

Modélisation des caractéristiques hydrogéologiques liées à une exploitation géothermique d'anciennes mines

Auteur : Vopat, Olivier

Promoteur(s) : Dassargues, Alain

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité approfondie

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/2580>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Modélisation des caractéristiques hydrogéologiques liées à une exploitation géothermique d'anciennes mines

Olivier Vopat

Année académique 2016-2017

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master
Ingénieur Civil des Mines et Géologue

Promoteur : Pr. Alain Dassargues

Travail de fin d'études

Modélisation des caractéristiques hydrogéologiques liées à une
exploitation géothermique d'anciennes mines

Olivier Vopat
Étudiant ingénieur civil des mines et géologue

8 juin 2017

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le concours de nombreuses personnes. Je tiens à particulièrement remercier :

M. le professeur Alain Dassargues, pour m'avoir proposé ce sujet qui vise à donner une seconde vie aux mines où ont travaillé mes ancêtres, tout en proposant une évolution durable de notre consommation. Merci également pour les nombreux commentaires et corrections ;

M. Serge Brouyère, pour le temps consacré aux modélisations à l'aide de SUFT3D et pour toutes les réponses aux questions que j'ai pu me poser à leurs propos ;

M. Philippe Orban, pour m'avoir permis de partager son bureau, guidé et aidé dans la réalisation des modélisations et de ce travail ;

Mme Virginie Harcouët-Menou et le VITO, pour l'accueil à Genk et les modélisations réalisées avec la version expérimentale d'EPANET ;

M. Christophe Fripiat et l'ISSEP, pour leurs recherches à propos de la mine de Wérister ;

MM. Herman Eijdens et René Verhoeven, pour m'avoir accueilli à Heerlen, pour les explications et les discussions à propos du projet Minewater ;

MM. Geoffrey Poulain et Vincent Vandenheede, pour avoir ouvert les réflexions qui ont mené à ce travail lors de mon stage.

Table des matières

Introduction	1
1 La géothermie et le milieu minier	3
1.1 Notions de géothermie	3
1.2 Contexte du projet Minewater	5
1.3 Qu'est-ce que le projet Minewater ?	6
1.3.1 Minewater 1.0	7
1.3.2 Minewater 2.0	9
1.3.3 Minewater 3.0	10
1.4 Recherches et modélisations nécessaires au projet	11
1.5 Proposition de méthodologie pour l'analyse de faisabilité de l'exploitation géo- thermique d'un système minier	12
1.5.1 Pré-étude et premiers critères de faisabilité	13
1.5.2 Phase de documentation préalable aux modélisations	13
1.5.3 Phase de modélisation	14
1.5.4 Phase d'analyse de la technique et de la rentabilité	15
1.5.5 Schéma euristique	17
2 Équations d'écoulement et de transfert de chaleur	19
2.1 Approches de modélisations utilisées par SUFT3D	20
2.1.1 Approche « Box model »	20
2.1.2 Approche classique en milieu poreux	21
2.1.3 Approche mixte	21
2.2 Équations d'écoulement utilisées par SUFT3D	21
2.2.1 Réservoir linéaire simple	22
2.2.2 Réservoir linéaire distribué	22
2.2.3 Écoulement en milieu poreux (méthode classique)	22
2.2.4 Conditions d'échange d'eau entre les sous-domaines et conditions aux limites	23
2.2.4.1 Conditions de Dirichlet	23
2.2.4.2 Conditions de Neumann	24
2.2.4.3 Conditions de Cauchy	24
2.2.4.4 Conditions de Fourier	25

2.3	Équations de transport de soluté et de transfert de chaleur	25
2.3.1	Advection	25
2.3.2	Diffusion et dispersion	26
2.3.2.1	Diffusion moléculaire	26
2.3.2.2	Dispersion mécanique	27
2.3.3	Effets de retard (transport de soluté)	28
2.3.4	Effets d'eau immobile	29
2.3.5	Dégradation (des solutés)	29
2.3.6	Conduction (thermique)	30
2.3.7	Convection naturelle (thermique)	32
2.3.8	Comparaison des équations de transport de chaleur et de soluté	33
2.3.8.1	Terme d'accumulation (sorption / désorption et équilibre thermique)	34
2.3.8.2	Terme diffusif (Diffusion, dispersion et conduction)	35
2.3.8.3	Advection et terme de source	35
2.3.8.4	Dégradation	35
2.3.9	Conditions aux limites	35
2.3.10	Type de réservoir et transport de chaleur / de soluté	36
2.4	Implémentation des équations dans SUFT3D	36
2.4.1	Équation d'écoulement	36
2.4.2	Équation de transport	39
2.5	Équations d'écoulement résolues avec EPANET	41
2.5.1	Éléments utilisables dans EPANET	41
2.5.1.1	Nœuds	41
2.5.1.2	Tuyaux	42
2.6	Équations de transport résolues dans EPANET	43
2.6.1	Advection	43
2.6.2	Mélange	44
2.6.3	Réactions	44
2.6.3.1	Réaction au sein de fluide	44
2.6.3.2	Réaction sur la paroi	44
2.6.4	Logiciel modifié par le VITO	45
3	Modélisations à l'aide des logiciels EPANET et SUFT3D	46
3.1	Modèle conceptuel	46
3.1.1	Géométrie	47
3.1.2	Débits	48
3.2	MODÈLE EPANET	49
3.2.1	Trois galeries sans conduction	49
3.2.2	Trois galeries avec conduction	52
3.2.3	Galeries avec failles	55
3.2.4	Conclusion sur les expériences réalisées avec EPANET	56

3.3	Validation du code de SUFT3D	58
3.3.1	Maillage test « 5*5*4 »	58
3.3.1.1	Réservoir linéaire	60
3.3.1.2	Éléments finis en écoulement et mixing cells en transport . .	61
3.3.2	Maillage en colonne de 6 cellules « Col6cells »	62
3.3.2.1	Écoulement	62
3.3.2.2	Transport au travers de la colonne	65
3.3.3	Conclusion	70
3.4	Modèles miniers plus élaborés résolus avec SUFT3D	71
3.4.1	Maillage grossier à une galerie « Mine 7 »	71
3.4.1.1	Transport par advection seule	73
3.4.1.2	Transport faisant intervenir la diffusion/conduction et dispersion	76
3.4.2	Maillage d'une galerie réaliste « Mine 3 »	77
3.4.2.1	Modèle	77
3.4.2.2	Résultats	79
3.4.3	Maillage trois galeries « Mine 8 »	82
3.4.3.1	Résultats des modélisations	83
3.4.3.2	Discussion	88
3.5	Comparaison entre les résultats	92
	Conclusion	95
	A Résultats des modélisations du maillage Mine 8	103

Table des figures

1.1	Circuits fermé (gauche) ou ouvert (droite) dans l'exploitation d'un système géothermique [Geotrainet 2011]	5
1.2	Fonctionnement de Minewater 1.0 [Verhoeven 2014]	8
1.3	Minewater 1.0, avec les puits d'extraction chaud et froid et l'injection [Verhoeven 2014]	9
1.4	Fonctionnement de minewater 2.0 (modifié d'après [Verhoeven et al. 2014]) . .	10
2.1	Mobilité de l'eau et effets sur le transport de soluté, d'après Hallet 1999 in [Brouyère 2001]	30
2.2	Coefficients utilisés par EPANET [Rossman 2000]	43
3.1	Modèle conceptuel général des modélisations	46
3.2	Modèle de maison type réalisé avec SketchUp	48
3.3	Modèle EPANET avec trois galeries sans conduction, état initial	50
3.4	Modèle EPANET avec trois galeries sans conduction, état du système après 500 heures	51
3.5	Évolution de la température au point de pompage	52
3.6	Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction, situation initiale	53
3.7	Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction, état du système après 500 heures	54
3.8	Évolution de la température au point de pompage	55
3.9	Évolution de la température au point de pompage	56
3.10	Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction après 2000 heures	57
3.11	Maillage 5*5*4	59
3.12	Comparaison des solutions analytiques et modélisées avec SUFT3D (cas 1 et 2)	61
3.13	Hauteur piézométrique calculée avec la résolution « éléments finis à V. C. » . .	63
3.14	Distribution de la concentration résolue par la méthode des éléments finis avec mixing cell	64
3.15	Modèle col6cells	65
3.16	Représentation du schéma du transport de soluté	67
3.17	Comparaison entre les concentrations théoriques et modélisées aux points 1, 3, 5 et 7. Maillage composé d'un seul sous-domaine.	67
3.18	Comparaison entre les concentrations théoriques et modélisées le long de la colonne. Maillage composé de deux sous-domaines	69

3.19	Sous-domaine réservoir linéaire (points 1 et 3) puis sous-domaine « éléments finis » avec une concentration décroissante (points 17 à 20)	70
3.20	Positionnement et concentration de l'élément « puits » dans le modèle col6cell	71
3.21	Modèle Mine 7, avec les hauteurs piézométriques (représentées par les couleurs)	72
3.22	Hauteur piézométrique et écoulement suivant une coupe le long de la galerie .	74
3.23	Évolution de la température en cas d'advection seule	75
3.24	État stabilisé de la concentration dans les puits, galerie et massif (modèle mine 7)	75
3.25	Évolution de la température au pied de la colonne d'injection, au sein de la galerie et à l'entrée de l'élément puits	76
3.26	Modèle Mine 7 avec advection, dispersion et diffusion / conduction	77
3.27	Modèle du maillage Mine 3, vues de biais et en plan	78
3.28	Température dans le modèle mine 3 après stabilisation	80
3.29	Évolution de la température au sein de la galerie du modèle Mine 3 (court terme)	81
3.30	Distribution de la température après 26 560 h	81
3.31	Evolution de la température sur le long terme	82
3.32	Oscillations et artéfacts autour du puits d'injection	83
3.33	Présentation du maillage Mine 8	84
3.34	Évolution de la température à l'élément de pompage dans le modèle Mine 8 pour différents contrastes de conductivité	86
3.35	Hauteur piézométrique (échelle partielle) sur le maillage pour un contraste de conductivité de 10^2	87
3.36	Évolution des températures au sein des différentes galeries en fonction du temps et du contraste de conductivité	89
3.37	Évolution des températures en fonction du temps à différents endroits du maillage, pour un contraste de conductivités de 10^4	90
3.38	Comparaison entre les panaches d'injection pour un contraste de $10^{2,5}$, à g. après 800 j et un débit $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{h}$, à d. après 200 j et un débit $Q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$	91
A.1	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^4	104
A.2	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^4	105
A.3	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{3,5}$	106
A.4	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{3,5}$	107
A.5	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^3	108
A.6	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^3	109

A.7	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{2,5}$	110
A.8	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{2,5}$	111
A.9	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^2	112
A.10	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^2	113
A.11	Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{1,5}$	114
A.12	Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{1,5}$	115

Introduction

L'énergie est une nécessité à toute vie, qu'elle soit acquise en digérant d'autres êtres vivants, en utilisant des rayons solaires ou en dégradant des composés chimiques présents dans l'environnement. L'espèce humaine, en plus de la nourriture, s'est distinguée par sa maîtrise du feu. Grâce à lui, elle a pu s'installer sur l'ensemble du globe, y compris dans des régions où le climat n'était pas favorable à sa constitution. Pendant des millénaires, l'alimentation énergétique a donc été une condition essentielle de survie, autant sur le plan alimentaire que pour entretenir le foyer. Le bois initialement utilisé pour se chauffer et cuire les repas a été remplacé progressivement par le charbon, le pétrole, le gaz, ou encore l'électricité, produite principalement par des énergies fossiles. Cependant, les choses changent : l'environnement est de plus en plus influencé par les activités humaines, en croissance constante, et en particulier par les déchets et rejets issus de l'industrie de l'énergie.

Pour faire face aux défis des pollutions et du réchauffement climatique, le XXI^e siècle sera vraisemblablement témoin d'un changement important dans le secteur énergétique. Aujourd'hui, plus encore que durant les siècles précédents, trouver de nouvelles sources d'énergie pour satisfaire à nos besoins est le défi technique que nos sociétés doivent relever. De plus, il n'est plus tolérable d'exploiter à long terme des sources d'énergie qui hypothéqueraient la vie de nos enfants et petits-enfants. L'énergie de demain doit être renouvelable, autant que possible, alliant la durabilité dans le temps, le respect de l'environnement et des autres êtres vivants. Un beau problème pour les ingénieurs à qui incombe la responsabilité d'y trouver des solutions.

De nombreux phénomènes peuvent aujourd'hui être utilisés pour produire de l'énergie de manière renouvelable, sous forme électrique ou thermique : le rayonnement solaire, le cycle de l'eau, la biomasse, les courants maritimes ou les vents. La Terre regorge également d'énergie : le flux géothermique émis par la Terre est estimé à 42 TW [UVED 2011], ce qui équivaut à environ $1,325 \cdot 10^{21}$ J par an. En comparaison, en 2012, la consommation d'énergie primaire atteignait $559,7 \cdot 10^{18}$ J [CDE 2017b], même si seule une faible partie de l'énergie géothermique est réellement exploitable. L'énergie géothermique présente de plus l'avantage d'être une ressource disponible de manière constante, contrairement à l'énergie éolienne ou solaire. Enfin, outre le flux géothermique, le sol et le sous-sol peuvent être utilisés comme d'immenses réservoirs d'énergie thermique : ceci est particulièrement utile pour des pays dont l'année se répartit entre une saison estivale, où les habitations et les activités génèrent un surplus de chaleur, et l'hiver où la demande en énergie est importante.

L'énergie géothermique est captée par des fluides circulant dans le sous-sol. Lorsque les caractéristiques géologiques le permettent, l'eau des nappes souterraines peut ainsi servir de fluide caloporteur. Dans d'autres conditions, il faut installer des conduites où circulent ce fluide.

En région liégeoise, la présence d'anciennes mines, aujourd'hui inondées, pourraient remplacer avantageusement ces conduites, ou encore servir de drains pour capter l'eau chaude présente dans le massif encaissant. Une application concrète de cette idée a été réalisée dans la ville de Heerlen, aux Pays-Bas, à laquelle est consacrée la première partie de ce travail de fin d'études. Par la suite, nous nous intéresserons au transfert de chaleur au sein d'un milieu poreux saturé, en établissant un parallèle entre le transfert de chaleur et le transport de soluté dans les nappes aquifères. Ceci, dans la seconde partie de ce travail, nous donnera des outils pour modéliser ce phénomène. Deux approches seront développées : une modélisation de type « éléments finis » (faisant intervenir des volumes de contrôles pour garantir la conservation de la masse ou de l'énergie), et une modélisation simulant un écoulement en conduites. La troisième partie du présent document sera consacrée aux résultats des modélisations effectuées, basées sur un schéma simplifié de mine. Nous comparerons l'évolution de la température, d'une part pour un écoulement en conduite, faisant intervenir ou non le phénomène de conduction et des sources d'eau chaude au sein de la mine, et d'autre part les modélisations basées sur la méthode des éléments finis, donnant un rôle plus complet au massif en tant que réservoir de chaleur. Nous nous intéresserons particulièrement au transport de chaleur pour différents contrastes de conductivité entre les puits (souvent remblayés) et le massif.

Chapitre 1

La géothermie et le milieu minier

1.1 Notions de géothermie

La géothermie est une source d'énergie qui consiste à exploiter la chaleur de la Terre. En Belgique, la température du sol est d'environ 10°C et elle augmente avec la profondeur, avec un gradient proche de 3°C par 100 m [VITO Team geo 2012]. Cette énergie est le résultat de trois processus :

- le refroidissement progressif de la Terre depuis sa formation. La Terre contient en effet une quantité de chaleur importante liée à son histoire géologique. Elle a été acquise par le frottement des particules lors de l'effondrement du nuage planétaire qui a formé la Terre, par le tri gravitationnel qui a entraîné les éléments les plus denses vers le noyau terrestre, enfin par la cristallisation du noyau [Letellier 2017]. Selon les modèles actuels, la différence de température entre le noyau et la croûte est d'ailleurs la source de mouvements de convections provoquant la migration des plaques tectoniques ainsi que les remontées de magma associées aux points chauds.
- la chaleur liée au frottement. Les plaques tectoniques se déplacent et leur frottement provoque une production de chaleur au sein même de la croûte, qui explique par exemple des phénomènes hydrothermaux [VITO Team geo 2012].
- la dégradation d'éléments radioactifs, processus dominant. La croûte terrestre et le manteau sont riches en éléments radioactifs, tels que l'uranium, le thorium et le potassium 40 qui produisent de la chaleur en se désintégrant [VITO Team geo 2012, Letellier 2017].

L'exploitation de cette énergie peut se faire de manière durable. Elle présente de plus l'avantage d'être disponible partout, bien que la température du sous-sol puisse varier. Ainsi, dans les zones volcaniques, il s'avère souvent possible d'exploiter des eaux dont la température dépasse 100°C. En Belgique, au contraire, une température comprise entre 20 et 30°C s'atteint aisément à moins de 500 m de profondeur (sauf exception) [Vandenberghe 1989]. Suivant les températures et les applications possibles, les gisements géothermiques peuvent être classés en quatre catégories :

Géothermie très basse énergie. Lorsque la température de la roche d'où on souhaite extraire de l'énergie est inférieure à 30 °C (ce qui est le cas en Belgique pour une

profondeur inférieure à 500 m), on parle de géothermie très basse énergie. L'utilisation de la chaleur peut servir à alimenter un système de chauffage, mais il faudra utiliser une pompe à chaleur car la température est insuffisante pour l'utilisation directe dans le système de chauffage. Cette utilisation de la géothermie est déjà très fréquente en Wallonie, notamment pour le chauffage et le rafraîchissement de bâtiments particuliers [DGO4 2017a].

Géothermie basse énergie. Dans ce cas, la température de la roche encaissante est comprise entre 30 et 90°C. Elle est suffisante pour une utilisation directe pour le chauffage, utilisant éventuellement un échangeur de chaleur. En Wallonie, ces températures correspondent à une profondeur de 1000 à 3000 m [DGO4 2017a].

Géothermie moyenne énergie. Ce terme correspond à l'exploitation d'un gisement dont la température est comprise entre 90 et 150°C. Cette température permet la production d'électricité, avec ou sans utilisation de la chaleur résiduelle. En Wallonie, une telle température pourrait être atteinte par des forages de près de 5000 m [DGO4 2017a].

Géothermie haute énergie. Lorsque la température est supérieure à 150°C, l'eau peut remonter sous forme de vapeur ou d'un fluide biphasique, utilisable pour la production électrique avec ou sans utilisation de la chaleur. Les moyens actuels ne permettent pas de telles exploitations en Belgique [DGO4 2017a]. Cependant, elles sont typiquement développées en Islande ou en Toscane [CDE 2017a].

La région Wallonne s'est intéressée depuis plusieurs années au potentiel géothermique profond, permettant d'exploiter la géothermie basse énergie à Saint-Ghislain [DGO4 2011].

Dans la région liégeoise, Chaudfontaine est connue pour sa source hydrothermale. A faible et moyenne profondeur, les aquifères des formations calcaires du Dévonien et Dinantien situés à l'Est du Sart Tilman sont considérées comme des zones prioritaires d'exploitation, de même que les formations calcaires situées sous la faille Eifelienne. Pour la grande profondeur (plus de 3000 m), la région liégeoise reste intéressante par sa sismicité active, productrice de chaleur [Petitclerc et Vanbrabant 2011a, Petitclerc et Vanbrabant 2011b].

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à l'exploitation de la géothermie par le biais des anciennes galeries minières qui jalonnent la région liégeoise. Leur profondeur dépasse rarement les 1000 m, il s'agit donc d'exploiter la géothermie très basse énergie. D'ordinaire, deux méthodes d'exploitation géothermique peuvent être mises en œuvres : les circuits ouverts ou fermés. Le circuit ouvert consiste généralement en un couple de puits, l'un servant au pompage et l'autre à l'injection. L'eau pompée est refroidie ou réchauffée au besoin par une pompe à chaleur liée au système de chauffage et de climatisation. Le circuit fermé quant à lui est utilisé pour de plus petites installations ou lorsque la nappe aquifère ne dispose pas des propriétés adéquates : le fluide caloporteur circule dans un tuyau placé artificiellement dans le sol ou des forages. La figure 1.1 illustre ces deux approches.

Les galeries et les puits devraient être autant de tuyaux et de drains, facilitant l'écoulement au sein de l'aquifère traversé, tout en étant des lieux où la circulation de l'eau est préférentielle. Nous ne sommes ni dans un système véritablement fermé, vu que l'eau des galeries est en

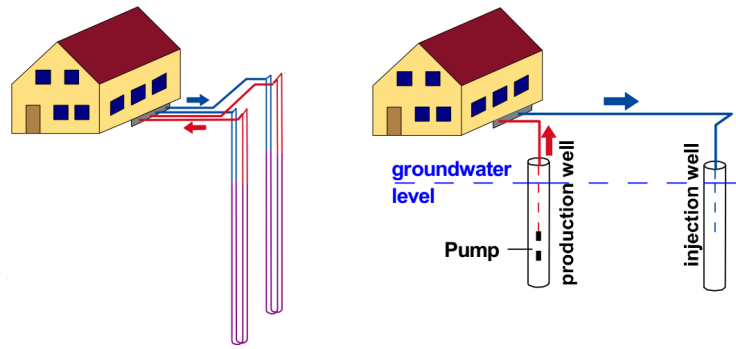


FIGURE 1.1 – Circuits fermé (gauche) ou ouvert (droite) dans l’exploitation d’un système géothermique [Geotrainet 2011]

contact avec celle de la nappe, ni complètement dans la dynamique habituelle d’un système ouvert.

Aux Pays-Bas, un tel projet a déjà été mis en œuvre à Heerlen. Quels ont été les enjeux lors de la construction, les difficultés rencontrées, et pour quel résultat ? Autant de questions auxquelles nous essayons d’apporter des réponses dans les sections suivantes.

1.2 Contexte du projet Minewater

Heerlen est une ville de la province du Limbourg néerlandais, située à l’Est de Maastricht. C’est une ville de 87 500 habitants, soit de la taille d’Hasselt. Elle dispose d’infrastructures ferroviaires et routières, et se trouve à proximité des frontières belges et allemandes, au cœur de l’Euregio.



Elle fut une des principales villes minières des Pays-Bas durant la première moitié du XXe siècle. Entre 1899 et 1974, 118 mégatonnes de charbon ont été extraites de quatre concessions, Oranje-Nassau 1 à 4 (abrégé ON1 à 4). Dans les années 1970, les gisements de gaz furent privilégiés au charbon, ce qui entraîna la fermeture des mines aux Pays-Bas. Les pompages d'exhaure furent arrêtés en 1975 sur la concession d'ON1. La fin de l'industrie du charbon, jusqu'alors principale richesse de la région et en particulier de cette ville, la plongea dans des difficultés économiques importantes. Alors qu'elle était une des villes les plus riches des Pays-Bas dans les années 1960, elle en devint une des plus pauvres [Mijnwater 2014].

Un vaste plan de remise en marche de l'économie fut adopté. Dénommé « Parkstad 2040 » (littéralement la « ville-parc », en référence au tissu urbain peu dense de la ville), le plan visa le redéploiement de la région entière. Après l'économie de l'énergie fossile, des investissements furent faits pour promouvoir les nouveaux axes de l'économie : les soins, l'enseignement, les nouvelles technologies, les services financiers, les loisirs et le tourisme. Les cheminées furent abattues (dont la plus haute des Pays-Bas qui fut longtemps un symbole de la ville), les terrils furent étalés, de vastes chantiers de construction et de reconstruction transformèrent radicalement le centre-ville de Heerlen. Ces efforts dépassèrent la ville et concernèrent tout le Limbourg, par la création de pôles d'enseignement, la promotion des énergies vertes...

Le projet Minewater s'inscrit clairement dans ce contexte. Il s'agit d'un projet européen, au début du moins, dont le but est d'exploiter l'énergie géothermique via les galeries de mines. Il profita d'un accord de recherche Interreg avec la région du Midlothian en Ecosse, la ville de Bönen en Allemagne, le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) en France, etc. Cet accord permit la construction du site pilote de Heerlen, durant les années 2006 et 2007, alors que les projets proposés au Midlothian et à Bönen furent finalement abandonnés [Veldman 2007].

Il regroupe également d'autres acteurs publics (comme la ville de Heerlen) et privés (comme la caisse de pension ABP). En 2008, la société Minewater fut créée et chargée de l'exploitation des puits et du réseau, ainsi que l'amélioration et l'extension de ce dernier. En 2011, la société devint une société indépendante dont les parts sont détenues à 100% par la ville de Heerlen [Minewaterproject 2011].

Les fonds proviennent de différents niveaux de pouvoir : l'Union Européenne (par le biais de l'accord INTERREG et du 6th Framework Program project EC REMINING-lowex), l'État néerlandais (par le biais de fonds pour la recherche énergétique, pour la réhabilitation urbaine), la province du Limbourg néerlandais, la ville de Heerlen. Au total le projet a coûté près de 19,6 M€, somme probablement réductible à 15 M€ si c'était à refaire, selon René Verhoeven, un des responsables rencontré sur place.

1.3 Qu'est-ce que le projet Minewater ?

Le projet Minewater a connu plusieurs phases de développement, entre les forages de 2006 et l'exploitation du réseau de chauffage urbain tel qu'il existe actuellement.

Les premières études ont été réalisées en 1999, la pré-étude en 2002, puis les choses se sont accélérées entre 2005 et 2007, aboutissant au forage des puits. Les études, confiées au VITO (*Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*), se sont notamment focalisées sur la géométrie et les plans des galeries, leurs interconnexions ; sur la géologie, en particulier la présence de plissements, de failles, les températures mesurées dans les galeries lors de leur exploitation ; et enfin sur la modélisation de l'écoulement dans ces galeries et le lien avec le massif. Deux premiers puits, les plus profonds, sont forés en 2006, puis en 2007 les trois suivants, accompagnés d'essais de pompage. Sur base de ces essais, le VITO a pu déterminer plus précisément les débits qui pouvaient être exploités, à l'aide de nouvelles modélisations. Initialement dimensionnées pour des débits de 120 m³/h dans les puits chauds et 250 m³/h pour les puits froids, les installations n'ont jamais connu de tels débits en pratique (communication personnelle de Hermann Eijdens).

Après le forage des puits et la pose des premiers aqueducs, l'exploitation a suivi trois phases correspondant à une évolution du projet. On parlera de Minewater 1.0, 2.0 et 3.0. Dans Minewater 1.0, la géothermie est considérée comme une « source » de chaleur ou de fraîcheur, les premiers clients importants se connectent au réseau. Suite aux modélisations qui confirment qu'il serait dangereux d'étendre le projet de cette manière, du fait de la connexion entre les zones chaudes profondes et les zones froides superficielles, le projet évolue vers l'utilisation de la géothermie comme « réservoir », c'est Minewater 2.0. La ville est alors pensée en « clusters » raccordés à Minewater et ne demandant au système que l'énergie que les voisins ne peuvent pas fournir. Minewater 3.0, qui n'a pas encore débuté, vise l'utilisation de méthodes prédictives, basées sur les statistiques d'utilisation du système ou sur la météo, pour prévoir la demande et améliorer encore le rendement de la géothermie.

1.3.1 Minewater 1.0

Minewater 1.0 (de 2003 à 2008) correspond au stade pilote, dont le but était principalement d'étudier la capacité des forages effectués à chauffer les bâtiments d'une manière directe.

L'infrastructure utilisée par le projet est constituée de puits, de différentes profondeurs pour obtenir différentes températures, et un ensemble de tuyaux pour transporter les différents fluides. En l'occurrence, il y a un circuit chaud, un circuit froid et un circuit de température intermédiaire pour le retour. Ces conduites transportent l'eau des mines, chaude ou froide, jusqu'aux échangeurs de chaleur des sociétés clientes (qui sont, jusqu'en 2012, exclusivement de grands bâtiments, comme le Bureau Central de Statistique CBS, ou un centre commercial et social « Heerlehed Centrum »). Les tuyaux transportant l'eau chaude sont isolés, les autres non. Ils forment une sorte de « colonne vertébrale » qui sera la base de l'exploitation de l'installation.

Nous avons déjà parlé de la présence de 5 puits. Deux puits ont une profondeur d'environ 700 m, et permettent de pomper de l'eau à 28°C [Verhoeven et al. 2014]. Cette eau est refroidie de 10°C pour chauffer les bâtiments. L'eau froide (16°C), venant de puits de 250 m de profondeur, est réchauffée de 6°C par le refroidissement des bâtiments. L'eau qui retourne en

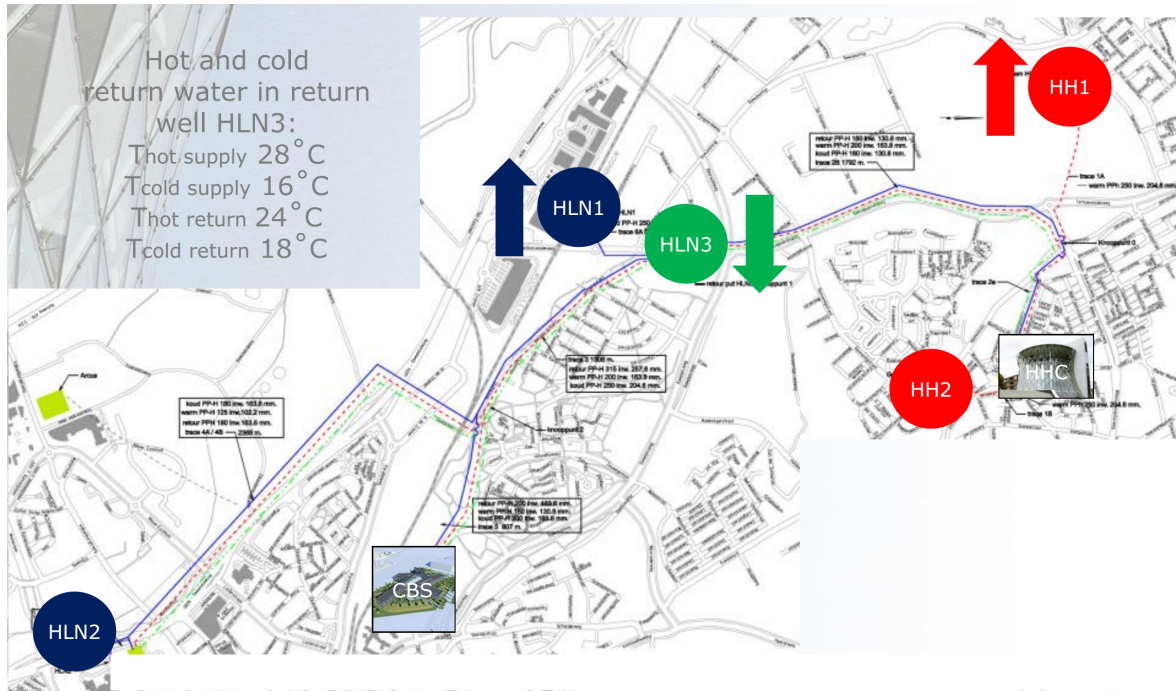


FIGURE 1.2 – Fonctionnement de Minewater 1.0 [Verhoeven 2014]

terre a donc une température d'environ 18 à 22 °C [Verhoeven et al. 2014], d'autres documents montrent plutôt 24 °C maximum [Verhoeven 2014]. Le puits de retour est profond de 350 m.

Suivant la saison, on tire donc de l'eau du puits chaud (HH1, HH2 pouvant être actionné en cas de besoin) ou froid (HLN1, HLN2 étant également un complément dans les premières phases d'exploitation). L'eau est réinjectée dans le puits HLN 3. Une carte de ces installations est présentée à la figure 1.2.

Suivant une coupe verticale, un schéma explicatif est visible à la figure 1.3.

Dans sa phase 1.0, le projet a été suivi par le VITO qui a pu affiner son modèle. Nous reviendrons dans la section 1.4 sur les modélisations effectuées. Les résultats ont montré dès le départ qu'un pompage tel qu'il était prévu (les puits ont été dimensionnés pour fournir 120 à 250 m³/h)[Van Tongeren et Daneels 2002] provoquerait une arrivée d'eau froide dans le réservoir chaud. L'idée de créer un « tampon » au niveau de la réinjection a été envisagée et partiellement implémentée, vu que l'eau injectée a une température moyenne.

Les principaux inconvénients de Minewater 1.0 étaient donc [Mijnwater 2014] :

- une capacité de pompage d'eau limitée, et conséquemment une capacité de production thermique très limitée ;
- d'avril à septembre, l'eau fraîche qui circulait permettait un refroidissement des bâtiments, d'octobre à mars, l'eau chaude en permettait le chauffage. Le système était donc peu flexible et inadapté à la demande, par conséquent source de pertes d'énergie ;
- il était regretté qu'aucun échange entre un bâtiment qui produisait de la chaleur (par exemple lié à un data center) ne puisse être effectué avec le bâtiment voisin susceptible d'avoir besoin de cette chaleur.

Le projet Minewater 2.0 va chercher à résoudre ces problèmes.

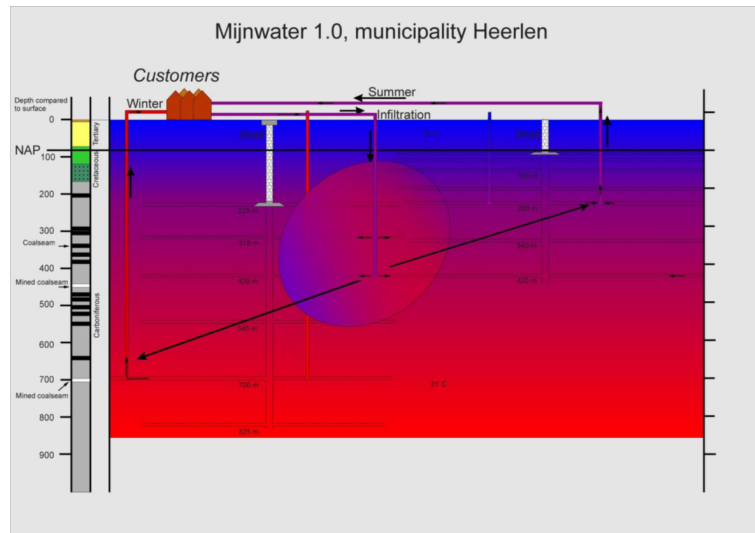


FIGURE 1.3 – Minewater 1.0, avec les puits d’extraction chaud et froid et l’injection [Verhoeven 2014]

1.3.2 Minewater 2.0

La seconde phase d’exploitation (de 2008 à nos jours) en a repensé complètement la philosophie. Tirer de l’eau des mines n’a plus pour but de réchauffer ou refroidir directement les bâtiments, mais bien de compenser le manque ou l’excédent d’énergie dans un certain voisinage. De source d’énergie, la géothermie devient une réserve d’énergie.

Les différentes zones desservies par les installations de Minewater 1.0 contiennent souvent des bâtiments qui sont une source de chaleur (une usine, un datacenter...) et des bâtiments qui demandent de la chaleur (habitations, bureaux...). Il était donc intéressant de chercher à récupérer un maximum d’énergie des premières activités vers les secondes, dans des laps de temps de l’ordre de l’heure. Les environs de la « colonne vertébrale » sont donc divisés en 4 zones, appelées « clusters », avec un système d’échange de chaleur à cette échelle locale. Si on prend l’exemple du cluster D, il regroupe l’entreprise sidérurgique Componenta, une piscine appelée « Otterveurdt » et une école (« Aldenhof »), la première activité étant principalement productrice de la chaleur alors que les deux autres en sont demandeuses.

Ces différents clusters sont reliés à la « colonne vertébrale » dans laquelle ne circule plus que de l’eau chaude (28°C) ou froide (16°C). Deux puits, HH2 et HLN2 sont utilisés de manière bidirectionnelle. Le puits intermédiaire HLN3 n’est plus utilisé dans cette configuration. Le principe est de créer dans le sous-sol deux régions bien distinctes, l’une chaude et l’autre froide, et de limiter la circulation et les mélanges entre ces zones. La figure 1.4 illustre cela.

On compte désormais plusieurs niveaux de gestion de la chaleur. A l’échelle du bâtiment, un système de régulation et de stockage permet le contrôle de la chaleur durant quelques heures à un jour. Entre alors en action le cluster : à titre d’exemple, dans le cluster D, la température maximale y varie de 29 à 50 °C et la minimale de 15 à 20°C. Le cluster compense les fluctuations hebdomadaires à mensuelles. Le réservoir de chaleur pour les variations plus importantes est le sous-sol, relié aux différents clusters par la « colonne vertébrale ».

De Minewater 1.0 à Minewater 2.0

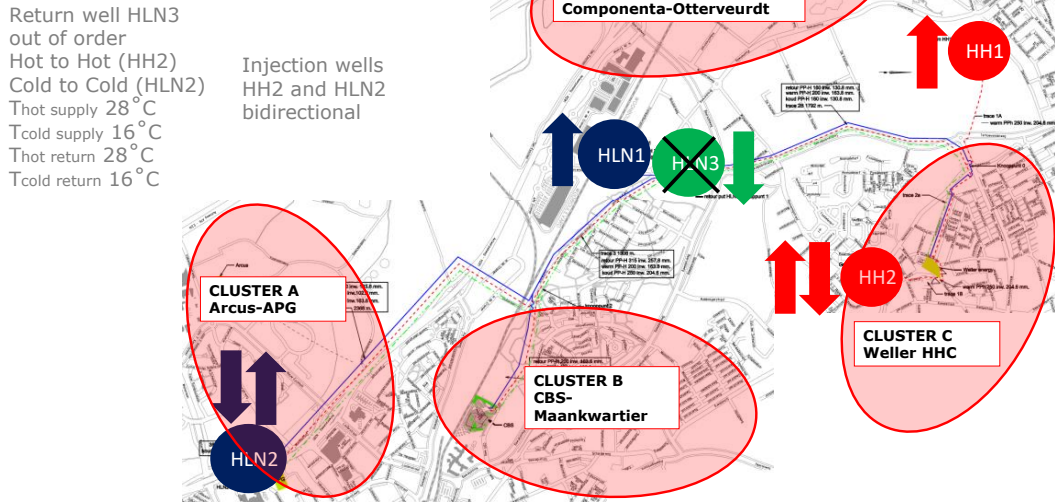


FIGURE 1.4 – Fonctionnement de minewater 2.0 (modifié d'après [Verhoeven et al. 2014])

Des stations de pompage et d'échange entre les différents niveaux sont nécessaires. En particulier, les stations entre le cluster et le client sont composées d'échangeurs de chaleur, de pompes à chaleur (qui sont capables de réchauffer ou refroidir l'eau du cluster), d'une capacité de stockage journalier et bien sûr de vases d'expansion. Les stations d'échanges entre la « colonne vertébrale » et le cluster sont bâties sur le même modèle.

Le système mis en place ne vise pas, de manière générale, à fournir le chauffage ou le refroidissement total du bâtiment. Au Heerleheide Centrum (un ensemble de logements, commerces, infrastructures diverses), par exemple, les pompes à chaleur ne fournissent qu'environ 700 kW, ce qui est suffisant pour la majorité des jours de l'année, mais durant environ 70 jours un chauffage d'appoint s'avère nécessaire. Le refroidissement est géré de manière similaire.

L'ensemble est évidemment contrôlé de manière informatique, avec de nombreux capteurs permettant de générer une base de données d'exploitation [Verhoeven et al. 2014, Verhoeven 2014, Veldman 2007].

1.3.3 Minewater 3.0

La version 3.0 du projet consiste en diverses améliorations, qui n'ont pas encore été implémentées à l'heure actuelle.

Les gestionnaires aimeraient disposer de prédictions de la demande. Les stratégies sont évoquées à cet effet : des entrepôts de données (*data mining*), des statistiques d'utilisation, des méthodes d'apprentissage automatique, et les prévisions météo. Ceci permettrait entre autre d'anticiper et d'exploiter au mieux les surproductions de chaleur.

Une étude de l'université de Maastricht montre que des variations de température au cours de la journée sont plus agréables humainement qu'une température constante. Les gestion-

naires aimeraient donc en faire l'expérience à plus grande échelle, ce qui permettrait aussi des économies d'énergie.

Il est également question d'ajouter du stockage de chaleur ou d'eau froide au sein des clusters ou des bâtiments [Verhoeven et al. 2014].

Enfin, le basculement du chauffage d'appoint vers des énergies renouvelables rendrait le projet encore plus écologique et durable. Les gestionnaires aimeraient *in fine* pouvoir offrir à leurs clients un chauffage 100 % vert [Hiddes 2014].

1.4 Recherches et modélisations nécessaires au projet

Différentes études ont été réalisées par le VITO depuis 1999. Un document important fut la pré-étude de 2002, qui résuma les informations de la littérature et des archives. Le but était de quantifier avec le plus de précision possible les vides présents dans le milieu souterrain, notamment pour estimer le volume d'eau et dès lors l'énergie mobilisable au sein du système. Elle visa aussi à établir la géochimie et la chimie des eaux qui y circulent ainsi que le gradient de température observé lorsque la mine était en exploitation. Ces informations permettent de diviser le massif en différents réservoirs potentiels, de les comparer, d'en tirer quelques premières conclusions.

En l'occurrence, une première estimation du volume des galeries a été faite grâce au volume de roche extrait de la mine (soit $10,8 \cdot 10^6 \text{m}^3$). La chimie de l'eau a permis de déterminer que l'utilisation de l'eau de la mine serait possible, et que le pompage comme l'injection de l'eau refroidie ne devrait pas poser de gros problèmes. Les limites du système ont alors pu être définies. Une seconde étude a poursuivi le travail sur les puits ON 1, 3 et 4.

Des recherches ont porté sur la structure des galeries, des bures, des zones foudroyées, des barrages et cloisons, des failles ainsi que les sources hydrothermales, et de la géologie plus généralement... mais hélas les informations se sont souvent révélées faibles. Elles se sont tout de même avérées suffisantes pour estimer l'écoulement de l'eau, et donc le flux de chaleur. Les premières modélisations ont pu être faites, mettant en lumière le risque de dénoyage et de « contamination » du puits chaud par le puits froid. En effet, dans les mines, les galeries sont logiquement creusées pour limiter le transport du charbon jusqu'au puits, alors qu'un système géothermique gagnerait au contraire à avoir le chemin le plus long possible entre l'injection et le pompage. Qui plus est, le risque de dénoyage ne laisse que deux options : l'injection dans une zone intermédiaire, ou la démultiplication des puits. La première option a été considérée comme plus simple et moins onéreuse [Van Tongeren et Daneels 2002].

Une compilation rigoureuse des données reprenant les informations géologiques, de température, des concessions, des premières modélisations, a permis de déterminer avec précision où forer les puits. Vu que les anciens puits de mine avaient été rebouchés et scellés, il a été décidé de forer à d'autres endroits. De plus, l'accessibilité en surface était également un critère important à prendre en compte. Finalement, le forage d'un puits vertical atteignant une galerie centrale, non foudroyée, et à proximité d'un ancien puits a été retenu pour les forages profonds [Van Tongeren et Laenen 2005, Van Tongeren 2005].

Suite à ce forage de puits, de nouvelles modélisations et leur calibration ont pu être réalisées. Ces modélisations ont été effectuées à l'aide d'une version modifiée d'EPANET, un logiciel initialement prévu pour calculer les écoulements en conduites. Elle prend en compte le transfert de chaleur sous forme d'advection, les arrivées d'eau connues en certains points de la galerie et la conduction thermique entre la paroi de la galerie et l'eau qu'elle contient. Le schéma utilisé est donc un plan 3D des galeries de la mine.

Des modélisations avec le logiciel SHEMAT ont également été réalisées, sur des sections de galeries notamment, avant d'être comparées avec les résultats d'EPANET [Ferket et al. 2011].

1.5 Proposition de méthodologie pour l'analyse de faisabilité de l'exploitation géothermique d'un système minier

A la suite de visites à Heerlen et de l'analyse du projet Minewater dans le cadre de mon stage au sein du bureau d'étude environnemental Géolys, une réflexion a été menée afin de déterminer une méthodologie efficace concernant l'exploitation du potentiel géothermique d'un complexe minier. En l'occurrence, nous nous intéressons à la mise en place d'un doublet géothermique correspondant à deux zones d'une même mine. La difficulté principale est généralement l'accès aux informations, si elles existent bel et bien, concernant la géométrie actuelle de la mine (soit plusieurs décennies après sa fermeture) et les propriétés de la géologie traversée.

Après la fermeture d'une mine, suite à l'arrêt des pompages d'exhaures, le niveau d'eau remonte à l'intérieur de la mine. Les puits sont remblayés et scellés (généralement par une dalle en béton armé ou en acier) afin de limiter les risques. Concernant les vides provoqués par l'exploitation, soit peuvent-ils avoir été remblayés (ceci étant lié ou non à la technique d'exploitation) ; soit la zone a pu être foudroyée, c'est-à-dire que lors de la fermeture le plafond et les parois de la zone exploitée ont été détruits et correspondent actuellement à une zone fortement fracturée ; soit ils ont été laissés vides, avec le risque que l'effondrement se fasse par la suite de manière non contrôlée. Si le plafond de la zone évidée ne s'est pas effondré de manière naturelle, de toute façon il reste malaisé d'estimer la taille réelle des galeries et autres zones évidées qui peuvent subir les effets du fluage de la roche, en particulier en grande profondeur.

Tout ceci implique que la géométrie des galeries et des zones évidées, déterminante dans l'écoulement, soit difficile à estimer. De même, les autres propriétés du massif et des zones déconsolidées ne peuvent généralement plus être mesurées (impossibilité de se rendre *in situ*) et il faut dès lors se baser sur la littérature existante. L'existence de sources hydrothermales, de même que les températures mesurées dans la mine ne peuvent être basées, avant les premiers forages, que sur les informations laissées lors de l'exploitation.

Une étude cherchant à établir la faisabilité sera donc très dépendante des ressources bibliographiques, et il convient d'adapter l'avancée du projet en fonction des données disponibles, tirant un maximum d'informations de ces ressources afin de poser des hypothèses réalistes le cas échéant.

1.5.1 Pré-étude et premiers critères de faisabilité

Dans un premier temps, une fois le lieu décidé et les buts de l'exploitation déterminés, la quantité de chaleur pouvant être extraite de la zone minière peut être estimée grossièrement à partir d'informations assez simples et généralement disponibles, comme le nombre de tonnes extraites et le volume des terrils, ou le nombre de wagons remontés durant l'exploitation, tout en tenant compte des zones ayant subi de la subsidence.

On peut estimer le volume du réservoir V_{res} créé par les activités minières par une relation empirique, du type

$$V_{res} = \frac{m \cdot \phi_{res}}{\rho}$$

où la masse de charbon et de roche extraite m , divisée par sa masse volumique ρ est pondérée par une « porosité résiduelle » ϕ_{res} qui est estimée empiriquement. Dans les bassins houillers du Sud de la Belgique, elle a été estimée à 20 % alors que dans le bassin de la Ruhr, les estimations sont plutôt de l'ordre de 5 à 10 %. Les différences sont vraisemblablement dues aux méthodes d'excavation, à la nature des roches, aux méthodes de remplissage des galeries après l'exploitation, etc. [Van Tongeren et al. 2004]. Les expériences effectuées par le VITO dans le projet Minewater ont montré que, selon leur schéma d'exploitation, l'eau mobilisable était en grande partie celle contenue dans les galeries. En première approximation, le volume des galeries (supposées non-rebouchées) peut être déterminé en considérant constant le rapport entre la longueur de galeries creusées et le nombre de tonnes de charbon extrait.

Le volume total des galeries peut être assimilable à un réservoir exploitable sur un court terme, correspondant à l'eau directement mobilisable par l'imposition d'un flux. Pour une première approche, la température peut être estimée selon la profondeur (gain de 3°C par 100 m). Connaissant la capacité calorifique de l'eau, ce flux peut être relié à une production de chaleur. De plus, les pores, voire l'ensemble de la zone exploitée (pores et roche), contiennent de l'énergie qui sera libérée sur le long terme. Déterminer la quantité d'énergie contenue dans les volumes de roches et d'eau n'est évidemment pas un gage que l'exploitation géothermique soit faisable, mais cela permet d'éliminer très rapidement et à peu de frais des options irréalistes (quand le réservoir géothermique est insuffisant pour être rentable par exemple). De même, la quantité d'énergie contenue dans les galeries doit être comparée aux besoins du projet, en supposant que cette énergie soit la seule mobilisable à court terme. Il est par exemple évident que si l'ensemble du volume des galeries est renouvelé en quelques heures, il est peu probable que la température de l'eau pompée reste stable et suffisamment élevée dans le cadre d'une exploitation s'étalant sur plusieurs années. Ceci donne également un critère simple de comparaison entre différentes mines potentiellement exploitables [Dembele 2015].

1.5.2 Phase de documentation préalable aux modélisations

Si le projet n'a pas été rejeté lors des premières estimations, il convient de chercher autant d'informations que possible concernant la mine, afin de prévoir les modalités de l'exploitation géothermique et de réaliser des modélisations. La compilation des données est une étape importante afin de faire les bons choix.

Un modèle géoréférencé reprenant les principales informations concernant les zones remblayées, ouvertes, les fractures, peut être un outil très utile. Il convient pour ce faire de rechercher des données sur :

les galeries : plan des galeries principales, gabarits concernant leur section, quel soutènement était utilisé à quel endroit, des effondrements ont-ils été répertoriés ?

la géologie : quelles structures et formations constituent le gisement ? À quelles lithologies les associer ? Des failles, des sources hydrothermales ont-elles été relevées ? Quelle est la composition ionique de l'eau d'exhaure ?

les concessions : les aspects législatifs ne doivent pas être négligés. Connaître les limites des concessions anciennes et actuelles est souvent nécessaire pour pouvoir retrouver les informations minières. Y sont également liées les limites physiques de l'exploitation, qui correspondent peu ou prou aux limites du domaine étudié.

Quand la géométrie du domaine est connue, il y a également lieu de déterminer les paramètres de l'écoulement, en particulier la conductivité hydraulique, l'emmagasinement spécifique, les flux ou potentiels imposés au sein du milieu, comme les puits et les rivières, et les conditions initiales. Ceci peut être effectué d'une manière moyenne pour le massif, ou plus précisément pour les différentes couches. De plus, il faut obtenir ces données pour les zones foudroyées ou remblayées. Comme nous le montrerons plus tard dans ce travail, le contraste de conductivité entre des zones remblayées ou non et le massif a une influence non négligeable sur l'écoulement et le transfert de chaleur qui l'accompagne. Il convient donc de déterminer si les zones sont bel et bien remblayées, effondrées ou foudroyées, ou encore simplement ouvertes.

Les données relatives au transfert de chaleur sont naturellement aussi nécessaires : porosité effective influençant l'advection, capacité thermique de l'eau et de la roche, conductivité thermique, et dans une moindre mesure la dispersion et la diffusion (qui peuvent être négligées dans un premier temps). La conductivité thermique et la capacité thermique sont généralement déterminées grâce à la lithologie, même si des mesures effectuées sur des échantillons sont plus précises. Il est opportun de déterminer les conditions aux frontières liées au pompage ou à l'injection d'eau. Les températures initiales demandent également des recherches : parfois elles ont été mesurées durant l'exploitation de la mine, de même que les sources d'eau chaudes rencontrées. À défaut, il faudra se référer aux modèles régionaux.

Il convient encore de contrôler que les nouvelles données, plus précises, ne conduisent pas à une insuffisance des capacités comme évoqué au point 1.5.1.

Enfin, il ne faut pas oublier d'examiner les aspects législatifs liés aux techniques d'exploitation ou de tests que l'on désire employer.

1.5.3 Phase de modélisation

Au terme de la phase de documentation, il convient peut-être de diviser le domaine à exploiter en différents compartiments, en fonction de la géométrie de la mine et des liaisons entre les différentes zones d'exploitations. Les conditions limites et les connexions entre ces compartiments doivent être définies. On peut alors décider quels compartiments sont les plus

intéressants pour le projet et ensuite choisir l'emplacement du pompage et de l'injection dans le système géothermique à construire.

Un modèle conceptuel du site est construit, reprenant les informations (sur l'écoulement et le transfert de chaleur) que les experts souhaitent modéliser.

Suivant le modèle conceptuel, plusieurs options s'ouvrent pour la modélisation numérique. La simulation d'écoulement en conduite, comme le permet EPANET, offre une résolution rapide mais ne prend en compte que les phénomènes d'advection et de conduction au travers de la paroi. De plus, l'advection ne se fait qu'au sein des galeries : cela convient au cas où la conductivité dans la galerie et les puits est très élevée par rapport à celle du massif. Remarquons aussi que, dans la version utilisée par le VITO, la méthode de Rodriguez et Diaz (2009) utilisée pour modéliser la conduction devient moins précise si de nombreuses interconnexions entre différents niveaux existent.

L'autre option est une modélisation utilisant les différences finies, volumes finis ou éléments finis avec volumes de contrôle, permettant de modéliser plus de phénomènes. Mais cette option est bien plus lente et compliquée à mettre en place. Il convient alors de déterminer également le niveau de précision des éléments à modéliser. Cependant, l'écoulement au sein des galeries ne respectant pas la loi de Darcy, généralement utilisée en milieu souterrain, il conviendra d'interpréter avec précaution les résultats... Ou encore de trouver le logiciel miracle associant les résolutions en conduite et de Darcy. Comme il sera montré dans le chapitre 2, un logiciel résolvant les équations d'écoulement et de transport de soluté peut être utilisé afin de résoudre les équations de transfert de chaleur.

Les principaux processus de transfert de chaleur dans ces situations sont l'advection (ou convection forcée) et la conduction. La diffusion et la dispersion sont de magnitude plus faible et peuvent généralement être négligées dans un premier temps [Fossoul 2009].

Différentes modélisations peuvent être effectuées, combinant plusieurs méthodes. Les résultats d'une modélisation doivent toujours être interprétés de manière critique. La suite de modèles devra être actualisée en fonction des découvertes effectuées.

1.5.4 Phase d'analyse de la technique et de la rentabilité

Les résultats des modélisations doivent répondre à une série de questions telles que :

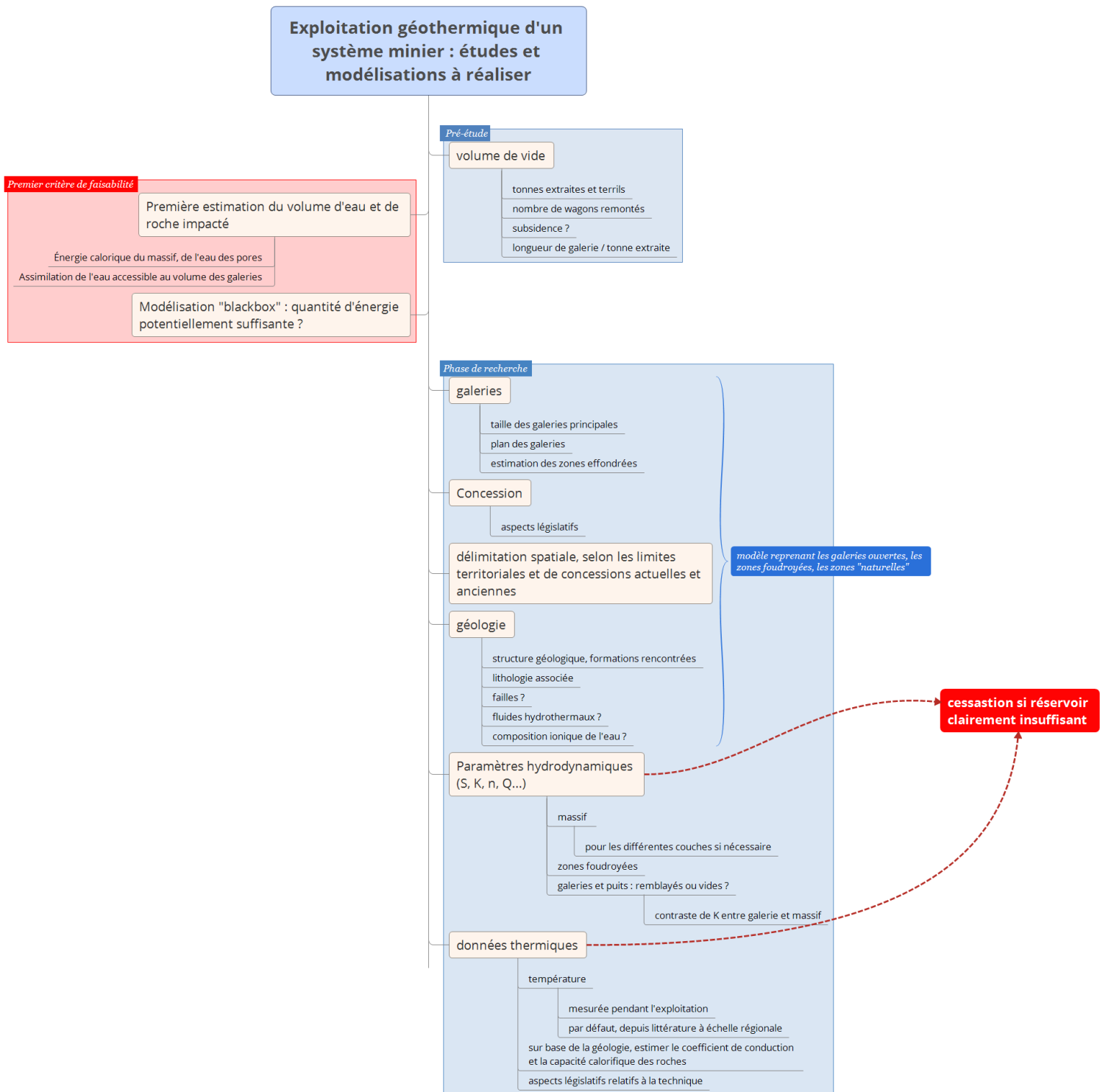
- la détection de « court-circuits » au sein du réseau de galeries, provoquant un mélange entre l'eau froide et l'eau chaude ;
- la délimitation du véritable réservoir d'énergie, certaines zones étant naturellement très peu impactées par le flux et le transfert de chaleur et donc inutiles au système géothermique ;
- le risque de dénoyage et ses conséquences, les débits qui devraient être utilisables ;
- le risque de pollution ;
- le risque associé à l'utilisation d'une eau chargée en ions ;
- etc.

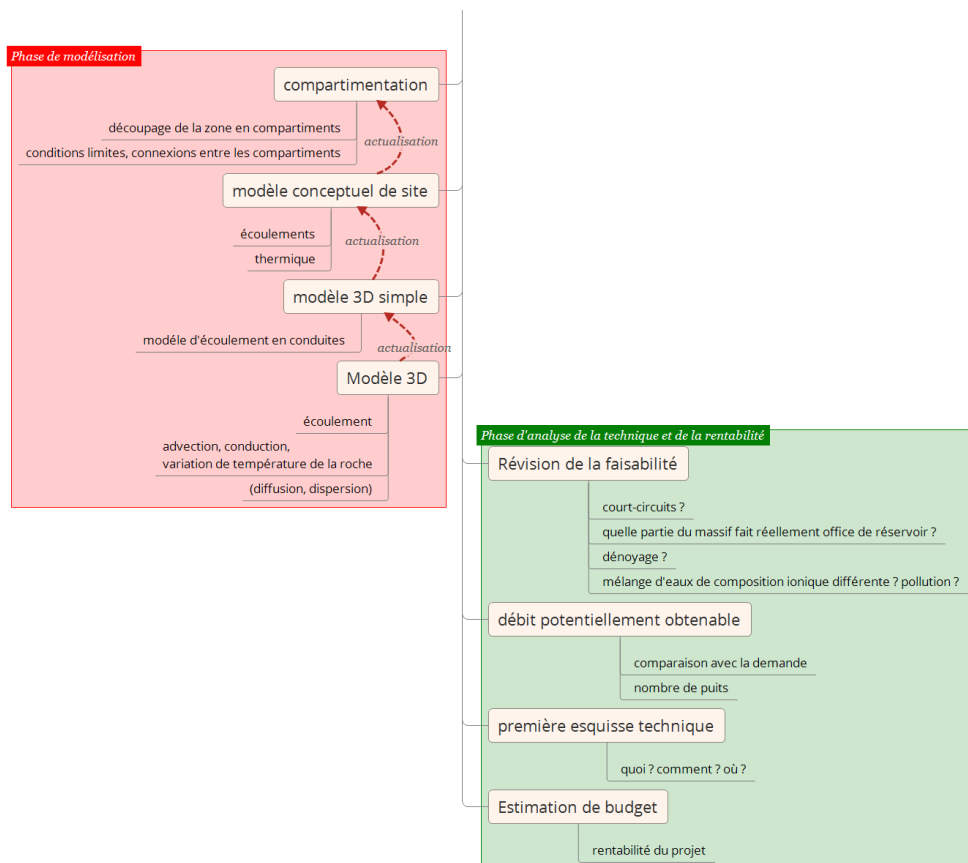
Ces différents points nous amènent à réviser la faisabilité du système.

Un nouveau débit, dépendant des résultats des modélisations et de la demande, devra potentiellement être évalué. En fonction du rabattement et du risque de dénoyage ou à la difficulté d'injection, une multiplication des puits peut être envisagée, bien que coûteuse. On pourra alors tracer les premières esquisses techniques et estimer le budget du gros œuvre.

Le schéma euristique synthétisant cette réflexion est présenté à la section 1.5.5.

1.5.5 Schéma euristique





Chapitre 2

Équations d'écoulement et de transfert de chaleur

L'extraction de la chaleur du massif se fait par le biais du pompage de l'eau. Le transport de chaleur se fera donc par cette phase, et la modélisation s'intéressera au transport de chaleur au sein de la phase aqueuse ainsi qu'aux interactions thermiques avec l'encaissant. La modélisation se fera donc en deux temps : d'abord modéliser l'écoulement de l'eau dans le milieu souterrain ; par la suite et sur cette base calculer le transfert de chaleur correspondant.

Deux approches de modélisation ont été utilisées dans ce travail.

Premièrement, le logiciel SUFT3D a permis une résolution des équations 3D d'écoulement et de transfert de chaleur par une méthode hybride associant des réservoirs linéaires et des éléments finis à volumes de contrôle. On y modélise donc les interactions entre les galeries et le massif poreux. Cette méthode est hélas très consommatrice de temps de calcul et demande des ressources informatiques importantes.

Deuxièmement, l'approche développée par le VITO néglige fortement l'interaction avec le massif encaissant : il s'agit de considérer les galeries minières comme autant de tuyaux. Pour ce faire, ils ont modifié le logiciel de calcul d'écoulement en conduite EPANET afin d'y inclure une représentation de la conduction entre la paroi de la conduite et le fluide. La principale hypothèse de ce cas de figure est bien évidemment que seules les galeries ouvertes sont modélisées, les zones remblayées, foudroyées ou encore le massif sont considérés comme imperméables.

Dans cette partie, différentes équations régissant ces deux modélisations seront décrites avec les phénomènes physiques impliqués dans le transfert de chaleur, les formulations mathématiques correspondantes et une comparaison des deux approches. Les codes EPANET et SUFT3D étant des logiciels initialement destinés au transport de soluté, nous établirons également le parallèle entre les équations de transport de soluté et celles du transfert de chaleur.

2.1 Approches de modélisations utilisées par SUFT3D

Les équations traditionnelles régissant l'écoulement en milieu souterrain se fondent habituellement sur l'équation de Darcy

$$\vec{v} = -\underline{\underline{K}} \bullet \overrightarrow{\nabla(h+z)}$$

où le tenseur $\underline{\underline{K}}$ [m/s] représente la conductivité hydraulique (fonction de la perméabilité du milieu, de la viscosité dynamique du fluide, de sa masse volumique et de la pesanteur), \vec{v} [m/s] le flux d'eau qui traverse la roche (appelé débit spécifique ou vitesse de Darcy) et $\overrightarrow{\nabla(h+z)}$ le gradient de la hauteur piézométrique : $h = \frac{p}{\rho g}$ représentant la hauteur manométrique et z le potentiel gravifique. Dans la définition de la hauteur manométrique, p [Pa] est la pression en eau, ρ [kg/m³] la masse volumique de l'eau et g [m/s²] l'accélération gravifique. C'est cette équation de mouvement de l'eau associée à la conservation de la masse qui est résolue par des méthodes numériques implémentées dans les logiciels de simulation d'écoulement en milieu poreux.

Cependant, l'équation de Darcy n'est valable qu'en régime laminaire (nombre de Reynolds compris entre 1 et 10) [Fetter 2014]. Or des zones fracturées voire des zones où il existe des galeries ouvertes doivent être considérées. Dans ces zones, rien n'empêche l'écoulement d'être rapide et turbulent. Il s'agit donc d'étudier différentes approches de calcul afin d'en tenir compte. Nous utilisons le logiciel SUFT3D, développé par l'équipe d'hydrogéologie de l'Université de Liège, qui permet de modéliser aussi bien les zones où on peut attendre un régime turbulent que les zones correspondant aux écoulements de Darcy. SUFT3D utilise une approche mixte, alliant des éléments utilisant les équations d'écoulement définies par l'approche « box model » et les éléments finis utilisant l'approche classique en milieu poreux.

2.1.1 Approche « Box model »

L'approche « box model » est une approche systémique où chaque élément du modèle sera considéré comme un réservoir au comportement linéaire. La zone investiguée est divisée en compartiments, sur lesquels on applique la loi de conservation de la masse. Les variations de flux d'entrée ou de sortie du compartiment induisent une variation du stock d'eau contenu dans le compartiment, ce qui est traduit en une variation du niveau d'eau dans le compartiment. Les échanges entre les compartiments sont supposés du premier ordre, *i.e.* une fonction linéaire de ΔH , la différence de hauteur piézométrique entre les deux compartiments. A l'intérieur de chaque compartiment, le gradient de H est nul.

Cette approche vise donc à quantifier les écoulements sans entrer dans le détail, et permet de se passer de données en quantités trop importantes [Gardin et Brouyère 2005].

2.1.2 Approche classique en milieu poreux

Basée exclusivement sur les équations de Darcy et de conservation, elle décrit l'écoulement dans les milieux poreux à écoulement laminaire. Dans SUFT3D, elle est implémentée par la méthode des éléments finis à volumes de contrôle [Gardin et Brouyère 2005].

2.1.3 Approche mixte

Nous utilisons de concert les deux approches précédentes : les zones qui répondent aux hypothèses de l'équation de Darcy sont traitées suivant l'approche classique alors que les zones exploitées et les galeries, où l'écoulement n'est pas nécessairement laminaire, sont considérées comme des compartiments « box model ». Il faut donc découper le modèle en sous-domaines, correspondant à des contextes d'écoulement différents.

Dans ce cas, les conditions d'échange entre les sous-domaines sont déterminées par des conditions de Fourier dynamiques. Le flux est égal à

$$q = \alpha(H_{j,m} - H_{i,n})$$

où α est un coefficient de transmissivité entre les sous-domaines, H la hauteur piézométrique dans tel sous-domaine i ou j , telle cellule m ou n . Une condition de Dirichlet sera atteinte si α est très élevé. Contrairement aux conditions de Fourier aux frontières du domaine, où une hauteur de référence est imposée, ici elles n'impliquent qu'une relation linéaire entre, d'une part, la différence de hauteurs piézométriques entre deux cellules, et d'autre part, le flux entre ces cellules.

Les sous-domaines sont régis par des équations correspondant soit au transfert simple, comme selon l'approche « box model », soit suivant les équations dérivées des équations de Darcy et de conservation. Le transfert simple est codé de deux manières différentes dans SUFT3D : les réservoirs linéaires simples et les réservoirs linéaires distribués. Pour les premiers, les caractéristiques à la sortie sont linéairement dépendantes du comportement moyen du réservoir, qui est donc considéré comme une entité unique et homogène. Le réservoir linéairement distribué permet de tenir compte de plus d'information, en subdivisant le réservoir en différents réservoirs linéaires simples [Gardin et Brouyère 2005].

Les sous-domaines sont divisés en cellules, suivant le maillage. Remarquons que dans le cas d'un élément linéaire simple, dans l'ensemble des cellules composant le sous-domaine les inconnues ont donc une valeur identique. Leur existence a pour seul but de définir la géométrie du réservoir linéaire.

2.2 Équations d'écoulement utilisées par SUFT3D

Cette section décrit les équations d'écoulement utilisées dans les différents sous-domaines définis par l'approche mixte.

2.2.1 Réservoir linéaire simple

Le débit sortant du réservoir varie linéairement en fonction du niveau d'eau dans le réservoir.

$$Q_{res} = V_{res} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = S \cdot A_{res} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\alpha \bar{H} \quad (2.1)$$

avec

- Q_{res} le débit en eau sortant du réservoir [m^3/s],
- V_{res} le volume du réservoir [m^3],
- θ la proportion volumique d'eau dans le réservoir [-],
- S le coefficient d'emménagement du réservoir [-],
- A_{res} l'aire du réservoir linéaire [m^2]
- \bar{H} la hauteur d'eau moyenne dans le réservoir linéaire, donc la variable du problème [m]
- α_{res} le coefficient de récession du réservoir linéaire [m^2/s]

Ce modèle est amélioré en lui incluant un niveau d'eau de base H_b , atteint lorsque l'aquifère est drainé, et un terme source / puits Q (de dimension m^3/s). Ainsi, le réservoir linéaire est utilisable dans un environnement saturé, où \bar{H} est la hauteur piézométrique du réservoir et H_b la hauteur piézométrique dans un sous-domaine voisin.

$$S \cdot A_{res} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\alpha_{res} \cdot (\bar{H} - H_b) + Q \quad (2.2)$$

2.2.2 Réservoir linéaire distribué

Supposons que des réservoirs linéaires soient connectés en série. Le niveau d'eau de base H_b défini ci-avant est remplacé par le niveau d'eau du réservoir connecté à celui dont on calcule le bilan. L'équation 2.2 devient

$$\frac{\partial V_{w,I}}{\partial t} = V_{res,I} \cdot \frac{\partial \theta_I}{\partial t} = S \cdot A_{res,I} \cdot \frac{\partial H_I}{\partial t} = \sum_{J \in \eta_I} \alpha_{I,J} \cdot (H_J - H_I) + Q$$

où I est la cellule dont on calcule le bilan et J les cellules connectées à celle-ci. De plus,

- $V_{w,I}$ est le volume d'eau dans le réservoir I [m^3],
- $V_{res,I}$ est le volume du réservoir I [m^3],
- θ_I est la proportion volumique d'eau dans le réservoir I [-],
- H_I est la hauteur d'eau dans le réservoir I [m],
- $\alpha_{I,J}$ [m^2/s] les coefficients de transfert d'eau entre la cellule I et la cellule J située dans le voisinage η_I [Gardin et Brouyère 2005].

2.2.3 Écoulement en milieu poreux (méthode classique)

Cette méthode est appliquée aux sous-domaines dont l'écoulement respecte les hypothèses de la loi de Darcy.

Considérons un élément de volume représentatif de milieu saturé. Soit un débit spécifique \vec{v} , le potentiel de pression $h(x, y, z)$, le potentiel de gravité $z(x, y, z)$ et le tenseur de conductivité hydraulique du milieu souterrain \underline{K} . La loi de Darcy sous forme vectorielle s'écrit

$$\vec{v} = -\underline{K} \bullet \overrightarrow{\nabla(h+z)}$$

Par ailleurs, par le principe de conservation de la masse, tout flux entrant dans un élément de volume représentatif doit en sortir. Ainsi, considérant un débit de sollicitation extérieure par unité de volume Q (T^{-1}),

$$-\vec{\nabla} \bullet (\rho \vec{v}) - \rho Q = 0$$

En écoulement transitoire, l'emmagasinement d'eau dans l'élément de volume représentatif varie en fonction du temps. Il faut dès lors tenir compte d'un coefficient d'emmagasinement spécifique S_s qui modélise les variations de porosité n et de masse volumique ρ , donc de masse d'eau contenue dans le volume représentatif.

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial(h+z)}{\partial t}$$

En combinant les trois équations précédentes, on peut écrire

$$S_s \frac{\partial(h+z)}{\partial t} = \vec{\nabla} \bullet [\underline{K} \bullet \overrightarrow{\nabla(h+z)}] + Q \quad (2.3)$$

où S_s est le coefficient d'emmagasinement, \underline{K} est le tenseur de conductivité hydraulique du milieu souterrain, h la hauteur manométrique [m], z le potentiel de gravité [m] et Q [1/s] un terme source ou puits volumique. Dans le code de SUFT3D, cette équation est résolue par la méthode des éléments finis avec volumes de contrôle (CVFE pour Control-Volume Finite-Elements) [Gardin et Brouyère 2005, Brouyère 2001].

2.2.4 Conditions d'échange d'eau entre les sous-domaines et conditions aux limites

On distinguera la possibilité d'user de quatre types de conditions aux limites : les conditions de Dirichlet, de Neumann, de Cauchy et de Fourier.

2.2.4.1 Conditions de Dirichlet

Les conditions de Dirichlet, ou du premier type, consistent à imposer une valeur de la variable principale (la hauteur piézométrique dans le cas d'un écoulement) sur la portion de frontière.

Par exemple, on choisira une condition de Dirichlet lorsque la nappe est liée à un réservoir dont on connaît la hauteur d'eau en tout temps, comme un lac ou un cours d'eau dont le niveau n'est pas influencé par la hauteur piézométrique de la nappe et qui peut soit la drainer, soit lui apporter de l'eau. L'imposition de cette condition crée un flux d'eau pour assurer le maintien du potentiel hydraulique imposé.

En tant que condition interne, la condition de Dirichlet impose l'égalité de la hauteur piézométrique aux frontières correspondantes des deux sous-domaines. Elle sert donc à les coupler.

Remarquons qu'imposer une condition de Dirichlet à un réservoir linéaire n'a aucun sens, puisque cela revient à imposer la hauteur piézométrique sur l'ensemble du réservoir. Pour le modèle distribué, le niveau imposé est le niveau de base H_b . Une condition de Dirichlet sur le modèle d'éléments finis impose une hauteur piézométrique aux nœuds qui constituent la frontière. L'imposition est effectuée en remplaçant l'équation relative à l'inconnue nodale par une matrice identité afin d'assurer que la valeur du potentiel soit égale à la valeur imposée [Gardin et Brouyère 2005]. Formellement, on peut écrire que sur la frontière \mathcal{B} , la hauteur piézométrique vaut la valeur imposée h_d :

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}$$

2.2.4.2 Conditions de Neumann

Les conditions de Neumann, ou du second type, consistent à imposer sur la frontière la dérivée spatiale de la variable principale, soit dans le cas d'un écoulement, un débit de flux d'eau au travers de cette portion de frontière en se basant exclusivement sur le gradient du potentiel de pression.

Ceci ne se rencontre a priori que rarement [Gardin et Brouyère 2005]. En particulier son utilisation dans SUFT3D peut souvent être substituée à la condition de Cauchy (au sens utilisé par SUFT3D), plus proche des phénomènes physiques en faisant intervenir la hauteur piézométrique ($h + z$) [Brouyère 2001].

Sur la frontière \mathcal{B}_N , l'équation à résoudre s'écrit [Yeh et al. 1993]

$$-\vec{n} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \vec{\nabla} h = q_N(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}_N$$

où \vec{n} est le vecteur normal à la frontière, $\underline{\underline{K}}$ est le tenseur de conductivité et q_N est le flux imposé.

2.2.4.3 Conditions de Cauchy

Les conditions de Cauchy telles qu'implémentées dans SUFT3D définissent également un flux d'eau au travers de la frontière, elles correspondent aux traditionnelles conditions de Neumann lorsque la hauteur manométrique et le potentiel graphique sont regroupés en une seule variable : la hauteur piézométrique. Le débit fait donc intervenir ici les variables h et z . Par exemple, les conditions de Cauchy permettent de modéliser le flux lié à la recharge par infiltration, ou encore un flux de débit connu entre deux sous-domaines. Dans ce cas, on appliquera des flux de même intensité mais de sens opposés aux frontières des deux sous-domaines.

Sur la frontière \mathcal{B}_C , l'équation à résoudre s'écrit [Yeh et al. 1993, Brouyère 2001]

$$-\vec{n} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet (\vec{\nabla} h + \vec{\nabla} z) = q_C(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}_C$$

où \vec{n} est le vecteur normal à la frontière, $\underline{\underline{K}}$ est le tenseur de conductivité et q_C est le flux de Cauchy.

2.2.4.4 Conditions de Fourier

Les conditions de Fourier consistent à imposer une relation linéaire entre la variable principale et sa dérivée temporelle sur la portion de frontière. Elles signifient donc que le flux d'eau entrant ou sortant du réservoir est proportionnel à une hauteur d'eau ; c'est le principe même utilisé pour les réservoirs linéaires.

Elles peuvent être utilisées pour modéliser les échanges entre rivière et nappe, le coefficient associé étant alors le coefficient de drainance du lit de la rivière. Lorsqu'elles sont utilisées pour calculer le flux entre deux sous-domaines, cela revient à coupler ces sous-domaines par une équation de transfert du premier ordre. Le flux est proportionnel au coefficient de transfert et à la différence des hauteurs piézométriques. Le coefficient de transfert peut être estimé à partir d'une moyenne des conductivités hydrauliques des aquifères à proximité de l'interface [Gardin et Brouyère 2005].

Dans le cas d'un réservoir linéaire simple, les équations sont identiques (équations 2.1 et 2.2). Pour le réservoir linéaire distribué, les conditions de Fourier sont appliquées à chaque cellule exutoire en utilisant l'équation 2.2. Enfin, pour une résolution d'éléments finis à volumes de contrôle (CVFE), on impose sur les frontières un flux du type $q_C = \alpha \cdot (H - H_L)$, où H est la hauteur piézométrique ($h + z$).

2.3 Équations de transport de soluté et de transfert de chaleur

Différents processus participent au transport de soluté et / ou de chaleur au sein du milieu souterrain. Nous verrons dans les sections suivantes les différents processus de transfert de chaleur et de soluté afin d'élaborer les équations décrivant l'ensemble du phénomène. Nous pourrions comparer *l'équation générale de transport de soluté* à celle correspondant au *transfert de chaleur*. Ainsi, nous déterminerons si le code informatique destiné à résoudre les équations de transport de soluté pourra être réutilisé dans le contexte du transfert de chaleur.

2.3.1 Advection

L'advection est le transport du soluté entraîné par l'écoulement de l'eau, suite à un gradient de hauteur piézométrique. Le flux de Darcy $\vec{v} = -\underline{\underline{K}} \cdot \vec{\nabla}(h + z)$ nous permet de déterminer la vitesse d'écoulement du fluide par l'équation

$$\vec{v}_e = \vec{v} / n_e$$

où n_e est la porosité efficace de transport. Cette vitesse \vec{v}_e est appelée vitesse effective ou vitesse advective [m/s].

Un soluté présent à concentration C [kg/m³] dans le fluide se déplacera à la même vitesse. Ainsi, le flux advectif de soluté [kg m⁻² s⁻¹] est donné par :

$$\vec{f}_{adv} = C \vec{v}_e = C \vec{v} / n_e$$

Notons que l'utilisation de la porosité totale à la place de la porosité efficace conduit à sous-évaluer le flux d'advection. La porosité efficace devrait être évaluée de manière indépendante de la porosité totale, car la porosité efficace est fonction de la saturation en eau et en eau mobile. La variation d'échelle fait également varier la porosité efficace : la présence ou non de fissures doit être prise en compte, et suivant la taille relative de ces fissures sur l'EVR, la porosité peut varier fortement. Cependant, la conductivité de l'EVR est également fonction de cette échelle. Le changement d'échelle ne modifie ainsi pas beaucoup les calculs d'advection, la variation de porosité étant compensée par la variation de conductivité [Brouyère 2001].

Lors du transfert de chaleur, le mouvement de l'eau transporte également de la chaleur. Ainsi, le phénomène d'advection est aussi observé, parfois dénommé « convection forcée ». Formulé mathématiquement,

$$\vec{f}_{adv} = \vec{v}_e \rho_w c_w T$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau, c_w la capacité calorifique de l'eau et T sa température. [Fossoul 2009, Molson et al. 1992].

2.3.2 Diffusion et dispersion

Dans le transport de soluté, les phénomènes de diffusion moléculaire et de dispersion mécanique sont souvent rassemblés dans le concept de dispersion hydrodynamique, qui produit un étalement du soluté autour de la solution advective. Ci-dessous sont décrits les deux phénomènes physiques en cause.

2.3.2.1 Diffusion moléculaire

Dans un volume fini de solvant à température ambiante, un soluté diffuse de telle sorte que les concentrations finissent par s'équilibrer dans l'ensemble du volume. Ce phénomène, appelé diffusion moléculaire, est dû au mouvement brownien des molécules de solvant. La diffusion est supposée isotrope [Fossoul 2009, Brouyère 2001].

En milieu poreux, la diffusion peut être freinée par les particules solides, qui peuvent limiter la distance sur laquelle la diffusion peut agir. On considère qu'elle suit généralement une loi de Fick qui établit le lien entre le flux de matière \vec{f}_{diff} et le gradient de concentration $\vec{\nabla}C$:

$$\vec{f}_{diff} = -D_{diff} \vec{\nabla}C$$

où le coefficient de diffusion au sein du milieu $D_{diff} = w \cdot d_{diff}$ avec d_{diff} [m²/s] le coefficient de diffusion moléculaire du soluté au sein du solvant et w [-] le coefficient de résistance à

la diffusion du milieu poreux (inférieur à 1) [Brouyère 2001]. Le coefficient est estimé par la porosité divisée par la tortuosité au carré, la tortuosité étant le rapport entre la longueur du chemin suivi par les molécules d'eau et la distance entre les points d'entrée et de sortie du flux d'eau [Fetter 2014].

En transport de contaminants, la diffusion sera le principal terme de transport lorsque l'advection est très faible (par exemple dans des couches très imperméables).

Lors de la présence de fluides de températures différentes, la diffusion participe également au transfert de chaleur. Elle s'exerce aussi bien dans l'eau mobile que l'eau immobile [Fossoul 2009] :

$$\overrightarrow{f_{diff}} = -\rho_w c_w D_{diff} \overrightarrow{\nabla T}$$

2.3.2.2 Dispersion mécanique

La vitesse d'advection est une vitesse moyenne du flux traversant l'élément de volume représentatif : dans la réalité, il existe des variations de cette vitesse. Ces variations conduisent à un étalement progressif du nuage de soluté. Le flux de matière associé à ce processus appelé dispersion mécanique, suit également une loi fickienne :

$$\overrightarrow{f_{disp}} = -\underline{\underline{D_{disp}}} \overrightarrow{\nabla C}$$

où C [kg/m³] est la concentration volumique dans l'eau mobile et $\underline{\underline{D_{disp}}}$ [m²/s] est un tenseur représentant la dispersion mécanique. Suivant les axes du trièdre de Frenet attachés au point d'observation,

$$\underline{\underline{D_{disp}}} = \begin{bmatrix} \alpha_L |\vec{v}_e|^m & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T |\vec{v}_e|^m & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T |\vec{v}_e|^m \end{bmatrix}$$

avec :

α_L la dispersivité longitudinale exprimant l'étalement dans le sens de l'écoulement [m],

α_T la dispersivité transversale exprimant l'étalement dans les directions perpendiculaires à l'écoulement [m],

\vec{v}_e la vitesse d'advection du soluté [m/s], m étant un paramètre souvent fixé à 1 [Brouyère 2001].

Si le phénomène de diffusion moléculaire a lieu dans l'ensemble de la porosité, la dispersion mécanique n'a lieu que dans la porosité effective de transport représentant l'eau mobile.

Physiquement, les variations de vitesse qui provoquent la dispersion sont une conséquence directe de la tortuosité du réseau, à la variabilité des ouvertures ainsi qu'à la friction au sein de l'eau et au contact du solide. La tortuosité provoque directement des variations de vitesse (intensité et orientation). Au sein des fissures, la variation de vitesse dépend surtout du régime d'écoulement. Ces phénomènes, valable en laboratoire à petite échelle (typiquement de l'ordre de quelques pores), provoquent la *microdispersion* [Brouyère 2001].

Cependant, dans la pratique, le facteur de dispersion à considérer pour expliquer les résultats observés est systématiquement plus élevé que selon les mécanismes de microdispersion.

De plus, la dispersion augmente avec la distance parcourue par le soluté (effet d'échelle). Dès lors, pour tenir compte de l'hétérogénéité de l'écoulement à une échelle supérieure ou égale à l'Élément de Volume Représentatif, on introduit la notion de *macrodispersion*. Pratiquement, on utilise généralement des valeurs moyennes obtenues à l'échelle du terrain et on intègre l'influence de l'hétérogénéité réelle dans la macrodispersion, ce qui globalise cet effet (*lumping parameter*) [Brouyère 2001].

On modélise ainsi de manière simplifiée les effets d'échelle qui affectent la macrodispersion : plus le chemin parcouru par le soluté est long, plus la probabilité de rencontrer des hétérogénéités d'échelles spatiales différentes est élevée, et donc plus l'étalement du soluté est grand. Ceci se traduit par une augmentation de la dispersivité [Fetter 2014]. Remarquons dès lors que la macrodispersion n'est pas une propriété intrinsèque du sol. Elle dépend du chemin emprunté par le soluté, et non de l'endroit à proprement parler. Serge Brouyère (2001) met en garde contre l'utilisation de grandes valeurs de dispersion, rappelant qu'il ne s'agit que d'une vision tronquée de la réalité.

La dispersion mécanique a aussi lieu dans le transfert de chaleur, naturellement. Elle traduit l'étalement de la masse de fluide chaud ou froid autour de la position advective moyenne (avec la conduction et la diffusion). Ce phénomène n'a donc lieu que dans l'eau mobile. Le transfert de chaleur dû à la dispersion thermomécanique suit la loi :

$$\overrightarrow{f_{diff}} = -\rho_w c_w \underline{\underline{D_{disp}}} \overrightarrow{\nabla T}$$

où $\underline{\underline{D_{disp}}}$ est le tenseur de dispersion thermomécanique [m^2/s]. Dans un champ uniforme de vitesses d'écoulement et dans un référentiel de Frenet, on peut écrire le tenseur sous la forme :

$$\underline{\underline{D_{disp}}} = \begin{bmatrix} \alpha_L |\vec{v_e}|^m & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T |\vec{v_e}|^m & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T |\vec{v_e}|^m \end{bmatrix}$$

comme pour le transport de soluté.

En transfert de chaleur, la dispersion thermomécanique est souvent négligeable par rapport à la conduction.

2.3.3 Effets de retard (transport de soluté)

L'effet de retard est principalement dû à deux phénomènes : les équilibres chimiques entre les substances dissoutes et la matrice solide, et l'adsorption.

La matrice solide est composée de minéraux qui peuvent être dissous. La composition chimique de l'eau qui traverse cette matrice est donc soumise à un équilibre de dissolution / précipitation avec les minéraux qui composent la phase solide. Mathématiquement, il faudra tenir compte de la constante de dissociation en tenant compte de la loi d'action des masses.

L'adsorption considéré comme un phénomène d'échanges et de partitionnement de soluté entre la phase aqueuse et la surface du solide (précisément, avant qu'il y ait précipitation). Elle

est liée aux charges électriques à la surface de la matrice. Elle dépend de la surface spécifique du solide : plus la surface est grande, plus il y a de sites d'adsorption.

Les sites sont des zones chargées électriquement, c'est-à-dire des échangeurs d'ions. Comme exemple, citons :

- les minéraux argileux (où il peut y avoir substitution entre $\text{Si}^{4+} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+}$)
- la matière organique (origine humique, se dégrade en s'oxydant)
- les oxydes et les hydroxydes.

L'adsorption est un équilibre physicochimique régi par un coefficient de distribution K_d [m^3/kg] :

$$C_{aq} + X \rightleftharpoons C_{ads}$$

$$K_d = \frac{C_{ads}}{C_{aq}}$$

représentant l'équilibre de la quantité de soluté en phase aqueuse C_{aq} , la phase solide X et la quantité de soluté adsorbé C_{ads} .

Il convient cependant de constater le fait que cette constante est déterminée empiriquement. Elle n'est donc valable que pour les paramètres thermodynamiques de l'expérience. Souvent, la constante K_d reflète plusieurs processus spécifiques, dont la précipitation ou la co-précipitation de certains composés. Remarquons encore que K_d varie en fonction du pH et du Eh [Brouyère 2001].

En transport de chaleur, ces notions chimiques n'ont pas d'équivalent direct.

2.3.4 Effets d'eau immobile

La porosité totale n est différente de la porosité effective du transport n_{eff} , où circule l'eau : une partie de la porosité est fermée et inaccessible au transport de soluté (n_c), une autre encore contient de l'eau qui ne circule pas hors de cette zone (est immobile) tout en étant accessible (n_{im}). En effet, l'eau s'écoule dans les pores avec une vitesse variable, nulle par endroit. La porosité totale est donc divisée telle que $n = n_{eff} + n_{im} + n_c$ [Brouyère 2001]. Ceci est illustré à la figure 2.1.

Cette eau immobile est en équilibre diffusif avec le reste du réseau, elle constitue donc un réservoir à soluté dans certaines parties du réseau. Le logiciel SUFT3D permet de modéliser de diverses manières l'eau immobile, même si les modèles simplifiés développés dans la suite de ce travail négligent ce phénomène. En effet, la conduction est supposée se produire sur l'ensemble de la porosité, en transfert de chaleur les effets d'eau immobile sont donc négligeables.

2.3.5 Dégradation (des solutés)

De nombreuses réactions peuvent intervenir en milieu souterrain. Ces réactions peuvent avoir comme réactifs des solutés apportés par l'homme ou un phénomène naturel, l'oxygène dissous, les minéraux constituant la géologie... Une manière extrêmement simplifiée de considérer l'influence de ces réactions dans l'évolution des concentrations consiste à appliquer une

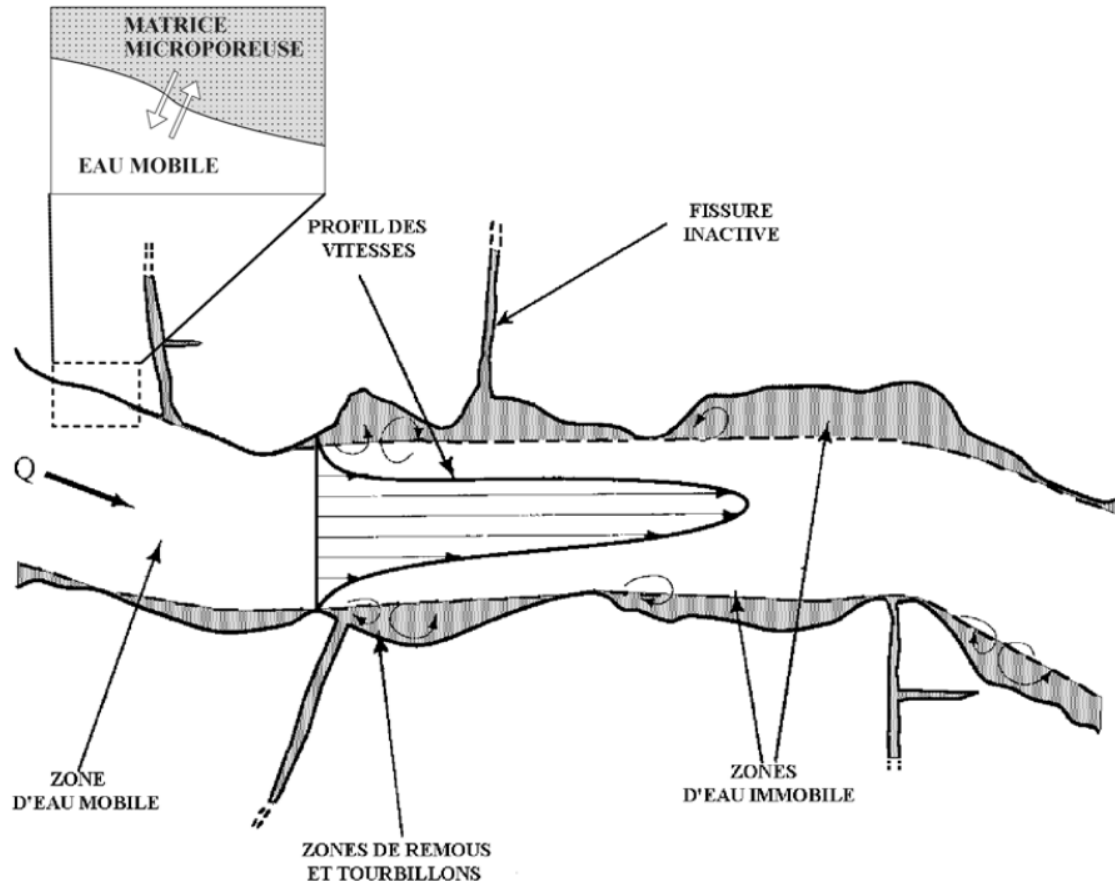


FIGURE 2.1 – Mobilité de l'eau et effets sur le transport de soluté, d'après Hallet 1999 in [Brouyère 2001]

relation de dégradation linéaire du réactif considéré :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C$$

où λ est un coefficient de dégradation linéaire en s^{-1} [Brouyère 2001]. La dégradation n'a pas d'équivalent en transfert de chaleur, du fait de la conservation de l'énergie. Éventuellement l'existence de réactions chimiques exo- ou endothermiques au sein du milieu pourrait être comparée à ce paramètre.

2.3.6 Conduction (thermique)

La conduction est la propagation de la chaleur par chocs entre les molécules. Elle ne dépend que du champ de chaleur au sein du milieu et des propriétés du milieu, non d'un déplacement de matière. Elle est régie par la *loi de Fourier* :

$$\vec{q}_{cond} = -\underline{\underline{\Lambda}} \cdot \vec{\nabla T}$$

où \vec{q} est le flux de chaleur par conduction [W] et $\underline{\underline{A}}$ est le tenseur de conductivité thermique du milieu [W/m-K]. Le flux de chaleur est ainsi dirigé de la zone où la température est la plus élevée vers la zone la plus froide [Fossoul 2009, Kreith et al. 2011, Jiji 2009].

Considérons un milieu n'échangeant de la chaleur qu'exclusivement par conduction. Si celui-ci est continu et incompressible, considérant que les particules qui le composent sont immobiles et qu'il n'y a pas de dispersion de chaleur mécanique, on peut écrire *l'équation de bilan de chaleur* d'un volume représentatif de ce milieu :

$$Q_v - \vec{\nabla} \bullet \vec{q}_{cond} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cette équation signifie que la différence entre, d'une part, le terme source de chaleur Q_v [J/m³] et, d'autre part, la chaleur qui entre ou sort du volumes de contrôle par conduction (la divergence de \vec{q}), correspond à la variation de température du milieu. c est la capacité calorifique spécifique du milieu [J/kg K] et ρ est la masse volumique de ce milieu [Molson et al. 1992, Patankar 1980]. La capacité calorifique (définie comme $c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$) peut être mesurée de deux manières : à pression constante (c_P , capacité calorifique isobare) ou à volume constant (c_V , capacité calorifique isochore). Pour les roches de la croute terrestre sous les 1000 K, la différence est faible entre les deux (moins de 1 %). Pour les roches et les sols de faible profondeur, la capacité calorifique isobare est préférée, et sera notée par la suite simplement c [Fossoul 2009].

Remarquons que c est la capacité calorifique des phases solide *et* liquide. Les températures de ces deux phases sont liées par un autre phénomène de conduction, cette fois-ci entre le liquide et le solide. Nous pouvons faire l'hypothèse que cet échange thermique est constamment à l'équilibre, du fait de la faible vitesse d'écoulement dans le milieu souterrain [Fossoul 2009]. Selon la loi de Kopp, la capacité calorifique d'un solide composé de plusieurs phases peut être calculée comme la moyenne arithmétique des capacités calorifiques de chaque phase pondérées par leur fraction massique. De manière similaire, on peut considérer que la capacité calorifique c_m d'une roche contenant de l'eau correspond à la moyenne arithmétique entre la capacité calorifique de la matrice solide ($\rho_s c_s$) et des phases liquides :

$$c_m = \frac{1}{\rho_m} [(1 - n) \rho_s c_s + n \sum_{j=1}^{N \text{ fluides}} S_j \rho_j c_j]$$

les capacités calorifiques sont ici pondérées par la porosité n et la saturation partielle en fluide S_j pour le fluide de phase j . Vu la très faible masse volumique des phases gazeuses comparées à celles de la matrice solide et des liquides, la contribution de la phase gazeuse est souvent négligée [Fossoul 2009]. Dans l'étude d'un aquifère, l'équation devient alors simplement :

$$c_m = \frac{1}{\rho_m} [(1 - n) \rho_s c_s + n S \rho_w c_w]$$

où la saturation S vaut 1 en milieu saturé.

Remarquons encore concernant ce point que $\Lambda_m = f(\Lambda_w, \Lambda_s \dots)$ peut être estimé par une moyenne pondérée, comme pour c_m , mais que de nombreuses autres lois ont été développées pour cette propriété, certains faisant intervenir une moyenne géométrique

$$\Lambda_m = (\Lambda_w)^n \cdot (\Lambda_s)^{1-n}$$

où n est la porosité [Fossoul 2009, Clauser 2003].

2.3.7 Convection naturelle (thermique)

La convection naturelle est générée par la différence de densité des fluides liée à leur température. Plus la température du fluide est élevée, plus il se dilate, sa masse volumique baisse et un mouvement de fluide vertical devient possible, une remontée d'eau chaude et une descente d'eau froide au sein de la nappe. Le mouvement de l'eau s'accompagne naturellement d'un transport de chaleur. Néanmoins, ce mouvement est à relativiser vis-à-vis de l'advection (aussi appelée convection forcée), issue de la différence de hauteur piézométrique. De manière générale, l'advection sera plus importante que la convection [Fossoul 2009].

L'importance du processus de convection naturelle peut être également comparée à la conduction grâce au nombre de Rayleigh (Ra). Lorsque le nombre de Rayleigh est supérieur à un nombre critique, le phénomène de convection prédominera sur la conduction.

Considérons un milieu poreux d'une épaisseur h , saturé en fluide, dont la frontière inférieure est chauffée (problème de Horton-Gogers-Lapwood) ; ceci correspond à un cas simplifié d'aquifère dans la croûte terrestre. Le nombre de Rayleigh adapté à ce cas se formule

$$Ra = \frac{\alpha K h}{\kappa} \Delta T$$

où α est le coefficient d'expansion thermique du fluide [K^{-1}] (pour l'eau, il vaut $2,07 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ à $20^\circ C$ [Fossoul 2009]), K la conductivité hydraulique verticale de la roche [m/s], ΔT la différence de température entre le bas de l'aquifère et le haut [K] et κ la diffusivité thermique du milieu poreux [m^2/s] [Nield et al. 2006]. Cette dernière est une autre variable caractérisant la conduction, elle correspond à la vitesse de pénétration et d'atténuation d'une onde thermique dans le milieu poreux [Fossoul 2009] et est :

$$\kappa = \frac{\Lambda_m}{\rho_m \cdot c_m}$$

La conductivité thermique est le principal paramètre décrivant le phénomène de conduction, mais la capacité calorifique tend à amortir la propagation de la chaleur.

Selon le problème évoqué précédemment, on peut évaluer un nombre de Rayleigh critique dans le massif poreux : si $Ra < 4\pi^2 \approx 39,47$, la conduction prédomine sur le phénomène de convection ; si $Ra > 4\pi^2$ ce sera naturellement le contraire [Nield et al. 2006, Fossoul 2009]. Qu'en est-il des aquifères que nous comptons modéliser ? Selon les paramètres développés dans le modèle simplifié du chapitre 3, considérons le massif : $K = 5 \cdot 10^{-6} m/s$, $\Lambda_m = 3 W/m \cdot K$, $C_m = \rho_m \cdot c_m = 2,3 MJ/m^3 \cdot K$, la hauteur totale d'un puits h étant de 500 m. On calcule $Ra =$

$\frac{2,07 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 500}{1,304 \cdot 10^{-6}} \Delta T = 0,396 \cdot \Delta T$. Pour que la conduction domine, c'est-à-dire $Ra < 4\pi^2$, il faut donc que $\Delta T < \frac{4\pi^2}{0,396} = 99,7 \text{ K}$, ce qui est évidemment toujours réalisé.

Dans le cas du puits, qui a la forme d'un cylindre très allongé, le nombre critique de Rayleigh est beaucoup plus élevé. Dans le cas d'un puits ouvert (conductivité infinie), il est estimé par

$$Ra_c = \frac{215,6}{\delta^4} (1 + 3,84\delta^2) = 842 \cdot 10^9$$

où $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ est le ratio entre le rayon du puits et sa longueur, soit r/h [Hamm et Sabet 2010].

Cette fois, le nombre de Rayleigh s'obtient à l'aide de la formule suivante :

$$Ra = \frac{\alpha g h^3 \cdot \Delta T}{\nu \kappa} = 1,769 \cdot 10^{18} \Delta T$$

où α est le coefficient d'expansion thermique de l'eau ($2,07 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), g l'accélération gravifique, h la hauteur du puits (500 m), ν la viscosité dynamique de l'eau ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), κ la diffusivité thermique de l'eau ($143,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, calculée sur base de la conductivité thermique de l'eau, $0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [Fossoul 2009], de sa capacité calorifique, $4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, et de sa masse volumique de 1000 kg/m^3) et ΔT la différence de température. Pour que la conduction domine, il faudrait que la différence de température entre le haut et le bas du puits soit naturellement

$$\Delta T < \frac{842 \cdot 10^9}{1,769 \cdot 10^{18}} = 476 \cdot 10^{-9} \text{ K}$$

ce qui n'est évidemment jamais le cas. La convection sera donc dominante au sein du puits. Toutefois, dans le cas d'un puits remblayé, le mouvement de l'eau se fera plus difficilement. De plus, le transfert par advection est généralement bien plus important que la convection naturelle. Enfin, les méthodes utilisées ne permettent pas de modéliser la convection au sein du puits. Il faut donc faire l'hypothèse que l'effet de cette convection au sein du puits est faible a priori, mais en relativisant par la suite les résultats obtenus.

2.3.8 Comparaison des équations de transport de chaleur et de soluté

Nous avons pu observer dans les précédentes sections la similitude entre le transport de soluté et le transfert de chaleur, de nombreux processus étant identiques (advection, dispersion, diffusion, effet d'eau immobile) tandis que d'autres suivent des lois similaires. L'équation de transfert de chaleur s'obtient en additionnant les effets des différents processus [Patankar 1980, Molson et al. 1992, Fossoul 2009] :

$$\rho_m c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[(\Lambda_m + n \rho_w c_w D_{diff} + n_e \rho_w c_w \underline{\underline{D_{disp}}}) \cdot \vec{\nabla} T \right] - \vec{\nabla} \cdot (n_e \rho_w c_w \vec{v}_e T) + q^*$$

où T est la température du milieu (liquide et solide), ρ_m la masse volumique du milieu, c_m sa capacité calorifique, Λ_m sa conductivité thermique, n sa porosité totale, n_e la porosité effective, D_{diff} le coefficient de diffusion moléculaire effectif dans l'eau, $\underline{\underline{D_{disp}}}$ le tenseur de dispersion

thermomécanique, \vec{v}_e la vitesse d'écoulement et q^* un débit d'extraction ou d'injection de chaleur $[W/m^3]$.

On peut considérer que la diffusion est active dans la porosité totale. Le terme de dispersion est généralement suffisamment faible pour pouvoir combiner les termes de diffusion et dispersion afin de former un unique tenseur de dispersion thermodynamique effective totale $\underline{\underline{D}} = D_{diff}\underline{\underline{I}} + \underline{\underline{D}}_{disp}$ (Alain Dassargues, com. pers.). On peut alors réécrire l'équation précédente sous la forme :

$$\frac{\rho_m c_m}{n_e \rho_w c_w} \cdot n_e \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \bullet \left[n_e \left(\frac{\Lambda_m}{n_e \rho_w c_w} + \frac{n}{n_e} \cdot \underline{\underline{D}} \right) \bullet \vec{\nabla} T \right] - \vec{\nabla} \bullet n_e \vec{v}_e T + \frac{q^*}{\rho_w c_w} \quad (2.4)$$

L'équation de bilan de transport de soluté en milieu poreux saturé, en régime transitoire et masse volumique constante [Dassargues 2014a, Dassargues 2014b, Fossoul 2009] est :

$$R n_e \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = \vec{\nabla} \bullet \left(n_e \underline{\underline{D}}_h \bullet \vec{\nabla} C \right) - \vec{\nabla} \bullet n_e \vec{v}_e C + C' q' - n_e \lambda C R \quad (2.5)$$

où C représente la concentration de l'aquifère tandis que C' est la concentration du fluide de sollicitation extérieur dont le débit est q' $[s^{-1}]$ (positif en pompage) et dont la masse volumique est identique à celle de la solution initiale. Remarquons tout de même qu'en pompage, $C' = C$. Le coefficient de retard est $R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n_e}$, c'est un nombre adimensionnel. Enfin, $\underline{\underline{D}}_h$ $[m^2/s]$ est le tenseur de dispersion hydrodynamique, qui regroupe les phénomènes de dispersion mécanique et diffusion moléculaire, comme dans le cas du transfert de chaleur évoqué ci-dessus. Cette équation qui néglige les effets d'eau immobile n'est valide que sous l'hypothèse que la porosité totale est assimilable à la porosité effective pour le terme de diffusion moléculaire.

La similarité de la forme des équations 2.4 et 2.5 est évidente. Nous pouvons ainsi faire correspondre les termes de la première afin de la résoudre par un code créé pour la seconde.

2.3.8.1 Terme d'accumulation (sorption / désorption et équilibre thermique)

Le facteur de retard, décrivant la sorption et la désorption du soluté sur la matrice, est équivalent au facteur représentant le rapport entre les capacités thermiques de la matrice et de l'eau. Ainsi, comparant les deux équations de bilan,

$$R \leftrightarrow \frac{\rho_m c_m}{n_e \rho_w c_w}$$

On peut en déduire la valeur équivalente du coefficient de partitionnement solide-liquide $K_d = C_s / \rho_w C_w$:

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n_e} \leftrightarrow \frac{\rho_m c_m}{n_e \rho_w c_w}$$

et donc

$$K_d \leftrightarrow \frac{\rho_m c_m}{\rho_w c_w \rho_b} - \frac{n_e}{\rho_b}$$

2.3.8.2 Terme diffusif (Diffusion, dispersion et conduction)

Nous avons pu voir dans les sections 2.3.2 et 2.3.6 que les phénomènes de diffusion, dispersion et de conduction suivent une loi de type $y = a \overrightarrow{\nabla} x$, aussi appelée loi de Fick. Nous pouvons donc les relier afin de faire correspondre la dispersion hydrodynamique thermique et la convection à la dispersion hydrodynamique chimique. Ainsi,

$$\underline{\underline{D_{soluté}}} \leftrightarrow \frac{n}{n_e} \cdot \underline{\underline{D_{thermique}}} + \frac{\Lambda_m}{n_e \rho_w c_w}$$

2.3.8.3 Advection et terme de source

Comme vu précédemment, le phénomène d'advection en transport de soluté et en transfert de chaleur est identique, la correspondance est donc immédiate. Le terme de source est écrit de façon différente dans les deux cas, mais nous pouvons aisément reformuler celui correspondant à l'équation de chaleur :

$$\frac{q^*}{\rho_w c_w} = T' \cdot q'$$

où $q^* [\text{W}/\text{m}^3]$ est un terme de source thermique alors que $q' [\text{s}^{-1}]$ correspond à un flux d'eau à une température T' . La correspondance entre les terme $C' q'$ et $T' q'$ est alors évidente.

2.3.8.4 Dégradation

Enfin, la dégradation n'a pas d'équivalent en transport de chaleur, car la consommation ou la production de chaleur au sein du milieu n'est pas envisagée. Les éventuelles réactions chimiques sont négligées, et la constante λ sera donc nulle.

2.3.9 Conditions aux limites

L'équation différentielle de bilan de transport (équations 2.4 et 2.5) nécessite des conditions aux limites pour être résolue. Elles sont identiques à celles développées pour l'écoulement (section 2.2.4), si ce n'est que la variable considérée n'est plus la hauteur piézométrique mais bien la température pour le transfert de chaleur (ou la concentration dans le cas du transport de soluté). Ainsi, de manière similaire, la condition de Dirichlet

$$T = T_D(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}$$

consiste à imposer la température T_D sur la frontière \mathcal{B} .

La condition de Neumann impose un flux de chaleur q_N sur la frontière \mathcal{B}_N , soit

$$-\vec{n} \bullet (-n_e \underline{\underline{D}} \bullet \overrightarrow{\nabla} T) = q_N(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}_N$$

où \vec{n} est le vecteur normal à la frontière, n_e la porosité effective du milieu, $\underline{\underline{D}}$ le tenseur de dispersion et diffusion.

La condition de Cauchy définie sur la frontière \mathcal{B}_C est définie par le flux q_C . Elle fait en plus intervenir la vitesse de Darcy (débit spécifique) \vec{v}

$$-\vec{n} \bullet \left(\vec{v}T - n_e \underline{D} \bullet \vec{\nabla} T \right) = q_C(x_b, y_b, z_b, t) \text{ sur } \mathcal{B}_C$$

Enfin, la condition de Fourier telle qu'utilisée dans SUFT3D impose une concentration pour le flux d'eau entrant dans le domaine grâce à une condition de Fourier en écoulement. Elle agit donc comme une condition de Cauchy dont le flux est déterminé par la condition de Fourier en écoulement.

2.3.10 Type de réservoir et transport de chaleur / de soluté

Nous avons évoqué l'utilisation des réservoirs linéaires et des réservoirs linéairement distribués dans la section 2.2. Un élément linéaire ne considérera qu'une seule valeur de concentration (moyenne) sur l'ensemble de son volume. Suivant la même logique, dans un réservoir linéaire distribué, les cellules sont autant de réservoirs linéaires se déversant les uns dans les autres. Pour le réservoir linéaire distribué, les équations décrites ci-dessus s'appliquent également. A l'heure actuelle dans SUFT3D, seul le phénomène d'advection est pris en charge entre les différents sous-domaines (déterminé par le flux d'eau calculé par la résolution des équations d'écoulement). Un développement futur devrait permettre l'ajout d'un paramètre correspondant à la diffusion entre les sous-domaines.

2.4 Implémentation des équations dans SUFT3D

Les équations précédentes sont implémentées dans SUFT3D avec la méthode des éléments finis avec volumes de contrôle, c'est-à-dire qu'autour de chaque nœud est considéré un volume fini. Le couplage éléments finis et volumes finis permet d'utiliser les équations de conservation des volumes finis avec les avantages numériques des méthodes éléments finis. Les autres types de fonctionnement (réservoirs linéaires simples ou distribués) consistent à remplacer par des moyennes sur le réservoir les fonctions de base des éléments finis (qui lient la valeur de la variable dans l'élément aux variables aux nœuds). Sans entrer dans trop de détails, nous allons décrire brièvement les calculs effectués par le code.

2.4.1 Équation d'écoulement

SUFT3D possède de nombreuses options, permettant par exemple de prendre en compte l'écoulement en milieu non saturé et les effets gravitaires (liés à la différence de masse volumique de la phase fluide). Dans un souci de lisibilité et vu que nous n'utilisons pas ces paramètres, les équations suivantes sont dépourvues des termes et facteurs correspondants. Pour plus d'informations, vous pouvez consulter [Brouyère 2001] où sont décrites les équations en annexe.

Considérons la discrétisation de la pression sur un élément approximée par la somme pondérée des hauteurs manométriques de l'ensemble des nœuds de l'élément :

$$h \approx h^* = h_j(t)N_j(x, y, z)$$

où h_j est l'amplitude de la hauteur manométrique au nœud j et N_j la fonction de base.

Sous forme matricielle, après avoir défini le résidu et avoir forcé le résidu pondéré à zéro, l'équation de bilan (équation 2.3) à résoudre a la forme

$$[M]\left\{\frac{dh}{dt}\right\} + [S]\{h\} = \{Q\} + \{B\}$$

où

$\left\{\frac{dh}{dt}\right\}$ et $\{h\}$ sont des vecteurs colonnes contenant les valeurs de $\frac{dh}{dt}$ et h respectivement, la hauteur piézométrique sur chaque nœud.

$[M]$ est la matrice correspondant au terme de stockage. Les termes la composant sont

$$M_{ij} = \sum_{e \in E} \int_{V_e} N_i S N_j dV$$

où V_e est la région de l'élément e , E l'ensemble des éléments correspondant à la face globale ij et N_i est la $i^{\text{ième}}$ fonction de base de l'élément e .

$[S]$ est la matrice de rigidité provenant de la conductivité. De manière similaire à $[M]$,

$$S_{ij} = \sum_{e \in E} \int_{V_e} \overrightarrow{\nabla N_i} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \overrightarrow{\nabla N_j} dV$$

$\{Q\}$, et $\{B\}$ sont les vecteurs de charge relatifs respectivement au terme source / puits et aux conditions aux limites. Ainsi,

$$Q_i = \sum_{e \in E} \int_{V_e} N_i q dV$$

et

$$B_i = - \sum_{e \in Se} \int_{B_e} N_i \vec{n} \bullet \left[-\underline{\underline{K}} \bullet \left\{ \overrightarrow{\nabla h} + \overrightarrow{\nabla z} \right\} \right] dB$$

où Se est l'ensemble de segments frontières qui correspondent au nœud global i , et où B_e est la longueur du segment frontière e [Yeh et al. 1993].

La méthode utilise des volumes de contrôle (en abrégé, CVFE pour *control volume finite elements*). L'idée est d'ajouter une condition de symétrie pour les flux entre les nœuds. Ainsi, le flux allant du nœud i au nœud j est égal à l'opposé du flux de j vers i : $\overrightarrow{f_{i \rightarrow j}} = -\overrightarrow{f_{j \rightarrow i}}$. On peut alors définir le gradient entre deux nœuds par $grad_{JI} = (h_J + z_J) - (h_I + z_I)$ et

l'équation finalement utilisée pour l'élément i est

$$[M] \left\{ \frac{h_i}{\Delta t} \right\} + \sum_{j \in \eta_i} \text{grad}_{ji}[S] = -[RQ] + \{B\}$$

où η_i représente l'ensemble des nœuds connectés au nœud i , avec

$$[M] = \int_V S_s N_i N_j dV$$

$$[S] = \int_V \overrightarrow{\nabla N_i} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \overrightarrow{\nabla N_j} dV$$

$$[RQ] = \int_V \left[\overrightarrow{\nabla N_i} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \overrightarrow{\nabla z} + q N_i \right] dV$$

et $\{B\}$ contenant les conditions aux limites du problème. Nous utilisons la formulation upstream, c'est-à-dire que pour chaque paire de nœuds, la conductivité utilisée est celle définie au nœud amont par rapport à l'écoulement [Brouyère 2001].

La vitesse de Darcy se calcule naturellement en calculant les dérivées de h :

$$\overrightarrow{v} = -\underline{\underline{K}} \bullet \left(\overrightarrow{\nabla N_j} h_j + \overrightarrow{\nabla z} \right)$$

Malheureusement, cette formulation donne un champ de vitesse qui est discontinu aux frontières et aux points nodaux où la variation de h n'est ni linéaire ni constante. Il faut alors appliquer la méthode des éléments finis de Galerkin. Pour chaque dimension (x, y, z) , on peut trouver pour les composantes V_x, V_y, V_z du flux de Darcy une équation du type

$$[T]\{V_x\} = \{D_x\}$$

où la matrice $[T]$ et les vecteurs de charge $\{D_x\}$ sont donnés par

$$T_{ij} = \sum_{e \in E_{Re}} \int N_i N_j dR$$

et

$$D_{xi} = - \sum_{e \in E_{Re}} \int N_i \overrightarrow{I} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \left\{ \overrightarrow{\nabla(h+z)} \right\} dB$$

où \overrightarrow{I} est le vecteur identité [Yeh et al. 1993].

Par la suite, les fonctions de base étant définies dans les coordonnées locales de l'élément, il convient d'effectuer le changement de repère (global vers local) afin de résoudre les intégrations utilisées ci-dessus. Nous ne résolvons l'équation d'écoulement que dans le cas d'un régime stationnaire, mais le code est également capable de la résoudre pour un régime transitoire, utilisant les différences finies pour la dimension temporelle.

Intéressons-nous maintenant aux conditions aux limites. Les conditions de Dirichlet sont implémentées simplement en fixant la valeur de $h_i = h_D$ pour tout i correspondant aux nœuds où est appliquée la condition. Les autres conditions sont définies par des flux, et donc correspondent au vecteur de charge $\{B\}$. Ainsi, pour attribuer une condition de Cauchy à une face d'un élément e , on construira un vecteur colonne $\{B_C^e\} = \{q_C^e\}$ où les différentes valeurs de $\{q_C^e\}$ sont données par

$$q_{Ci} = - \int_{B_e} N_i q_c dB$$

Le vecteur de la condition aux limites de Cauchy représente le flux normal passant au travers de deux nœuds sur le segment B_e . De manière similaire, la condition de Neumann fonctionnera également pour chaque élément e comme un vecteur $\{B_N^e\} = \{q_N^e\}$ dont le flux, indépendant de h , vaut [Yeh et al. 1993] :

$$q_{Ni} = \int_{B_e} \left(N_i \vec{n} \bullet \underline{\underline{K}} \bullet \vec{\nabla} z - N_i q_N \right) dB$$

En ce qui concerne les conditions de Fourier, celles-ci se séparent en deux termes : $q = \alpha(h - h_L) = \alpha h - \alpha h_L$. Le premier terme faisant intervenir la variable h , il est intégré dans la matrice $[M]$. Le second terme génère un vecteur de charge $\{B_F^e\} = \{q_F^e\}$ similaire à celui de Cauchy tel que :

$$q_{Fi} = \int_{B_e} N_i \alpha h_L dB$$

L'assemblage du vecteur $\{B\}$ final se fait en additionnant tous les vecteurs $\{B_C^e\}$, $\{B_N^e\}$ ou $\{B_F^e\}$ relatifs à tous les éléments [Yeh et al. 1993].

2.4.2 Équation de transport

Dans le phénomène de transport, nous ne travaillerons qu'en milieu saturé et négligerons les effets d'eau immobile, comme dans l'équation 2.5.

Considérant la discrétisation des variables de concentration

$$C \approx \omega_{tc} C_{n+1} + (1 - \omega_{tc}) C_n$$

et

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{n+1} - C_n}{\Delta t}$$

où $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ dont n est le pas de temps, ω_{tc} est le coefficient de pondération temporelle de l'équation de transport ($\omega_{tc} = 1$ correspond au schéma implicite alors que $\omega_{tc} = 0$ est le schéma explicite), le système à résoudre prend la forme

$$[M] \left\{ \frac{C_{n+1} - C_n}{\Delta t} \right\} + ([A] + [D] + [L] + [K_1]) \{ \omega_{tc} \{ C_{n+1} \} + (1 - \omega_{tc}) \{ C_n \} \} + \{ Q \} + \{ B \} = 0$$

Les différents termes de l'équation précédente sont :

$$\begin{aligned}
[M] &= \int_{V_e} N_i n_e R N_j dV \\
[A] &= \int_{V_e} N_i \vec{v}_e \bullet \overrightarrow{\nabla N_j} dV \\
[D] &= \int_{V_e} \overrightarrow{\nabla N_i} \bullet \left(n_e \underline{\underline{D_h}} \right) \bullet \overrightarrow{\nabla N_j} dV \\
[L] &= \int_{V_e} N_i q N_j dV \\
[K_1] &= \int_{V_e} N_i \left(\lambda R n_e - S \frac{\partial h}{\partial t} \right) N_j dV \\
\{Q\} &= - \int_{V_e} N_i q C^* dV
\end{aligned}$$

et enfin $\{B\}$ contient les contributions des conditions aux limites [Brouyère 2001]. De manière générale, le vecteur des conditions frontières est défini par :

$$B_i = \int_{B_e} N_i \vec{n} \bullet -n_e \underline{\underline{D_h}} \bullet \overrightarrow{\nabla C} dB \quad (2.6)$$

On peut dès lors faire correspondre l'intérieur de l'intégrale avec la définition des conditions aux limites telle qu'exprimée au point 2.3.9. Pour la condition de Neumann, on a directement

$$B_{Ni} = q_{Ni} = - \int_{B_e} N_i q_N dB$$

La condition de Cauchy s'obtient en introduisant le flux de Darcy dans l'équation 2.6. La condition de Cauchy est de la forme $\{B_C\} = \{q_C\} + [V_C]\{C\}$ dont les termes sont définis par le système suivant :

$$\begin{cases} q_{Ci} &= - \int_{B_e} N_i q_C dB \\ V_{Cij} &= \int_{B_e} N_i \vec{n} \bullet \vec{v} N_j dB \end{cases}$$

La condition de Fourier utilisée en transport s'obtient en introduisant dans la condition de Cauchy ci-dessus un flux massique proportionnel au flux d'eau calculé par la condition de Fourier en écoulement correspondante. Ainsi, l'eau qui entre dans le domaine est à une concentration C_{in} imposée. Il est impossible d'imposer une concentration lorsque l'eau quitte le domaine : elle le quitte à sa concentration propre.

La construction du vecteur $\{B\}$ se fait par addition des conditions aux limites des différents éléments. On obtient alors une équation de la forme $\{B\} = \{q\} + [V]\{C\}$. Les conditions de

Dirichlet correspondent à une identité dans le vecteur $\{C\}$ comme pour l'écoulement [Yeh et al. 1993].

Par la suite, nous résoudrons généralement les équations d'écoulement en milieu souterrain par la méthode des éléments finis avec volumes de contrôle, et le transport de soluté par des équations similaires aux éléments linéairement distribués (mixing cell), ce qui est mathématiquement équivalent aux éléments finis avec full upwind [Orban 2009].

2.5 Équations d'écoulement résolues avec EPANET

EPANET est un logiciel d'écoulement en conduites. Dans cette section, l'écoulement qui est observé est limité à l'intérieur des galeries, ou à une zone assimilable à une galerie. Un modèle EPANET est un réseau composé de points reliés par des liens. Les points peuvent être des jonctions, des réservoirs, des « tanks », des émetteurs ; les liens sont des tuyaux, munis ou non de pompes et de valves. Le logiciel permet une estimation du transport de contaminants, désignés par « qualité de l'eau ».

2.5.1 Éléments utilisables dans EPANET

2.5.1.1 Nœuds

Jonction

Les jonctions sont les points du réseau où les liens se rejoignent et où l'eau entre ou sort dudit réseau (terme de source / perte). Sur base de l'élévation (topographie), de la demande (terme source / perte sur le réseau) et de la qualité initiale de l'eau, le logiciel peut calculer à chaque jonction la hauteur piézométrique, la pression et la qualité de l'eau, pour chaque pas de temps. Notons qu'un nœud correspondant à une source dans la galerie peut également être porteur d'indications sur la qualité. Le flux associé à la source peut être variable en fonction du temps, de la pression, etc [Rossman 2000]. Les conditions d'impositions de flux sont une transposition des conditions de Neumann.

Réservoir

Les réservoirs sont des points qui représentent une source ou une perte externe infinie, dont la hauteur piézométrique est fixe. Dans un modèle d'écoulement en conduites, ils peuvent représenter des lacs, des rivières, des aquifères, ou des liaisons vers d'autres systèmes dont la hauteur piézométrique ainsi que la qualité de l'eau sont fixes. Cet élément n'est pas influencé par ce qui se passe dans le réseau.

Le modèle simplifié créé avec l'aide de Virginie Harcouët-Menou n'utilise que ces deux types de points. Cependant, il peut être intéressant de mentionner l'existence de deux autres types de nœuds :

Tank

Un tank est un point possédant une capacité de stockage, dont le volume d'eau stockée

peut varier en fonction du temps. Ses paramètres d'entrée sont l'élévation du fond, le diamètre (considérant l'objet comme cylindrique) ou d'autres paramètres de taille pour en déterminer le volume, les niveaux d'eau initiaux, minimum et maximum et la qualité de l'eau initialement contenue. Le logiciel calcule pour tout temps la hauteur piézométrique et la qualité de l'eau qu'il contient. Si le niveau d'eau est au maximum ou au minimum, aucun flux, respectivement entrant ou sortant du tank, ne sera possible.

Émetteurs

Une sortie du réseau vers l'atmosphère, comme un sprinkler ou un système d'arrosage, est représentée par un point appelé un émetteur. Dans ce cas, le débit qui le traverse est lié à la pression par une équation non linéaire :

$$q = C p^\gamma$$

où q est le flux d'eau traversant l'émetteur, C le coefficient de décharge, p la pression et γ un exposant empirique, par exemple 0,5 dans le cas d'un sprinkler. Les émetteurs peuvent aussi être utilisés pour simuler une fuite dans un tuyau, ou plus généralement un flux lié à une pression minimale résiduelle.

2.5.1.2 Tuyaux

Les tuyaux sont des liens conduisant l'eau d'un point à un autre, du point possédant la plus grande hauteur piézométrique vers la plus petite. Les paramètres d'entrée sont naturellement les nœuds (départ et arrivée), le diamètre et la longueur du tuyau, le coefficient de rugosité et un statut (ouvert, fermé, contient-il une valve ? Si oui, elle peut être une simple fermeture ou un anti-retour), les coefficients de réaction relatifs à la paroi du tuyau et au milieu. Le logiciel calcule un flux, une vitesse, les pertes de charge, le coefficient de friction de Darcy-Weisbach, le taux moyen de réaction sur la longueur du tuyau et la qualité moyenne de l'eau sur la longueur du tuyau.

Trois formules sont implémentées dans EPANET pour déterminer la perte de charge :

- Hazen-Williams, une formule empirique très utilisée aux Etats-Unis, mais ne permettant que l'utilisation d'eau comme fluide,
- Darcy-Weisbach, qui est théoriquement plus correcte,
- Chézy-Manning, pour les écoulements à surface libre.

Les trois formules sont résolues par l'équation $h_L = A \cdot q^B$ où la perte de charge est h_L [m], le flux q [m³/s], A et B des paramètres dépendant de la loi. Les différents coefficients sont repris dans le tableau à la figure 2.2 [Rossman 2000].

La loi de Hazen-Williams est parfois préférée à la loi de Darcy-Weisbach pour sa simplicité, en particulier pour les écoulements d'eau en conduite ou pour les produits pétroliers. Elle s'écrit

$$Q = 9,0379 \cdot 10^{-8} \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot (P_{km}/Sg)^{0,54}$$

<i>Formula</i>	<i>Resistance Coefficient (A)</i>	<i>Flow Exponent (B)</i>
Hazen-Williams	$4.727 C^{-1.852} d^{-4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0252 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$4.66 n^2 d^{-5.33} L$	2
Notes: C = Hazen-Williams roughness coefficient ϵ = Darcy-Weisbach roughness coefficient (ft) f = friction factor (dependent on ϵ , d, and q) n = Manning roughness coefficient d = pipe diameter (ft) L = pipe length (ft) q = flow rate (cfs)		

FIGURE 2.2 – Coefficients utilisés par EPANET [Rossman 2000]

avec Q le flux [m^3/s], C la constante de rugosité de Hazen-Williams, D le diamètre interne du tuyau [mm], P_{km} la perte de charge liée à la friction [kPa/km] et Sg la densité du fluide [Menon 2015]. La constante de rugosité est basée sur des conditions « normales » de vitesse d'écoulement, soit environ 1 m/s. [Engineering toolbox 2016].

La loi de Darcy-Weisbach peut s'écrire

$$\Delta H = f \cdot \frac{L v^2}{2 d g}$$

où ΔH [m] est la perte d'un écoulement à la vitesse v [m/s] dans un tuyau de longueur L [m], de diamètre intérieur d [m] sous l'accélération gravifique g [m/s^2] [Valiantzas 2008, Gardin et Brouyère 2005]. Dans EPANET, le facteur f est calculé de différentes façons en fonction de l'écoulement, à savoir :

- pour un écoulement laminaire ($Re < 2000$), la formule de Hagen Poiseuille est utilisée,
- pour un écoulement complètement turbulent ($Re > 4000$), l'approximation de Swamee et Jain de l'équation de Colebrook-White
- pour un écoulement transitoire, une interpolation du diagramme de Moody.

La loi de Chézy-Manning se base sur l'équilibre des forces de gravité et de frottement. Elle est déterminée pour des écoulements permanents uniformes à surface libre, mais est parfois utilisé dans des contextes d'écoulements non-uniformes. Elle s'exprime généralement sous la forme $V = K \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$ où V est la vitesse moyenne du fluide, K le coefficient de rugosité de Manning, S la section mouillée, R le rayon hydraulique avec $R = S/P$, P le périmètre mouillé et i la pente (par hypothèse constante) [Degoutte 2017].

2.6 Équations de transport résolues dans EPANET

2.6.1 Advection

Le transport est effectué sur EPANET par une approche Lagrangienne (« *particule tracking* ») : l'intérêt porte sur le chemin parcouru par des particules du liquide dans le système de tuyaux et comment elles se mélangent entre chaque pas de temps. Ces pas de temps sont

plus petits que ceux utilisés pour calculer l'écoulement (typiquement le pas de temps pour le transport est de l'ordre de la minute, pour l'écoulement, de l'ordre de l'heure). On considère des segments d'eau, ne se chevauchant pas, remplissant l'ensemble des tuyaux. La méthode enregistre leur taille et leur concentration au fil du temps. Au fur et à mesure que la simulation avance dans le temps, les segments situés à une injection d'eau dans le réseau augmentent en taille, ceux situés près d'une sortie d'eau du réseau diminuent, alors que les segments intermédiaires restent inchangés en taille.

A chaque pas de temps, le contenu de chaque segment subit des réactions. Le suivi de la masse totale et du volume entrant à chaque nœud, ainsi que des positions de chaque segment est également mis à jour. Les nouvelles concentrations à chaque nœud sont alors calculées, en tenant compte des contributions des différentes sources externes. Enfin, un segment est créé à la fin de chaque lien qui recueille un flux provenant d'un nœud si la qualité du flux diffère de celle du dernier segment du lien, tenant compte de la tolérance fournie par l'utilisateur.

Au départ, chaque tuyau contient un seul segment dont la qualité est égale à la qualité initiale du nœud en amont. En cas d'inversion du flux, les particules sont réordonnées.

2.6.2 Mélange

EPANET permet de considérer le mélange de soluté dans un « tank », mais les modélisations du VITO n'utilisent pas cet outil.

2.6.3 Réactions

EPANET permet de modéliser des réactions au sein du fluide et entre le fluide et le tuyau. Les réactions au sein du fluide peuvent avoir lieu dans les tuyaux et les « tanks ».

2.6.3.1 Réaction au sein de fluide

EPANET modélise les réactions définies par un taux de réaction (R en $[kg/m^3s]$) dépendant de la concentration C $[kg/m^3]$:

$$R = K_b C^n$$

Cette réaction est déterminée par une constante K_b $\left[\frac{(kg/m^3)^{1-n}}{s} \right]$ et par l'ordre de la réaction n . K_b peut être mesurée empiriquement comme la pente du graphe $C(t)/C_0$ en échelle logarithmique [Rossman 2000], elle est similaire à la constante de dégradation λ évoquée pour SUFT3D. EPANET permet en outre de fixer une concentration limite (maximale ou minimale) telle que :

$$\begin{aligned} R &= K_b(C_L - C) \cdot C^{(n-1)} & \text{si } n > 0, K_b > 0 \\ R &= K_b(C - C_L) \cdot C^{(n-1)} & \text{si } n > 0, K_b < 0 \end{aligned}$$

2.6.3.2 Réaction sur la paroi

La réaction entre le fluide et la paroi du tuyau est estimée dans EPANET par l'expression $R = (A/V) K_w C^n$ où K_w est un coefficient correspondant au taux de réaction, comme K_b .

A/V correspond au rapport entre la surface de réaction et le volume, *i.e.* 4 divisé par le diamètre du tuyau. Dans ce cas, n ne peut être que 0 ou 1.

K_w est adapté automatiquement au régime d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds. Le seul paramètre entré par l'utilisateur *in fine* est un coefficient F empirique, tenant compte de la vitesse de réaction et de la rugosité de la paroi. Suivant la formule utilisée au point 2.5.1.2, le coefficient K_w sera défini par :

formule de perte de charge	K_w correspondant
Hazen-Williams	$K_w = F/C$
Darcy-Weisbach	$K_w = -F/\log(e/d)$
Chezy-Manning	$K_w = F \cdot n$

où C est le facteur d'Hazen-Williams, e la rugosité de Darcy-Weisbach, d le diamètre du tuyau, n le coefficient de rugosité de Manning [Rossman 2000]. Remarquons que la forme des équations utilisées ici pourrait être utilisée pour reproduire le phénomène de conduction thermique entre la paroi et le liquide. En effet, la loi de Newton du refroidissement décrit le transfert de chaleur d'un solide à un liquide q comme directement proportionnel à la différence de température entre le fluide T_∞ et le solide T_s : $q = h(T_s - T_\infty)$. Le coefficient de transfert de chaleur h dépend de la géométrie du milieu, des propriétés du fluide, du déplacement du fluide et dans certains cas de la différence de températures [Jiji 2009]. La plupart des paramètres énumérés ci-avant ou leurs équivalents sont bel et bien pris en compte par EPANET, ce qui pourrait permettre une utilisation dans le transfert de chaleur de manière empirique [Rossman 2000].

2.6.4 Logiciel modifié par le VITO

Pour des raisons de confidentialité, la méthode utilisée dans la version d'EPANET modifiée par le VITO ne pourra être décrite complètement. Deux phénomènes y sont modélisés : l'advection est une pseudo-conduction. Le facteur correspondant à cette pseudo-conduction avec l'encaissant a été estimé dans le cadre du projet Minewater, il est égal généralement à 0,002 dans le milieu souterrain. Celui-ci influence le taux de réaction qui correspond à l'échange de température avec l'encaissant.

Les modifications apportées à EPANET sont basées sur les travaux de Rodriguez et Diaz (2009), qui ont étudié le réchauffement de l'eau circulant dans une galerie hémicylindrique [Ferket et al. 2011]. Lorsque la température de la roche encaissante est différente de celle de l'eau entrant dans la galerie, la méthode consiste à diviser la galerie en section, et à déterminer le gain de température de l'eau pour chaque section traversée. Les équations présentées prennent notamment en compte la géométrie de la galerie, la conductivité du fluide et de la paroi rocheuse, et leurs capacités calorifiques respectives. On détermine ainsi un coefficient correspondant à la convection du fluide au sein de la galerie et un coefficient de transmission entre la paroi et le fluide [Rodriguez et Diaz 2009].

Cette méthode donne des résultats corrects dans les galeries sub-horizontales qui ne sont pas souvent entrecoupées de puits verticaux [Ferket et al. 2011].

Chapitre 3

Modélisations à l'aide des logiciels EPANET et SUFT3D

3.1 Modèle conceptuel

Le modèle que nous souhaitons étudier dans un premier temps est une simplification très importante d'une mine type. Afin de situer le modèle dans un cas concret, nous avons envisagé l'emplacement à Wérister, un ancien charbonnage sur les hauteurs de Liège, près de Beyne-Heusay. L'estimation du volume des vides à partir des données d'exploitations et son emplacement la rend intéressante pour une exploitation [Dembele 2015], selon les premiers critères de faisabilité développés à la section 1.5. La mine modélisée pourrait correspondre approximativement à la situation entre les puits de Soxhluse et de Wérister : deux puits distants d'un kilomètre, reliés par trois galeries principales aux niveaux -200, -350 et -500 m. Le schéma général peut être observé à la figure 3.1.

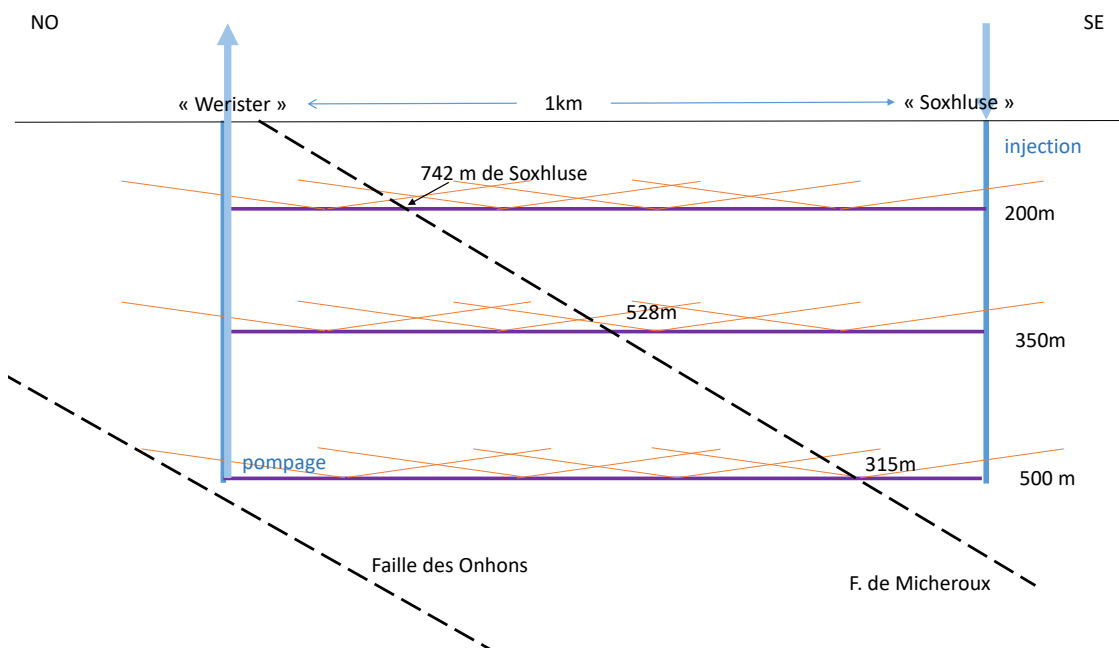


FIGURE 3.1 – Modèle conceptuel général des modélisations

3.1.1 Géométrie

Le massif est constitué d'un ensemble de roches du Houiller. Selon Wildemeersch (2010), qui a étudié un cas similaire, la conductivité considérée était de $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Nous supposons que les galeries principales, horizontales, sont ouvertes. Leur coupe forme un demi-cercle de diamètre égal à 5 m. Le rayon équivalent circulaire est donc de 1,76 m ; dans le cas d'un maillage carré la largeur des mailles équivalente est de 3,13 m.

Les puits verticaux sont considérés comme remblayés. Ils contiennent des graviers, dont la conductivité est estimée à 10^{-4} m/s. Leur porosité efficace est posée à 5 %. Ils sont circulaires, de diamètre de 4 m ; dans un maillage carré la largeur des mailles correspondante est de 3,54 m.

Une zone exploitée surplombe les galeries principales. Celle-ci est percée de galeries secondaires, d'une longueur de 100 m pour une pente moyenne de 1,5 %. Elles seraient hautes de 0,6 m pour 2 m de large. Nous supposons qu'elles ont été foudroyées ou qu'elles se sont effondrées de manière naturelle. La porosité efficace est fixée à 5 % pour la zone du massif déconsolidé qui les entourait.

Nous avons également repéré plusieurs failles qu'il peut être intéressant de modéliser. Elles ont un pendage de 35° vers le Sud Est (Soxhluse). Le massif schisto-gréseux du Houiller devrait se fracturer en un mélange de schistes fracturés, d'argiles et de sables. La conductivité de ces zones est posée à 10^{-5} m/s dans le plan de faille. La disposition des failles et des galeries permettent d'estimer leurs intersections, représentées à la figure 3.1 avec la distance séparant cette intersection du puits de Soxhluse. L'emplacement des failles se base sur les travaux d'Émile Humblet (1941).

L'écoulement est produit par des forages dans les anciens puits (remblayés). Le pompage a lieu à partir de la base du puits de Werister (niveau -500), l'injection a lieu au sommet du puits de Soxhluse à la cote 0. Nous ne travaillerons qu'en milieu saturé : la hauteur piézométrique imposée aux frontières éventuelles du bedrock sera supérieure ou égale à l'altitude 0 (plafond de l'aquifère).

Nous négligeons donc volontairement plusieurs facteurs qui pourraient influencer l'écoulement au sein du site de Werister. Les formations secondaires recouvrant le houiller (mort terrain) ne sont pas représentées, ni la topographie. L'emplacement géoréférencé des galeries nécessiterait des recherches bibliographiques importantes qui dépassent le but de ce travail. D'un point de vue géologique, le Houiller est considéré comme homogène alors qu'il est en réalité composé d'une alternance de couches de grès, de charbon et de schistes, le tout étant plissé [Boulvain 2017]. En réalité, la conductivité ne devrait donc pas être homogène, même si nous pouvons supposer sans gros risque d'erreur que ces différences de conductivités n'ont qu'une faible influence sur l'écoulement en comparaison avec des galeries ouvertes et des zones foudroyées.



FIGURE 3.2 – Modèle de maison type réalisé avec SketchUp

3.1.2 Débits

Il faut, avant toute modélisation, déterminer un débit réaliste correspondant à une situation d'exploitation. Nous postulons donc que le but de cette exploitation serait d'alimenter en chaleur un nouveau quartier d'une cinquantaine d'habitations.

Ces habitations sont isolées suivant les normes modernes (K45) [DGO4 2017b], sans être basse énergie ou passives. Considérons une habitation type : ses dimensions sont de 8 m de largeur, 15 m de longueur et 6 m de hauteur, plus un grenier sous le toit que nous considérons comme non-habité et isolé du reste de l'habitation. Pour mieux se rendre compte des volumes, le lecteur trouvera à la figure 3.2 un modèle réalisé sous SketchUp reprenant ces dimensions.

Le volume total de la surface chauffée est alors $8 \cdot 15 \cdot 6 = 720 \text{ m}^3$ pour une surface d'échange avec l'extérieur de $2 \cdot 6 \cdot 8 + 2 \cdot 6 \cdot 15 + 2 \cdot 8 \cdot 15 = 516 \text{ m}^2$. Grâce au fichier Excel développé par l'UCL pour vérifier le dimensionnement des chaudières sur le site Énergie Plus [UCL 2016], il est possible d'estimer la puissance P qui sera nécessaire pour chauffer le bâtiment. Pour un emplacement situé sur les hauteurs de Liège, la puissance nécessaire est de 15 kW. L'ensemble du lotissement demandera donc 750 kW.

La chaleur spécifique de l'eau à température ambiante est d'environ $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Considérant que l'eau est refroidie de 5°C (ΔT) dans la pompe à chaleur, sans tenir compte de l'énergie électrique utilisée par la pompe, nous pouvons estimer le flux d'eau nécessaire au chauffage du lotissement :

$$Q = \frac{P}{\Delta T c_w \rho_w} = \frac{750}{5 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 35,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

soit un débit volumique d'environ $130 \text{ m}^3/\text{h}$.

Pour simplifier le problème, nous considérons que l'écoulement se fait en régime permanent (sans variation de débit ni de phase transitoire).

3.2 MODÈLE EPANET

EPANET est un logiciel d'écoulement en conduites, développé par l'agence de protection environnementale des États-Unis. Comme développé à la section 2.6, le VITO en utilise une version modifiée pour modéliser deux processus de transport de chaleur : l'advection et la conduction de chaleur entre le massif et le fluide présent dans les galeries. Seul est considéré l'écoulement à l'intérieur des galeries ouvertes, assimilées à des conduites.

Cette technique permet de construire et résoudre des modèles très rapidement. Les modèles présentés ci-après ont été réalisés en quelques heures, avec Virginie Harcouët-Menou qui travaille sur le projet de Heerlen pour le VITO et sur cette version d'EPANET.

3.2.1 Trois galeries sans conduction

Dans un premier temps, en ne prenant pas en considération le phénomène de conduction, le modèle réalisé se présente sous la forme suivante :

- 3 galeries horizontales de 1000 m de long, de 3,5 m de diamètre,
- galeries reliées verticalement par des puits (ouverts) de 4 m de diamètre,
- les températures initiales sont calculées avec un gradient géothermique de 2,5°C par 100 m et une température au sommet de 11°C.

Pour simuler le fait que les puits ne sont pas vides, la longueur des segments de puits entre chaque galerie a été exagérée à 1000 m. Ceci est assimilable au fait que l'eau circule plus lentement entre les débris contenus dans les puits.

Dans ce modèle, l'injection est réalisée au sommet d'un puits tandis que le pompage se fait à la base de l'autre. La température d'injection est de 10°C. Les figures 3.3 et 3.4 reprennent les principaux résultats sous forme de graphiques.

Aux nœuds sont notées les températures, avec un code couleurs (rouge est plus chaud que bleu). Les nœuds représentés par des croix disposent d'une condition d'injection ou de pompage. Les débits sont inscrits le long des segments représentant les tuyaux. Ils respectent le code couleurs et l'épaisseur des segments est proportionnelle au débit.

D'après cette simulation ne faisant donc intervenir que l'advection, la figure 3.5 nous montre que la température du nœud où le pompage est réalisé subit de nombreux sauts, correspondant au refroidissement des différentes galeries. Après environ 720 h (30 jours), la température a atteint son minimum, le système est complètement vidangé.

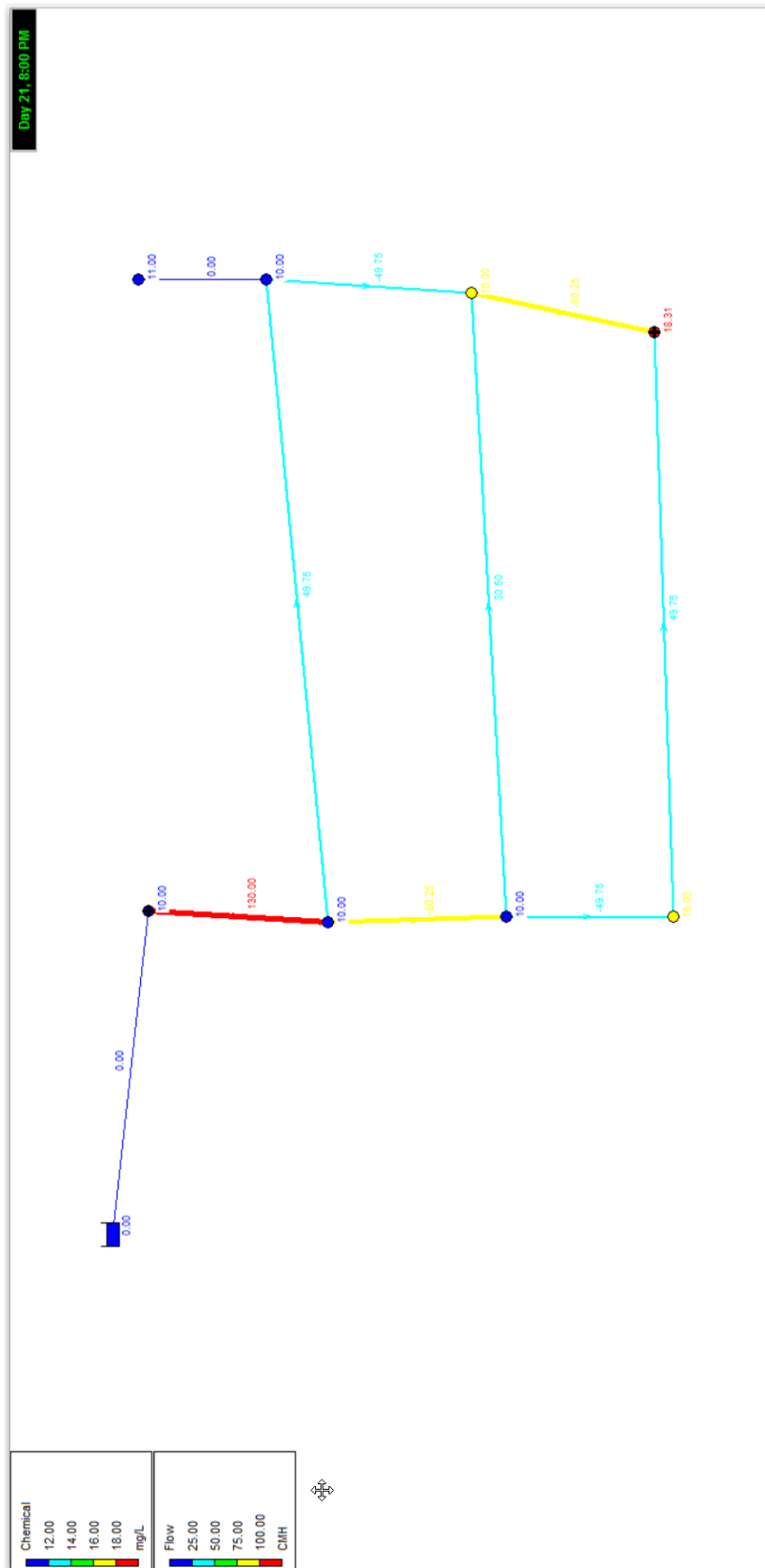


FIGURE 3.4 – Modèle EPANET avec trois galeries sans conduction, état du système après 500 heures

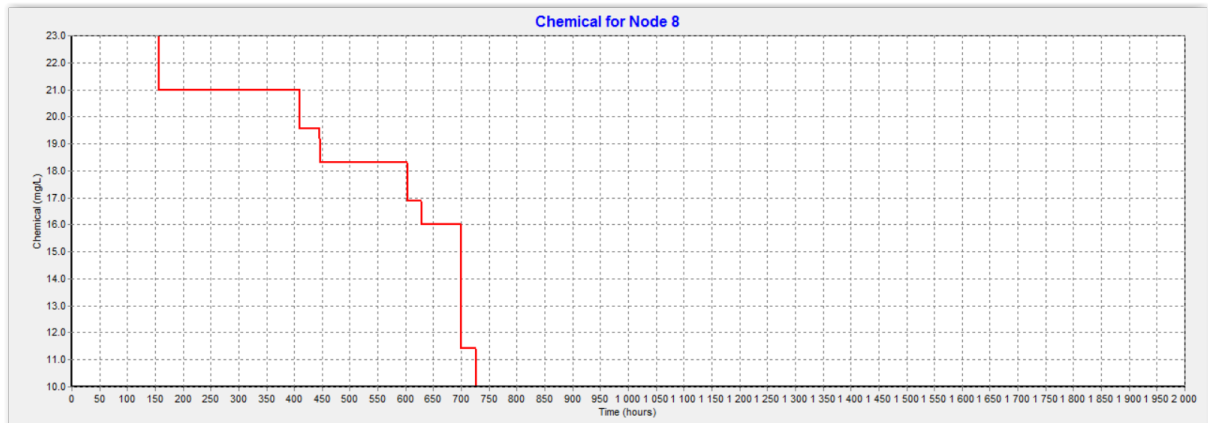


FIGURE 3.5 – Évolution de la température au point de pompage

3.2.2 Trois galeries avec conduction

Considérons le même maillage, mais en tenant compte, cette fois, de la conduction, tous les autres paramètres restant égaux. Le modèle est présenté aux figures 3.6 et 3.7.

En comparaison avec la figure 3.5, la figure 3.8 montre que l'évolution n'est pas très différente au niveau temporel. Les diminutions de chaleur ont lieu après un laps de temps très similaire. Par contre, les variations de température sont influencées par le massif. Ainsi, la température diminue de manière plus progressive, et surtout elle descend moins bas : la température minimale au pompage est légèrement inférieure à 15°C, contre 10 pour le cas précédent.

La comparaison de la situation du modèle après 500 h (figure 3.7) montre également que l'eau est réchauffée au fil de son parcours dans les galeries.

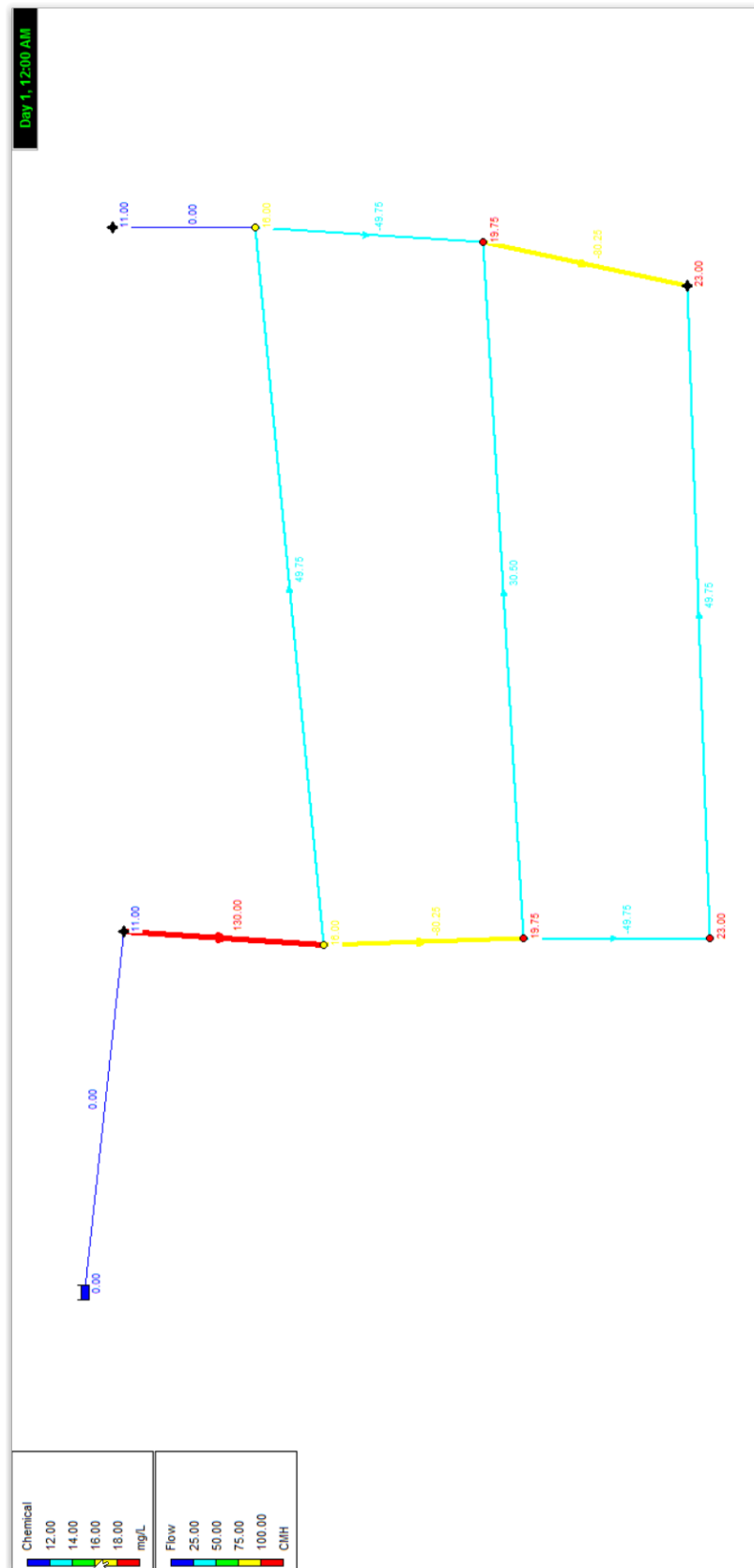


FIGURE 3.6 – Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction, situation initiale

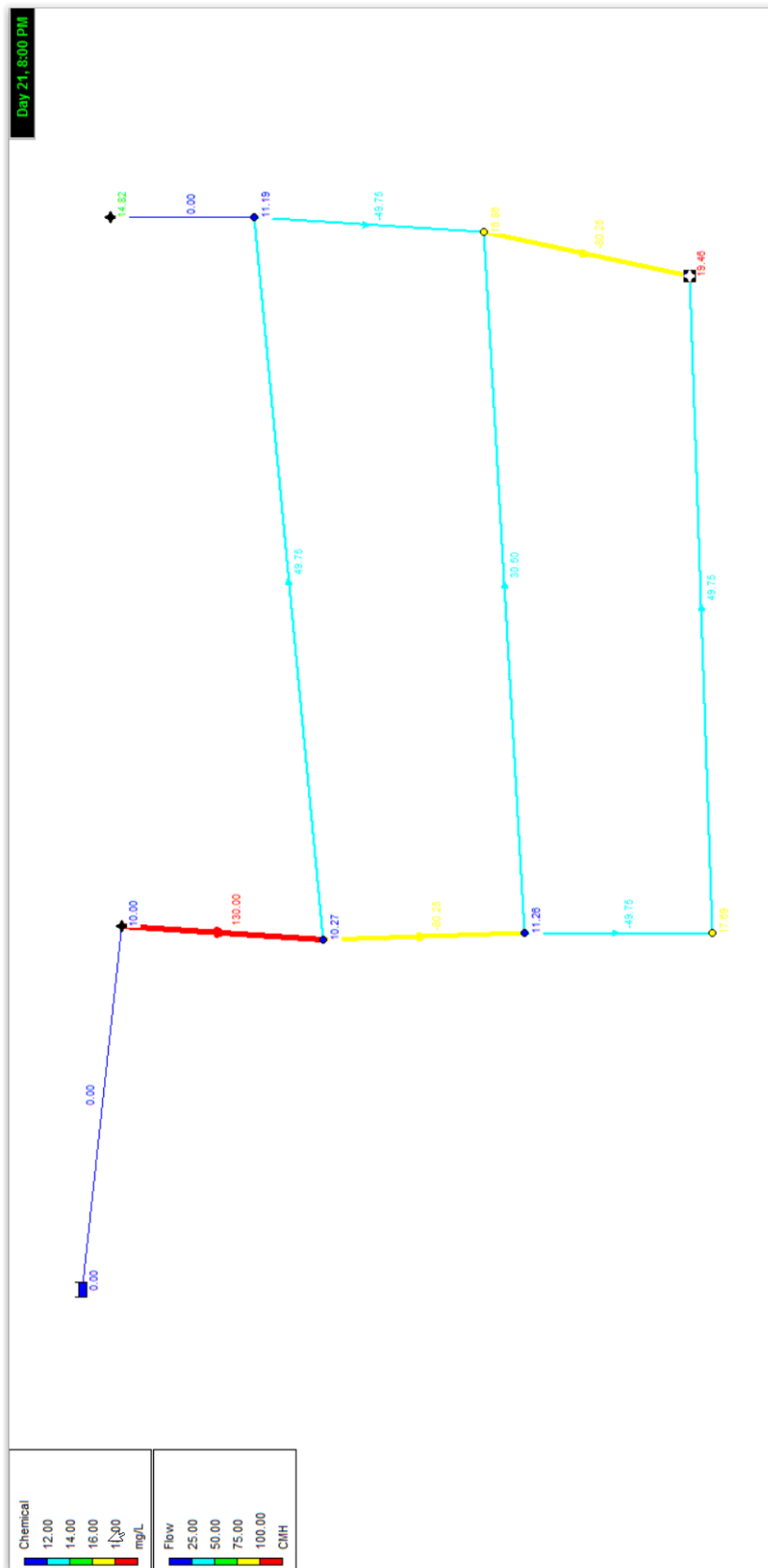


FIGURE 3.7 – Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction, état du système après 500 heures

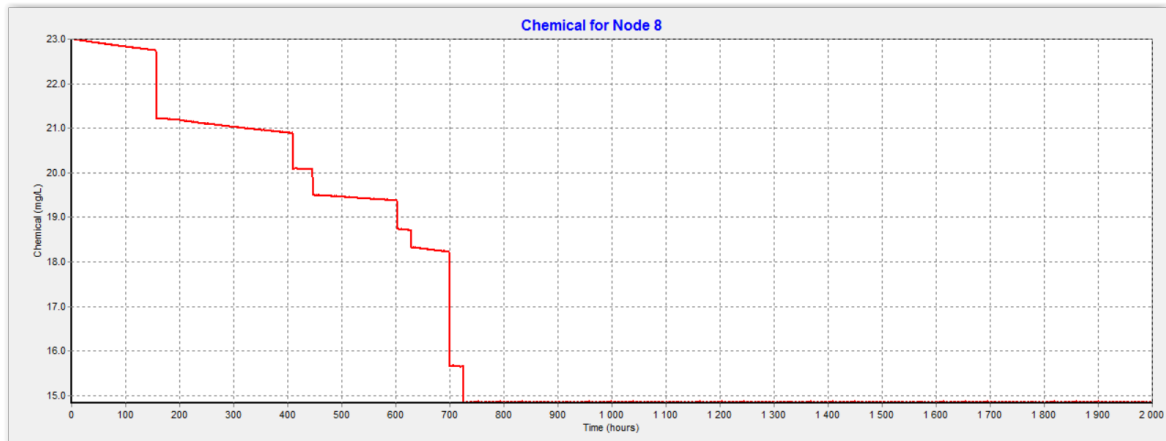


FIGURE 3.8 – Évolution de la température au point de pompage

3.2.3 Galeries avec failles

Le troisième modèle réalisé avec EPANET est plus complexe. Au modèle précédent, nous avons ajouté plusieurs éléments :

- la faille de Micheroux, telle que nommée et représentée dans le modèle conceptuel général à la figure 3.1, est modélisée par une conduite de 50 mm de diamètre ;
- cette faille se prolongeant en profondeur, nous avons imaginé le cas où elle provoquerait une source d'eau plus chaude venant des profondeurs (50°C, débit de 10 m³/h) ;
- enfin, Virginie Harcouët-Menou a fait remarquer que les galeries ne s'arrêtaient jamais aux puits dans un plan de mine. Nous avons donc prolongé les galeries et considéré qu'elles étaient reliées à des sources débitant faiblement de l'eau (2 m³/h). La température correspondante est naturellement fonction de la profondeur de la galerie : elle est identique à la température initiale des étages correspondants.

La figure 3.10 représente l'état du modèle après 2000 heures et l'évolution de la température au point de pompage (intersection entre la galerie inférieure et le puits de droite).

Plusieurs remarques peuvent être faites. Tout d'abord, lorsque l'écoulement est à l'équilibre, du fait de l'existence des sources dans le massif, une partie de l'eau injectée n'entre pas dans le système de galeries, mais s'en va vers le réservoir, nécessaire pour le calcul afin de stabiliser la hauteur piézométrique du système. Ce réservoir pourrait par exemple correspondre à une rivière, de hauteur piézométrique constante, en connexion avec le réseau minier, ou dans ce cas à un trop plein vers le réseau d'égouttage.

Ensuite, remarquons que la faille transversale draine un très faible débit. Celui-ci, entre les puits d'injection et de pompage, est d'environ 0,007 m³/h, ce qui est négligeable en comparaison des 21 à 69 m³/h délivrés par les galeries. Par contre, la figure 3.9, à comparer avec la figure 3.8, montre bien l'influence des sources supplémentaires de chaleur.

À nouveau, la vitesse de la décroissance des températures n'est pas extrêmement influencée d'un modèle à l'autre : d'un peu plus de 700 h (30 jours) pour atteindre le minimum, on passe à environ 1100 h (45 jours). Plusieurs raisons peuvent être évoquées : le débit de l'eau froide

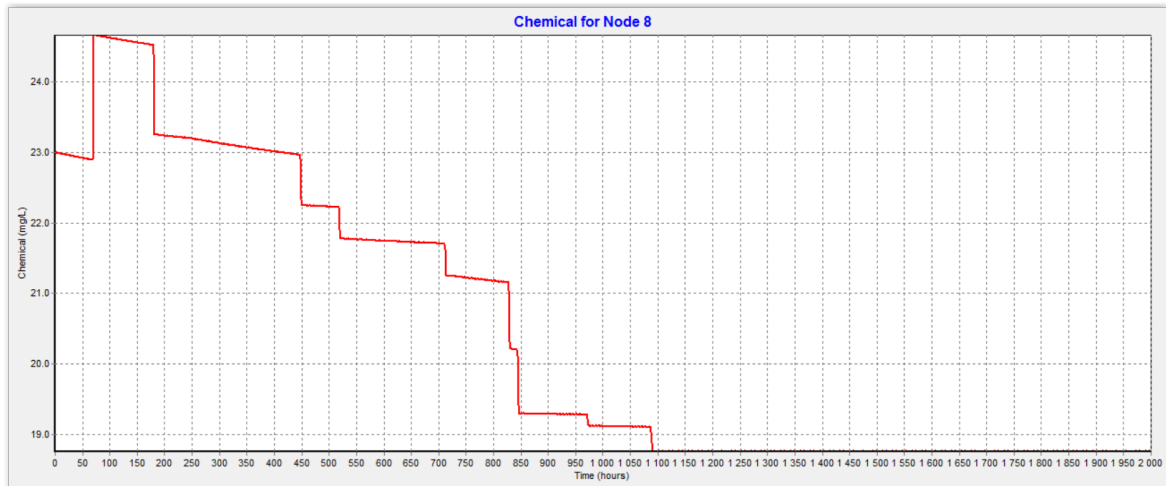


FIGURE 3.9 – Évolution de la température au point de pompage

entrant dans le système est plus faible (seulement $108 \text{ m}^3/\text{h}$ contre $130 \text{ m}^3/\text{h}$), il y a plus d'entrées d'eau chaude qui se mélangent avec le front froid et « perturbent le signal ». Ainsi, remarquons le pic de température entre 60 et 190 h, provenant de l'apport de la source chaude, qui entre dans la galerie inférieure une fois que l'eau y est mise en mouvement.

Cependant, l'information la plus intéressante à observer en comparant successivement les graphiques 3.5, 3.8 et 3.9 est certainement la hausse successive de la température minimale pompée. Là où elle était identique à celle d'injection (10°C) dans le cas où il n'y avait ni sources supplémentaire ni phénomène de conduction, elle gagne près de 9°C sur le dernier graphique étudié.

3.2.4 Conclusion sur les expériences réalisées avec EPANET

Sur base des trois modèles étudiés précédemment, nous pouvons tirer quelques conclusions générales.

D'abord, selon les hypothèses de ces modèles, la température du nœud où le pompage est réalisé chutera rapidement (après un mois, un mois et demi selon les cas envisagés) à moins d'un apport conséquent de chaleur venant du massif. L'évolution de la température semble se faire en deux phases : une première phase transitoire, qui consiste en un remplacement de l'eau contenue dans les galeries et une chute de température au pompage, suivie d'une stabilisation à une température minimale, stationnaire. Ceci montre qu'un pompage continu avec les débits estimés ne pourra pas garantir un apport de chaleur haut et constant sur une période d'exploitation raisonnable.

Cependant, la présence de sources chaudes liées au massif rocheux et à sa fracturation, la connexion à un réseau de galeries voisines et le phénomène de conduction thermique influencent fortement la température minimale en régime stabilisé. Ainsi, une température stationnaire proche de 19°C est atteinte dans la troisième modélisation, ce qui remplit déjà le

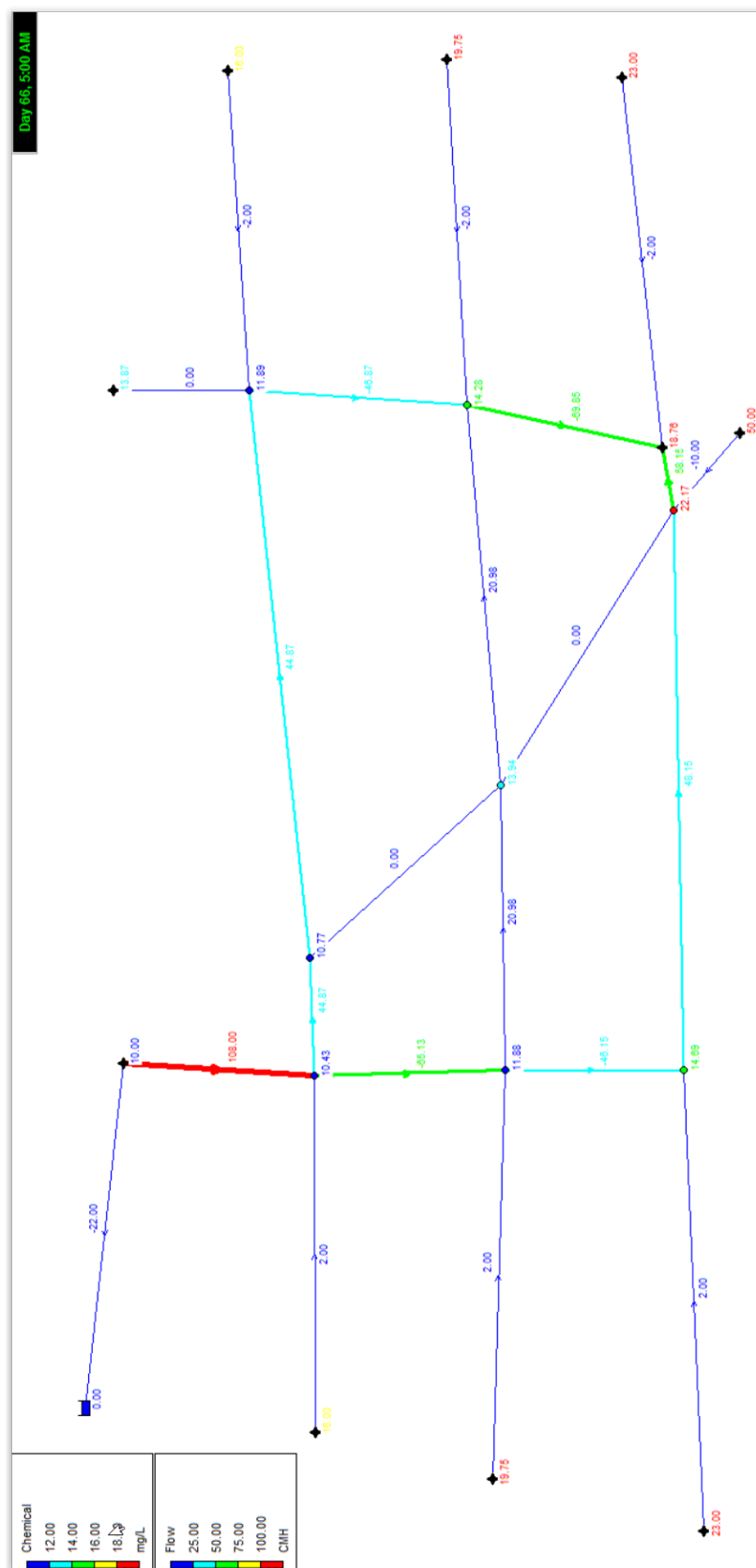


FIGURE 3.10 – Modèle EPANET avec trois galeries avec conduction après 2000 heures

critère énergétique fixé initialement. Il s'avère que la géologie et les connexions influencent donc fortement le système.

3.3 Validation du code de SUFT3D

Dans la section précédente, nous avons pu tirer plusieurs conclusions de l'approche avec le logiciel d'écoulement en conduites Epanet. Cependant, la modélisation des interactions entre le massif rocheux et l'eau circulant dans les galeries est très rudimentaire et imposée de manière arbitraire. De nombreux phénomènes décrits à la section 2.3 n'y sont pas représentés. En plus, nous faisons originellement l'hypothèse que les puits étaient remblayés, ce qui n'est pas tout à fait équivalent à un long tuyau. Dès lors, des modélisations équivalentes dans Suft3D nous amèneront-elles aux mêmes résultats ?

Dans un premier temps, Suft3D a dû être testé et validé par plusieurs modèles pouvant être résolus analytiquement. En effet, il n'avait jamais été utilisé dans cette configuration et pour ce type d'application. Cette section présente les différents tests effectués et leurs résultats.

3.3.1 Maillage test « 5*5*4 »

Le maillage 5*5*4 consiste en un parallélépipède rectangle constitué de $5 \cdot 5 \cdot 4$ mailles cubiques de 10 m de côté. Une condition de Fourier est appliquée sur une des faces latérales, pour permettre l'évacuation de l'eau au-delà d'une certaine hauteur piézométrique, tandis qu'une condition de flux imposé est appliquée sur la face supérieure, afin de simuler une recharge. Le modèle a été réalisé en particulier pour tester le comportement d'un « élément source / puits » défini au centre du maillage, ainsi que l'évolution de la température dans cet espace par l'imposition d'un flux de recharge et une condition de maintien de la hauteur piézométrique (Fourier). Les faces où n'est imposée aucune des deux conditions frontières sus-mentionnées sont imperméables.

Un schéma du maillage est représenté à la figure 3.11. Différents tests ont été réalisés sur ce maillage, notamment en variant le type de résolution d'écoulement : via la méthode des éléments finis ou un réservoir linéaire simple.

La conductivité hydraulique K a été fixée à 10^{-2} m/s pour la résolution par éléments finis. Dans le cas où l'ensemble est considéré comme un réservoir linéaire simple, l'ensemble du parallélépipède forme un seul réservoir, dont la concentration est constante.

Afin de garder constamment les pores saturés en eau, la hauteur piézométrique initiale et minimale est fixée à 50 m (soit 10 m de plus que la hauteur du modèle). La condition de Fourier, considérant le débit imposé, doit nous donner la hauteur piézométrique suivante en régime permanent une fois le calcul réalisé :

$$h = h_L + \frac{Q}{S\alpha} = 50 + \frac{2,5}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2} = 51,25 \text{ m}$$

où S est la surface de la condition de Fourier, Q le débit la traversant, α le coefficient correspondant et h_L la hauteur piézométrique de base.

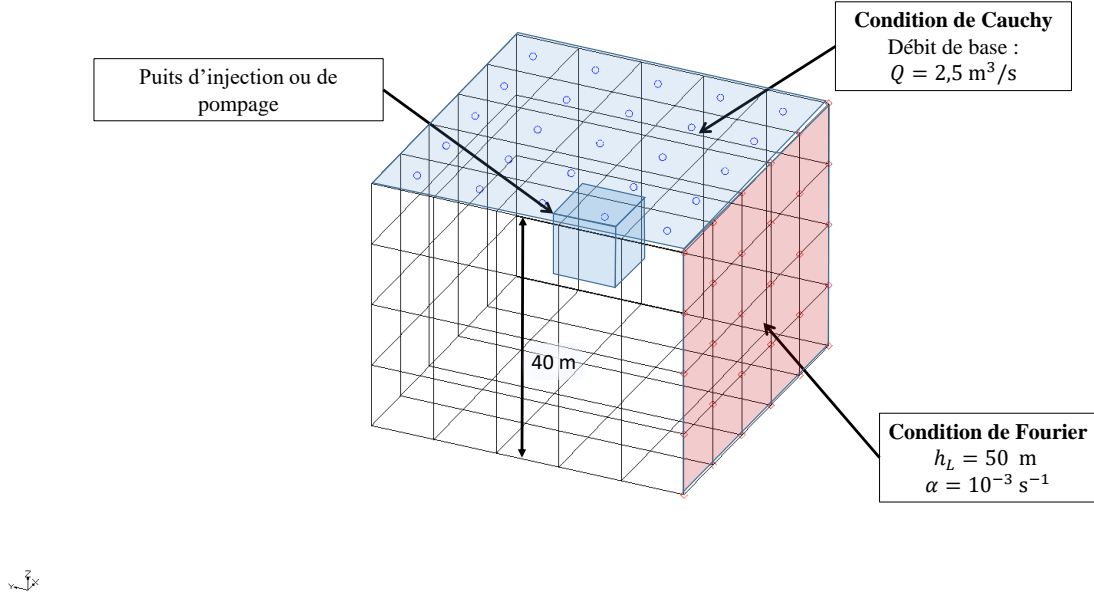


FIGURE 3.11 – Maillage 5*5*4

La concentration initiale est fixée à 16 UC¹. L'intérêt des cas envisagés sur ce modèle permettront l'observation de la baisse de concentration occasionnée par l'injection d'eau à 10 UC.

Trois cas-tests ont été considérés, pour chacune des méthodes de résolution (éléments finis et réservoir linéaire simple) :

1. **Cas de base.** La recharge est effectuée exclusivement par la condition de Cauchy à un débit $Q_c = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, à une température de 10 UC.
2. **Deuxième cas.** La recharge est effectuée par la condition de Cauchy (10 UC). Un pompage est effectué à un débit $Q_p = Q_c/2$. Le coefficient α de la condition de Fourier est ici réduit d'un facteur 2. Ainsi, la moitié de l'eau devrait sortir du modèle par le puits et l'autre par la condition de Fourier.
3. **Troisième cas.** La recharge est effectuée par la condition de Cauchy avec une température identique à la température initiale (16 UC). Comme pour le cas n°2, la moitié du flux sortant passe par le puits et l'autre moitié par la condition de Fourier. Ce test permet de vérifier que la conservation du soluté est bien respectée, et que la concentration ne varie donc pas.

SUFT3D permet de poser les conditions de Fourier aux nœuds ou aux faces, dans ce cas la condition utilisée est celle appliquée aux nœuds.

1. UC pour unité de concentration : kg/m^3 , M, ... dans notre cas cela peut également être des unités de température (K)

3.3.1.1 Réservoir linéaire

Le réservoir linéaire (considéré pour résoudre l'équation d'écoulement et de transport) a l'avantage de correspondre à une solution analytique simple. Il s'agit en effet simplement d'un système chimique ouvert, dont le volume est connu.

Considérons un réservoir de volume fini V , dont la concentration $C(t)$ est homogène, et dans lequel entre un flux volumique Q dont la concentration est C_{in} . Le flux sortant du volume vaut également Q à une concentration $C(t)$. L'évolution de la concentration dans le temps peut donc se formuler de la manière suivante :

$$C(t + \Delta t) = \frac{C(t) \cdot V + C_{in} \cdot Q - C(t) \cdot Q}{V}$$

En mettant en évidence la différence de concentration, l'équation devient

$$[C(t + \Delta t) - C(t)] = \frac{Q}{V} [C_{in} - C(t)]$$

qui peut être écrite comme une équation différentielle linéaire du premier ordre :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{V} C(t) + \frac{Q}{V} C_{in}$$

Cette équation a comme solution

$$C(t) = k \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} + C_{in}$$

où la constante k est déterminée à l'aide des conditions initiales : en $t = 0$, $C = C_0$. On trouve donc que $k = C_0 - C_{in}$, en remplaçant l'équation devient

$$C(t) = (C_0 - C_{in}) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} + C_{in}$$

Remarquons encore que le volume V considéré ici est le volume d'eau contenu dans le réservoir. Il ne s'agit donc que du volume des pores saturés de notre bloc de roche. Dans l'expérience menée ici, on peut donc relier ce volume au volume du réservoir linéaire V_{res} par $V = V_{res} \cdot n$ où n est la porosité.

Nous pouvons dès lors comparer les résultats obtenus avec la solution analytique. Les solutions aux cas 1 et 2 se superposent sur le graphique à la figure 3.12, ce qui est correct dans un réservoir linéaire. La courbe est très proche de la forme analytique théorique (en pointillés oranges), avec un très léger retard.

Lorsque nous en aurons la possibilité dans cette partie du travail, nous comparerons les résultats numériques théoriques ou analytiques avec ceux obtenus par des modélisations avec SUFT3D à l'aide d'une erreur. Dans les prochaines simulations, la qualité des résultats a été appréciée par deux variables :

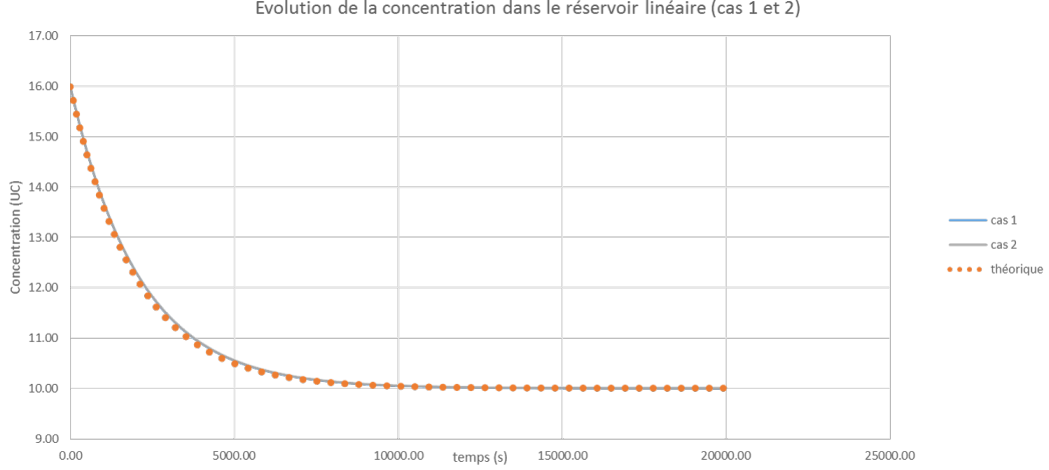


FIGURE 3.12 – Comparaison des solutions analytiques et modélisées avec SUFT3D (cas 1 et 2)

1. l'erreur relative maximale, estimée comme le maximum de la valeur absolue des erreurs relatives, soit pour deux populations X et Y,

$$\max \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right|$$

2. l'erreur relative moyenne, estimée comme la moyenne de la valeur absolue des erreurs relatives, soit pour deux populations X et Y,

$$\text{mean} \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right|$$

Pour le cas 1, l'erreur relative maximale est estimée à 0,88 % ; l'erreur relative moyenne à 0,26 %. Pour le cas 2, l'erreur relative maximale est estimée à 0,93 % et l'erreur relative moyenne à 0,30 %.

Pour le cas test n°3, la température ne varie pas dans le réservoir, l'erreur relative est donc systématiquement de 0 %.

Nous pouvons donc considérer comme étant corrects les résultats de la simulation utilisant le réservoir linéaire.

3.3.1.2 Éléments finis en écoulement et mixing cells en transport

Il est malheureusement impossible dans ce cas de déterminer une solution analytique sur le modèle en éléments finis avec mixing cell. Cependant, le transport a l'air d'être correct, les concentrations sont dans les places attendues, proches des résultats calculés au point 3.3.1.1 et ne sortent pas des valeurs limites [10 ; 16].

Dans ces modélisations, un quatrième cas test a été élaboré : la recharge est effectuée pour moitié par la condition de Cauchy (à 16 UC, à un débit $q = Q_c/2 = 1,25 \text{ m}^3/\text{s}$), l'autre moitié étant fournie par le puits (à 10 UC, même débit que la condition de Cauchy). L'entièreté de la sortie est effectuée via la condition de Fourier.

La figure 3.13 montre les hauteurs piézométriques calculées par la méthode des éléments finis pour chaque cas-test. Le cas 1 présente d'étranges artéfacts au niveau des coins, liés à une grande vitesse d'écoulement qui montre la limite du calcul. En dehors de cette observation, les hauteurs piézométriques et les isopièzes sont corrects. On remarquera notamment l'influence du puits au centre (zone évidée) dans les cas 2 à 4, tandis que les isopièzes sont quasi-rectilignes en surface pour le cas 1.

Les résultats des calculs de transport de soluté sont présentés à la figure 3.14. Le cas 1 présente une distribution de la concentration similaire à ce qui a pu être observé avec la hauteur piézométrique, un front froid qui avance de façon linéaire en diagonale par rapport à l'élément (l'état représenté sur la figure n'est pas stationnaire). Le second cas nous permet d'observer que l'eau froide est en partie absorbée par le puits (au centre de la coupe) (l'état représenté à cette figure n'est pas non plus stationnaire). Le cas 3 ne montre rien si ce n'est une température homogène... comme c'était prévu. Enfin, le quatrième cas nous montre bien le nuage froid qui s'échappe du puits, alors que de l'eau plus chaude entre par la face supérieure. La figure représentant ce dernier cas montre l'état stationnaire du système.

3.3.2 Maillage en colonne de 6 cellules « Col6cells »

Vu l'impossibilité de comparer les résultats du maillage $5 \times 5 \times 4$ à une solution analytique pour les éléments finis, nous avons construit un modèle en forme de colonne composée de six cellules. Il est présenté à la figure 3.15. Chaque cellule est cubique et fait un mètre de côté. En dehors des deux faces aux extrémités où sont imposés les débits, toutes les autres faces sont imperméables.

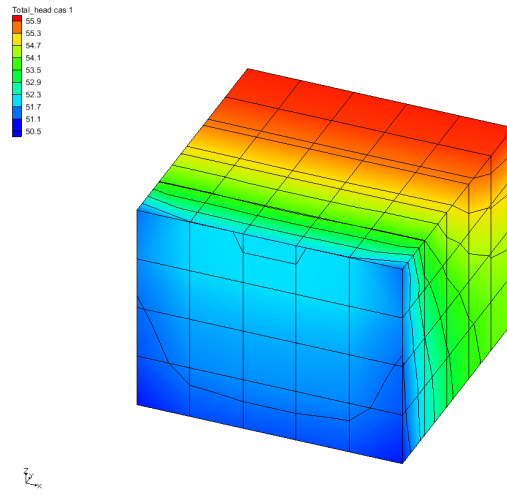
3.3.2.1 Écoulement

La conductivité du matériau 1 est de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ et celle du matériau 2 de $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. La condition de Fourier est placée sur les nœuds. Une version où les matériaux sont séparés dans deux sous-domaines a également été implémentée, l'interface suivant une condition de Fourier dont le coefficient est $\alpha = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

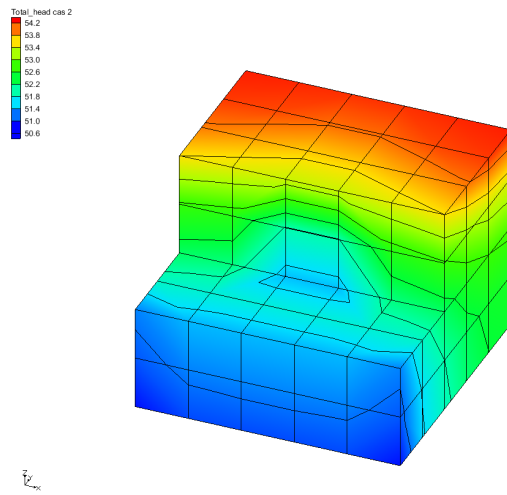
Plusieurs tests ont été réalisés sur ce maillage. Composé d'un seul ou de deux sous-domaines, il permet de vérifier que l'écoulement et le transport à travers différents sous-domaines sont corrects.

Nous pouvons ainsi montrer que les hauteurs piézométriques sont correctes d'après la solution théorique. Elles s'obtiennent très simplement grâce à la loi de Darcy. Le flux est identique pour chaque cellule (vu qu'elles sont en série). Nous déterminons donc que pour chaque cellule il existe un Δh entre l'amont et l'aval tel que : $q = K \Delta h = 0,001 \text{ m/s}$. Dans le cas où deux sous-domaines existent, la colonne se comporte comme si un élément sans épaisseur se trouvait entre les sous-domaines, le coefficient α correspondant à la conductivité au travers de la surface. Les modélisations sont correctes.

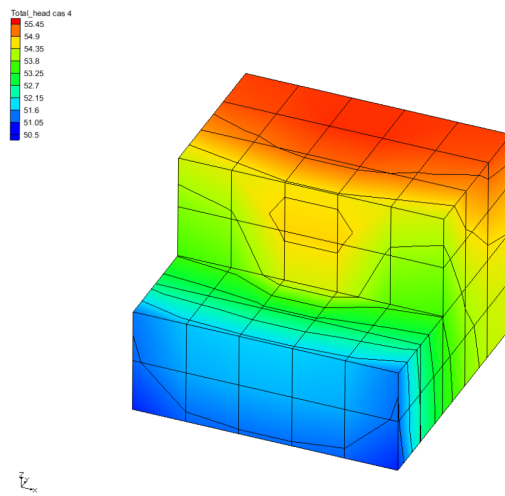
Les hauteurs piézométriques le long de la colonne composée d'un seul sous-domaine sont reprises dans le tableau suivant :



(a) Cas 1

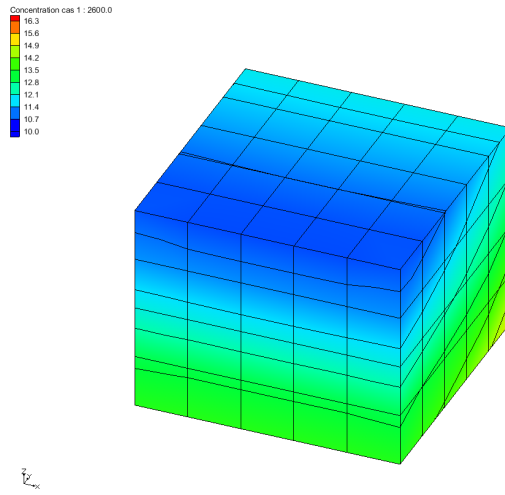


(b) Cas 2 et 3

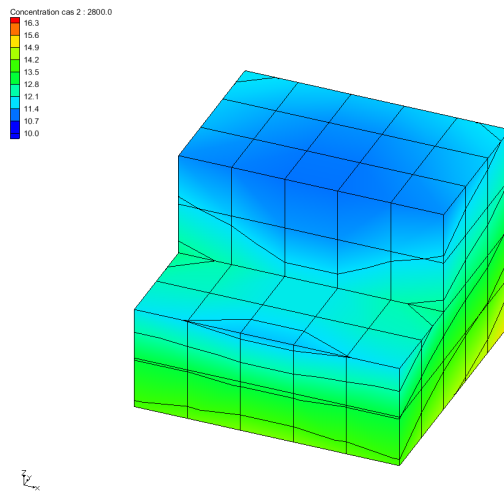


(c) Cas 4

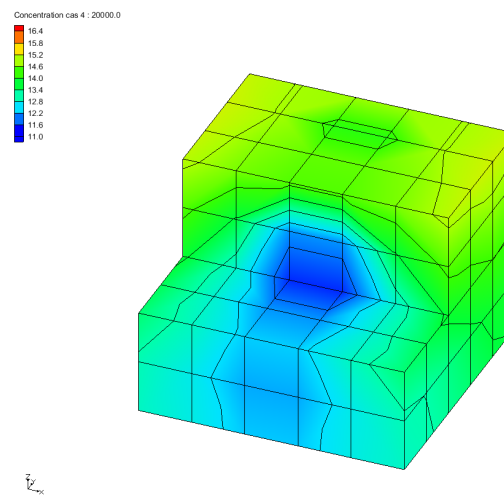
FIGURE 3.13 – Hauteur piézométrique calculée avec la résolution « éléments finis à V. C. »



(a) Cas 1



(b) Cas 2



(c) Cas 4

FIGURE 3.14 – Distribution de la concentration résolue par la méthode des éléments finis avec mixing cell

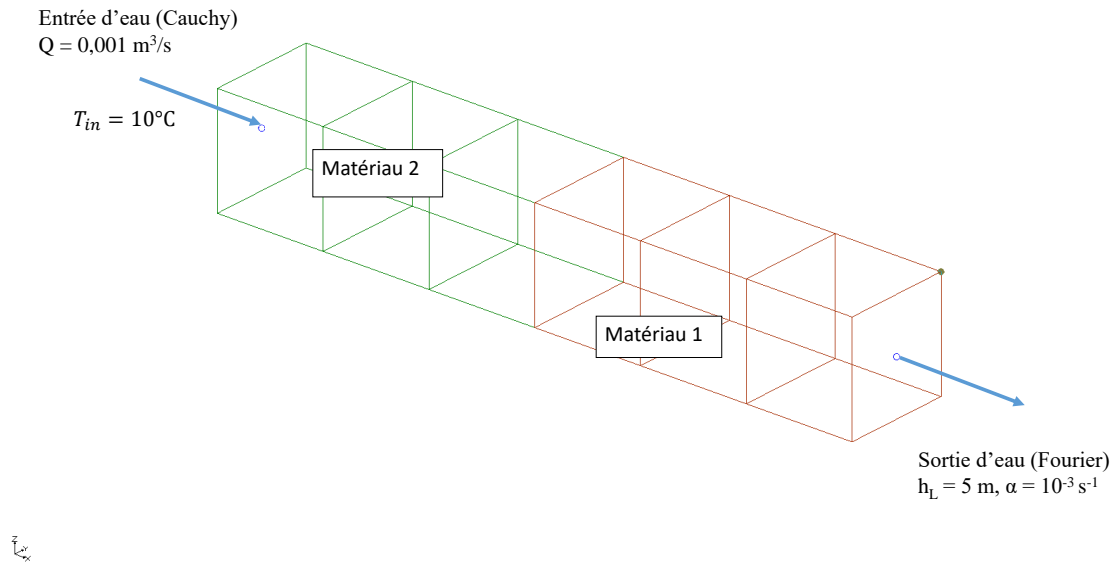


FIGURE 3.15 – Modèle col6cells

Nœud	1	2	3	4	5	6	7
H modélisée	13.50	11.50	9.50	7.50	7.00	6.50	6.00
H théorique	13.50	11.50	9.50	7.50	7.00	6.50	6.00

Pour le cas où la colonne est divisée en deux sous-domaines :

Nœud	1	2	3	4	18	19	20
H modélisée	13.60	11.60	9.60	7.60	7.00	6.50	6.00
H théorique	13.60	11.60	9.60	7.60	7.00	6.50	6.00

3.3.2.2 Transport au travers de la colonne

Plusieurs tests ont été réalisés sur ce maillage. Tout d'abord, il a été vérifié que les concentrations modélisées étaient bien correctes dans le cas des modèles d'écoulements évoqués ci-avant. La modélisation considère que la colonne est initialement à une concentration C de 0 UC² et qu'y est injectée par la condition de Cauchy une eau à 10 UC. Les phénomènes non advectifs sont négligés (impossibles à représenter facilement numériquement). En utilisant un schéma explicite ($\omega_{tc} = 0$ dans la section 2.4.2), en écoulement stationnaire le flux au travers de la cellule i sera $Q_i = Q_{i-1} = Q_{in}$. L'équation de transport en *mixing cell* pour cette cellule devient :

$$V_i \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{in}(C_{i-1} - C_i)$$

soit, sous forme discrète par application des différences finies à la variable temporelle,

$$V_i \frac{C_i(t + \Delta t) - C_i(t)}{\Delta t} = Q_{in} [C_{i-1}(t) - C_i(t)]$$

2. UC pour unité de concentration : kg/m³, M,... dans notre cas cela peut également être des unités de température (K)

Ainsi, l'évolution de la concentration dans la cellule i peut être estimée par [Orban 2009] :

$$C_i(t + \Delta t) = \frac{Q_{in} \cdot \Delta t}{V_i} [C_{i-1}(t) - C_i(t)] + C_i(t)$$

Un pas de temps $\Delta t = 200$ secondes a été adopté pour l'ensemble des simulations.

Intéressons-nous plus particulièrement au volume V_i de la cellule considérée. Le programme SUFT3D utilise un volume de contrôle centré sur chaque nœud du maillage. C'est ce dernier qui correspond à la cellule évoquée ci-dessus. La figure 3.16 présente un exemple de la répartition de l'espace attribué à chaque volume de contrôle autour des nœuds, en comparaison avec les cellules définies par le maillage. Remarquons qu'ils n'ont pas tous la même taille : ceux situés aux extrémités du modèle sont deux fois plus petits que ceux situés à l'intérieur. Ils sont en réalité déterminés par les fonctions de bases utilisées dans le calcul « élément fini ». Ainsi, la figure 3.16a montre les volumes associés aux nœuds 1 à 5 au sein d'un sous-domaine. La figure 3.16b schématise la situation où deux sous-domaines sont considérés : les nœuds 4 et 17 sont superposés et les volumes associés sont naturellement différents du cas à un seul sous-domaine. Remarquons que la limite entre les sous-domaines lie les volumes associés aux nœuds 4 et 17 par une condition différente des autres : le flux entrant dans le volume V_{17} en l'instant $t + \Delta t$ est à la concentration $C_4(t + \Delta t)$ et non $C_4(t)$. Nous reprenons alors la formulation analytique d'un flux de soluté entrant dans un réservoir au volume fini tel que développé à la section 3.11 :

$$C_{17}(t + \Delta t) = [C_{17}(t) - C_4(t + \Delta t)] \cdot e^{-\frac{Q_{in}}{V} \Delta t} + C_4(t + \Delta t)$$

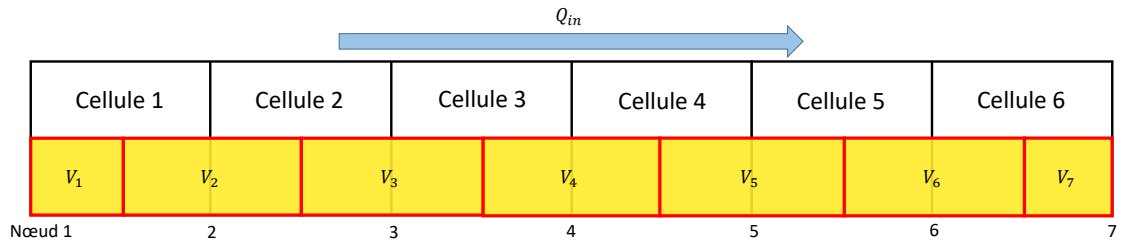
La solution théorique développée, nous pouvons désormais valider les résultats obtenus par la modélisation effectuée à l'aide de SUFT3D.

Le schéma à un sous-domaine a été validé avec une erreur relative maximale de 0,0046 %. Celle-ci est indépendante de l'ordre de grandeur de la concentration. Le modèle a été testé en envisageant deux cas de conditions frontières à l'aval :

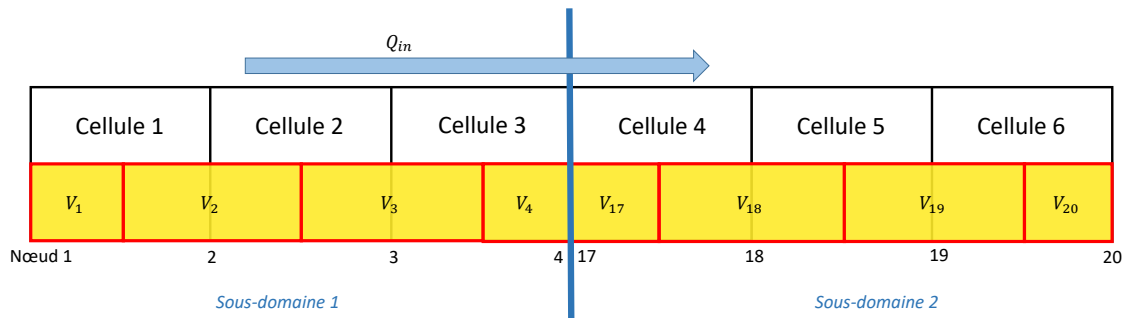
- condition de Fourier (sur les nœuds)
- condition de Dirichlet

Les deux résultats sont strictement égaux. La représentation graphique de la comparaison entre la concentration théorique et celle issue de SUFT3D aux nœuds 1, 3, 5 et 7 (d'un bout à l'autre de la colonne), en ne considérant qu'un seul sous-domaine est visible figure 3.17.

L'utilisation de deux sous-domaines a permis d'effectuer plusieurs validations. Tout d'abord, vérifier que la limite entre les sous-domaines fonctionne correctement en transport. Le modèle utilisant deux sous-domaines (correspondant aux matériaux décrits à la figure 3.15) produit un champ de concentration correct d'après le modèle théorique explicité ci-avant. Il génère néanmoins une erreur relative plus importante que dans son équivalent à un seul sous-domaine : son maximum atteint 7,1%. Cependant, une telle erreur ne se retrouve que dans les concentrations les plus faibles (de l'ordre de 10^{-9} UC). En moyenne, la valeur absolue de l'erreur relative sur la simulation n'atteint que 0,43 %. Remarquons encore que, malheureusement, la moyenne de l'erreur en valeurs réelles est également de 0,4 %, le biais ne se compense donc



(a) Un seul sous-domaine



(b) Deux sous-domaines

FIGURE 3.16 – Représentation du schéma du transport de soluté

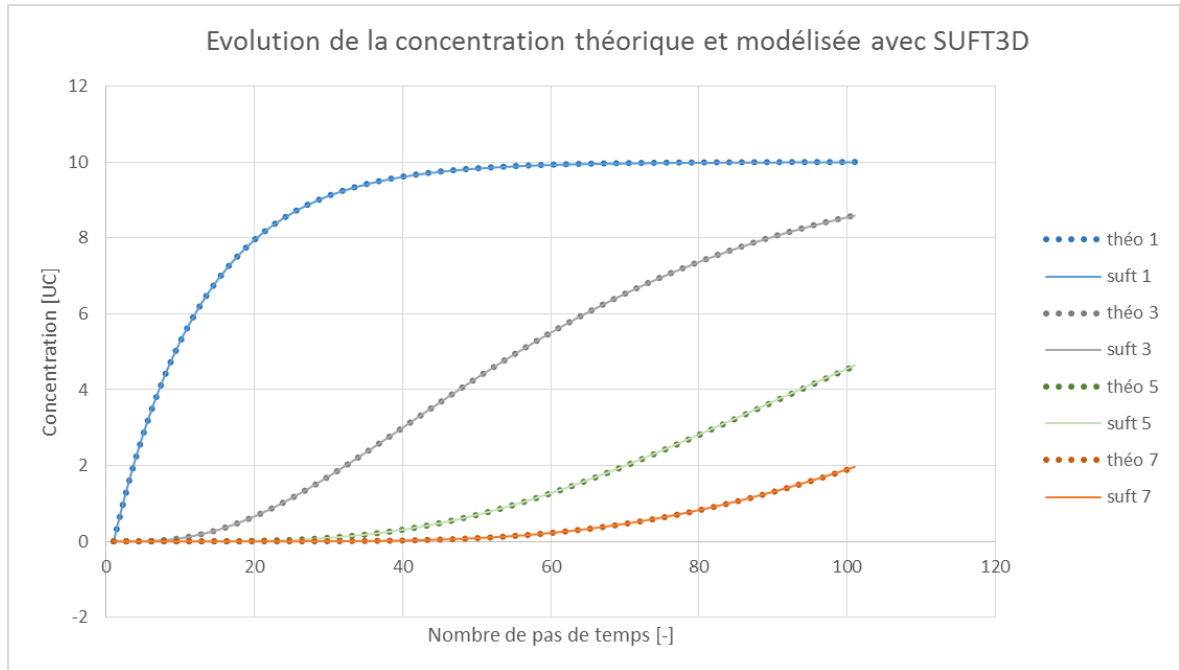


FIGURE 3.17 – Comparaison entre les concentrations théoriques et modélisées aux points 1, 3, 5 et 7. Maillage composé d'un seul sous-domaine.

pas. Elle correspond, sur les graphiques, à un léger retard. Enfin, si la présence d'une frontière entre deux sous-domaines semble augmenter l'erreur par rapport à notre cas théorique, la variation du coefficient α n'a aucune influence sur celle-ci.

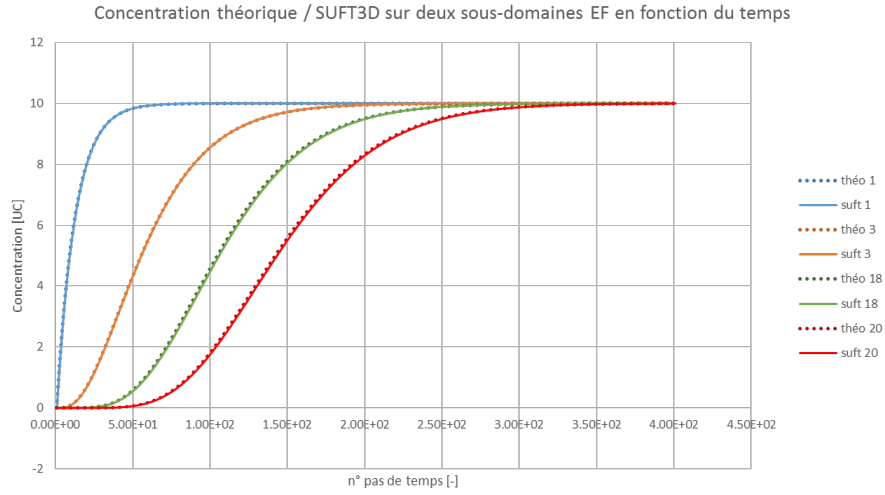
L'erreur absolue quant à elle est naturellement très dépendante de l'ordre de la concentration et n'est donc pas un bon indicateur sur la fiabilité des résultats.

La représentation graphique de cette modélisation et des résultats théoriques associés sont visibles à la figure 3.18a.

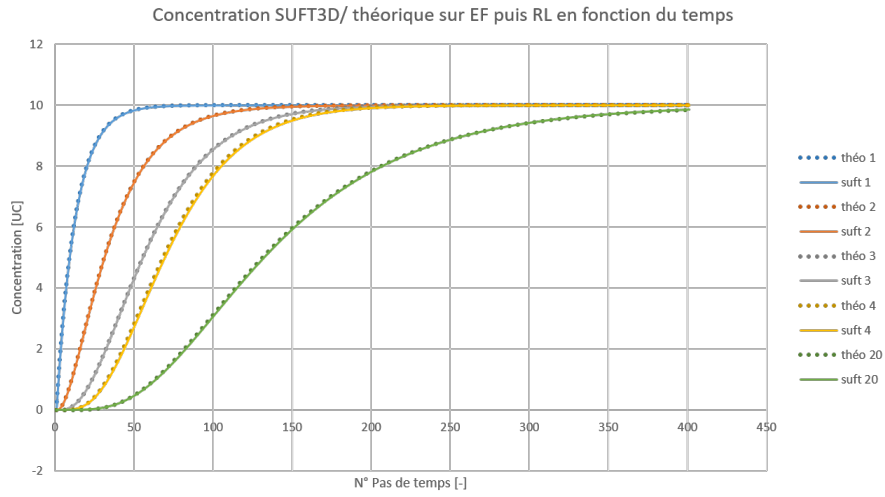
Le maillage divisé en deux sous-domaines a également permis de tester le transport à travers un réservoir linéaire et un réservoir « éléments finis » en série (dans les deux sens). Le réservoir linéaire est simplement modélisé en associant une concentration moyenne sur le réservoir aux nœuds correspondants. Les résultats sont présentés sous forme de graphique aux figures 3.18b et 3.18c. Sur la simulation où le réservoir « éléments finis » est en amont du réservoir linéaire simple, en valeur absolue l'erreur relative maximale est de 7,41 % et l'erreur relative moyenne de 0,63 %. Dans l'autre cas où c'est le réservoir linéaire qui est en amont du réservoir « éléments finis », les erreurs relatives maximale et moyenne sont plus faibles : respectivement 2,69 % et 0,36 %. Quel que soit l'ordre des réservoirs, les erreurs sont toujours plus importantes dans les petites valeurs de concentration que dans les ordres plus grands. Sur les graphiques, cette erreur se traduit par un léger décalage entre les points théoriques et issus de la simulation avec SUFT3D. La hausse de concentration semble légèrement en retard par rapport au calcul théorique. Une modélisation supplémentaire utilisant des concentrations décroissantes (concentration initiale fixée à 10 UC, entrée d'eau à 0 UC) a permis de montrer qu'il s'agit bien d'un retard systématique et non d'une sous-estimation. Les résultats sont présentés graphiquement à la figure 3.19.

Profitons encore de ces graphiques pour interpréter les deux effets des réservoirs linéaires sur le transport du soluté, en particulier sur base des figures 3.18a, 3.18b et 3.18c. Tout d'abord, avec la présence d'un réservoir linéaire, le front de concentration avance plus rapidement à l'intérieur de la colonne ; ceci est logique vu qu'à tout moment la concentration est homogène dans le réservoir. Tout apport de soluté sera donc disponible dès le pas de temps suivant à sa sortie. Le second effet est que la hausse de concentration se fait plus lentement ; en effet, le volume du réservoir dans lequel se fait le mélange est plus important et donc il faut plus de soluté pour faire augmenter la concentration.

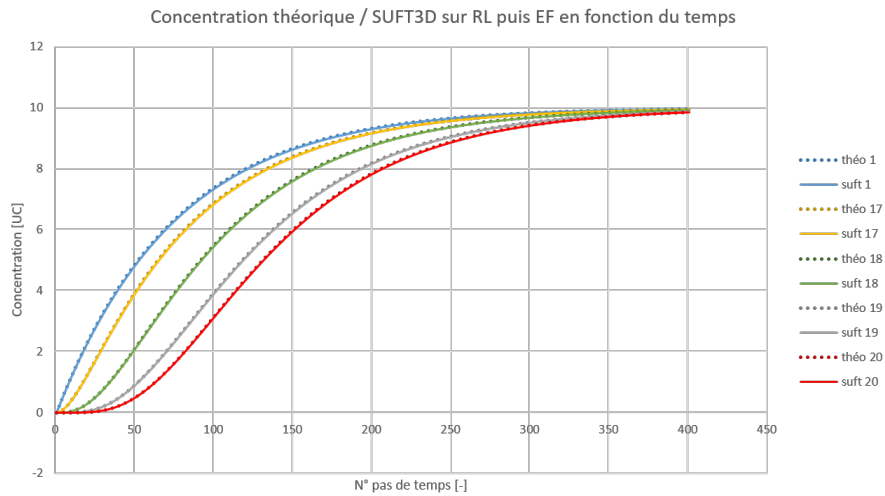
Enfin, le dernier test réalisé avec ce maillage consiste à placer un élément source / puits en pompage sur la quatrième cellule de la colonne, après un réservoir linéaire constitué des trois premières cellules. Ainsi, il a été possible de vérifier que le transport associant un puits à côté d'une frontière de sous-domaine fonctionnait bien correctement. La moitié du débit entrant dans la colonne sort alors par le puits. Il est représenté théoriquement par une diminution du débit à la sortie de la quatrième cellule. Le débit pompé se répartit sur les volumes de contrôle 17 et 18. Le volume de contrôle situé sur le nœud 18, à la frontière entre la quatrième et cinquième cellule, reçoit donc encore les trois quarts du débit à l'entrée de la colonne. L'erreur relative maximale entre ce modèle théorique et la modélisation est de 1,33 %, tandis



(a) Deux sous-domaines résolus par la méthode des « éléments finis »



(b) Sous-domaine « éléments finis » (points 1 à 4) puis sous-domaine réservoir linéaire (point 20)



(c) Sous-domaine réservoir linéaire (point 1) puis sous-domaine « éléments finis » (points 17 à 20)

FIGURE 3.18 – Comparaison entre les concentrations théoriques et modélisées le long de la colonne. Maillage composé de deux sous-domaines

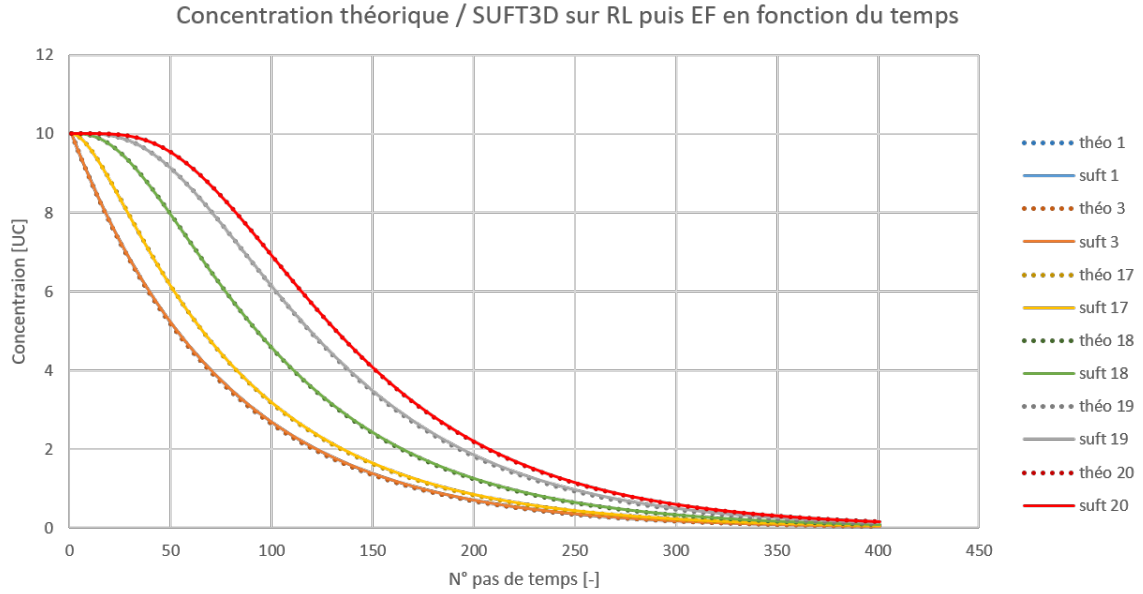


FIGURE 3.19 – Sous-domaine réservoir linéaire (points 1 et 3) puis sous-domaine « éléments finis » avec une concentration décroissante (points 17 à 20)

que la valeur absolue de l'erreur relative moyenne est de 0,47 %. La figure 3.20 présente la concentration sur le modèle après 2000 secondes (pas de temps de 200 s).

3.3.3 Conclusion

Ces différents cas tests ont permis de contrôler que le logiciel SUFT3D était apte à résoudre le problème que nous nous sommes posé. N'ayant été que peu utilisé dans les conditions de transport avec plusieurs sous-domaines, il était important de contrôler la validité de calculs sur des modèles pour lesquels il existe une solution théorique voire analytique.

Nous avons ainsi pu contrôler la validité de l'écoulement et du transport dans les réservoirs linéaires simples et les réservoirs résolus par la méthode « classique » des éléments finis à volumes de contrôle. Le calcul d'écoulement est parfaitement correct face au modèle théorique. En ce qui concerne le transport, l'erreur relative entre les modélisations et un modèle théorique a été calculée :

- au sein d'un seul sous-domaine, elle est extrêmement faible (moins de 0,005 %) ;
- lorsque plusieurs sous-domaines sont utilisés, des erreurs de l'ordre de quelques pour cent sont observées (jusqu'à 7 %). Ceci n'est cependant vrai que pour les valeurs de concentration les plus faibles. La valeur absolue de l'erreur relative moyenne était souvent de l'ordre de 0,5 %. L'erreur correspond à un retard dans la courbe d'évolution de la concentration.

Lors de l'utilisation d'une limite entre sous-domaines, le flux est naturellement impacté, mais l'advection semble également l'être très légèrement. Cependant, vu la faiblesse de l'erreur en moyenne nous considérerons que de manière générale les résultats sont fiables. Remarquons tout de même que d'autres phénomènes (dispersion, diffusion, conduction...) s'ajoutent au phénomène d'advection, ce qui limitait l'impact de l'erreur montrée ici.

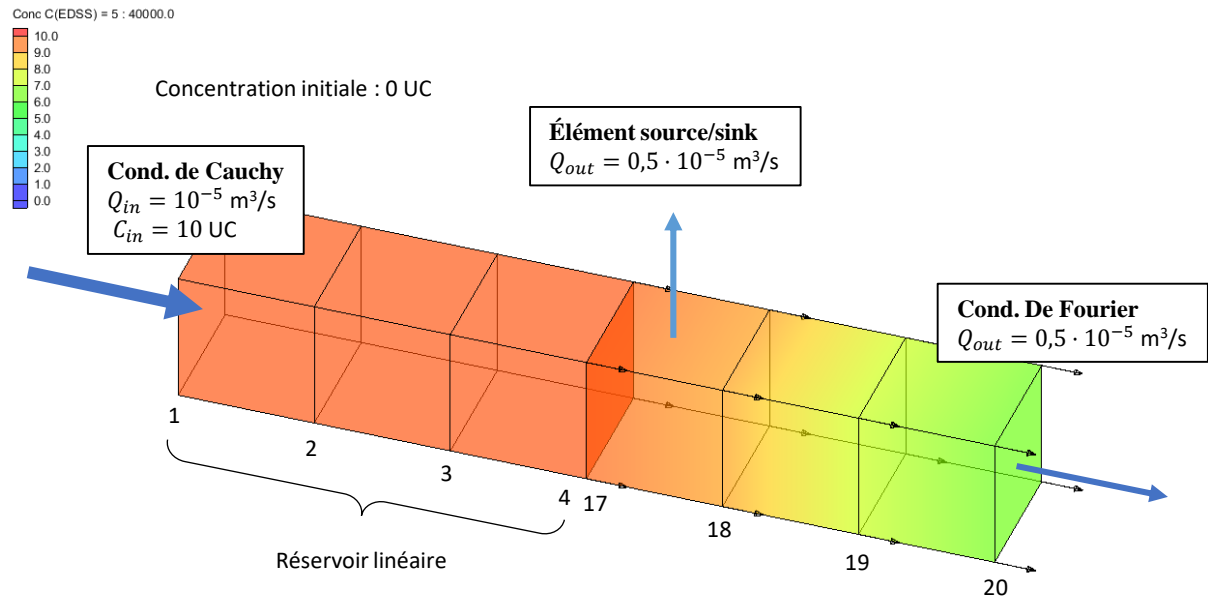


FIGURE 3.20 – Positionnement et concentration de l'élément « puits » dans le modèle col6cell

Enfin, nous avons montré sur deux modèles que l'élément « puits » fonctionne correctement en utilisant la méthode « éléments finis avec volumes de contrôle ».

3.4 Modèles miniers plus élaborés résolus avec SUFT3D

3.4.1 Maillage grossier à une galerie « Mine 7 »

Un maillage grossier de $24 \cdot 21 \cdot 10$ cellules cubiques de 1 m de côté a été réalisé pour introduire d'autres phénomènes de transferts de chaleur que l'advection et lier les expériences théoriques au modèle conceptuel qui nous intéresse. Nous n'utilisons pas encore les paramètres du modèle conceptuel définis à la section 3.1 vu la volonté de garder un maillage aussi simple que possible, et dont la résolution est rapide. Dans un premier temps, nous observerons l'évolution des températures sur base du seul phénomène d'advection. Par la suite seront ajoutées diffusion et dispersion dans le cadre desquelles un modèle de cette taille montrera ses limites. Ce modèle, dont le nom est « Mine 7 », est présenté à la figure 3.21.

Le maillage est divisé en quatre sous-domaines :

- deux puits indépendants, dont la conductivité hydraulique $K = 10^{-4} \text{ m/s}$ et la porosité efficace $n_e = 1\%$, où les équations d'écoulement et de transport sont résolues par les méthodes des éléments finis avec volumes de contrôles (CVFE), avec *mixing cell* pour le transport ;
- une galerie dont la porosité est de 1 et qui est un réservoir linéaire ;
- le massif rocheux englobe le tout, avec une conductivité hydraulique $K = 10^{-6} \text{ m/s}$, une porosité efficace $n_e = 1\%$, où les équations d'écoulement et de transport sont

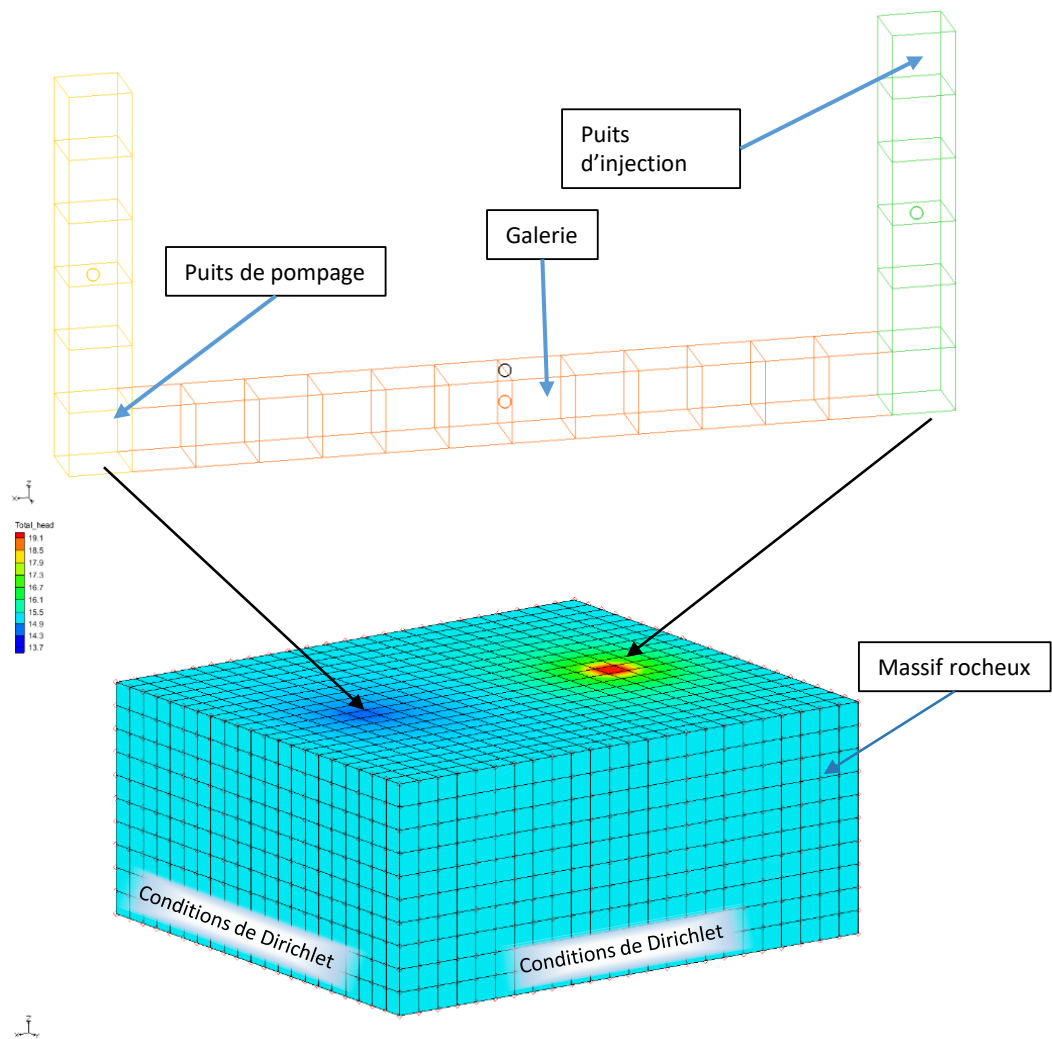


FIGURE 3.21 – Modèle Mine 7, avec les hauteurs piézométriques (représentées par les couleurs)

résolues par les méthodes des éléments finis avec volumes de contrôle (CVFE), avec *mixing cell* pour le transport ;

— les faces supérieures et inférieures sont imperméables.

Initialement, la hauteur piézométrique est fixée à 15 m (soit 5 de plus que le sommet du modèle afin de garantir la saturation) et la température à 16°C.

Latéralement, les conditions aux limites du maillage sont des conditions de Dirichlet, imposant la hauteur piézométrique de 15 m et la température de 16°C. Un élément source / puits impose un pompage au débit de $10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ au pied du puits de pompage. L'injection est quant à elle effectuée par une condition de Cauchy, imposant un débit égal de $10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ à une température de 10°C. Enfin, les conditions de liaisons entre sous-domaines sont des conditions de Fourier, dont le coefficient α vaut 10^{-4}s^{-1} . Pour rappel, dans ce modèle ainsi que les suivants, le transfert de chaleur **entre les sous-domaines** ne tient compte **que de l'advection**.

Dans le massif, la masse volumique apparente de la matrice rocheuse est estimée à 2000kg/m^3 , pour les graviers présents dans les puits elle est un peu moindre, à 1800kg/m^3 . La porosité efficace est fixée dans tous les cas à 1 %.

La constante d'adsorption K_d représente ici le rapport des capacités d'accumulation de la chaleur dans l'eau et dans la matrice, soit $K_d \leftrightarrow \frac{\rho_m c_m}{\rho_w c_w \rho_b} - \frac{n_e}{\rho_b}$. Pour du schiste, $\rho_m c_m$ est estimé à $2,3\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$ [Fossoul 2009]. Ainsi,

$$K_d = \frac{2,3 \cdot 10^6}{1000 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 2000} - \frac{0,01}{2000} = 2,70 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Pour les puits, utilisant un matériau déconsolidé sous forme de gravier saturé, c_m est du même ordre de grandeur [Fossoul 2009]. Alors,

$$K_d = \frac{2,3 \cdot 10^6}{1000 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 1800} - \frac{0,05}{1800} = 2,77 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3/\text{kg}]$$

La hauteur piézométrique ainsi que l'écoulement à l'intérieur des puits et de la galerie est montré à la figure 3.22. La longueur des flèches est proportionnelle à la norme de l'écoulement. On peut observer l'influence radiale de la condition de Cauchy d'injection, ainsi que l'influence du puits de plus haute conductivité. Observons également la galerie, où les hauteurs piézométriques sont homogènes. Enfin, remarquons l'influence du pompage sur le puits.

Deux modélisations ont été effectuées avec ce modèle, tout d'abord en n'utilisant, encore une fois, que le phénomène d'advection pour le transfert de chaleur, puis en y ajoutant les paramètres de diffusion et dispersion.

3.4.1.1 Transport par advection seule

Les résultats des modélisations sont présentés à la figure 3.23. On y voit clairement le front froid qui descend dans le puits d'injection. Une fois celui-ci complètement refroidi, la galerie, peu à peu, se refroidit à son tour. Si l'avancée du front froid se passe assez rapidement au sein du puits, proportionnellement la galerie se refroidit très lentement. Il faut remarquer deux points à ce sujet : non seulement le volume de la galerie est bien plus important que

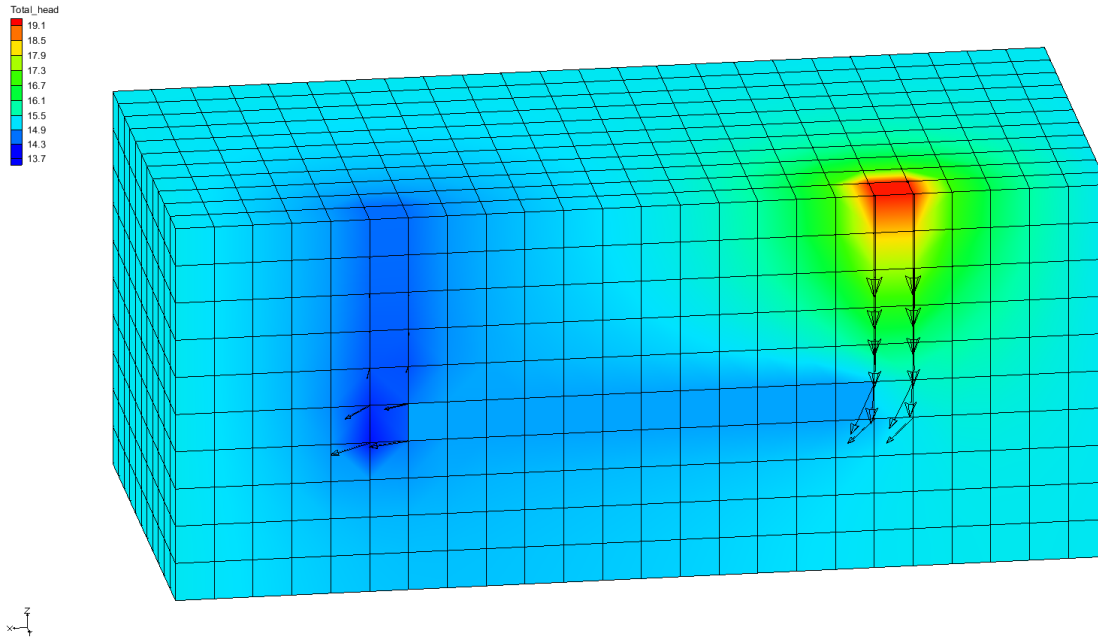


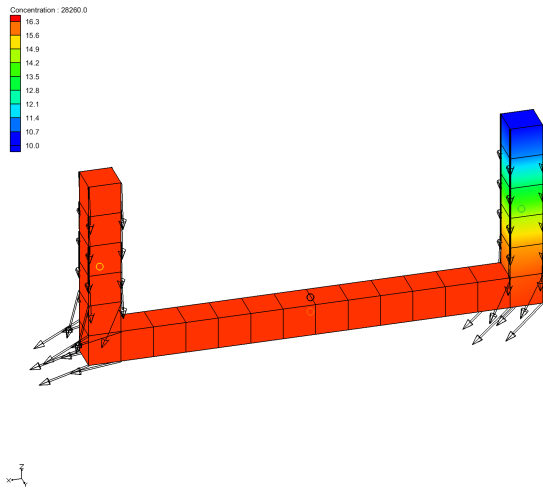
FIGURE 3.22 – Hauteur piézométrique et écoulement suivant une coupe le long de la galerie

celui du puits, mais en plus elle est exclusivement remplie d'eau (porosité égale à 1) alors que seulement 1 % du volume du puits est constitué d'eau. Enfin, le front froid arrive dans l'élément de pompage au fond du puits suivant. L'eau de l'élément de pompage est également réchauffée par l'arrivée d'eau provenant de la partie supérieure du puits.

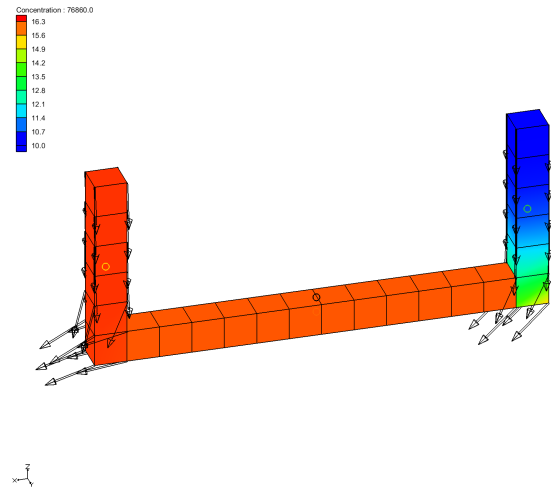
La figure 3.24 montre une coupe longitudinale dans le modèle, le long de la galerie. A ce moment, une quasi-stabilité des températures est atteinte. On peut observer que l'eau froide, en plus d'envahir le puits d'injection et la galerie, se propage également dans le massif attendant et forme une « bulle » froide. L'évolution des températures de l'eau pompée tend à se stabiliser après environ 250 h, comme l'atteste le graphique à la figure 3.25. La température finale atteint 11,20 °C dans la galerie ; le nœud situé à l'entrée de l'élément de pompage (du côté de la galerie) atteint une température stable de 11,26°C. La moyenne des températures des nœuds de l'élément de pompage est légèrement plus élevée, du fait de l'apport d'eau chaude venant du puits où est réalisé le pompage : 11,93°C.

Suite à un essai utilisant un K_d double, nous pouvons affirmer que la variation de K_d n'influence pratiquement pas la valeur finale stable. Son effet porte principalement sur la vitesse du refroidissement lors de l'avancée du front froid.

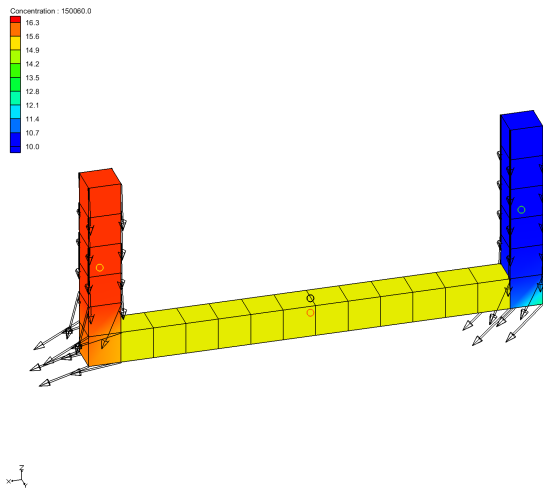
Le fait que la galerie se stabilise à une température supérieure aux 10°C montre l'impact du drainage du massif, qui alimente la galerie en eau chaude. Le massif lui-même est supposé réalimenté par les conditions frontières de Dirichlet. D'autre part, le volume d'eau contenu par la galerie, proportionnellement important comparé au volume des pores des puits, joue un rôle non négligeable dans la diminution de la température de l'eau pompée. Enfin, le second puits apporte également de l'eau chaude, ce qui permet *in fine* d'estimer la température de l'eau pompée à environ 12 °C en écoulement permanent, alors que l'eau injectée l'a été à 10, et ce sans tenir compte des effets de diffusion/conduction ni de la dispersion.



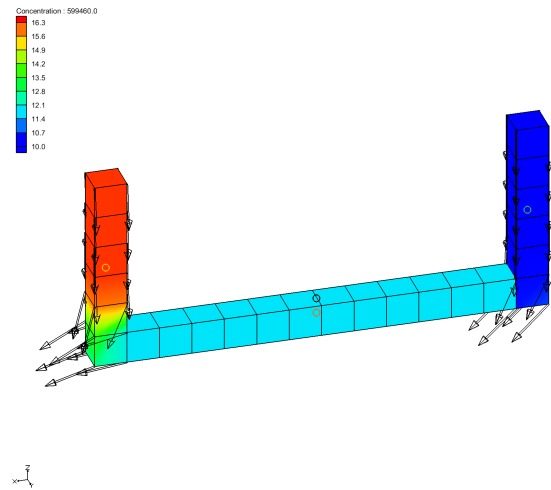
(a) Le front froid descend dans le puits



(b) Le front froid a atteint la galerie



(c) La galerie se refroidit



(d) L'eau froide a atteint le puits.

FIGURE 3.23 – Évolution de la température en cas d'advection seule

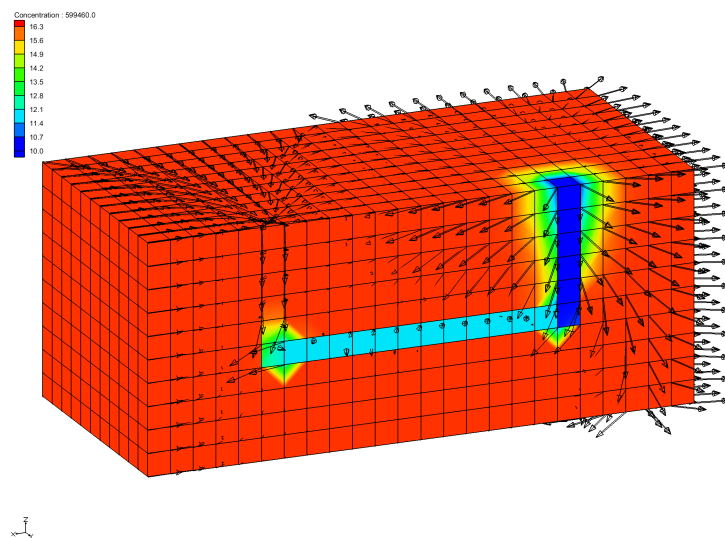


FIGURE 3.24 – État stabilisé de la concentration dans les puits, galerie et massif (modèle mine 7)

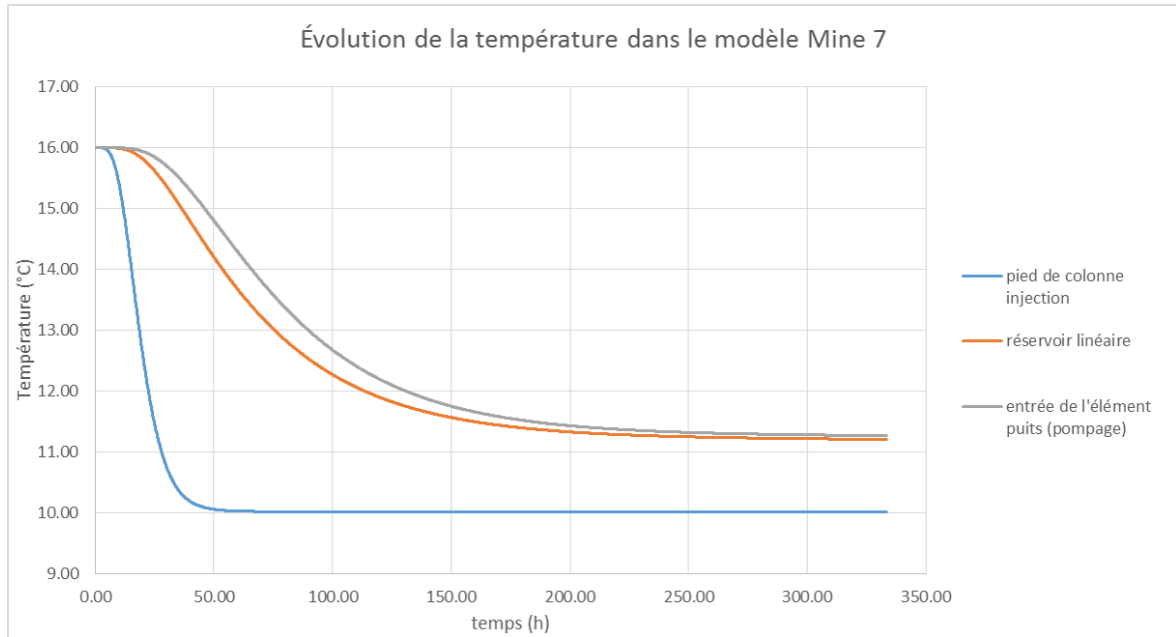


FIGURE 3.25 – Évolution de la température au pied de la colonne d’injection, au sein de la galerie et à l’entrée de l’élément puits

3.4.1.2 Transport faisant intervenir la diffusion/conduction et dispersion

L’ajout des phénomènes de dispersion et de diffusion/conduction modifie le résultat obtenu au point précédent. La dispersivité longitudinale est fixée à 1,5 m (soit la longueur d’une cellule et demi), la transversale à 0,5 m. Le coefficient de diffusion moléculaire est quant à lui estimé à $d_m = 7,10 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. La diffusion utilisée ici fait intervenir la conduction thermique, bien plus importante que le phénomène de diffusion thermique en tant que tel [Fossoul 2009]. Vu la présence de charbon, matériau conducteur de chaleur, nous avons considéré une conduction relativement élevée de $\Lambda_m = 3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Le coefficient de diffusion moléculaire devient :

$$d_m \leftrightarrow d_{diff} + \frac{\Lambda_m}{n_e \rho_w c_w} = 0 + \frac{3}{0,01 \cdot 1000 \cdot 4,2 \cdot 10^3} = 71,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Avec ces paramètres, la température s’harmonise plus que précédemment dans les sous-domaines. La figure 3.26 montre l’état du système après 333 h. A ce moment, la température dans l’élément de pompage s’est stabilisée. La progression du front froid se fait plus rapidement que dans le modèle d’advection seule, il se stabilise également plus rapidement. La température de pompage moyenne sur l’élément de pompage après stabilisation est d’environ 11,42 °C. La température du réservoir linéaire descend également plus bas que précédemment : jusque 10,68°C. On remarque qu’en tout temps, la température de l’élément de pompage est plus basse que dans le cas sans diffusion/conduction ni dispersion.

Remarquons que la diffusion a un impact sur le refroidissement du puits de pompage jusqu’à son sommet. Vu la forme du panache froid, le massif est probablement influencé par les conditions aux frontières, qui imposent une température de 16°C. Même si ce modèle est basique, il nous offre déjà quelques observations utiles pour développer les modèles plus complexes, tout en vérifiant la bonne tenue du logiciel qui donne ici une réponse plausible.

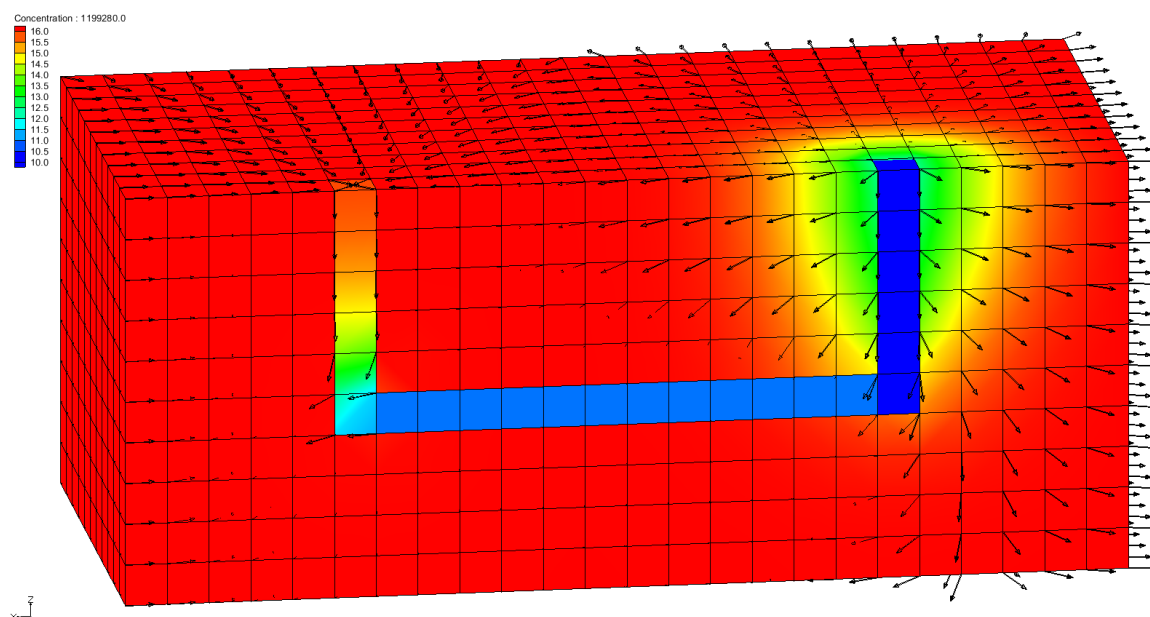


FIGURE 3.26 – Modèle Mine 7 avec advection, dispersion et diffusion / conduction

3.4.2 Maillage d'une galerie réaliste « Mine 3 »

Le maillage reprend les paramètres du modèle conceptuel présenté à la section 3.1, mais en ne représentant que le premier niveau de galerie.

3.4.2.1 Modèle

Ce maillage a été nommé Mine 3. Deux illustrations descriptives sont visibles à la figure 3.27. Il est constitué de trois sous-domaines :

- le massif rocheux en tant que tel, un parallélépipède rectangle de $400 \cdot 400 \cdot 1400 \text{ m}^3$, dont les faces latérales sont soumises à une condition de Dirichlet imposant une hauteur piézométrique de 0 (soit le toit du maillage) et une température de 16°C ;
- les faces supérieures et inférieures sont imperméables, sauf à l'emplacement de la condition de Cauchy au puits d'injection ;
- les puits, de 205 m de longueur (200 pour atteindre la galerie plus 5 correspondant à la zone de service de la cage) pour $3,5 \cdot 3,5 \text{ m}^2$ de section. À hauteur de la galerie dans le puits de pompage se situent les deux éléments sur lesquels sont effectués le pompage ($65 \text{ m}^3/\text{h}$) alors qu'au sommet du puits d'injection une condition de Cauchy simule l'injection ($65 \text{ m}^3/\text{h}$ à une température de 10°C) ;
- la galerie, longue de 1000 m, large de 4 m et haute de 2,5 m, est un réservoir linéaire.

Le flux d'eau injecté a été réduit de moitié par rapport au modèle conceptuel ($65 \text{ m}^3/\text{h}$ en pompage et injection) dans ce cas afin d'être plus réaliste en ce qui concerne les hauteurs piézométriques et de réduire les artéfacts se développant autour du puits d'injection (*cf. infra*).

Le maillage est constitué de polyèdres droits à faces triangulaires, qui ont été générés à partir de droites entourant la galerie et les puits. Ce type de maillage présente l'avantage

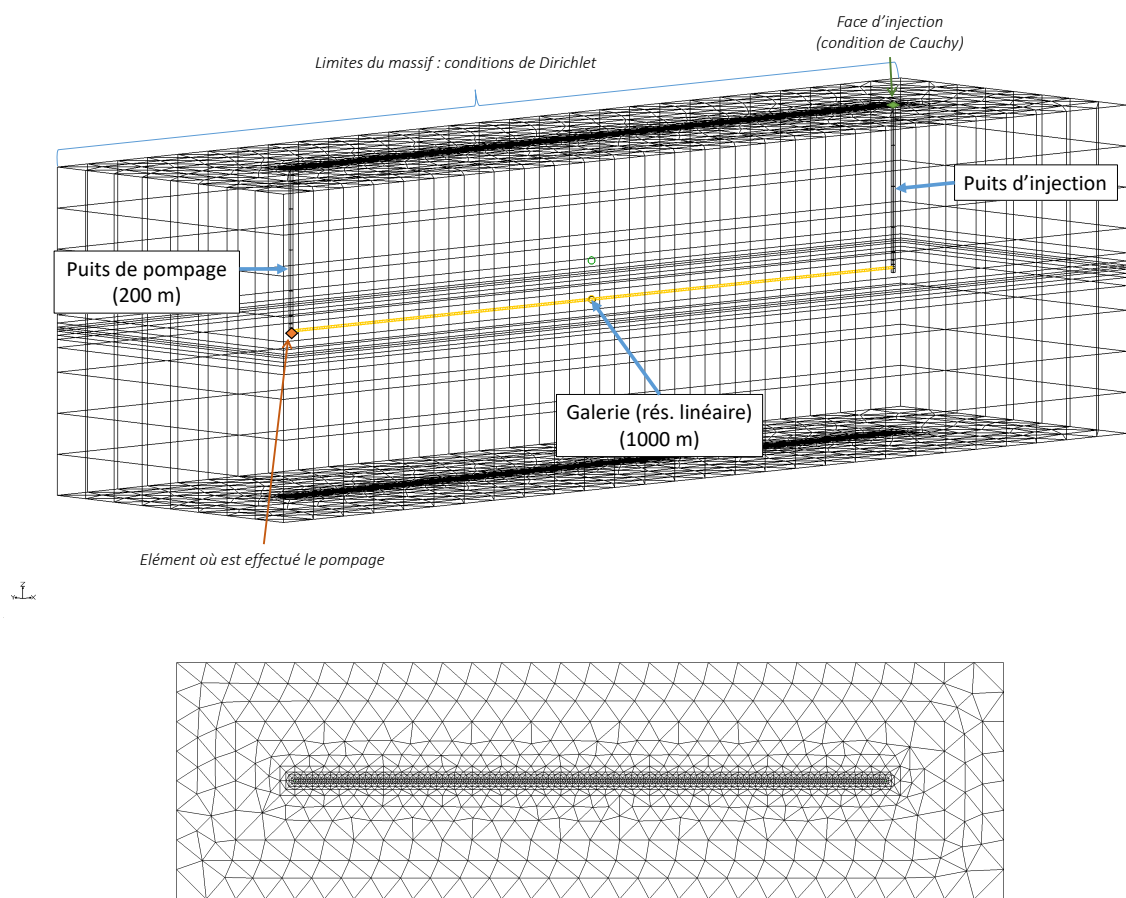


FIGURE 3.27 – Modèle du maillage Mine 3, vues de biais et en plan

Propriété	Roche	Puits	Galerie
Conductivité K	10^{-6} m/s	10^{-4} m/s	-
Coefficient d'emmagasinement spécifique S_s	10^{-4} m $^{-1}$	10^{-3} m $^{-1}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$ m $^{-1}$
Masse volumique de la matrice ρ_b	$2 \cdot 10^3$ kg/m 3	$1,8 \cdot 10^3$ kg/m 3	-
Porosité effective n_e	1 %	5 %	1
Dispersivité longitudinale α_L	200 m	200 m	-
Dispersivité transversale α_T	20 m	20 m	-
Tortuosité τ	1	1	-
constante d'adsorption K_d	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	-

TABLE 3.1 – Paramètres des différents matériaux associés au modèle Mine 3

d'être plus régulier suivant les différentes directions que des maillages rectangulaires. La taille des mailles varient de 2,5 à 50 m.

Les propriétés des différents matériaux composant ces sous-domaines sont présentés dans le tableau 3.1.

La diffusion a déjà été estimée pour le modèle décrit à la section 3.4.2 à $71,8 \cdot 10^{-6}$ m 2 /s. Le coefficient K_d est également identique à ce qui avait été utilisé dans la simulation précédente.

Enfin, les différents sous-domaines sont liés par une condition de Fourier, qui fait intervenir un coefficient α égal à 10^{-4} s $^{-1}$ entre la galerie et les puits et à 10^{-6} s $^{-1}$ pour les interfaces faisant intervenir le massif.

3.4.2.2 Résultats

Les résultats sont particulièrement intéressants comparés aux modélisations utilisant EPA-NET. En effet, le front froid, s'il avance bel et bien dans le puits d'injection dans un premier temps, finit par se stabiliser. L'injection d'eau froide contribue alors à provoquer une « bulle froide » autour de l'injection. L'impact sur les températures pompées est très faible voire négligeable : la température après stabilisation dans le puits de pompage est d'environ 15,88°C, alors que la température initiale est de 16°C. Une représentation graphique est visible sur la figure 3.28. La figure 3.29 montre l'évolution de la température dans la galerie sur le court terme, qui se stabilise vers 15,80°C.

Nous pouvons interpréter ces résultats, représentant des températures bien plus élevées que celles d'injection, comme le fait que le pompage et la galerie drainent principalement de l'eau du massif, plutôt que celle provenant du puits d'injection. La diminution de la température est ici liée à l'entrée du front froid dans la galerie environ 60h après le début de l'exploitation. Vu le volume concerné la température met un temps assez important, d'environ 1200 h, pour se stabiliser.

Cependant, il est à noter que sur le long terme on observe, après un palier, une reprise de la diminution de température, bien plus lente que celle observée précédemment. Cette diminution correspond à l'arrivée du front froid à travers le massif. Vu le temps nécessaire et la faiblesse de l'advection, à 200 m de profondeur le refroidissement se fait lentement. La galerie, drainante, est de plus en plus impactée par ce nuage froid au fur et à mesure que le temps passe : le nuage s'étale et le voisinage de la galerie se refroidit petit à petit. Le

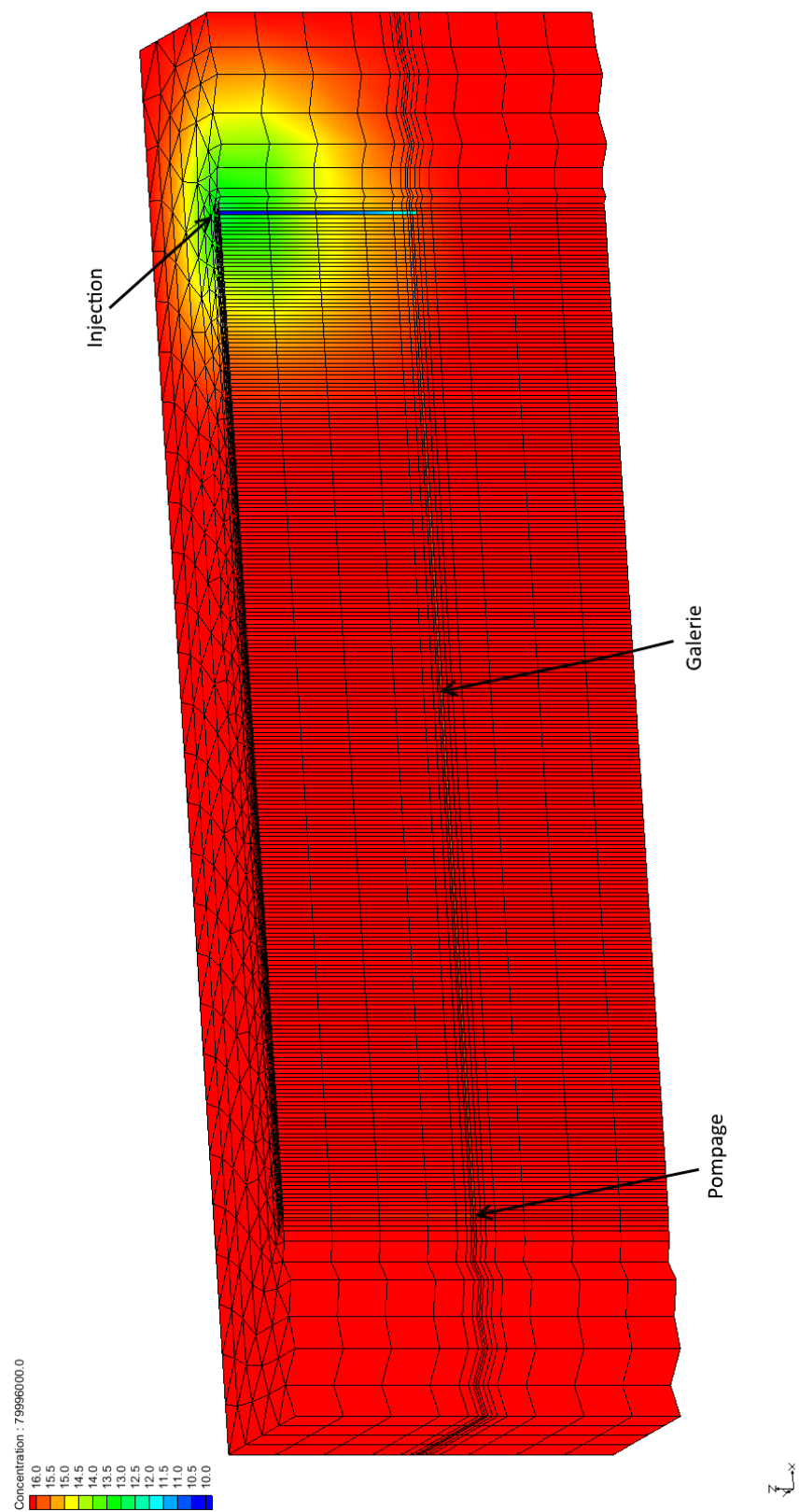


FIGURE 3.28 – Température dans le modèle mine 3 après stabilisation

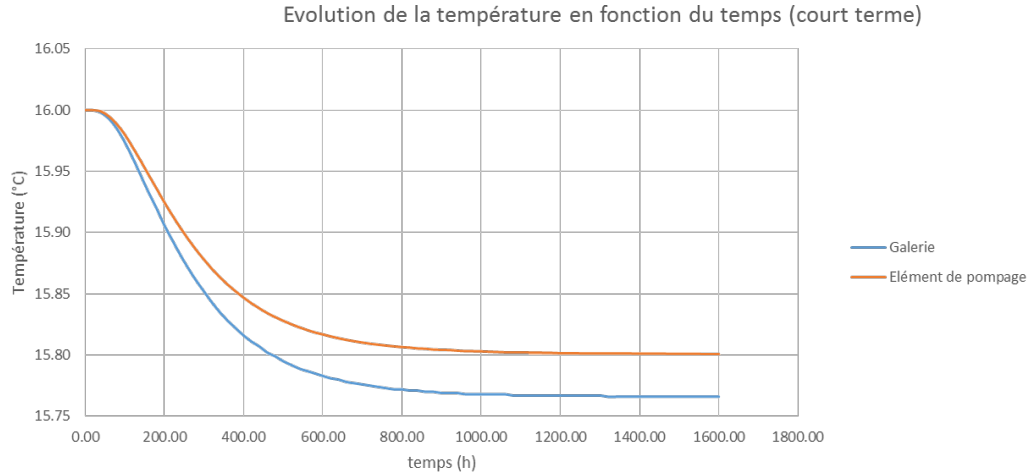


FIGURE 3.29 – Évolution de la température au sein de la galerie du modèle Mine 3 (court terme)

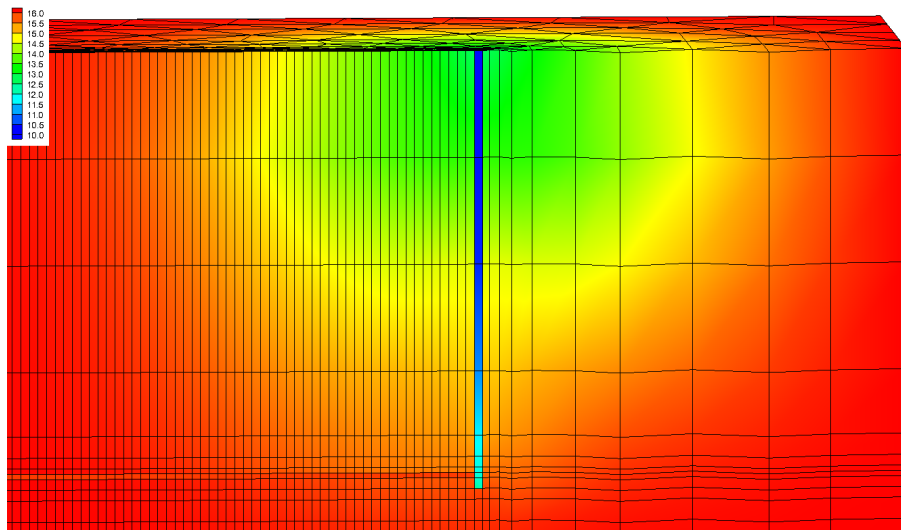


FIGURE 3.30 – Distribution de la température après 26 560 h

phénomène de diffusion (et de conduction) au sein du massif devient alors important, comme on peut le constater à la figure 3.30. La figure 3.31 représente l'évolution de la température sur le long terme.

Le modèle met cependant en lumière deux légers problèmes. Le premier est que la hauteur piézométrique au lieu d'injection atteint près de 315 m au-dessus du plafond de l'aquifère modélisé, ce qui est beaucoup. Certes, l'aquifère n'étant pas libre (il n'y a pas de zone désaturée dans le maillage), tout apport d'eau se traduit immédiatement par une hausse de pression, donc de hauteur piézométrique. De plus, il faut également considérer que l'injection se fait par une condition de Cauchy pour des moyens pratiques, alors qu'en réalité l'injection devrait plutôt se faire via une injection sur plusieurs mètres dans le puits. Mais il convient de noter que cette forte hauteur piézométrique, d'une part impacte le champ d'écoulement, et d'autre part est assez peu réaliste dans les conditions supposées, à savoir que le sol devrait se trouver au maximum quelques dizaines de mètres au-dessus du bedrock modélisé ici.

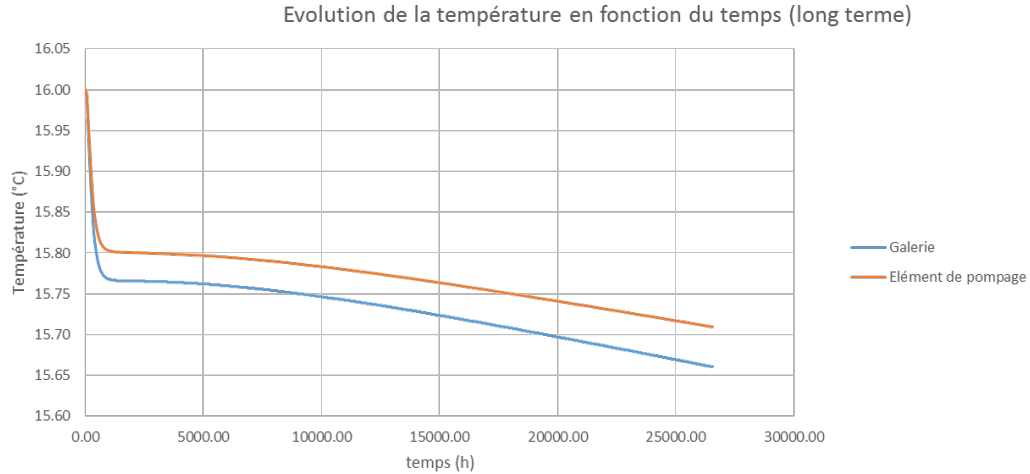


FIGURE 3.31 – Evolution de la température sur le long terme

Le second problème est numérique : dans le puits d'injection, les premières cellules traversées sont très longues et étroites, et le flux orthogonal y est loin d'être anecdotique. Le rapport longueur sur largeur des éléments constitutifs du puits provoquent ici des erreurs dites de « transmissibilité négative ». L'intégration sur l'élément peut amener dans certains cas à des flux négatifs, allant des hauteurs piézométriques les plus basses vers les plus élevées [Blessent et al. 2009]. Lorsque le front froid traverse le haut du puits, des artéfacts tels que montrés à la figure 3.32 apparaissent. Heureusement, ce phénomène s'estompe avec le temps, et il est de faible ampleur... bien qu'il suffise à dépasser par endroit la température maximale (16°C). Ce problème étant lié au maillage, les leçons ont été tirées lors de la création du dernier modèle.

3.4.3 Maillage trois galeries « Mine 8 »

Le dernier maillage est basé sur la même construction que le précédent, mais compte trois galeries aux cotes -200 (identique à « Mine 3 »), -350 et -500, qui sont autant de réservoirs linéaires indépendants. Ce maillage introduit également une zone déconsolidée au-dessus des galeries. Pour des raisons de temps de calcul, seule une moitié du modèle conceptuel a été modélisée (coupe selon le plan de symétrie défini par les puits et les galeries). Une représentation explicative du maillage est faite à la figure 3.33, qui montre le maillage avec ou sans le massif par soucis de lisibilité. Ce maillage a été nommé Mine 8.

Les dimensions des galeries et puits sont similaires à celles du modèle développé au point 3.4.2, à ceci près que seule la moitié des puits et des galeries sont ici représentées (coupe selon le plan de symétrie). Verticalement, afin d'éviter le phénomène de transmissibilité négative, les plans formant le maillage sont espacés au maximum de 20 m, contre 50 dans le maillage précédent. Ainsi, le maillage compte 6 sous-domaines :

- le massif rocheux en tant que tel, un parallélépipède rectangle de $400 \cdot 600 \cdot 1800 \text{ m}^3$, dont trois faces latérales sont soumises à une condition de Dirichlet imposant une hauteur

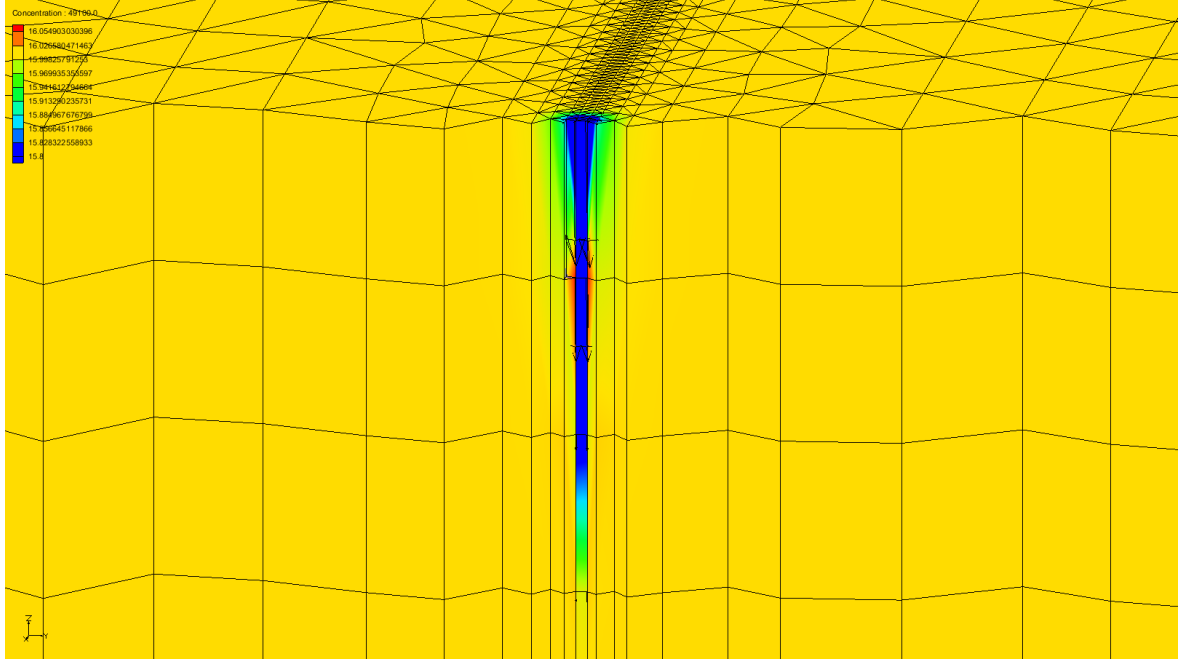


FIGURE 3.32 – Oscillations et artéfacts autour du puits d’injection

piézométrique de 10 m (soit 10 m de plus que le toit du maillage afin que le milieu reste saturé) et une température de 19,5°C ;

- les faces supérieure et inférieure sont imperméables, de même que la face suivant l’axe de symétrie du modèle conceptuel ;
- les puits, de 504 m de longueur pour 1,75·3,5 m² de section. À hauteur de la 3^e galerie dans le puits de pompage se situent les deux éléments sur lesquels sont effectués le pompage alors qu’au sommet du puits d’injection une condition de Cauchy simule l’injection à une température de 10°C. Vu que seule la moitié du modèle conceptuel est représenté, le débit de base $Q = 130/2 = 65 \text{ m}^3/\text{h}$ en injection et en pompage ;
- les trois galeries, longues de 1000 m, larges de 1,5 m et hautes de 2,5 m, sont autant de réservoirs linéaires.

La température initiale est encore une température moyenne homogène sur l’ensemble du domaine : 19,5°C. Les flux injectés et pompés correspondent à ceux développés dans le modèle conceptuel (section 3.1) : vu que le modèle est divisé par deux, les flux le sont également. La hauteur piézométrique initiale est de 10 m.

Les principaux paramètres du modèle sont repris dans le tableau 3.2. La diffusion est toujours égale à $71,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et, comme K_d , a été calculée dans les sections précédentes. Les zones déconsolidées sont formées des mêmes matériaux que ceux remplissant le puits, mais ils sont un peu moins conducteurs.

3.4.3.1 Résultats des modélisations

La construction de ce modèle implique que les débits soient également divisés par deux par rapport au modèle conceptuel. Cependant, afin de garantir la cohérence avec les autres modèles, les débits mentionnés par la suite correspondront au modèle conceptuel entier.

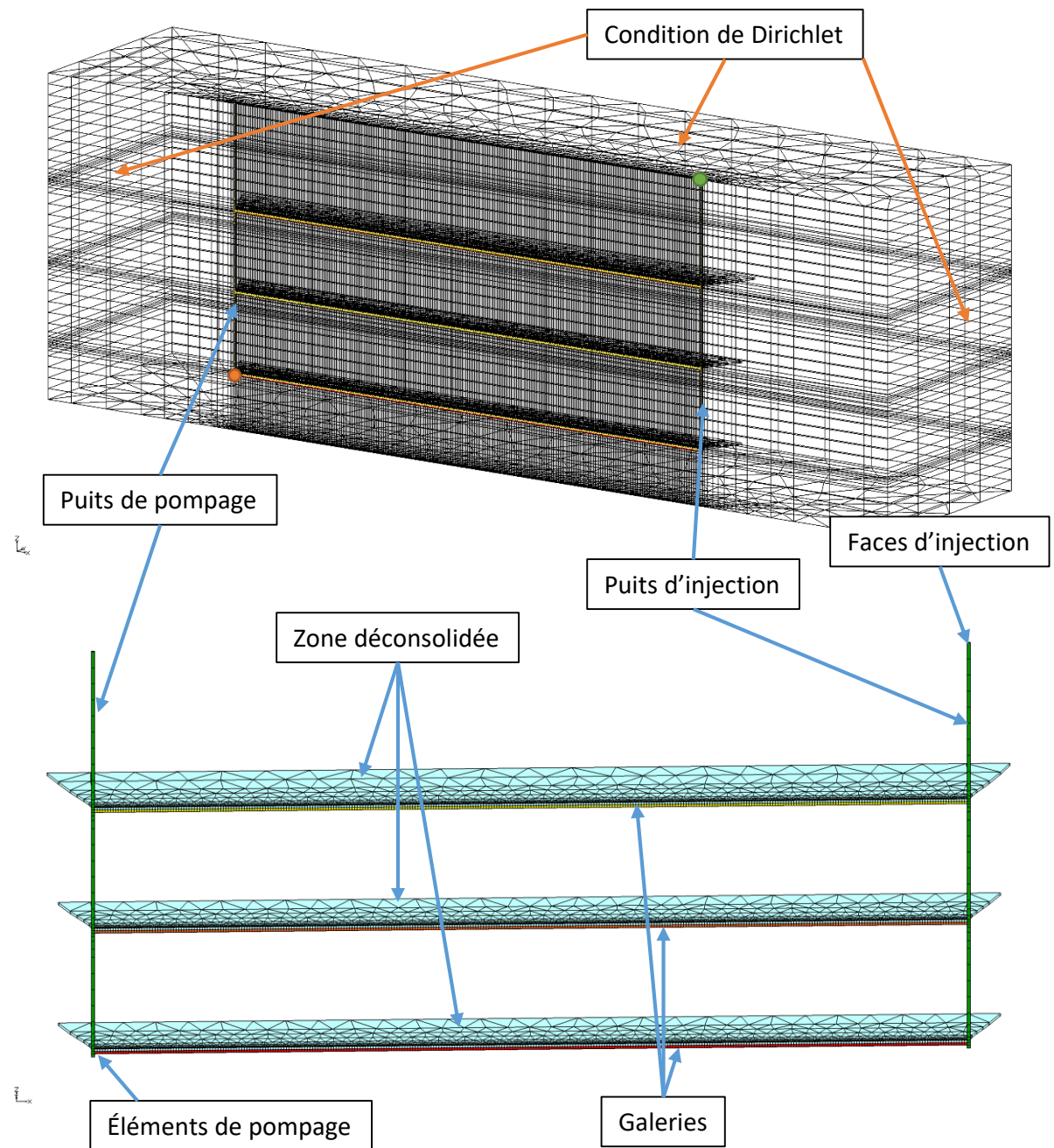


FIGURE 3.33 – Présentation du maillage Mine 8

Propriété	Roche	Puits	Galeries	Zone déconsolidée
Conductivité K	10^{-6} m/s	variable	-	10^{-5} m/s
Coef. d'emmagasinement spécifique S_s	10^{-4} m $^{-1}$	10^{-3} m $^{-1}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$ m $^{-1}$	10^{-3} m $^{-1}$
Masse volumique de la matrice ρ_b	$2 \cdot 10^3$ kg/m 3	$1,8 \cdot 10^3$ kg/m 3	-	$1,8 \cdot 10^3$ kg/m 3
Porosité effective n_e	1 %	5 %	1	5 %
Dispersivité longitudinale α_L	100 m	100 m	-	100 m
Dispersivité transversale α_T	10 m	10 m	-	10 m
Tortuosité τ	1	1	-	1
constante d'adsorption K_d	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	-	$2,77 \cdot 10^{-4}$

TABLE 3.2 – Paramètres des différents matériaux associés au modèle à trois galeries

Grâce à la résolution du modèle construit à la section 3.4.2, nous avons observé que le flux et surtout le transfert de chaleur pouvaient être très différents de ceux résultant d'un écoulement en conduites, où l'eau circulerait sans entrave dans les puits comme dans les galeries. Le principal paramètre influençant l'écoulement est la conductivité hydraulique du milieu. Considérons dès lors deux cas extrêmes :

- Si la conductivité est homogène et isotrope autour du point d'injection ($K_{puits} = K_{massif}$), l'eau froide devrait se répartir en une « bulle froide » autour de la zone d'injection.
- Au contraire, si le puits est beaucoup plus conducteur que le massif (qui, relativement, se comporterait comme une zone quasiment imperméable), l'eau froide circulerait quasiment exclusivement dans les puits, assimilables alors à des tuyaux.

C'est pourquoi nous avons effectué une étude de sensibilité de la différence de conductivité entre le puits et le massif. La conductivité du massif étant fixée à 10^{-6} m/s, nous faisons varier la conductivité des puits entre 10^{-2} m/s et $10^{-4,5}$ m/s. Ceci nous permettra d'étudier les écoulements relatifs aux contrastes de conductivités compris entre $10^{1,5}$ et 10^4 . Les hauteurs piézométriques obtenues ne sont pas toujours réalistes, en particulier dans les basses conductivités, mais nous négligerons ce point momentanément.

Les représentations graphiques des résultats de transfert sur le long terme se trouvent dans les annexes, à la section A. Ils ont été pris après la stabilisation du système, dans ce cas-ci après 800 jours.

Comme le montre la figure 3.34 et les modélisations, la température de l'élément de pompage n'est impactée que pour un contraste de conductivité compris entre $10^{2,5}$ et 10^3 ou plus. La température se stabilise à environ 19,06°C pour le contraste de conductivité de 10^3 et à 17,75°C pour le contraste $10^{3,5}$. Sur la courbe relative au contraste 10^4 , remarquons que la chute de température semble se faire en deux phases, comme observé dans le cas à une galerie, il n'y a pas de stabilisation.

Observons les températures dans les résultats présentés en annexe. Celles-ci nous indiquent comment s'effectue l'écoulement, telles un traceur. Lorsque le contraste de conductivité est très faible ($10^{1,5}$ et 10^2), l'écoulement se fait majoritairement radialement. On observe l'apparition

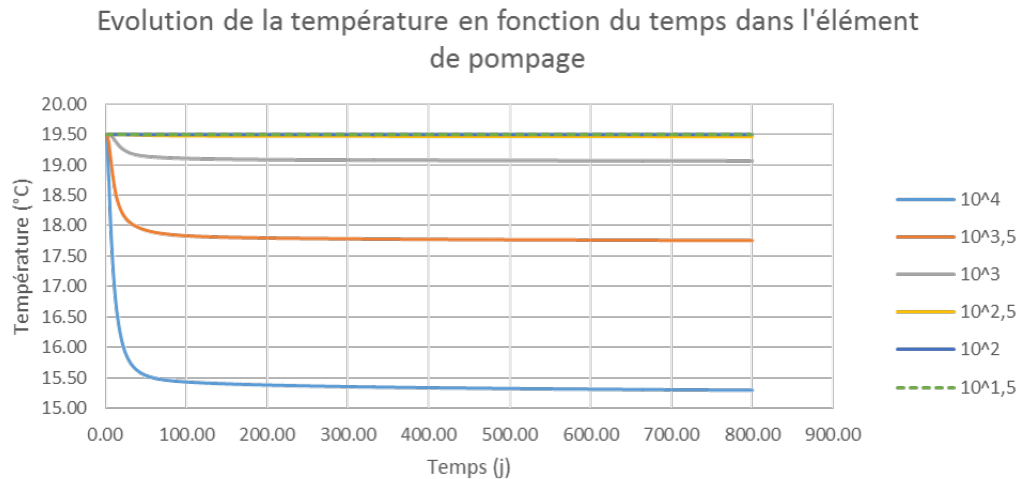


FIGURE 3.34 – Évolution de la température à l'élément de pompage dans le modèle Mine 8 pour différents contrastes de conductivité

d'une « bulle » d'eau froide au sommet du puits d'injection. Certes, l'eau froide se propage dans le puits également, mais le refroidissement n'a que peu d'effets sur le reste du système, dont la température demeure proche de 19°C.

L'évolution des températures dans les différentes galeries est représentée à la figure 3.36, en complément des figures en annexe. La première galerie qui se refroidit est, assez logiquement, celle située au premier niveau (galerie 1). L'impact est perceptible, même avec le contraste le plus faible. Dans ce cas, le refroidissement rapide, lié à l'arrivée du front froid par le puits, est proportionnellement faible (moins d'un demi degré Celsius). Par la suite, le refroidissement continue, comme il a été observé sur le maillage à une galerie (section 3.4.2). Grâce à la distribution de température au sein du domaine (figure A.11 en annexe), on observe que la « bulle froide » atteint le voisinage immédiat de la galerie dans sa partie droite. Dans cette zone, la galerie est drainante, et l'on peut clairement voir un panache froid relier la « bulle » en tant que telle et la galerie.

En augmentant le contraste, c'est-à-dire en diminuant la conductivité au sein des puits, le panachage d'eau froide avance de plus en plus loin dans ce sous-domaine. La « bulle » s'allonge dans le puits et impacte également plus les zones déconsolidées, plus conductrices que le massif. La première galerie est en contact avec de l'eau de plus en plus froide, ce qui augmente l'impact de l'arrivée du front froid et produit, naturellement, un refroidissement d'autant plus important de la galerie. En augmentant le contraste de conductivité, le massif est de plus en plus refroidi le long du puits et des galeries perdantes. Le caractère perdant ou drainant des galeries est particulièrement bien visible sur la zone déconsolidée. Considérons la zone déconsolidée associée à la première galerie (très bien visible pour des contrastes de $10^{2,5}$ ou 10^3 aux figures A.6 et A.8) : la partie droite de la galerie, située près du puits d'injection, draine des eaux chaudes venant du massif et le panache froid provoqué par le puits. La partie gauche de la galerie, au contraire, est perdante, et l'eau froide qu'elle contient remplit la zone déconsolidée.

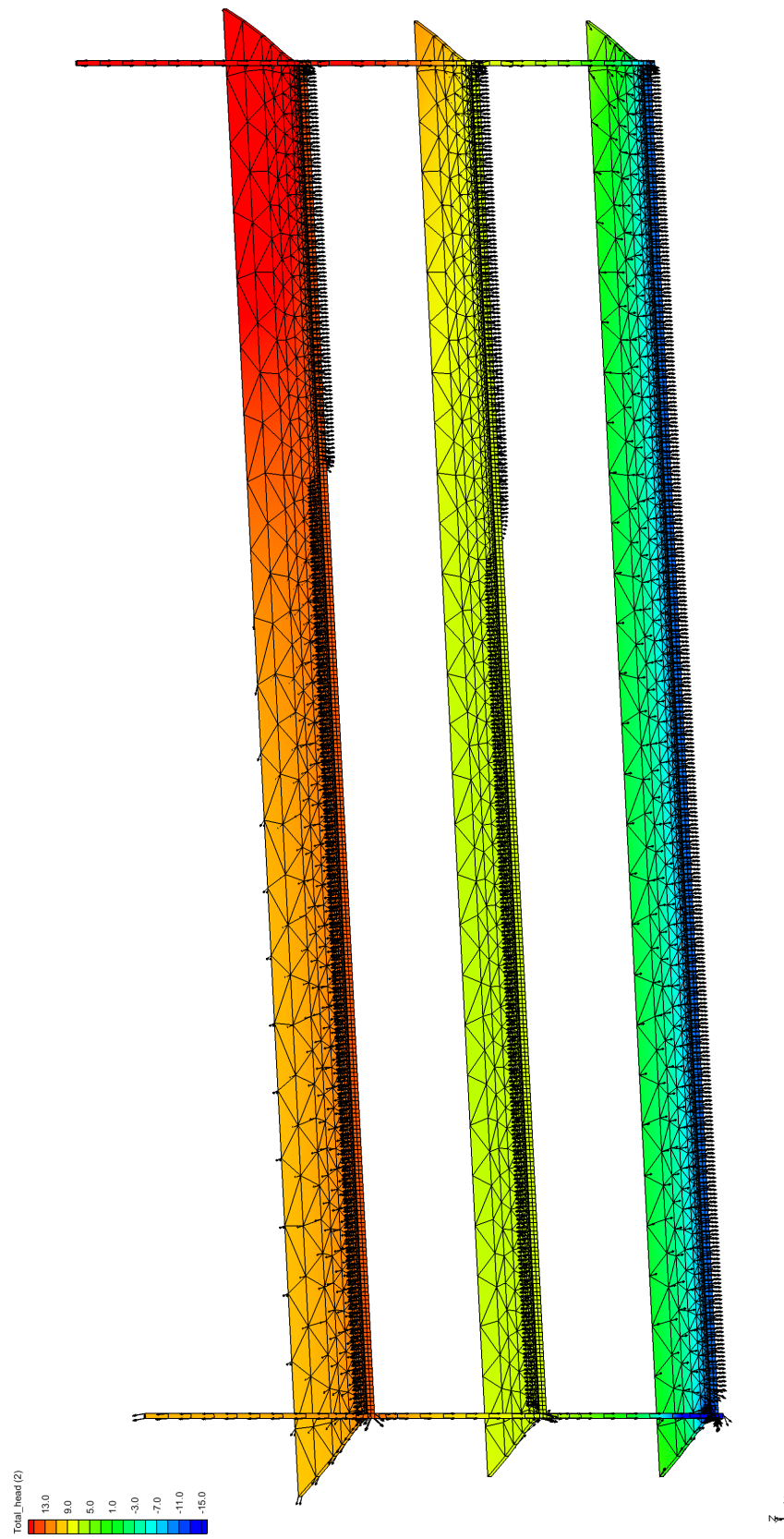


FIGURE 3.35 – Hauteur piézométrique (échelle partielle) sur le maillage pour un contraste de conductivité de 10^2

Les galeries 2 et 3 sont moins impactées, à contraste égal, que la première. L'arrivée du front froid est moins brutale, le débit provenant du puits d'injection moins important, et parfois l'eau froide n'atteint pas la profondeur de la galerie. Ainsi, la galerie 2 n'est impactée que pour un contraste de conductivité supérieur à 10^2 ; pour la troisième il faut un contraste supérieur à $10^{2,5}$. A l'exception du contraste de conductivité de 10^4 , les températures des galeries 2 et 3 sont relativement stables une fois le front froid passé. On constate d'ailleurs pour les contrastes de conductivité inférieurs à 10^4 que le massif est relativement peu refroidi dans le voisinage des galeries 2 et 3.

Le refroidissement du puits de pompage évolue avec le contraste. On remarque que la galerie 1 amène de l'eau au puits de pompage, et que cette eau, naturellement descend vers l'élément de pompage, mais remonte également dans la partie supérieure du puits. En effet, le puits de pompage est perdant dans sa partie supérieure. Les hauteurs piézométriques et la direction de l'écoulement sont affichés à la figure 3.35 (attention, l'échelle utilisée est partielle, les maximums et minimums la dépassent). On observe à l'élément de pompage que l'eau la plus froide est acheminée par le puits de pompage plutôt que par la galerie adjacente.

Enfin, le graphique de la figure 3.37 présente l'évolution des températures en différents endroits importants du maillage pour un contraste de conductivité de 10^4 . En particulier, on distinguera l'évolution de la température dans les trois galeries, dans l'élément de pompage ainsi qu'un peu en amont de cet élément dans le puits de pompage. Ce graphique, réalisé sur les 250 premiers jours, montre bien la chute de température en deux temps. La première est la plus importante, il s'agit de l'arrivée du front froid (qui s'est étalé du fait de la diffusion et de la dispersion ainsi que la traversée de la galerie, dotée d'un grand volume de mélange). Par la suite, la température baisse, avec une concavité positive, et bien plus lentement. En observant la distribution de la température après que le front froid ait atteint l'élément de pompage (figure A.1 dans les annexes), on remarque que le massif se refroidit au niveau des intersections entre les puits et les galeries 1 et 2. L'écoulement est plus complexe dans ces zones : il s'agit d'intersections de sous-domaines drainants et perdants. Par exemple, le puits d'injection est perdant tandis que les galeries 1 et 2 sont drainantes à proximité du puits d'injection ; ces mêmes galeries sont perdantes à proximité du puits de pompage. Il faut également constater que si l'eau des galeries 1 et 2 et en amont de l'élément de pompage dans le puits refroidit (perte de $0,07^\circ\text{C}$ environ entre les jours 100 et 250), il n'en est pas de même dans la troisième galerie, où la température demeure stable.

On observe également que l'eau de la galerie 3 est plus chaude que l'eau provenant du puits de pompage, refroidi par l'eau provenant des galeries 1 et 2.

3.4.3.2 Discussion

Les résultats présentés ici sont systématiquement conditionnés par le caractère drainant ou non des réservoirs considérés. Selon le schéma étudié, une galerie est forcément drainante d'un côté et perdante de l'autre.

Nous avons remarqué que le refroidissement du système se faisait dans certains cas en deux phases. La première est liée à l'arrivée du front froid, sans surprise. La seconde est plus

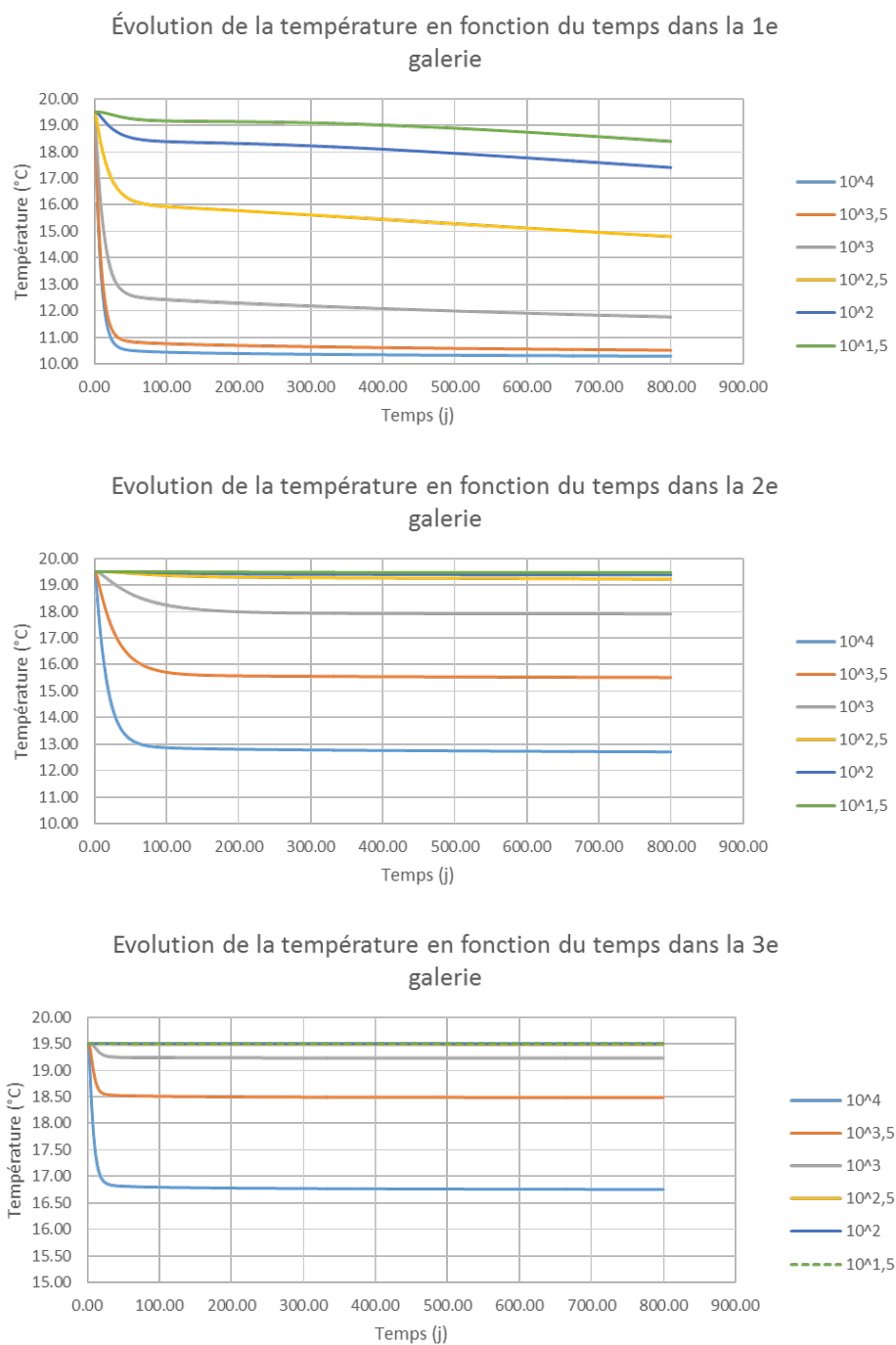


FIGURE 3.36 – Évolution des températures au sein des différentes galeries en fonction du temps et du contraste de conductivité

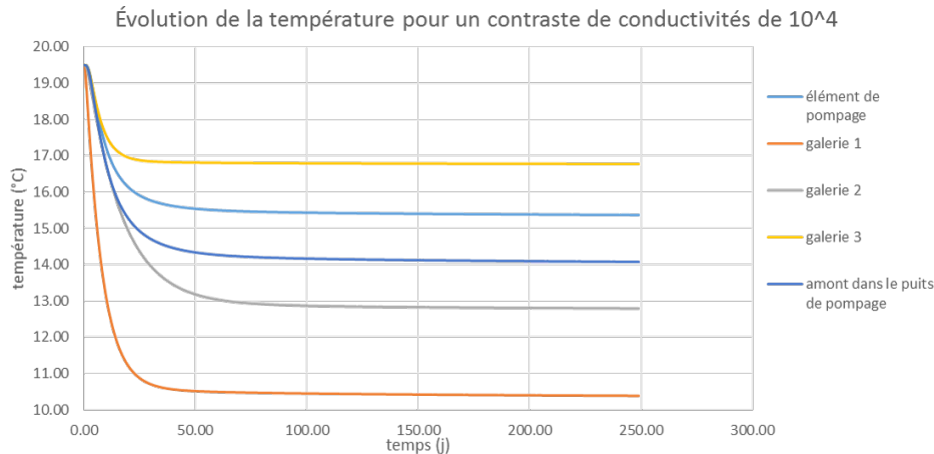


FIGURE 3.37 – Évolution des températures en fonction du temps à différents endroits du maillage, pour un contraste de conductivités de 10^4

complexe à appréhender : elle correspond en effet à l'évolution de la température du massif dans les zones où il est drainé par la galerie. Ainsi, la première galerie est impactée sur le long terme par le panache froid qui quitte le puits d'injection et traverse une partie du massif avant de rejoindre la galerie. De manière similaire, la galerie 3 constitue un drain. Dans ce cas, le massif en profondeur étant très peu impacté par le panache injecté, l'eau drainée est chaude et d'une température stable. Ceci explique pourquoi la température de la galerie 3 est stable une fois que le front froid est passé.

Lorsque le contraste de conductivité est suffisamment faible (moins de 10^3), le flux d'eau froide n'atteint pas l'élément de pompage, une partie importante est dirigée vers le massif. Pour les contrastes de conductivité plus importants, le flux se fait suffisamment au sein des puits pour influencer la température de l'eau extraite.

Quel que soit le contraste choisi, la première galerie est impactée. Pour les plus petits contrastes de conductivité, remarquons que l'effet du drainage du panache au sein du massif a plus d'impact à long terme que l'arrivée du front froid. Pour les contrastes plus élevés ($10^{2.5}$ et plus), l'eau froide s'y propage préférentiellement, en particulier du fait qu'elle est perdante dans une grande portion. L'eau froide s'engouffre de plus en plus fortement dans les puits au fur et à mesure que le contraste augmente, produisant un refroidissement important de la seconde galerie pour les contrastes de 10^3 et plus. Le second puits se refroidit alors, et l'eau froide est finalement attirée par l'élément de pompage qui crée une aspiration.

La manière dont la température évolue est très fortement liée à la manière dont les flux s'écoulent dans les galeries et dans la roche, selon ces résultats. Il s'agit de formuler à ce sujet deux mises en garde :

- le code ne prend pas en compte la diffusion au travers des parois entre sous-domaines,
- le flux est directement proportionnel à la différence de hauteur piézométrique, pondéré par la conductivité. Or, la hauteur piézométrique a bien souvent été irréaliste dans ces modélisations. En effet, pour garder des résultats comparables, le même débit a été

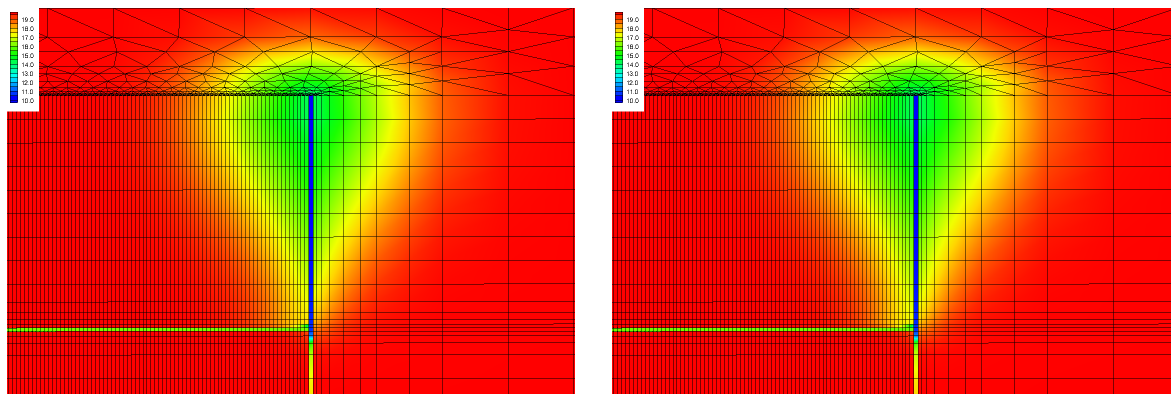


FIGURE 3.38 – Comparaison entre les panaches d'injection pour un contraste de $10^{2,5}$, à g. après 800 j et un débit $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{h}$, à d. après 200 j et un débit $Q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$

utilisé pour chaque simulation. Pour y remédier, une seconde simulation, utilisant un débit divisé par 4 ($32,5 \text{ m}^3/\text{h}$) a également été effectuée.

Les hauteurs piézométriques maximales, observées à la condition d'injection (de Cauchy) sont reprises dans le tableau ci-dessous. Il est évident qu'une hauteur piézométrique de 1177 m n'a aucun sens physique, elle est impossible à appliquer sans poser de nombreux problèmes géotechniques et mécaniques. Remarquons encore que la condition de Cauchy ne représente pas une méthode d'injection très réaliste, comme déjà évoqué dans le modèle précédent. Malheureusement, la solution utilisant un élément d'injection ne convergerait pas lors de la résolution des équations d'écoulement.

contraste de conductivité	conductivité des puits (m/s)	hauteur piézométrique maximale (m)	
		$Q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{h}$
$10^{1,5}$	$10^{-4,5}$	1177	302
10^2	10^{-4}	775	201
$10^{2,5}$	$10^{-3,5}$	479	127
10^3	10^{-3}	280	77
$10^{3,5}$	$10^{-2,5}$	149	45
10^4	10^{-2}	74	26

Les simulations avec un débit quart donnent des résultats tout à fait similaires au débit initial. Le comportement observé en fonction du contraste est absolument identique. Ainsi, le contraste nécessaire pour impacter l'élément de pompage est le même, le refroidissement des galeries est identique. La principale différence tient dans la vitesse du refroidissement : le phénomène est pratiquement 4 fois plus lent. Une seconde différence observée, mais qui est négligeable, est l'étalement du panache froid, légèrement plus important du fait de la diffusion. La figure 3.38 permet de comparer le panache d'eau froide dans le puits d'injection après 800 jours pour un débit de $32,5 \text{ m}^3/\text{h}$ et 200 jours pour un débit de $130 \text{ m}^3/\text{h}$. On peut constater que les deux panaches sont quasiment identiques. De plus, les températures du pompage, dans les cas où elles atteignent un état stable, sont identiques à $0,04^\circ\text{C}$ près.

3.5 Comparaison entre les résultats

Deux grandes approches ont été utilisées dans cette partie : d'une part l'écoulement en conduites, modélisant les phénomènes d'advection au sein des galeries et de conduction entre la paroi rocheuse et le fluide ; d'autre part une modélisation 3D, d'éléments finis avec volumes de contrôle, qui a permis un ensemble de modélisations sur le massif, une zone déconsolidée, des puits remblayés et des galeries ouvertes. Dans les deux cas, le but a été d'observer l'évolution de la température du système minier, soumis à un débit de 130 m³/h et à une injection d'eau à 10 °C.

Les simulations en conduite représentent une mine constituée de deux puits reliés par trois galeries. Elles ont été élaborées en tenant compte de la température associée à chaque étage de la mine. Cette méthode considère que tous les puits sont ouverts. Une première simulation montrait que l'advection seule au sein des galeries et puits vidangeait le système en un peu plus d'un mois. L'ajout du phénomène de conduction ne ralentit pas la chute de température, mais augmente le minimum atteint, jusqu'à 15°C. Dans ce cas, le système est déjà viable selon les critères fixés dans le modèle conceptuel qui prévoyait de réduire la température de 5 °C. La présence de failles et de galeries de mines prolongées au-delà des puits offre des opportunités supplémentaires. Nous avons modélisé une faille en travers du massif, une source d'eau chaude dont le débit était faible, et supposé que les galeries prolongées étaient drainantes et apportaient ainsi un peu d'eau à la température du massif. Ce cas de figure a montré, d'une part, que la faille traversant le massif n'avait presque pas d'impact, tandis que la source chaude et l'apport d'eau venant du massif avaient un impact important (plus de 3°C) sur la température de l'eau pompée. Il faut également noter qu'une partie de l'eau froide n'était pas injectée dans ce cas, mais bien envoyée dans les écoulements de surface (pour compenser les débits d'eau provenant des galeries drainantes et de la source d'eau chaude). La réduction du débit d'eau froide a eu comme conséquence de retarder l'arrivée du front froid au pompage, en plus d'augmenter la température minimale atteinte en ce nœud. La simulation en conduite nous a donc montré l'importance des sources éventuelles d'eau dans le résultat final, bien que la mine ne pourrait être exploitée sur une période supérieure à quelques mois avant que la température de l'eau au lieu de pompage ne baisse du fait de l'arrivée du front froid. Il conviendrait donc de bien définir ce minimum pour une exploitation.

La simulation utilisant les éléments finis avec volumes de contrôle a également modélisé une mine constituée de deux puits reliés par trois galeries. Cependant, les puits ont été considérés comme remblayés, comme c'est souvent le cas dans les mines aujourd'hui abandonnées. De plus, la température du massif a été considérée comme homogène à 19,5°C. Dans le futur, il serait certainement intéressant d'effectuer une modélisation tenant compte du gradient de température naturel, mais la construction de cette condition initiale n'étant ni immédiate ni évidente, il a été choisi, dans un premier temps, de prendre une température moyenne. Le modèle « élément finis » fait intervenir bien plus de processus de transfert de chaleur que le modèle d'écoulement en conduites : advection, diffusion/conduction au sein des milieux, dispersion, il tient compte de la capacité calorifique des roches et de l'eau. Malheureusement il ne modélise pas la diffusion/conduction entre les sous-domaines.

Il a été remarqué que le contraste de conductivité entre les puits (où est injectée et pompée l'eau) et le massif rocheux encaissant était déterminant sur l'évolution de la température du système. En effet, lorsque ce contraste est faible (moins de $10^{2,5}$ dans notre schéma), l'eau froide forme une « bulle » autour de la zone d'injection. Dans ce cas, il est possible d'exploiter une eau dont la température est constante dans le temps, bien qu'à un débit plus faible qu'initialement souhaité. Au contraire, lorsque le contraste de conductivité hydraulique entre le matériau remplissant le puits et le massif est élevé (plus de 10^3), l'advection au sein des puits devient bien plus importante qu'au sein du massif et le schéma se rapproche d'un écoulement en conduites.

Une autre différence importante entre les résultats obtenus en écoulement en conduite et à l'aide des « éléments finis à volumes de contrôle » tient dans le rôle drainant ou perdant des galeries. Les galeries sont à la fois drainantes (généralement à proximité du puits d'injection) et perdantes (du côté du puits où a lieu le pompage). La température du massif dans les zones où les galeries sont drainantes influence fortement la température de l'eau au sein de la galerie. Par exemple, le drainage d'une zone du massif proche de la zone d'injection provoque une diminution de la température sur le long terme. Au contraire, le positionnement de la galerie en profondeur, loin de la zone d'injection, peut garantir à la galerie une température principalement influencée par le massif. Par exemple, même avec un contraste de conductivité entre le massif et les puits de $10^{3,5}$ (soit un puits de conductivité $K = 10^{-2,5}$ m/s contre un massif de conductivité $K = 10^{-6}$ m/s), l'eau pompée est à une température quasi-constante de 17,75 °C et la galerie située à proximité reste à 18,5 °C.

Malheureusement, l'augmentation de la conductivité du puits induit également une augmentation de la charge pour le pompage et l'injection. Pour les contrastes les plus faibles, il est impossible d'atteindre les 130 m³/h souhaités selon le modèle conceptuel. Nous avons donc effectué une simulation reprenant des débits divisés par 4, soit 32,5 m³/h. Il est remarquable que, en dehors de différences mineures liées à la conduction, le comportement est identique. Certes, la vitesse du refroidissement du système est évidemment influencée par le débit, mais seul le contraste entre les conductivités influence sur la formation d'une « bulle » d'eau froide, restant à proximité du puits d'injection, ce qui détermine fortement la température du pompage.

Il faut encore remarquer, à propos de la modélisation du type « éléments finis à volumes de contrôle », qu'aucun écoulement régional n'a été pris en compte. Or dans le cas où le contraste est faible, et où le panache d'eau froide forme une « bulle » froide en impactant peu les galeries et l'élément de pompage, l'existence d'un courant d'eau régional au sein du massif aurait certainement une influence sur la forme du panache et sur la température au sein du puits d'injection. À plus grand contraste, il est à supposer que, si le courant était orienté favorablement, la température de pompage serait plus haute vu qu'elle est fortement influencée par la température au sein du puits de pompage et par la galerie attenante, drainante.

En ce qui concerne le phénomène de convection au sein des puits, on peut supposer qu'il est faible par rapport au flux produit par le pompage et l'injection. Aucun des deux modèles n'est capable de le modéliser. En considérant un gradient naturel de température, on peut

craindre que les températures dans le puits de pompage soient un peu plus faibles que prévues au début de l'exploitation, du fait de la circulation naturelle à l'intérieur du puits et donc de l'homogénéisation des températures avant le pompage. Cependant, vu l'importance du drainage autour du puits de pompage, l'impact sur le moyen et long terme est vraisemblablement négligeable.

Enfin, en utilisant le débit de $130 \text{ m}^3/\text{h}$, on observe, comme dans les modélisations utilisant les équations d'écoulement en conduites, qu'il faut environ un mois pour que le front froid arrive et que la température de l'élément de pompage atteigne le minimum à court terme. Malgré les différences de modélisation entre les deux méthodes, les durées sont du même ordre de grandeur.

Pour conclure, nous pouvons dire que ces deux modèles sont complémentaires. Le modèle « éléments finis avec volumes de contrôle » permet de modéliser les écoulements entre les galeries et le massif, ainsi que de considérer que les puits sont remblayés. Ceci permet de décrire bien plus finement le transport que par un modèle d'écoulement en conduites, en particulier concernant le caractère drainant et les contrastes de conductivité. Cependant, sa résolution est bien plus lente et sa construction plus complexe que celle du modèle d'écoulement en conduite. Ce dernier montre aussi le phénomène d'advection et décrit correctement l'évolution de la température à court terme. En effet, le drainage et l'évolution de la température du massif ne sont véritablement utiles que pour des simulations sur le long terme, bien après que les galeries aient été vidangées. L'idéal serait de pouvoir combiner les deux approches au sein d'un même modèle. Un logiciel tel SUFT3D pourrait être pourvu de sous-domaines régis par des écoulements en conduites, et où l'interface entre les sous-domaines prendraient également en compte la conduction.

Conclusion

Ce travail de fin d'études a permis de considérer la possibilité d'exploiter une ancienne mine, aujourd'hui noyée, comme un système géothermique.

Nous avons étudié les réalisations effectuées à Heerlen (NL) où existe déjà ce type d'installation permettant d'alimenter une partie de plus en plus importante de la ville en chauffage et air conditionné d'une manière durable. Le schéma de construction de projet a été analysé en vue d'en comprendre les tenants et aboutissants, les grandes questions et les problèmes techniques rencontrés.

Par la suite, nous avons établi les équations permettant de modéliser le transfert de chaleur en milieu souterrain, pour le cas de galeries ouvertes. Deux méthodes ont été développées.

La première assimile l'écoulement au sein des mines à des écoulements en conduites, négligeant de ce fait les phénomènes se passant au sein du massif encaissant et des zones déconsolidées.

La seconde établit les similitudes entre les équations de transport de soluté en milieu poreux et celles de transfert de chaleur, ce qui permet d'utiliser un logiciel résolvant les équations d'écoulement et de transport de polluant pour modéliser le système minier, le massif et des zones déconsolidées.

Après les vérifications nécessaires, nous avons modélisé un schéma simplifié d'ancienne mine de charbon, où un pompage d'eau chaude serait effectué à une extrémité tandis qu'à l'autre extrémité serait injectée le même débit d'eau froide. Nous avons pu comparer les deux méthodes, montrant une certaine complémentarité.

L'écoulement en conduites modélise bien le phénomène d'advection et assimile l'énergie venant du massif comme un paramètre de conduction. Il assimile les galeries ou puits à des zones ouvertes, où l'eau peut circuler librement. L'avancée du front froid est modélisée, permettant de déterminer à partir de quand la mine sera vidangée. La conduction offre une estimation du minimum de température qui sera atteint après l'arrivée du front froid. Les modélisations ont pu mettre en évidence l'importance de l'arrivée d'eau provenant du massif, de la prolongation des galeries de mines ou encore de la présence de sources géothermiques.

La méthode « éléments finis avec volumes de contrôle » a permis une modélisation plus complète des phénomènes d'écoulement et du transfert de chaleur associé. L'importance capitale du contraste de conductivité entre les zones remblayées (puits) et le massif rocheux a été mise en évidence. Dans certains cas, il est ainsi possible de pomper une eau dont la température n'est pas influencée par une injection d'eau froide. Le débit de pompage est évidemment influencé par la conductivité, mais il a pu être montré que les différents comportements sont in-

dépendants du débit. De plus, à long terme, nous avons pu montrer l'importance du caractère drainant ou perdant des galeries. Dans certains cas, deux phases de diminution de température sont observées : la première correspond à l'arrivée du front froid à travers les puits et galeries ; la seconde, plus lente et tardive est une conséquence du refroidissement du massif. Pour une exploitation à long terme, le drainage de certaines zones du massif à proximité des zones d'injection provoque le refroidissement des galeries, puis du système entier.

Enfin, grâce à ces modélisations, nous montrons qu'en choisissant les bonnes solutions techniques, l'exploitation d'un système géothermique peut pourvoir à une demande d'énergie sur le long terme comme le court terme. L'exemple de Heerlen promet un avenir différent, débarrassant à terme une ville des énergies fossiles pour son chauffage, et ouvre ainsi l'espoir de l'indépendance et de la durabilité des villes de demain.

Bibliographie

- [Blessent et al. 2009] Blessent D., Therrien R., MacQuarrie K., 2009 *Coupling geological and numerical models to simulate groundwater flow and contaminant transport in fractured media*, Computers and Geosciences, 35, pp. 1897-1906.
- [Boulvain 2017] Boulvain F., 2017, *Une introduction à la géologie de la Wallonie*, Université de Liège, faculté des sciences, département de géologie. Consulté en avril 2017 à l'adresse : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm>
- [Brouyère 2001] Brouyère S., 2001, *Étude et modélisation du transport de soluté et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé*, Thèse de doctorat, Université de Liège (faculté des sciences appliquées).
- [Brouyère 2014] Brouyère S., 2015, *Qualité et protection des eaux souterraines (5/6), réactions à la surface du solide*, Université de Liège, département Argenco.
- [CDE 2017a] Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des énergies, 2017, *Géothermie haute température*, Connaissance des énergies. Consulté en mai 2017 à l'adresse <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-haute-temperature>.
- [CDE 2017b] Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des énergies, 2017, *Production d'énergie dans le monde*, Connaissance des énergies. Consulté en mai 2017 à l'adresse <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/chiffres-cles-production-d-energie>.
- [Clauser 2003] Clauser C. , 2003, *Numerical simulation of reactive flux in hot aquifers. SHEMAT and processing SHEMAT*, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 332 p.
- [Dassargues 2014a] Dassargues A., 2014, *Modélisation des réservoirs souterrains (Rappel et extension des équations d'écoulement en milieu saturé)*, Université de Liège.

- [Dassargues 2014b] Dassargues A., 2014, *Modélisation des réservoirs souterrains (Modélisation du transport dissous dans l'eau souterraine)*, Université de Liège.
- [Degoutte 2017] Degoutte G., 2017, *Traité d'hydraulique à surface libre*, consulté le 4 mai à l'adresse <http://www.hydrologie.org/MISC/hydr/degoutte/degoutte1.pdf>
- [Dembele 2015] Dembele A., Hauglustaine J. M., Eijdem H., 2015, *Minewater project : Possible application of geothermal mine water energy system of Heerlen in other regions of Europe (case study Liège)*. Mémoire de fin de master, Université de Liège, 94 p.
- [DGO4 2011] DGO4, département de l'Energie, 2011, *Etude des obstacles à la géothermie profonde (basse et haute énergie), rapport final*, DGO4, Service public de Wallonie, 2011. Consulté en mai 2017 à l'adresse <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/rapport-final-plateforme-geothermie-rw-dgo4.pdf?ID=30511&saveFile=true>.
- [DGO4 2017a] DG04, 2017, énergie Wallonie, *Valoriser la chaleur du ventre de la terre, c'est possible!* Service public de Wallonie, DGO4. Consulté en juin 2017 à l'adresse <http://energie.wallonie.be/fr/la-geothermie-profonde.html?IDC=6173>.
- [DGO4 2017b] Service Public de Wallonie, 2017, *Energie +, dimensionner une installation de chauffage : principes généraux*, réalisé en collaboration avec l'UCL et le département de l'Énergie et du Bâtiment durable de la région wallonne. Consulté en juin 2017 à l'adresse : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=17072#c20935043>
- [Engineering toolbox 2016] The Engineering Toolbox, 2016, *Hazen-Williams Equation - calculate Head Loss in Water Pipes*, consulté en septembre 2016 à l'adresse http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-water-d_797.html
- [Ferket et al. 2011] Ferket H. L. W., Laenen B. J. M., Van Tongeren P. C. H., 2011, *Transforming flooded coal mines to large-scale geothermal and heat storage reservoirs : what can we expect ?*, « Mine Water - Managing the challenges », conférence de l'IMWA à Aachen, 2011, 6 p.
- [Fetter 2014] Fetter C.W., 2014, *Applied hydrogeology*, Pearson new international edition, 612 p.

- [Fossoul 2009] Fossoul F., Dassargues A., 2009, *Etude de modélisation d'un aquifère alluvial en vue de la mise en place d'installations géothermiques de refroidissement d'air et de conditionnement d'air*, Travail de fin d'études, Université de Liège, 161 p.
- [Gardin et Brouyère 2005] Gardin N., Brouyère S., Dassargues A., 2005, *Modélisation de la remontée des niveaux piézométriques dans les massifs affectés par des travaux miniers dans l'ancien bassin charbonnier de Liège*, Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège, département GEOMAC.
- [Geotrainet 2011] Geotrainet, 2011, *Geotrainet Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*, Geotrainet. Disponible à l'adresse www.geotrainet.eu
- [Hamm et Sabet 2010] Hamm V., Sabet B. B., 2010, *Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France*, Geothermics, 39, pp. 177-186
- [Hiddes 2014] Hiddes L., 2014, *Mijnwater 3.0, presentatie HOI februari 2014, Duurzaamheidsvisie*, Mijnwater B.V 2014.
- [Humblet 1941] Humblet E., 1941, *Le bassin houiller de Liège*, ed. Vaillant-Carmanne, Revue universelle des mines, série 8, tome 17. 21 p.
- [Jiji 2009] Jiji L., 2009, *Heat Conduction*, 3e édition, ed. Springer Berlin Heidelberg, 432 p.
- [Kreith et al. 2011] Kreith F, Manglik R. M., Bohn M. S., 2011, *Principles of heat transfer*, 7e édition, ed. SI Edition, 696 p.
- [Letellier 2017] Letellier A., 2017, *D'où provient la chaleur interne de la Terre*, Ecole des mines de Saint-Etienne. Consulté en mai 2017 à l'adresse <http://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up1/web/wiki/Q-Energieinterne-lachaleurinternesurTerre-Letellier.htm>.
- [Menon 2015] Menon S., 2015, *Transmission pipeline calculations and simulation manual*, Gulf Professional Publishing, Boston, Chapter five : *Fluid flow in pipes* pp. 149-234. DOI : 10.1016/B978-1-85617-830-3.00005-5
- [Mijnwater 2014] Mijnwater B. V., 2014, *Mine water, a basis for sustainable energy*, consulté en 2016 et 2017 à l'adresse <http://www.mijnwater.com/?lang=en>
- [Minewaterproject 2011] Archives du site www.minewaterproject.info entre 2005 et 2011, site du projet de développement des

- infrastructures et du forage, disponibles à l'adresse <http://web.archive.org/web/20080316010547/http://www.minewaterproject.info/>
- [Molson et al. 1992] Molson J. W., Frind E. O et Parlmer C. D., 1992, *Thermal Energy Storage in Unconfined Aquifer partim 2 : Model Development, Validation and Application*, Water Resources Research vol 28 n°10, pp. 2857 - 2867.
- [Nield et al. 2006] Nield D., Bejan A., 2006, *Convection in Porous Media*, 3e édition, ed. Springer New York, 655 p.
- [Op 't Veld et Gilissen 2014] Op 't Veld P., Gilissen B., 2014, *The Mine Water Project in Heerlen the Netherlands : development of a geothermal mine water pilot towards a full scale hybrid low energy infrastructure*, Nordic Showroom on Energy Quality Management, workshop in Iceland at the conference center HARPA in Reykjavik, august 25-29, 2014, 23 slides
- [Orban 2009] Orban P., 2009, *Solute transport modelling at the groundwater body scale : Nitrate trends assessment in the Geer basin (Belgium)*, Thèse de doctorat, Université de Liège, 222 p.
- [Patankar 1980] Patankar S., 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, New-York, Taylor & Francis, 214 p.
- [Petitclerc et Vanbrabant 2011a] Petitclerc E. et Vanbrabant Y., 2011, *Carte des zones d'intérêt géothermique de faible à moyenne profondeur en Wallonie, de 300 à 3000 m de profondeur*; Service Public de Wallonie, Institut royal des sciences naturelles de Belgique, Service Géologique de Belgique, 2011. Consulté en juin 2017 à l'adresse <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/carte-d-interet-geoth-moyenne-profondeur.pdf?ID=30509>.
- [Petitclerc et Vanbrabant 2011b] Petitclerc E. et Vanbrabant Y., 2011, *Carte des zones d'intérêt géothermique de grande profondeur en Wallonie, de 3000 à 6000 m de profondeur*; Service Public de Wallonie, Institut royal des sciences naturelles de Belgique, Service Géologique de Belgique, 2011. Consulté en juin 2017 à l'adresse <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/carte-d-interet-geoth-grande-profondeur.pdf?ID=30508>.
- [Rodriguez et Diaz 2009] Rodriguez R., Diaz M. B., 2009, *Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method*, Renewable Energy, 2009, numéro 34, pp. 1716-1725.

- [Rossman 2000] Rossman L. A., 2000, *Epanet 2 user manual*, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency.
- [UCL 2016] UCL, septembre 2016, *Contrôle de la puissance d'une chaudière*, publié sur le site Energie +, DGO4, 2017. Consulté en mai 2017 à l'adresse : https://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/05_chauffage/08_calculs/01_programmes_calcul/chaucaldimensionnementvs.xlsm
- [UVED 2011] UVED, 2011, *Carte mondiale du gradient géothermique et du flux de chaleur à la surface du globe*, UVED. Consulté en juin 2017 à l'adresse <http://unt.unice.fr/uved/bouillante/cours/i.-la-geothermie-manifestations-quantification-origine-et-utilisations-de-la-chaleur-interne-du-globe/1.-le-gradient-geothermique/1.3.-carte-mondiale-du-gradient-geothermique-et-du-flux-de-chaleur-a-la-surface-du-globe.html>.
- [Vandenberghé 1989] Vandenberghé N. et Fock W., 1989, *Temperature data in the subsurface of Belgium*, in *Tectonophysics*, 164, pp. 237-250
- [Van Tongeren et Daneels 2002] Van Tongeren P. C. H., Daneels A., août 2002, *Geothermische gebruiksmogelijkheden van het mijnwater in de gemeente Heerlen, Nederland, Voorstudie*, APRAS Energy Contracting et la commune de Heerlen, référencé par le VITO au matricule 2002/ETE/R079
- [Van Tongeren et al. 2004] Van Tongeren P., Dreesen R., 2004, *Residual space volumes in abandoned coal mines of the belgian Campine basin and possibilities of use*, *Geologica Belgica* (2004) 7/3-4, pp. 157-164
- [Van Tongeren et Laenen 2005] Van Tongeren P. C. H., Laenen B., décembre 2005 *Reservoir compartmentalization and anticipated flow-behaviour of the minewater in the former Oranje Nassau coal mining concession area ; Heerlen, the Netherlands*, étude commandée par la ville de Heerlen, référencée par le VITO au matricule 2005/MAT/R/0186.
- [Van Tongeren 2005] Van Tongeren P. C. H., novembre 2005, *Selected well-site locations in the first phase of the minewater-project of the city Heerlen, the Netherlands*, étude commandée par la ville de Heerlen, référencée par le VITO par le matricule 2005/MAT/R/0202

- [Valiantzas 2008] Valiantzas J., 2008, *Explicit Power Formula for the Darcy-Weisbach Pipe Flow Equation : Application in Optimal Pipeline Design*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, July / August 2008, pp. 454-461, téléchargé le 10 août 2016 à l'adresse <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=18929303-18c2-4cd6-8593-d9facaa396f4@sessionmgr4007&vid=1&hid=4104>
- [Veldman 2007] Veldman M., 2007, *Parkstad Limburg werkt aan Nieuwe Energie, Mijnwaterproject - pilot Heerlen*, 47 slides.
- [Verhoeven 2014] Verhoeven R., 2014, *Minewater 2.0, development of a hybrid sustainable energy infrastructure in the municipality Heerlen*, Mijnwater BV, 25 slides
- [Verhoeven et al. 2014] Verhoeven R., Willems E, Harcouët-Menou V., De Boever E., Hiddes L., Op 't Veld P., Demollin E., 2014, *Minewater 2.0 project in Heerlen in the Netherlands : transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling*, Energy Procedia, 46, pp. 58 - 67.
- [VITO Team geo 2012] VITO Team geo, De Boever E, Lagrou D., Laenen B., 2012, *Guide de la géothermie en Belgique*, VITO, 30 p.
- [Wildemeersch et al. 2010] Wildemeersch S., Brouyère S., Orban Ph., Couturier J., Dingelstadt C., Veschkens M., Dassargues A., 2010, *Application of the hybrid finite element mixing cell method to an abandoned coalfield in Belgium*, Journal of hydrogeology, 392, pp. 188-200.
- [Yeh et al. 1993] Yeh G. T., Chang J. R., Cheng H. P., 1993, *3DFEM-FAT : User's manual of a 3-dimensional finite element model of flow and transport through saturated-unsaturated media*, IHE Delft (NL), 1993.

Annexe A

Résultats des modélisations du maillage Mine 8

Les figures suivantes reprennent les résultats des modélisations du maillage Mine 8 pour différent contrastes de conductivité entre le puits et le massif. Le débit utilisé est égal à $130 \text{ m}^3/\text{h}$, les mesures ont été prises après 800 jours.

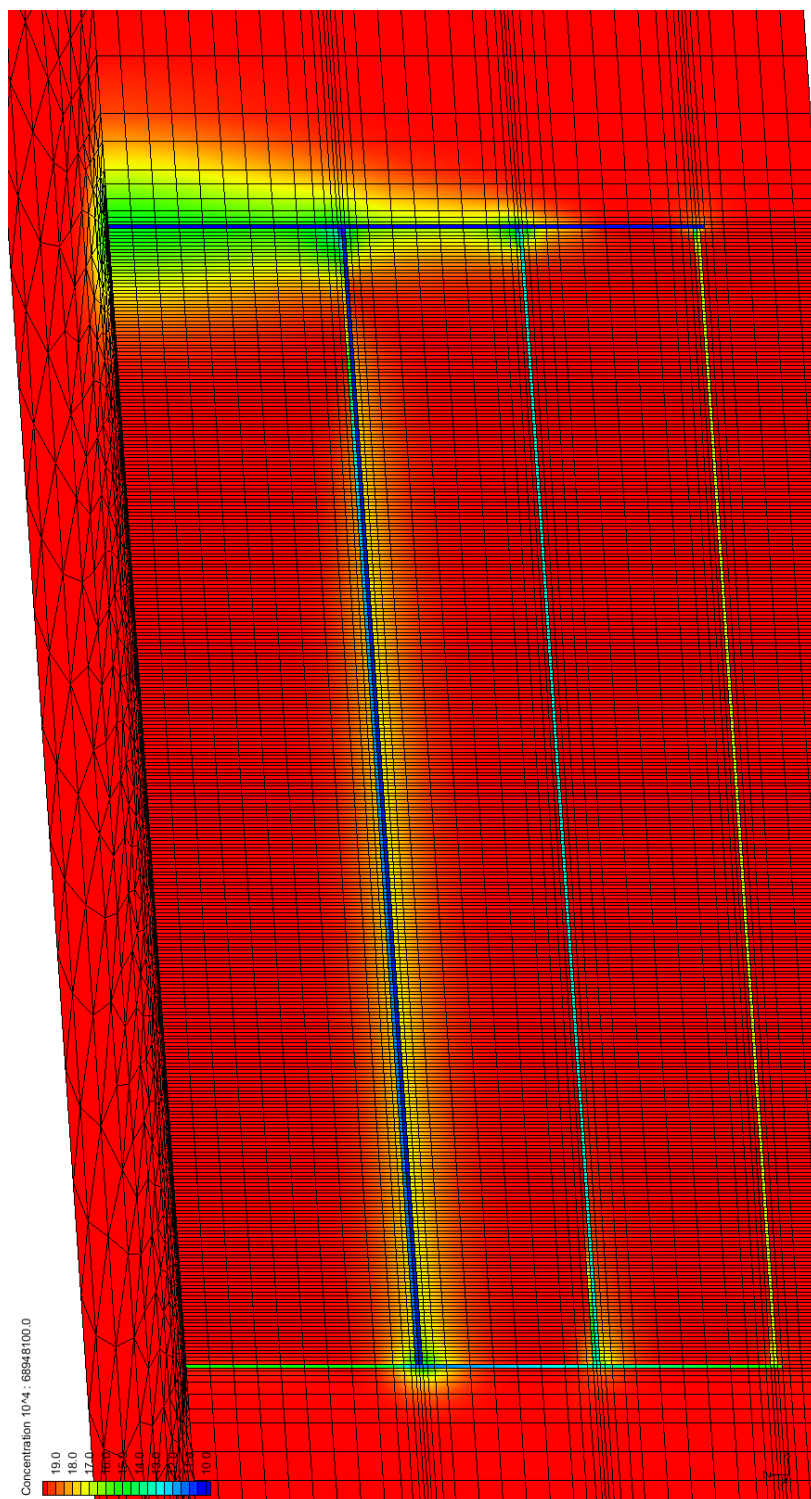


FIGURE A.1 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^4

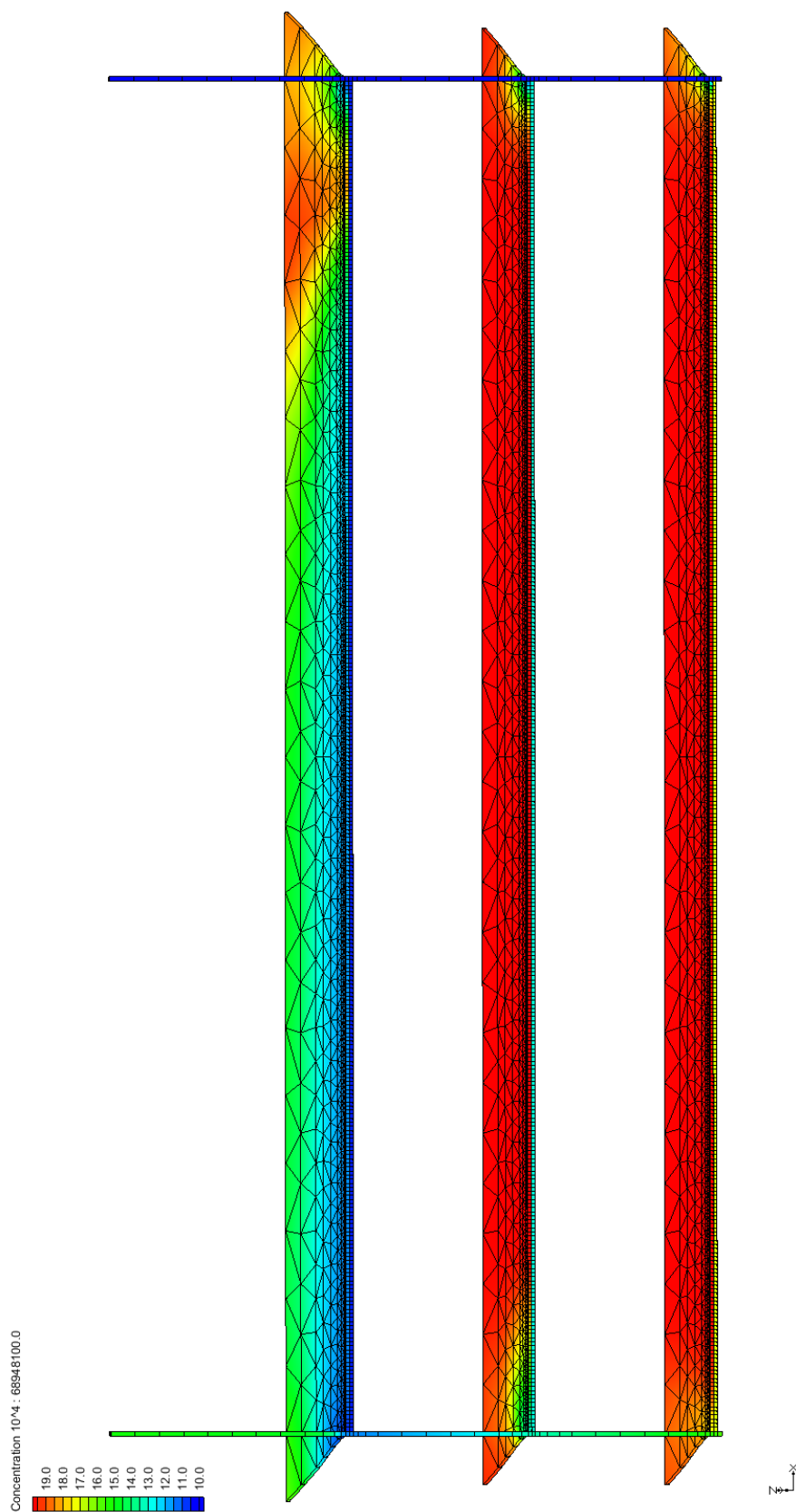


FIGURE A.2 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^4

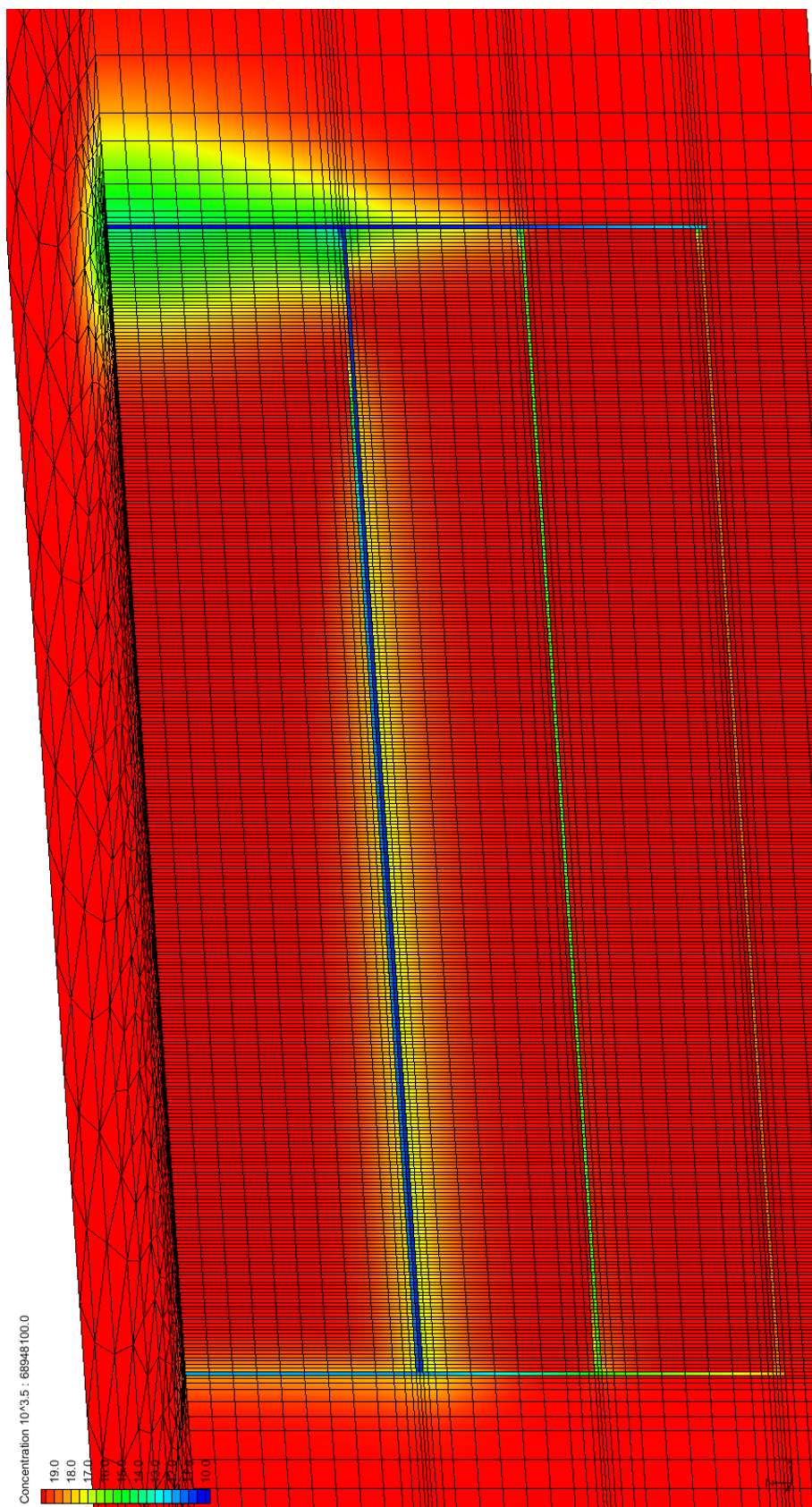


FIGURE A.3 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{3,5}$

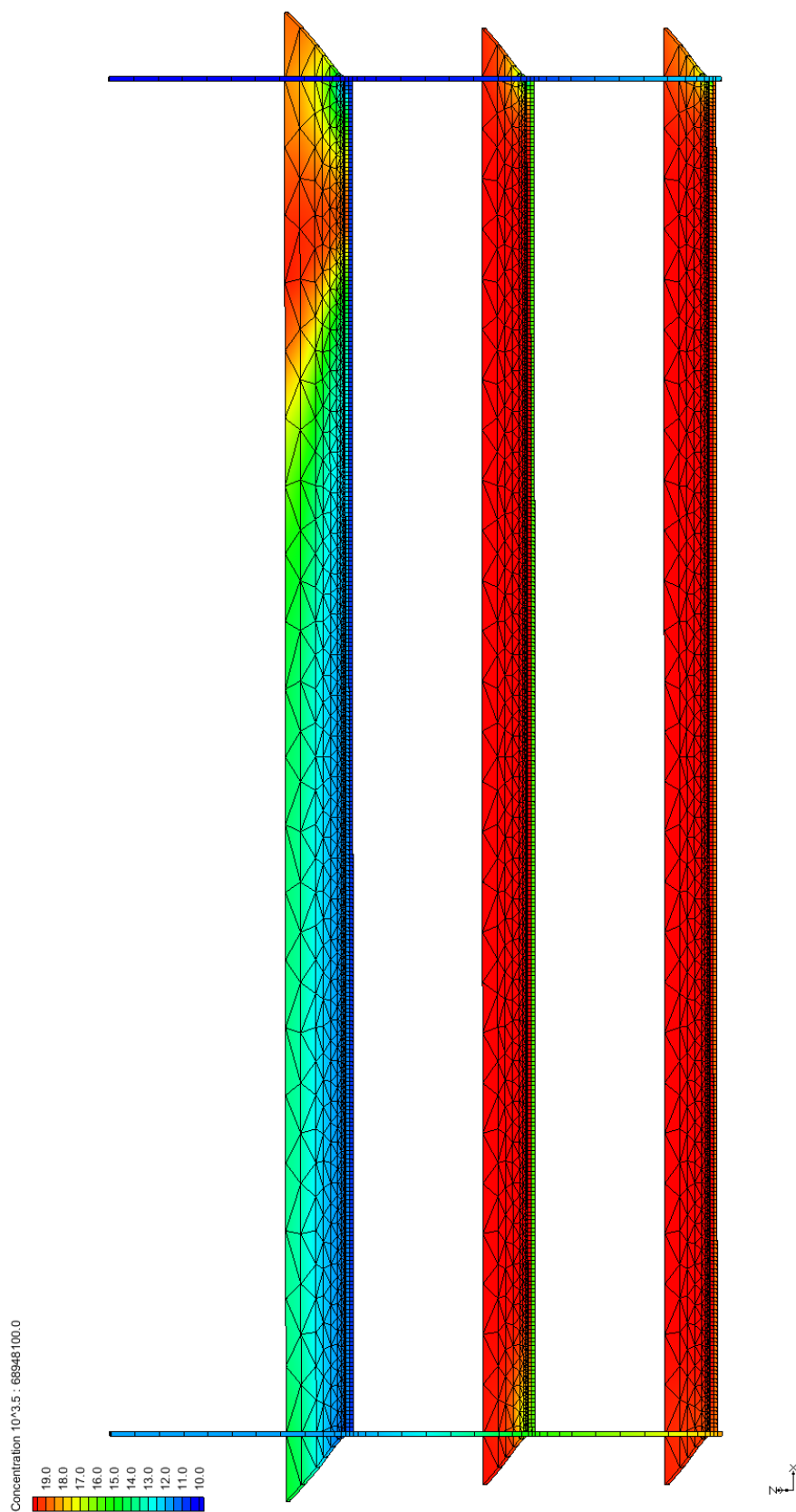


FIGURE A.4 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{3.5}$

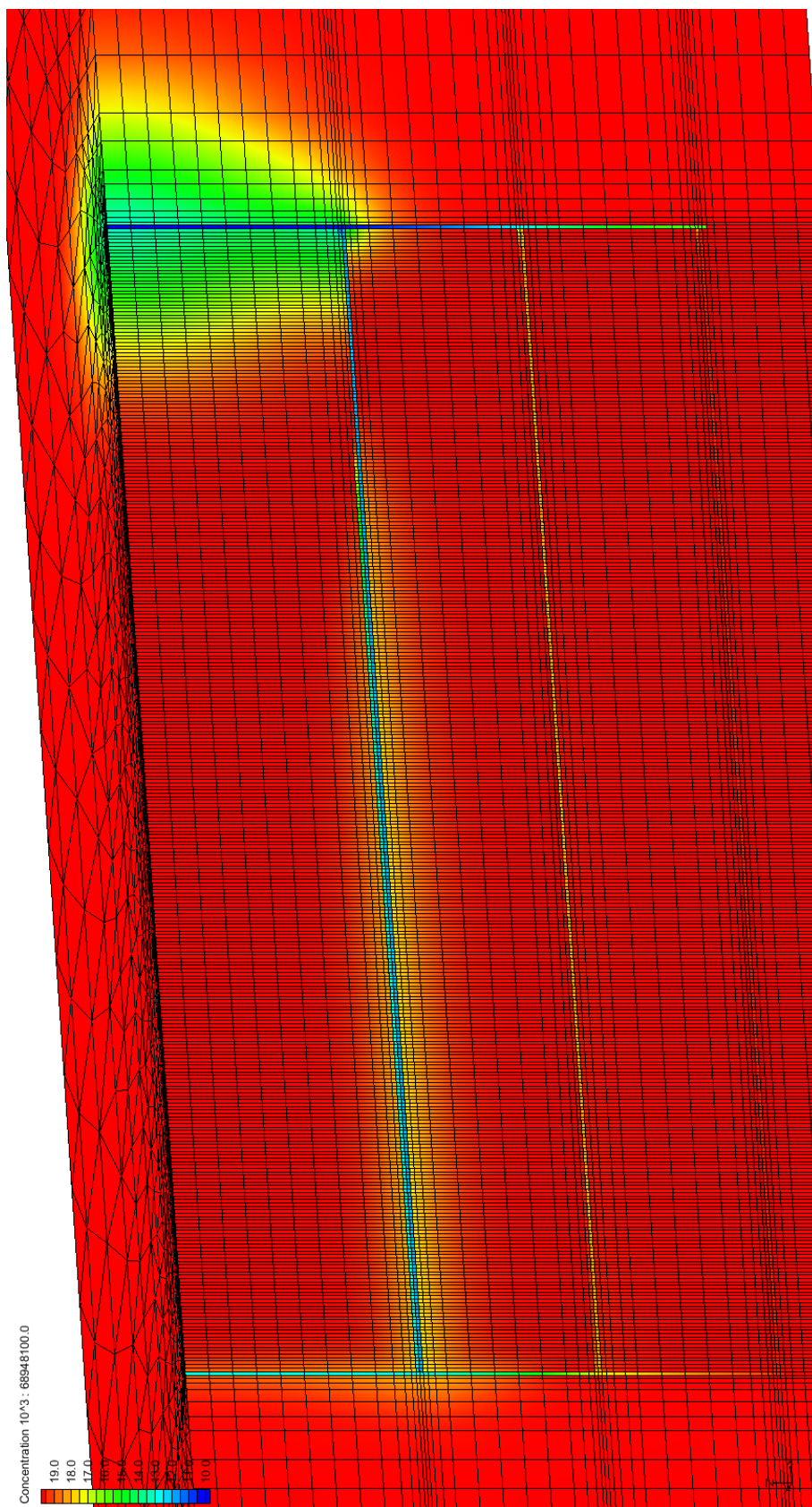


FIGURE A.5 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^3

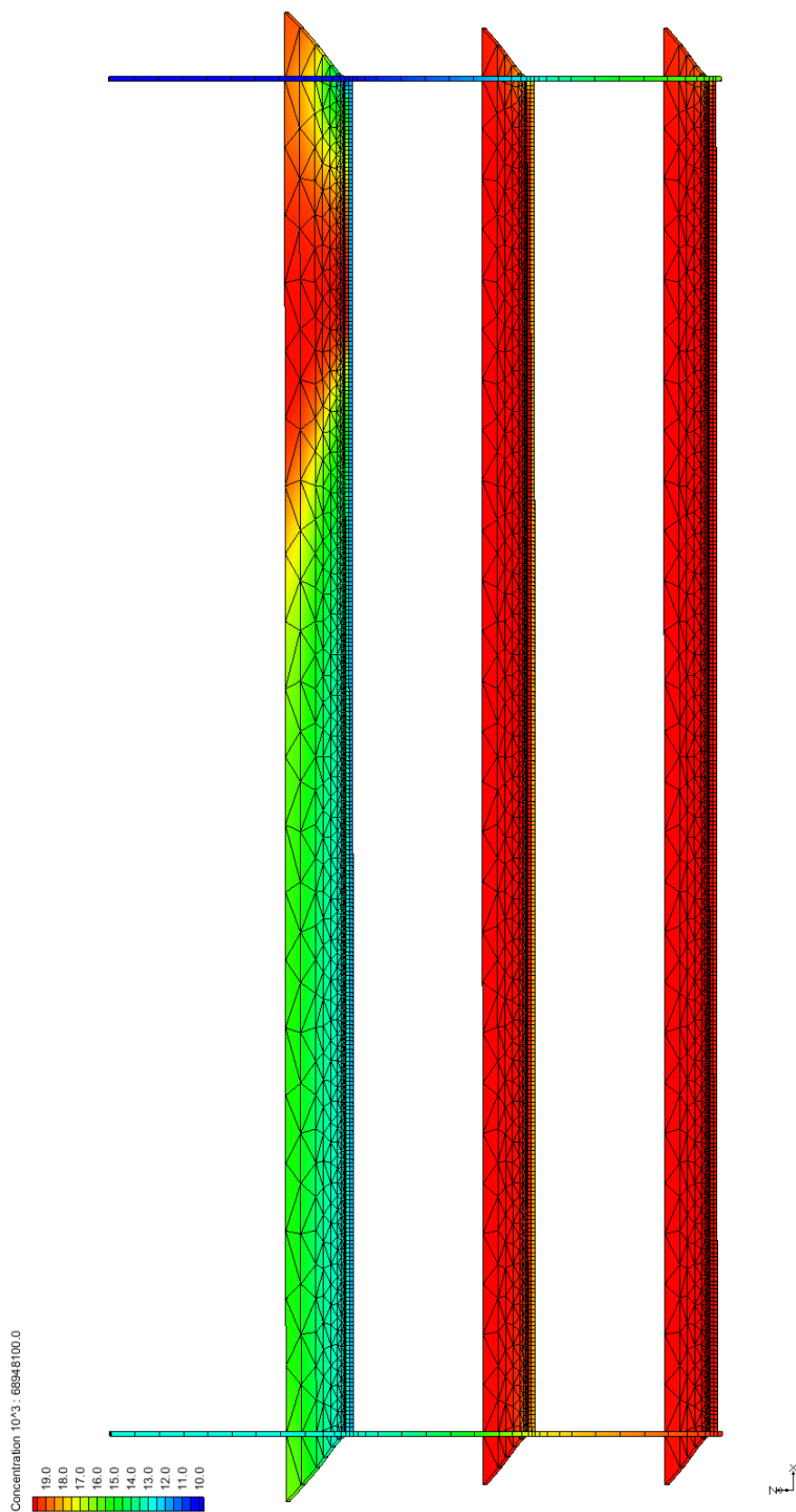


FIGURE A.6 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^3

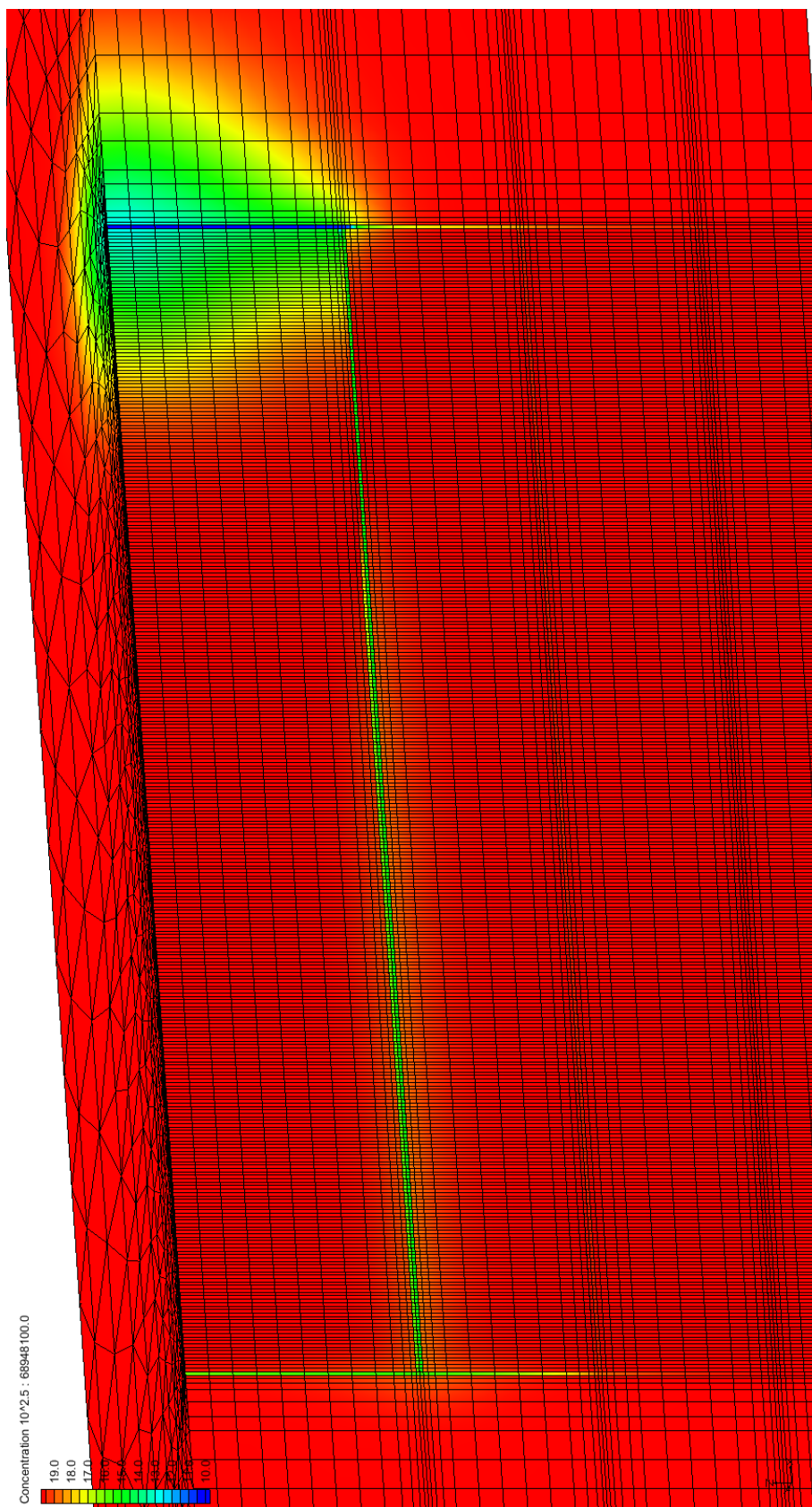


FIGURE A.7 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{2,5}$

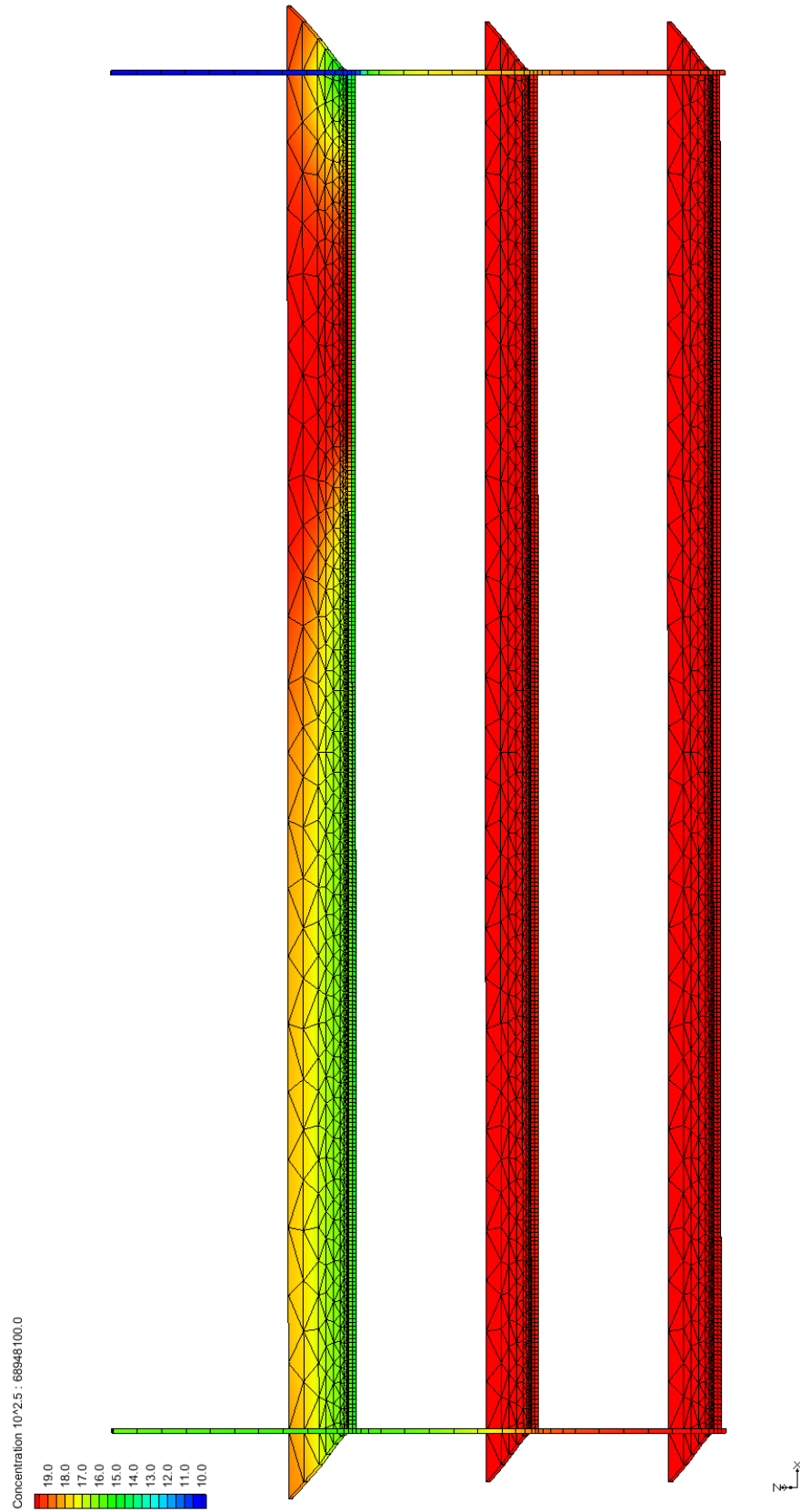


FIGURE A.8 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{2.5}$

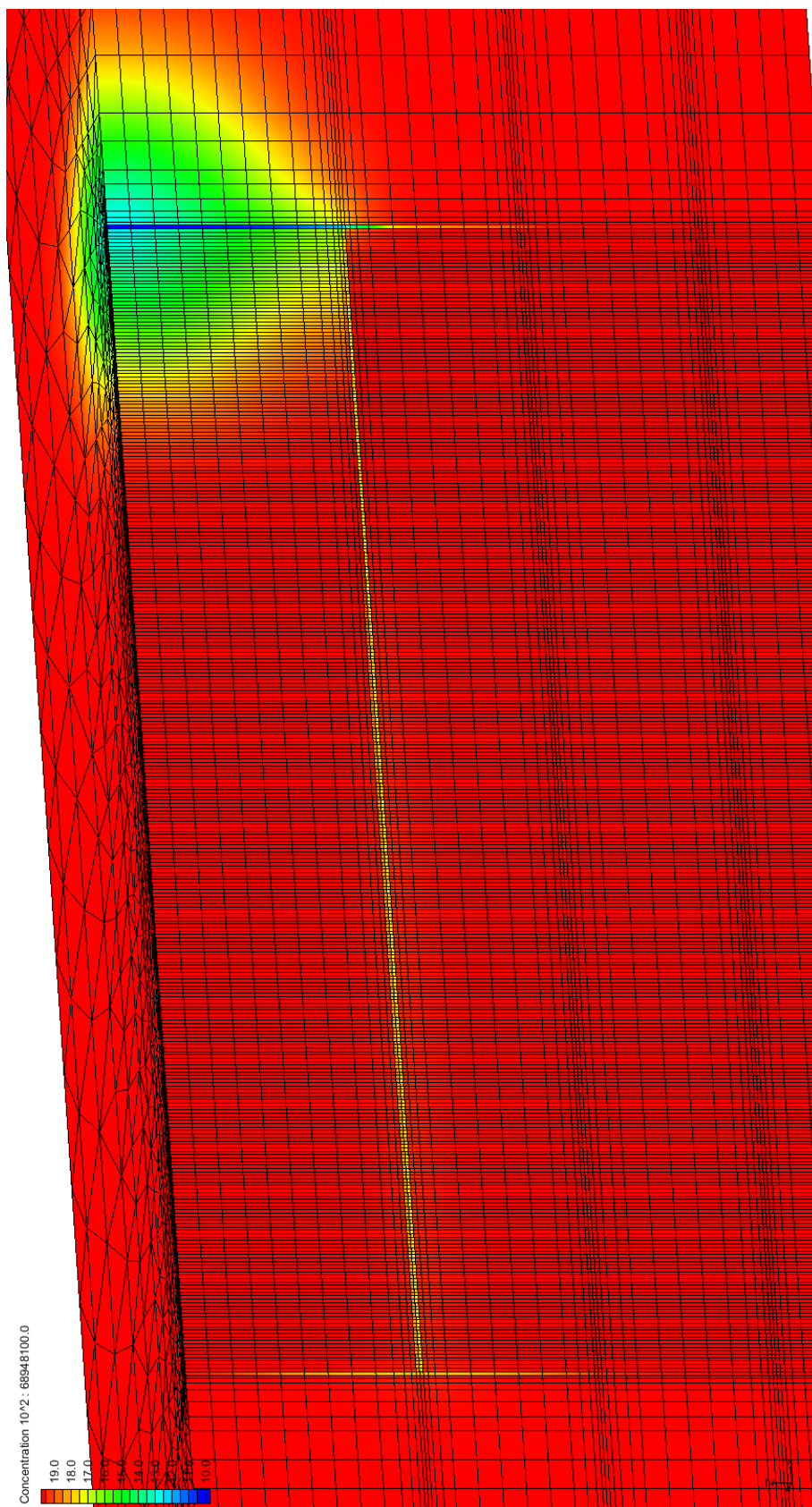


FIGURE A.9 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de 10^2

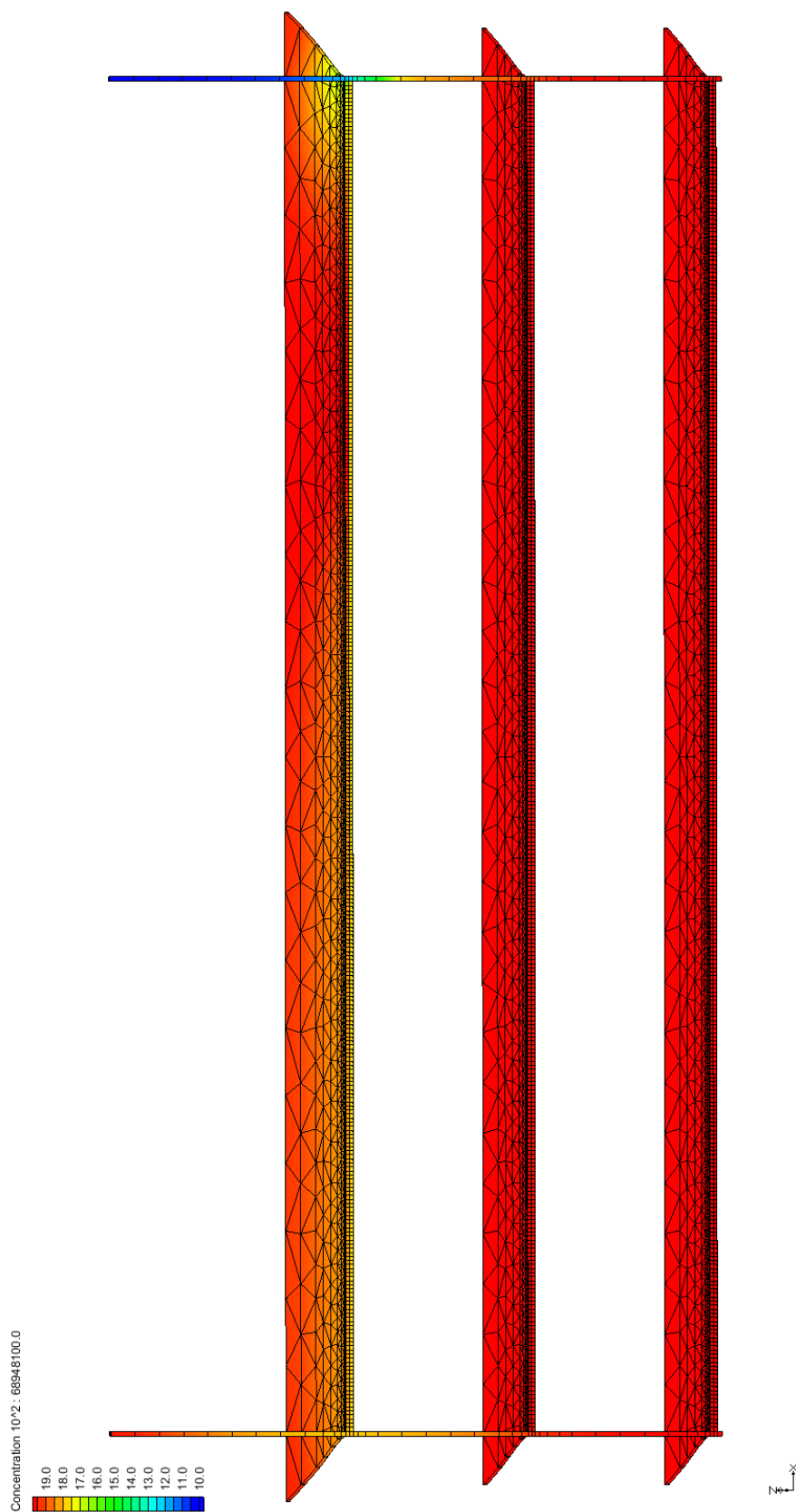


FIGURE A.10 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de 10^2

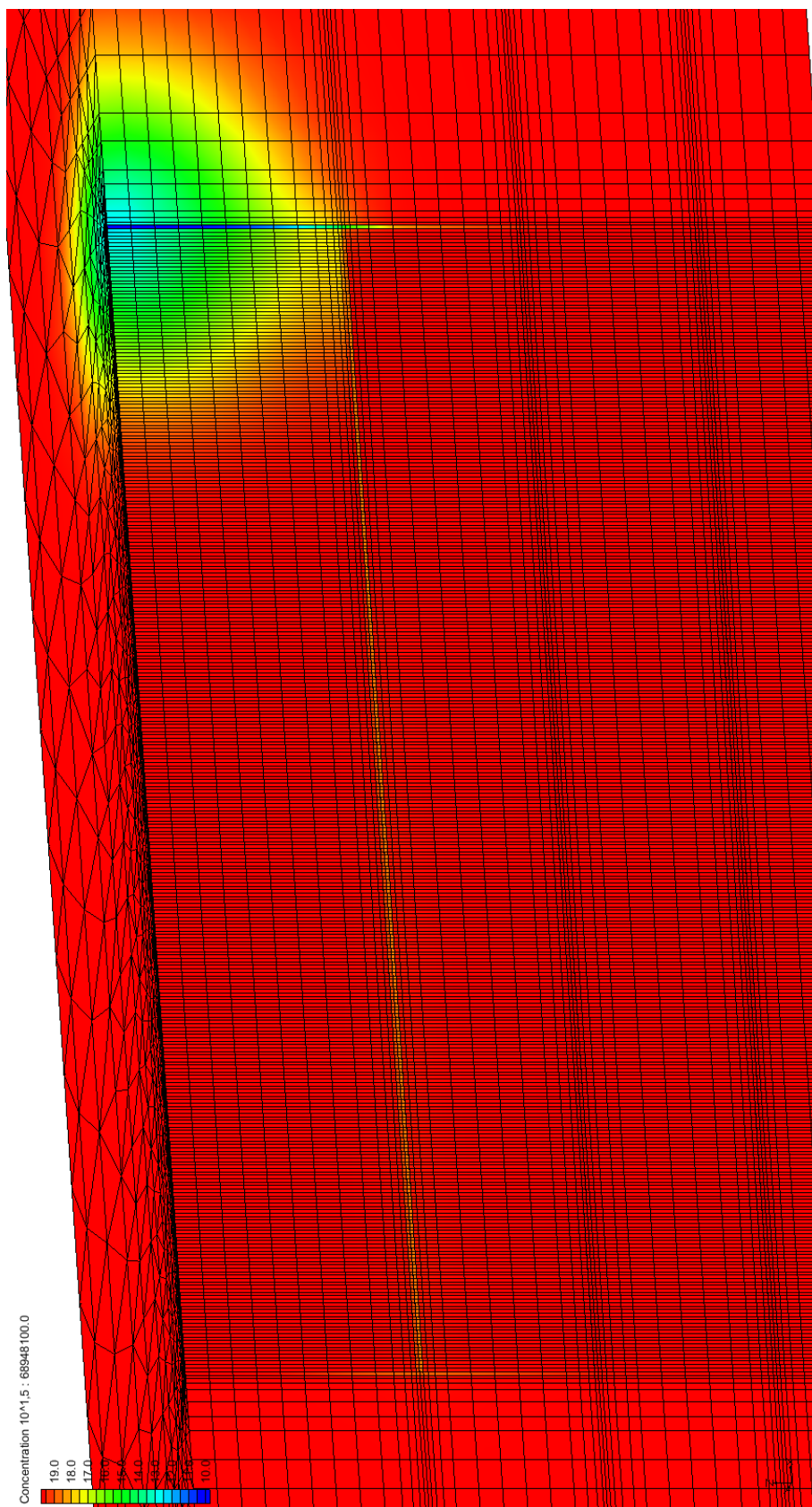


FIGURE A.11 – Température stabilisée, maillage complet, pour un contraste de conductivité de $10^{1,5}$

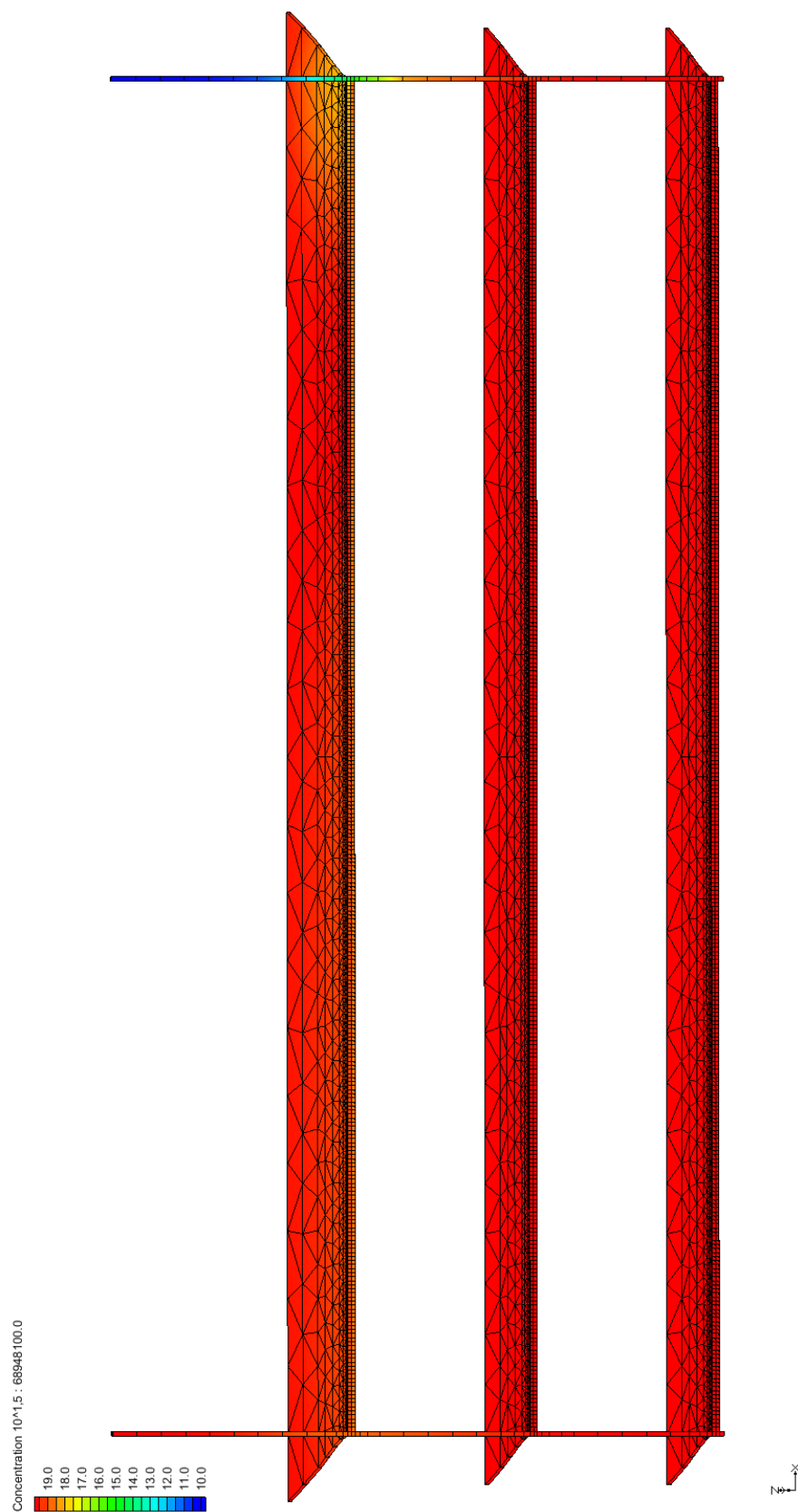


FIGURE A.12 – Température stabilisée dans les galeries, puits et zone déconsolidée pour un contraste de conductivité de $10^{1.5}$