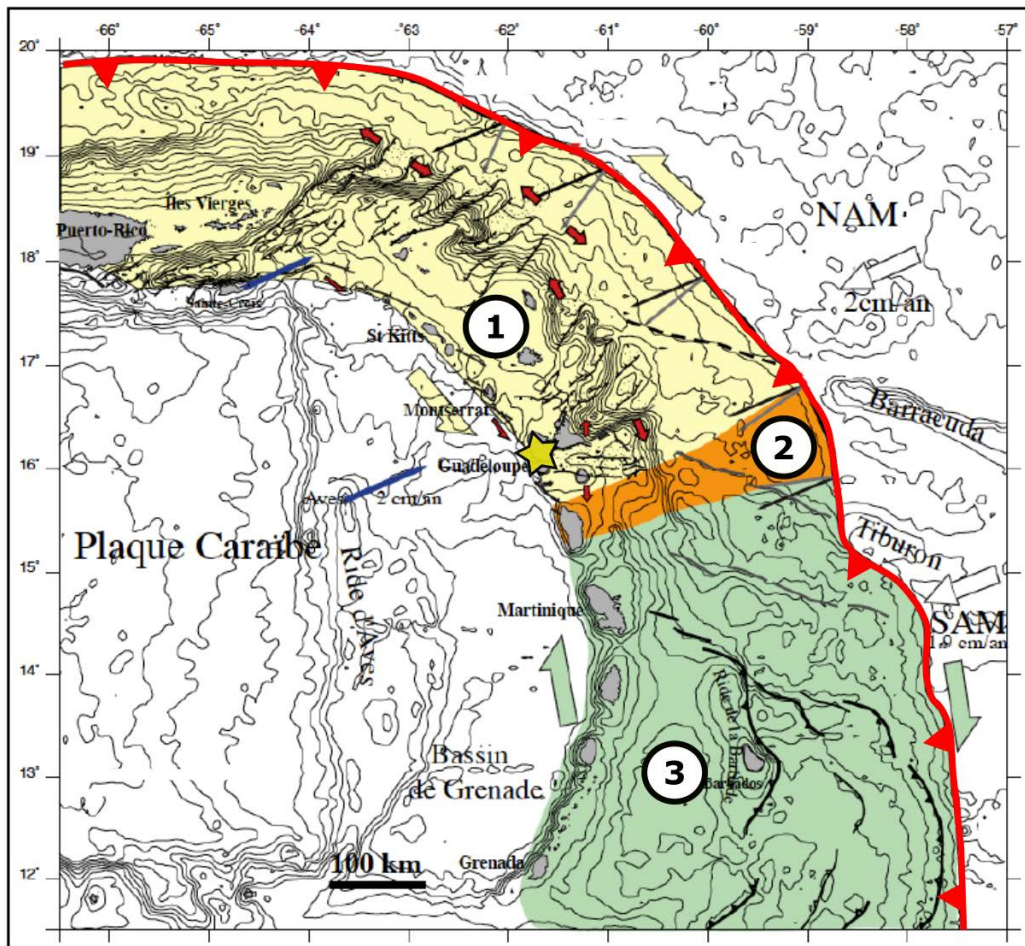


FIGURE II.3 – Carte tectonique de l'arc des Petites Antilles d'après Feuillet [2000]. Trois zones sont distinguées : (1) une zone de cisaillement normal sénestre au Nord, (2) une zone de transition au niveau de la Dominique et (3) une zone de compression oblique dextre au Sud.

à pendage ouest, et de petites failles N110 formant un graben. Ce système résulte d'une extension ESE-ONO.

- le système de Marie-Galante, composé de très nombreuses failles normales d'orientation E-O. Ce système résulte d'une extension NNO-SSE à N-S, parallèle à l'arc.

- le système des Saintes, composé de failles normales qui forment un graben principal d'orientation NO-SE.

- le système Bouillante-Montserrat-Redonda, qui est un système décrochant sénestre orienté $N140 \pm 20^\circ$.

Ces structures majeures à l'échelle de l'archipel sont retrouvées à une échelle plus locales sur l'île de Basse-Terre. Le schéma structural le plus détaillé, qui fait office de référence, est celui de la partie Sud de Basse-Terre, établi par Feuillet et al. [2002] (Figure II.5).

Les deux familles principalement identifiées dans cette partie de l'île sont les suivantes :

- une famille Est-Ouest, correspondant à un régime d'extension mis en avant par la présence du graben de Basse-Terre-Marie-Galante,

- une famille Nord-Sud, correspondant à des failles normales faisant partie du système de Basse-Terre-Montserrat, qui s'étend sur tout l'arc.

Un mécanisme de déformation différent a été proposé par Mathieu [2010], qui évoque une zone de faille transtensive sénestre dans laquelle se forment de grandes sigmoïdes. Ces sigmoïdes seraient alors responsables des effondrements observés, et pourraient être vecteurs de transport de fluides hydrothermaux à grande échelle.

II.2.2 Histoire volcanique de l'île de Basse-Terre

La géologie de l'île de Basse-Terre est liée à l'histoire de son volcanisme. Même si la structure de l'île n'est pas connue avec précision, principalement à cause de l'érosion, des structures d'effondrement, et de la couverture végétale intense en zone tropicale [Mathieu et al., 2013], différents travaux ont amené une description des différentes phases et systèmes éruptifs et d'une carte géologique (*e.g.* Boudon et al. [1988], Mathieu [2010], Legendre [2018]).

L'île de Basse-Terre est constituée d'un assemblage de sept volcans composites, alignés selon un axe NNO-SSE, les plus vieux au Nord de l'île, et les plus récents au Sud. Ces complexes sont : le Complexe Basal, la Chaîne Septentrionale, la Chaîne Axiale, la Chaîne de Bouillante, les Monts Caraïbes, le Complexe de Trois-Rivières-Madeleine, et la chaîne montagneuse de La Grande Découverte-Soufrière, qui est le seul complexe ayant un volcanisme encore actif (Figure II.6). Il est intéressant de noter que quelques édifices volcaniques et monts sous-marins sont hors de l'alignement global, notamment les Monts Caraïbes.

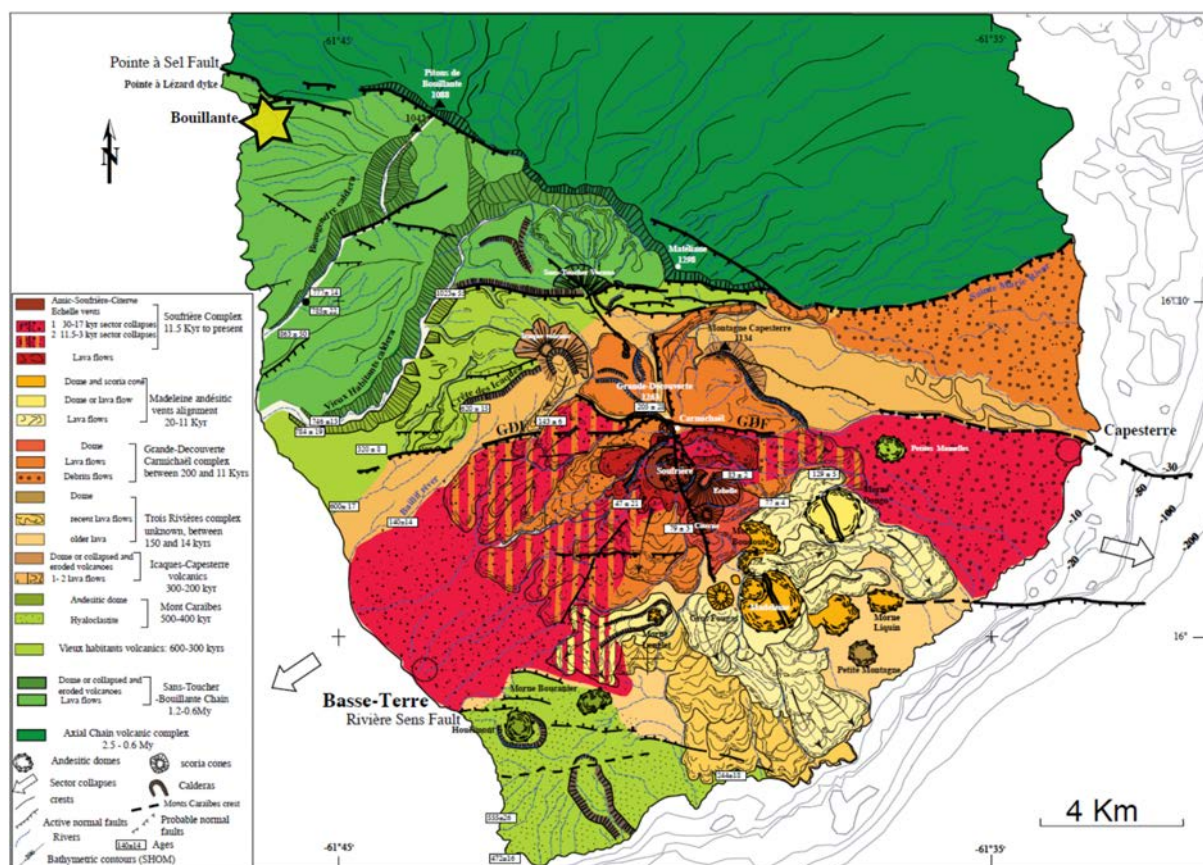


FIGURE II.5 – Carte géologique, structurale et morphologique de la partie Sud de l'île de Basse-Terre, d'après Feuillet et al. [2002]. Les deux familles principales de failles sont l'expression à l'échelle locale des systèmes vus à l'échelle régionale.

De nombreux points éruptifs sont présents dans chacun de ces complexes volcaniques, qui composent une large chaîne volcanique globale (Figure II.6, 55 km de long et 25 km de large, avec une orientation NNO). La frise présentée Figure II.7 résume l'histoire éruptive de l'île. L'activité volcanique conduisant à la création de l'île de Basse-Terre a commencé il y a trois millions d'années, avec la construction du Complexe Basal, puis de la Chaîne Septentrionale à l'extrémité nord de l'île actuelle [Samper, 2007]. Les autres étapes du volcanisme de l'île eurent lieu durant le dernier million d'années. Entre 600 000 et 250 000 ans, trois complexes étaient actifs en même temps : la Chaîne Axiale, la Chaîne de Bouillante et les Monts Caraïbes. La chaîne de Bouillante a été formée entre 800 000 et 250 000 ans, principalement suite à une activité phréatomagmatique, qui a conduit à la formation d'une série de cheminées sous-marines et aériennes. Les deux complexes les plus récents sont ceux de Grande-Découverte-Soufrière et de Trois-Rivières-Madeleine, avec une activité démarrant respectivement il y a 200 000 et 87 500 ans. Un schéma montrant l'évolution de l'île de Basse-Terre au cours des différentes phases éruptives est présenté Figure II.8 [Mathieu, 2010].

II.2.3 La Soufrière, volcan au coeur de l'île

Le seul complexe avec un volcanisme encore actif est celui du volcan composite Grande-Découverte-Soufrière, qui montre trois étapes distinctes d'activité magmatique [Boudon et al., 1988] (Figure II.9) :

- la phase de Grande-Découverte : entre 200 000 et 42 000 ans. Le volcan composite de Grande-Découverte a été érigé par une série d'éruptions effusives produisant des flux de laves andésitiques pouvant se disperser jusqu'à 10 km autour de la cheminée. Cette phase à dominante effusive a été interrompue par trois éruptions explosives majeures qui ont formé des caldeiras et dispersé des dépôts de ponces sur tout le Sud de Basse-Terre.
- la phase Carmichaël : entre 42 000 et 11 500 ans. Le volcan composite de Carmichaël est reconstruit à l'intérieur de la caldeira suite à une succession de coulées de laves et de dômes dus à des éruptions explosives pyroclastiques.
- la phase Soufrière : 8 500 à l'actuel. La dernière, et actuelle, phase éruptive a commencé après l'effondrement d'un édifice ayant conduit à la formation du cratère Amic (il y a 8500 ans). Cette phase est caractérisée par une succession d'éruptions avec coulées de lave, ainsi que par des périodes prolongées d'activité phréatique produisant des dépôts de cendres (en particulier entre 8000 et 2700 ans).

Depuis la dernière éruption magmatique de la Soufrière (1530), six éruptions phréatiques ont eu lieu (1690, 1812, 1836-1837, 1956) dont les événements majeurs de 1797-1798 et 1976-1977.

Le dôme actuel de la Soufrière est constitué de nombreux compartiments argillés épais, séparés par des couches imperméables, dans lesquelles les eaux phréatiques montrent leur nature thermique (températures et débits des sources) [Zlotnicki et al., 1992]. Un schéma de la structure du dôme et des circulation de fluides y ayant lieu a

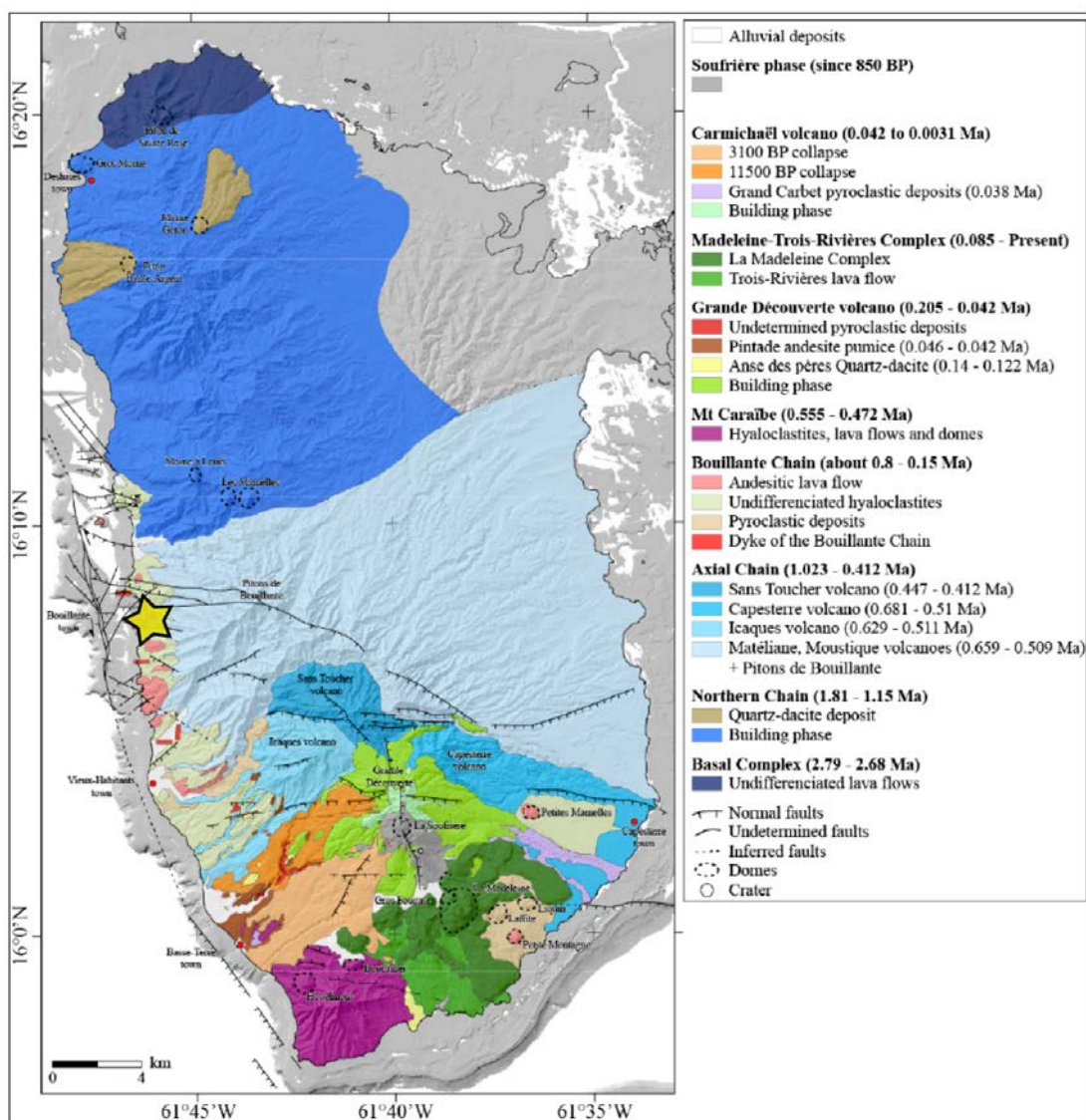


FIGURE II.6 – Carte géologique mettant en avant les différents complexes volcaniques de l'île de Basse-Terre. Lithologies d'après Boudon et al. [1988], Mathieu [2010], Legendre [2018] ; éléments structuraux d'après Boudon et al. [1988], Feuillet et al. [2002], Calcagno et al. [2012] ; âges selon la synthèse de Ricci et al. [2017] ; modifié d'après Navelot [2018].

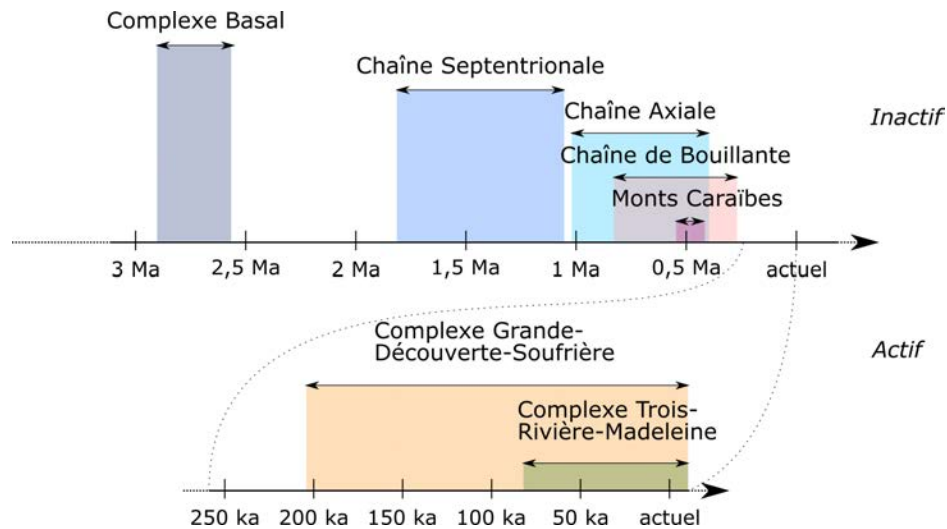


FIGURE II.7 – Frise chronologique des différentes phases éruptives et des différents complexes volcaniques mis en place sur l'île de Basse-Terre (d'après Mathieu [2010], Ricci et al. [2017]).

été établi grâce à une étude intégrée de données de prospection électrique, de potentiel spontané, de mesures de températures du sous-sol et de composition de CO_2 dans le sous-sol (Figure II.10, Brothelande et al. [2014]).

II.3 Les zones de subduction, un environnement propice à la géothermie

Le cadre tectonique particulier de l'île de Basse-Terre en fait un lieu privilégié de mise en place d'une exploitation géothermique [Reeder, 1985]. Dans cette partie, nous reviendrons plus spécifiquement sur l'exploitation du champ de Bouillante, ainsi que sur les différents analogues de réservoirs présents dans l'archipel, qui peuvent permettre une meilleure compréhension du réservoir de Vieux-Habitants, dans la partie sud de Basse-Terre.

II.3.1 Le champ de Bouillante

De nombreuses manifestations thermales sont présentes dans la partie Sud de l'île de Basse-Terre. L'essentiel de ces manifestations apparaît sous forme de fumeroles autour du dôme de la Soufrière, mais il y a aussi des sources pouvant atteindre 100°C [Bézègues-Courtade et Bès de Berc, 2007, Villemant et al., 2014, Brothelande et al., 2014]. Plusieurs de ces sources sont présentes autour de la ville de Bouillante, où une usine d'exploitation géothermique a été mise en place dans les années 1970 [Jaud et Lamethe, 1985]. Quatre puits d'exploration verticaux ont été forés dans un premier lieu, dans cette zone reconnue pour ces fortes manifestations de chaleur en surface. En 2001, trois puits supplémentaires, déviés, ont été forés. Aujourd'hui, seulement deux puits sont utilisés pour la production d'électricité, les autres permettant soit d'effectuer des

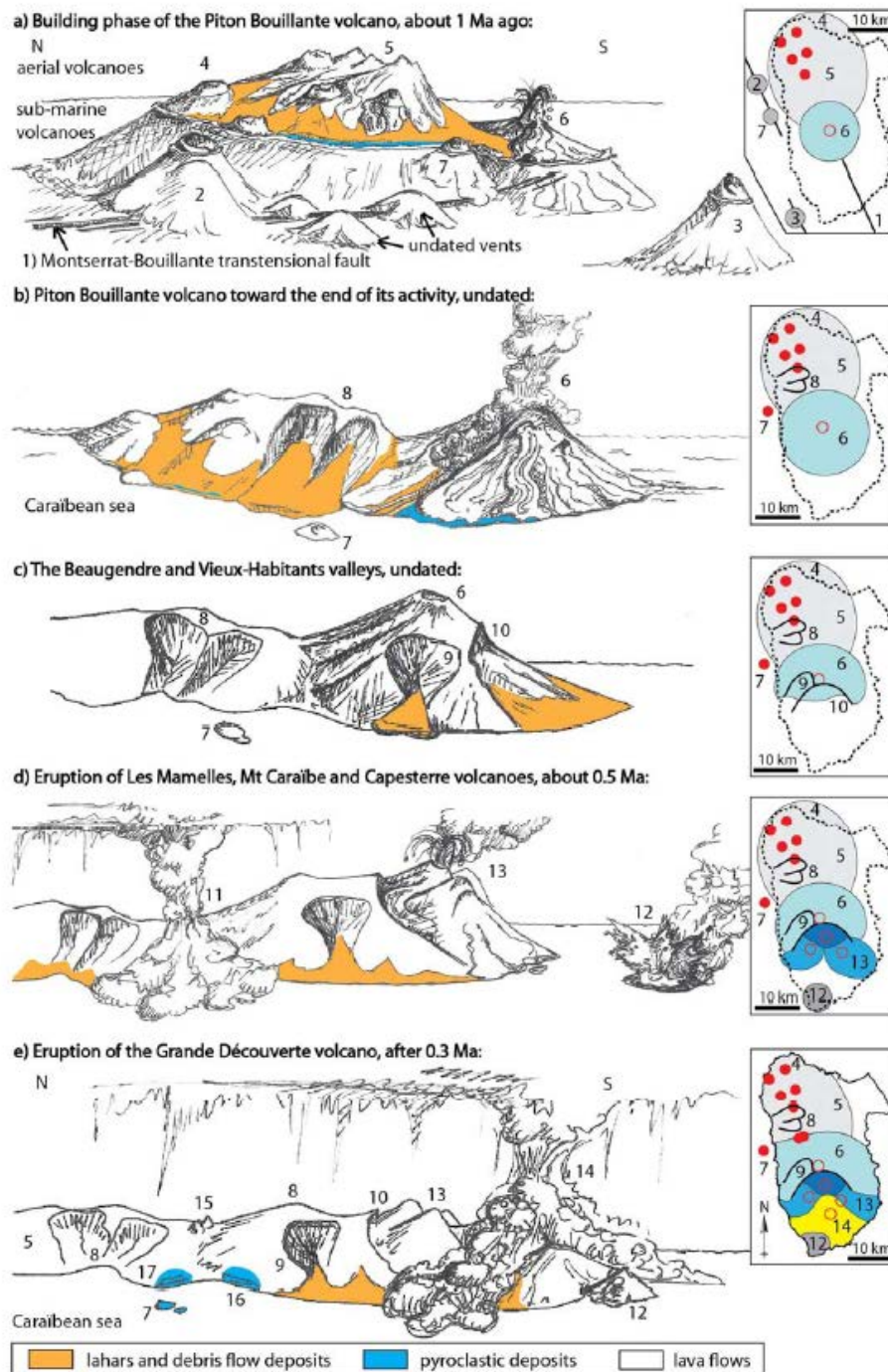


FIGURE II.8 – Schéma présentant l'évolution de l'île de Basse-Terre au cours des différentes phases éruptives et de la mise en place des différents complexes volcaniques, d'après Mathieu [2010] .

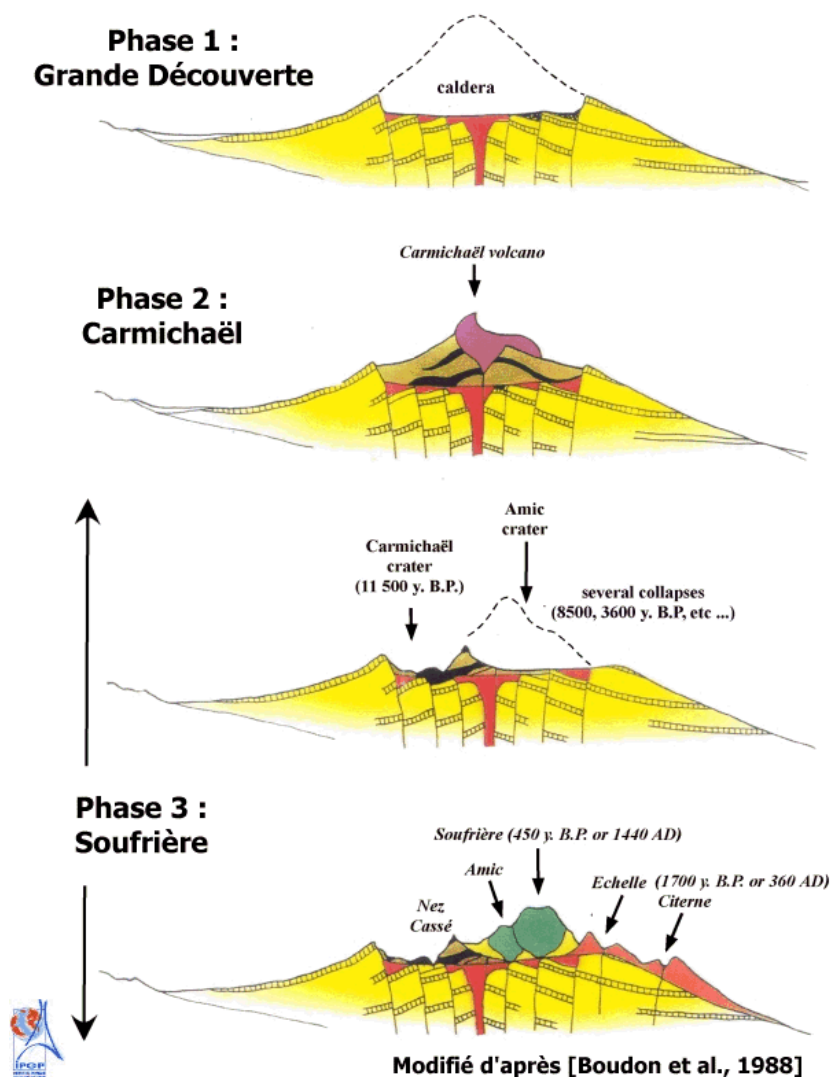


FIGURE II.9 – Évolution du complexe volcanique du volcan composite Grande-Découverte-Soufrière, d'après Boudon et al. [1988].

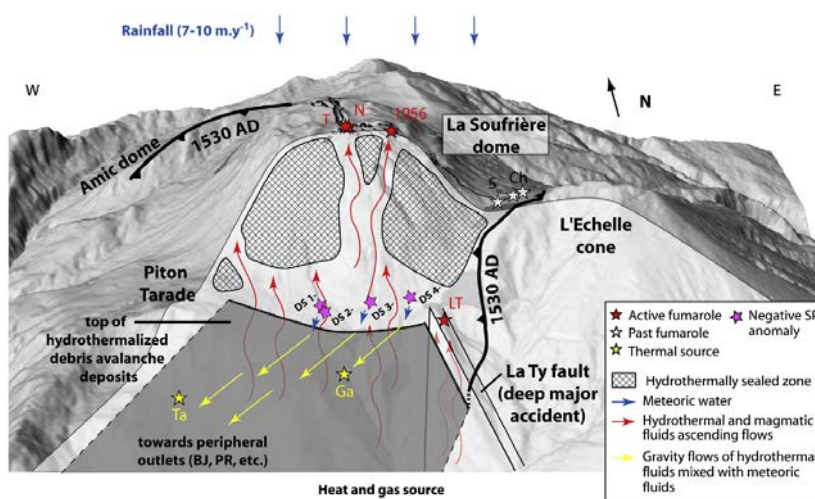


FIGURE II.10 – Schéma structural et des circulations de fluides ayant lieu dans le dôme du volcan de la Soufrière, d'après Brothelande et al. [2014].

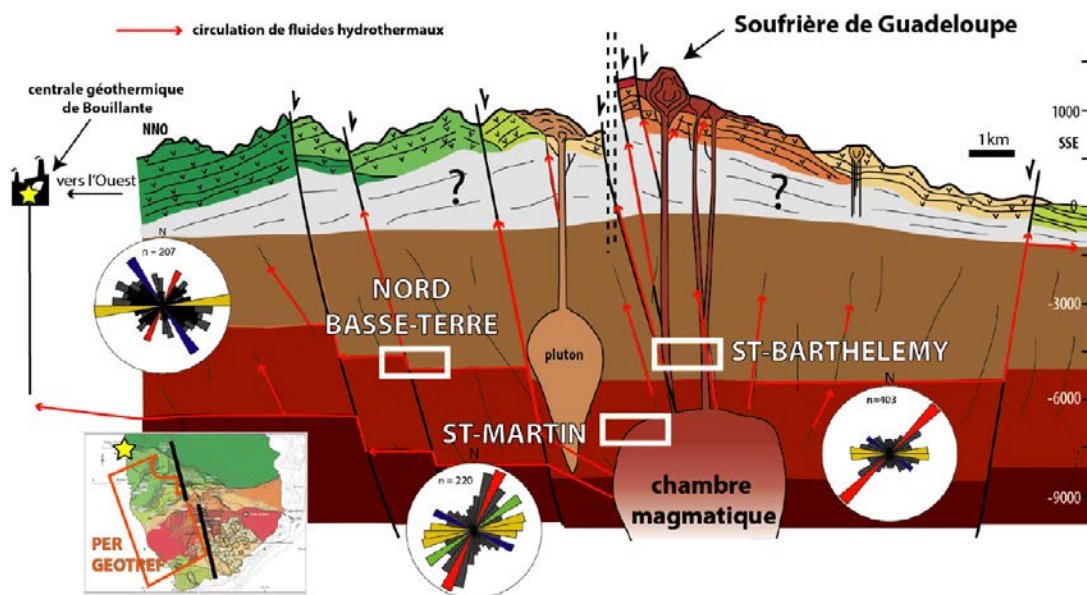


FIGURE II.11 – Coupe schématique représentant les différents analogues de réservoirs étudiés dans le cadre du projet GEOTREF par Navelot [2018] et Legendre [2018].

observations et suivis, soit de réinjecter pour éviter le déclin de pression.

Le champ de Bouillante est à une position géodynamique clé, à l'intersection entre deux familles de failles majeures développées précédemment : le système de Bouillante-Montserrat et la faille de Bouillante-Capesterre, qui appartient au système de Marie-Galante. Le champ de Bouillante est ainsi localisé dans un petit graben, dont le pendage sub-vertical des failles favorise la circulation de fluides géothermaux [Calcagno et al., 2012].

Le champ de Bouillante est un champ de type magmatique volcanique, dominé par la convection (d'après la classification établie par Moeck [2014]). Il est caractérisé par une altération hydrothermale pénétrante, de type neutre, qui est classique des systèmes géothermiques haute enthalpie d'arc volcanique.

Pour expliquer le fonctionnement de ce champ, deux modèles ont été réalisés : un modèle conceptuel, développé par Bouchot et al. [2009], et un modèle hydrogéologique, développé par Lachassagne et al. [2009]. Ces modèles ne font pas consensus, et l'un des objectifs de GEOTREF est de les améliorer.

II.3.2 L'archipel des Antilles, un ensemble d'analogues de réservoirs

L'approche globale développée dans le cadre du projet GEOTREF est de s'intéresser à des paléo réservoirs géothermaux analogues à celui de Vieux-Habitants, pour le caractériser à différentes phases de maturation. Différentes parties de l'archipel des Petites Antilles ont ainsi été étudiées pour pallier l'inaccessibilité du réservoir de Vieux-Habitants, comme le montre la Figure II.11.

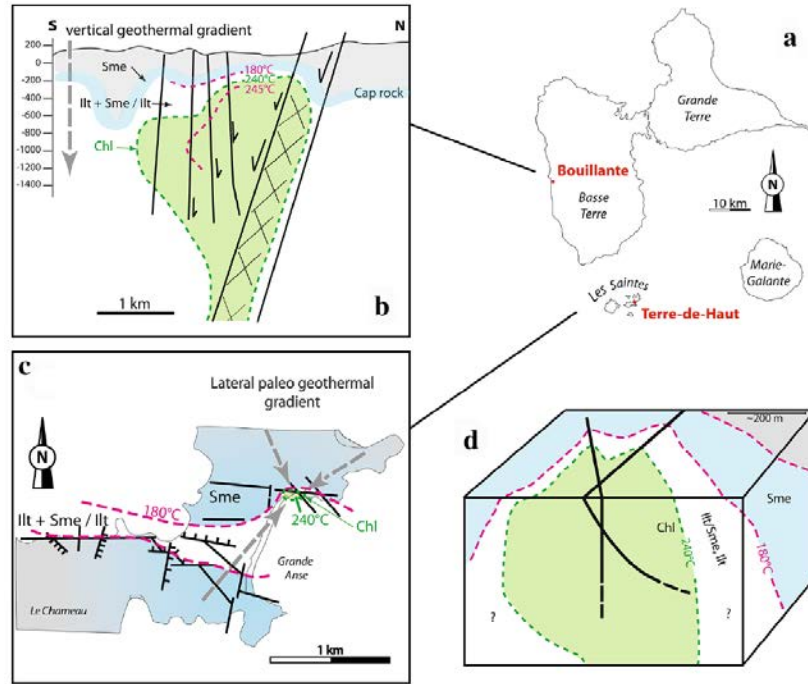


FIGURE II.12 – Comparaison et interprétation des répartitions de minéraux argileux sur les systèmes géothermaux actifs ou paléo-réservoirs de Bouillante et Terre-de-Haut. (a) Carte de l'archipel de la Guadeloupe. (b) Représentation schématique 2D de la répartition des minéraux argileux dans le réservoir de Bouillante. (c) Représentation 2D de la répartition des minéraux argileux dans le paléo-réservoir exhumé de Terre-de-Haut. (d) Interprétation 3D des systèmes géothermiques en Guadeloupe, avec les répartitions des minéraux argileux (d'après Bouchot et al. [2009], Beauchamps et al. [2019]).

II.4 Nouvelles données acquises dans le cadre du projet GEOTREF

Dans le cadre du projet GEOTREF, de nouvelles études de terrain ont été réalisées. Ces études de terrain s'intéressent à des paléo réservoirs géothermaux. Des études ont été menées sur l'île de Basse-Terre [Navelot et al., 2018, Legendre, 2018] et sur les îles de Terre-de-Haut de l'archipel des Saintes [Navelot, 2018, Beauchamps et al., 2019]. Ces études ont permis de confirmer les trois directions principales des discontinuités structurales observées à l'échelle de tout l'archipel, et une meilleure caractérisation des propriétés pétrophysiques liées à l'altération du réservoir, comme par exemple la répartition des phases argileuses présentée Figure II.12.

En plus de ces études de terrains, de nouvelles campagnes d'acquisition de données géophysiques ont été menées. Différentes méthodologies ont été développées et utilisées dans le cadre de la thèse de Jeanne Mercier de Lépinay, notamment grâce à des levés magnétiques par drone. Cela a permis de mieux caractériser les structures affleurantes sur l'île de Terre-de-Haut des Saintes et une partie de la zone PER de Basse-Terre. Une campagne d'acquisition de données magnéto-telluriques a également été menée par

IMAGIR, conduisant à l'interprétation de zones conductrices pouvant être dues à la remontée de chaleur [Teranov, 2018].

Chapitre III

Méthodologie de reconstruction, transfert et conservation des informations géologiques lors des simulations physiques.

Sommaire

III.1 Reconstruction des informations topologiques d'une coupe 2D dans un modèle géologique	50
III.1.1 Description du workflow et des outils utilisés	50
III.1.2 Conservation de l'intégrité des informations lors des transferts	52
III.2 Methodology to ensure the conservation of geological infor- mation during transfer from geological modeller to physical simulation tool	59
III.3 Benchmark on the estimation of the stress near a borehole	62
III.3.1 Model set up	62
III.3.2 Results	63
III.4 Application to a complex geological model	65
III.5 Conclusion	67

Résumé La création d'un modèle géologique passe par la caractérisation et la représentation des hétérogénéités du sous-sol. Les hétérogénéités à grande échelle (failles, horizons...) définissent des régions dans lesquelles un modèle de propriétés est défini. Les modèles géologiques ainsi créés servent de support à la simulation de processus physiques. Cependant, la simulation de processus physiques réclame souvent un changement d'échelle de représentation et une simplification géométrique et/ou topologique. Cette étape est motivée par des contraintes pratiques liées aux outils (temps de calcul, incompatibilité des formats de discrétisation...). Ce chapitre propose des outils pour limiter la perte de consistance géologique pendant la création du modèle physique. Cette étape produira directement une discrétisation utilisable pour la modélisation de phénomènes physiques couplés en conservant la géométrie et la topologie du modèle géologique produites par le géologue.

Ce chapitre comporte une première section sur la reconstruction d'un modèle géologique complet à partir de coupes 2D d'un modèle géologique. Le reste de ce chapitre est présenté sous la forme d'une partie d'un article écrit pour soumission au journal *Applied Computing and Geosciences*, et d'une application réalisée en collaboration avec l'équipe de Stephan Matthäi, professeur à l'Université de Melbourne.

III.1 Reconstruction des informations topologiques d'une coupe 2D dans un modèle géologique

La mise en place d'une simulation physique implique une caractérisation précise des entités présentes dans le modèle (entités géologiques, comme les couches géologiques, et entités physiques, comme les interfaces sur lesquelles sont appliquées les conditions aux limites). Cette caractérisation peut être simplifiée pour des raisons pratiques au fil de la transmission entre différents outils logiciels. Cela est particulièrement vrai en 2D. Nous proposons ici une méthodologie pour transcrire toutes les informations lors de la création de coupes 2D, et les ajouter lorsqu'elles manquent. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec Pierre Anquez, doctorant de l'équipe RING, et s'appuient sur des outils mis en place durant sa thèse [Anquez et al., 2019].

III.1.1 Description du workflow et des outils utilisés

Les étapes globales du processus de simulations physiques sur des coupes géologiques en 2D, reprenant la chaîne de modélisation présentée Chapitre I, ainsi que les outils intervenant dans ce processus sont présentés Figure III.1.

Les outils de ce workflow ont chacun un rôle différent :

- SKUA-GocadTM, un géomodeleur qui permet de réaliser des modèles en 3D intégrant différents types de données. À partir de ce modèle 3D, une coupe en

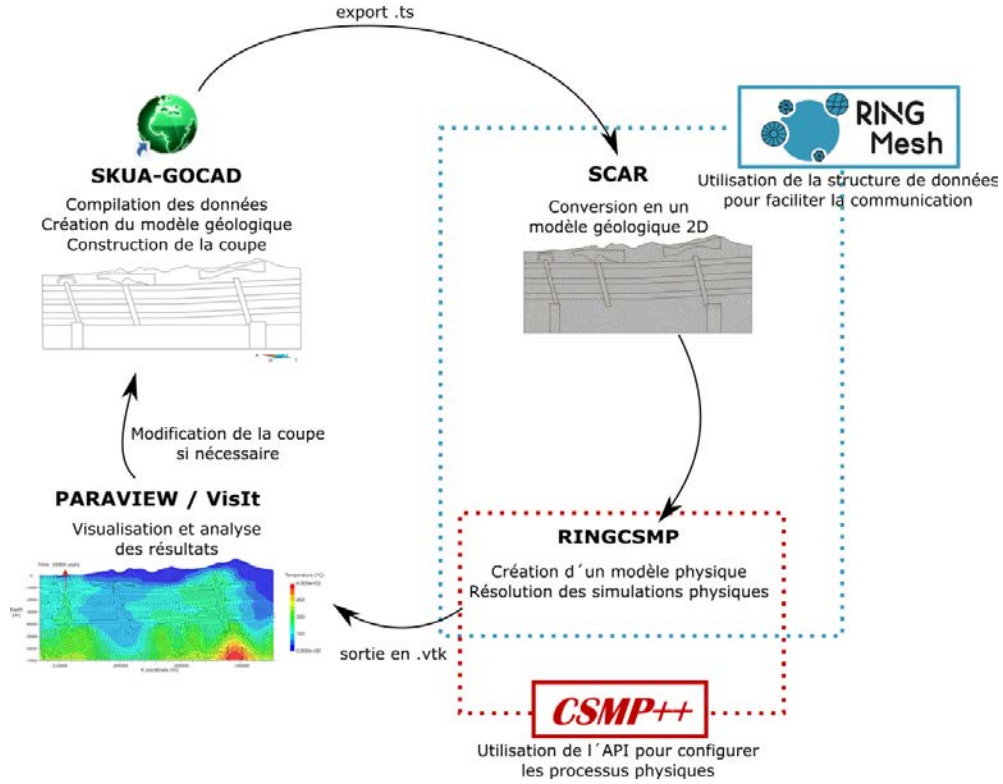


FIGURE III.1 – Présentation du workflow et des outils utilisés pour réaliser des simulations physiques sur des coupes géologiques en 2D.

2D est réalisée. Cependant, l'information géologique est alors perdue, le modèle ne consistant plus qu'en un assemblage de lignes.

► **RINGMesh**, une bibliothèque développée en C++ au sein de l'équipe RING. Elle définit la structure de données présentée Chapitre I sur laquelle s'appuie ce travail pour reconstruire et transférer les informations nécessaires aux simulations physiques.

► **SCAR**, une bibliothèque développée en C++ au sein de l'équipe RING par Pierre Anquez lors de son doctorat. Cette librairie s'appuie sur la structure de données définie dans RINGMesh pour la gestion des géomodèles. Son objectif est d'automatiser les processus de réparation et de simplification des modèles géologiques en 2D. Différentes fonctionnalités de cette librairie ont été utilisées, améliorées ou mises en place dans le cadre de ce workflow.

► **RINGCSMP**, une bibliothèque développée en C++ au cours de cette thèse. Elle s'appuie sur la structure de données définie par RINGMesh pour identifier les différentes entités du modèle et assurer leur conversion et transfert à la librairie CSMP++.

► **CSMP++**, une bibliothèque développée en C++ pour réaliser des simulations physiques de différents processus. Cette librairie généraliste permet de modéliser des processus couplés, en incluant notamment les processus multiphasiques en 2D, avec l'utilisation d'un schéma numérique éléments finis, volumes finis.

► Paraview ou VisIt, des logiciels qui permettent de visualiser les résultats des simulations physiques.

Pour pouvoir agir sur le modèle, par exemple pour définir des propriétés constantes par régions ou des conditions aux limites, il est nécessaire d'identifier précisément les différentes entités du modèle. Cependant, ces informations peuvent être non définies ou perdues, selon les outils utilisés ou lors des conversions pour passer de l'un à l'autre. Une méthodologie est proposée ici pour récupérer ou reconstruire tous les éléments nécessaires sur une coupe géologique 2D.

III.1.2 Conservation de l'intégrité des informations lors des transferts

L'extraction d'une coupe géologique à partir d'un modèle 3D est ici réalisée sous la forme d'un ensemble de lignes définissant les contours des différentes entités du modèle. L'information géométrique est conservée, et il est nécessaire de reconstituer les informations topologiques. Il faut alors :

► recréer les entités topologiques. En 2D, les entités topologiques de plus haute dimension sont les surfaces. De par la méthode de création du modèle utilisé, à partir d'un ensemble de lignes, ces surfaces ne sont pas définies. Il faut donc recréer les entités topologiques Surfaces en indiquant les relations d'incidence dans le modèle, *i.e.* en définissant toutes les lignes qui bordent chaque surface.

► redéfinir les entités géologiques, supports des informations physiques. Un sens géologique est apporté aux entités topologiques précédemment recréées, en redéfinissant les entités géologiques. À chacune de ces entités géologique sont associées les entités topologiques qui la composent et un nom, qui va permettre d'appliquer des conditions ou des propriétés différentes à chacune lors des simulations physiques (voir Figure I.5).

Pour restituer la cohérence du modèle, l'algorithme présenté Algorithme 1 est utilisé.

Une fois le modèle préparé et complété, le transfert vers le simulateur physique pourra être assuré avec la méthodologie présentée dans les sections suivantes, valable à la fois en 2D et en 3D.

Algorithme 1 : Processus de conservation des informations topologiques et géologiques sur un modèle 2D.

Données : un ensemble E de lignes L_i formant les contours du modèle géologique en 2D

Résultat : un modèle géologique en 2D contenant les informations nécessaires à une simulation physique

- 1 Projection de E sur une surface plane 2D ;
 - 2 Nettoyage et réparation du modèle ;
 - 3 **pour chaque** *entité surface du modèle* **faire**
 - 4 | Définition des lignes qui la bordent ;
 - 5 **fin**
 - 6 Remaillage du modèle ;
 - 7 **pour chaque** *entité géologique du modèle* **faire**
 - 8 | Définition de son nom ;
 - 9 | Définition des entités topologiques qui la composent ;
 - 10 **fin**
-

*Partie d'article en préparation pour soumission au journal Applied Computing and
Geosciences*

Authors : M. Raguenel, A. Mazuyer, F. Bonneau, S. K. Matthai

Abstract Simulate physical processes on geological models is becoming an asset for decision making in geosciences. Several tools, processes and workflows have been developed in this perspective. In this context, enabling the conjoint use of different software represents a major challenge leading to deal with several tools and various file formats. Therefore, it can be a drawback to understand the impact of geological heterogeneities on coupled physical processes. In this paper, we propose an interfacing tool allowing the direct communication between two libraries: (1) RINGMesh, which implements a data structure for describing the topology and the geometry of geological models; and (2) CSMP++, which performs physical simulations using a finite volume-finite element resolution scheme. The first step to establish this communication is to extract and transfer the geometrical, topological and geological information from RINGMesh to CSMP++. This representation is, in a second step, used to set the physical model by describing the constitutive equations and boundary conditions. A benchmark has been done on the modeling of the stress state near a borehole. Finally, a simple geothermal process has been simulated on a geometry involving several geological heterogeneities to show the capacity of the tool to handle various physical processes and open the path for further complex coupled applications.

Introduction

Understanding complex reservoirs is a key point in their exploitation in all resource industries (oil and gas, geothermal energy, mining...). With the new capacities to acquire large datasets and monitor the subsurface, the comprehension of reservoir behavior relies on numerical models. These models aim at taking into account both the geological and physical complexity of a reservoir. The results of the models and simulations are only meaningful if the geometric complexity of the geology of the studied area is well represented. This can only be done with the use of specialised geomodeling software that can handle the specificities of geological modeling, such as scarcity and uncertainties [Caumon, 2018, Wellmann et Caumon, 2018]. However, specialized software is also mandatory to simulate the physical processes through resolution schemes solving the physical equations (i.e. Zienkiewicz et Taylor [2000]). In between, an extra step may be requested to create or improve a volume discretization [Botella, 2016]. This calls for the elaboration of a complex workflow or an interfacing tool to handle several programs and transfer data from one to another (Figure III.2, Zehner et al. [2015], Görz et al. [2017], Jang et al. [2018]).

The transferring and interfacing work calls for a clarification of what is referred to as the geological and physical models, and of which elements of each model need to be kept and integrated. Geologists should be able to directly create a model that can be used by the physical simulator. In this paper, what will be called the geological model (or GeoModel as defined by Pellerin et al. [2017]) is a boundary representation of the geological structures that has been discretized in space [Caumon et al., 2009]. It individualizes regions inside which a property model can be set on the mesh. Mesh

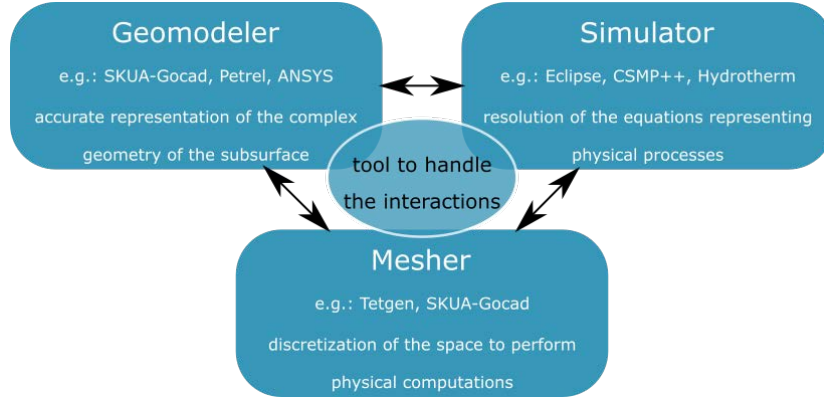


Figure III.2 – Interaction between several specialized tools to perform physical simulations on a geological model.

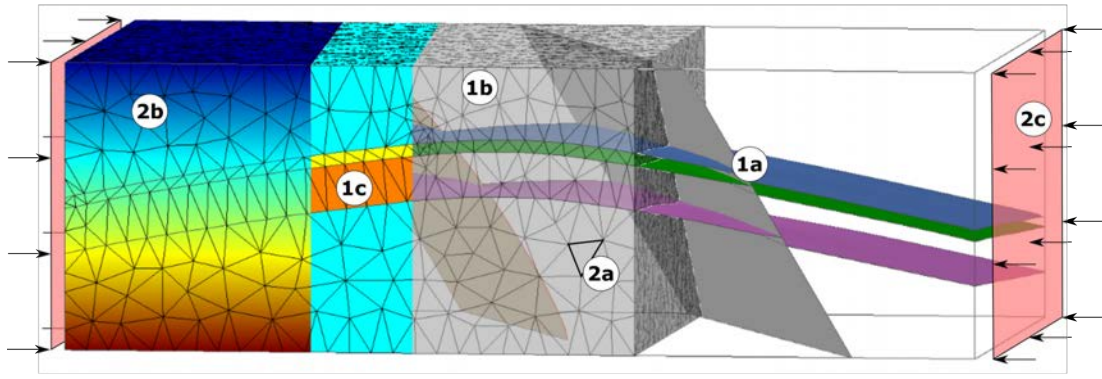


Figure III.3 – Elements needed to run simulations in geomodels: (1) the geological model composed of the surfaces delimiting geological structures (1a, here horizons and faults), the mesh representing these structures in 3D (1b, here an unstructured conformable tetrahedral mesh) and the properties describing the behavior of the rocks (1c, here a property which is constant by layer). (2) the physical model, with the equation(s) describing the physical processes (2a, the equation is solved on each element of the mesh), the state variables involved in the process(es) (2b, here a uniform gradient) and the initial and boundary conditions (2c, here applied only on two boundaries).

cell resolution needs to be carefully chosen in order to set a meaningful property model. What will be referred to as the physical model are the equations describing the physical processes discretized in space, the state variables involved in the processes and the boundary and initial conditions (Figure III.3).

Different types of space discretizations exist, depending on the process that is represented and the resolution method that we want to use. In this paper, we choose to use unstructured grids, as it can better accommodate the geometric complexity of the geological structures, and several resolution schemes can be applied on it. The representation of the geological structures is a key point as it is mandatory to assess their impact on the physical processes. Large scale discontinuities will be considered explicitly and the mesh resolution is assumed to be close to a representative elementary volume to avoid upscaling issues [Bear, 1988, Eaton, 2006].

In this paper, we will first present the methodology used to keep the needed information during the interface between the geological and physical models. Our methodology is then validated with a benchmark on an linear elasticity problem. Finally, we demonstrate that our tool can handle complex models through the handling of a model with a lot of geological features.

III.2 Methodology to ensure the conservation of geological information during transfer from geological modeller to physical simulation tool

The prerequisites to run a simulation are a mesh suitable for a resolution scheme, borders to apply the initial and boundary conditions and properties that describe the material (Figure III.3). The RINGMesh library is able to preserve the geological complexity described in geomodeler and ensure its validity while it is manipulated (for example through the call of different meshers to produce the most suitable mesh for the chosen application). The aim of the methodology developed here is to easily transfer a geological model to a physical simulator, CSMP++, by handling the intermediary steps through the RINGMesh API (Application Programming Interface) [Pellerin et al., 2017]. This can both (1) allow a better efficiency in the communication between various specialists during the modeling workflow, (2) allow more complexity by taking advantage of the capacities of both tools together. Until now, the creation of a CSMP++ model for simulation is mostly handled through the direct use of software not designed specifically for geological modeling, or with the handling of several files.

To ensure the consistency between the geological model handled by RINGMesh and the model recreated in CSMP++, several steps have to be carefully followed. These steps are described in the following paragraphs and Figure III.4.

Retrieve the geometry The first step is to reconstruct the mesh into a CSMP++ *VSet* object, which contains all the elements of the mesh (cells, facets and vertices). First of all, all the vertices coordinates are read and transferred. Then, the specificities of each element (type, vertices, neighbors) are stored in different lists. During this step, a specific attention has to be attached to the iteration order. To ensure the good handling of the lists and the integrity of the model, the elements have to be always read in the same order.

Retrieve the topology Once all the elements have been stored, the connection between them and their relations to form regions are stored. These regions are in all dimensions, representing geological layers, geological interfaces (horizons, faults or boundaries) and geological contacts.

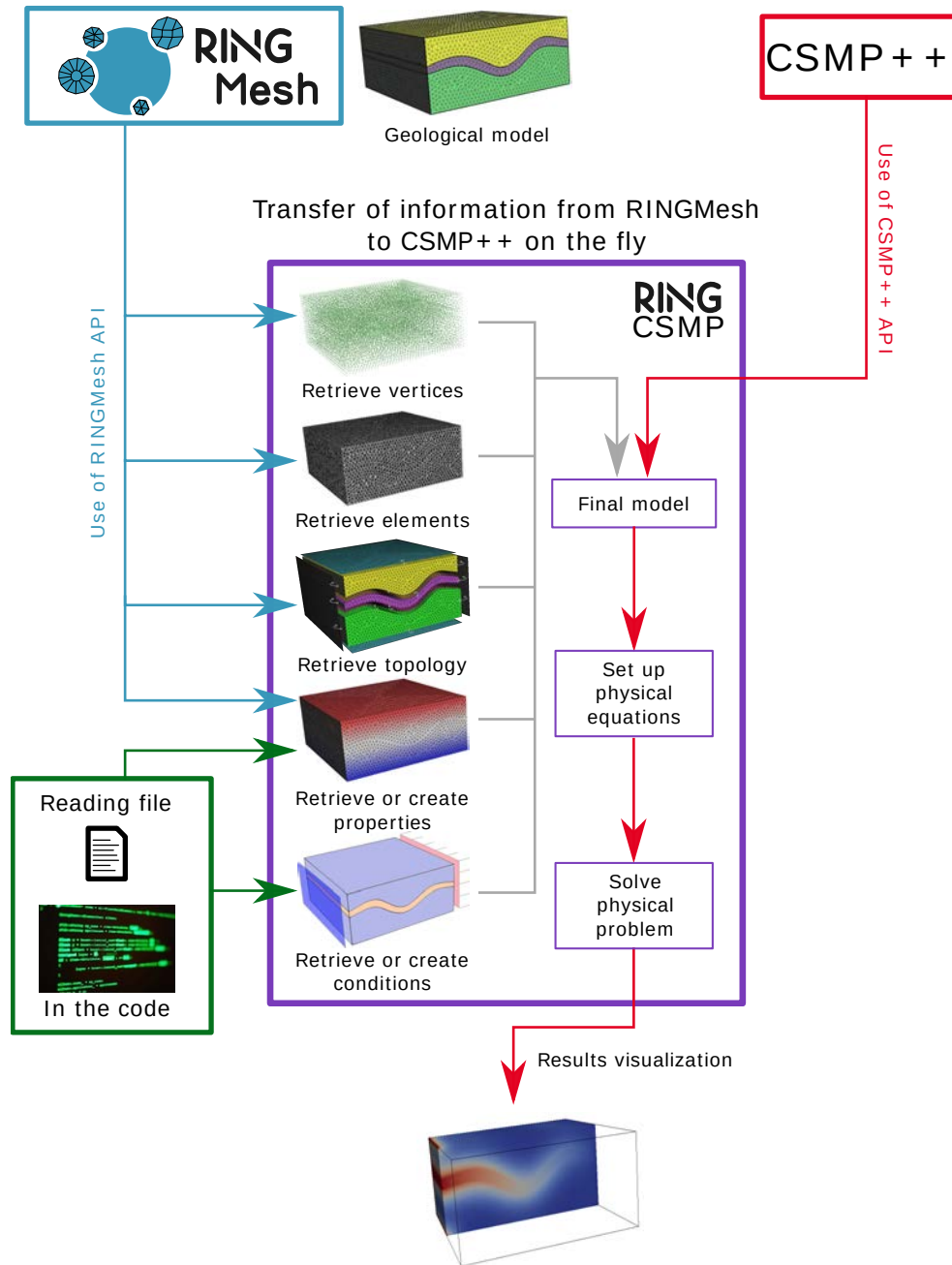


Figure III.4 – Steps to link RINGMesh and CSMP++ to run physical simulations and ensure the geological consistency of the model.

Algorithm 2 : Transfer of the information from the geological model.

```

Data : a valid geological model
Result : a model with all the geological information transferred and ready
            for the physical simulation
/* Preparation of the transfer (count all the elements and create
   empty lists) */
/* It is mandatory to be careful of the order of reading, as the
   matching between the different lists is only done by the
   ordering inside */
1 create empty list to store coordinates of the vertices ;
2 create empty list to store the type of each element of the model ;
3 create empty list to store the neighbors of each element ;
4 create empty list to store the vertices belonging to each element ;
5 foreach Vertex of the model do
6 |   transfer the coordinates (inversion of Y and Z) ;
7 end
   /* Geometrical transfer of the model */
8 foreach geological entity of the model do
9 |   foreach geometrical entity inside the geological entity do
10 | |   foreach element of this entity do
11 | | |   determine and transfer the type of the element ;
12 | | |   determine and transfer the vertices that are part of the element ;
13 | | |   determine and transfer the neighbours of the element ;
14 | |   end
15 |   end
16 end
   /* Topological transfer of the model */
17 foreach geological entity of the model do
18 |   retrieve the name of the entity ;
19 |   create an empty list for the entity region ;
20 |   foreach geometrical entity inside the geological entity do
21 | |   foreach element of this entity do
22 | | |   retrieve the index of this element ;
23 | | |   add the element to the region list ;
24 | |   end
25 |   end
26 |   create a region corresponding to the entity from the list ;
27 end
   /* Property transfer of the model */
28 retrieve the list of the properties stored in the model; foreach property that
   need to be transferred do
29 |   create the specific property in the final model; foreach geological entity
   of the model do
30 | |   foreach geometrical entity inside the geological entity do
31 | | |   foreach element of this entity do
32 | | | |   transfer the value of the property ;
33 | | |   end
34 | |   end
35 |   end
36 end

```

Retrieve the properties All the properties needed to represent the geological behavior of the rocks and to run physical processes are then included in the model. This can be done by different ways, with an increasing complexity. (1) Constant properties are defined with a configuration file read at the initialization of the model or constant properties are defined directly in the code once the model is initialized. (2) To allow for heterogeneous material properties obtained for instance by geostatistical methods, non-constant properties are created in the geomodeler, stored and then transferred through the RINGMesh API.

Set up the physical problem Two inputs have to be added to the model to set up the physical problem considered. (1) The equation(s) representing the problem studied. To describe the equation(s), operators can be combined at the right-hand and left-hand sides of a partial differential equation integrator that is included in the CSMP++ API. (2) The initial and boundary conditions. The conditions can be applied to each boundary and each region of the model, either directly in the code or through a configuration file.

Solve the problem The resolution of the equations is done with an external multigrid matrix solver, SAMG [Stüben, 2001].

III.3 Benchmark on the estimation of the stress near a borehole

III.3.1 Model set up

To test the good integration between our tools and its efficiency, we decided to lead a benchmark on a well-defined and known problem. This benchmark is done on the computation of the stress concentration around a borehole in a general isotropic elastic medium, which has an analytical solution [Gaede et al., 2012, Mazuyer, 2018]. The analytical solution of this problem is described by the Kirsch equations [Kirsch, 1898], which describe the radial and tangential components of the stress around a vertical well. Under the hypothesis of an isotropic linear behavior, Kirsch equations are written as follow:

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2} (S_{H_{max}} + S_{h_{min}}) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (S_{H_{max}} - S_{h_{min}}) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} (S_{H_{max}} + S_{h_{min}}) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (S_{H_{max}} - S_{h_{min}}) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (\text{III.2})$$

with a the well radius and r the radial distance measured from the center of the well. $S_{H_{max}}$ and $S_{h_{min}}$ represent the stress constraints, in a medium that is supposedly not disturbed by the well. θ represents the angle between the direction of $S_{H_{max}}$ and the

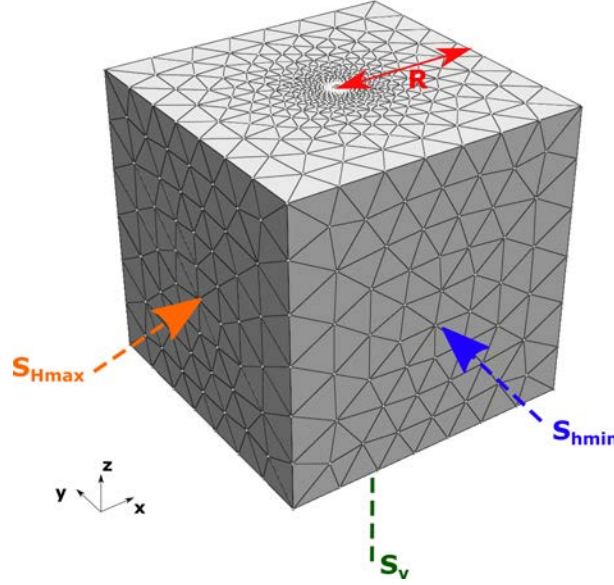


Figure III.5 – Model set up for the benchmark. There is an adaptive tetrahedral mesh surrounding a central well. Neumann boundary conditions corresponding to $S_{H_{max}}$ (West boundary), $S_{h_{min}}$ (South boundary) and S_V (Bottom boundary) are applied homogeneously. Dirichlet boundary conditions to have a null displacement are applied to the normal of the other surfaces. The red arrow corresponds to the projection of the trace used for the charts on the top boundary, normally at the middle depth.

radial direction.

In this benchmark, we used a simple model with a unit cube of 5 meters completely crossed by a well with a 0,1 meter radius. The model is meshed with an adaptive tetrahedral mesh with a finer resolution around the central well. The boundary conditions are applied to correspond to a far stress state described by $S_{H_{max}}$ (20000), $S_{h_{min}}$ (10000) and S_V (5000), respectively on the West, South and Bottom surfaces. The other surfaces are set to a null displacement in their normal direction (Figure III.5).

III.3.2 Results

The simulation has been done using the link between RINGMesh and CSMP++ previously described. The results are compared with those obtained on several geometrical solvers by Mazuyer [2018], with the elastic coefficients equals to $E = 5 \text{ GPa}$ and $\nu = 0,32$, on linear (P1) and quadratic (P2) elements. The solvers tested are MFEM [MFEM, 2017], getfem [INSA Lyon, 2017] and RINGMecha, a research tool developed by Chauvin [2017] and Mazuyer [2018].

Two cross-plots showing the evolution of the radial and tangential components of the stress as a function of the distance to the well are presented in Figures III.6 and III.7. We observe identical results between our simulation and the results obtained with the various finite element solvers tested. The differences that appear in the curve shape are related to the order of the elements used for MFEM, and to a post processing step in getfem. This shows that the geometry and information about the model used are well

transferred and that we can successfully apply different types of boundary conditions on the model.

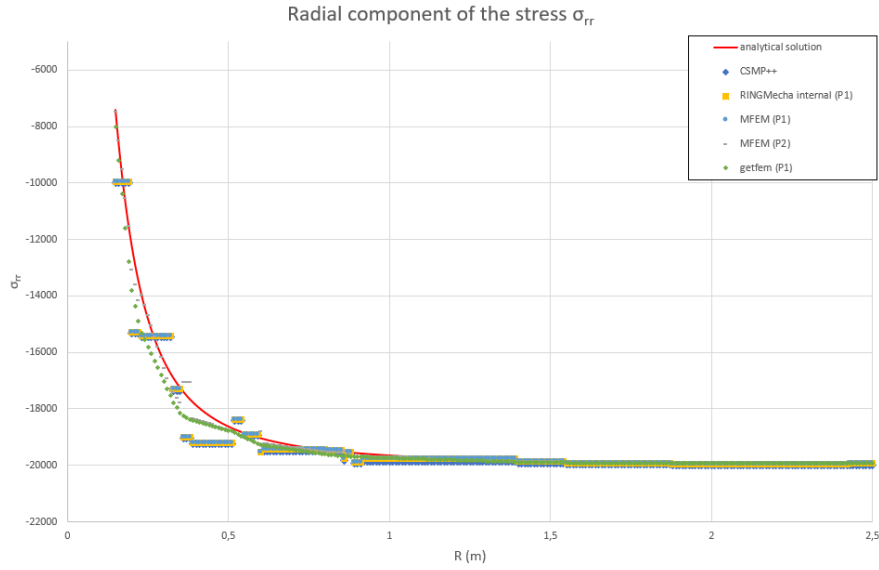


Figure III.6 – Evolution of the radial component of the stress σ_{rr} depending on the distance to the well center. Several solutions are computed with different tools to compare to our workflow (compilation of results with other librairies from Mazuyer [2018]).

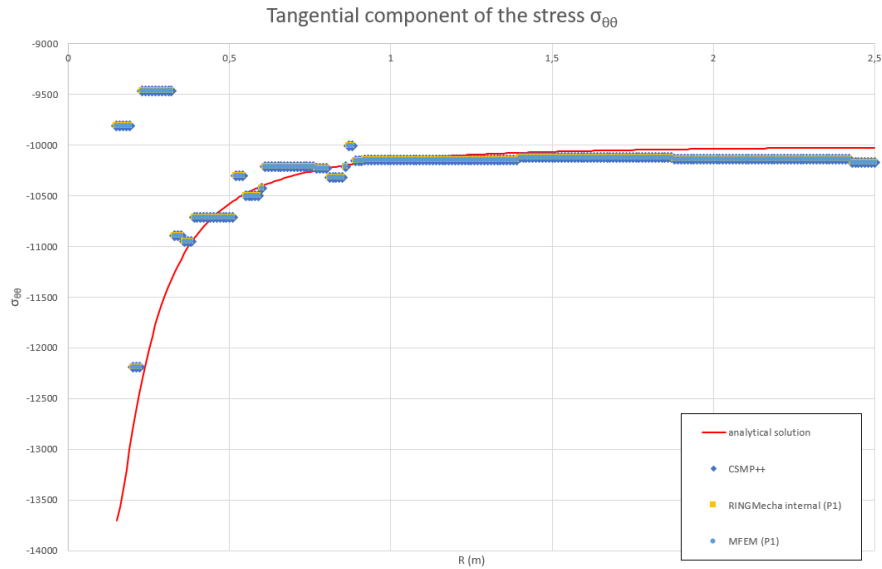


Figure III.7 – Evolution of the tangential component of the stress $\sigma_{\theta\theta}$ depending on the distance to the well center. Several solutions are computed with different tools to compare to our workflow (compilation of results with other librairies from Mazuyer [2018]).

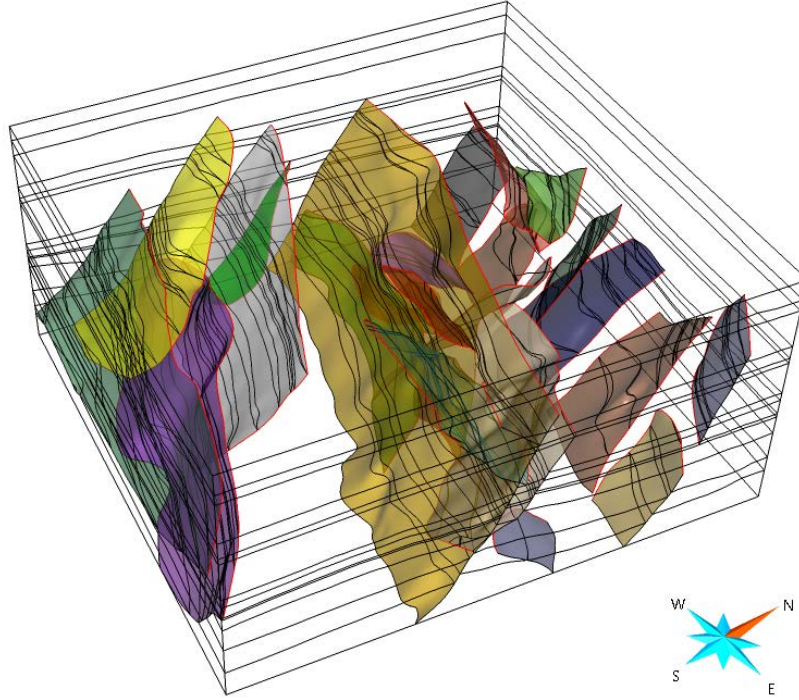


Figure III.8 – Fault network of the modeled transferred in the frame of the collaboration with the Peter Cook Centre for Carbon Capture and Storage Research, in the University of Melbourne (pers.comm).

III.4 Application to a complex geological model

This workflow has been used in the frame of a collaborative work with Stephan Matthai's team¹ from the Peter Cook Centre for Carbon Capture and Storage Research, in the University of Melbourne. The geological model of a studied area for CO₂ storage purposes has been done in Melbourne. This model presents a complex geometry, with 12 horizons and 26 faults. The proposed workflow ensured the transfer of all these geological structures and kept the integrity of the model in order to perform a simulation of physical behavior of the rocks during CO₂ injection.

Three volumetric models with tetrahedra have been done at different resolutions (mean edge size at 30 m, 50 m and 70 m) inside SKUA-GocadTM. These three models respectively contain 10 millions, 2.5 millions and 900 thousands cells. A cross-section view of the second model (resolution of 50 m) is presented Figure III.9.

Table III.1 shows the time needed to transfer each model from RINGMesh to CSMP++, with a computer using one core at 2.5GHz. As the methodology we used calls for reading several times the cell elements, we observe that the relation between time and number of elements is not linear.

The physical simulations done on this model are part of an Australian CO₂ storage project and can not be shown here due to confidentiality.

1. <https://infrastructure.eng.unimelb.edu.au/matthai/>

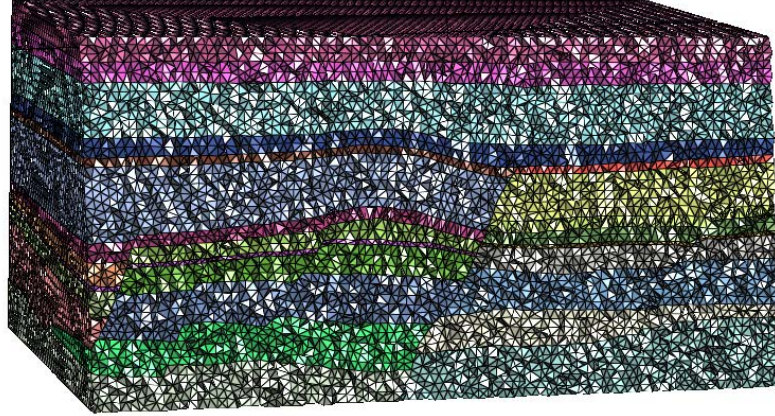


Figure III.9 – Cross-section view of the volumetric model with a resolution of 50 m. The different geological entities, which are the blocks delimited by the faults and horizons, are underlined with different colors.

Model and Resolution	Number of Elements	Time
Model 30m	10 074 092 cells 786 436 polygons 1 675 401 vertices	9713 s 2 h 41 min 53 s
Model 50m	2 435 837 cells 377 496 polygons 414 838 vertices	2124 s 35 min 24 s
Model 70m	930 564 cells 185 118 polygons 160 890 vertices	644 s 10 min 44 s

Table III.1 – Details on the three models and the time needed to transfer from RINGMesh to CSMP++. This transfer has been done on a computer using one core at 2.5GHz.

III.5 Conclusion

A methodology designed to preserve geological information and consistency while transferring data between different modeling tools has been developed. This methodology allows to: reconstruct missing geological tags on 2D cross-sections, and to transfer the mandatory information to run physical simulations. During the process, large scale geological structures are geometrically included, while small scale heterogeneities can be represented with physical properties. A reflexion and a choice have to be done to represent intermediate scale geological structures, to overcome the difficulties related to mesh resolution and upscaling.

The methodology has been successfully tested on a geomechanical problem with a known analytical solution. This means that the transfer of the geological model does not introduce a bias and allows to perform correct physical simulations.

The methodology has also been used at the reservoir scale to transfer a structurally complex geological model with 12 horizons and 26 faults. The structure of the model is well preserved during the transfer.

However, this methodology has only been implemented to handle two data structures, the ones of RINGMesh and CSMP++. To go technically further, it could be interesting to add the data structures from other tools, following the example done with several libraries used to solve mechanical problems [Mazuyer, 2018].

Chapitre IV

Évaluation de différents modèles conceptuels du comportement thermo-hydraulique du réservoir de Basse-Terre

Sommaire

IV.1 Introduction	73
IV.2 Thermo-Hydrology of high-enthalpy systems	74
IV.3 Geological and geothermal context	75
IV.3.1 General context	75
IV.3.2 Geologic elements of geothermal relevance	75
IV.3.3 Constraints on the geothermal reservoir of the south of Basse-Terre Island	76
Presence of a second heat source	77
Large basal heat flux and vertical conduits	78
Dominance of horizontal heat transport	79
IV.4 From geology to numerical simulations	79
IV.4.1 Choice of the simulator	79
IV.4.2 Parametrization of the model	80
IV.4.3 Sensitivity study with a sub-model for a separate magmatic heat source under Bouillante	81
IV.5 Results	82
General thermal structure.	82
Thermal structure at the Bouillante site.	83
IV.6 Discussion	84
IV.7 Conclusion and perspectives	86

Résumé Grâce à l’apport de nouvelles études de la zone de Basse-Terre et d’analogues dans le cadre du projet GEOTREF, différents modèles et scénarios conceptuels pouvant expliquer le comportement du réservoir ont été développés. Ce chapitre précise ces différents scénarios et développe une analyse pour évaluer leur réalisme physique. Les méthodes présentées dans le chapitre précédent sont ainsi appliquées dans le cadre du réservoir de Basse-Terre.

Les trois scénarios s’articulent autour de l’influence de différents éléments géologiques dans le réservoir. Ainsi, le premier scénario s’appuie sur la présence de deux chambres magmatiques (Bouillante et La Soufrière), pouvant expliquer les anomalies thermiques près de Bouillante. Les deux autres scénarios considèrent uniquement la présence d’une source de chaleur à la Soufrière, les vecteurs de chaleur étant alors des drains d’écoulement préférentiel, horizontaux et/ou verticaux. Ces scénarios ont été modélisés en prenant en compte les contraintes structurales et géologiques de l’île de Basse-Terre. Les résultats des simulations sont comparés avec les informations disponibles sur l’évolution du volcanisme en Guadeloupe, et avec les profils de température obtenus à Bouillante.

Les simulations permettent de mettre en évidence la vraisemblance d’un des scénarios, et permet de reproduire les profils de température observés à Bouillante.

Ce travail fait suite à une première étude de sensibilité présentée à la conférence de l’*EAGE* en 2017, qui est ici ajoutée en Annexe 1. Ce chapitre est présenté sous la forme d’un article accepté au journal *Geothermal Energy*.

Article publié au journal Geothermal Energy

M. Raguanel*, T. Driesner, F. Bonneau (2019) *Numerical Modeling of the Geothermal Hydrology of the Volcanic Island of Basse-Terre, Guadeloupe*, Geothermal Energy Journal 7, 28. doi : 10.1186/s40517-019-0144-5

Abstract This study investigates the thermo-hydraulic implications of three geologic scenarios for characterizing the geothermal hydrology of Basse-Terre Island, Guadeloupe. Despite newly acquired magnetotelluric, petrophysical, and geologic data, flow patterns and heat sources have remained elusive. Our simulations were performed in 2D, on a cross section going from La Soufrière volcano in the south to the operating Bouillante geothermal field near the west coast. Simulation results are compared to geologic constraints such as the temperature profile measured at Bouillante and the timing of volcanic activity in the area, which may be indicative of new heat sources at depth. The simulations indicate that during lateral flow from La Soufrière, geothermal fluids would cool too much to explain the temperature at Bouillante. Two other scenarios were found to explain the current thermal structure of the Bouillante geothermal system : a young (ca. 5000 yrs) and more local magmatic intrusion at depth, or vertical corridors of enhanced permeability that tap hot and porous formations at a few km depth. Without further geologic evidence neither of these two scenarios can be preferred. The second magma chamber scenario would indicate a more complex magmatic history of the island than previously established. The study shows that geologically constrained scenarios of regional geothermal hydrology can be meaningfully tested with current numerical simulation techniques, providing further insights for geothermal exploration.

IV.1 Introduction

Basse-Terre island in Guadeloupe (French West Indies) is part of the Lesser Antilles volcanic arc and has good potential for high-enthalpy geothermal resources [Laplaige et al., 2013]. A geothermal plant was installed in 1984 at the Bouillante site on the island’s west coast [Jaud et Lamethe, 1985], where surface hot springs had indicated a possible high-enthalpy resource. The rest of the island, however, remained largely unexplored for geothermal resources. In recent years, several projects have been launched to determine the potential of other targets in the area, such as GEOTREF¹, which focuses on the southwestern part of Basse-Terre. As for many geothermal greenfield exploration projects, characterization began with a magnetotellurics (MT) survey. The MT survey revealed several areas of interest [Teranov, 2018] but could not identify clear targets. Due to intense vegetation cover and the collapse of La Soufrière volcano flanks, few geothermal features have been identified and MT anomalies may be related to extinct geothermal systems active during earlier phase in the complex volcanic history. A link between scattered thermal springs and the MT anomalies is not obvious.

We therefore performed a series of numerical simulations to better understand the geothermal hydrology of the Basse Terre system. We started from three geologic-

1. <http://geotref.com/>

geothermal scenarios developed by the GEOTREF project and compared the simulation results to known geologic and geothermal constraints, such as the site and thermal structure of the Bouillante system and the temporal evolution of volcanism a possible indicator of new magmatic heat sources.

IV.2 Thermo-Hydrology of high-enthalpy systems

Numerical simulations over the past ca. 20 years have shown that the occurrence and the thermal and the hydraulic characteristics of typical high-enthalpy geothermal systems are strongly and sensitively linked to a rather small parameter space. Strong feedbacks between geologic factors, heat transfer physics, and temperature-pressure-dependent water properties strongly limit the number of possible thermal structures [Hayba et Ingebritsen, 1997, Hurwitz et al., 2003, Driesner et Geiger, 2007, Scott et al., 2016].

A key finding of those studies is that the maximum temperature of a high-enthalpy system is ultimately governed by the competition of conduction-limited heat transfer in and near the magmatic heat source and advective heat transport by the geothermal fluid [Driesner et Geiger, 2007] : high host rock permeability allows high convection rates. While heat input from the magmatic heat source is conduction-limited and therefore restricted to a relatively small range of values, convection rates scale with permeability that can vary over orders of magnitude. Fluids with high convection rates in permeable rocks therefore get heated less than those in less permeable rocks. Temperatures in systems with a bulk host rock permeability around $10^{-14}m^2$ (10 mD) typically cannot become hotter than ca. 250 ° C, with boiling restricted to upper few hundred meters ; those with permeability ca. $10^{-15}m^2$ (1 mD) or slightly less will follow the boiling curve to great depth, reaching ca. 300 ° C at already ca. 1 km depth ; and those with permeability $10^{-16}m^2$ (0.1 mD) or less will develop no significant geothermal system, as the low permeability limits advection too strongly. This means that a rather small variation in large-scale mean host rock permeability leads to very different thermal characteristics of the geothermal system.

Obviously, site-specific geology like strongly fracture-bound flow, or inflow from aquifers, can modify the geometry of the system, but these temperatures are true upper limits. In this study we attempt to utilize this overall sensitivity of geothermal systems to bulk permeability. The strong coupling between the geologic situation and underlying physics in shaping geothermal systems implies that - unlike for cold groundwater systems with typically strong non-uniqueness - numerical simulations should be able to provide a meaningful test of the plausibility of conceptual models. We explore three different, geology-inspired thermo-hydrological models for the Bouillante system. If clear conclusions can be drawn about their physical plausibility, the findings of this study may aid to refine regional geothermal exploration models.

IV.3 Geological and geothermal context

IV.3.1 General context

As a part of the Lesser Antilles subduction system, the Guadeloupe archipelago is at the collision between the Caribbean and the North American plates. The volcanic arc resulting from the subduction is split at this location [Bouysse et al., 1990, Legendre, 2018]. The external arc (blue in Figure IV.1a) is inactive, whereas the internal arc is still active (red in Figure IV.1 a). The succession of volcanic episodes on Basse Terre island has been reconstructed by several authors [Samper, 2007, Legendre, 2012, Ricci et al., 2017]. The earliest volcanic events are located in the north of the island (Figure IV.1b) and the volcanic centers become progressively younger towards the currently active volcanic center, La Soufrière in the south. Based on these relations and the results of the MT surveys, a cross section was selected for this study that crosses three volcanic complexes : the Axial Chain, which was active between 1 000 000 and 435 000 years ago, the Bouillante Chain, which was active between 850 000 and 250 000 years ago, and the Grande-Découverte-Soufrière complex, which began activity 205 000 years ago and is still active.

IV.3.2 Geologic elements of geothermal relevance

The earlier magmatic phases may still retain residual heat and are considered as one factor explaining the geothermal potential of the area [Zlotnicki et al., 1992, Boudon et al., 2008, Legendre, 2012].

La Soufrière is an active volcano, and its inferred, underlying magma chamber likely provides a strong and active heat source [Lachassagne et al., 2009]. The magma chamber temperature has been estimated as around 800 ° C by Besson et Poirier [1994]. However, its depth and size are still uncertain. The large distance between La Soufrière and the Bouillante geothermal system, as well as the location of Bouillante in the older, extinct volcanic areas, have sparked discussions whether regarding there is a second, hidden magmatic heat source below the Bouillante system that has no associated volcanic features and does not follow the north-south age trend [Calcagno et al., 2012].

Another important factor potentially affecting geothermal activity in the Lesser Antilles, and especially in Guadeloupe, is the presence of a dense fault network allowing the circulation of fluids at depth. In the Basse-Terre island, two major fault families have been identified (Figure IV.1b) [Feuillet et al., 2002] :

- A west-east oriented family, corresponding to an extensional regime that is reflected by the presence of the Basse-Terre - Marie-Galante graben in the southern part of the island (purple lines in Figure IV.1b).
- A north-south oriented family, corresponding to normal faults that are part of the Basse-Terre - Montserrat system that extends throughout the volcanic arc (orange lines in Figure IV.1b).

These two fault systems are identified at various scales, with faults observed at lengths

of several kilometers and fractures observed on outcrops or rock samples.

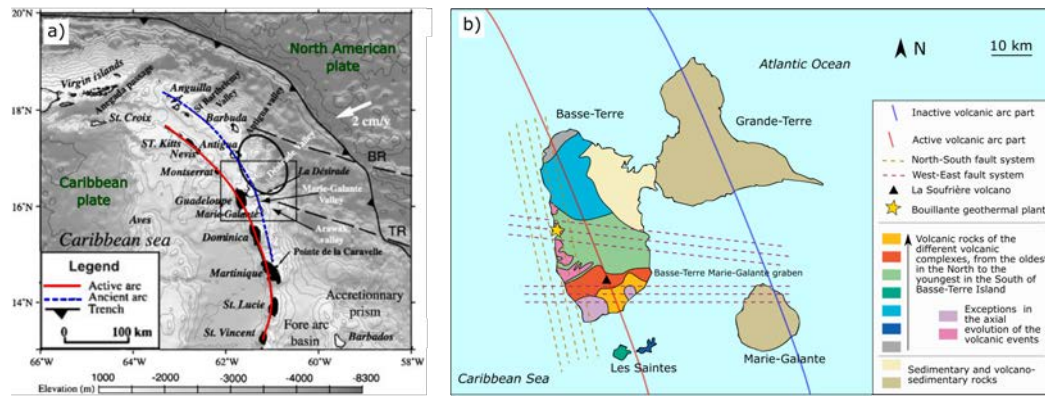


FIGURE IV.1 – Geological context of the Guadeloupe archipelago. a) Volcanic arc resulting from the subduction of the Caribbean plate under the North American plate at a rate of 2 cm/year (modified from Lachassagne et al. [2009], Feuillet et al. [2002]). b) Lithology and fault network in the Guadeloupe archipelago, with volcanic units identified on Basse-Terre (modified from [Komorowski et al., 2005, Lachassagne et al., 2009]).

In general, the global behavior of the geothermal system and the role of these different elements have remained poorly understood.

IV.3.3 Constraints on the geothermal reservoir of the south of Basse-Terre Island

The present study was inspired by the results of a magnetotelluric survey that was run in the context of the GEOTREF project in 2015-2016. The data were acquired by the Teranov and Imagir companies from 149 stations, with 103 obtaining high quality data. The stations were not evenly spaced, due to the presence of anthropogenic activity or accessibility issues. The acquired data were analysed to produce 1D and 3D models [Teranov, 2018]. Two areas with low resistivity were identified in the area of interest, near Matouba and Morne Beaupin (Figure IV.2). In the light of their geometries (dome shape, high vertical resistivity contrast and thin conductive layer), these two low resistivity areas may represent clay caps above active geothermal reservoirs (Figure IV.2; Teranov [2018], Navelot [2018]). However, they may also represent remnant clay caps above extinct geothermal systems. Therefore, a resistivity cross section has been extracted from the 3D model, passing through the MT anomalies as well as La Soufrière volcano and Bouillante (black line Figure IV.2). This cross section defines our numerical simulation domains and allows us to test for plausibility of active hot upflow in these regions (Figure IV.3a).

Four interesting elements are observed on this resistivity cross section : a well defined conductor horizon with a dome shape ((1) in Figure IV.3a), a deeper upflow associated with the La Soufrière magma chamber ((2) in Figure IV.3a), a well-delimited low resistivity area at depth, interpreted as a potential geothermal reservoir ((3) in Figure IV.3a), and a low resistivity unit associated with the Bouillante reservoir ((4) in Figure

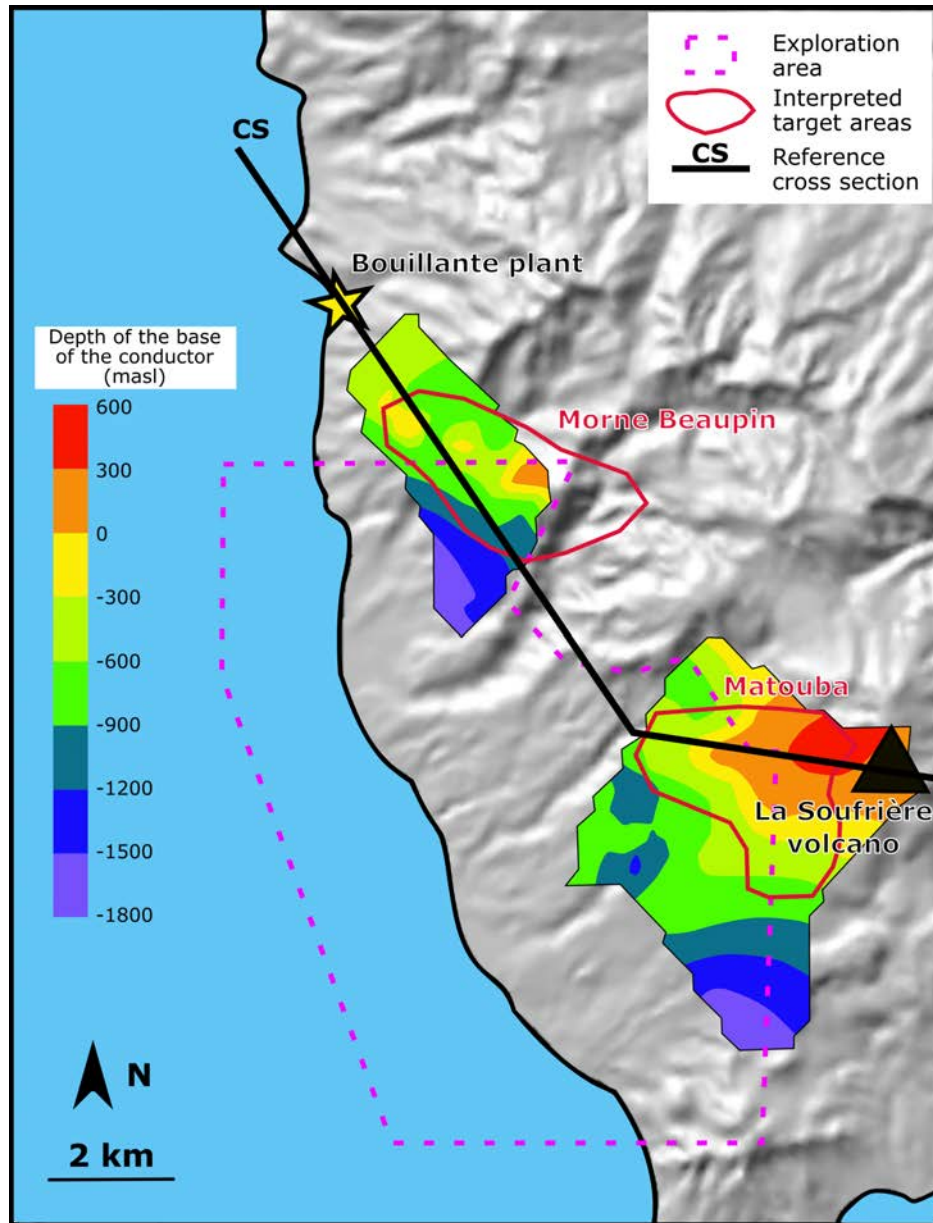


FIGURE IV.2 – Map of the southwest part of Basse-Terre, showing the areas of interest determined from the MT survey. The black line represents the cross section used for this study (modified from Teranov [2018]).

IV.3a).

From this resistivity cross section, three different conceptual scenarios have been defined by the GEOTREF project. These scenarios vary mainly regarding the nature of the heat sources involved. They all seek to justify both the temperature profiles at Bouillante (Figure IV.4) and the MT anomalies (Figure IV.3) :

Presence of a second heat source This scenario suggests that the Bouillante reservoir is mainly heated by an underlying, cooling magma chamber (Figure IV.3b).

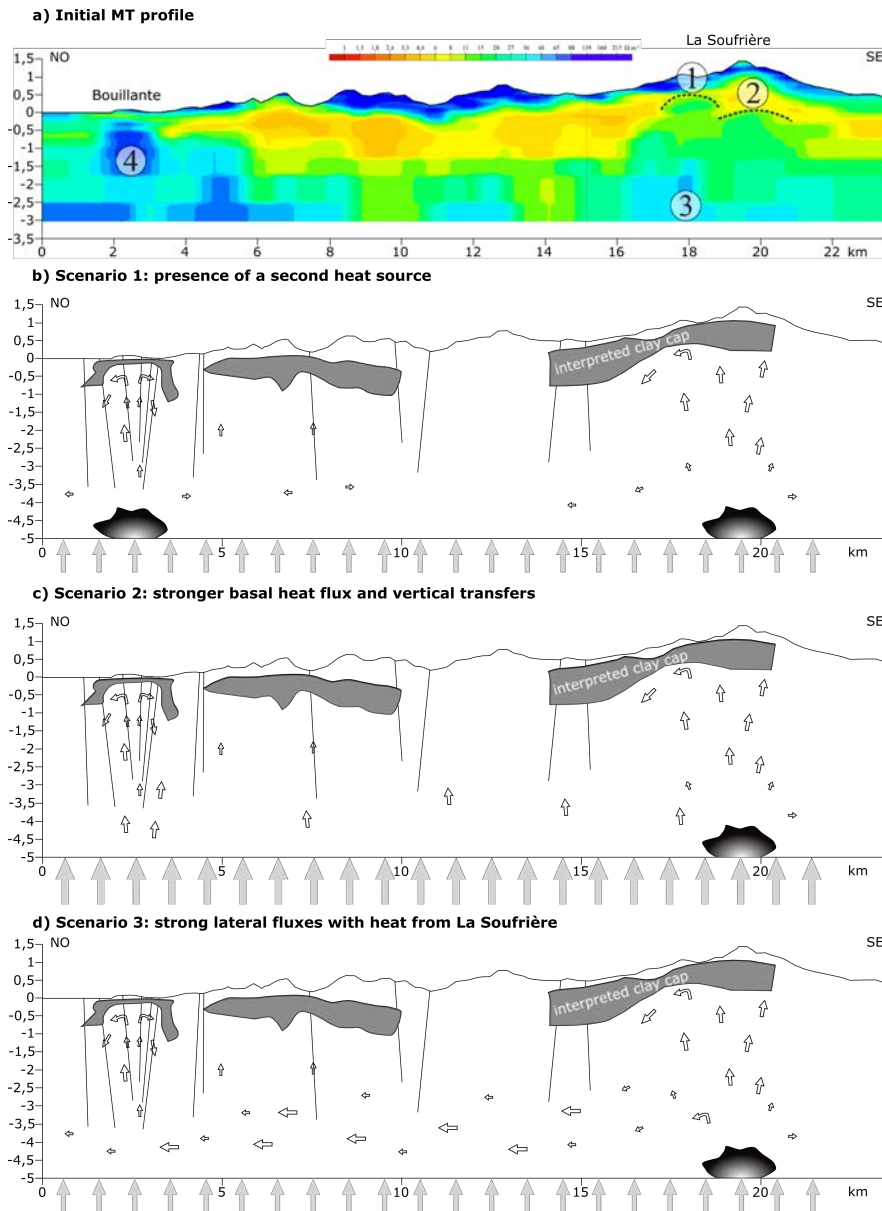


FIGURE IV.3 – Three scenarios for the behavior of the Basse-Terre geothermal reservoir, defined from the cross section extracted from the MT survey (a). The MT survey presents four elements, (1) a well defined conductor horizon with a dome shape, (2) a deeper upflow, associated with the La Soufrière magmatic chamber, (3) a well delimited resistive area at depth, interpreted as a potential heat reservoir, and (4) a resistive unit associated with the Bouillante reservoir. (b) The first scenario with heat sources under both Bouillante and La Soufrière. (c) The second model with a higher basal heat flux that supports vertical fluid fluxes. (d) The third model with a heat source only under La Soufrière and strong lateral fluid fluxes (modified from Teranov [2018], Navelot [2018]).

Large basal heat flux and vertical conduits This scenario suggests that the basal heat flux is strong enough to heat the Bouillante area through sub-vertical fault conduits, that provide pathways for heat and fluid flow (Figure IV.3c).

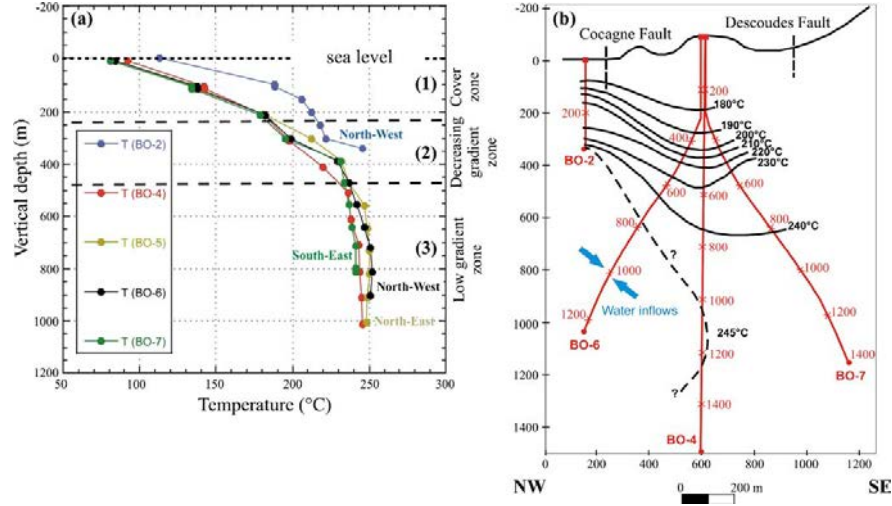


FIGURE IV.4 – Well data from Bouillante (a) Equilibrium temperature-depth profiles in the main Bouillante boreholes and (b) isotherms in a NW–SE plane (modified from Guillou-Frottier [2003]).

Dominance of horizontal heat transport In this scenario, the La Soufrière magma chamber is considered to be the primary heat source. Heat and fluids move laterally through horizontal zones corresponding to volcanic aquifers, a permeable zone at the ductile-brittle transition temperature and ultimately the subvertical fault conduits (Figure IV.3d).

IV.4 From geology to numerical simulations

IV.4.1 Choice of the simulator

The three scenarios present constraints that cannot be handled by many numerical simulation tools, such as the explicit inclusion of a magmatic heat source (here taken as 800 °C) and phase changes (liquid, vapor or supercritical water). At present, only the HYDROTHERM code of the USGS [Hayba et Ingebritsen, 1994, 1997, Kipp et al., 2008] and the Complex Systems Modelling Platform (CSMP++) [Matthäi et al., 2007, Matthäi, 2014] are able to perform such simulations routinely. As discussed by Ingebritsen et al. [2010], CSMP++ presents the advantages of dealing with multiphase flow and geometrically complex geological structures through unstructured grids [Paluszny et al., 2007, Yapparova et al., 2014, Patterson et al., 2018] and elaborates a coupled Control Volume-Finite Element resolution scheme [Weis et al., 2014], whereas HYDROTHERM performs computations on structured grids with a finite difference approach [Hayba et Ingebritsen, 1994, Kipp et al., 2008]. Both codes have provided essentially identical results for similar model setups except for minor discretization-specific differences [Weis et al., 2014].

As HYDROTHERM has an easy-to-use interface and model workflow, first tests were run with this tool, but only rarely converged. CSMP++ was therefore used to

investigate the scenarios further. A refined study of the factors governing the thermal structure of the Bouillante system was done in HYDROTHERM, as a large set of pre-existing results with this tool [Hayba et Ingebritsen, 1997, Driesner et Geiger, 2007] allowed rapid narrowing down of the relevant parameters.

For the purposes of this study, we developed a novel workflow that allowed us to extract cross sections from the 3D geomodeller SKUA-GocadTM, repair them if needed [Anquez et al., 2019], mesh them, and finally transfer all the required information to CSMP++ (geological entities, petrophysical properties, boundary conditions, etc). A SKUA-GocadTM model was built based on the topography of the area and the structural interpretations done by the GEOTREF geologists [Teranov, 2017].

The CSMP++ implementation used to describe the fluid flows and thermal evolution of the system was developed by Weis et al. [2014], and uses the Control Volume Finite Element Method to solve the equations.

IV.4.2 Parametrization of the model

The model parametrization should describe both the heat source and the geological heterogeneities that impact fluid flow and heat transfer. Establishing such parametrization is challenging, both in terms of the initial choice of parameters to describe the system at the appropriate scale and in uncertainty management of parameter values. We ran a preliminary study to assess the sensitivity to the topography, the precipitation flux and geological heterogeneities [Ragueneil et al., 2017]. This work showed that topography needs to be carefully represented, but that the precipitation flux has a limited impact on the simulation, which is in accordance with Gaudin et al. [2015]. The geological heterogeneities have a major impact on the simulation. In this study, we intend to quantify the impact of the main geological structures described in section IV.3.

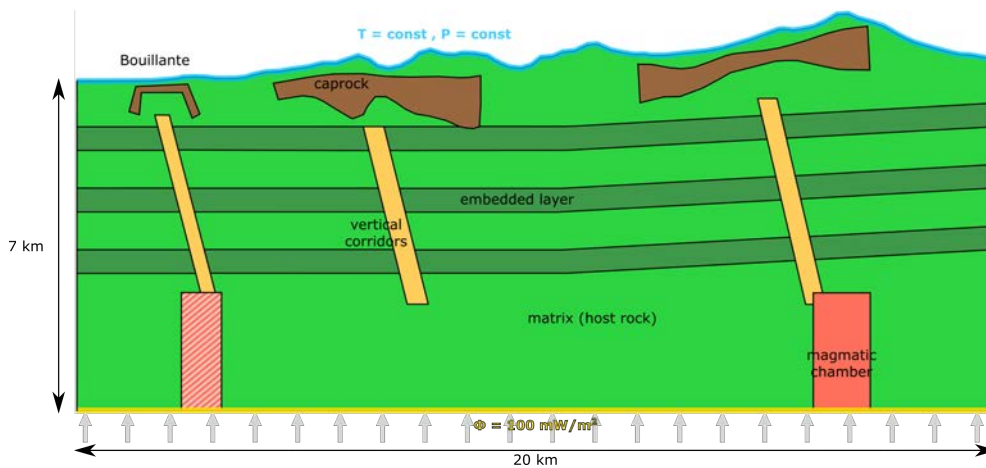


FIGURE IV.5 – Geometry used to represent the different scenarios, with the matrix rock, magma chambers (the optional second one is hatched), caprocks, vertical conduits, and horizontal layers. The boundary conditions are represented on the top by the blue line (constant pressure and temperature from initial values) and on the bottom by the yellow line (basal heat flux, 100 mW/m^2).

Figure IV.5 describes the simplified rock types that we used to represent subsurface heterogeneities. We define five rock types with petrophysical properties that follow the findings of Navelot et al. [2018]. The following three rock types are used to define the base geology of the model :

- Intrusion. The magmatic intrusion is represented by impermeable rock ($10^{-22} m^2$) at the beginning of the simulations. The permeability then evolves depending on the temperature [Hayba et Ingebritsen, 1997]. The initial temperature of this intrusion is $800^\circ C$ [Besson et Poirier, 1994]. The size and depth of the intrusion were fixed at plausible values, and the effect of the relatively high uncertainties about these parameters were not studied further. However, the number of magmatic sources included in the model can vary (1 or 2 intrusions).
- Caprock. This rock type represents the clay caps suggested by the MT data. These rocks have low permeability ($10^{-18} m^2$). Lacking adequate constraints, we decided not to implement a function that would allow the caprock to evolve as a function of time as the geothermal system develops.
- Matrix. This rock type is the most widespread. Its porosity is fixed at 0.3 while its permeability is temperature dependent [Hayba et Ingebritsen, 1997], varying from $10^{-15} m^2$ to $10^{-18} m^2$.

GEOTREF geologists suggested large scale horizontal and vertical flow in geological structures. Two other optional rock types were defined to integrate these concepts according to the scenarios introduced in Figure IV.3.

- Higher permeability layers. To represent potentially strong lateral fluxes, three higher-permeability horizontal layers were embedded in the matrix rock ($5 \cdot 10^{-14} m^2$).
- Fault conduits were represented by a similarly high permeability ($5 \cdot 10^{-14} m^2$).

Initial and boundary conditions represent other physical constraints on the model. On the bottom of the model, a basal heat flux is represented with a value of $100 mW/m^2$ [Manga et al., 2012]. On the top of the model, as it has been shown that the precipitation flux has a negligible impact on the simulation, the initial conditions are maintained at atmospheric pressure and temperature [Ragueneil et al., 2017].

IV.4.3 Sensitivity study with a sub-model for a separate magmatic heat source under Bouillante

Only few simulations with a separate heat source below the Bouillante system converged using either HYDROTHERM or CSMP++. We therefore ran a separate sensitivity study using the simple single-intrusion setup of Hayba et Ingebritsen [1997]. The low-temperature end ($< 360^\circ C$) of the temperature-dependent permeability model of Hayba et Ingebritsen [1997] for the "Matrix" permeability was varied between $5 \cdot 10^{-14} m^2$ and $10^{-15} m^2$ in order to demonstrate (a) consistency with the full model setup using $10^{-15} m^2$ and (b) more closely constrain the most likely permeability. A 300 m thick and 600 m wide caprock with a permeability of $10^{-18} m^2$ was placed at the surface above the intrusion. A thermal boundary condition of constant $80^\circ C$ in the

uppermost cells of this caprock turned out to be essential to reproduce the upper parts of the measured temperature profiles.

IV.5 Results

General thermal structure. The simulation corresponding to the first scenario (Figure IV.3b), with a second magma chamber under Bouillante, develops two well-defined thermal plumes (Figure IV.6a) above the two heat sources. No additional upwellings develop.

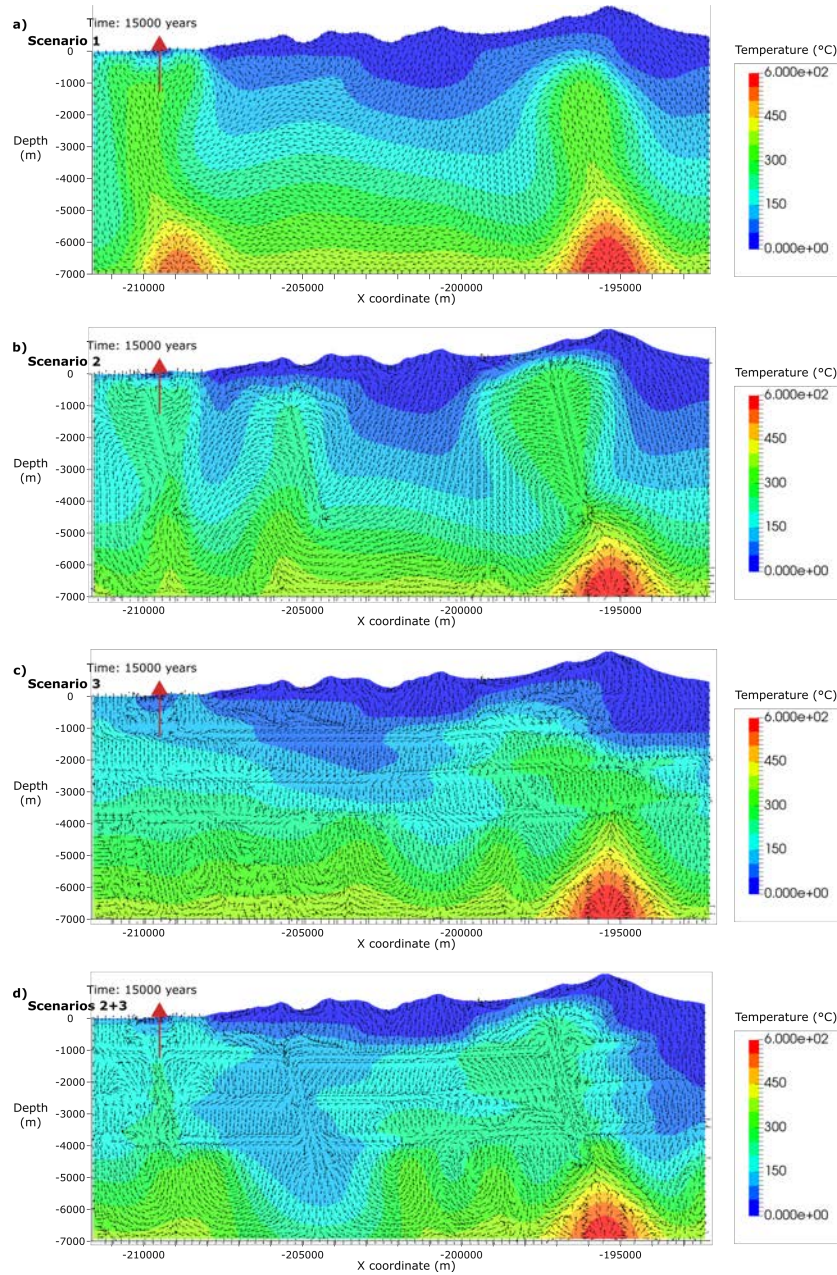


FIGURE IV.6 – Result of the simulations after 15 000 years. (a) A second magmatic heat source under Bouillante. (b) Highly permeable vertical conduits. (c) Highly permeable horizontal layers. (d) Both highly permeable vertical conduits and horizontal layers.

The simulation corresponding to the second scenario, which enhances vertical heat transport via high-permeability conduits, shows three upflow zones sustained by the basal heat flux and La Soufrière magma chamber (Figure IV.6b).

The simulation representing the third scenario, with a single strong heat source at La Soufrière and enhanced lateral fluid flow, does not result in clearly defined hot zones (Figure IV.6c).

A fourth simulation, combining the second and third scenarios with the enhancement of both lateral and vertical fluid fluxes, also results in diffuse and unclear hot zones (Figure IV.6d). Moreover, the middle vertical conduit, which brought hot fluids to the surface under the second scenario, now conveys cold fluids from the surface.

Thermal structure at the Bouillante site. Temperature profiles were extracted from each simulation result at the location of Bouillante (red well, Figure IV.6). Figure IV.7 compares every simulated temperature profiles with data measured at Bouillante [Guillou-Frottier, 2003]. The models in which fluid flow is influenced by horizontal layers present lower temperatures.

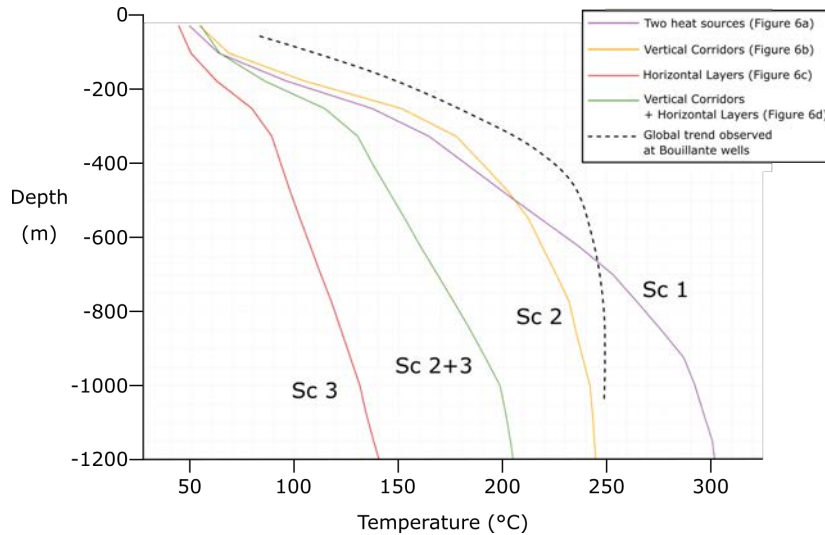


FIGURE IV.7 – Temperature profiles extracted for all scenarios after 15 000 years of simulation and compared with data from Bouillante.

The two scenarios with a second magmatic chamber and permeable vertical conduits seem to reproduce the thermal profile at Bouillante most closely. In the upper part, the curve follows the shape of the measured one, albeit being displaced ca. 100 m further down. In the lower part, the scenario with a second magma chamber overestimates the temperature while the model with vertical permeability corridors somewhat underestimates it. In order to assess transient effects, we also extracted temperature profiles at several different simulation times for the scenarios with a second magma chamber (Figure IV.8a) and highly permeable corridors (Figure IV.8b). In each case, we observe that the peak temperature is reached between 15 000 and 20 000 years of simulation. After that, the temperature decreases and is too low to match the conditions observed

at Bouillante.

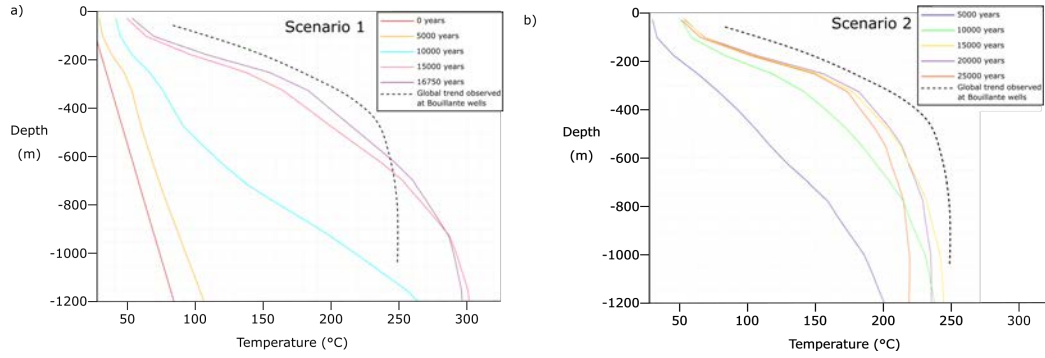


FIGURE IV.8 – Temperature profiles extracted at different time stages for two scenarios. (a) Scenario with a second magmatic heat source. (b) Scenario with highly permeable vertical conduits.

The excess temperature for the second magmatic heat source scenario can most likely be explained by the $10^{-15} m^2$ permeability of the matrix lithology, which would typically give 300 °C at ca. 1 km depth during the hottest phase of the hydrothermal system's evolution [Hayba et Ingebritsen, 1997, Driesner et Geiger, 2007]. As a somewhat higher permeability should give a better match, we evaluated its influence by varying permeability in a simpler model with the setup of Hayba et Ingebritsen [1997]. Figure IV.9 shows the results of this sensitivity study, displaying the temperature-depth curves during the hottest phase of the system for four different matrix permeabilities. A matrix permeability of ca. $8 \cdot 10^{-15} m^2$ gives an essentially perfect match with the measured values. Even small deviations in permeability would lead to distinctly different temperature profiles, demonstrating that the thermal structure provides a sensitive test of model parameterization. Notice, however, that this better agreement with the measured temperature profile may also be influenced by the geometry of the caprock - here, the caprock was modeled as a simple horizontal layer of 300 m thickness while in the large-scale model it had a mushroom shape.

Varying permeability in the corridor scenario also brings the simulated thermal structure at Bouillante closer to the measured curve. Figure IV.10 displays the hottest phase of the system for different corridor permeability. A moderate influence of the permeability is observed and clearly impacts the time when the hottest point is reached. It seems that we reached the limits of the proposed parameterization - a better match might be expected for a somewhat higher conductive heat flux model as the curve would start with higher temperatures at greater depth. Also, the exact geometry of the corridor and caprock are expected to influence the result.

IV.6 Discussion

The scenarios with a second magma chamber and with permeable vertical conduits both appear capable of explaining the natural thermal anomalies at Bouillante quite

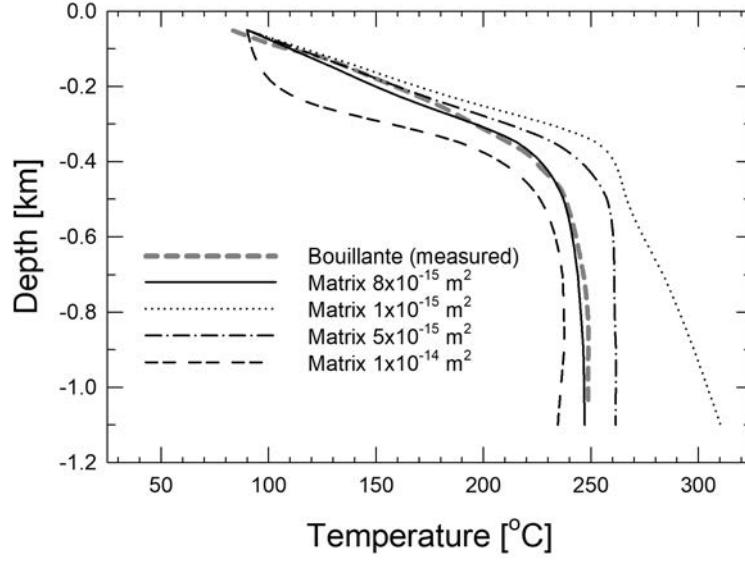


FIGURE IV.9 – Temperature-depth curves for a simple model setup following Hayba et Ingebritsen [1997] with a 300 m thick, horizontal caprock having the same width as the intrusion. The curves represent the onset of the hottest phase in the system’s evolution and occur at different times ($1.10^{-15} m^2$ - 10000 yrs; $5.10^{-15} m^2$ - 7000 yrs; $8.10^{-15} m^2$ - 4800 yrs; $1.10^{-14} m^2$ - 2500 yrs).

well. This finding is not too surprising, as the conduit scenario taps permeable rocks, heated by a high conductive heat flux to temperatures close to those predicted around a magma body by the temperature-dependent permeability model of Hayba et Ingebritsen [1997]. Without further knowledge of the deep geology of the Island, the distinction between the two scenarios therefore remains open.

If the second magmatic heat source scenario is correct, it would imply that the surface geology does not provide a full record of magmatism at Basse Terre Island. Rather, the simulation predicts that magmatic intrusion occurred ca. 5000 years ago within the 800,000 to 240,000 year old Bouillante magmatic chain. The intrusion age could be older by a few thousand years, as the current thermal profile in the geothermal system could persist for a few thousand years, depending on the size of the intrusion [Hayba et Ingebritsen, 1997, Driesner et Geiger, 2007] but would still postdate the volcanic rocks in the area by hundreds of thousands of years.

Our modeling implies that highly permeable lateral layers are unable to transport sufficient heat from La Soufrière to the Bouillante area. Even when combined with highly permeable vertical conduits, the horizontal layers result in a global loss of heat. This effect would likely be amplified in a full 3D model, where topographically driven flow out of our 2D cross-section would add to the heat dissipation. This is a strong argument to discard the model that considers large scale heat transfer from La Soufrière to Bouillante.

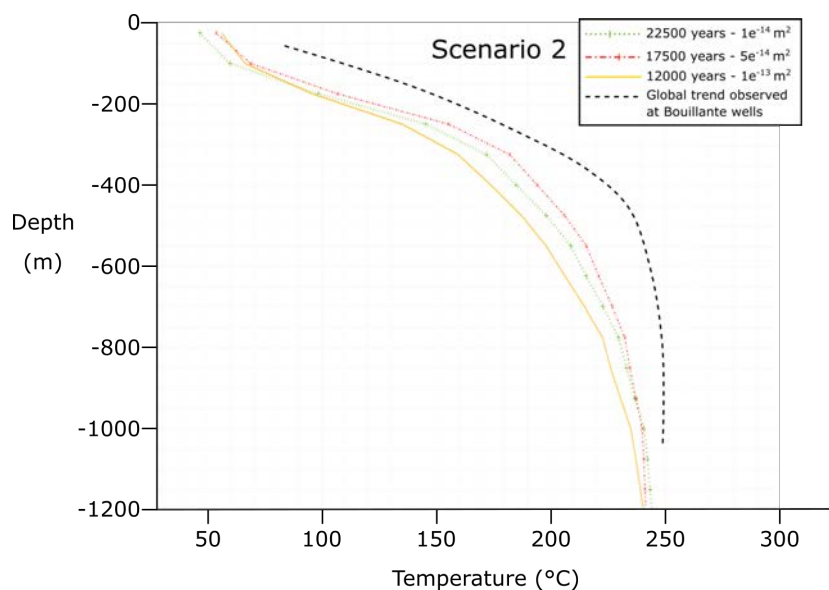


FIGURE IV.10 – Temperature profiles extracted for different values of vertical-conduit permeability, at the time of the highest heat flux.

IV.7 Conclusion and perspectives

We describe numerical modeling constraints on the geothermal hydrology of Basse Terre island. Identifying those global geological structures that have a potential impact on the physical behavior of the geothermal system, we formulated three possible scenarios and tested the modeling results mainly by assessing their ability to explain temperature anomalies at Bouillante. A key conclusion is that larger scale heat transfer from La Soufrière magmatic chamber seems very unlikely to explain geothermal-reservoir heat anomalies and particularly the temperature profile measured at Bouillante. Both a second magmatic chamber beneath the Bouillante geothermal system or high-permeability vertical conduits focusing hot fluids circulating at depth can explain the current system at Bouillante. The scenario with a magmatic intrusion beneath the geothermal system would imply magmatism in this "dormant" part of the island as recently as a few thousand years ago, without identified surface volcanism.

Although this study could not explore the full parameter space - owing to both the lack of further geologic constraints and numerical limitations - it highlights that the physical plausibility of geologically constrained scenarios can, in principle, be tested with current numerical modeling approaches.

Acknowledgements

This work was performed in the framework of the RING project² at Université de Lorraine. Studies were implemented through the program GEOTREF which benefits from the support of both the ADEME and the French public funds “ Investments for the

2. <http://ring.georessources.univ-lorraine.fr>

future". We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA. We also acknowledge Paradigm for providing the SKUA-GOCADTM software and API, INRIA for the Geogram library, Pierre Anquez for the SCAR library and Stephan Matthäi for providing the CSMP++ code and API.

Chapitre V

Complexification progressive des hétérogénéités prises en compte dans la modélisation : méthodologie et application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe

Sommaire

V.1	Présentation du cadre général de la modélisation	90
V.2	Observations sur un cas synthétique	91
V.2.1	Motivations	91
V.2.2	Étapes de complexification	92
V.2.3	Résultats	92
V.3	Application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Gua- deloupe	94
V.3.1	Description du processus physique et de la méthodologie de résolution	94
V.3.2	Description de la méthodologie de complexification mise en place	97
V.3.3	Résultats	100
V.4	Conclusion	103

Résumé L'un des principaux défi lié à cette thèse concerne la gestion des hétérogénéités dans le processus de modélisation. Deux stratégies différentes peuvent être mises en place, en prenant en compte explicitement les discontinuités identifiées (généralement utilisé pour les hétérogénéités à grande échelle), ou en réalisant un modèle de propriété et des changements d'échelles de ces propriétés (généralement utilisé pour les hétérogénéités à petite échelle). Comment doivent être traitées les discontinuités d'échelle intermédiaire ? Quel est l'impact du choix de l'une ou de l'autre de ces stratégies ? Et où doit-on placer le curseur entre les deux pour avoir une représentation réaliste ? Pour répondre à ces questions, une méthodologie de complexification progressive du modèle géologique, avec ajout des hétérogénéités prises en compte, a été mise en place. Cette méthodologie permet à la fois d'intégrer différents concepts géologiques dans les modélisations sans données de subsurface localisées, d'intégrer des données supplémentaires au cours de la modélisation, d'échantillonner les incertitudes et d'ouvrir la voie au questionnement du niveau de détail nécessaire et d'échelle représentative dans les simulations. Ce chapitre décrit cette approche ainsi que les différents modèles réalisés et les résultats obtenus.

V.1 Présentation du cadre général de la modélisation

La chaîne de modélisation présentée Chapitre I s'appuie sur l'utilisation de données de subsurface pour la modélisation des géométries du sous-sol. Dans l'industrie pétrolière, de vastes campagnes sont menées pour récolter ces données (acquisition sismique ou de forages de puits) qui forment une base de données s'enrichissant au cours du temps. Ces campagnes sont très coûteuses et ne sont pas toujours réalisables. Dans le cadre du projet GEOTREF, des campagnes d'acquisitions de données de surface ou proche surface ont été réalisées (voir Chapitre 2), ainsi qu'une campagne magneto-tellurique plus profonde. Ces données ont permis d'identifier des structures générales, mais leur position reste incertaine. Pour évaluer l'impact des hétérogénéités du sous-sol, et pour appréhender le niveau de détail à prendre en compte dans un modèle numérique prédictif du comportement du réservoir, une méthodologie de complexification progressive du modèle est proposée.

L'objectif ici est de partir d'un modèle très simple, peu contraint, et d'ajouter progressivement une représentation explicite des hétérogénéités géologiques. Ce processus de complexification progressive servira de base à une discussion sur l'impact des structures sur les processus physiques modélisés, et donc sur le comportement des réservoirs.

Pour cela, le modèle physique (équations et conditions aux limites) mis en place n'est pas modifié, et seules les géométries et les valeurs des propriétés pétrophysiques impliquées dans les processus, ici la perméabilité, sont complexifiées dans les différentes

étapes.

V.2 Observations sur un cas synthétique

V.2.1 Motivations

Un cas synthétique simple est réalisé pour prouver conceptuellement l'impact des structures et des hétérogénéités géologiques sur les phénomènes physiques. Le modèle géologique utilisé ici reprend l'organisation géométrique d'un pli présent dans deux blocs qui sont séparés par une faille inverse. Ce pli se développe dans un environnement stratigraphique constitué de quatre couches aux propriétés pétrophysiques, notamment la perméabilité, différentes (Figure V.1).

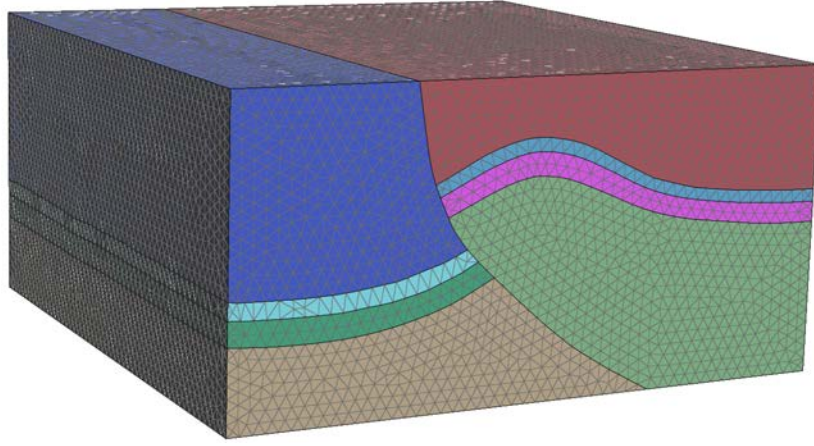


FIGURE V.1 – Géométrie du modèle synthétique, avec ces quatre couches et la faille inverse.

L'équation résolue pour ce cas simple est l'équation de la diffusion de la pression fluide :

$$c \frac{dp}{dt} = \nabla(K \text{ grad } p) + S \quad (\text{V.1})$$

avec p la pression de fluide, c la compressibilité (roche et fluide), $K = \frac{k}{\mu}$ la conductivité hydraulique et S un terme source volumétrique. Cette équation est discrétisée pour sa résolution :

$$\left(\frac{c}{dt} + \mathbf{K} \right) \vec{p}t + dt = \frac{\vec{c}}{dt} \vec{p}t + \vec{S}t + dt \quad (\text{V.2})$$

Cela conduit au système linéaire sous la forme $\mathbf{A} * \vec{x} = \vec{b}$, avec $\mathbf{A}$ la discrétisation de $\nabla(K \text{ grad } p)$ et $c \frac{dp}{dt}$. $\vec{b}$ contient la pression connue au temps t et la source inconnue au temps $t+dt$. $\vec{x}$ est la pression inconnue au temps $t+dt$ qui est recherchée.

Des conditions aux limites sont appliquées sur deux frontières du modèle, comme présenté Figure V.2 : une pression de fluide de $3.0 \cdot 10^7$ est appliquée sur le bord rouge, tandis que la pression de fluide est maintenue à $1.0 \cdot 10^7$ sur le bord bleu.

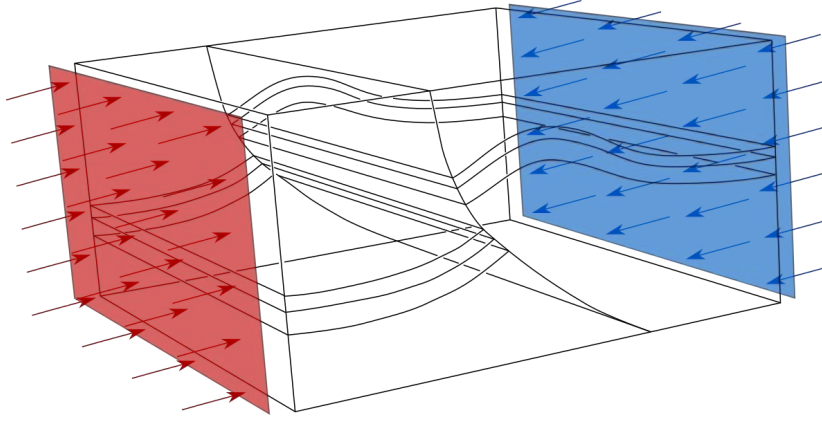


FIGURE V.2 – Conditions appliquées sur le modèle synthétique. Les conditions aux limites sont les suivantes : une pression de fluide de $3.0 \cdot 10^7$ est appliquée sur le bord rouge, tandis que la pression de fluide est maintenue à $1.0 \cdot 10^7$ sur le bord bleu.

V.2.2 Étapes de complexification

Sur ce cas synthétique, le modèle géologique est enrichi grâce aux étapes de complexification suivantes (Figure V.3) :

- *étape 1* : le modèle est représenté par un cube homogène, avec une perméabilité $k = 1.0 \cdot 10^{-14} m^2$ et une porosité $\phi = 0.25$. On assimile alors le modèle à un volume élémentaire représentatif en calculant les propriétés effectives moyennes.
- *étape 2* : le modèle est représenté par deux blocs séparés par une faille prise en compte explicitement dans le maillage, le premier bloc a la même perméabilité que la matrice du cube homogène ($k = 1.0 \cdot 10^{-14} m^2$), tandis que le second bloc présente une perméabilité plus faible ($k = 5.0 \cdot 10^{-15} m^2$).
- *étape 3* : une couche plus perméable formant un pli ($k = 5.0 \cdot 10^{-14} m^2$) est introduite dans le modèle précédent. Cette couche, tout comme la faille, est introduite explicitement dans le maillage.
- *modèle 4* : au sein du pli, une fine couche moins perméable est identifiée et incorporée ($k = 1.0 \cdot 10^{-16} m^2$). Toutes les structures géologiques (horizons et failles) sont ainsi prises en compte explicitement dans le modèle. Dans un processus de modélisation à grande échelle, cette fine couche pourrait être en dessous de la résolution des données sismiques ou non représentée explicitement pour faciliter l'étape de discrétisation spatiale.

V.2.3 Résultats

La Figure V.4 représente les fronts de pression de fluide de différentes valeurs ($1.5 \cdot 10^7$, $2.0 \cdot 10^7$ et $2.5 \cdot 10^7$, respectivement de la droite vers la gauche) après 7200 heures de simulation, pour les quatre modèles évoqués précédemment. Ce temps de simulation permet d'observer les valeurs de fronts de pression alors que l'équilibre n'est pas encore atteint, avec tout de même déjà des variations des valeurs de pressions observables.

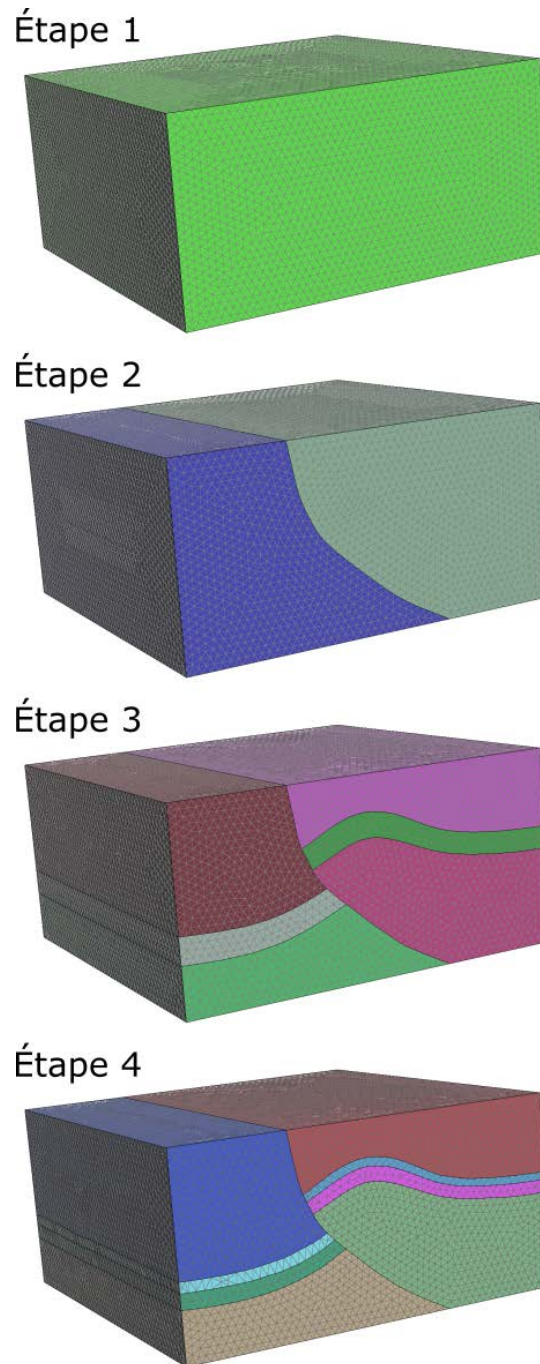


FIGURE V.3 – Étapes de complexification progressive du modèle synthétique, qui présente au final un pli de deux couches dans une matrice, impacté par une faille inverse.

Dans le cube homogène, avec les surfaces jaunes, le front de pression est parallèle aux bords. Dans le cube avec seulement une faille, avec les surfaces vertes, il est constaté que la forme du front de pression est légèrement impactée par la présence de la faille. Cette forme est encore plus modifiée par l'introduction d'une couche plus perméable (surfaces bleu foncé). Enfin, il est très intéressant de constater l'influence majeure de la fine couche imperméable introduite dans le dernier modèle (surfaces bleu clair). En effet, on observe que la présence de cette couche a une influence sur le front de pression non seulement là où elle est située, mais également dans les blocs rocheux qui lui sont voisins. Ainsi, si l'on compare les surfaces bleu clair et foncé les plus à droite, la différence dans la partie supérieure est flagrante, la couche imperméable isolant le bloc supérieur, dans lequel la diffusion de la pression se rapproche du comportement observé dans le cube homogène.

Ces résultats confirment que les hétérogénéités d'un modèle géologique, notamment les hétérogénéités imperméables isolant différentes régions du modèle, ont un impact sur le comportement physique local. Selon l'échelle de modélisation, et l'objectif de l'étude, il convient donc de modéliser ces hétérogénéités.

V.3 Application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe

Cette méthodologie est appliquée au réservoir géothermique de Bouillante, pour incorporer au fur et à mesure des connaissances conceptuelles géologiques, malgré le manque de données de subsurface. Le comportement thermo-hydraulique du réservoir est étudié, dans l'objectif de voir quel niveau de complexité est nécessaire pour que le modèle corresponde aux observations de terrain.

V.3.1 Description du processus physique et de la méthodologie de résolution

Dans cette application, le comportement thermo-hydraulique du réservoir est investigué via la résolution des équations d'écoulement de fluides et de transfert de chaleur, présentées chapitre I. La résolution de ces équations se fait grâce à l'utilisation combinée des schémas de résolution des éléments finis pour les parties diffusives des équations et des volumes finis pour les parties advectives. L'algorithme de mise en place des équations et des schémas de résolution est présenté (Algorithme 3).

Les conditions initiales et aux limites mises en place sur le modèle sont les suivantes :

- ▶ température de 300°C dans la zone de source de chaleur,
- ▶ température de 20°C sur la frontière supérieure du modèle,
- ▶ pression atmosphérique sur la frontière supérieure du modèle,
- ▶ température de 150°C sur la frontière inférieure du modèle, ce qui permet d'introduire un gradient thermique selon la profondeur mais conserve la source de chaleur comme source principale.

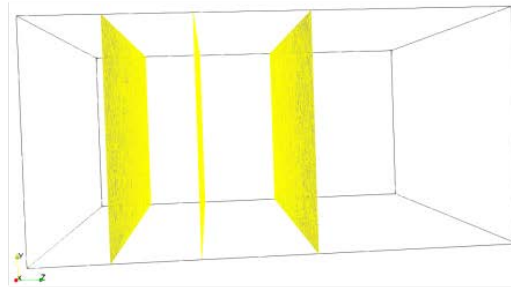
Algorithme 3 : Algorithme de définition et de résolution du processus thermo-hydraulique avec la combinaison des schémas des éléments finis et des volumes finis (d'après Patterson et al. [2018]).

Données : un modèle géologique complet (géométrie, topologie et propriétés pétrophysiques) prêt pour une simulation physique

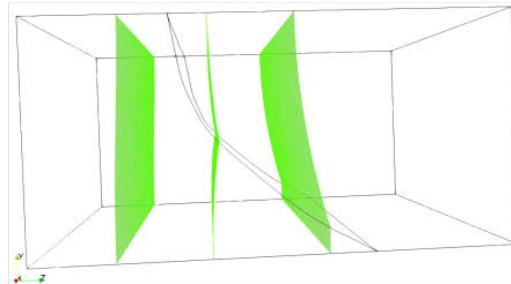
Résultat : évolution de la température et de la vitesse d'écoulement des fluides en fonction du temps

```
1 début Mise en place des équations de diffusion de pression et de température  
   sur les éléments finis  
2   |   équation stationnaire de la pression de fluides ;  
3   |   équation stationnaire de la température ;  
4   |   équation transitoire de la pression de fluides ;  
5   |   équation transitoire de la température ;  
6 fin  
7 Mise en place du schéma explicite d'advection de la masse et de l'enthalpie  
   sur les volume finis ;  
8 Calcul de la solution stationnaire ;  
9 Calcul évolutif de la solution transitoire : tant que le temps maximal n'est  
   pas atteint faire  
10  |   Résolution de la diffusion de la température sur les éléments finis ;  
11  |   Advection de masse et d'enthalpie sur les volumes finis ;  
12  |   Mise à jour des propriétés des fluides suite à l'advection ;  
13  |   Résolution de la diffusion de la pression sur les éléments finis ;  
14  |   Mise à jour des vitesses ;  
15 fin
```

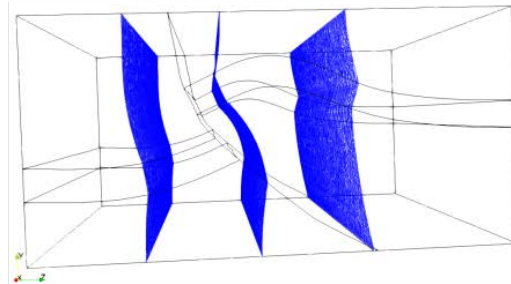
Étape 1



Étape 2



Étape 3



Étape 4

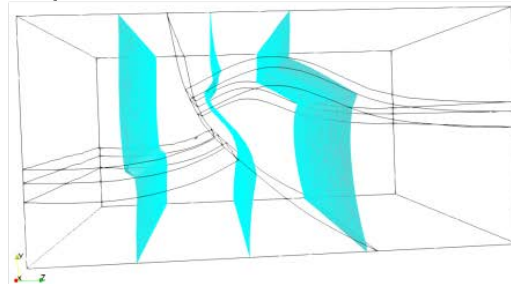


FIGURE V.4 – Résultat contours de fronts de pression du fluide de différentes valeurs ($1.5 \cdot 10^7$, $2.0 \cdot 10^7$ et $2.5 \cdot 10^7$, respectivement de la droite vers la gauche), pour les différents modèles des étapes de complexification.

Ces conditions ne reflètent pas totalement la réalité, du fait de l'impossibilité avec le simulateur choisi de modéliser les fluides multiphasiques en 3D, ce qui contraint à un intervalle de température plus réduit (0 - 300°C) par rapport aux modèles réalisés en 2D.

V.3.2 Description de la méthodologie de complexification mise en place

Différents niveaux de complexification ont été définis, pour prendre en compte progressivement différentes informations géologiques, établies à partir de données brutes ou de modèles conceptuels dérivés de la compréhension globale du système. Nous discuterons l'impact de ces niveaux de complexité sur le comportement tridimensionnel du réservoir à grande échelle. Les différents niveaux définis sont les suivants :

► *Niveau 0 : prise en compte de la topographie de l'île*

La topographie de l'île de Basse-Terre est prise en compte. L'altitude maximale du modèle est ainsi établie à 1 500 m au niveau du volcan de la Soufrière. L'axe de la chaîne de montagnes présente une direction N140, suivant l'axe volcanique présenté Chapitre I. Cette chaîne est parallèle à la côte Ouest de l'île dans la zone modélisée, la pente est ainsi plus élevée sur les flancs Ouest que sur les flancs Est (Figure V.5). Les données permettant d'établir la topographie du modèle sont résolues et précises. Dans ce modèle, la perméabilité des roches est fixée à $k = 1.0 \cdot 10^{-14} m^2$. Il s'agit d'une valeur haute sur l'ensemble de la zone par rapport au modèle conceptuel de perméabilité, choisie pour permettre d'obtenir des résultats avec un temps de calcul plus faible.

► *Niveau 0 bis : prise en compte de la bathymétrie*

La modélisation à grande échelle du comportement du réservoir de Basse-Terre implique d'inclure un domaine d'étude plus large que l'île. Il faut alors combiner les données de topographie et celles de bathymétrie, qui sont obtenues par différentes méthodes et n'ont pas la même résolution. La topographie de l'île est prolongée en mer par la bathymétrie en tant que frontière supérieure du modèle. La continuité de la forte pente à l'Ouest de l'île est ainsi prise en compte, ainsi que les structures particulières liées à l'effondrement des flancs du volcan à l'Ouest (Figure V.5).

► *Niveau 1 : ajout de corridors de failles*

L'emplacement des failles n'est pas connu avec précision, du fait d'une impossibilité d'en suivre la continuité en surface (végétation, mer...), et du manque d'informations en subsurface. Des structures représentant des corridors de fracturation, qui suivent les directions principales connues des familles de failles, et qui intègrent les évidences de failles observées, ont été interprétées durant le projet (GEOTREF). Ces corridors sont représentés par des zones rectangulaires, autour de surfaces de failles (considérées comme le centre des corridors). Ces corridors ont été extrapolés en 3D en considérant un prolongement vertical des structures (Figure V.6). La représentation tridimensionnelle de chaque corridor est donc un parallélépipède centré sur une faille plane et verticale. Les relations entre ces corridors sont définies par le recoupement de ces parallélépipèdes. La prise en compte de ces corridors peut se faire de deux façons :

- par une représentation explicite. Cette approche impliquera de simplifier

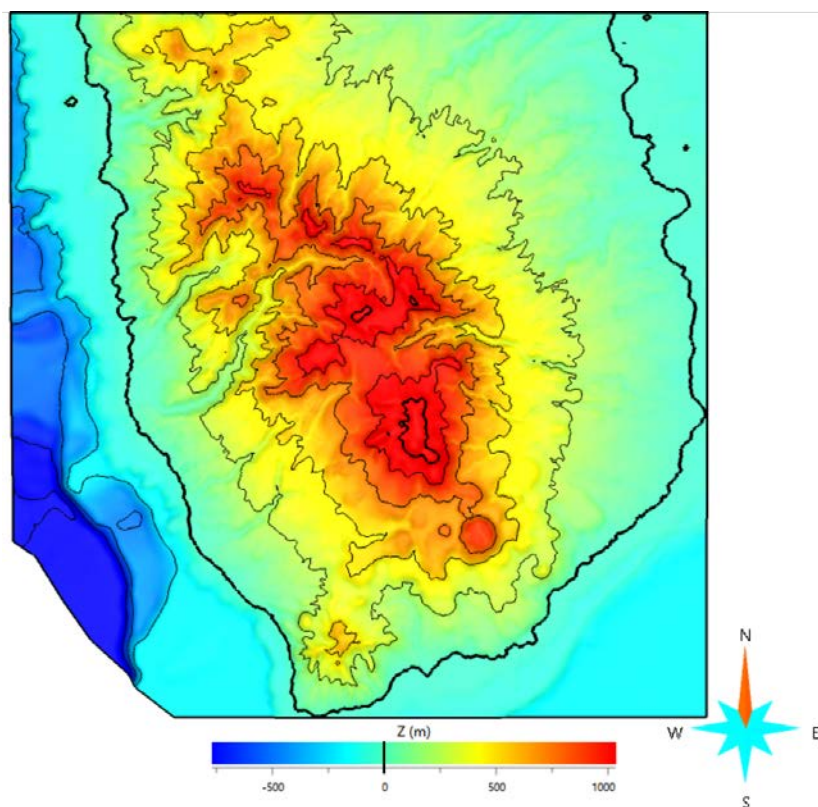


FIGURE V.5 – Topographie de l'île de Basse-Terre prise en compte lors de la modélisation (Données IGN-SHOM-UA).

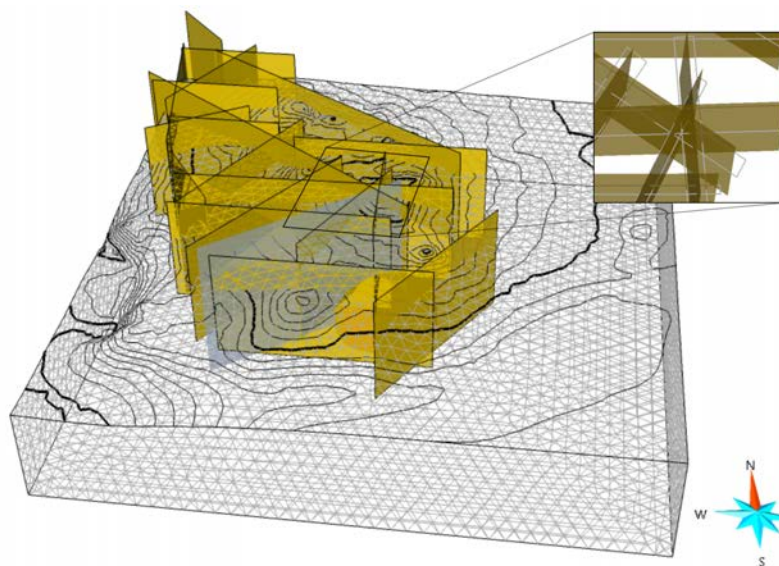


FIGURE V.6 – Vue 3D de l'ensemble des données utilisées pour le modèle de Basse-Terre. Ces données comprennent la surface de topographie et bathymétrie, les surfaces centrales des corridors de failles (surfaces jaunes) et l'emplacement de la coupe présentant le modèle de perméabilité (surface grise). Un agrandissement sur une zone de jonction des corridors de failles (lignes grises), avec les surfaces centrales représentées (surfaces jaunes) est réalisé, ce qui permet de voir les faibles angles et petites zones.

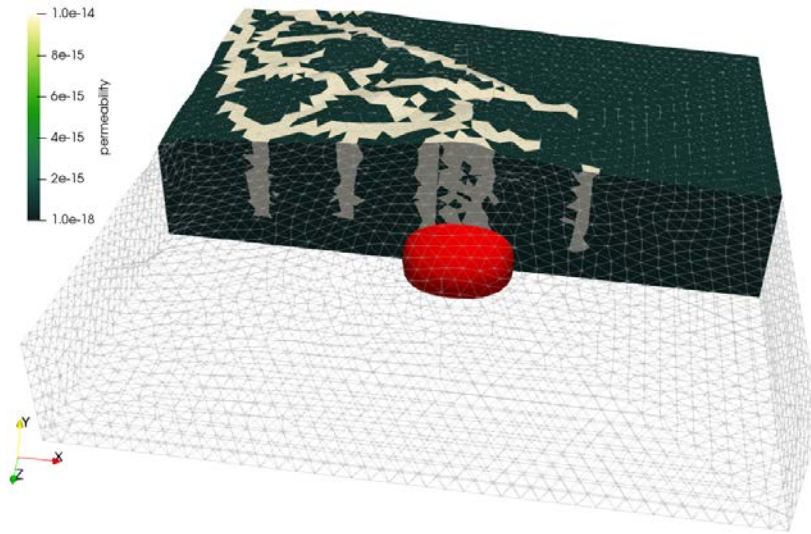


FIGURE V.7 – Représentation des corridors de failles, avec les valeurs de perméabilité associées ($k = 1.0 \cdot 10^{-14} m^2$).

le réseau de failles pour pallier les problèmes numériques liés à la création d'un maillage, comme les faibles angles au niveau des intersections (Figure V.6).

► par une représentation implicite. Les corridors sont alors représentés par un volume dépendant d'une propriété de distance aux surfaces de failles représentant le centre des corridors, calculée sur un maillage de fond.

Pour cette première approche de modélisation en 3D du comportement de ce réservoir, il a été décidé de définir les corridors de failles comme une zone volumique grâce à une propriété de distance à la surface médiane des corridors. La largeur moyenne des corridors étant de 900 m, les éléments étant à moins de 450 m des surfaces médianes des corridors de failles sont considérés dans les corridors. La perméabilité des couloirs de failles est fixée à $k = 1.0 \cdot 10^{-14} m^2$. Pour maintenir une différence d'un ordre de grandeur, celle de la matrice est fixée à $k = 1.0 \cdot 10^{-15} m^2$. Pour aller plus loin dans l'étude du comportement de ce réservoir et dans la quantification de l'impact des différentes hétérogénéités, il serait intéressant de définir une analyse de sensibilité sur un grand nombre de modèles incluant les surfaces au centre des corridors dans le maillage, simplifiées de différentes façons (en supprimant des parties aux intersections, en déplaçant certaines surfaces...).

► *Niveau 2 : mise en place de couches stratigraphiques et variation des valeurs de perméabilité*

Différents éléments structuraux influencent les valeurs de perméabilité. Un modèle conceptuel a été établi dans le cadre du projet GEOTREF autour de ces différents éléments (Figure V.8). Ces différents éléments sont les suivants :

► une surface de glissement sur les flancs Ouest des volcans, plus imperméable ($k = 1.0 \cdot 10^{-17} m^2$) ,

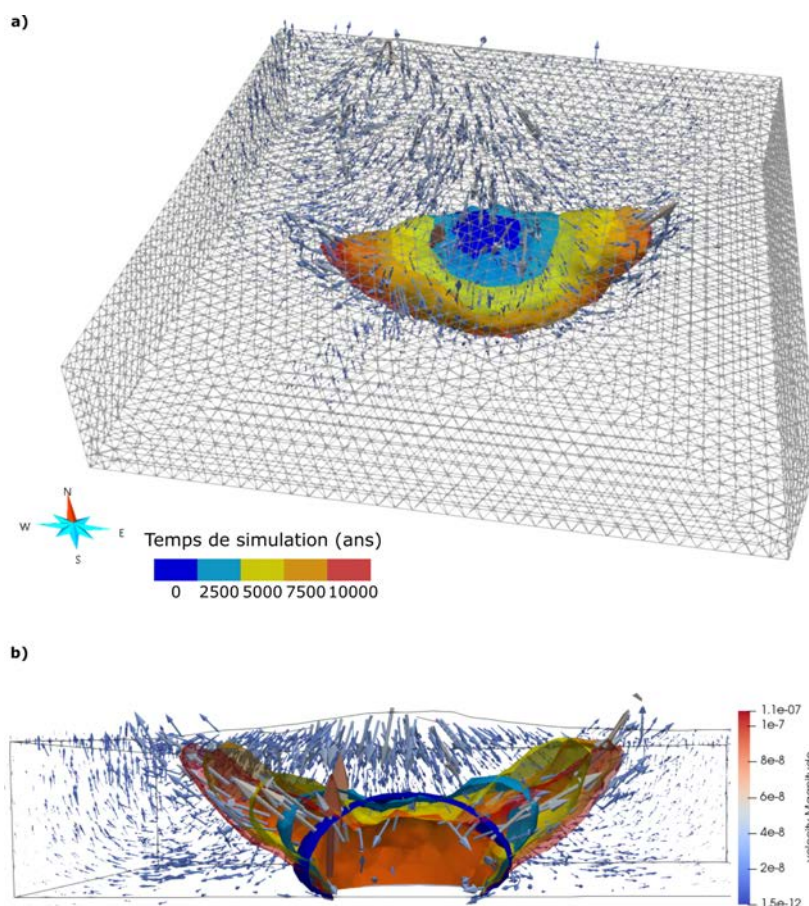


FIGURE V.9 – Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec seulement la topographie prise en compte. L'isotherme 175°C est observé pour différents temps de simulation, et la magnitude de la vitesse d'écoulement des fluides est représentée par les flèches.

Prise en compte de la bathymétrie autour de l'île de Basse-Terre La bathymétrie autour de l'île présente deux profils différents à l'Est et à l'Ouest. À l'Est, il s'agit d'une plaine peu profonde, tandis qu'à l'Ouest, un talus très escarpé est présent, entraînant un fort dénivelé très près des côtes. Cette différence influence fortement la circulation des fluides, entraînés par la forte pente. On observe ainsi une modification de la forme des isothermes, avec un déplacement de chaleur vers le Sud-Ouest.

Prise en compte de couloirs de failles sur l'île de Basse-Terre La prise en compte des couloirs de fracturation atténue l'effet de la bathymétrie, les écoulements de fluides se concentrant dans les parties plus perméables. La forme générale des isothermes est conservée, en étant cependant moins lissée. Un impact plus important pourrait être observé en effectuant la simulation physique sur un temps plus important, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années, ce qui impliquerait un temps de calcul supérieur à un mois, et n'a pas pu être réalisé ici.

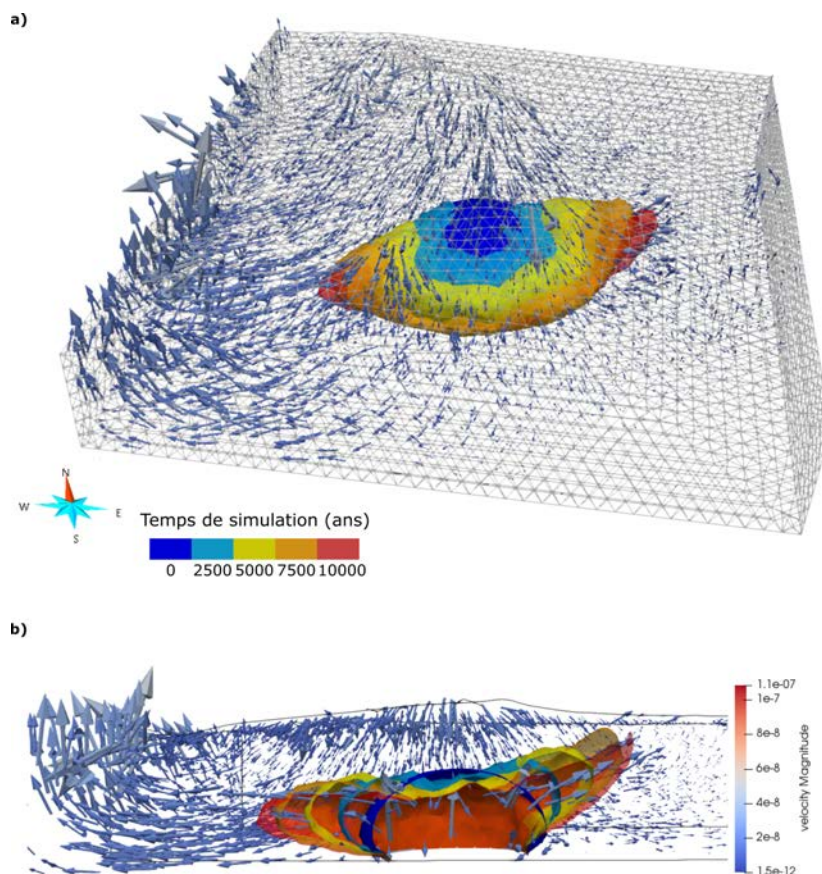


FIGURE V.10 – Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec ajout de la prise en compte de la bathymétrie en prolongement de la topographie. L'isotherme 175°C est observé pour différents temps de simulation, et la magnitude de la vitesse d'écoulement des fluides est représentée par les flèches.

Mise en place de couches stratigraphiques et variation des valeurs de perméabilité L'introduction de la surface de glissement présentée Figure V.8 dans le modèle entraîne des difficultés techniques dans le processus. En effet, une fois la surface créée (Figure V.12), il y a un faible angle entre la surface topographique et cette surface de glissement. Cela résulte en la construction de cellules à très faibles volumes tout autour de l'intersection entre les deux surfaces (différence de cinq ordres de grandeur par rapport aux autres cellules du modèle). Cela aboutit à un ralentissement des calculs dans un premier temps, selon la condition CFL, et finalement, à une impossibilité pour le simulateur physique de converger.

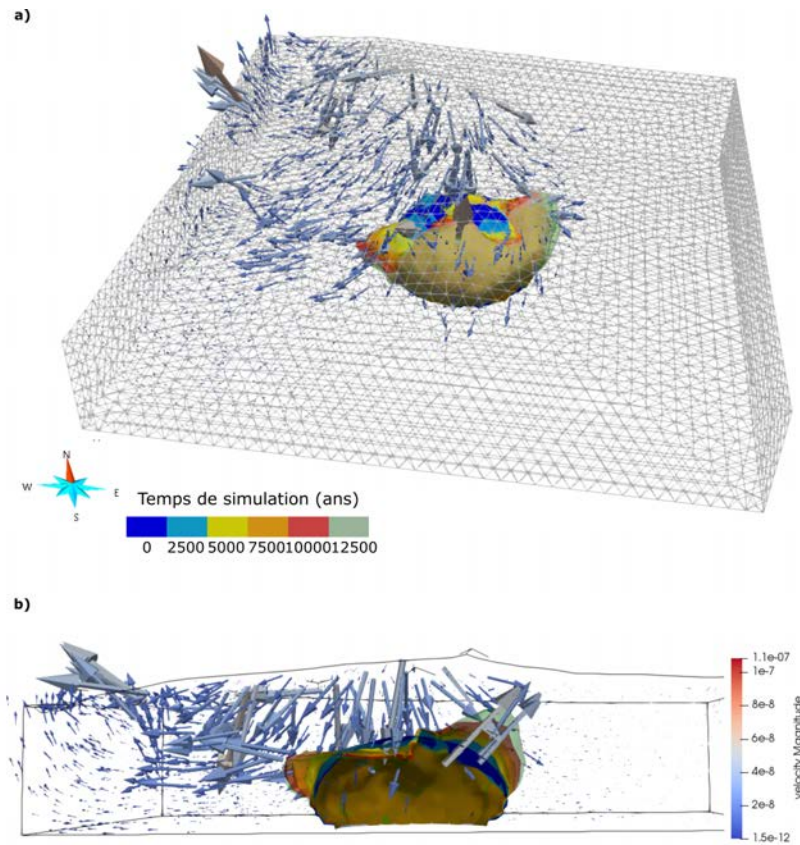


FIGURE V.11 – Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec modélisation de couloirs de fracturation avec une perméabilité plus forte, en conservant la bathymétrie et la topographie. L'isotherme 175°C est observé pour différents temps de simulation, et la magnitude de la vitesse d'écoulement des fluides est représentée par les flèches.

V.4 Conclusion

Deux études ont été réalisées en 3D avec complexification progressive du milieu pour prendre en compte des informations géologiques. La première, effectuée sur un cas synthétique à petite échelle, montre que les hétérogénéités qui ont le plus d'impact sont les couches imperméables, en isolant différentes régions du modèle.

Dans le cas du modèle réalisé à grande échelle sur l'île de Basse-Terre, l'importance de la topographie et de la bathymétrie a été montrée. Des corridors de failles plus perméables ont également été introduits. Ceux-ci ne semblent pas avoir une influence sur le comportement global du réservoir, mais plus localement.

La tentative d'ajout au modèle d'une surface de glissement imperméable montre la difficulté d'intégrer explicitement toutes les hétérogénéités à une échelle aussi large. Cette difficulté est d'un ordre technique, et pourrait être contournée en utilisant des ordinateurs plus puissants et en parallélisant les opérations de résolution des simulations physiques, ce qui n'a pas été possible dans le cadre de ce projet. Une autre solution serait d'envisager des simplifications géométriques n'ayant que peu ou pas d'influence sur le comportement physique [Anquez et al., 2019]. Cependant, il apparaît difficile de savoir

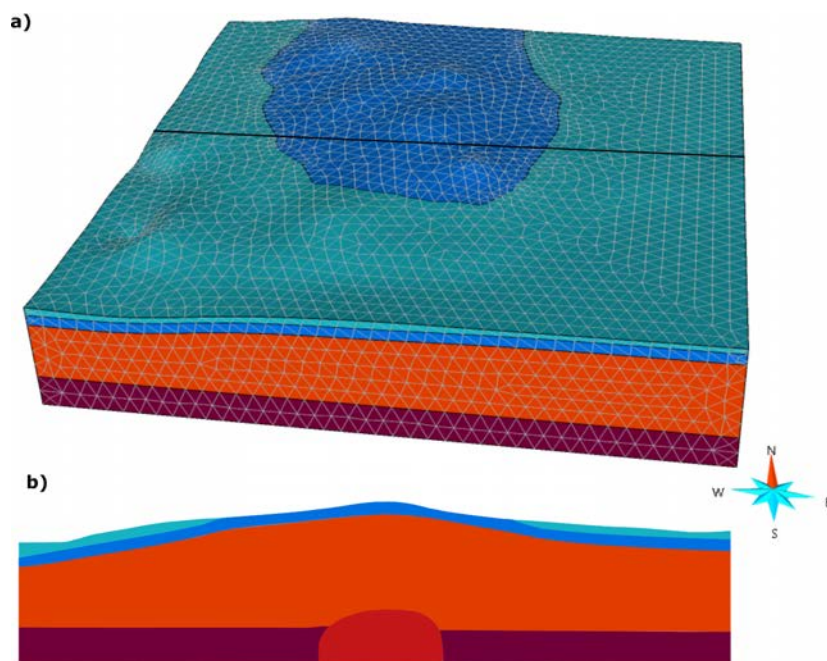


FIGURE V.12 – Modèle géologique 3D réalisé avec surface de glissement et couche ductile. (a) Vue générale du modèle. (b) Vue en coupe selon le trait noir matérialisé en (a). Les petits angles conduisant à la création de cellules de faibles volumes sont localisés dans la couche supérieure, à l'intersection entre la surface topographique et la surface de glissement.

quel compromis effectuer sans solution complète de référence.

Concernant le comportement du réservoir de Basse-Terre, il apparaît qu'à l'échelle modélisée, les couloirs de failles ont seulement une influence locale, ou que l'impact est dilué dans l'ensemble du modèle. Pour pouvoir établir de façon plus précise cette influence, il faudrait réaliser différents modèles, soit à des échelles plus petites que l'ensemble de l'île, soit en complexifiant petit à petit le réseau de failles. Cela nécessiterait également plus de données à cette résolution car de nombreuses incertitudes demeurent, dont la principale concerne la position, la taille et la forme de la source de chaleur.

Des améliorations pourraient également être apportées concernant le modèle physique, comme la prise en compte de fluides multiphasiques et de différentes compositions (eau salée notamment).

Conclusions générales

Contributions de cette thèse

Dans cette thèse, je me suis intéressée à la prise en compte de l'information géologique pour la simulation de processus physiques. Je me suis notamment concentrée sur la mise en place de méthodes permettant de conserver cette information tout au long de la chaîne de modélisation, et sur une application à un réservoir géothermique haute température dans un environnement volcanique à Basse-Terre, en Guadeloupe. Les objectifs sont : (1) de pouvoir incorporer et respecter la géométrie et la topologie des hétérogénéités géologiques à différentes échelles dans les simulations physiques ; et (2) d'appréhender le comportement thermo-hydraulique à grande échelle d'un réservoir géothermique tel que celui de Basse-Terre. En considérant ces deux aspects, une discussion sur l'échelle des hétérogénéités à prendre en compte explicitement a été initiée.

Méthode - Conservation de la géométrie et de la topologie des modèles géologiques lors de mise en place de simulations physiques grâce à l'utilisation de maillages non structurés

Deux pans de cette méthode ont été développés. Le premier, en 2D et 3D, permet d'assurer un transfert de tous les éléments constituant le modèle géologique lors de la mise en place du modèle physique. Le second est d'assurer une description précise de la topologie et de la géométrie des modèles au cours de la création de coupes 2D dans un modèle 3D. En effet, la modélisation fait appel à des experts et des outils présentant une certaine complémentarité. Il est courant de devoir transférer des modèles d'un logiciel ou d'un code à l'autre, pour bénéficier de leurs spécificités.

Dans le Chapitre 3, les différentes étapes de cette méthodologie, qui se base sur la définition des entités topologiques et géologiques, sont détaillées. La méthode proposée parcourt les différents éléments du modèle en se focalisant sur la signification géologique de chacun. Ceci permet à la fois un transfert des discontinuités à grande échelle, prises en compte explicitement (géométrie et topologie) et des hétérogénéités à petite échelle, représenté par un modèle de propriétés. Cette méthode a été validée sur une application dont la solution analytique est connue, et qui a été testée avec différents simulateurs physiques. Les performances de cette méthode sont comparées lors du transfert d'un modèle géologique complexe, comportant 12 horizons et 26 failles.

Cette méthode a été présentée lors de plusieurs conférences internationales (*EGW 2107 et IAMG 2018*).

Modélisation du comportement thermo-hydraulique du réservoir de Basse-Terre, Guadeloupe

La méthode développée dans cette thèse a été utilisée pour mieux appréhender le comportement thermo-hydraulique du réservoir géothermique de Basse-Terre, en Guadeloupe. Les Chapitres 4 et 5 présentent deux approches différentes.

Le Chapitre 4 propose d'évaluer le réalisme physique de différents scénarios conceptuels établis en 2D à partir de données géologiques. Dans ces scénarios, différentes hypothèses sont établies sur la présence d'éléments ayant un rôle majeur dans le comportement thermo-hydraulique du réservoir (seconde source de chaleur, corridors de failles, couches perméables). Les profils de température obtenus à Bouillante sont reproduits pour deux des scénarios explorés. Cela laisse penser que les conditions permettant un transfert latéral de chaleur depuis la Soufrière vers Bouillante ne sont pas réunies d'après les simulations réalisées. Deux hypothèses demeurent plausibles : la présence d'un flux de chaleur basal suffisamment fort pour soutenir un réservoir localisé par des corridors de fracturation, ou la présence d'une source de chaleur ponctuelle, dont la géométrie reste inconnue. Ce travail a été valorisé dans un article publié dans le journal *Geothermal Energy*.

Le Chapitre 5 propose une approche différente en 3D, en incorporant progressivement de l'information. Ainsi, la topographie de la zone puis la bathymétrie sont prises en compte, avant l'insertion de corridors de failles. Ces modèles mettent en avant l'importance de la prise en compte des informations topologiques et bathymétriques pour ces modèles de proche surface. En revanche, le modèle des corridors de faille ajoutés semblent n'avoir un impact qu'à l'échelle locale, et pas sur le comportement global du réservoir. L'utilisation d'une représentation explicite de ces corridors de failles n'a pas pu être abordée. Des modèles géologiques insérant d'autres hétérogénéités, comme les surfaces de glissement imperméables, ont été construits, mais une limite est atteinte concernant les capacités techniques entre précision géologique, résolution du maillage et temps de calcul.

Perspectives

Les différentes méthodes développées dans cette thèse et les premiers cas d'applications ouvrent la voie à de nombreuses perspectives. Celles-ci portent à la fois sur des améliorations techniques, mais également sur certains points théoriques (géologiques ou physiques). Certaines pistes sont évoquées ici.

Vers un processus intégrant différents outils selon les applications

Dans le cadre de cette thèse, l'application principale était l'étude du comportement d'un réservoir géothermique. Pour cela, le choix s'est porté sur une bibliothèque de simulation, CSMP++. Cette bibliothèque, généraliste, permet d'effectuer différentes applications. Cependant, pour d'autres études, comme par exemple des études de propagations d'ondes, d'autres simulateurs plus spécifiques peuvent être utilisés. Pour faciliter les interactions, les comparaisons et valider les différentes approches, il serait techniquement intéressant d'intégrer dans le processus développé ici d'autres simulateurs, pour résoudre d'autres problèmes, comme la propagation d'ondes sismiques [Anquez et al., 2019].

Des contraintes géologiques et un modèle physique plus réalistes

Dans le quatrième chapitre de cette thèse, différents scénarios géologiques ont été évalués. Cette étude montre que sans plus de contraintes géologiques, les modélisations ne permettent pas de discriminer différents scénarios géologiques, impliquant différents mécanismes. Pour obtenir un modèle plus réaliste du comportement du réservoir de Basse-Terre, différentes améliorations peuvent être apportées. D'une part, les informations géologiques (données de subsurface sur l'organisation des roches, localisation plus précise des failles...) peuvent être précisées. Dans un environnement volcanique, cette tâche est cependant rendue difficile par l'enchaînement rapide (à l'échelle des temps géologiques) de différents événements modifiant la structure, la géométrie et l'organisation des roches, qui peuvent donc apparaître peu organisées et difficilement identifiables. D'autre part, le modèle physique peut être amélioré pour prendre en compte différentes compositions de fluides (eau salée), et des fluides multiphasiques en 3D (adaptation en 3D des méthodes développées par Driesner et Geiger [2007] et Weis et al. [2014]).

Comparaison entre prise en compte explicite des hétérogénéités, changement d'échelle et simplification

Lors de la modélisation, différentes stratégies peuvent être mises en place pour considérer les hétérogénéités de la roche. Dans cette thèse, nous avons considéré les hétérogénéités à grande échelle (couches, failles...). Elles ont majoritairement été intégrées géométriquement et physiquement de façon explicite dans les modèles. Cependant, il existe également des hétérogénéités plus fines qui peuvent être présentes, comme par exemple les fractures, ou des évolutions dans les séquences stratigraphiques, avec de

finies couches imperméables [Ringrose et Bentley, 2015]. Différentes stratégies peuvent alors être envisagées pour prendre en compte ces hétérogénéités : la première consiste à représenter explicitement ces hétérogénéités, à l'aide d'une discrétisation spatiale très fine, qui demande encore des efforts dans la gestion des maillages. La seconde repose sur l'utilisation d'un maillage plus grossier, avec utilisation de méthodes de mises à l'échelle pour obtenir des valeurs de propriétés équivalentes sur les grandes cellules à celles sur les petites cellules [Durlofsky, 2005]. Enfin, des méthodes de simplification des modèles géologiques peuvent aussi être utilisées pour faciliter la création du maillage [Anquez et al., 2019].

Le choix d'utiliser l'une ou l'autre de ces méthodes dépend à la fois de critères techniques (outils disponibles, puissance de calcul, etc) et de critères scientifiques (échelle considérée, phénomène physique étudié, etc). Cela reste cependant généralement un choix subjectif, lié à des habitudes, des impératifs extérieurs ou des contraintes temporelles ou opérationnelles. Il serait donc très intéressant d'effectuer une étude globale mettant en parallèle ces différentes stratégies pour quantifier leur impact sur les simulations physiques [Geiger et Matthäi, 2014].

Vers la mise à jour itérative des modèles

Dans cette thèse, différents modèles ont été réalisés pour comparer et évaluer l'impact de différentes structures géologiques sur les simulations physiques. Cependant, un nouveau modèle a été réalisé à chaque fois, repartant de la modélisation structurale en 3D. Des premiers travaux ont été réalisés pour modifier le modèle à l'étape suivante, en insérant de nouvelles structures dans le maillage (Voir Annexe 2). Cependant, ce travail a uniquement été réalisé sur les maillages, sans conservation des informations géologiques. Il serait intéressant de poursuivre dans cette voie, pour finir la boucle intégrative et pouvoir mettre à jour itérativement un modèle géologique selon les résultats d'une simulation d'un processus physique. Cette mise à jour permettrait d'intégrer de nouvelles données au cours du processus, mais également de pouvoir réaliser des modèles proches les uns des autres et ouvrir une nouvelle voie à la quantification des incertitudes [Wellmann et Caumon, 2018].

Annexes

Sommaire

Résumé étendu correspondant au poster présenté lors de la conférence de l'EAGE Paris 2017, portant sur une ana- lyse de sensibilité lors de la modélisation des transferts de fluides et de chaleur dans le réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe	109
Article correspondant au poster présenté lors du RING Meeting 2016, portant sur la découpe de maillages tétraédriques à partir de fonctions implicites	114

Résumé étendu correspondant au poster présenté lors de la conférence de l'EAGE Paris 2017, portant sur une analyse de sensibilité lors de la modélisation des transferts de fluides et de chaleur dans le réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe



Introduction

Understanding the flow circulation in geothermal areas is a key point to a potential exploitation of heat resources. This study focuses on the geothermal field of Basse-Terre, Guadeloupe, in the French West Indies. The island is part of the Lesser Antilles island arc. A geothermal plant is already implanted in Bouillante, and hypotheses have been made to explain the origin of the heat (Lachassagne et al., 2009). However, a more thorough analysis is needed to understand the geothermal activity of the field area, to operate geothermal resources. Since 2015, a set of studies started to characterize flow and heat transfers at depth. The Geotref project aims at developing exploitation principles in Vieux-Habitants, 10 km South of Bouillante. In this context, we focus on fluid and heat transfers using numerical simulations, with a special attention to the influence of static and dynamic parameters.

We will use the expertise from petroleum reservoirs simulations but modify the approach to address particular challenges related to high temperature geothermal systems (e.g. very high temperature, pressure changes...). We propose a sensitivity study on the parameters defining the thermo-hydrodynamic model to identify the critical parameter(s) of the model. Tests are run in 2D with the simulator Hydrotherm (Hayba and Ingebritsen, 1994). One of the pioneer works in this area is based on the circulation of heat flux around a cooling pluton has been led by Hayba and Ingebritsen (1997). We will use technical and theoretical improvements that have been done since this work (Ingebritsen et al., 2010).

The geological context of the studied area will first be shortly presented. A conceptual thermo-hydrodynamic model is then built from this context. Several possible scenarios are studied to determine the impact of each factor on the heat and fluid flows. With these experiments we show that geological interfaces and the permeability field have a strong impact on the heat and fluid flows.

Geological and geothermal context of Guadeloupe islands

The Guadeloupe island is part of the Lesser Antilles subduction arc (Figure 1), located in the Caribbean sea, at the collision between the Caribbean and the North American plates. The area is composed of two volcanic arcs. The older one (blue in Figure 1) was active between the Eocene and the Oligocene. Since the Miocene, the volcanic activity has been translated to the South West, which created the active inner arc (red in Figure 1). Those two arcs are the result of the subduction of the North American plate under the Caribbean plate, at a rate of about 2 cm/year.

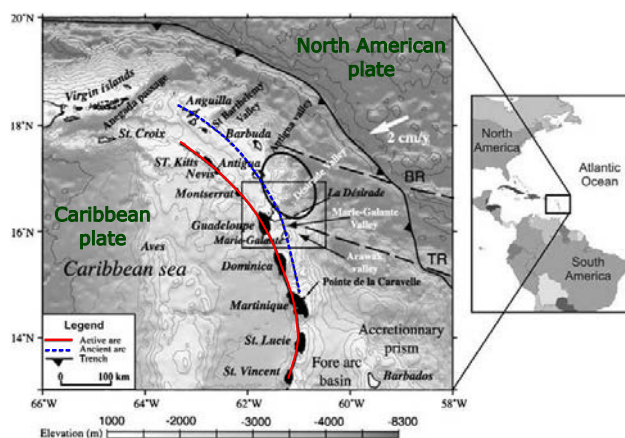


Figure 1: The Lesser Antilles islands, results of the collision of the North American and the Caribbean plates. The ancient and active arcs (resp. blue and red lines) are products of the volcanic activity due to the subduction process (modified from Lachassagne et al. (2009), initially from Feuillet et al. (2002)).

Most of Guadeloupe islands belong to the ancient and now inactive volcanic arc. These old islands are



now covered by sedimentary rocks (e.g. Grande Terre). On the contrary, the Basse-Terre island belongs to the active arc and presents recent volcanic rocks resulting of the volcanic activity. From the North to the South (actual location of the volcano), the rocks are younger, because they result from more recent volcanic events (Komorowski et al., 2005).

The area is also characterized by the presence of a dense fault network, impacting fluid flow at depth. In the Basse-Terre island, two major fault families have been identified (Feuillet et al., 2002; Lachassagne et al., 2009):

- A West-East oriented family, corresponding to an extension regime that is reflected by the presence of the Basse-Terre - Marie-Galante graben, in the southern part of the island.
- A North-South oriented family, corresponding to normal faults that are part of the Basse-Terre - Montserrat system, that extend throughout the volcanic arc.

Even with the implantation of a geothermal plant in Bouillante, the behavior of the geothermal field is not well understood, especially regarding heterogeneities and fluid flow patterns. These two concerns are combined, as former flow paths can introduce heterogeneities in the rocks, that will be preferential paths now. This work focuses on the creation of a geothermal fluid circulation model for the Basse-Terre island of Guadeloupe. A first conceptual model explaining the origin of the heat near the Bouillante plant was developed by Lachassagne et al. (2009). This model is still discussed, because no geological heterogeneity has been introduced. Moreover, the model needs more information to be extended. This work tackles the problem by producing 2D models with parameters that intent to represent geological heterogeneities and demonstrate their impact. For this, some results obtained by Lachassagne et al. (2009) will be used, and other interpretations will come from field geologists working on the project.

Modeling flows and heat transfers: Sensitivity analysis

Taking into account geological heterogeneities is not that easy. The first step is to identify the main parameters that drive the simulation process. This work is a first try to better identify geological structures that we need to consider in a complex 3D model. We propose a conceptual model (Figure 2) to assess both the impact of geological heterogeneities and the climate on flow and heat transfers. The parameters that are tested reflect geological and environmental features:

- *The horizontal and vertical permeabilities, representing small scale heterogeneities (fractures, schistosity...).* The permeabilities are petrophysical properties of the rocks, strongly involved in the fluid flows, measuring the ability of the rock to allow fluids to pass through it. The higher the permeability is, the more the fluid will go through it. The permeability field can be isotropic or anisotropic, leading to preferential flow patterns in a direction.
- *The presence of a geological interface separating two layers with different properties, representing large scale heterogeneities (horizons, faults...).* Variations between the properties of the two layers may induce variation in the flow patterns. In this case, we will study a model without heterogeneities and a model with two layers with different properties. The model was chosen with two layers to grab a first idea of the impact of heterogeneities on the model, and will be more precise once the complete geological description of the area will be known.
- *The precipitation flux on the top of the model, representing the influence of the climate.* The recharge of the aquifer by the top boundary of the model can have a major impact on the fluid flows underground. The model will be set with two values of precipitation flux (in the software, the precipitation flux corresponds to the recharge of the model): no flux at all for most of the models and one model with a flux of 300 mm/year.

The reference case (Figure 3a) corresponds to the conceptual model with an isotropic permeability field, no geological interface and no precipitation. Each parameter is then modified to perform a sensitivity

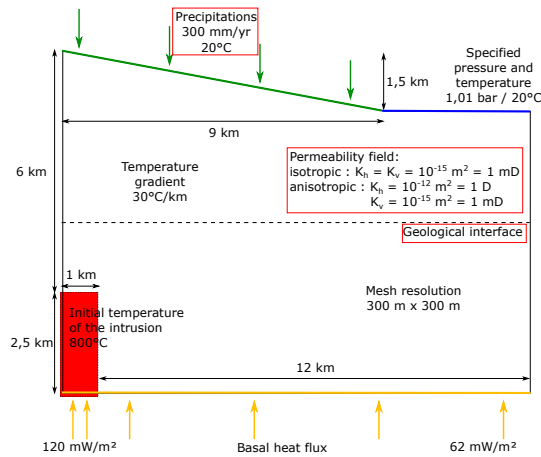


Figure 2: Conceptual model presenting the geometry of the model used in Hydrotherm and the various parameters that will vary (framed in red).

study. The result shown Figure 3b corresponds to an anisotropic permeability field. A geological interface was introduced for the third case (Figure 3c). Finally, the last case comes from the second one with the addition of precipitations at the border (Figure 3d).

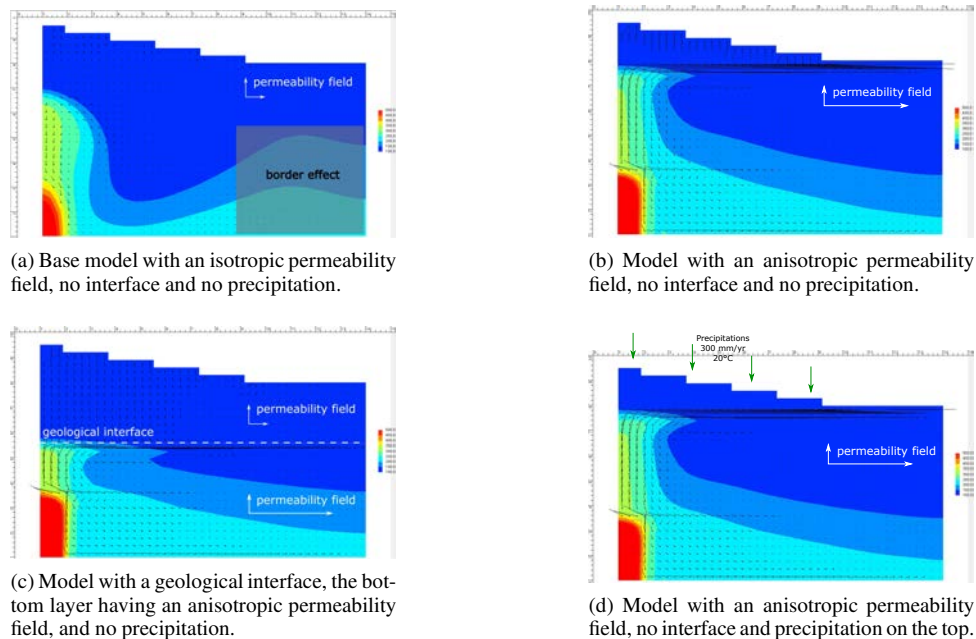


Figure 3: Four examples of the results obtained with the simulations.

Discussions

Those results are the first step for the study and the understanding of the flow processes in the area. We plan to test a model with a geometry and petrophysical properties more adapted to our knowledge of



the Guadeloupe islands. We are also working on tools to quantify the impact of simulation parameters on thermal profiles at wells. We showed that geological heterogeneities of the model have a major impact on the flow patterns. Some of the limitations of 2D modeling can here be pointed out: the obtained result is only a cross-section, complex geometries of geological structures are not represented. The next step is to build a complex 3D geological model of the area. This model can then be used to create a flow simulation grid and run flow simulations. However, in most cases, the flow simulation grid used is regular, simplifying the geometry of the model, and missing some important features, such as fractures. Our goal is to develop a tool to link 3D complex models and the CSMP++ library (see Matthäi et al. (2005) and Paluszny et al. (2007)), which allow flow simulation on unstructured meshes. Our final objective is to obtain of flow simulator that can handle fractured reservoirs thanks to the use of unstructured meshes, as well as model the behavior of supercritical fluids and define various solution composition (in 2D, see Weis et al. (2014)).

Acknowledgements

This work was performed in the framework of the RING project at Université de Lorraine. Studies were implemented for the GEOTREF program, which benefits from the support of both the ADEME and the French public funds "Investments for the future". We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA.

References

- Feuillet, N., Manighetti, I., Tapponnier, P. and Jacques, E. [2002] Arc parallel extension and localization of volcanic complexes in Guadeloupe, Lesser Antilles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107**(B12), 2331.
- Hayba, D.O. and Ingebritsen, S.E. [1994] The computer model Hydrotherm, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1,200 degrees C. Tech. Rep. 94-4045, U.S. Geological Survey ; USGS Earth Science Information Center, Open-File Reports Section.
- Hayba, D.O. and Ingebritsen, S.E. [1997] Multiphase groundwater flow near cooling plutons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **102**(B6), 12235–12252.
- Ingebritsen, S.E., Geiger, S., Hurwitz, S. and Driesner, T. [2010] Numerical simulation of magmatic hydrothermal systems. *Reviews of Geophysics*, **48**(1).
- Komorowski, J.C., Boudon, G., Semet, M., Beauducel, F., Anténor-Habazac, C., Bazin, S., Hammouya, G. and Cheminée, J.L. [2005] Guadeloupe. *Volcanic Atlas of the Lesser Antilles*, 65–102.
- Lachassagne, P., Marechal, J.C. and Sanjuan, B. [2009] Hydrogeological model of a high-energy geothermal field (Bouillante area, Guadeloupe, French West Indies). *Hydrogeology Journal*, **17**(7), 1589–1606.
- Matthäi, S., Mezentsev, A. and Belayneh, M. [2005] Control-Volume Finite-Element Two-Phase Flow Experiments with Fractured Rock Represented by Unstructured 3D Hybrid Meshes. Society of Petroleum Engineers.
- Paluszny, A., Matthäi, S.K. and Hohmeyer, M. [2007] Hybrid finite element-finite volume discretization of complex geologic structures and a new simulation workflow demonstrated on fractured rocks. *Geofluids*, **7**(2), 186–208.
- Weis, P., Driesner, T., Coumou, D. and Geiger, S. [2014] Hydrothermal, multiphase convection of H₂O-NaCl fluids from ambient to magmatic temperatures: a new numerical scheme and benchmarks for code comparison. *Geofluids*, **14**(3), 347–371.

Article correspondant au poster présenté lors du RING Meeting 2016, portant sur la découpe de maillages tétraédriques à partir de fonctions implicites

Cutting a tetrahedral mesh by implicit surfaces

Margaux Raguenel¹, Guillaume Caumon¹, and Arnaud Botella¹

¹*GeoRessources, Université de Lorraine / CNRS / CREGU, ENSG, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

September 2016

Abstract

Numerical simulations, such as flow simulation, need a space discretization that set equivalent media properties to be use in the computation. Geomodels individualize structures that either segregate rock types or locally impact the rock mechanical properties. Volumetric meshes must integrate these structures in order to store consistent physical properties. We propose a method to update volumetric tetrahedral mesh by cutting mesh elements. This work has been developed with an implicit modeling framework where geological objects are represented as isovalue of a 3D scalar field. The method starts with a purely tetrahedral mesh and produces a hybrid (i.e. composed of tetrahedra, prisms, pyramids and hexahedra) unstructured mesh while adding implicit surfaces. It opens new perspectives for automatic mesh simplification and for incremental structural modeling.

Introduction

A geomodel is the result of the interpretation of the geologists, who edit and interpolate the geometry of surfaces and contacts that represent the geological objects. The accuracy of this model is important because it segregates the studied volume into regions where rock properties may be considered as statistically homogeneous (where the hypothesis of stationarity can be made). These models need to capture major geological heterogeneities in order to produce representative physical behavior, e.g. during flow simulations.

Two approaches can be considered to build a structural model. The explicit approach describes all the objects of the model (horizons, faults...) using triangulated or quadratic surfaces. The implicit approach is based on the representation of a surface by the isovalue of a property, e.g. in a tetrahedral mesh [Frank et al., 2007]. Implicit modeling is more and more used because it allows a better control on the constraints added to model the complexity of the subsurface geology (see for example [Caumon et al., 2013]), as well as for the robustness and the automation of the method. However, the strong interactions between faults and horizons in the structural model often implies a sequential process, with first the representation of the fault network and then the creation of the horizons. Doing adjustments in the fault network while modeling the stratigraphy then requires to completely rebuild the model, which is really time consuming.

For both approaches meshing is a key step of the process. For the explicit model approach, meshing is the last step of the process, with all the structural surfaces already represented. At this step, it has to face challenging situations (Figure 1), with the issues of small angles and mesh quality (often both), especially with thin layers, pinch outs, or dying faults [Pellerin et al., 2014]. In the implicit approach, a mesh is first built as a support for the interpolation of the scalar field representing the implicit surfaces. Combining the two approaches by inserting implicit surfaces in a tetrahedral mesh, as shown in Figure 2, appears as a possibility to overcome several difficulties: (1) ease the mesh global creation by handling the difficulties locally at the addition of new surfaces, (2) allow a dynamic modification of the structural model, by adding and removing surfaces without having to sequentially rebuild the fault network or the structural model after each correction.

In this paper, we introduce a method to cut a tetrahedral mesh by an implicit surface. This allows more flexibility in the whole process, with an easier interaction between the faults and horizons

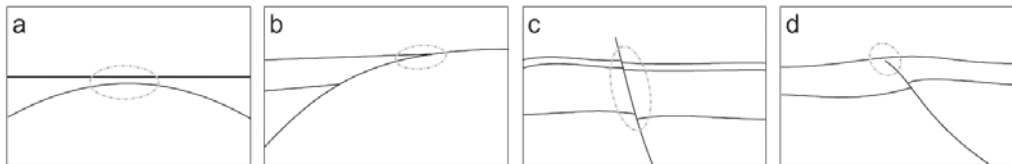


Figure 1: The creation of a mesh faces various challenging situations: (a) thin layers, (b) layer pinch outs, (c) small displacement of faults and (d) dying syn-sedimentary faults (from [Pellerin et al., 2014])

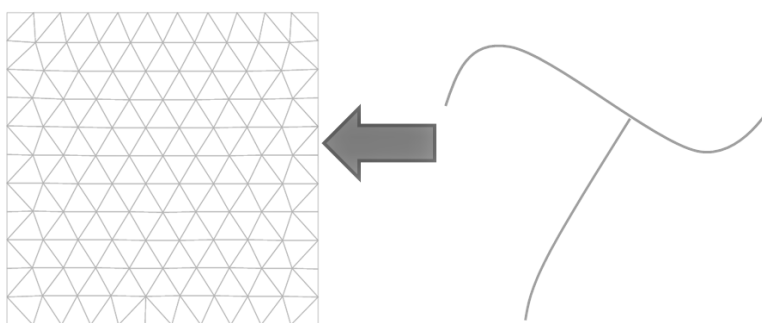


Figure 2: Principle of the proposed approach: the surfaces will be inserted in an initial mesh, which is cut iteratively.

modeling while building the structural model. The challenge addressed during this model update is to provide the geometric accuracy needed to well represent the subsurface while preserving a mesh quality criteria imposed for the numerical resolution of the partial differential equations governing subsurface processes. Clément and Caumon [2010] developed the early stages of this method but faced several difficulties, one of them being the constraint of using only a tetrahedral mesh, which implies to reconstruct conformable tetrahedra directly after the cut. We propose to overcome this difficulty by adding some flexibility in the choice of mesh elements. Tetrahedral meshes cuts generate hybrid meshes with tetrahedra, hexahedra, pyramids and prisms. The hybrid mesh we use is based on the data structure of the Geogram library [Lévy, 2015] and handled by the RINGMesh library [Pellerin et al., 2015] for the link with geological models. This introduces a major difference in our approach as compared to the one proposed by Clément and Caumon [2010]: there is no need to handle everything at the same step (cut and reconstruction of tetrahedra), so we use a sequential process that involves less dependencies between the various steps of the cut.

After presenting the global algorithm used for this work, some key points are detailed and synthetic examples are shown.

1 Global algorithm

The algorithm is based on the marching tetrahedra algorithm [Treece et al., 1999]. We iterate on all the tetrahedra of the mesh and we test the intersection between the implicit surface and the current tetrahedron. We flag each node of the tetrahedron in order to establish its signature. This signature defines the next move of the algorithm, by labeling the tetrahedra as cut or not. If a cut is indeed needed, it is performed by the insertion of new points and cells. Once each tetrahedron is treated, a cleaning process is done, by deleting the vertices created multiple times and deleting the old tetrahedra. This algorithm is presented in Algorithm 1. The mesh obtained by this process is a

hybrid mesh containing tetrahedra, prisms and pyramids.

Algorithm 1: Global algorithm to cut a mesh by an implicit surface

Input: tetrahedral mesh with implicit surface scalar values at each vertex

Result: the new mesh cut by an implicit surface (hybrid mesh)

```

1 for each cell do
2   determine signature
3   if cut is needed then
4     addition of the new vertices
5     creation of the new cells
6   end
7 end
8 deletion of the collocated vertices
9 deletion of the old tetrahedra

```

2 Key steps of the algorithm

In this algorithm, the key steps are the computation of the information needed to decide if a tetrahedron is cut or not, called signature determination, the cut of the tetrahedron by itself, and then the postprocess cleaning. These three main steps of the algorithm are detailed in the following section.

2.1 Tetrahedron signature

The signature of a tetrahedron represents how the vertices of the tetrahedron are organized depending on the implicit surface property values stored at its nodes. In order to cut a tetrahedron, the first step is to determine its signature to know if and how the cut has to be done. If the property value on a vertex is superior to the isovalue representing the surface, this vertex is marked as +, if it is inferior, as -, and if it is equal to the isovalue, as 0. An example of the determination of the signature for a tetrahedron is presented Figure 3.

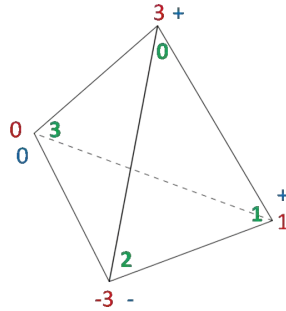


Figure 3: Example of the configuration of a tetrahedron, with the value of the property representing the surface in red and the associated symbol for the signature in blue. The isovalue corresponding to the surface is 0. The vertex index layout order is in green. The signature of this tetrahedron is therefore (+, +, -, 0).

From the signature of a tetrahedron, we can identify all the possible cases resulting from the introduction of an implicit surface in the mesh. The signature is a combination with repetition. The total number of possible configurations is therefore $\Gamma_3^4 = 15$. One combination is impossible (0, 0, 0, 0)

2016 RING-MEETING

and, due to the symmetry, only 8 cases have to be studied. Four configurations will not introduce any changes in the mesh, as shown in Figure 4.

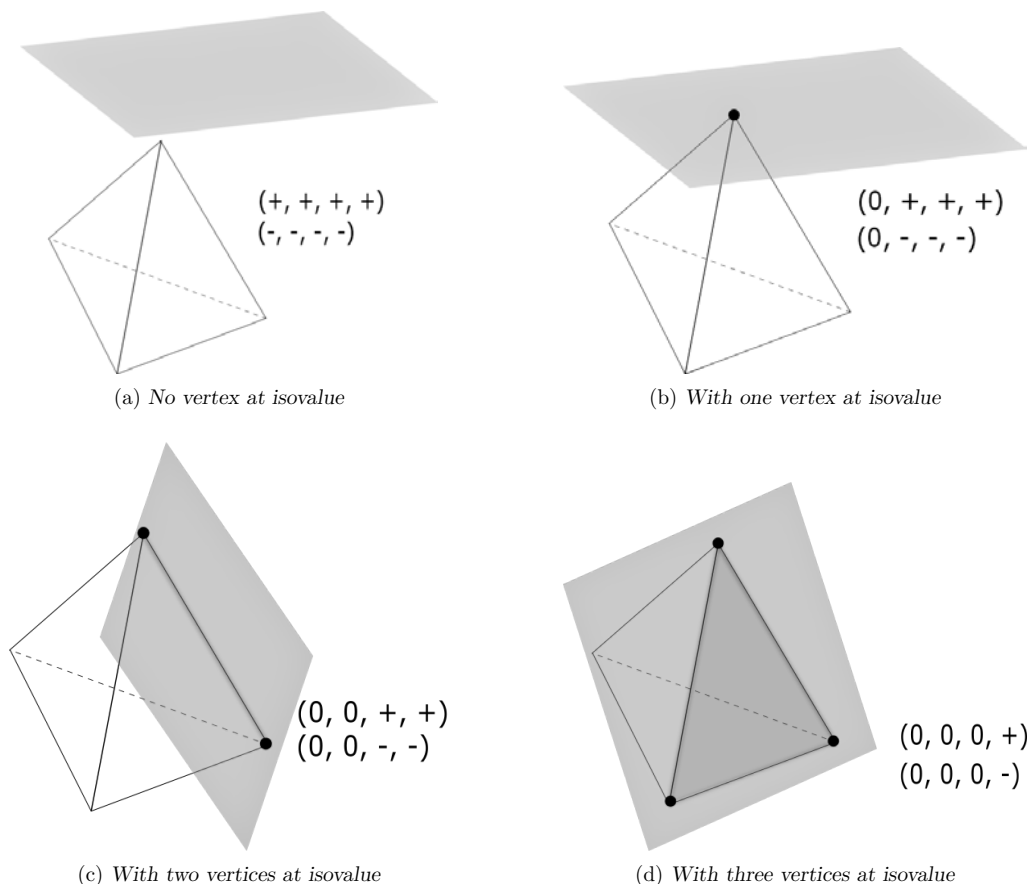


Figure 4: Configurations with no change in the mesh. Here, for each case, only one configuration with one specific index layout order is shown. The other index layout orders are also considered in the code.

Four configurations will introduce changes and an effective cut in the mesh, as shown in Figure 5.

2.2 Tetrahedron cut

After determining the signature, the information about the necessity of the cut is known. If the tetrahedron is not cut, the algorithm goes to the next tetrahedron. If the cut is needed, it has to be effectively done. With the signature of the tetrahedron, the theoretical result of the cut of the tetrahedron is known, each signature being associated to one of the eighth cases developed above. The effective cut then consists in two steps:

1. Create the new vertices, when the tetrahedron signature indicates an intersection between the implicit surface and an edge of the tetrahedron. The new vertex position is chosen by a linear interpolation of the implicit surface property on the edge.
2. Create the new cells, which will replace the intersected tetrahedron. After the addition of all the

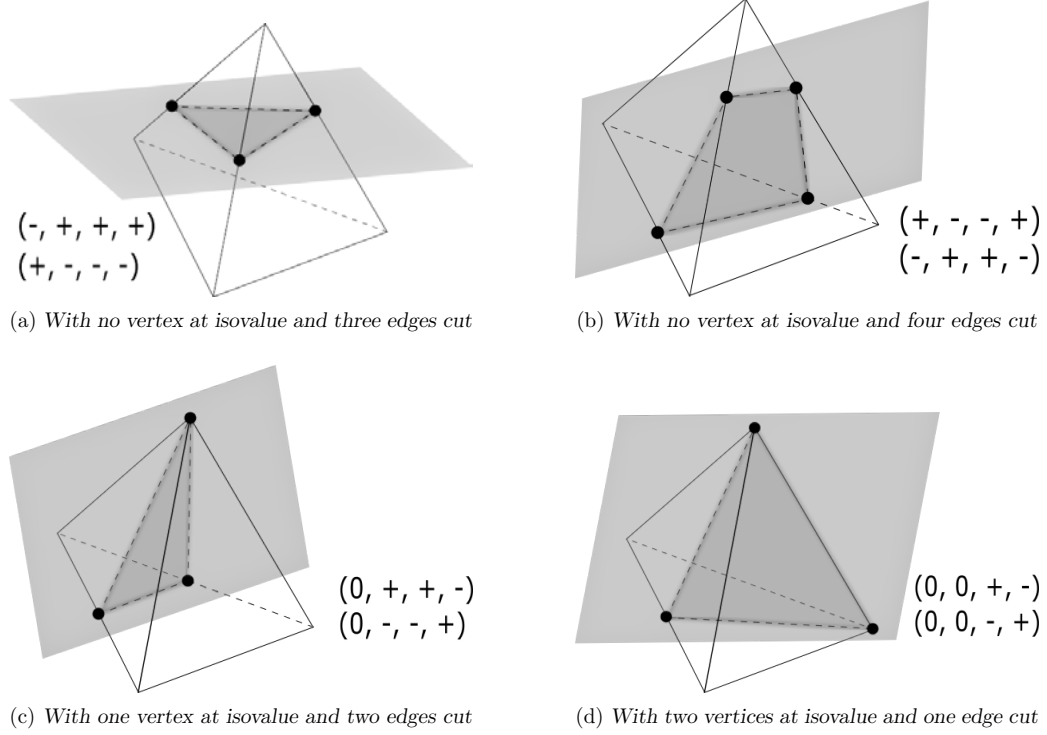


Figure 5: Configurations where the mesh is cut. Here, for each case, only one configuration with one specific index layout order is shown. The other index layout orders are also considered in the code.

needed vertices, new cells, whose topology is indicated by the tetrahedron signature, are created and added in the mesh.

In order to confirm the approach and test the validity of the written code, the first tests established were on the theoretical configurations explained in section 2.1, to ensure that the steps run at the tetrahedron level were valid. Those tests were included in the code as routine tests to ensure the stability of the process and verify its usability each time an important change is made (regression and unit tests).

Two configurations are presented here: a tetrahedron cut into two prisms (Figure 6a) and a tetrahedron cut into a tetrahedron and a pyramid (Figure 6b).

2.3 Postprocessing

Once all the tetrahedra have been considered and gone through, new vertices and cells have been added without special consideration. A postprocessing step is mandatory to clean the newly created mesh. Two major issues have to be addressed:

1. At a same location, several vertices could have been created, as the algorithm goes through all the tetrahedra independently. At an edge shared by two tetrahedra, two vertices will be created by the cut process described above (Section 2.2) and only one has to remain in the final mesh.
2. The old tetrahedra that remain after the creation of the new cells during the cut process. They have to be deleted to obtain a clean final mesh.

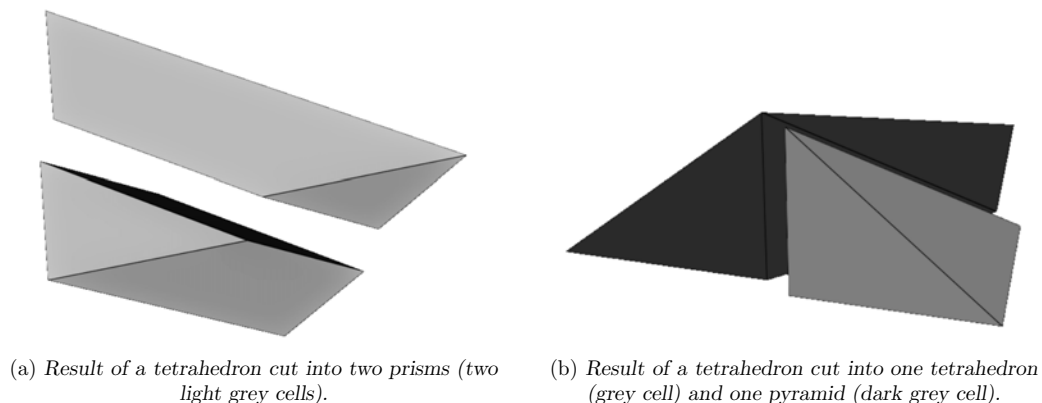


Figure 6: Results of two of the regression and unit tests made on the configuration of the tetrahedra.

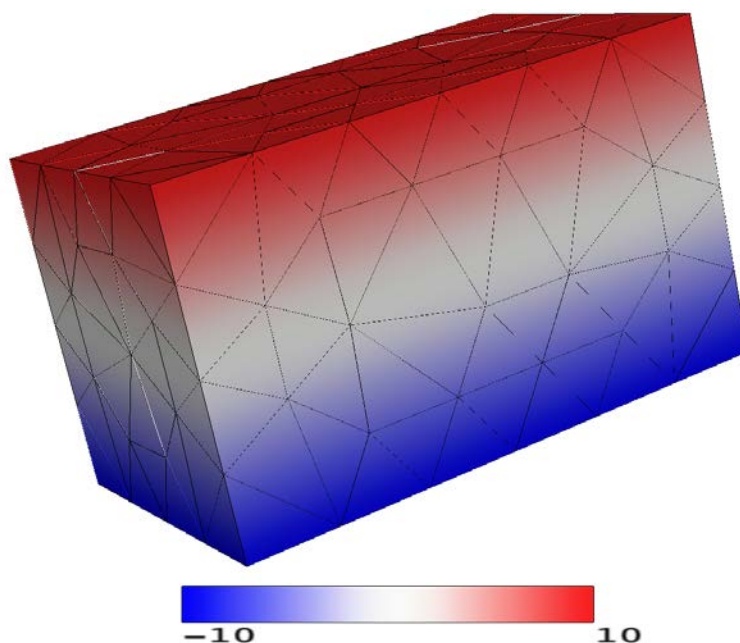


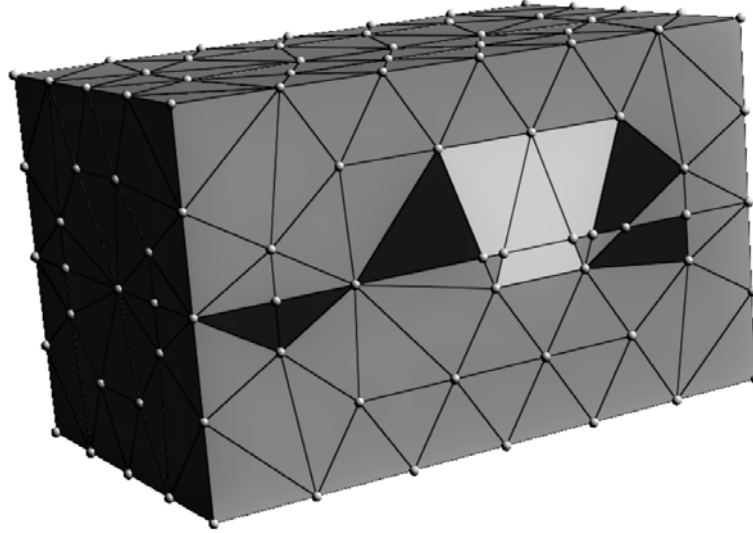
Figure 7: Initial synthetic mesh with 163 vertices and 517 tetrahedra. The property shown is representing the implicit surface that will cut the mesh, at the isovalue 0 (white).

The cleaning process therefore consists of two actions: the deletion of the collocated vertices and the deletion of the initial tetrahedra.

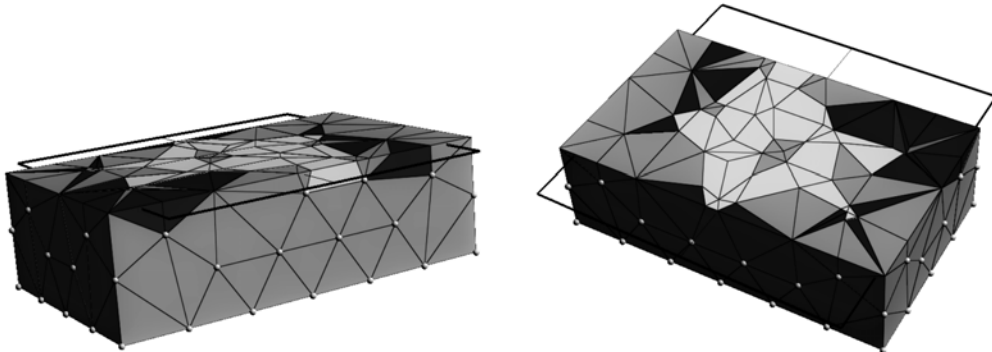
At the end of the postprocessing, a clean hybrid final mesh is obtained. Two examples on a synthetic mesh are presented. Before the cut, the initial mesh without any surface included in the volume of interest was composed of 163 vertices and 517 tetrahedra. This synthetic initial mesh is presented in Figure 7.

The first test was a cut along a planar surface at a determined depth. The new mesh obtained now contains 204 vertices, 533 tetrahedra, 39 prisms and 21 pyramids and is presented in Figure 8. In

the slices (Figures 8b and 8c), some small elements can be seen. Those elements may cause problems with further use of the mesh for physical applications.



(a) Mesh cut by a planar surface at a given depth. The presence of new cells can be observed (prisms in light grey and pyramids in dark grey).



(b) Bottom slice of the mesh cut along a planar surface at a given depth (view from the top). (c) Top slice of the mesh cut along a planar surface at a given depth (view from the bottom).

Figure 8: Result of the test of the cut of the synthetic mesh by a planar surface at a given depth.

A test was also done with a curved surface, as to represent a folded horizon. The result of this test is presented Figure in 9. The mesh now contains 274 vertices, 477 tetrahedra and 171 prisms.

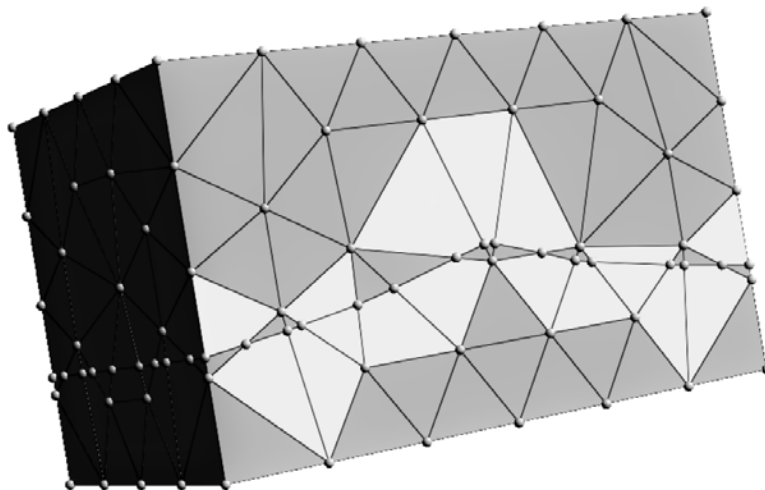


Figure 9: *Result of the test of the cut of the synthetic mesh by a curved surface, representing a folded horizon. The apparition of prisms (light grey cells) due to the cut can be observed.*

3 Perspectives

This work is still in the early stage of development. Before any work on real models and maybe the combination with other techniques under development in the team, such as the sequential simulation of faults, several technical issues have to be addressed. A major and mandatory improvement would be to cut a mesh not only by one but by several surfaces. However, our algorithm is for now based on the cut of tetrahedra. Moreover, the cut operation of prisms and pyramids would ultimately lead to polyhedra with an arbitrary number of faces. In order to avoid that, we have to decompose the prisms and pyramids obtained in the cut into tetrahedra (inverse operation of the one explained by Meshkat and Talmor [2000]). An other technical issue is the handling of faults which terminate laterally inside a volume. Dealing with these issues will arise various possibilities in the way of handling meshes and the geometrical complexity of geological models.

Then to go further in the representation of actual geological models, it is mandatory to deal with the update of the boundary model representing the geology of the considered mesh.

Conclusion

In this paper, we presented a new approach consisting on adding surfaces in a pre existing mesh by cutting it. This approach is based on the use of a mesh structure that considers unstructured hybrid meshes with tetrahedra, prisms and pyramids, cell types that result from the cut. By defining a signature associated to each tetrahedron of the mesh, we were able to determine all configurations that needed a cut. Several examples were shown, first only on a single tetrahedron, which is useful to ensure the stability of the code, and then on a synthetic mesh, with planar and folded cuts.

This work, still on the early stage of development, offers new possibilities, especially during iterative processes, such as the sequential stochastic simulation of faults. In the end, this will allow more flexibility in the global geomodeling workflow, by permitting to modify a mesh during the modeling step and not creating one after each modification.

Acknowledgments

This work was performed in the framework of the RING project at the Université de Lorraine. We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA. We also want to acknowledge the INRIA Lorraine for providing the GeoGram library used in RINGMesh.

References

- G. Caumon, G. Gray, C. Antoine, and M.-O. Titeux. Three-Dimensional Implicit Stratigraphic Model Building From Remote Sensing Data on Tetrahedral Meshes: Theory and Application to a Regional Model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3):1613–1621, Mar. 2013. doi: 10.1109/TGRS.2012.2207727.
- J. Clément and G. Caumon. Improvement and edition of tetrahedral meshes in numerical geology. In *Proc. 30th Gocad Meeting, Nancy*, 2010.
- T. Frank, A.-L. Tertois, and J.-L. Mallet. 3d-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers & Geosciences*, 33(7):932–943, July 2007. doi: 10.1016/j.cageo.2006.11.014.
- B. Lévy. Geogram, 2015. URL <http://alice.loria.fr/index.php/software/4-library/75-geogram.html>.
- S. Meshkat and D. Talmor. Generating a mixed mesh of hexahedra, pentahedra and tetrahedra from an underlying tetrahedral mesh. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 49(1-2): 17–30, Sept. 2000. doi: 10.1002/1097-0207(20000910/20)49:1/2<17::AID-NME920>3.0.CO;2-U.
- J. Pellerin, B. Lévy, G. Caumon, and A. Botella. Automatic surface remeshing of 3d structural models at specified resolution: A method based on Voronoi diagrams. *Computers & Geosciences*, 62:103–116, Jan. 2014. doi: 10.1016/j.cageo.2013.09.008.
- J. Pellerin, A. Botella, A. Mazuyer, B. Lévy, and G. Caumon. RINGMesh: A programming library for developing mesh based geomodeling applications. In *Proceedings of IAMG 2015 Freiberg*. International Association for Mathematical Geosciences, sep 2015.
- G. M. Treece, R. W. Prager, and A. H. Gee. Regularised marching tetrahedra: improved iso-surface extraction. *Computers & Graphics*, 23(4):583–598, 1999. doi: 10.1016/S0097-8493(99)00076-X.

Table des figures

1	Cadre de recherche de la thèse.	7
2	Partenaires impliqués dans le projet GEOTREF.	8
3	Résumé des enseignements dispensés durant la thèse.	9
I.1	Chaîne intégrative de modélisation	15
I.2	Exemple de différents types de données	16
I.3	Résolution et couverture des données, montrant le challenge de l'intégration de données collectées à différentes échelles et différentes résolutions (modifiée d'après Howell et al. [2014]).	18
I.4	Méthodes de modélisation des structures géologiques à grande échelle	18
I.5	Description des entités d'un modèle géologique	20
I.6	Différents types de grilles	21
I.7	Procédures de définition d'un volume fini	23
I.8	Combinaison des schémas de discrétisation éléments finis et volumes finis	24
I.9	Éléments nécessaires pour une simulation physique sur un modèle géologique	30
II.1	Carte géodynamique de l'arc des Petites Antilles	35
II.2	Schéma du mécanisme de subduction entraînant le volcanisme actif de l'arc des Petites Antilles	36
II.3	Carte tectonique de l'arc des Petites Antilles	37
II.4	Carte bathymétrique et structurale de l'archipel de Guadeloupe .	39
II.5	Carte géologique, structurale et morphologique de la partie Sud de l'île de Basse-Terre	40
II.6	Carte géologique mettant en avant les différents complexes volcaniques de l'île de Basse-Terre	42
II.7	Frise chronologique des différentes phases éruptives et des différents complexes volcaniques mis en place sur l'île de Basse-Terre.	43
II.8	Schéma présentant l'évolution de l'île de Basse-Terre au cours de son histoire éruptive.	44
II.9	Évolution du complexe volcanique du volcan composite Grande-Découverte-Soufrière	45

TABLE DES FIGURES

II.10 Schéma structural et des circulations de fluides ayant lieu dans le dôme du volcan de la Soufrière	45
II.11 Coupe schématique représentant les différents analogues de réservoirs étudiés dans le cadre du projet GEOTREF	46
II.12 Comparaison et interprétation des répartitions de minéraux argileux sur les systèmes géothermaux actifs ou paléo-réservoirs de Bouillante et Terre-de-Haut	47
III.1 Présentation du workflow et des outils utilisés pour réaliser des simulations physiques sur des coupes géologiques en 2D	51
III.2 Interaction between several specialized tools to perform physical simulations on a geological model.	58
III.3 Elements needed to run simulations in geomodels	58
III.4 Steps to link RINGMesh and CSMP++	60
III.5 Model set up for the benchmark	63
III.6 Evolution of the radial component of the stress	64
III.7 Evolution of the tangential component of the stress	64
III.8 Fault network of the modeled transfered in the frame of the collaboration with the Peter Cook Centre for Carbon Capture and Storage Research, in the University of Melbourne (pers.comm). . .	65
III.9 Cross-section view of the volumetric model with a resolution of 50 m. The different geological entities, which are the blocks delimited by the faults and horizons, are underlined with different colors. . .	66
IV.1 Geological context of the Guadeloupe archipelago	76
IV.2 Map of the southwest part of Basse-Terre	77
IV.3 Three scenarios for the behavior of the Basse-Terre geothermal reservoir	78
IV.4 Well data from Bouillante	79
IV.5 Geometry used to represent the different scenarios	80
IV.6 Result of the simulations after 15 000 years	82
IV.7 Temperature profiles extracted from the simulations	83
IV.8 Temperature profiles extracted at different time stages for two scenarios	84
IV.9 Temperature-depth curves for a simple model setup	85
IV.10 Temperature profiles extracted for different values of vertical-conduit permeability	86
V.1 Géométrie du modèle synthétique, avec ces quatre couches et la faille inverse.	91
V.2 Conditions appliquées sur le modèle synthétique	92
V.3 Étapes de complexification progressive du modèle synthétique . .	93

V.4	Résultat contours de fronts de pression du fluide de différentes valeurs ($1.5 \cdot 10^7$, $2.0 \cdot 10^7$ et $2.5 \cdot 10^7$, respectivement de la droite vers la gauche), pour les différents modèles des étapes de complexification.	96
V.5	Topographie et bathymétrie de l'île de Basse-Terre	98
V.6	Vue 3D de l'ensemble des données utilisées pour le modèle de Basse-Terre	98
V.7	Représentation des corridors de failles	99
V.8	Modèle de distribution de la perméabilité sur l'île de Basse-Terre .	100
V.9	Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec seulement la topographie prise en compte	101
V.10	Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec ajout de la prise en compte de la bathymétrie en prolongement de la topographie	102
V.11	Résultat de la modélisation thermo-hydraulique sur le volcan de la Soufrière avec modélisation de couloirs de fracturation avec une perméabilité plus forte, en conservant la bathymétrie et la topographie	103
V.12	Modèle géologique 3D réalisé avec surface de glissement et couche ductile	104

Liste des tableaux

1	Étudiants co-encadrés lors de projets de recherche.	10
I.1	Récapitulatif des différents outils de simulations pouvant être utilisés dans un contexte géothermique	28
III.1	Details on the three models and the time needed to tranfer from RINGMesh to CSMP++. This transfer has been done on a computer using on core at 2.5GHz.	66

Liste des Algorithmes

1	Processus de conservation des informations topologiques et géologiques sur un modèle 2D.	53
2	Transfer of the information from the geological model.	61
3	Algorithme de définition et de résolution du processus thermo-hydraulique avec la combinaison des schémas des éléments finis et des volumes finis (d'après Patterson et al. [2018]).	95

Bibliographie

- P. Anquez, J. Pellerin, M. Irakarama, P. Cupillard, B. Lévy, et G. Caumon. Automatic correction and simplification of geological maps and cross-sections for numerical simulations. *Comptes Rendus Geoscience*, 2019. ISSN 1631-0713. doi: 10.1016/j.crte.2018.12.001. (Cité p. 50, 80, 103, 107, 108)
- M. Antics et B. Sanner. Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe. Dans *Proceedings*, p. 8, 2007. (Cité p. 3)
- N. L. Bangs, G. L. Christeson, et T. H. Shipley. Structure of the Lesser Antilles subduction zone backstop and its role in a large accretionary system. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 108(B7), 2003. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2002JB002040. (Cité p. 34)
- J. Bear. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Books on Physics and Chemistry. Dover, New York, 1988. ISBN 978-0-486-65675-5. (Cité p. 2, 22, 58)
- G. Beauchamps, B. Ledésert, R. Hébert, V. Navelot, et A. Favier. The characterisation of an exhumed high-temperature paleo-geothermal system on Terre-de-Haut Island (the Les Saintes archipelago, Guadeloupe) in terms of clay minerals and petrophysics. *Geothermal Energy*, 7(1) : 6, 2019. ISSN 2195-9706. doi: 10.1186/s40517-019-0122-y. (Cité p. 47)
- S. E. Benzley, E. Perry, K. Merkley, B. Clark, et G. Sjaardema. A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elasto-plastic analysis. Dans *In Proceedings, 4th International Meshing Roundtable*, 1995. (Cité p. 22)
- P. Besson et J.-P. Poirier. The 3100 bp eruption of the Soufrière of Guadeloupe A transmission electron microscopy study of the cryptodome andesite. *Bulletin of Volcanology*, 56(3) : 184–192, 1994. ISSN 0258-8900, 1432-0819. doi: 10.1007/BF00279603. (Cité p. 75, 81)
- S. Bézèlques-Courtade et S. Bès de Berc. Inventaire et caractérisation des sources thermales de Guadeloupe. Technical Report RP-55060-FR, BRGM, Orléans, France, 2007. (Cité p. 43)

- T. Blacker. Meeting the Challenge for Automated Conformal Hexahedral Meshing. Dans *9th International Meshing Roundtable*, 2000. (Cité p. 22)
- G. Blöcher, M. Cacace, T. Reinsch, et N. Watanabe. Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North German Basin. *Computers & Geosciences*, 82 : 120–129, 2015. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2015.06.005. (Cité p. 4)
- A. Botella. *Génération de Maillages Non Structurés Volumiques de Modèles Géologiques Pour La Simulation de Phénomènes Physiques*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016. (Cité p. 3, 22, 57)
- N. Böttcher, N. Watanabe, U.-J. Görke, et O. Kolditz. *Geoenergy Modeling I : Geothermal Processes in Fractured Porous Media*. Computational Modeling of Energy Systems. Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-31333-7. (Cité p. 28)
- V. Bouchot, H. Traineau, B. Sanjuan, A. Gadalia, L. Guillou-Frottier, I. Thinon, H. Fabriol, B. Bourgeois, J.-M. Baltassat, G. Pajot, P. Jousset, E. Lasne, et A. Genter. Modèle conceptuel du champ géothermique haute température de Bouillante, Guadeloupe, Antilles françaises. Technical Report BRGM/RP-57252-FR, BRGM, Orléans, France, 2009. (Cité p. 46, 47)
- G. Boudon, J. Dagain, M. Semet, et D. Westercamp. Carte géologique du massif volcanique de la Soufrière 1 : 20 000 Département de la Guadeloupe, 1988. OCLC : 490787376. (Cité p. 38, 41, 42, 45)
- G. Boudon, J.-C. Komorowski, B. Villemant, et M. P. Semet. A new scenario for the last magmatic eruption of La Soufrière of Guadeloupe (Lesser Antilles) in 1530 A.D. Evidence from stratigraphy radiocarbon dating and magmatic evolution of erupted products. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3) : 474–490, 2008. ISSN 03770273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.006. (Cité p. 75)
- P. Bouysse et D. Westercamp. Effets de la subduction de rides océaniques sur l'évolution d'un arc insulaire : L'exemple des Petites Antilles | Géologie de la France. *Géologie de la France*, 2(3) : 3 – 38, 1988. (Cité p. 34)
- P. Bouysse, D. Westercamp, et P. Andreieff. The Lesser Antilles Island Arc. Dans *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, vol. 110. Ocean Drilling Program, 1990. doi: 10.2973/odp.proc.sr.110.1990. (Cité p. 34, 36, 75)
- E. Brothelande, A. Finizola, A. Peltier, E. Delcher, J.-C. Komorowski, F. Di Gangi, G. Borgogno, M. Passarella, C. Trovato, et Y. Legendre. Fluid circulation pattern inside La Soufrière volcano (Guadeloupe) inferred from combined electrical resistivity tomography, self-potential, soil temperature and diffuse degassing measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 288 : 105–122, 2014. ISSN 03770273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.10.007. (Cité p. 43, 45)

- P. Calcagno, J. Chilès, G. Courrioux, et A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 (1-4) : 147–157, 2008. ISSN 00319201. doi: 10.1016/j.pepi.2008.06.013. (Cité p. 19)
- P. Calcagno, V. Bouchot, I. Thinon, et B. Bourguine. A new 3D fault model of the Bouillante geothermal province combining onshore and offshore structural knowledge (French West Indies). *Tectonophysics*, 526-529 : 185–195, 2012. ISSN 00401951. doi: 10.1016/j.tecto.2011.08.012. (Cité p. 36, 42, 46, 75)
- G. Caumon. Geological Objects and Physical Parameter Fields in the Subsurface : A Review. Dans *Handbook of Mathematical Geosciences : Fifty Years of IAMG*, p. 567–588. Springer International Publishing, Cham, 2018. ISBN 978-3-319-78999-6. doi: 10.1007/978-3-319-78999-6_28. (Cité p. 57)
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, et J. Sausse. Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences*, 41 (8) : 927–945, 2009. ISSN 1874-8961, 1874-8953. doi: 10.1007/s11004-009-9244-2. (Cité p. 17, 19, 57)
- G. Caumon, G. Gray, C. Antoine, et M.-O. Titeux. Three-Dimensional Implicit Stratigraphic Model Building From Remote Sensing Data on Tetrahedral Meshes : Theory and Application to a Regional Model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3) : 1613–1621, 2013. ISSN 0196-2892, 1558-0644. doi: 10.1109/TGRS.2012.2207727. (Cité p. 2)
- B. Chauvin. *Applicability of the Mechanics-Based Restoration : Boundary Conditions, Fault Network and Comparison with a Geometrical Method*. Thesis, Université de Lorraine, 2017. (Cité p. 63)
- G. L. Christeson, N. L. Bangs, et T. H. Shipley. Deep structure of an island arc backstop, Lesser Antilles subduction zone. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 108 (B7), 2003. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2002JB002243. (Cité p. 34)
- C. Clauser. *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers Shemat and Processing Shemat*. Springer Verlag, 2014. ISBN 978-3-642-62866-5. OCLC : 879247801. (Cité p. 28)
- P. Collon, W. Steckiewicz-Laurent, J. Pellerin, G. Laurent, G. Caumon, G. Reichart, et L. Vaute. 3D geomodelling combining implicit surfaces and Voronoi-based remeshing : A case study in the Lorraine Coal Basin (France). *Computers & Geosciences*, 77 : 29–43, 2015. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2015.01.009. (Cité p. 19)
- P. Collon, A. Pichat, C. Kergaravat, A. Botella, G. Caumon, J.-C. Ringenbach, et J.-P. Callot. 3D modeling from outcrop data in a salt tectonic context : Example from the Inceyol minibasin, Sivas Basin, Turkey. *Interpretation*, 4(3) : SM17–SM31, 2016. ISSN 2324-8858, 2324-8866. doi: 10.1190/INT-2015-0178.1. (Cité p. 2, 19)

BIBLIOGRAPHIE

- D. Coumou, T. Driesner, S. Geiger, C. Heinrich, et S. Matthai. The dynamics of mid-ocean ridge hydrothermal systems : Splitting plumes and fluctuating vent temperatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1-2) : 218–231, 2006. ISSN 0012821X. doi: 10.1016/j.epsl.2006.02.044. (Cité p. 25, 26)
- D. Coumou, S. Matthäi, S. Geiger, et T. Driesner. A parallel FE–FV scheme to solve fluid flow in complex geologic media. *Computers & Geosciences*, 34(12) : 1697–1707, 2008. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2007.11.010. (Cité p. 28)
- M. de la Varga, A. Schaaf, et F. Wellmann. GemPy 1.0 : Open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development*, 12(1) : 1–32, 2019. ISSN 1991-9603. doi: 10.5194/gmd-12-1-2019. (Cité p. 21)
- D. Dolejš. Quantitative characterization of hydrothermal systems and reconstruction of fluid fluxes : The significance of advection, disequilibrium, and dispersion. Dans *Mineral Resources in a Sustainable World*, vol. 2, p. 445–448, 2015. (Cité p. 4)
- T. Driesner et S. Geiger. Numerical Simulation of Multiphase Fluid Flow in Hydrothermal Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1) : 187–212, 2007. ISSN 1529-6466. doi: 10.2138/rmg.2007.65.6. (Cité p. 74, 80, 84, 85, 107)
- L. J. Durlofsky. Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation. Dans *8th International Forum on Reservoir Simulation Iles Borromees, Stresa, Italy*, vol. 2024, 2005. (Cité p. 22, 108)
- T. T. Eaton. On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology*, 184(3) : 187–201, 2006. ISSN 0037-0738. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.11.002. (Cité p. 22, 58)
- J. Edwards. *Construction de Modèles Stratigraphiques à Partir de Données Éparses*. Thesis, Université de Lorraine, 2017. (Cité p. 17)
- Emerson E&P Software. SKUA-GOCAD Software Suite. <https://www.pdgm.com/products/skua-gocad/>, 2019. (Cité p. 20)
- R. Eymard, T. Gallouët, et R. Herbin. Finite volume methods. Dans *Handbook of Numerical Analysis*, vol. 7, p. 713–1018. Elsevier, 2000. ISBN 978-0-444-50350-3. doi: 10.1016/S1570-8659(00)07005-8. (Cité p. 23)
- C. R. Faust et J. W. Mercer. Geothermal reservoir simulation : 1. Mathematical models for liquid- and vapor-dominated hydrothermal systems. *Water Resources Research*, 15(1) : 23–30, 1979. ISSN 1944-7973. doi: 10.1029/WR015i001p00023. (Cité p. 22)
- N. Feuillet. *Sismotectonique Des Petites Antilles : Liaison Entre Activité Sismique et Volcanique*. Thesis, Paris 7, 2000. (Cité p. 35, 36, 37, 39)

- N. Feuillet, I. Manighetti, P. Tapponnier, et E. Jacques. Arc parallel extension and localization of volcanic complexes in Guadeloupe, Lesser Antilles. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 107(B12) : ETG 3–1 – ETG 3–29, 2002. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2001JB000308. (Cité p. 35, 36, 38, 40, 42, 75, 76)
- B. Flemisch, M. Darcis, K. Erbertseder, B. Faigle, A. Lauser, K. Mosthaf, S. Müthing, P. Nuske, A. Tatomir, M. Wolff, et R. Helmig. DuMux : DUNE for multi-{phase,Component,Scale,Physics,...} flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 34(9) : 1102–1112, 2011. ISSN 0309-1708. doi: 10.1016/j.advwatres.2011.03.007. (Cité p. 28)
- T. Frank, A.-L. Tertois, et J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers & Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2006.11.014. (Cité p. 19)
- O. Gaede, F. Karpfinger, J. Jocker, et R. Prioul. Comparison between analytical and 3D finite element solutions for borehole stresses in anisotropic elastic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51 : 53–63, 2012. ISSN 1365-1609. doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.12.010. (Cité p. 62)
- D. Garner, D. Thenin, et C. V. Deutsch. *Closing the Gap : Advances in Applied Geomodeling for Hydrocarbon Reservoirs*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, 2013. ISBN 978-0-9869425-2-5. OCLC : 862958528. (Cité p. 3)
- D. Gaudin, A. Finizola, E. Delcher, F. Beauducel, P. Allemand, C. Delacourt, E. Brothelande, A. Peltier, et F. Di Gangi. Influence of rainfalls on heat and steam fluxes of fumarolic zones : Six months records along the Ty fault (Soufrière of Guadeloupe, Lesser Antilles). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302 : 273–285, 2015. ISSN 03770273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.06.015. (Cité p. 80)
- S. Geiger et S. Matthäi. What can we learn from high-resolution numerical simulations of single- and multi-phase fluid flow in fractured outcrop analogues? *Geological Society, London, Special Publications*, 374(1) : 125–144, 2014. ISSN 0305-8719, 2041-4927. doi: 10.1144/SP374.8. (Cité p. 108)
- S. Geiger, S. Roberts, S. K. Matthäi, C. Zoppou, et A. Burri. Combining finite element and finite volume methods for efficient multiphase flow simulations in highly heterogeneous and structurally complex geologic media. *Geofluids*, 4(4) : 284–299, 2004. ISSN 14688115, 14688123. doi: 10.1111/j.1468-8123.2004.00093.x. (Cité p. 23, 28)
- S. Geiger, T. Driesner, C. A. Heinrich, et S. K. Matthäi. Multiphase Thermohaline Convection in the Earth’s Crust : I. A New Finite Element – Finite Volume Solution Technique Combined With a New Equation of State for NaCl–H₂O. *Transport in Porous Media*, 63(3) : 399–434, 2006. ISSN 0169-3913, 1573-1634. doi: 10.1007/s11242-005-0108-z. (Cité p. 26)

- G. Godefroy. *Modélisation Cinématique et Stochastique Des Failles à Partir de Données Éparses Pour l'analyse Des Incertitudes Structurales*. Thesis, Université de Lorraine, 2018. (Cité p. 16, 21)
- I. Görz, M. Herbst, J. H. Börner, et B. Zehner. Workflow for the integration of a realistic 3D geomodel in process simulations using different cell types and advanced scientific visualization : Variations on a synthetic salt diapir. *Tectonophysics*, 699 : 42–60, 2017. ISSN 00401951. doi: 10.1016/j.tecto.2017.01.011. (Cité p. 3, 57)
- A. Guillen, P. Calcagno, G. Courrioux, A. Joly, et P. Ledru. Geological modelling from field data and geological knowledge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 (1-4) : 158–169, 2008. ISSN 00319201. doi: 10.1016/j.pepi.2008.06.014. (Cité p. 19)
- L. Guillou-Frottier. Compilation et analyse des données thermiques sur le champ géothermique de Bouillante. Premières interprétations pour le fonctionnement du champ géothermique de Bouillante. Technical Report BRGM/RP-52452-FR, BRGM, Orléans, France, 2003. (Cité p. 79, 83)
- M.-A. Gutscher, G. K. Westbrook, B. Marcaillou, D. Graindorge, A. Gailler, T. Pichot, et R. C. Maury. How wide is the seismogenic zone of the Lesser Antilles forearc? *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 184(1-2) : 47–59, 2013. ISSN 0037-9409. doi: 10.2113/gssgfbull.184.1-2.47. (Cité p. 34)
- D. O. Hayba et S. E. Ingebritsen. The computer model Hydrotherm, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1,200 degrees C. Technical Report 94-4045, U.S. Geological Survey ; USGS Earth Science Information Center, 1994. (Cité p. 28, 79)
- D. O. Hayba et S. E. Ingebritsen. Multiphase groundwater flow near cooling plutons. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 102(B6) : 12235–12252, 1997. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/97JB00552. (Cité p. 28, 74, 79, 80, 81, 84, 85)
- R. Hinkelmann. *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques for Modeling Hydro- and Environmental Systems*. Springer Science & Business Media, 2006. ISBN 978-3-540-32379-2. (Cité p. 2, 23)
- C. M. Hoffmann. *Geometric and Solid Modeling : An Introduction*. Morgan Kaufmann, 1989. ISBN 978-1-55860-067-6. (Cité p. 19)
- J. A. Howell, A. W. Martinius, et T. R. Good. The application of outcrop analogues in geological modelling : A review, present status and future outlook. *Geological Society, London, Special Publications*, 387(1) : 1–25, 2014. ISSN 0305-8719, 2041-4927. doi: 10.1144/SP387.12. (Cité p. 16, 18, 123)
- S. Hurwitz, K. L. Kipp, S. E. Ingebritsen, et M. E. Reid. Groundwater flow, heat transport, and water table position within volcanic edifices : Implications for volcanic

- processes in the Cascade Range. *Journal of Geophysical Research*, 108(B12), 2003. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/2003JB002565. (Cité p. 28, 74)
- S. E. Ingebritsen et W. E. Sanford. *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, NY, USA, 1998. ISBN 978-0-521-49608-7. (Cité p. 25, 28)
- S. E. Ingebritsen, S. Geiger, S. Hurwitz, et T. Driesner. Numerical simulation of magmatic hydrothermal systems. *Reviews of Geophysics*, 48(1) : RG1002, 2010. ISSN 8755-1209. doi: 10.1029/2009RG000287. (Cité p. 23, 24, 79)
- S. E. Ingebritsen, D. Bergfeld, L. E. Clor, et W. C. Evans. The Lassen hydrothermal system. *American Mineralogist*, 101(2) : 343–354, 2016. ISSN 0003-004X. doi: 10.2138/am-2016-5456. (Cité p. 4, 28, 31)
- INSA Lyon. Getfem, 2017. (Cité p. 63)
- Intrepid Geophysics. GeoModeller. <https://www.intrepid-geophysics.com/ig/index.php?page=geomodeller>, 2019. (Cité p. 20)
- C. Jacquemyn, M. D. Jackson, et G. J. Hampson. Surface-Based Geological Reservoir Modelling Using Grid-Free NURBS Curves and Surfaces. *Mathematical Geosciences*, 51(1) : 1–28, 2019. ISSN 1874-8953. doi: 10.1007/s11004-018-9764-8. (Cité p. 17)
- E. Jang, J. Boog, W. He, et T. Kalbacher. *OpenGeoSys Tutorial : Computational Hydrology III : OGS#IPhreeqc Coupled Reactive Transport Modeling*. SpringerBriefs in Earth System Sciences. Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-67152-9. (Cité p. 28, 57)
- P. Jaud et D. Lamethe. The Bouillante geothermal power-plant, Guadeloupe. *Geothermics*, 14(2) : 197–205, 1985. ISSN 0375-6505. doi: 10.1016/0375-6505(85)90061-6. (Cité p. 43, 73)
- K. L. Kipp, P. A. Hsieh, et S. R. Charlton. Guide to the revised ground-water flow and heat transport simulator : HYDROTHERM-Version 3. Techniques and Methods 6-A25, U.S. Geological Survey, 2008. (Cité p. 79)
- G. Kirsch. *Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*. Springer, 1898. (Cité p. 62)
- T. Koch, D. Gläser, K. Weishaupt, S. Ackermann, M. Beck, B. Becker, S. Burbulla, H. Class, E. Coltman, T. Fetzer, B. Flemisch, C. Grüniger, K. Heck, J. Hommel, T. Kurz, M. Lipp, F. Mohammadi, M. Schneider, G. Seitz, S. Scholz, et F. Weinhardt. DuMuX 3.0.0. Zenodo, 2018. (Cité p. 28)
- T. Kohl, D. Bächler, et L. Rybach. Steps towards a comprehensive thermo-hydrolic analysis of the HDR test site Soultz-sous-Forêts. Dans *World Geothermal Congress*, p. 6, 2000. (Cité p. 4)

- J. C. Komorowski, G. Boudon, M. Semet, F. Beauducel, C. Anténor-Habazac, S. Bazin, G. Hammouya, et J. L. Cheminée. Guadeloupe. Dans *Volcanic Atlas of the Lesser Antilles*, p. 65–102. University of the West Indies, Seismic Research Unit, Trinidad and IAVCEI, 2005. (Cité p. 76)
- P. Lachassagne, J. C. Marechal, et B. Sanjuan. Hydrogeological model of a high-energy geothermal field (Bouillante area, Guadeloupe, French West Indies). *Hydrogeology Journal*, 17(7) : 1589–1606, 2009. ISSN 1431-2174, 1435-0157. doi: 10.1007/s10040-009-0486-3. (Cité p. 46, 75, 76)
- P. Laplaige, H. Durimel, et J.-M. Mompelat. Développement de la géothermie dans la Caraïbe. *Geosciences*, (16) : 26–35, 2013. (Cité p. 73)
- L. Legendre. *Cinématique Des Déformations Fragiles Dans La Partie Nord de l'arc Des Petites Antilles*. Thèse de doctorat, Université des Antilles, 2018. (Cité p. 36, 38, 42, 46, 47, 75)
- Y. Legendre. *Reconstruction Fine de l'histoire Éruptive et Scénarii Éruptifs à La Soufrière de Guadeloupe : Vers Un Modèle Intégré de Fonctionnement Du Volcan*. Thèse de doctorat, Paris 7, 2012. (Cité p. 75)
- K. C. Lewis. *Numerical Modeling of Two-Phase Flow in the Sodium Chloride-Water System with Applications to Seafloor Hydrothermal Systems*. Georgia Institute of Technology, 2007. (Cité p. 28)
- K. C. Lewis et R. P. Lowell. Numerical modeling of two-phase flow in the NaCl-H₂O system : Introduction of a numerical method and benchmarking. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 114(B5), 2009. (Cité p. 28)
- J.-L. Mallet. Discrete smooth interpolation in geometric modelling. *Computer-Aided Design*, 24(4) : 178–191, 1992. ISSN 00104485. doi: 10.1016/0010-4485(92)90054-E. (Cité p. 19)
- J.-L. Mallet. *Elements of Mathematical Sedimentary Geology : The GeoChron Model*. EAGE Publications bv, Houten, 01 edition, 2014. ISBN 978-90-73834-81-1. (Cité p. 19)
- M. Manga, M. J. Hornbach, A. Le Friant, O. Ishizuka, N. Stroncik, T. Adachi, M. Al-jahdali, G. Boudon, C. Breitzkreuz, A. Fraass, A. Fujinawa, R. Hatfield, M. Jutzeler, K. Kataoka, S. Lafuerza, F. Maeno, M. Martinez-Colon, M. McCanta, S. Morgan, M. R. Palmer, T. Saito, A. Slagle, A. J. Stinton, K. S. V. Subramanyam, Y. Tamura, P. J. Talling, B. Villemant, D. Wall-Palmer, et F. Wang. Heat flow in the Lesser Antilles island arc and adjacent back arc Grenada basin : HEAT FLOW IN THE LESSER ANTILLES ARC. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(8) : n/a–n/a, 2012. ISSN 15252027. doi: 10.1029/2012GC004260. (Cité p. 81)

- M. Mäntylä. *An Introduction to Solid Modeling*. Computer Science Press, 1988. ISBN 978-0-7167-8015-1. (Cité p. 19)
- L. Mathieu. *The Structure of Guadeloupe, Maderas and Mt Cameroon Volcanoes and the Impact of Strike-Slip Movements*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II ; Trinity College Dublin, 2010. (Cité p. 36, 38, 41, 42, 43, 44)
- L. Mathieu, B. van Wyk de Vries, C. Mannessiez, N. Mazzoni, C. Savry, et V. R. Troll. The structure and morphology of the Basse Terre Island, Lesser Antilles volcanic arc. *Bulletin of Volcanology*, 75(3), 2013. ISSN 0258-8900, 1432-0819. doi: 10.1007/s00445-013-0700-y. (Cité p. 38)
- S. K. Matthäi. Complex Systems Platform, CSMP++, User's Guide, 2014. (Cité p. 28, 79)
- S. K. Matthäi, A. Mezentsev, et M. Belayneh. Control-Volume Finite-Element Two-Phase Flow Experiments with Fractured Rock Represented by Unstructured 3D Hybrid Meshes. 2005. doi: 10.2118/93341-MS. (Cité p. 28)
- S. K. Matthäi, S. Geiger, S. G. Roberts, A. Paluszny, M. Belayneh, A. Burri, A. Mezentsev, H. Lu, D. Coumou, T. Driesner, et C. A. Heinrich. Numerical simulation of multi-phase fluid flow in structurally complex reservoirs. *Geological Society, London, Special Publications*, 292(1) : 405–429, 2007. ISSN 0305-8719, 2041-4927. doi: 10.1144/SP292.22. (Cité p. 6, 28)
- S. K. Matthäi, A. A. Mezentsev, et M. Belayneh. Finite Element - Node-Centered Finite-Volume Two-Phase-Flow Experiments With Fractured Rock Represented by Unstructured Hybrid-Element Meshes. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 10(06) : 740–756, 2007. ISSN 1094-6470. doi: 10.2118/93341-PA. (Cité p. 23, 28, 79)
- A. Mazuyer. *Estimation de l'état de Contrainte Initial in Situ Dans Les Réservoirs Par Approche Inverse*. Thesis, Université de Lorraine, 2018. (Cité p. 62, 63, 64, 67)
- MFEM. MFEM library, 2017. (Cité p. 63)
- I. S. Moeck. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37 : 867–882, 2014. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.032. (Cité p. 46)
- T. N. Narasimhan et P. A. Witherspoon. An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media. *Water Resources Research*, 12(1) : 57–64, 1976. ISSN 00431397. doi: 10.1029/WR012i001p00057. (Cité p. 23)
- V. Navelot. *Caractérisations Structurale et Pétrophysique d'un Système Géothermique En Contexte Volcanique d'arc de Subduction Exemple de l'archipel de La Guadeloupe*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2018. (Cité p. 42, 46, 47, 76, 78)

- V. Navelot, Y. Géraud, A. Favier, M. Diraison, M. Corsini, J.-M. Lardeaux, C. Verati, J. Mercier de Lépinay, L. Legendre, et G. Beauchamps. Petrophysical properties of volcanic rocks and impacts of hydrothermal alteration in the Guadeloupe Archipelago (West Indies). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 360 : 1–21, 2018. ISSN 0377-0273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.07.004. (Cité p. 47, 81)
- A. Paluszny, S. K. Matthäi, et M. Hohmeyer. Hybrid finite element-finite volume discretization of complex geologic structures and a new simulation workflow demonstrated on fractured rocks. *Geofluids*, 7(2) : 186–208, 2007. ISSN 1468-8115, 1468-8123. doi: 10.1111/j.1468-8123.2007.00180.x. (Cité p. 24, 28, 79)
- J. W. Patterson, T. Driesner, S. Matthai, et R. Tomlinson. Heat and Fluid Transport Induced by Convective Fluid Circulation Within a Fracture or Fault. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 123(4) : 2658–2673, 2018. ISSN 21699313. doi: 10.1002/2017JB015363. (Cité p. 31, 79, 95, 126)
- J. Pellerin, B. Lévy, G. Caumon, et A. Botella. Automatic surface remeshing of 3D structural models at specified resolution : A method based on Voronoi diagrams. *Computers & Geosciences*, 62 : 103–116, 2014. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2013.09.008. (Cité p. 3)
- J. Pellerin, A. Botella, F. Bonneau, A. Mazuyer, B. Chauvin, B. Lévy, et G. Caumon. RINGMesh : A programming library for developing mesh-based geomodeling applications. *Computers & Geosciences*, 2017. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2017.03.005. (Cité p. 6, 19, 20, 30, 57, 59)
- M. Perrin et J.-F. Rainaud, editors. *Shared Earth Modeling : Knowledge Driven Solutions for Building and Managing Subsurface 3D Geological Models*. IFP Energies Nouvelles Publications. Éd. Technip, Paris, 2013. ISBN 978-2-7108-1002-5. OCLC : 929919528. (Cité p. 1, 14, 17)
- K. Pruess. Numerical simulation of ‘multiphase tracer transport in fractured geothermal reservoirs. *Geothermics*, 31(4) : 475–499, 2002. ISSN 03756505. doi: 10.1016/S0375-6505(02)00007-X. (Cité p. 28)
- M. A. Puso et J. Solberg. A stabilized nodally integrated tetrahedral. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67(6) : 841–867, 2006. ISSN 0029-5981, 1097-0207. doi: 10.1002/nme.1651. (Cité p. 22)
- M. Raguenel, F. Bonneau, et T. Driesner. Sensitivity Analysis on the Modeling of Flows and Heat Transfers in the Geothermal Field of Basse-Terre, Guadeloupe. Dans *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 2017. doi: 10.3997/2214-4609.201701124. (Cité p. 80, 81)
- J. W. Reeder. Formation of geothermal resources at lithospheric subduction zones. *International Journal of Energy Research*, 9(3) : 229–239, 1985. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.4440090305. (Cité p. 43)

- J. Renaudeau, E. Malvesin, F. Maerten, et G. Caumon. Implicit Structural Modeling by Minimization of the Bending Energy with Moving Least Squares Functions. *Mathematical Geosciences*, 2019. ISSN 1874-8961, 1874-8953. doi: 10.1007/s11004-019-09789-6. (Cité p. 19, 21)
- A. G. Requicha. Representations for Rigid Solids : Theory, Methods, and Systems. *ACM Computing Surveys*, 12(4) : 437–464, 1980. ISSN 03600300. doi: 10.1145/356827.356833. (Cité p. 19)
- J. Ricci, X. Quidelleur, C. Pallares, et P. Lahitte. High-resolution K-Ar dating of a complex magmatic system : The example of Basse-Terre Island (French West Indies). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 345 : 142–160, 2017. ISSN 0377-0273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.07.013. (Cité p. 42, 43, 75)
- P. Ringrose et M. Bentley. *Reservoir Model Design : A Practitioner’s Guide*. Springer Netherlands, 2015. ISBN 978-94-007-5496-6. (Cité p. 3, 14, 108)
- J. Ruiiu, G. Caumon, et S. Viseur. Modeling Channel Forms and Related Sedimentary Objects Using a Boundary Representation Based on Non-uniform Rational B-Splines. *Mathematical Geosciences*, 48(3) : 259–284, 2016. ISSN 1874-8961, 1874-8953. doi: 10.1007/s11004-015-9629-3. (Cité p. 17)
- A. Samper. *Etude géochronologique, aspects géomorphologiques et géochimiques du volcanisme de l’île de Basse Terre (Guadeloupe), et datation des structures d’effondrement de flanc majeures de l’Arc des Petites Antilles*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2007. (Cité p. 41, 75)
- Schlumberger. VBM Algorithm Defines Complex Structures. p. 2, 2015. (Cité p. 20)
- Schlumberger. ECLIPSE Industry Reference Reservoir Simulator, 2019a. (Cité p. 28)
- Schlumberger. Petrel E&P Software Platform. <http://www.software.slb.com/products/petrel>, 2019b. (Cité p. 20)
- S. Scott, T. Driesner, et P. Weis. Geologic controls on supercritical geothermal resources above magmatic intrusions. *Nature Communications*, 6(7837), 2015. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/ncomms8837. (Cité p. 4, 28)
- S. Scott, T. Driesner, et P. Weis. The thermal structure and temporal evolution of high-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 62 : 33–47, 2016. ISSN 03756505. doi: 10.1016/j.geothermics.2016.02.004. (Cité p. 4, 28, 31, 74)
- Seequent. Leapfrog. <http://www.leapfrog3d.com/>, 2019. (Cité p. 20)
- K. Stüben. A review of algebraic multigrid. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 128(1-2) : 281–309, 2001. ISSN 03770427. doi: 10.1016/S0377-0427(00)00516-1. (Cité p. 62)

- Teranov. Rapport de synthèse des études géologiques. Technical report, 2017. (Cité p. 80)
- Teranov. Rapport d'interprétation des résultats de modélisation magnétotellurique et gravimétrique, exploration géothermique du PER de Vieux-Habitants, Guadeloupe. Technical Report v.3, 2018. (Cité p. 48, 73, 76, 77, 78)
- B. Villemant, J. Komorowski, C. Dessert, A. Michel, O. Crispi, G. Hammouya, F. Beauducel, et J. De Chabalier. Evidence for a new shallow magma intrusion at La Soufrière of Guadeloupe (Lesser Antilles). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285 : 247–277, 2014. ISSN 03770273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.002. (Cité p. 43)
- P. Weis, T. Driesner, D. Coumou, et S. Geiger. Hydrothermal, multiphase convection of H₂O-NaCl fluids from ambient to magmatic temperatures : A new numerical scheme and benchmarks for code comparison. *Geofluids*, 14(3) : 347–371, 2014. ISSN 14688115. doi: 10.1111/gfl.12080. (Cité p. 4, 26, 28, 79, 80, 107)
- F. Wellmann et G. Caumon. 3-D Structural geological models : Concepts, methods, and uncertainties. Dans *Advances in Geophysics*, vol. 59, p. 1–121. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-815208-9. doi: 10.1016/bs.agph.2018.09.001. (Cité p. 57, 108)
- S. Yamakawa, I. Gentilini, et K. Shimada. Subdivision templates for converting a non-conformal hex-dominant mesh to a conformal hex-dominant mesh without pyramid elements. *Engineering with Computers*, 27(1) : 51–65, 2011. ISSN 0177-0667, 1435-5663. doi: 10.1007/s00366-010-0178-6. (Cité p. 22)
- A. Yapparova, S. Matthäi, et T. Driesner. Realistic simulation of an aquifer thermal energy storage : Effects of injection temperature, well placement and groundwater flow. *Energy*, 76 : 1011–1018, 2014. ISSN 0360-5442. doi: 10.1016/j.energy.2014.09.018. (Cité p. 26, 31, 79)
- B. Zehner, J. H. Börner, I. Görz, et K. Spitzer. Workflows for generating tetrahedral meshes for finite element simulations on complex geological structures. *Computers & Geosciences*, 79 : 105–117, 2015. ISSN 0098-3004. doi: 10.1016/j.cageo.2015.02.009. (Cité p. 19, 57)
- O. C. Zienkiewicz et R. L. Taylor. *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, Oxford ; Boston, 5th ed edition, 2000. ISBN 978-0-7506-5049-6 978-0-7506-5055-7 978-0-7506-5050-2. (Cité p. 2, 23, 57)
- J. Zlotnicki, G. Boudon, et J.-L. Le Mouél. The volcanic activity of La Soufrière of Guadeloupe (lesser antilles) : Structural and tectonic implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49(1-2) : 91–104, 1992. ISSN 03770273. doi: 10.1016/0377-0273(92)90006-Y. (Cité p. 41, 75)

- G. A. Zyvoloski, B. A. Robinson, Z. V. Dash, et L. L. Trease. Summary of the models and methods for the FEHM application-a finite-element heat-and mass-transfer code. Technical report, Los Alamos National Lab., NM (US), 1997. (Cité p. 28)

Modélisation des phénomènes thermo-hydrauliques dans des réservoirs fracturés sur des maillages non structurés : application au réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe.

Résumé : La quantification des ressources géologiques naturelles (huile, gaz, eau, dépôts minéraux, énergie géothermique, etc) nécessite une compréhension et une description précises des hétérogénéités géologiques et des processus physico-chimiques qui contrôlent leur formation, leur mise en place, leur préservation et leur récupération. Pour caractériser le comportement physique des réservoirs, des modèles géologiques en 2D, 3D et 4D servent de base aux simulations numériques. Un modèle numérique requiert l'intégration et l'homogénéisation de nombreuses données obtenues à différentes échelles. Cela exige hypothèses, choix et simplifications pour représenter la complexité des objets géologiques et des processus physiques avec un nombre limité de paramètres. Dans le cas des études de réservoirs géothermiques haute température, il faut faire face à la complexité géométrique et structurale liée aux environnements volcaniques et à la résolution de processus physiques couplés. Cela demande l'utilisation de recherches effectuées dans différents domaines, avec différents outils. L'interopérabilité entre ces outils théoriques et numériques est un défi. Ces travaux de thèse proposent de pallier ce problème en réalisant des modèles géologiques dont la complexité est préservée à l'aide de maillages non structurés et d'outils permettant de réaliser des simulations de processus physiques couplés réalistes.

Des stratégies de conservation de l'intégrité d'un modèle structural sont proposées, respectant les données et l'organisation des structures géologiques. Différents outils ont été élaborés pour identifier et préserver ces structures jouant un rôle particulier dans les processus physiques, comme les couches, les failles ou les frontières d'un modèle. Une représentation numérique adaptée à la géologie (permise par la librairie RINGMesh utilisant les concepts géologiques dans la description du modèle numérique) préserve ces différents éléments depuis le géomodeleur (SKUA-GocadTM) jusqu'aux simulations physiques (CSMP++). Les outils créés sont inclus dans une chaîne intégrative, allant de la modélisation géo-

logique aux simulations physiques, i.e. de la caractérisation de la géométrie des structures vers la quantification des ressources.

Les méthodologies développées sont d'abord validées grâce à des solutions analytiques et appliquées sur des cas synthétiques. Elles sont ensuite utilisées pour comprendre l'évolution des processus thermo-hydrauliques dans le réservoir géothermique de Basse-Terre, Guadeloupe (cadre du programme GEOTREF). Une première étude menée en 2D compare le réalisme physique de différents scénarios géologiques possibles selon les données de terrain (profils de température et campagne magnétotellurique). Cette étude reproduit les profils de température observés pour deux scénarios étudiés, et semble exclure l'hypothèse de transferts latéraux de chaleur à l'échelle de l'île.

Une seconde étude réalisée en 3D, avec une complexification progressive du modèle géologique, quantifie l'impact des structures sur le comportement physique du réservoir. Il apparaît que le comportement thermique du modèle réalisé est principalement influencé par la topographie de la zone, malgré l'ajout d'hétérogénéités plus perméables telles des corridors de failles. Cependant, des hétérogénéités imperméables comme les surfaces de glissements n'ont pas été incluses, et des incertitudes majeures concernant la position, la taille et la forme de la source de chaleur pourraient être étudiées.

Ces travaux de thèse ont ainsi permis (1) de mettre en place un environnement numérique propice pour tester l'impact des hétérogénéités géologiques sur le comportement physique des réservoirs, (2) d'ouvrir la voie vers une meilleure compréhension et caractérisation du comportement hydraulique et thermique d'un réservoir géothermique, et particulièrement vers la quantification de l'influence de la géométrie et de la connectivité des hétérogénéités sur les processus physiques.

Mots-clés : modélisation numérique 3D, géologie intégrative, simulations numériques, géothermie, maillages non structurés, Basse-Terre, Guadeloupe

Modeling of thermo-hydraulic processes in fractured reservoirs on unstructured grids : application to the geothermal reservoir of Basse-Terre, Guadeloupe.

Abstract : The quantification of natural geological resources (oil, gas, water, ore deposits, geothermal energy, etc) calls for a precise understanding and description of the geological heterogeneities and physical and chemical processes that influence their formation, their settings, their preservation and their recovery. In order to understand the physical behavior of subsurface reservoirs, 2D, 3D and 4D geological models must be developed as basis for numerical simulations. A numerical model needs the integration and homogenization of various and multi-scale data. This implies hypothesis, choices and simplifications to represent the complexity of geological objects and physical processes with a limited number of parameters. In the case of high temperature geothermal studies, one must face both the geometric and structural complexity of volcanic environments and the resolution of coupled physical processes. This calls for the use of several developments made in different research domains, with different tools. However, interoperability between all these theoretical and numerical tools remains a challenge. This work tackles this issue by preserving the geometrical complexity of geological models thanks to unstructured grids and tools which allows realistic physical simulations.

New strategies are proposed to preserve the geological characteristics of the model, by honoring field data and the organization of geological structures during physical simulations. Several tools have been developed to identify and represent these structures that play a fundamental role in physical processes, such as layers, faults or model boundaries. An adapted numerical representation (allowed by the RINGMesh library which focuses on using geological concepts in the model description) preserves these elements from the geomodeler (SKUA-GocadTM) to the physical simulator (CSMP++). These tools are part of an integrated workflow, going from geological modeling to physical simulations, i.e. from

geometrical characterization of the main geological structures to the quantification of reservoir resources.

The developed methodologies are first benchmarked with analytical solutions and applied on synthetic cases. They have then been used in a case study to understand the evolution of thermo-hydraulic processes in the geothermal reservoir of Basse-Terre, Guadeloupe (in the frame of the GEOTREF project). A first study has been led in 2D to assess the physical realism of three possible geological scenarios designed in regard of the available field data, such as temperature profiles and MT survey. This study reproduces the observed temperature profiles in two of the studied scenarios and seems to exclude the hypothesis of strong lateral heat transfers at the island scale.

A second study has then been realized in 3D, using a progressive model complexification approach to test the impact of heterogeneities on the global physical behavior of the reservoir. It appears that the thermal behavior of the designed model is mainly influenced by the topography of the area, rather than the introduction of permeable heterogeneities, such as fault corridors. However, impermeable features such as sliding surfaces have not been added and a major uncertainty about the heat source position, shape and size remains and could be further studied.

These works have allowed (1) to build of a numerical environment that facilitates the tests regarding the impact of geological heterogeneities on the physical behavior of reservoirs, (2) to open the path toward a better understanding and characterization of the thermo-hydraulic behavior of a geothermal reservoir, and especially toward the quantification of the influence of the geometry and connectivity of heterogeneities on physical processes.

Keywords : 3D numerical modeling, integrative geology, numerical simulations, geothermal energy, unstructured grids, Basse-Terre, Guadeloupe