THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX MONTAIGNE

École Doctorale Montaigne-Humanités (ED 480)

Discipline : Science et Technologie

Spécialité : Géothermie - Hydrogéologie

présentée par

Jérémy GODINAUD

pour obtenir le grade de :

Docteur de l'Université Michel de Montaigne

Le dispositif de Stockage d'Energie Thermique saisonnière en Aquifère (ATES) de faible profondeur : Application au domaine urbain dans un contexte de changement climatique

---

Soutenue le 4 Mai 2023 devant le jury composé de :

René THERRIEN	Professeur, Université Laval	Rapporteur
Pierre CÉZAC	Professeur, Université de Pau	Rapporteur
Maria KLEPIKOVA	Docteur, Université de Rennes	Examinatrice
Patrick EGERMANN	Docteur, Storengy	Examinateur
Philippe GOMBERT	Docteur, BRGM Orléans	Invité
Alain DUPUY	Professeur, Bordeaux INP	Directeur de thèse
François LARROQUE	Maître de Conférences, Bordeaux INP	Co-directeur de thèse

Résumé

Afin d'atténuer le réchauffement climatique, il convient de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités anthropiques. À l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 20 % des émissions de CO_2. Dans ce contexte, le système de Stockage d'Énergie Thermique dans les Aquifères (ATES) peu profonds s'avère pertinent pour répondre aux besoins thermiques (chauffage et refroidissement) des bâtiments de taille importante tout en réduisant leurs émissions de gaz à effet de serre.

Toutefois, trois questionnements peuvent être soulevés quant à la pérennité des ATES. La première problématique est inhérente au développement des îlots de chaleur souterrains en zone urbaine et de leurs effets sur le fonctionnement à long terme des ATES. Le deuxième point est relatif aux effets du changement climatique à long terme sur la demande thermique du bâtiment et les implications sur le fonctionnement des ATES. Enfin, la caractérisation et le suivi du vieillissement des forages de l'ATES (notamment les problématiques de colmatages et corrosion) apparaissent primordiales dans l'optique d'assurer un maintien de la performance des ouvrages.

L'objectif de ces travaux de thèse est de donner des éléments de réponse à ces trois problématiques en développant différents outils. À travers une expérimentation basée sur le déploiement d'un dispositif de mesures thermiques distribuées via un câble de fibre optique placé dans des forages, il a été possible de mettre en évidence les zones colmatées des ouvrages. Ce dispositif peu intrusif pourrait s'avérer pertinent à développer pour un suivi de l'évolution du colmatage.
Des stratégies de modélisation analytique et numérique ont été développées afin de mettre en évidence l'effet du réchauffement climatique et de l'artificialisation des sols sur la dynamique thermique du sous-sol en contexte urbain. Ces impacts ont été intégrés dans la modélisation à long terme du fonctionnement d'un système ATES théorique exploitant un aquifère peu profond. Différents scénarios climatiques et d'artificialisation des sols ont été testés. Il ressort que l'impact thermique dans le sous-sol et la performance des forages de l'ATES sont influencés par ces deux facteurs. Les stratégies de modélisation développées sont ensuite appliquées sur l'ATES pilote de l'ENSEGID, pour évaluer l'évolution à long terme du dispositif dans ce contexte de changement climatique.
En complément, une analyse en cycle de vie permet de démontrer les bénéfices environnementaux du choix de l'ATES pour ce site, en comparant la solution retenue à d'autres solutions énergétiques plus classique et en remettant le choix local dans un contexte énergétique européen.

Mots clés : ATES, Géothermie, Hydrogéologie, Modélisation, Changement Climatique, Fibre Optique, Colmatage.

Abstract

In order to mitigate global warming, greenhouse gas emissions from human activities must be significantly reduced. On a global scale, the building sector is responsible for about 20 % of CO_2 emissions. In this context, Aquifer Thermal Energy Storage is a relevant technology to meet the thermal loads (heating and cooling) of large buildings while reducing their greenhouse gas emissions.

However, three questions arise regarding the sustainability of the ATES. The first issue is inherent to the development of underground heat islands in urban areas and its effects on the long-term operation of the ATES. The second issue is related to the effects of long-term climate change on the thermal demand of buildings and the implications on the ATES operation. Finally, the characterization and monitoring of the aging of the ATES boreholes (especially the problems of clogging and corrosion) appear to be essential in order to ensure the sustainability of the system performance.

The present work aims to develop different tools in order to explore these questions. Through an experiment based on the deployment of an active distributed temperature sensor technology via a fiber optic cable placed in boreholes, it was possible to highlight the clogged areas of the boreholes. This low-intrusive device could be relevant to develop a long-term monitoring strategy to follow borehole clogging evolution.

Analytical and numerical modelling strategies were developed in order to highlight the effect of global warming and surface building-up on the thermal dynamics of the underground in an urban context. These impacts have been integrated in the long-term modeling of a theoretical ATES system exploiting a shallow aquifer. Different climatic and land reclamation scenarios were tested. It is shown that the thermal impact in the subsurface and the performance of the ATES boreholes are influenced by these two factors. The modelling strategies developed were then applied to the pilot ATES at ENSEGID, to evaluate the long-term evolution of the system in the context of climate change.

In addition, a life cycle assessment is used to demonstrate the environmental benefits of the environmental benefits of the choice of the ATES for this site, by comparing the solution to other more conventional energy solutions and to the European energy context.

Keywords : ATES, Geothermal Energy, Hydrogeology, Modeling, Climate Change, Optical Fiber, Clogging.

Table des matières

Introduction **1**

1 Les systèmes de stockage d'énergie thermique : une solution pour décarboner le secteur du bâtiment et lutter contre le réchauffement climatique **5**

1.1 Émission de Gaz à Effet de Serre et changement climatique : l'influence de l'Homme 6

1.1.1 La contribution anthropique au changement climatique . . 6

1.1.2 Les émissions de GES par sources et secteurs 13

1.1.3 Le bâtiment : un secteur clé 14

1.1.4 Évolution et adaptation des bâtiments face au changement climatique 17

1.2 Le stockage d'énergie thermique : un moyen de décarboner le secteur énergétique en réduisant les coûts et la production d'énergie . 18

1.2.1 Stockage d'énergie thermique (Thermal Energy Storage TES) : généralités 18

1.2.2 Principes physiques du stockage d'énergie thermique . . . 20

1.3 Applications des TES dans le bâtiment : méthodes et bénéfices . . 22

1.3.1 Le bâtiment : une structure adaptée pour le stockage d'énergie thermique 22

1.3.2 Les techniques TES appliquées aux bâtiments 22

1.3.3 Choix d'une filière de stockage thermique 24

1.3.4 Avantages de la solution TES pour les bâtiments 26

1.4 Conclusion 28

2 Le système de Stockage d'Énergie Thermique dans les Aquifères : fonctionnement, pertinence, potentiel et verrous 29

2.1 Le système ATES : fonctionnement et performance énergétique . . 30
2.1.1 Spécificités techniques du système ATES 30
2.1.2 Résumé des transferts thermiques dans le sous-sol appliqués aux ATES 32
2.1.3 Les indicateurs de performances des systèmes ATES 34
2.1.4 Stratégie d'implantation pour l'optimisation de la performance du dispositif 36
2.2 ATES : un dispositif avantageux 38
2.2.1 Aspect économique 39
2.2.2 Aspect environnemental 40
2.3 ... au fort potentiel de développement 42
2.4 ... mais nécessitant une attention particulière 44
2.4.1 L'aléa hydrogéologique lors de l'implantation 44
2.4.2 Vieillissement et dégradation des composants du système . 44
2.4.3 Évolution des conditions de surface 48

3 Caractérisation et suivi des systèmes ATES : développement d'une technologie innovante 51

3.1 Hétérogénéité d'un aquifère et suivi du colmatage : deux facteurs cruciaux pour optimiser la performance des ATES 52
3.2 La fibre optique : une technologie en plein essor pour caractériser des phénomènes complexes et hétérogènes appliqués aux géosciences 53
3.2.1 Principe de fonctionnement 53
3.2.2 Domaines d'applications 55
3.3 Détection du colmatage et des zones productrices le long d'un forage par utilisation de mesures actives thermiques distribuées . . 57
3.4 Conclusion 72

4 Dynamique thermique du sous-sol en zone urbaine : outils de caractérisation et enjeux pour l'implantation des systèmes ATES 73

4.1 Forçage des températures souterraines : les principaux phénomènes 76
4.1.1 Forçage atmosphérique 76
4.1.2 Forçage géothermique naturel 79
4.1.3 Forçage anthropique 81
4.2 Caractérisation thermique du sous-sol : stratégie de modélisation . 83

4.2.1 Brève introduction aux transferts de fluide et de chaleur en milieu poreux . . . 83
4.2.2 Le site référence théorique . . . 85
4.2.3 Résolution par approche analytique . . . 87
4.2.4 Résolution par approche numérique . . . 92
4.3 Dynamique thermique du sous-sol : complémentarité des outils analytique et numérique . . . 97
4.3.1 Dynamique thermique du site . . . 97
4.3.2 Deux modes d'approches différents mais complémentaires . 102
4.4 Conclusion . . . 107

5 Le système ATES : un dispositif dépendant de son environnement 109
5.1 Introduction et problématique générale . . . 110
5.2 Dimensionnement de l'ATES en contexte de changement climatique 111
5.2.1 Méthode et hypothèses de calcul . . . 111
5.2.2 Évolution des besoins thermiques à long terme . . . 114
5.3 Construction du modèle numérique et scénario de modélisation . . 116
5.4 Impact thermique dans le sous-sol et implication pour la performance de l'ATES : résultats des modélisations . . . 121
5.4.1 Impact de l'exploitation de l'ATES sur le régime thermique du sous-sol . . . 121
5.4.2 Implications sur la performance de l'ATES . . . 137
5.5 Discussion . . . 140

6 Le système ATES : la solution énergétique retenue pour l'ENSEGID 143
6.1 Déploiement du dispositif sur le site de l'ENSEGID . . . 144
6.2 Cadre hydrogéologique du site de l'ENSEGID . . . 148
6.2.1 Contexte préexistant . . . 148
6.2.2 Données nouvelles pour une vision affinée . . . 150
6.3 Contexte thermique du site de l'ENSEGID : un héritage du passé 164
6.3.1 Le constat actuel . . . 164
6.3.2 Héritage climatique et occupation des sols : deux facteurs explicatifs . . . 167
6.4 Exploitation de l'ATES de l'ENSEGID dans un contexte de changement climatique . . . 176
6.4.1 Développement du modèle numérique de l'ENSEGID . . . 177

6.4.2 Analyse actuelle et prospective de l'ATES de l'ENSEGID . 182
6.5 Premier bilan prospectif de l'exploitation de l'ATES ENSEGID . 190

7 Estimation des impacts environnementaux de l'ATES de l'ENSEGID par l'Analyse du Cycle de Vie 193
7.1 Généralités et principes de l'Analyse du cycle de vie 194
7.2 Méthode de l'Analyse du Cycle de Vie appliquée à l'ATES de l'ENSEGID 197
7.2.1 Délimitation des frontières du système et Inventaire du Cycle de Vie 197
7.2.2 Scénario de fonctionnement de l'ATES 200
7.3 Impact environnemental de l'ATES de l'ENSEGID 201
7.3.1 Détails de l'ACV de l'ATES ENSEGID 201
7.3.2 Confrontation de l'ATES ENSEGID aux autres dispositifs ATES 204
7.4 Pertinence de l'utilisation d'un ATES dans le contexte de demande énergétique de l'ENSEGID 208
7.4.1 Influence du mix électrique 208
7.4.2 Le dispositif ATES face à d'autres solutions énergétiques . 212
7.5 L'ATES : un système performant pour répondre aux demandes thermiques importantes 214
7.6 Bilan environnemental de l'ATES ENSEGID 216

Conclusion Générale 219

Annexes 243

A Modélisation demande thermique B5 : Caractéristiques du bâtiment 245

B L'indice Degré Journalier Unifié : une information sur la sévérité du climat pour l'estimation des demandes thermiques du bâtiment 249

C Détail des processus utilisés dans Écoinvent 251
C.1 Processus utilisés dans le scénarios de comparaison à l'ATES ENSEGID 252
C.2 Processus utilisés dans l'ICV de l'ATES ENSEGID 253

Table des figures

1.1 Écart de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1850-1900. La courbe rouge représente la moyenne glissante sur 10 ans (issues de Rohde et Hausfather 2020) 6

1.2 Évolution du niveau des océans : (a) niveau moyen à l'échelle mondiale depuis 1993 (évolution de 3.55 mm an^{-1}) et (b) évolution annuelle à l'échelle régionale du globe par rapport à 1993 (Données en libre accès produites par le Centre National d'Études Spatiales) 8

1.3 Bilan des forçages radiatifs. Le forçage anthropique positif est lié aux émissions de GES et le forçage négatif aux effets du changement d'affectation des terres, de l'accumulation atmosphérique d'aérosols et de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Le forçage naturel englobe les effets de l'activité solaire et volcanique (IPCC 2014b) 9

1.4 Concentration atmosphérique de certains GES. À noter la différence d'échelle sur chaque axe (1 ppm = 1×10^3 ppb) (données sources : Tans et Keeling 2022, Lan et al. 2022 10

1.5 Total des émissions anthropiques de GES par gaz entre 1970 et 2010. Le CO_2 "AFOLU" se rapporte à toutes les activités agricoles et forestiers émettant directement du CO_2 (données issues de IPCC 2014b) 11

1.6 Évolution de la concentration atmosphérique de CO_{2eq} selon les scénarios décrits par le GIEC ((Fujino et al. 2006 ; Riahi et al. 2007 ; Vuuren et al. 2007) 12

1.7 Émissions directes et indirectes de GES par secteur : les émissions indirectes proviennent de la production d'électricité et de chaleur et sont représentées en pâle sur le graphique de droite. Elles sont quasiment nulles pour le transport et l'agriculture (d'après les données de l'Agence Internationale de l'Énergie pour l'année 2010). 14
1.8 Évolution de la quantité de GES émise par le secteur du bâtiment : (a) au niveau mondial et (b) par groupe de pays (à noter la différence d'échelle verticale) (IPCC 2014a) 15
1.9 Consommation finale d'énergie par secteur dans le bâtiment (IPCC 2014a) . 16
1.10 Exemple de stockage d'énergie thermique appliqué à un bâtiment : (a) fonctionnement d'un système énergétique conventionnel et (b) fonctionnement d'un système énergétique muni d'un TES. Les croix bleues représentent la création de froid et les croix rouges de chaud 19
1.11 Principes et vecteurs utilisés par les différentes techniques de stockage d'énergie thermique appliquées aux bâtiments (adapté de Heier et al. 2015). TABS = Bâtiment actif thermiquement (*i.e.* distribution de l'énergie par voie aérienne ou par circulation d'eau), HVAC = Système de chauffage, ventilation, climatisation 23

2.1 Fonctionnement d'un ATES réversible : (a) état initial du bâtiment et de l'aquifère pré-production, (b) premier cycle de chauffage utilisant l'eau de l'aquifère et stockage de l'eau refroidie dans une bulle d'eau froide, (c) premier cycle de refroidissement utilisant l'eau froide et stockage d'une bulle chaude et (d) deuxième cycle de chauffage utilisant l'eau chaude stockée 30
2.2 Mécanismes de transfert d'énergie en milieu poreux en fonction du nombre de Peclet thermique (Pe) : (a) transfert d'énergie principalement dominé par la conduction dans la matrice poreuse et le fluide, (b) transfert d'énergie principalement dominé par l'advection en lien avec une vitesse d'écoulement souterrain élevée (c) équilibre entre le transport advectif et conductif 33
2.3 Émergence des ATES dans le mode : (a) barrières freinant le développement et (b) phase de développement des marchés ATES en fonction des pays, à noter que les conditions climatiques et de subsurface sont supposées favorables *(*Fleuchaus *et al. 2018)* 42
2.4 Potentiel de développement des ATES dans le monde, (a) cartographie de toutes les aires urbaines du monde et (b) mise en évidence des aires urbaines avec un fort potentiel de développement des ATES (tiré de Lu et al. 2019) . 43
2.5 Exemple d'un forage colmaté mécaniquement par des fines suite à un développement insuffisant (a) comblement du fond du forage et (b) crépines obstruées 46

2.6 Exemple d'équipements colmatés par des oxydes de fer dans un système géothermique open loop non réversible (a) crépines du forage de production, (b) pompe du forage, (c) tube PVC et (d) échangeur de chaleur (tiré de Gjengedal et al. 2020) 47

3.1 Principe de la mesure de température distribuée par fibre optique (adapté de Fenta et al. 2021 ; Simon 2020) 54

3.2 Résultats d'expérience de mesures distribuées actives de température par fibre optique : (a) évolution de la température le long du forage (B. F. d. Tombe et al. 2019), (b) profil vitesse de Darcy issu de l'interprétation des mesures thermiques (B. F. d. Tombe et al. 2019), (c) et (d) profils de conductivité thermique issus de l'interprétation des résultats (Hakala et al. 2022 ; Zhang et al. 2020) 56

3.3 Installation des câbles dans les forages : (a) fixation à la base du tube PVC, (b) descente du tube et (c) tension et fixation à 3 m d'intervalle avec un collier plastique 57

3.4 Préparation de l'expérience : (a) câble aérien de fibre dans le bac de calibration, (b) mise à nu du câble de fibre, (c) fusion du câble avec celui de l'unité DTS et (d) unité DTS installée sur le terrain 58

3.5 Disposition du site expérimental : (a) Agencement du système d'acquisition (camion) par rapport à l'emplacement des forages, (b) camion et bac de calibration et (c) représentation schématique des équipements expérimentaux . . 59

4.1 Moyenne journalière des températures atmosphériques de surface montrant la fluctuation saisonnière (station météo de Villenave d'Ornon - Bordeaux - Données Météo-France) 77

4.2 Impact de la fluctuation annuelle des températures atmosphériques dans le sous-sol : (a) fluctuation annuelle de la température atmosphérique et (b) pénétration de l'onde thermique de surface en fonction du temps. Chaque panneau représente une valeur de diffusivité thermique D. Les points représentent l'influence d'un gradient géothermique de 3.0 °C/100m ($T_m = 14.0$ °C, $A = 10.0$ °C, $t_0 = 365$ j et L = 0.45 m) 79

4.3 Logs de température réalisés en différentes localisations et gradient géothermique associés (données issues de Bayer et al. 2019 ; Visser et al. 2020 ; Watson et Westaway 2020 pour les villes respectives d'Osaka et Winnipeg, Amsterdam et Glasgow). Pour Bordeaux, le profil a été fourni par Antea Group. 80

4.4 Profils de température mesurés dans différents lieux de la ville de Berlin. L'occupation des sols joue un rôle majeur sur la forme des profils (adaptée de Blum et al. 2021) 82

4.5 Zone théorique : plan d'occupation des sols "actuel". 85

4.6 Chronique synthétique des moyennes annuelles des températures atmosphériques 86

4.7 Bilan thermique du sous-sol, approche conceptuelle 88

4.8 Ajustement des moyennes de températures annuelles théoriques par un polynôme $\varphi_{SAT}(t)$ d'ordre 3 89

4.9 Composantes des fonctions $\varphi_{anth}(t)$ et φ_{GST} (t) pour la prise en compte de l'occupation des sols dans le transfert thermique 91

4.10 Extension 3D du modèle numérique et conditions limites thermiques et hydrauliques utilisées dans Feflow 93

4.11 Nombre de Péclet en fonction de la vitesse de Darcy et de la longueur caractéristique pour $\lambda_{bulk} = 3.0\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ (*ie* $\lambda_{solide} = 1.89\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ et $n = 0.3$). Lorsque le nombre de Péclet est inférieur à 1, l'énergie est majoritairement transportée par conduction 95

4.12 Impact du SUHI sur le réchauffement du sous-sol à 30 m de profondeur : Plan horizontal représentant l'augmentation de température par rapport à l'état initial avant construction des routes et des bâtiments en 1980. Une augmentation en dessous de 0.5 °C est représentée en blanc. En 1985, les bâtiments ne sont pas encore construits et sont représentés en pointillés sur la carte. 98

4.13 Impact du SUHI sur l'évolution de la température dans le sous-sol au point F2 pour $v = 5.0\,\mathrm{m\,an^{-1}}$ et $\alpha = 1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$: (a) évolution transitoire de la température à différentes profondeurs et (b) évolution de la forme des profils de température en fonction du temps (résultats du modèle numérique) . . . 99

4.14 Déconvolution du signal thermique dans le sous-sol à 30 m de profondeur au droit de F2 : apport de chaque structure en surface en fonction du temps (résultats analytiques) 99

4.15 Déconvolution des signaux thermiques le long du profil F2 : apport des différents phénomènes de surface en 1995 et 2050 100

4.16 Effet de la vitesse d'écoulement naturelle et de la dispersion sur la température moyenne de différents intervalles en profondeur au droit de F2. Les courbes noires correspondent à la date de 1985 et les vertes à 2050 101

4.17 Impact de l'anthropisation des sols et du réchauffement climatique sur la distribution de la température en profondeur restituée par modèles analytique et numérique : (a) Évolution de la température en fonction du temps à différentes profondeurs (lignes : modèle analytiques et points : modèle numérique 3D) et (b) différences de température entre le modèle numérique et le modèle analytique 103

4.18 Impact de la vitesse de Darcy et de la dispersion sur l'erreur relative de la solution analytique par rapport au modèle numérique en 2050. L'erreur en dessous de 10 % (trait rouge) est considérée comme acceptable (Pophillat et al. 2020). Observation au point F2. 104

5.1 Données de température journalière moyenne du scénario RCP 8.5 appliqué à Bordeaux (données issues de Soubeyroux et al. 2020) 112

5.2 Répartition de la demande thermique journalière pour l'année 2022 114

5.3 Projection des demandes thermiques journalières pour le scénario climatique RCP 8.5 115

5.4 Variables de fonctionnement de l'ATES pour le scénario RCP 8.5 en hiver et été : (a) projection des puissances moyennes nécessaires pour satisfaire les besoins thermiques et (b) volumes associés pompés aux ouvrages 116

5.5 Configuration et propriétés du sous-sol modélisé dans Feflow 8.0 117

5.6 Chroniques de $\varphi_{SAT}(t)$ utilisées pour les conditions limites de la première couche du modèle numérique, et ordre de création des différentes structures en surface du modèle. La courbe verte correspond au lissage des données de SAT moyennes annuelles issues de la station de Bordeaux Mérignac de 1906 à 2021 (données Météo France, points noirs) auxquelles s'ajoutent les projections du RCP 8.5 à partir de 2022 (point verts). La courbe noire correspond au lissage des données de la station de Bordeaux Mérignac de 1906 à 2022 suivie par une stabilisation de température à 13.9 °C à partir de 2022. 119

5.7 Impact des conditions de surface sur la distribution des températures dans le sous-sol avant le lancement de l'ATES : (a) profil au droit de F2 en fonction des conditions de surface et (b) différence de température entre les scénarios de surface. Les pointillés représentent le toit et le mur de l'aquifère exploité. 122

5.8 Évolution de la température en face des crépines des forages pour les scénarios $\textbf{STABLE}_{\boldsymbol{Nat}}$ et $\textbf{STABLE}_{\boldsymbol{Anthro}}$. Le trait épais correspond à la température moyenne annuelle au forage 123

5.9 Évolution de la température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. 125

5.10 Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux les limites des différentes formations sédimentaires 126

5.11 Évolution de la température dans le sous-sol : scénario $\textbf{STABLE}_{Anthro}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. Les bâtiments et routes sont représentés à la surface par les rectangles bleus et gris 128

5.12 Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario $\textbf{STABLE}_{Anthro}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. 129

5.13 Évolution de la température en face des crépines des forages pour les scénarios $\textbf{RCP8.5}_{Nat}$ et $\textbf{RCP8.5}_{Anthro}$. Le trait épais correspond à la température moyenne annuelle au forage 130

5.14 Évolution transitoire de la distribution de température dans le sous-sol : $\textbf{RCP8.5}_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. 132

5.15 Évolution de la température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : $\textbf{RCP8.5}_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. 133

5.16 Évolution de la distribution de température dans le sous-sol : **Scénario** $\textbf{RCP8.5}_{Anthro}$. Les bâtiments et les routes sont représentés sur la surface par les rectangles bleus et gris 135

5.17 Coupe transversale entre les deux forages montrant l'évolution de la distribution de température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : **Scénario** $\textbf{RCP8.5}_{Anthro}$ 136

5.18 Évolution de la performance de l'ATES au droit des deux forages en fonction des différents scénarios : (a) évolution du ratio de température, (b) évolution du ratio volumique et (c) évolution de la performance globale des ouvrages . 138

6.1 Présentation du site d'étude (a) localisation du site, (b) vue aérienne du campus de Bordeaux centrée sur l'ENSEGID et (c) bâtiment livré en 2022 . . . 144

6.2 Chantier des forages de l'ATES (a) mat de la machine de forage durant la réalisation de GF2, (b) remontée de l'outil de forage pour nettoyage suite à la traversée d'un horizon "légèrement" argileux au droit de GF1 (c) récolte des cuttings en sortie de forage et (d) crépines inox installées dans les forages 145

6.3 Configuration du site et équipements installés à l'ENSEGID (a) plan de localisation des ouvrages sur site (les ronds colorés correspondent aux forages de l'ATES, et les points noirs aux différents piézomètres. L'emplacement du local technique est marqué par la croix blanche, et les locaux de l'ENSEGID sont colorés en rouge), (b) équipement de la tête de forage GF1, (c) disposition des équipements dans le local technique et (d) borne de visualisation de fonctionnement du système en temps réel. 146

6.4 Schéma du fonctionnement du système ATES affichée à la borne de visualisation avec les données de température, de débit et de pression en temps réel 147

6.5 Logs lithologiques disponibles sur le site de l'ENSEGID 148

6.6 Évolution de la piézométrie de la nappe oligocène et des sens d'écoulement au sud et à l'ouest de la métropole bordelaise. La localisation du site de l'ENSEGID est marquée par le carré rouge (données issues du SIGES Aquitaine https ://sigesaqi.brgm.fr) 149

6.7 Logs lithologiques existants sur le site de l'ENSEGID 150

6.8 Analyse microscopique des déblais de forage de la partie supérieure des calcaires : (a) débris calcaire (loupe binoculaire), (b) algue rouge (microscope électronique), (c) et (d) comblement de la porosité interstitielle par une matrice argileuse (microscope électronique) 151

6.9 Observation des cuttings de la partie réservoir des calcaires : (a) débris calcaire montrant une porosité importante autour d'un foraminifère (loupe binoculaire), (b), (c) et (d) mise en évidence d'une porosité interstitielle dans les débris calcaires (microscope électronique) 152

6.10 Compilation des données acquises au forage GF1 : coupe géologique, diagraphies de réception et coupe technique 153

6.11 Compilation des données acquises au forage GF2 : coupe géologique, diagraphies de réception et coupe technique 154

6.12 Esquisse piézométrique du site de l'ENSEGID (mesures avril 2021) 155

6.13 Rabattements enregistrés aux forages de production durant leur essai de nappe. Les sauts brusques de rabattement correspondent à des variations de débit (variations non enregistrées durant les essais). 156

6.14 Sensibilité du "diagnostic plot" à l'échantillonnage (essai de pompage GF2, piézomètre F2) : un nombre de points trop faible (10) génère une courbe dérivée à la signature potentiellement ambiguë, alors qu'un nombre de points important (1000) génère une dérivée excessivement bruitée. 158

6.15 Modèle conceptuel de Theis : pompage dans un aquifère strictement confiné (adapté de Kruseman et Ridder 1994 159

6.16 Modèle conceptuel de Hantush : pompage dans un aquifère semi-captif (adapté de Kruseman et Ridder 1994 160

6.17 *Diagnostic plots* aux différents piézomètres suivis durant les deux essais de pompage et modèles analytiques de Theis et Hantush ajustés sur les rabattements mesurées 161

6.18 Profils de températures mensuels sur 5 forages du site de l'ENSEGID. La droite horizontale représente la profondeur du point fixe 164

6.19 Profils de températures relevés dans les forages géothermiques des lycées de Talence. La droite en pointillé représente la distribution de la température estimée à partir du calcul du gradient géothermique (Données Antea Group) 165

6.20 Occupation des sols dans le sud de Bordeaux (Corine Land Cover, version 2012) et localisation de l'ENSEGID (rectangle noir) 167

6.21 Évolution du bâti sur la zone d'étude depuis 1924. Le polygone rouge représente l'emprise des nouveaux locaux ENSEGID sur la zone à partir de 2021 . 169

6.22 Moyenne annuelle des températures atmosphériques relevées à la station météo de Mérignac (33) et courbe de tendance associée (Données Météo France) 170

6.23 Comparaison de la température atmosphérique (SAT) et de la température à la surface du sol (GST) sur le site de l'ENSEGID : (a) évolution en fonction du temps des températures au pas de temps 5 minutes (b) moyenne journalière des températures en fonction du temps, (c) différence entre les moyennes journalières GST et SAT et (d) localisation du point d'enregistrement des températures sur site 171

6.24 Stratégie élaborée pour prendre en compte les structures anthropiques de surface : (a) Définition du système de coordonnées délimité par le rectangle rouge (le coin inférieur sud correspond à la coordonnée (0,0)) et (b) délimitation des structures prises en compte pour la modélisation selon leur année de construction 172

6.25 Profils de température mesurés (points noirs) et simulés avec les valeurs enveloppes de 0.8 et 1.2 °C pour $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}}$ (courbes oranges) dans les 5 piézomètres du site de l'ENSEGID 175
6.26 Débits de pompage mensuels moyens estimés lors du dimensionnement de l'ATES ENSEGID (source INGEROP) 177
6.27 Comparaison de l'énergie extraite de l'aquifère entre l'ATES ENSEGID et la moyenne de 73 ATES néerlandais (données Fleuchaus et al. 2019) : (a) données mensuelles et (b) données annuelles 178
6.28 Projection sur les débits pompés à l'ENSEGID pour le scénario RCP 8.5 . . 179
6.29 Modèle conceptuel retenu pour la modélisation numérique de l'ATES ENSEGID : (a) vue pseudo-3D et (b) vue latérale passant par les puits de l'ATES . 180
6.30 Détail du modèle réalisé dans Feflow : (a) maillage 3D montrant l'épaisseur des différentes couches et (b) zoom sur le maillage 2D en surface montrant le schéma de discrétisation autour des différentes structures. Des exemples de conditions limites de température appliquées aux différentes structures sont présentés. 181
6.31 Distribution de la température au droit de chaque piézomètre avant le lancement de l'ATES (températures calculées : traits verts, relevés de terrain en 2021 : points noirs). Les lignes pointillées représentent les limites des formations géologiques 182
6.32 Évolution de la température moyenne en face des crépines des forages dans les deux scénarios **Stable** et **RCP 8.5** simulés 183
6.33 Évolution de la température dans le sous-sol : scénario **Stable**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques. 185
6.34 Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **Stable**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques. . . . 186
6.35 Évolution de la température dans le sous-sol : scénario **RCP8.5**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques. 187
6.36 Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **RCP8.5**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques. . . . 188
6.37 Estimation de la performance aux puits froid et chaud pour le scénario **Stable** et **RCP8.5** : (a) évolution du ratio de température, (b) évolution du ratio volumique et (c) évolution de la performance globale 190

7.1 Schéma d'ensemble de la méthode Impact 2002+ qui relie les impacts de chaque processus d'un système aux *Midpoints* et aux *Endpoints*. Les flèches en pointillés représentent un impact supposé exister, mais qui n'est pas modélisé pour cause de connaissances trop faibles ou qui est en cours de développement (issue de Humbert 2014, LCI = Life Cycle Inventory : Inventaire du Cycle de Vie). 196
7.2 Choix des frontières du système ATES de l'ENSEGID pour réaliser l'ACV . . 198
7.3 *Endpoints* de l'ACV - ATES ENSEGID 201
7.4 Impacts environnementaux avec analyse de la catégorie "Ressources" aux *Midpoints* - ATES ENSEGID 202
7.5 Résultats d'ACV d'ATES comparables à l'ENSEGID : (a) Stemmle et al. 2021 et (b) Moulopoulos 2014 206
7.6 Influence du mix électrique : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix . . . 210
7.7 Influence du mix électrique choisi sur les résultats de l'ACV de l'ATES ENSEGID : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix 211
7.8 Comparaison des impacts environnementaux de l'ATES ENSEGID avec les solutions conventionnelles Biomasse et Gaz (le système de refroidissement utilisé dans les scénarios conventionnels correspond à un climatiseur électrique alimenté par de l'électricité française.) 213
7.9 Normalisation des impacts environnementaux pour les solutions énergétiques conventionnelles 214
7.10 Influence de la demande thermique sur les résultats l'ACV de l'ATES ENSEGID : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix électrique 216
7.11 Trajectoire des émissions de GES en accord avec les politiques implantées et les stratégies de réduction. Les NDCs sont les politiques de réductions d'émissions actuellement planifiées à l'horizon 2030 (figure issue de IPCC 2023) 225

Liste des tableaux

1.1 Temps de résidence d'un GES dans l'atmosphère et PRC associé en fonction de l'horizon de temps considéré (adapté de IPCC 1996) 11
1.2 Propriétés thermiques de matériaux courants 20
1.3 Résumé des bénéfices économiques et environnementaux de l'application du système TES aux bâtiments 27

2.1 Puissance géothermique et débit associé nécessaire pour satisfaire la demande thermique du bâtiment en fonction du mode de fonctionnement de l'ATES (COP et ERR correspondent au coefficient de performance de la pompe à chaleur respectivement en mode chaud et en mode froid) 32
2.2 Comparaison des caractéristiques techniques des systèmes UTES (Fleuchaus et al. 2018) 39
2.3 Retour sur investissement et réduction des émissions de CO_2 pour différents projets d'ATES 41

4.1 Propriétés thermiques des roches sédimentaires (issue de Dalla Santa et al. 2020, rec = recommandée) 76
4.2 Paramètres du sous-sol du modèle référence 87
4.3 Paramètres et fonctions utilisés pour représenter l'effet du climat 90
4.4 Paramètres pouvant être utilisés dans l'équation 4.2.4 et dispersion associée pour $L_c = 500$ m (adapté de Schulze-Makuch 2005) 94
4.5 Tableau résumant les conductivités hydrauliques et les gradients hydrauliques utilisés dans le modèle numérique pour restituer les vitesses de Darcy, le scénario de référence correspond à la deuxième ligne 95
4.6 Discrétisation verticale du maillage 3D Feflow 96

5.1 Résumé des facteurs à prendre en compte pour le calcul de la demande thermique du bâtiment B5 selon la saison (ASHRAE 1997, 2021) 113
5.2 Synthèse des scénarios 120

6.1 Résumé des caractéristiques des essais de pompages GF1 et GF2 156
6.2 Paramètres hydrodynamiques estimés à partir de l'interprétation des essais de pompage en utilisant la solution de Theis 162
6.3 Paramètres hydrodynamiques estimés à partir de l'interprétation des essais de pompage en utilisant la solution de d'Hantush 163
6.4 Conductivté hydraulique et épaisseur des différentes formations choisies pour estimer K_{eq} 173
6.5 Conductivité thermique λ et épaisseur b des formations retenues pour estimer λ_{eq} 174

7.1 Inventaire du cycle de vie d'un forage géothermique 199
7.2 Inventaire du cycle de vie du fonctionnement du système 200
7.3 Consommation électrique inhérente au design de l'ATES à l'ENSEGID . . . 200
7.4 Impact sur le réchauffement climatique : comparaison de l'ATES ENSEGID et des systèmes existants documentés. Le mix électrique utilisé est précisé entre parenthèse 204
7.5 Part (en %) des sources d'énergie dans le mix électrique de la France et de l'Allemagne dans la base de données EcoInvent en 2014 205
7.6 Facteurs de normalisation utilisés dans la méthode ***Impact2002+*** (v2.1) . . 211
7.7 Détail des systèmes énergétiques comparé à l'ATES de l'ENSEGID. Les rendements sont issues de données fabricants 213

C.1 Inventaire du cycle de vie d'un forage géothermique 253
C.2 Inventaire du cycle de vie d'un piézomètre 254
C.3 Inventaire du cycle de vie des équipements intérieurs 255
C.4 Inventaire du cycle de vie du chantier de raccord réseau en subsurface 255
C.5 Inventaire du cycle de vie du fonctionnement du système 256
C.6 Inventaire du cycle de vie de la maintenance 256

Introduction

Les bâtiments sont des vecteurs de consommation d'énergie importants qui génèrent à l'échelle mondiale environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2014c). Le confort thermique dans les bâtiments (chauffage et climatisation) est le pôle qui consomme le plus d'énergie (IPCC 2014a). Outre l'importance de la rénovation des parois des bâtiments afin d'éviter des pertes thermiques trop importantes, l'utilisation de sources d'énergie moins carbonée pour satisfaire les besoins thermique apparaît comme primordiale dans la lutte face aux émissions de GES. Dans ce contexte, les technologies visant à stocker de l'énergie thermique excédentaire et à la restituer au bâtiment en période de besoin apparaissent comme des solutions pertinentes pour atteindre les objectifs de réductions de GES (Alva et al. 2017 ; Arce et al. 2011 ; L. F. Cabeza et al. 2015 ; Heier et al. 2015). Parmi ces technologies, les systèmes de Stockage d'Énergie Thermique en Aquifère (ATES) se révèlent particulièrement efficace pour stocker et fournir de l'énergie à des bâtiments ayant des demandes thermiques conséquentes tels que les universités, les complexes hôteliers, les hôpitaux, etc... (Fleuchaus et al. 2019 ; Schüppler et al. 2019 ; Stemmle et al. 2021). À l'aide de 2 forages au minimum dans un même aquifère, ils peuvent tout aussi bien fournir/stocker de l'énergie froide pour rafraîchir les bâtiments ou de l'énergie chaude pour le chauffage, via un dispositif de pompe à chaleur.

Depuis les années 1990, leur développement de ces systèmes de stockage réversibles s'accroît dans les zones urbaines de certains pays du Nord de l'Europe (Fleuchaus et al. 2018). Toutefois, trois problématiques apparaissent quant à leur utilisation et au maintien de leur performance :

1. le développement des îlots de chaleur souterrains dans les zones urbaines. En effet, le sous-sol des agglomérations est sujet au développement d'anomalies thermiques positives (Bayer et al. 2016 ; Bidarmaghz et al. 2021 ; Dědeček et al. 2012 ; Grant Ferguson et A. D. Woodbury 2007 ; Tissen et al. 2019). Ces phénomènes sont générés par l'augmentation des transferts de chaleur venant du sol imputables à l'anthropisation de la surface et au réchauffement climatique. En fonction de la densité et de la nature de l'urbanisation, les perturbations thermiques peuvent se propager en profondeur à long terme et atteindre jusqu'à 100 m de profondeur. Leur impact sur la performance des installations géothermiques en général, et sur les ATES de faible profondeur plus spécialement, reste à ce jour peu documenté (Fleuchaus et al. 2019) ;
2. l'effet du changement climatique sur la demande thermique du bâtiment. Sur le long terme, le réchauffement climatique va induire des modifications

sur la demande thermique des bâtiments (Isaac et Vuuren 2008). Les besoins en rafraîchissement vont augmenter et la demande de chauffage devrait diminuer. De fait, ces modifications de besoin pourraient perturber l'équilibre thermique d'un sous-sol exploité par un ATES ;

3. le vieillissement des forages de l'ATES. Les forages réversibles sont particulièrement sensibles au développement de colmatage (Bakema 2001 ; Gjengedal et al. 2020 ; Song et al. 2020). Dans la plupart des problèmes de colmatage, ce processus intervient dans les deux années qui suivent la mise en service du système. Il induit une diminution de la performance du système, voire un endommagement plus conséquent. Afin de garantir le succès d'une installation et ainsi contribuer au développement de cette technologie, il apparaît primordial de disposer d'outils permettant de suivre l'évolution de ce phénomène afin d'y remédier efficacement.

L'objectif de ces travaux de thèse est de mettre au point des outils afin de répondre à ces problématiques. Dans ce contexte, le sujet de thèse s'articule autour de trois thématiques principales : ***(i)*** un état de l'art sur le stockage d'énergie et les ATES, ***(ii)*** la mise en place d'un dispositif expérimental pour caractériser le vieillissement des forages d'exploitation d'un dispositif ATES et ***(iii)*** la modélisation pour étudier l'influence de l'artificialisation des sols et du réchauffement climatique sur le fonctionnement et la performance des ATES peu profonds.

Le premier thème est articulé en deux chapitres. Le chapitre 1 présente l'état actuel du climat en se basant sur les travaux du GIEC. Les différentes sources d'émissions de GES sont décrites et la pertinence et les bénéfices des technologies de stockage d'énergie thermiques pour réduire les GES sont détaillés.
Le chapitre 2 présente en détail l'objet d'étude de ces travaux de thèse : le système de Stockage d'Énergie Thermique en Aquifère (ATES). Cette partie se focalise sur son fonctionnement et détaille ses bénéfices économiques et environnementaux, la pertinence d'installation et les conditions requises pour un bon fonctionnement. Enfin, différentes limites et questionnements persistant autour de la caractérisation des aquifères ciblés et du fonctionnement des ATES sont dressés.

Le deuxième thème (chapitre 3) détaille un dispositif expérimental visant à caractériser le complexe aquifère-forage avec une résolution spatiale élevée. Cette expérience utilise une technique de mesure de température distribuée avec de la fibre optique (Bense et al. 2016 ; Read et al. 2014 ; B. d. Tombe 2021) placée le

long des piézomètres expérimentaux. La méthode consiste à chauffer l'armature de la fibre en y injectant un courant électrique constant. Connectée à un outil de traitement de signal, la fibre optique permet de suivre l'évolution dans le temps de la réponse thermique engendrée par l'injection du courant électrique avec une résolution verticale inférieure à 1 m (Simon et al. 2020). Le but de cette acquisition de données est d'estimer verticalement la distribution et la vitesse des flux souterrains le long de l'aquifère et d'identifier l'éventuel développement de colmatage le long des ouvrages en analysant les variations de conductivités thermiques.

Le troisième thème, découpé en trois chapitres, traite de l'effet de l'urbanisation et du réchauffement climatique sur le fonctionnement des ATES. Le chapitre 4 présente l'influence de ces deux phénomènes sur la distribution de la température dans les 100 premiers mètres du sous-sol. Le travail est axé sur l'utilisation d'une formulation analytique (Bayer et al. 2016 ; Rivera et al. 2015) et la mise au point d'un modèle numérique équivalent. Le chapitre 5 vise à estimer sur le long terme l'impact de ces deux facteurs sur la performance d'un ATES. Pour ce faire, un modèle numérique synthétique est développé et intègre les démarches détaillées dans le chapitre 4 afin de prendre en compte l'impact de l'artificialisation des sols et du réchauffement climatique sur le fonctionnement et la performance de l'ATES. Enfin, dans le chapitre 6, l'ATES pilote de l'ENSEGID est présenté. Après le détail des travaux réalisés, aboutissant à une vision plus précise du sous-sol du site et de son état thermique actuel, les techniques de modélisation développées sont utilisées pour aboutir à un premier outil de gestion du dispositif. L'outil est utilisé pour étudier la sensibilité de la performance de l'ATES, en contexte réel d'exploitation, sous l'influence de scénario de réchauffement climatique.

Le chapitre 7 de ce manuscrit ouvre sur une étude du bénéfice environnemental éventuel de ce type de dispositif. Une Analyse en Cycle de Vie est réalisée pour le dispositif ATES ENSEGID. Le gain environnemental est remis en perspective face à des solutions énergétiques conventionnelles, et replacé dans un contexte énergétique européen.

CHAPITRE 1

Les systèmes de stockage d'énergie thermique : une solution pour décarboner le secteur du bâtiment et lutter contre le réchauffement climatique

1.1 Émission de Gaz à Effet de Serre et changement climatique : l'influence de l'Homme

1.1.1 La contribution anthropique au changement climatique

Le constat : changements observés dans le système climatique

L'influence de l'Homme sur le système climatique planétaire est aujourd'hui manifeste. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) estime que les activités humaines sont responsables d'une augmentation moyenne des températures à l'échelle mondiale de l'ordre de $\pm 1.0\,°C$ ($\pm 0.2\,°C$) par rapport à la période de référence préindustrielle allant de 1850 à 1900 (figure 1.1). Cette augmentation se fait à une vitesse moyenne de $0.2\,°C$ ($\pm 0.1\,°C$) par décennie (IPCC 2018a).

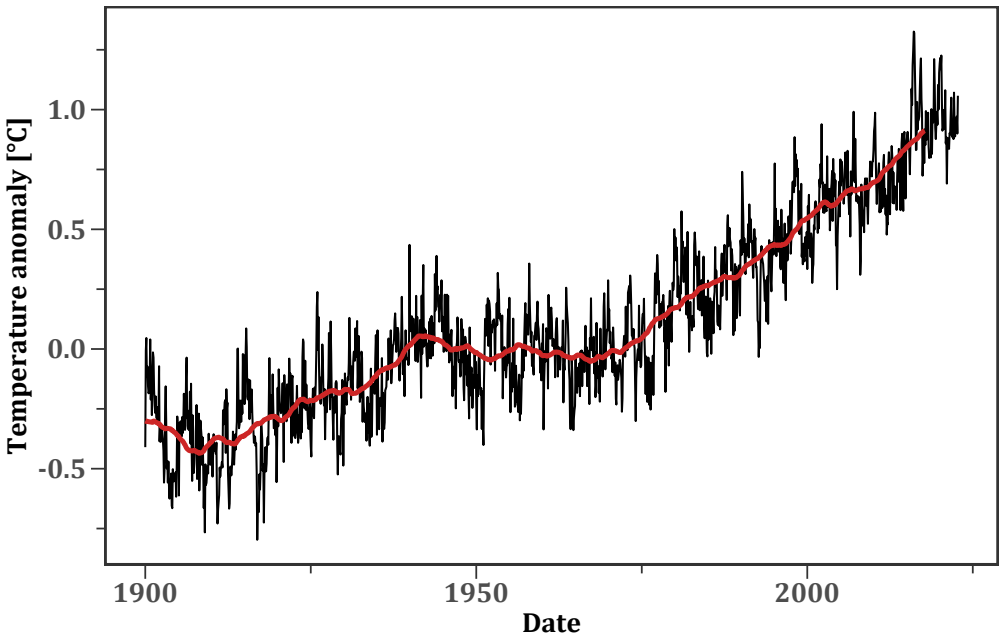


Figure 1.1 – Écart de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1850-1900. La courbe rouge représente la moyenne glissante sur 10 ans (issues de Rohde et Hausfather 2020)

En plus de l'augmentation des températures atmosphériques, de nombreux changements observés à l'échelle du globe sont autant de manifestations du changement climatique amorcé (IPCC 2014b). On peut notamment noter :

- Une augmentation du niveau des mers et des océans de 19 cm à l'échelle mondiale entre 1900 et 2010 (rythme supérieur aux deux derniers millénaires). Le rythme est encore plus soutenu depuis ces dernières années avec une moyenne d'augmentation du niveau de 3.55 mm an^{-1} qui a conduit à une augmentation totale de près de 10 cm en 30 ans (figure 1.2a). Tous les océans du monde sont concernés par cette augmentation, à l'exception du Pacifique Sud et de certaines zones localisées au sud du Japon (figure 1.2b) ;
- Une réduction de la couverture neigeuse et glaciaire de la Terre depuis 1992 entraînant une augmentation des températures du pergélisol dans la plupart des régions ;
- Une réduction de l'étendue de la banquise arctique de 3,5 à 4,1 % par décennie depuis 1980 et une augmentation de la surface de manière très irrégulière de la banquise antarctique de 1,2 à 1,8 % par décennie ;
- Une modification du régime des pluies au niveau des latitudes moyennes de l'hémisphère nord, se traduisant par une augmentation moyenne du volume de précipitations ;
- Des changements de salinité océanique suggérant des modifications des principaux courants océaniques et des cycles hydriques planétaires associés.

En plus des changements globaux, de nombreuses modifications locales ont été constatées depuis 1950 concernant les évènements climatiques extrêmes. Il est très probable que le nombre de journées et nuits froides ait diminué et que le nombre de journées et nuits chaudes ait augmenté depuis le milieu du 20e siècle. Il est aussi probable que les activités humaines aient plus que doublé les occurrences de fortes chaleurs en certains endroits de la Terre (Europe, Asie et Australie notamment), et qu'elles participent à l'augmentation des épisodes de précipitations abondantes et d'écoulements extrêmes (IPCC 2014b).
Ces changements climatiques globaux et l'augmentation des phénomènes extrêmes impactent de nombreuses espèces terrestres, marines et d'eau douce. Leur aire de répartition et les activités migratoires sont impactées. À l'échelle mondiale, 68 % de la biodiversité a disparu depuis 1970 (WWF 2020). Les systèmes humains sont aussi concernés par des diminutions de rendements agricoles ou des impacts directs et indirects sur la santé.

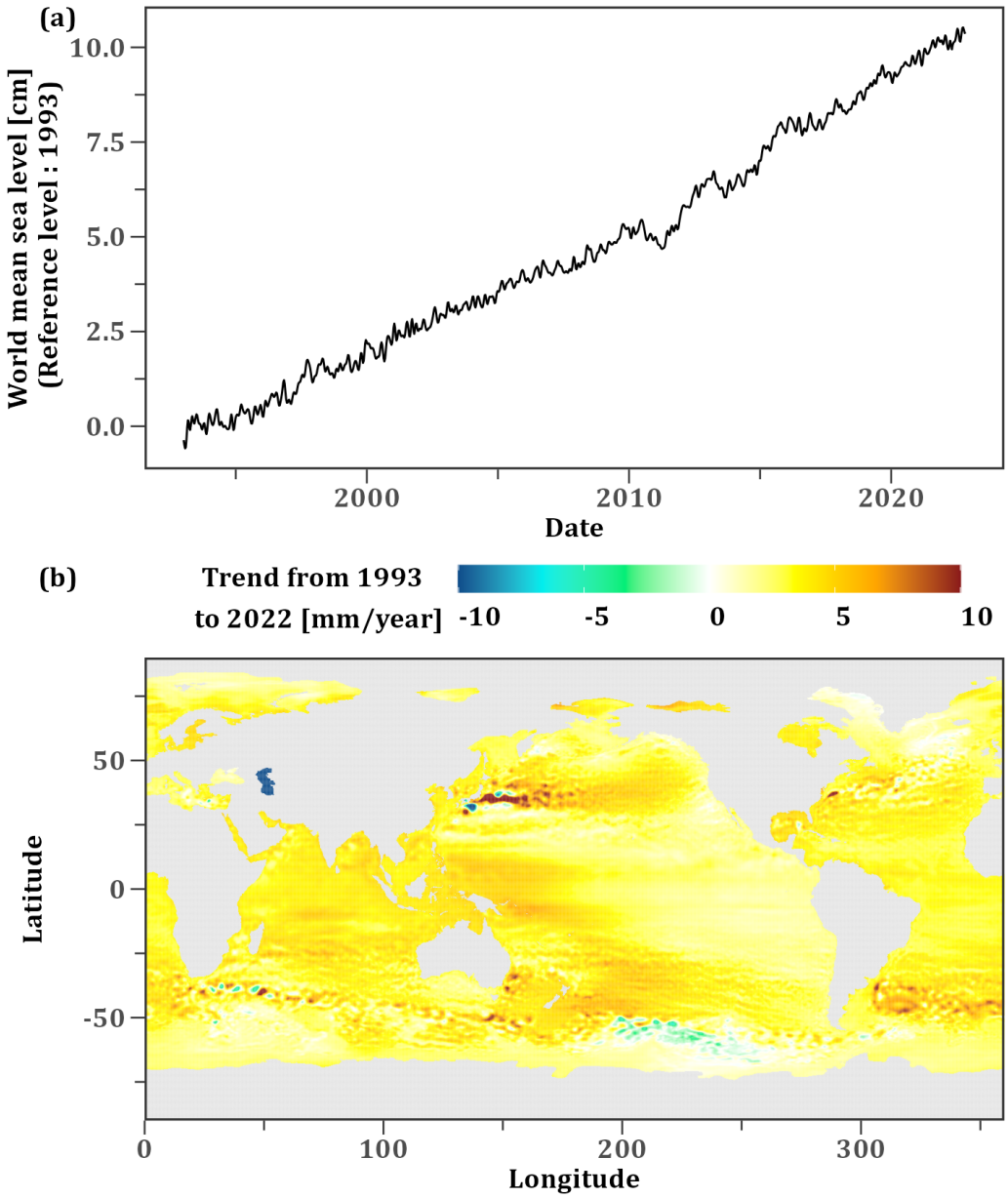


FIGURE 1.2 – Évolution du niveau des océans : (a) niveau moyen à l'échelle mondiale depuis 1993 (évolution de 3.55 mm an^{-1}) et (b) évolution annuelle à l'échelle régionale du globe par rapport à 1993 (Données en libre accès produites par le Centre National d'Études Spatiales)

Le rôle des GES dans le forçage radiatif

Le forçage radiatif est une variable qui illustre le réchauffement de la Terre. Il représente la différence entre la puissance radiative reçue et la puissance radiative émise par un système climatique donné, comme le système Terre. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer le système (plus d'énergie reçue qu'émise), alors qu'un forçage radiatif négatif va dans le sens d'un refroidissement (plus d'énergie

perdue que reçue). Le forçage radiatif, appliqué au système climatique terrestre, mesure la propension d'un facteur à perturber l'équilibre énergétique de la Terre. Il quantifie les facteurs (naturels et anthropiques) responsables de modifications et du dérèglement du bilan énergétique terrestre. Le forçage radiatif anthropique total se traduit par un effet de réchauffement (figure 1.3).

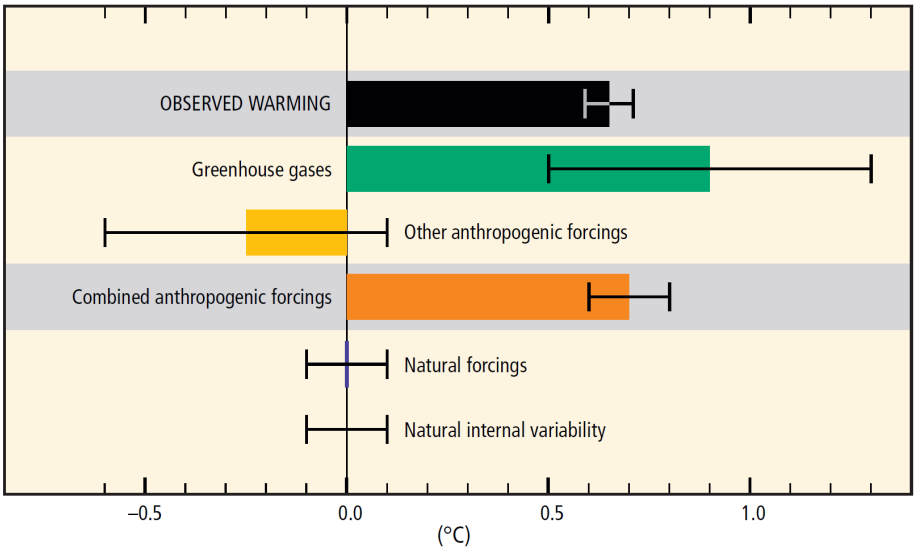


FIGURE 1.3 – Bilan des forçages radiatifs. Le forçage anthropique positif est lié aux émissions de GES et le forçage négatif aux effets du changement d'affectation des terres, de l'accumulation atmosphérique d'aérosols et de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Le forçage naturel englobe les effets de l'activité solaire et volcanique (IPCC 2014b)

L'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) constitue la part principale du forçage anthropique. L'effet de serre est un des phénomènes physiques responsables du changement climatique. Il découle en partie de ces émissions et contribue à retenir le rayonnement thermique à la surface de la Terre.

La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO_2) sont les deux principaux gaz naturels à l'origine de l'effet de serre. Le méthane (CH_4), les oxydes nitreux (NO_x), et l'ozone sont d'autres gaz naturels ayant une influence moindre, mais non négligeable (en particulier pour le méthane). L'effet de serre généré par les GES est indispensable pour maintenir des conditions favorables à la surface de la Terre.

Avec l'activité anthropique, les concentrations en GES standards (CO_2, CH_4 et NO_x) ont fortement augmenté. De plus, de nouveaux GES d'origine purement anthropique ont fait leur apparition (HydroFluoroCarbures (HFC), PerFluoroCarbures (PFC) et de l'HexaFluorure de Soufre (SF_6)). Au total, les concentrations atmosphériques n'ont jamais été aussi élevées depuis 800 000 ans (IPCC 2014b), et ne cessent d'augmenter (figure 1.4).

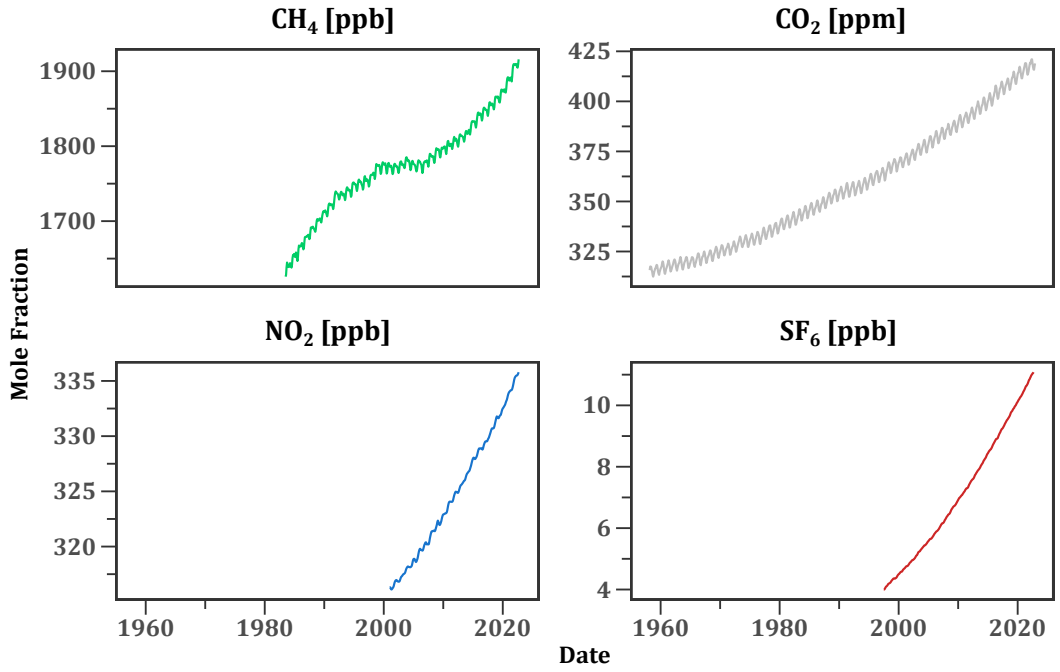


FIGURE 1.4 – Concentration atmosphérique de certains GES. À noter la différence d'échelle sur chaque axe (1 ppm = 1×10^3 ppb) (données sources : TANS et KEELING 2022, LAN et al. 2022

Le CO_2 est le gaz à effet de serre le plus émis via les activités humaines (figure 1.4). Depuis 1750, le cumul des émissions anthropiques de ce gaz dans l'atmosphère atteint 2040 ± 310 Gt. 40 % de cette accumulation est restée dans l'atmosphère, le reste étant stocké dans la végétation, le sol et l'océan. Près de la moitié des émissions ont eu lieu au cours des 40 dernières années, et elles sont en constante augmentation depuis 1970 (figure 1.5). Ces émissions sont mesurées en kg d'équivalent CO_2 (kg CO_{2eq}). Pour une certaine quantité de GES émise, son équivalent CO_2 correspond à la quantité de CO_2 qui aurait engendré un forçage radiatif équivalent (IPCC 1996). Le CO_{2eq} d'une quantité gaz émise (E_{GES}) se calcule par :

$$CO_{2eq} = PRC \times E_{GES} \tag{1.1}$$

où PRC correspond au Potentiel de Réchauffement Climatique du gaz considéré par rapport au CO_2. La valeur du PRC est fonction de la persistance du GES dans l'atmosphère et de l'horizon de temps où l'on se place pour observer les effets du GES émis (tableau 1.1)

Gaz	Temps de résidence	PRC		
	(ans)	20 ans	100 ans	500 ans
CO_2	variable	1	1	1
CH4	12	56	21	6.5
NO_x	120	280	310	170
SF_6	3200	16300	23900	34900
HFC	1–264	460–9100	140–11700	42–9800
PFC	2600–50000	4400–6200	6500–9200	10000-14000

TABLE 1.1 – Temps de résidence d'un GES dans l'atmosphère et PRC associé en fonction de l'horizon de temps considéré (adapté de IPCC 1996)

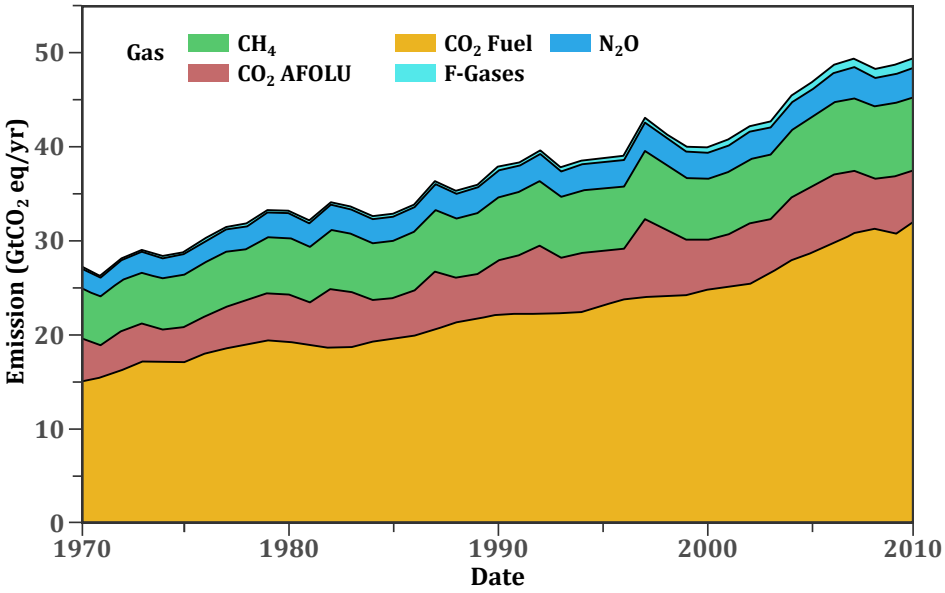


FIGURE 1.5 – Total des émissions anthropiques de GES par gaz entre 1970 et 2010. Le CO_2 "AFOLU" se rapporte à toutes les activités agricoles et forestiers émettant directement du CO_2 (données issues de IPCC 2014b)

PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

Le cumul des émissions de GES déterminera dans une large mesure la moyenne mondiale du réchauffement climatique en surface d'ici à la fin du XXIe siècle et au-delà. Les projections faites sur ces émissions se font à partir de différents profils représentatifs d'évolution des concentrations en GES (Representative Concentration Pathways : RCP). Les trajectoires des différents RCP varient fortement en fonction du développement socio-économique (taille de la population, mode de vie, production d'énergie, utilisation des terres, technologie) et des politiques cli-

matiques appliquées à l'échelle mondiale. 4 voies principales sont décrites par ces scénarios (figure 1.6). Le RCP 2.6 (Vuuren et al. 2007) représente un scénario strict d'atténuation des émissions de GES. Les RCP 4.5 (Smith et Wigley 2006) et 6.0 (Fujino et al. 2006) sont des scénarios intermédiaires, alors que le RCP 8.5 (Riahi et al. 2007) est un scénario d'émissions élevées.

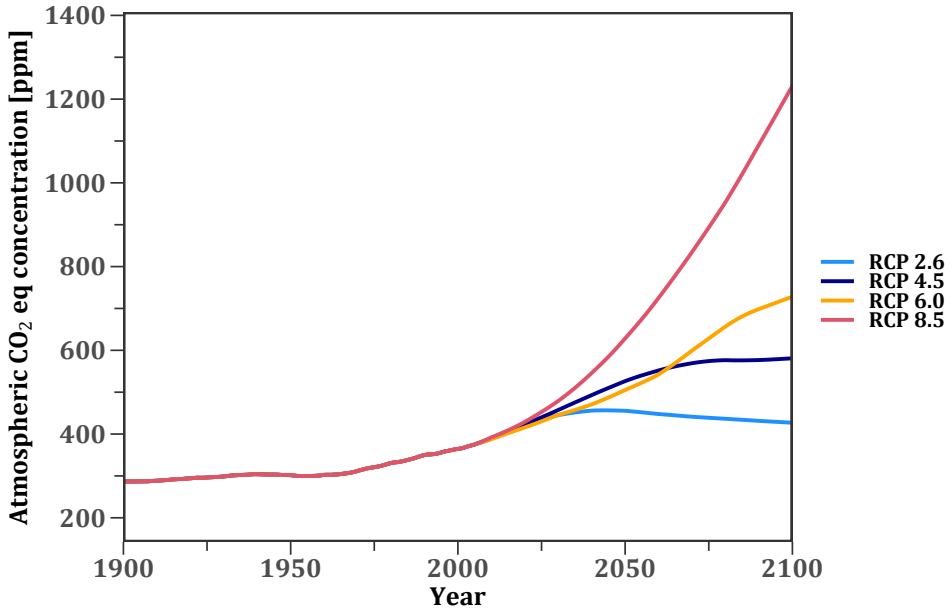


Figure 1.6 – Évolution de la concentration atmosphérique de CO_{2eq} selon les scénarios décrits par le GIEC ((Fujino et al. 2006 ; Riahi et al. 2007 ; Vuuren et al. 2007)

En se basant sur la période de référence, toutes les projections décrites par le GIEC indiquent une augmentation de la température atmosphérique de surface au cours du XXIe siècle. L'augmentation de la température de surface du globe dépassera très probablement 1.5 °C pour les RCP 4.5, 6.5 et 8.5. Le RCP 4.5 devrait toutefois permettre de maintenir une augmentation de température moyenne en dessous 2.0 °C. Le scénario RCP 2.6 permettrait de maintenir un réchauffement en dessous de 1.5 °C. Les scénarios ne prévoyant aucun effort d'atténuation par rapport aux émissions actuelles correspondent aux RCP 6.0 et RCP 8.5.

En poursuivant les émissions de GES sur le rythme actuel, les probabilités de conséquences graves, généralisées et irréversibles augmenteront pour les populations et les écosystèmes. Les températures continueront de croître et les composantes du système climatique planétaire seront modifiées de manière durable. (IPCC 2014b).

Face à ce constat, l'accord de Paris, ratifié en 2015 lors de la COP21, fixe l'objectif de limiter l'augmentation de la température mondiale à une valeur in-

férieure à 2.0 °C par rapport à celle de l'ère préindustrielle (United-Nations 2015). Pour aller plus loin et minimiser les risques liés au changement climatique, le rapport du GIEC de 2019, préconise de maintenir une augmentation en dessous des 1.5 °C (IPCC 2018b), même si cet objectif semble à l'heure actuelle difficilement atteignable.

1.1.2 Les émissions de GES par sources et secteurs

La généralisation de la consommation des énergies fossiles et les changements des modes de vie sont les vecteurs majeurs qui ont influé et influent encore sur l'utilisation des ressources terrestres et sur les émissions de GES associées (IPCC 2014d). Les deux tiers des émissions mondiales de GES, principalement du CO_2, sont causées par les processus de conversion d'énergie associés à la combustion des matières fossiles (moteur à explosion, chauffage dans les bâtiments ou chaudière de centrale électrique, etc ...). Un tiers des émissions est dû à d'autres activités comme les processus industriels (principalement CO_2, gaz fluorés et NO_2), déforestation (CO_2), production de matière fossile (principalement CH_4) ou encore l'agriculture (principalement CH_4 et NO_2) (IPCC 2014c). Toutes ces sources d'émissions peuvent être classées en 5 secteurs (figure 1.7a).

Le secteur le plus émetteur est la production d'électricité et de chaleur (25 %) pour satisfaire les besoins énergétiques des différentes activités humaines. Ce secteur émet énormément de GES, car, à l'échelle mondiale, plus de 65 % de l'électricité est produite à partir de ressources fossiles, à savoir le gaz, le charbon et le pétrole dans une moindre mesure (figure 1.7b). La quasi-totalité de ces émissions est dite indirecte et se rapportent aux consommations énergétiques du secteur du bâtiment et de l'industrie.

Le secteur de l'agriculture, forêt et autre affectation des terres (AFAT) est le deuxième secteur le plus émetteur et contribue à hauteur de 24% des émissions mondiales. Il s'agit d'émission de NO_2 et CH_4 (IPCC 2014c).

Les trois derniers secteurs concernent des émissions directes. Il s'agit d'émissions directes et concernent l'industrie, le transport et le bâtiment (par exemple création de ciment pour l'industrie, ou consommation de carburant pour le transport) et indirecte par le biais de l'utilisation de l'électricité ou du chauffage et refroidissement fournis par le secteur énergétique.

Lorsque les émissions directes et indirectes sont cumulées (figure 1.7), le secteur de l'industrie contribue à 31,8 % des émissions de GES mondiales, le transport 14,3 %. Quant au secteur du bâtiment, il est responsable de l'émission de 18,4 % de GES dont les deux tiers sont des émissions indirectes.

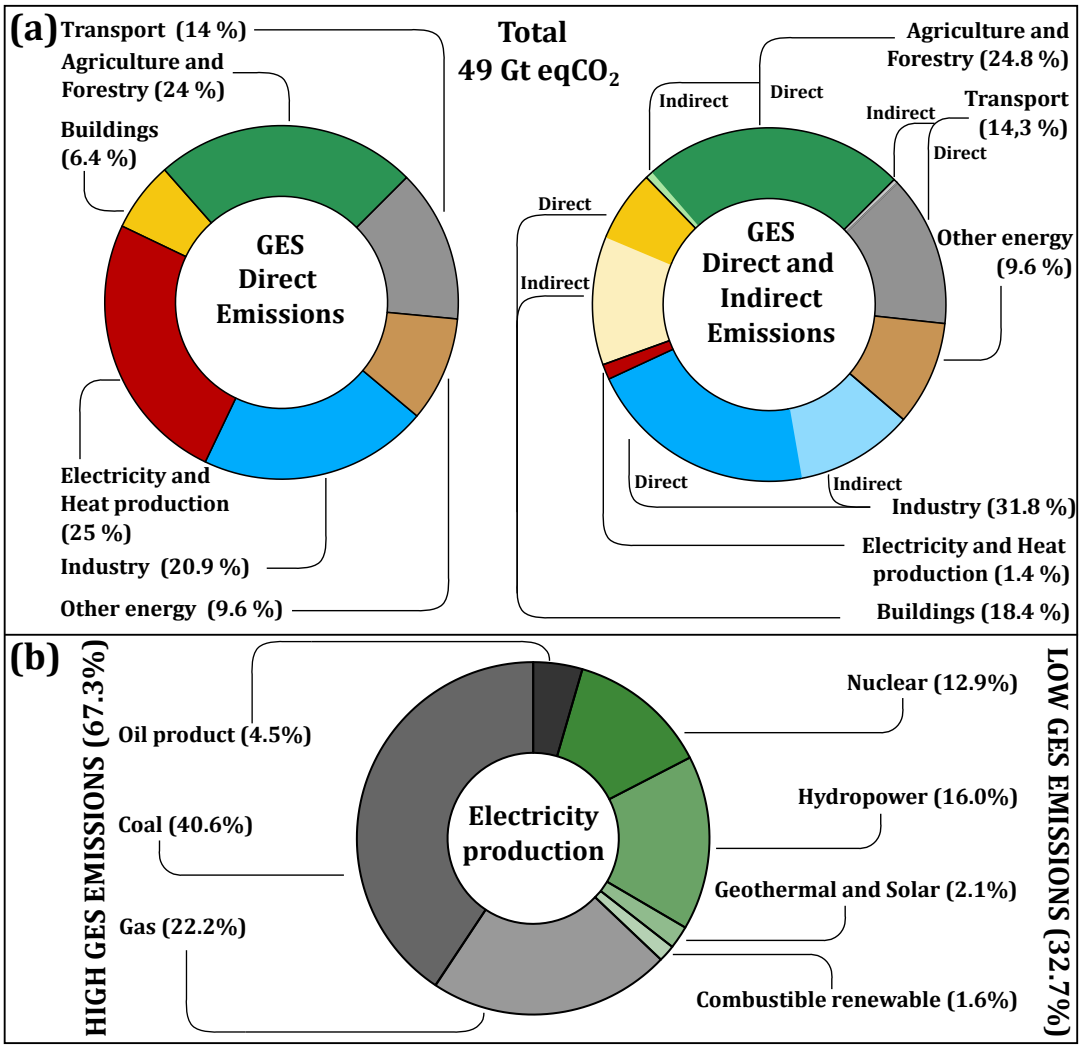


FIGURE 1.7 – Émissions directes et indirectes de GES par secteur : les émissions indirectes proviennent de la production d'électricité et de chaleur et sont représentées en pâle sur le graphique de droite. Elles sont quasiment nulles pour le transport et l'agriculture (d'après les données de l'Agence Internationale de l'Énergie pour l'année 2010).

1.1.3 Le bâtiment : un secteur clé

La part du secteur du bâtiment dans la production de GES est prépondérante et augmente constamment depuis 1970 (figure 1.8a). Depuis cette date, les émissions ont augmenté de 3.8 à 9.2 $GtCO_{2eq}$ an^{-1}. Cette augmentation est principalement due aux émissions indirectes qui sont passées de 1.28 à 6.02 $GtCO_{2eq}$ an^{-1}, alors que sur la même période, les émissions directes sont relativement stables (IPCC 2014a). Si le bâtiment est le plus gros émetteur de GES par voie indirecte (sous-section 1.1.2) c'est notamment parce que 51 % de l'électricité mondiale produite est utilisée par les infrastructures résidentielles et tertiaires (IPCC 2014a).

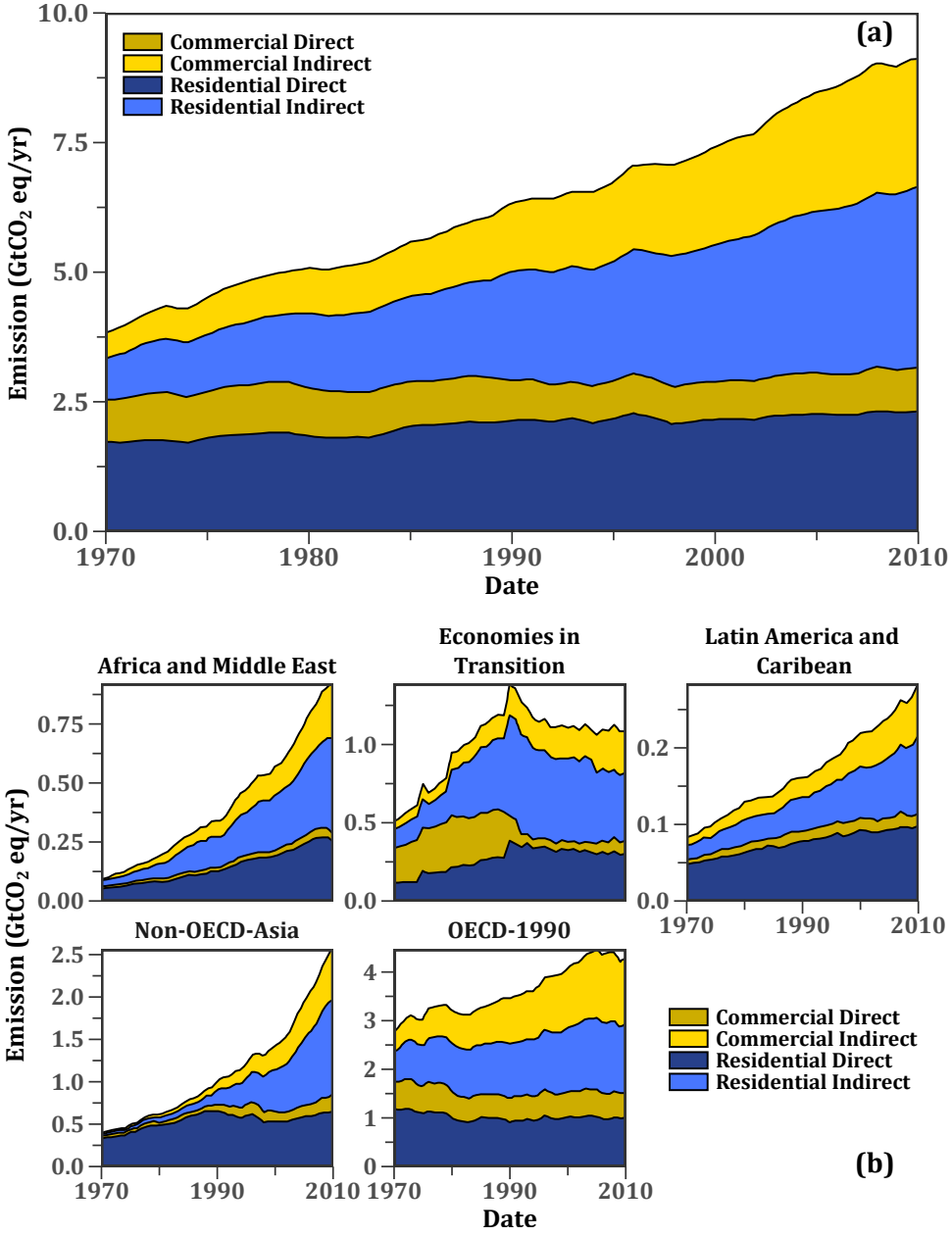


FIGURE 1.8 – Évolution de la quantité de GES émise par le secteur du bâtiment : (a) au niveau mondial et (b) par groupe de pays (à noter la différence d'échelle verticale) (IPCC 2014a)

Il existe par ailleurs une grande disparité à l'échelle du globe concernant les émissions de GES des bâtiments (figure 1.8b). La consommation des pays de l'Amérique du Nord et de l'Union Européenne de l'Ouest devrait rester stable ou légèrement diminuer malgré l'augmentation de la population et des niveaux de services. Ceci traduit l'application de mesures et réglementations concernant la politique énergétique des bâtiments. Ces pays sont et devraient rester toutefois parmi les plus gros consommateurs d'énergie thermique (IPCC 2014a). Dans ces

pays développés, la part d'émission des bâtiments est supérieure à la moyenne mondiale de 18 %. Par exemple, en Suisse et en France, les activités liées aux bâtiments sont responsables de 40 % des émissions de carbone du pays (Schwarz et al. 2019).
Concernant les pays en voie de développement, les émissions de GES des bâtiments ne cessent de croître sans toutefois atteindre les valeurs des pays développés.

Les deux catégories de bâtiments qui consomment le plus d'énergie sont les bâtiments résidentiels et tertiaires. Dans les deux cas, la demande thermique, dominée par le chauffage (espace et eau chaude), est le vecteur qui consomme le plus d'énergie avec 45 % pour le tertiaire et 61 % pour le résidentiel (figure 1.9).

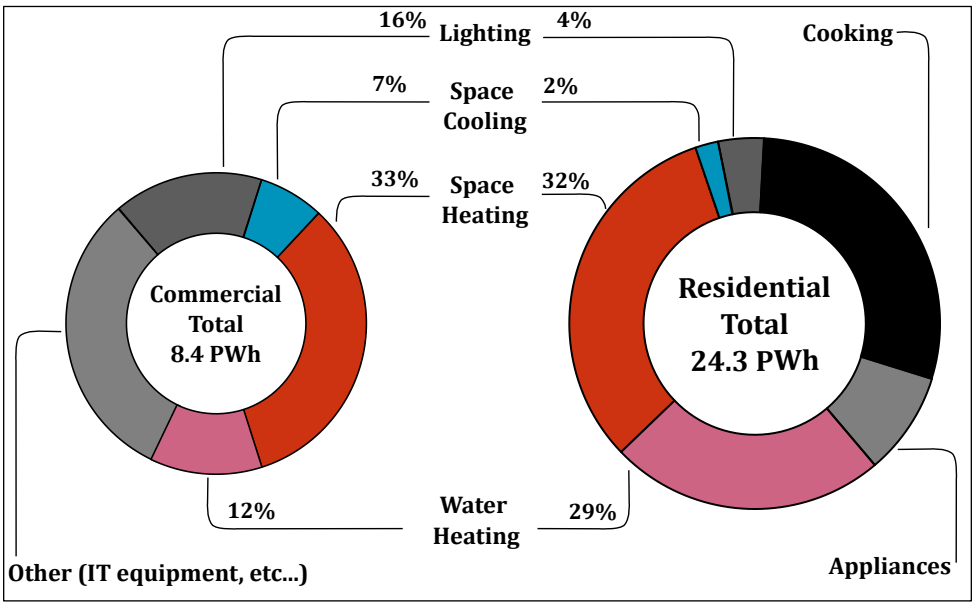


Figure 1.9 – Consommation finale d'énergie par secteur dans le bâtiment (IPCC 2014a)

En ajoutant la demande thermique en froid, la demande thermique totale d'un bâtiment tertiaire atteint à 52 % de la consommation énergétique. Les bâtiments résidentiels étant plus rarement climatisés, le pourcentage ne monte qu'à 63 % en ajoutant les consommations liées à la climatisation. Seule 25 % de l'énergie fournie pour satisfaire les besoins de chauffage est considérée comme renouvelable (REN21 2017). Parmi ces 25%, les deux tiers sont issus de la biomasse traditionnelle. Le tiers restant provient de sources d'énergie renouvelable dites modernes, à savoir sans classement d'importance le solaire thermique, le chauffage produit à partir d'électricité générée de manière renouvelable, la combustion moderne de bioénergie et enfin l'utilisation géothermique directe.

1.1.4 Stratégies d'adaptation et d'évolution pour lutter contre le changement climatique

Face aux enjeux posés par le changement climatique, il semble primordial d'adopter des stratégies visant à décarboner l'énergie utilisée par le secteur immobilier et notamment l'énergie consommée pour répondre aux besoins thermiques des bâtiments. Cela semble indispensable afin d'être en phase avec l'objectif de rester sous une augmentation de 2.0 °C de la température mondiale fixé lors de la COP21, ou pour aller plus loin, de rester sous les 1.5 °C préconisés par le GIEC en 2019.

Actuellement, l'énergie est 10 fois plus utilisée pour chauffer les bâtiments que pour les refroidir. En se projetant sur les bases d'un scénario médian, la demande de chauffage devrait, d'ici à 2100, diminuer d'environ 30% alors que la demande de refroidissement augmenterait de 70 % (Isaac et Vuuren 2008 ; REN21 2017). L'augmentation de la demande en froid aura pour conséquence une augmentation des consommations électriques. À l'échelle mondiale, la production d'électricité ayant un facteur d'émission plus important que les énergies fossiles, l'augmentation de la demande en froid se traduirait par une nette augmentation des émissions de GES (Isaac et Vuuren 2008).

En l'absence de stratégie d'adaptation face aux changements climatiques, les conséquences et les effets sur la société et l'environnement seront délétères. Ces stratégies doivent permettre de maximiser la durée de vie opérationnelle des bâtiments via des gestions, des maintenances et des exploitations adaptées au changement climatique tout en minimisant leur impact environnemental par l'atténuation de leurs émissions de GES (Grynning et al. 2017). Les stratégies adoptées seront forcément différentes selon les niveaux de développement et d'urbanisation des zones, des conditions climatiques et des infrastructures déjà en place (IPCC 2014a). L'un des leviers importants est de réduire et de décarboner l'énergie consommée par les systèmes de chauffage–ventilation–climatisation (CVC), principaux vecteurs de consommation d'énergie des bâtiments tertiaires et résidentiels (sous-section 1.1.3).
Dans l'hypothèse de pratiques et savoirs faire optimaux, en supposant une augmentation de 127 % de la surface bâtie d'ici à 2050, et un confort thermique optimal, la demande thermique mondiale pour le bâtiment pourrait être réduite d'un tiers par rapport à 2005 (Urge-Vorsatz et al. 2012). L'augmentation des coûts d'investissement serait largement compensée par la diminution de la demande en énergie.

Par ailleurs, des stratégies d'adaptation face à l'apparition de plus en plus fréquente d'événements climatiques extrêmes devront être adoptées. Avec une durée de vie variant en général entre 60 et 100 ans, l'impact du changement climatique futur doit être intégré dès la construction actuelle d'un nouveau bâtiment (Lisø 2006).

1.2 Le stockage d'énergie thermique : un moyen de décarboner le secteur énergétique en réduisant les coûts et la production d'énergie

1.2.1 Stockage d'énergie thermique (Thermal Energy Storage TES) : généralités

Sur Terre, de nombreuses sources d'énergies thermiques chaudes et froides sont disponibles. Que l'énergie soit naturelle et décarbonée ou provenant d'activité industrielle, elle peut être stockée de manière économiquement viable (Alva et al. 2017).
Les énergies solaire et éolienne sont aussi facilement exploitables, mais de manière intermittente, et leur intensité dépend des conditions climatiques. A contrario, l'énergie géothermique est disponible plus ou moins facilement tout au long de l'année. Elle peut venir en complément d'autres sources (centrales nucléaires, centrales de combustion de matières fossiles, centrales de biomasse) (Alva et al. 2017).
En parallèle, les surplus d'énergie produits par les activités industrielles représentent une source conséquente d'énergie disponible, mais bien souvent non valorisée. Plusieurs pays ont quantifié la quantité d'énergie dissipée dans l'environnement suite aux activités industrielles. À titre d'exemple, le Canada et la Turquie perdent respectivement l'équivalent de 26,4 % et 17,4 % de la consommation énergétique totale du pays via l'industrie (Miró et al. 2015).

Les systèmes de stockage dit Thermal Energy Storage (TES) permettent de stocker de l'énergie thermique chaude et/ou froide disponible (ou produite en excès) mais non utilisée à un temps t. L'énergie est utilisée ultérieurement lorsque la production est déficitaire (figure 1.10). Ce fonctionnement implique trois étapes différentes : la mise en charge du système, la période de stockage et enfin la décharge du système pour remobiliser l'énergie stockée (L. Cabeza et al. 2015).

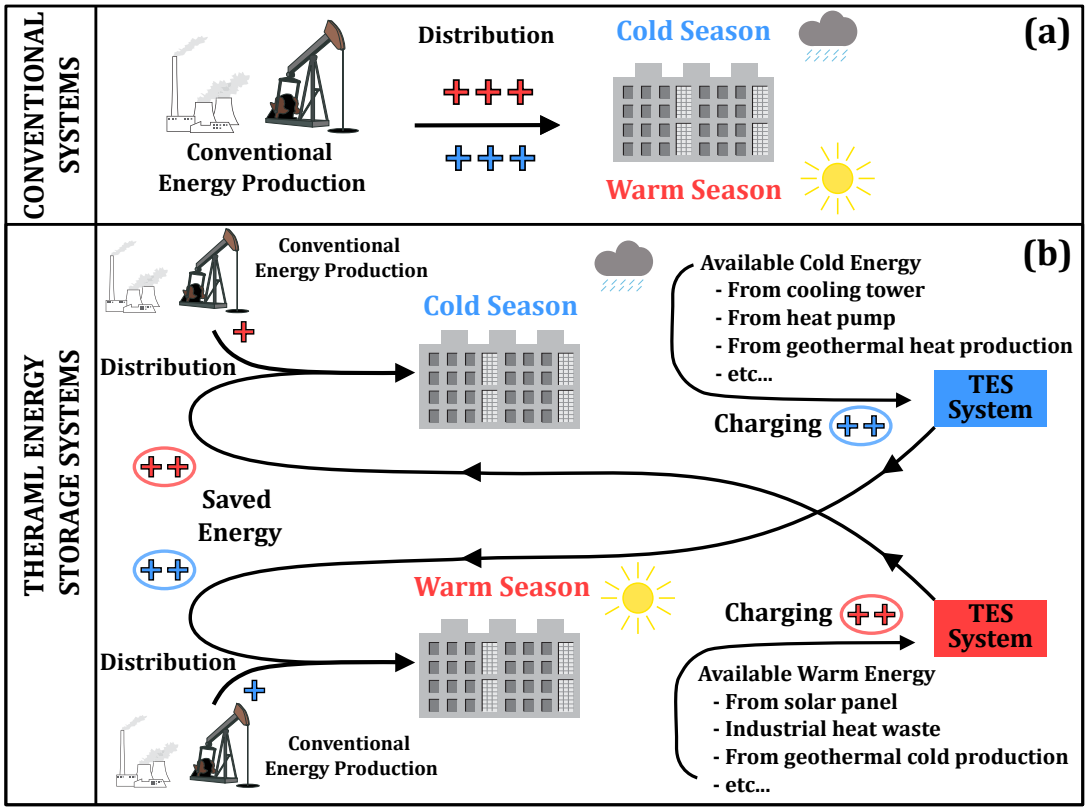


FIGURE 1.10 – Exemple de stockage d'énergie thermique appliqué à un bâtiment : (a) fonctionnement d'un système énergétique conventionnel et (b) fonctionnement d'un système énergétique muni d'un TES. Les croix bleues représentent la création de froid et les croix rouges de chaud

Le stockage d'énergie thermique est intéressant à plusieurs titres. L'utilisation de systèmes TES permet de :

- Satisfaire les déphasages éventuels entre phase de production énergétique et phase de consommation ;
- Préserver les autres sources d'énergie qui auraient été utilisées sans le stockage ;
- Augmenter le rendement et la fiabilité de certains systèmes de production (DINÇER et ROSEN 2010b) ;
- Réguler les périodes d'achat d'énergie primaire en fonction des cours du marché ;
- Optimiser la distribution géographique des points de production et de distribution (ALVA et al. 2017).

1.2.2 Principes physiques du stockage d'énergie thermique

Il existe deux processus majeurs de stockage d'énergie. Ils reposent sur deux phénomènes physiques différents : le stockage d'énergie latente et le stockage d'énergie sensible (L. Cabeza et al. 2015 ; Caliskan et al. 2012 ; Heier et al. 2015). Les spécificités des deux processus sont résumées ci-dessous :

Stockage de chaleur sensible (processus sensible)

L'accumulation de calories ou de frigories dans un matériau entraînant une augmentation de sa température sans engendrer de changement de phase est appelée stockage d'énergie sensible (Caliskan et al. 2012). La quantité d'énergie stockée $Q_{sensible}$ (J) est définie par :

$$Q_{sensible} = mc_p\Delta T \tag{1.2}$$

où m est la masse du matériau (kg), c_p la capacité thermique massique du matériau ($\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$) et ΔT la variation de température (K).

Pour un stockage efficace et économiquement intéressant, Il est préconisé que le matériau de stockage ait une chaleur spécifique élevée, une conductivité thermique supérieure à $0.3\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$, un prix relativement faible et qu'il soit stable chimiquement (G. Li 2015). Ainsi, l'eau est adaptée au stockage, car sa chaleur spécifique est relativement élevée comparée à d'autres matériaux (tableau 1.2).

Matériau	$\boldsymbol{\lambda}$ ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$)	$\boldsymbol{c_p}$ ($\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$)
Eau	0.65	4200
Air	0.02	1000
Bois	0.2	2300
PVC	0.6	1500
Béton	0.6	650
Verre	1.2	800

Table 1.2 – Propriétés thermiques de matériaux courants

C'est un matériau intéressant, car il circule facilement, ce qui permet de l'utiliser en tant que moyen de stockage et/ou de fluide de transfert de chaleur. L'eau présente d'autres avantages, à savoir son faible coût, sa non-toxicité et sa

relative disponibilité (Alva et al. 2017). Néanmoins, contrairement à du stockage dans des matières solides (roche, métal, béton), des problèmes de fuites et de contaminations peuvent apparaître. Il est aussi plus aisé de stocker de l'énergie générant des températures élevées dans les matériaux solides (G. Li 2015).

Stockage de chaleur latente (processus latent)

Le processus latent consiste à stocker/récupérer l'énergie lors du changement de phase d'un matériau. Les matériaux utilisés pour stocker sont dits à changement de phase (*Phase Change Material* ou PCM). La transition liquide $\leftrightarrow$ gaz a la chaleur latente la plus élevée, néanmoins elle reste peu utilisée en raison des variations de volume trop importantes (Alva et al. 2017). Le changement solide $\leftrightarrow$ liquide opéré via la fusion et la solidification est le plus utilisé (L. Cabeza et al. 2015).

La quantité d'énergie stockée est :

$$Q_{latent} = m\Delta h \tag{1.3}$$

où m est la masse du matériau (kg) et Δh l'enthalpie de changement de phase ($\mathrm{J\,kg^{-1}}$).

La chaleur latente stockée lors de la solidification d'un matériau peut être récupérée quand il fusionne. Cette méthode a l'avantage de fournir une densité énergétique élevée à température constante (G. Li 2015). La capacité calorifique des matériaux PCM utilisés pour le processus latent est 50 à 100 fois supérieure à celle des matériaux utilisés pour le processus sensible. La densité de stockage d'énergie est donc bien plus importante pour le processus latent (Alva et al. 2017).

Toutefois, les PCM sont inflammables, corrosifs et possèdent une faible conductivité thermique (G. Li 2015). Ils restent difficiles à intégrer dans les schémas de construction classiques. Enfin, le coût de revient du processus latent n'est pas compétitif par rapport aux techniques utilisant le processus sensible. Les techniques de stockage utilisant le processus latent nécessitent encore des développements et de la recherche (Alva et al. 2017 ; Heier et al. 2015).

1.3 Applications des TES dans le bâtiment : méthodes et bénéfices

1.3.1 Le bâtiment : une structure adaptée pour le stockage d'énergie thermique

La demande thermique d'un bâtiment résidentiel, commercial, ou industriel peut varier de manière quotidienne, mensuelle ou encore saisonnière (Dinçer et Rosen 2010b). Dans les zones à climat tempéré, les bâtiments font face à un décalage saisonnier entre la demande et la disponibilité d'énergie thermique. Les structures requièrent un besoin de chauffage en hiver alors que la disponibilité de chaleur est réduite à cette période. Durant les saisons estivales, les bâtiments sont confrontés à des températures plus élevées, entraînant un besoin de rafraîchissement. Face à ce constat, le stockage d'énergie disponible et non utilisée à une certaine période de l'année doit être considéré comme un enjeu crucial pour le secteur énergétique du bâtiment. Les TES ont un potentiel non négligeable pour économiser la production d'énergie visant à satisfaire la demande thermique d'un bâtiment, tout en réduisant les émissions de GES. En Europe, l'utilisation des TES dans le secteur du bâtiment et de l'industrie permettrait de réduire les émissions de GES de 5,5 % par rapport aux émissions totales de 2005 sur le continent (Arce et al. 2011). Ce résultat se base sur l'hypothèse d'un développement relativement lent mais réaliste de ces technologies.

1.3.2 Les techniques TES appliquées aux bâtiments

Il existe deux grands principes de stockage d'énergie pour satisfaire les besoins thermiques des bâtiments : le stockage actif et le stockage passif. Dans les deux cas, les processus sensible et latent sont utilisables.

Pour le principe passif, le seul vecteur de mise en charge et de décharge du système est la différence de température qu'il existe entre le matériel stockant et son environnement. Cette technique repose principalement sur la quantité de masse thermique à l'intérieur des parois du bâtiment. La masse thermique regroupe de lourds matériaux sombres capables d'absorber, stocker et de relâcher l'énergie à l'intérieur du bâtiment avec un certain déphasage. On parle alors d'inertie thermique du bâtiment. Ce procédé permet d'améliorer le confort thermique du bâtiment et de réduire considérablement les pics de demande énergétique. Toutefois, la consommation totale d'énergie ne diminue que très légèrement (Verbeke

et Audenaert 2018).

Le principe actif est basé sur des technologies utilisant des pompes ou des ventilateurs pour stocker/déstocker et distribuer l'énergie (Heier et al. 2015). De multiples procédés et systèmes actifs peuvent être appliqués dans un bâtiment (figure 1.11).

Ces procédés sont classés en trois catégories en fonction de la localisation du lieu de stockage thermique (Heier et al. 2015) :

- À proximité immédiate du bâtiment ;
- Dans la structure du bâtiment (mur, plancher, plafond) ;
- Directement dans le système de production/distribution d'énergie.

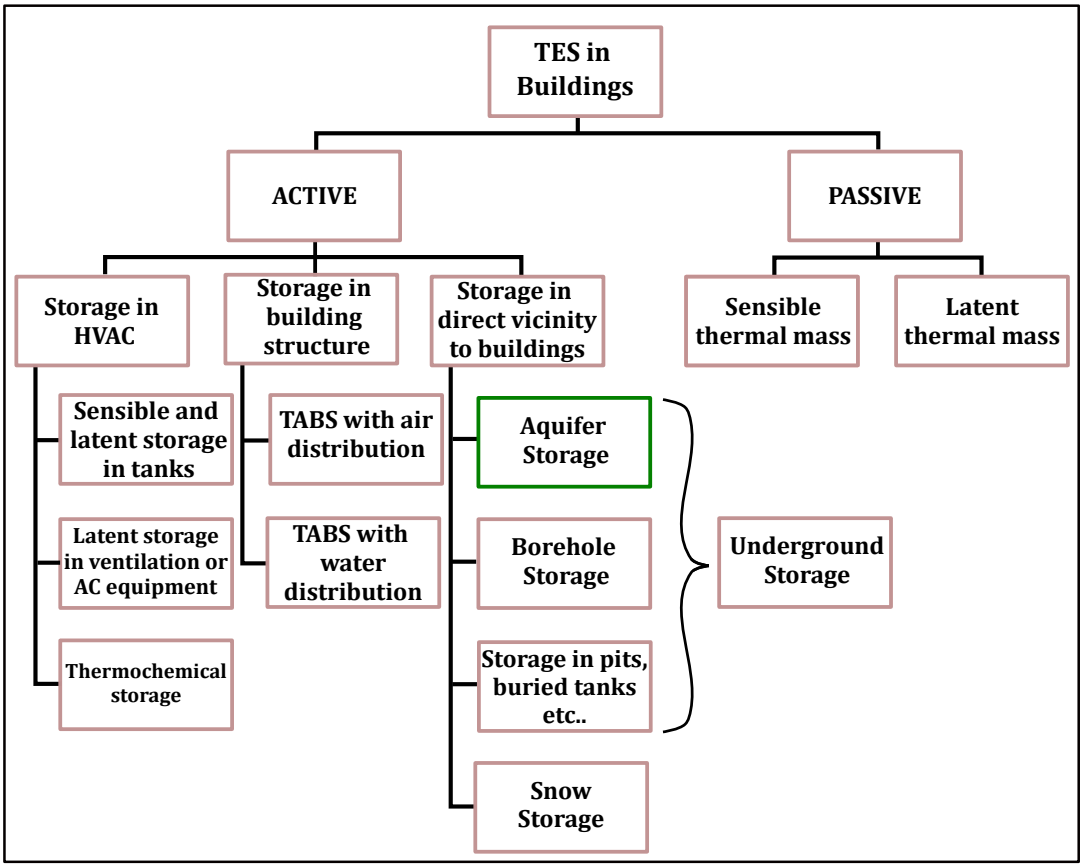


Figure 1.11 – Principes et vecteurs utilisés par les différentes techniques de stockage d'énergie thermique appliquées aux bâtiments (adapté de Heier et al. 2015). TABS = Bâtiment actif thermiquement (*i.e.* distribution de l'énergie par voie aérienne ou par circulation d'eau), HVAC = Système de chauffage, ventilation, climatisation

Si le processus latent (actif et passif) est prometteur dans le secteur du bâtiment, en particulier pour les besoins de climatisation (Faraj et al. 2020 ; Heier et al. 2015), les PCM actuels ne sont pas optimaux pour être utilisés dans des bâtiments en raison de leur faible chaleur latente dans les gammes de températures de confort des bâtiments (Heier et al. 2015). Par ailleurs, lorsqu'ils sont utilisés

pour rafraîchir un bâtiment, les PCM rencontrent des problèmes de solidification incomplète lors de la nuit (Faraj et al. 2020).
De fait, les techniques de stockage les plus répandues à ce jour utilisent le processus sensible.

1.3.3 Choix d'une filière de stockage thermique

Le choix de la méthode appropriée pour un stockage d'énergie thermique dépend de plusieurs facteurs techniques (L. Cabeza et al. 2015 ; Dinçer et Rosen 2010b ; Fleuchaus et al. 2018) parmi lesquels on note :

- Le temps de stockage requis ;
- La capacité de stockage ;
- La disponibilité du matériau vecteur ;
- L'espace disponible et la taille du système ;
- L'efficacité et le rendement ;
- La durée de vie ;
- Les températures à fournir lors de la restitution de l'énergie.

Outre ces facteurs, il est important de prendre en compte les critères économiques et les réductions de consommation énergétique potentiellement atteignables. L'utilisation d'un TES est justifiée économiquement lorsque les coûts d'investissement et de fonctionnement annualisés sont inférieurs à ceux requis pour la production d'une même quantité d'énergie primaire, à l'aide d'une autre solution. Le temps de retour sur investissement est le facteur qui est souvent utilisé pour évaluer la viabilité économique d'un TES (Dinçer et Rosen 2010b ; Schüppler et al. 2019 ; Vanhoudt et al. 2011). Ce concept peut être défini comme le nombre d'années nécessaires pour récupérer, au cours de sa durée de vie, l'énergie et les coûts qui ont servi à fabriquer le système ou le produit.

La filière TES retenue va dépendre de la typologie du bâtiment et de son utilisation. Les bâtiments commerciaux sont beaucoup plus occupés en journée. Cette occupation peut être conséquente et générer d'importants besoins énergétiques pour maintenir un confort thermique et une bonne qualité de l'air intérieur. Ces demandes peuvent être en partie soulagées par des gains importants de chaleur dus à l'éclairage et aux équipements électriques. En parallèle, ces structures nécessitent une production de froid une grande partie de l'année, même dans les climats froids (ASHRAE 2021 ; Heier et al. 2015). En période estivale, s'ajoutent les demandes en rafraîchissement qui peuvent devenir considérables.
Pour les bâtiments résidentiels, les gains d'énergie par les équipements et l'éclairage sont négligeables et les pics de demandes énergétiques interviennent princi-

palement en début et en fin de journée. En climat tempéré, les besoins des bâtiments résidentiels sont attribués au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire (Heier et al. 2015).

Les techniques de stockage les plus adaptées en fonction du type de bâtiment sont résumées ci-dessous.

Bâtiments résidentiels : Pour ce type de bâtiment, la technique de stockage la plus répandue est le processus sensible actif qui vise à stocker de la chaleur directement dans un composant du système de distribution de l'énergie. Pour ce faire, l'intégration de réservoirs/ballon d'eau est extrêmement répandue dans les habitations. C'est un équipement facilement accessible techniquement, économiquement et non toxique. Il sert à stocker de l'eau chaude pour la production d'eau domestique et/ou peut être intégrée dans des systèmes de chauffage plus complexes basés sur le stockage de l'énergie solaire. Cette énergie n'est généralement pas disponible lors des pics de demande (le matin et le soir). Son stockage prend alors tout son sens (Heier et al. 2015).

Les ballons d'eau et les circuits de distribution associés peuvent être sujet à des pertes thermiques importantes. L'utilisation du processus latent dans des ballons de stockage peut s'avérer prometteur dans certains contextes. A l'heure actuelle, il n'est pas établi que de tels systèmes soient performants sur le long terme (Talmatsky et Kribus 2008) et nécessitent encore un effort de recherche et développement (Seddegh et al. 2015).
Pour les périodes estivales, en l'absence de climatisation, le recours à des parois faites de masses thermiques importantes permet d'améliorer considérablement le confort intérieur d'une maison individuelle (Heier et al. 2015).
Dans une maison individuelle, l'espace disponible et les problèmes techniques complexes pouvant intervenir sont les critères limitant l'installation d'un TES. Face à ce problème, il peut s'avérer pertinent de mutualiser les demandes d'un quartier en développant des réseaux de chaleur et de froid. Ces réseaux peuvent être approvisionnés par de l'énergie thermique provenant de TES avec des capacités de stockages et de production conséquentes (Karasu et Dincer 2020 ; Raluy et al. 2014 ; Welsch et al. 2018).

Bâtiments commerciaux : En journée, afin de garantir des conditions de travail optimales, les températures intérieures sont soumises à une régulation assez stricte. En dehors des heures d'occupation, il est possible de désactiver ou diminuer l'intensité de la production d'énergie. Ces fonctionnements induisent de larges variations de demande thermique entre le jour et la nuit, qui sont pro-

pices à l'utilisation de stockage thermique sur des courtes durées. L'utilisation du stockage latent durant la nuit pour refroidir le bâtiment en journée présente un potentiel plus important dans les bâtiments commerciaux que dans les bâtiments résidentiels. Cependant, des problèmes de solidifications du PCM peuvent être rencontrés si la température ne descend pas assez bas la nuit.
Dans les édifices de grande superficie, comme les établissements scolaires ou les bâtiments commerciaux, qui ne sont pas habituellement équipés de système de climatisation, les méthodes passives pour réduire les pics de consommation, ou le rafraîchissement la nuit par un processus latent peuvent être utilisées.
La technique de stockage sensible reste toutefois la plus développée pour les bâtiments commerciaux. Le stockage en aquifère sur sondes (BTES) ou via des forages (ATES) est particulièrement adapté pour satisfaire ces demandes thermiques conséquentes (Fleuchaus et al. 2019 ; Heier et al. 2015 ; Schüppler et al. 2019).

Les systèmes ATES et BTES sont utilisés pour stocker/fournir de l'énergie froide et chaude dans le sous-sol et sont donc particulièrement adaptés pour répondre au décalage saisonnier entre la disponibilité d'une énergie et son utilisation. Dans les endroits sur Terre où la neige est disponible facilement en hiver, son stockage et son utilisation pour rafraîchir les bâtiments est une technique prometteuse, particulièrement pour des bâtiments comme les hôpitaux ayant une demande conséquente supérieure au MWh an^{-1} (Skogsberg 2002). Toutefois, son stockage peut nécessiter un espace disponible conséquent à proximité du bâtiment.

1.3.4 Avantages de la solution TES pour les bâtiments

Les études concernant les bâtiments résidentiels se confrontent aux difficultés d'acquérir des données directement chez l'habitant. Par conséquent, bon nombre d'études de performance (énergétique, environnementale et financière) des TES se basent uniquement sur des modélisations. Il existe un réel besoin de monitoring du fonctionnement des TES dans les maisons individuelles pour connaître leur efficacité réelle et leurs éventuels avantages par rapport aux systèmes conventionnels (Heier et al. 2015). La collecte de données est plus facile à mettre en œuvre à l'échelle d'un réseau de chaleur dont la régulation et le suivi sont souvent assurées par un industriel ou une collectivité. Il est toutefois rare d'obtenir des données réelles et facilement comparables sur les bénéfices économiques et environnementaux des TES appliqués aux bâtiments. Selon une récente étude bibliométrique, l'analyse et le détail des bénéfices économiques et environnemen-

taux des TES appliqués au bâtiment apparaît comme une réelle lacune dans la littérature scientifique (Borri et al. 2021). Il existe cependant des références sur le sujet dont certaines sont listées dans le tableau 1.3.

Étude	**Lieu**	**Système de référence**	**Type d'étude**	**Réduction CO_2**	**Bénéfice économique**
(Karasu et Dincer 2020)	Canada	Zone pavillonnaire alimenté par un BTES stockant de l'énergie solaire	Cas réel	4.5 t CO_2 par an par maison	?
(Worthington 2011)	Pays-Bas	Campus universitaire alimenté par un ATES	Cas réel	13300t CO_2 par an	Retour sur investissement 6 à 10 ans
(Colclough et McGrath 2015)	Canada	Maison équipé d'un système de chauffage et ECS de type un réservoir d'eau alimenté par des panneaux solaire	Cas réel	Réduction de 75% des émissions de CO_2 par rapport à un fontionnement tout électrique	?
(L. F. Cabeza et al. 2015)	-	Intégration PCM dans les parois de maison individuelle	Modélisation	0.5 à 1.3 t CO_2 par an par maison selon l'endroit sur Terre	?
(Schüppler et al. 2019)	Allemagne	Hôpital alimenté par un ATES	Modélisatior	600 t CO_2 par an	Retour sur investissement 3 ans

Table 1.3 – Résumé des bénéfices économiques et environnementaux de l'application du système TES aux bâtiments

1.4 Conclusion

Ce chapitre introductif permet de mettre en évidence la part importante d'émissions de GES générée à l'échelle mondiale par les bâtiments. Près de la moitié de la consommation énergétique des bâtiments provient des besoins pour satisfaire le confort thermique de l'espace intérieur. Afin d'atteindre les objectifs de diminution des émissions de GES à l'échelle mondiale fixés par le GIEC, il existe un réel besoin de décarbonner le secteur énergétique du bâtiment.
Dans cette optique, les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) appliqués aux bâtiments présentent un potentiel réel pour réduire les émissions de GES. L'utilisation de techniques de stockages sensibles est à ce jour la plus répandue pour stocker et fournir de l'énergie thermique au bâtiment. Toutefois, chaque bâtiment requiert des besoins spécifiques. La prise en compte de cet aspect stockage dès le début du dimensionnement d'un bâtiment apparaît comme un enjeu crucial pour envisager toutes les possibilités et éviter des dysfonctionnements du bâtiment.

CHAPITRE 2

Les systèmes de stockage d'énergie thermique dans les aquifères : fonctionnement, pertinence, potentiels et verrous

2.1 Le système ATES : fonctionnement et performance énergétique

2.1.1 Spécificités techniques du système ATES

Le système de Stockage d'Énergie Thermique dans les Aquifères (Aquifer Thermal Energy Storage : ATES), est une technique de stockage de la famille des *Underground Thermal Energy Storage* (UTES). C'est une méthode qui utilise l'eau souterraine et le milieu poreux pour emmagasiner de l'énergie thermique à l'intérieur d'un aquifère, mais aussi pour l'en extraire et l'utiliser. Cette énergie est stockée en partie dans l'eau elle-même et aussi dans la matrice (grains/roches) qui forme l'aquifère (Andersson 2007).

Le système ATES fonctionne en boucle ouverte (*open loop*) de manière saisonnière, et permet de capturer aussi bien du chaud que du froid dans l'aquifère via deux groupes de forages distincts (chaque groupe est constitué d'un forage au minimum). Le mode de fonctionnement des forages est réversible (figure 2.1). Ils servent à la fois à pomper et à réinjecter de l'eau froide ou chaude dans l'aquifère (Andersson 2007).

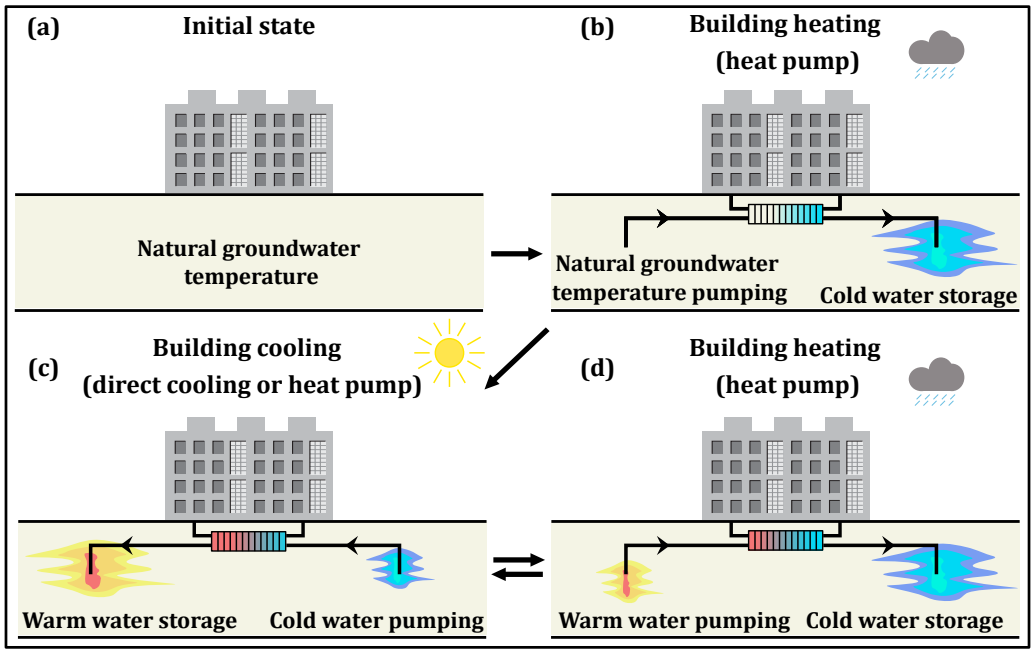


Figure 2.1 – Fonctionnement d'un ATES réversible : (a) état initial du bâtiment et de l'aquifère pré-production, (b) premier cycle de chauffage utilisant l'eau de l'aquifère et stockage de l'eau refroidie dans une bulle d'eau froide, (c) premier cycle de refroidissement utilisant l'eau froide et stockage d'une bulle chaude et (d) deuxième cycle de chauffage utilisant l'eau chaude stockée

Lorsqu'un ATES est initialisé en période climatique froide, l'eau de l'aquifère à température naturelle de gisement est pompée par le forage de production (**puits chaud**). Elle passe par un échangeur thermique pour fournir les calories de chauffage au système énergétique du bâtiment. Une pompe à chaleur est éventuellement utilisée pour atteindre les températures nécessaires si la température de l'aquifère est insuffisante. Après échange thermique, l'eau refroidie est réinjectée dans l'aquifère via le forage de réinjection (**puits froid**) (figure 2.1b).
À la saison chaude, le mode de fonctionnement des deux forages est inversé. L'eau froide préalablement stockée est pompée au **puits froid** et fournit ses frigories au bâtiment via l'échangeur thermique (figure 2.1c). Le passage dans l'échangeur thermique réchauffe l'eau qui est ensuite réinjectée dans le **puits chaud**. Le bâtiment peut être refroidi par utilisation directe des frigories dans le système énergétique du bâtiment ("geocooling"), ce qui permet de faire des économies d'énergie significatives (Vanhoudt et al. 2011). Dans le cas de fortes demandes en froid il est possible d'utiliser la pompe à chaleur pour atteindre les températures de rafraîchissement souhaitées.
Le cycle suivant de chauffage peut donc utiliser la bulle chaude générée lors de la saison précédente (figure 2.1d). Ce fonctionnement permet un stockage saisonnier et réversible d'énergie thermique chaude et froide (Nordell et al. 2015).

Le débit de pompage Q nécessaire au niveau de chaque ouvrage pour satisfaire la puissance thermique du bâtiment s'obtient par la formule suivante :

$$Q = \frac{P_{geo}}{\Delta T c_{eau} \rho_{eau}} \tag{2.1}$$

avec ΔT la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur thermique (K), $c_{eau}\rho_{eau}$ la capacité calorifique volumique de l'eau ($\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$) et P_{geo} l'énergie géothermale requise (J). Dans la suite du manuscrit, les paramètres utilisé dans cette formule seront exprimés en unité conventionnelle à savoir :

- ΔT en°C ;
- P_{geo} en kW ;
- $c_{eau}\rho_{eau}$ en kWh $\mathrm{m^{-3}}$ $\mathrm{K^{-1}}$
- Q en $\mathrm{m^3\,h^{-1}}$

La puissance géothermique dépend de la puissance requise par le bâtiment P_{bat} (kW) et du mode de fonctionnement de l'ATES. Les débits de pompage selon le mode de fonctionnement de l'ATES sont résumés dans le tableau 2.1.

Mode de fonctionnement	**Puissance géothermique**	**Débit**
Production de chaud sur PAC	$P_{bat}^{chaud}(1-\frac{1}{COP})$	$Q_c = \frac{P_m(1-\frac{1}{COP})}{\Delta T c_{eau}\rho_{eau}}$
Production de froid sur PAC	$P_{bat}^{froid}(1+\frac{1}{ERR})$	$Q_f = \frac{P_m(1+\frac{1}{ERR})}{\Delta T c_{eau}\rho_{eau}}$
Production de froid par géocooling	P_{bat}^{froid}	$Q_g = \frac{P_{bat}}{\Delta T c_{eau}\rho_{eau}}$

TABLE 2.1 – Puissance géothermique et débit associé nécessaire pour satisfaire la demande thermique du bâtiment en fonction du mode de fonctionnement de l'ATES (COP et ERR correspondent au coefficient de performance de la pompe à chaleur respectivement en mode chaud et en mode froid)

Il existe deux catégories d'ATES, en fonction de leur température de prélèvement dans le milieu souterrain :

- ATES haute température (H-ATES) qui stockent de l'eau à une température $> 25.0\,°C$;
- ATES basse température (L-ATES) qui stockent de l'eau à une température $< 25.0\,°C$.

À l'échelle mondiale, il existe environ 3000 ATES, fournissant plus de 2.5 TWh de puissance "chaude" et "froide" par an (FLEUCHAUS et al. 2018). Parmi ces systèmes, 99 % sont des L-ATES dont plus de 85 % se situent aux Pays-Bas. Dans les régions tempérées, le L-ATES est particulièrement bien adapté pour combler le décalage saisonnier existant entre la demande thermique d'un bâtiment et la disponibilité de l'énergie (SCHÜPPLER et al. 2019). Dans la suite de ce mémoire, seuls les systèmes L-ATES seront envisagés.

2.1.2 Résumé des transferts thermiques dans le sous-sol appliqués aux ATES

L'exploitation d'un aquifère par un système L-ATES est basé sur deux mécanismes de transfert d'énergie dans le sous-sol, à savoir la conduction et l'advection (figure 2.2). La conduction, ou diffusion thermique, correspond au transport d'énergie le long d'un gradient thermique sans déplacement de matière. L'énergie est transportée au sein d'un milieu par l'agitation moléculaire transmise de proche en proche et se fait dans la direction des zones chaudes vers les zones froides. Ce flux conductif j ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) s'exprime par la loi de Fourier :

$$j = -\lambda \overrightarrow{gradT} \tag{2.2}$$

où λ représente la conductivité thermique ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) du milieu traversé par le flux et $\overrightarrow{gradT}$ le gradient de température ($\mathrm{K\,m^{-1}}$). La conduction se fait aussi bien dans la phase solide que dans la phase liquide de l'aquifère.

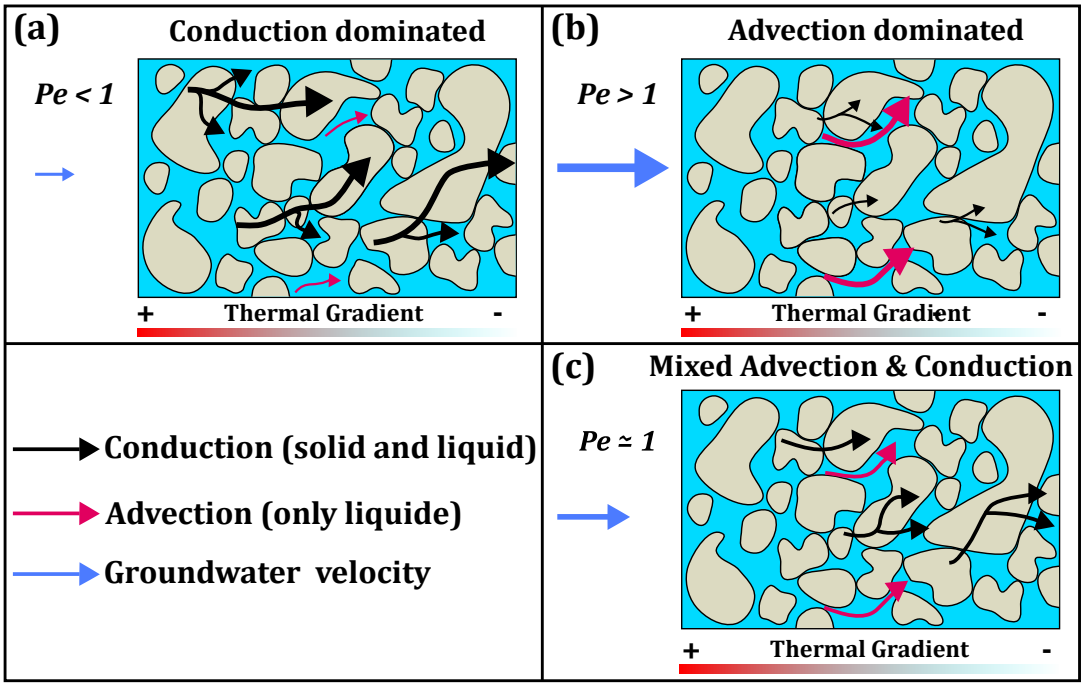


FIGURE 2.2 – Mécanismes de transfert d'énergie en milieu poreux en fonction du nombre de Peclet thermique (Pe) : (a) transfert d'énergie principalement dominé par la conduction dans la matrice poreuse et le fluide, (b) transfert d'énergie principalement dominé par l'advection en lien avec une vitesse d'écoulement souterrain élevée (c) équilibre entre le transport advectif et conductif

Le deuxième type de transfert thermique est l'advection. Ce phénomène correspond au transport d'énergie par le mouvement de l'eau, dans les pores ou fractures du milieu. Ce transport se fait via les différents chemins disponibles dans le milieu poreux générant de l'advection différentielle aussi bien à l'échelle microscopique que dans les structures macroscopiques (MOLINA-GIRALDO et al. 2011). Ces processus de transports différentiels induits par l'hétérogénéité et la tortuosité à l'échelle de l'aquifère constituent le phénomène de dispersion thermique.

Afin d'estimer la prédominance d'un mécanisme de transfert par rapport à l'autre, le nombre de Péclet (Pe) est utilisé. Si $Pe > 1$, l'énergie est principalement transportée par advection et inversement. Il est défini par le rapport entre le transfert thermique par advection et le transfert thermique par conduction :

$$Pe = \frac{v \rho_{eau} c_{eau} d}{\lambda_{bulk}} \tag{2.3}$$

avec v la vitesse d'écoulement de l'eau ($\mathrm{m\,s^{-1}}$), d la longueur caractéristique souvent associée à la taille médiane des grains de l'aquifère (m), $\rho_{eau} c_{eau}$ la capacité volumétrique de l'eau ($\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$) et λ_{bulk} la conductivité thermique de l'aquifère ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$). La conductivité thermique de l'aquifère peut être exprimée par (Dassargues 2018 ; Previati et al. 2022) :

$$\lambda_{bulk} = \lambda_s^{(1-n)} \times \lambda_w^n \tag{2.4}$$

avec n la porosité de l'aquifère, λ_s et λ_w les conductivités thermiques respectives de la matrice solide et de l'eau ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$).

2.1.3 Les indicateurs de performances des systèmes ATES

La performance d'un ATES s'estime à travers la faculté du système à stocker et récupérer de l'énergie dans la nappe ; mais aussi par la quantité d'énergie électrique qu'il consomme pour restituer la demande thermique au bâtiment.

Performance du stockage dans l'aquifère : il existe plusieurs indicateurs permettant chacun de tirer une information spécifique liée au fonctionnement de stockage/récupération énergétique de l'ATES dans l'aquifère (Bloemendal et Hartog 2018 ; Fleuchaus et al. 2019 ; Sommer et al. 2013) :

- L'efficacité de récupération η_E mesure les pertes thermiques durant la période de stockage :

$$\eta_E(t_0 \to t) = \frac{\int_{t_0}^{t} Q_{pomp} \cdot (T_{pomp} - T_{amb}) \cdot dt}{\int_{t_0}^{t} Q_{inj} \cdot (T_{inj} - T_{amb}) \cdot dt} \tag{2.5}$$

  avec T_{pomp}, T_{inj}, T_{amb} les températures respectivement de pompage, d'injection et ambiante de l'aquifère, et Q_{pomp}, Q_{inj} les débits d'extraction et d'injection.

- Le taux de récupération η_R donne une information sur la quantité d'énergie qui est récupérée après une période de stockage. C'est le rapport entre l'énergie extraite E_{pomp} et l'énergie injectée E_{inj} :

$$\eta_R(t_0 \to t) = \frac{E_{pomp}}{E_{inj}} = \frac{\int_{t_0}^{t} \Delta T_{pomp} \cdot Q_{pomp} \cdot dt}{\int_{t_0}^{t} \Delta T_{inj} \cdot Q_{inj} \cdot dt} \tag{2.6}$$

avec ΔT_{pomp} et ΔT_{inj} les différences de température sur une période donnée pour les volumes respectivement extraits et injectés ;

- La balance thermique E permet de savoir si un système ATES est à l'équilibre saisonnier, c'est à dire s'il stocke et exploite autant de froid que de chaud. Ce paramètre s'exprime par :

$$E = \frac{E_{inj}(froid) - E_{inj}(chaud)}{E_{inj}(froid) + E_{inj}(chaud)} \tag{2.7}$$

Les températures d'extraction et d'injection qui sont mesurées avant et après l'échangeur thermique fournissent plusieurs informations :

- ΔT_{out} traduit l'énergie transférée de l'aquifère vers le bâtiment :

$$\Delta T_{out} = T_{pomp} - T_{inj} \tag{2.8}$$

Cette valeur doit être la plus élevée possible ;

- ΔT_{rec} mesure les pertes d'énergie durant la période de stockage à un même forage :

$$\Delta T_{rec} = T_{inj} - T_{pomp} \tag{2.9}$$

Cette valeur doit être la plus faible possible ;

- ΔT_{tot} correspond à la différence de température entre le puits chaud et le puits froid.

$$\Delta T_{tot} = T_{chaud} - T_{froid} \tag{2.10}$$

Cette température doit être la plus élevée possible.

Performance de rendement énergétique du système : la performance d'un système ATES peut s'estimer de manière plus générale en se focalisant sur le rendement énergétique du système entier. Pour ce faire, il est d'usage de comparer la consommation électrique de tous les équipements du système (pompes des forages, pompes de circulation, pompe à chaleur, unité de gestion automatique du système etc...) avec l'énergie thermique restituée au bâtiment. Cette estimation se fait par le calcul du facteur de performance saisonnière (SPF) et s'exprime comme suit :

$$SPF = \frac{E_R}{E_C} \tag{2.11}$$

avec E_R et E_C respectivement l'énergie globalement restituée et consommée par le système. Plus le SPF est élevé, plus la performance globale du système est bonne. Dans le cas où l'ATES fonctionne en mode géocooling, le SPF en période

estivale peut atteindre des valeurs très élevées aux alentours de 25, car seuls des équipements "peu" énergivores fonctionnent (pompes des forages et de circulation dans le bâtiment). Lorsque l'ATES utilise en plus une pompe à chaleur pour atteindre les températures requises pour chauffer ou refroidir le bâtiment, le SPF est plus faible et dépend grandement de la valeur du coefficient de performance de la pompe à chaleur (COP). Le COP s'exprime de la manière suivante :

$$COP = \frac{e_r}{e_c} \tag{2.12}$$

Avec e_r et e_c l'énergie respectivement restituée et consommée par la pompe à chaleur. Plus le COP est élevé plus la pompe à chaleur possède une bonne performance.

2.1.4 Stratégie d'implantation pour l'optimisation de la performance du dispositif

Dans les vingts premiers mètres du sous-sol, la température de l'eau fluctue de manière saisonnière et dépend de la température de l'air ambiant (Taylor et Stefan 2009). En dessous de cette profondeur, la température augmente en suivant le gradient géothermique local (en moyenne 2.8 °C par 100 m en France métropolitaine). Afin de garantir une certaine stabilité du système et une fiabilité de la source d'énergie, il est souhaitable d'exploiter l'aquifère en dessous de cette zone d'hétérothermie (Lee 2013). Plus de détails sur ce point sont fournis dans le chapitre 4.

Afin que le rendement et l'efficacité du système restent optimaux, il faut veiller à éviter les interférences entre les fronts thermiques chauds et froids qui se développent autour des groupes de forages. Il est commun d'espacer les ouvrages chauds et froids d'une distance proche de 3 rayons thermiques. Le rayon thermique (R_{th}) est défini par (Bloemendal et Hartog 2018) :

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w \rho_w V_{inj}}{c_{bulk} \rho_{bulk} \pi L}} \tag{2.13}$$

avec V_{inj} le volume d'eau injecté dans l'aquifère durant un cycle de fonctionnement (m^3), L la hauteur crépinée du forage (m), $c_w \rho_w$ et $c_{bulk} \rho_{bulk}$ respectivement la capacité thermique volumique de l'eau et de l'aquifère ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$). Ce dernier paramètre dépend de la porosité de l'aquifère et s'exprime par (Bloemendal et Hartog 2018 ; Dassargues 2018) :

$$c_{bulk}\rho_{bulk} = n \times c_w\rho_w + (1-n) \times c_s\rho_s \tag{2.14}$$

avec n la porosité de l'aquifère et $c_s\rho_s$ la capacité thermique volumique de la matrice solide de l'aquifère.
Augmenter la taille de la hauteur crépinée L permet de diminuer R_{th} et donc l'empreinte thermique d'un ouvrage. Les risques d'interférence seront alors limités. Cela permet d'implanter plus d'ouvrages sur une même zone et donc d'exploiter et de stocker plus d'énergie thermique (Bloemendal et al. 2018).
Le dimensionnement des puits est important pour le fonctionnement de l'ATES. La longueur de la zone crépinée a une influence sur les pertes d'énergie par conduction et dispersion aux extrémités des bulles thermiques. Une hauteur crépinée adéquate permet d'atteindre un optimum de performance. Dans un contexte conductif pur, la longueur adéquate de crépine est obtenue lorsque le ratio L/R_{th} est compris entre 0.5 et 3. Ce ratio diminue lorsque des phénomènes d'advection rentrent en compte. Par exemple, pour une vitesse naturelle d'écoulement de $40\,\mathrm{m\,an^{-1}}$ ($1.3\times10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$), le ratio optimal se situe entre 0.25 et 0.75 (Bloemendal et Hartog 2018).

Malgré ces deux règles, la taille des crépines est souvent sous-dimensionnée. En pratique, la hauteur crépinée est déterminée par le débit maximum de pompage requis et les coûts des travaux de forage. Ce sous dimensionnement entraîne le développement de fronts thermiques trop larges et une diminution de la performance des ATES (Bloemendal et Hartog 2018 ; Bloemendal et al. 2018).

Pour des systèmes de tailles importantes comprenant plusieurs forages, on assiste à un changement de paradigme. En adoptant des gestions optimales basées sur l'échange d'informations entre les différents groupes de forages ou systèmes ATES, il est possible d'augmenter la densité de forage sur une même zone tout en limitant les interactions thermiques. Pour une zone soumise à ce type de gestion, cela permet de stocker et d'exploiter des quantités d'énergie supérieures à une zone équivalente respectant le principe d'espacement du R_{th}. Il en résulte une diminution d'émission de GES pouvant atteindre 40 % par rapport à une aire gérée classiquement (Beernink et al. 2022 ; Bloemendal et al. 2018 ; Rostampour et al. 2019).

2.2 ATES : un dispositif avantageux ...

L'installation d'un système ATES afin de subvenir aux besoins thermique d'un bâtiment est pertinent pour plusieurs raisons, parmi lesquelles (Drenkelfort et al. 2014) :

- Une grande capacité de stockage ;
- L'application au stockage saisonnier ;
- L'économie d'énergie grâce à l'utilisation d'une pompe chaleur, ou du fonctionnement en géocooling ;
- Une économie entre 40 et 70 % d'émissions de CO_2 par rapport à des systèmes classiques (Fleuchaus et al. 2018 ; Stemmle et al. 2021) ;
- Baisse du coût de revient pour le chauffage/refroidissement du bâtiment car utilisation d'une énergie moins chère (Schüppler et al. 2019) ;
- Un amortissement de l'investissement compris entre 2 et 10 ans ;
- Une réduction de l'espace requis pour les climatiseurs ;
- Une réduction de la pollution sonore/visuelle associée au système de chauffage/refroidissement ;
- Une image positive auprès du grand public en lien avec l'innovation des projets et la diminution de l'impact sur l'environnement.

Par rapport à d'autres systèmes UTES (tableau 2.2, le dispositif ATES est le système pouvant stocker le volume d'énergie le plus important. Il requiert un faible espace au sol pour être installé. Les coûts d'investissement sont inférieurs aux PTES/TTES et BTES, ce qui permet, en général, un temps de retour sur investissement assez court ne dépassant pas les 10 ans (Ghaebi et al. 2016 ; Schüppler et al. 2019 ; Vanhoudt et al. 2011). Toutes ces caractéristiques en font des systèmes particulièrement bien adaptés pour des applications à grande échelle (Dinçer et Rosen 2010a).
Les ATES nécessitent néanmoins un entretien et une maintenance importante. L'impact sur le sous-sol et l'espace souterrain n'est pas à négliger. Ils sont directement dépendants des conditions hydrogéologiques du sous-sol, de la disponibilité ou non d'un aquifère et de ses propriétés. Étant en boucle ouverte, ils interagissent fortement avec leur environnement. Par conséquent, avant la mise en place et le lancement de l'exploitation, des études détaillées doivent être réalisées (Fleuchaus et al. 2018) afin de préciser leurs impacts géologique, hydrogéologique et environnemental.

	ATES	**BTES**	**CTES/TTES**
Entité de stockage	Eau souterraine et sédiments	Eau souterraine et sédiments	Eau et gravier
Emprise sur la subsurface	+++	++	+
Pré investigation nécessaire	+++	++	+
Capacité de stockage maximum (kWh/m^3)	++	+	+++
Volume stocké	+++	++	+
Espace au sol requis	+	++	+++
Coût d'investissement	+	++	+++
Maintenance	+++	+	+
Interaction avec le sous-sol	+++	++	+

TABLE 2.2 – Comparaison des caractéristiques techniques des systèmes UTES (FLEUCHAUS et al. 2018)

2.2.1 Aspect économique

Actuellement, peu d'études se sont penchées sur les bénéfices économiques qu'un ATES peut générer par rapport à l'utilisation d'un système conventionnel classique (chauffage gaz, chauffage électrique classique sans stockage, climatiseur conventionnel). Les rares études publiées mettent en évidence que les ATES permettrait d'atteindre des durées de retour sur investissement en dessous de 10 ans (GHAEBI et al. 2016 ; SCHÜPPLER et al. 2019 ; VANHOUDT et al. 2011). Ce temps de retour sur investissement dépend néanmoins des aides financières accordées par les autorités. En France, l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), met à disposition des aides financières destinées à encourager la transition vers des systèmes énergétiques moins émetteurs de GES. Parmi ces aides, le Fond Chaleur a pour vocation *"d'encourager le remplacement d'installations consommant des énergies fossiles par la mise en place d'équipements de production de chaleur et de froid renouvelables utilisant la biomasse, la géothermie, le solaire, le biogaz et les énergies de récupération, couplés à des réseaux de chaleur et de froid. Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et aux entreprises"*. À travers ce fond, l'ADEME peut financer entre 30 et 60 % d'un projet répondant à ces critères.

2.2.2 Aspect environnemental

Généralement, l'impact environnemental est estimé à partir des réductions d'émissions de CO_2 atteintes par rapport à des systèmes énergétiques conventionnels (Ghaebi et al. 2016 ; Schüppler et al. 2019 ; Vanhoudt et al. 2011). Les retours d'expérience sur les systèmes ATES en place aux Pays-Bas font état de réductions d'émissions par rapport à un système conventionnel en phase de fonctionnement allant de 40 à 13 000 tCO_2/an selon la taille du dispositif (tableau 2.3). Cela correspond à des réductions moyennes comprises entre 40 et 70 % (Fleuchaus et al. 2018 ; Stemmle et al. 2021).

Toutefois, comme pour la majeure partie des TES (Borri et al. 2021), la prise en compte des impacts environnementaux globaux du système, depuis sa création jusqu'à son démantèlement, ne semble pas être une pratique courante concernant les ATES. Dans cette optique, il est intéressant d'appliquer et de développer la technique d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) aux systèmes ATES. Ce procédé a été largement développé et harmonisé depuis les années 2000 à travers le monde et son utilisation est soumise aux normes ISO 14040 et 14044 (Finnveden et al. 2009). L'ACV est utilisée pour analyser et modéliser les impacts environnementaux à travers le cycle de vie complet d'un objet ou système : extraction des matières premières nécessaires à la création du produit, conception des pièces, assemblage, utilisation du produit et enfin méthodes utilisées pour gérer sa fin de vie (démantèlement et recyclage) (Finnveden et al. 2009). Grâce à ce type d'analyse, plusieurs catégories d'impacts peuvent être étudiées, comme les effets sur le changement climatique, l'extraction des minéraux, l'acidification ou encore l'eutrophisation des milieux naturels. Ces impacts intermédiaires peuvent servir à mesurer des impacts finaux sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes ou encore la disponibilité des ressources.
Les rares études ACV réalisées sur les ATES font ressortir les mêmes tendances (Moulopoulos 2014 ; Ni et al. 2020 ; Stemmle et al. 2021 ; Tomasetta et al. 2015). Durant un cycle de vie complet, c'est un système qui permet d'obtenir des réductions de GES comprises entre 50 et 100 % par rapport à des systèmes énergétiques classiques (chaudières gaz et climatiseurs électriques). Le pourcentage de réduction dépend grandement du *mix* électrique qui est utilisé pour faire fonctionner les équipements du système. L'utilisation de l'électricité par les divers équipements (pompe de forage, pompe à chaleur, pompe de circulation) est le facteur générant le plus d'impact sur les émissions de GES, la santé humaine et la qualité des écosystèmes. Cette phase de fonctionnement représente plus de 80 % des impacts totaux. En comparaison, la phase de chantier et le démantèle-

Lieu et étude	Type de production énergétique	Retour sur investissement (ans)	Réduction émissions de CO_2 (t/an)	Système énergétique de référence
Iran (Ghaebi et al. 2016)	Froid	2,4	1700	Chaudière à gaz et climatiseur
Iran (Ghaebi et al. 2016)	Chaud	5,5	400	Chaudière à gaz et climatiseur
Iran (Ghaebi et al. 2016)	Froid et Chaud	2,9	1840	Chaudière à gaz et climatiseur
Belgique (Vanhoudt et al. 2011)	Froid et Chaud	8,4 / sans subventions 3,9 avec	425	Chaudière à gaz et cooling machine
Allemagne (Schüppler et al. 2019)	Froid et Chaud	2,7	262	Réseau de chaleur et climatiseur
Inde (Sethi et Sharma 2007)	Froid et chaud	7,6	-	Système énergétique classique pour une serre
Afghanistan (Hill et DeHouche 2017)	Froid et chaud	2	40	Pompe à chaleur air-air
Belgique (Hoes et al. 2006)	Froid et chaud	-	630	-
Pays-Bas (Worthington 2011)	Froid et chaud	6 à 10	13300	Réseau chaleur/chaudière gaz/climatiseurs classiques
Suède et Turquie,(Kilkiş et al. 2017)	Chaud et froid	-	2663	Réseau chaleur et de froid alimenté par biofuel, charbon et électricité, pompe à chaleur eau de mer

Table 2.3 – Retour sur investissement et réduction des émissions de CO_2 pour différents projets d'ATES

ment ne représentent qu'un faible pourcentage des impacts globaux. En revanche, les ATES ont un impact plus important sur les ressources utilisées par rapport aux systèmes énergétiques conventionnels. Cela s'explique par la complexité et la diversité des équipements installés (tube de forage en acier, pompe à chaleur, échangeur thermique, etc ...).

2.3 ... au fort potentiel de développement ...

Actuellement, environ 3000 ATES sont opérationnels dans le monde. Ils ont démontré leur faculté de réduction d'émission de CO_2 durant leur phase d'utilisation (tableau 2.3), mais aussi le long de leur cycle de vie (phase d'opération, production des équipements, maintenance et fin de vie) (Stemmle et al. 2021). Malgré ces aspects positifs, les ATES ont du mal à se développer en dehors d'un certain nombres de pays du nord-ouest européen. Les Pays Bas est le pays le plus avancé avec plus de 2500 systèmes en place et le marché est maintenant dans une phase mature dans ce pays. Avec respectivement 220, 55 et 30 ATES installés, la Suède, le Danemark et la Belgique présentent des marchés en pleine phase de croissance (Fleuchaus et al. 2018).

Plus généralement, le marché des ATES est encore en phase d'émergence dans le monde (figure 2.3). Outre la faisabilité technique, les principaux freins de développement sont législatifs et financiers. La méconnaissance de ce type de dispositif ne favorise pas son essor, particulièrement vis-à-vis des autorités administratives et des maîtres d'ouvrage.

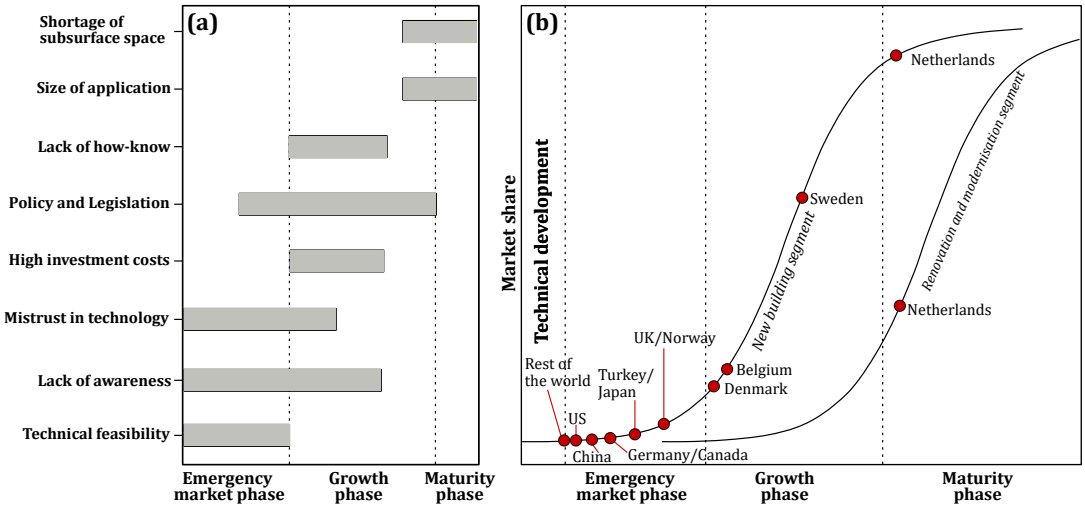


Figure 2.3 – Émergence des ATES dans le mode : (a) barrières freinant le développement et (b) phase de développement des marchés ATES en fonction des pays, à noter que les conditions climatiques et de subsurface sont supposées favorables *(Fleuchaus et al. 2018)*

Lu et al. 2019 proposent une analyse cartographique multi-critères concernant le potentiel de développement des ATES à l'échelle mondiale. En croisant les données techniques, économiques (figure 2.4a) et la dynamique démographique (figure 2.4b), ils estiment que les principales aires urbaines ayant un très bon potentiel pour l'implantation des ATES se trouvent en Europe, sur la côte est des

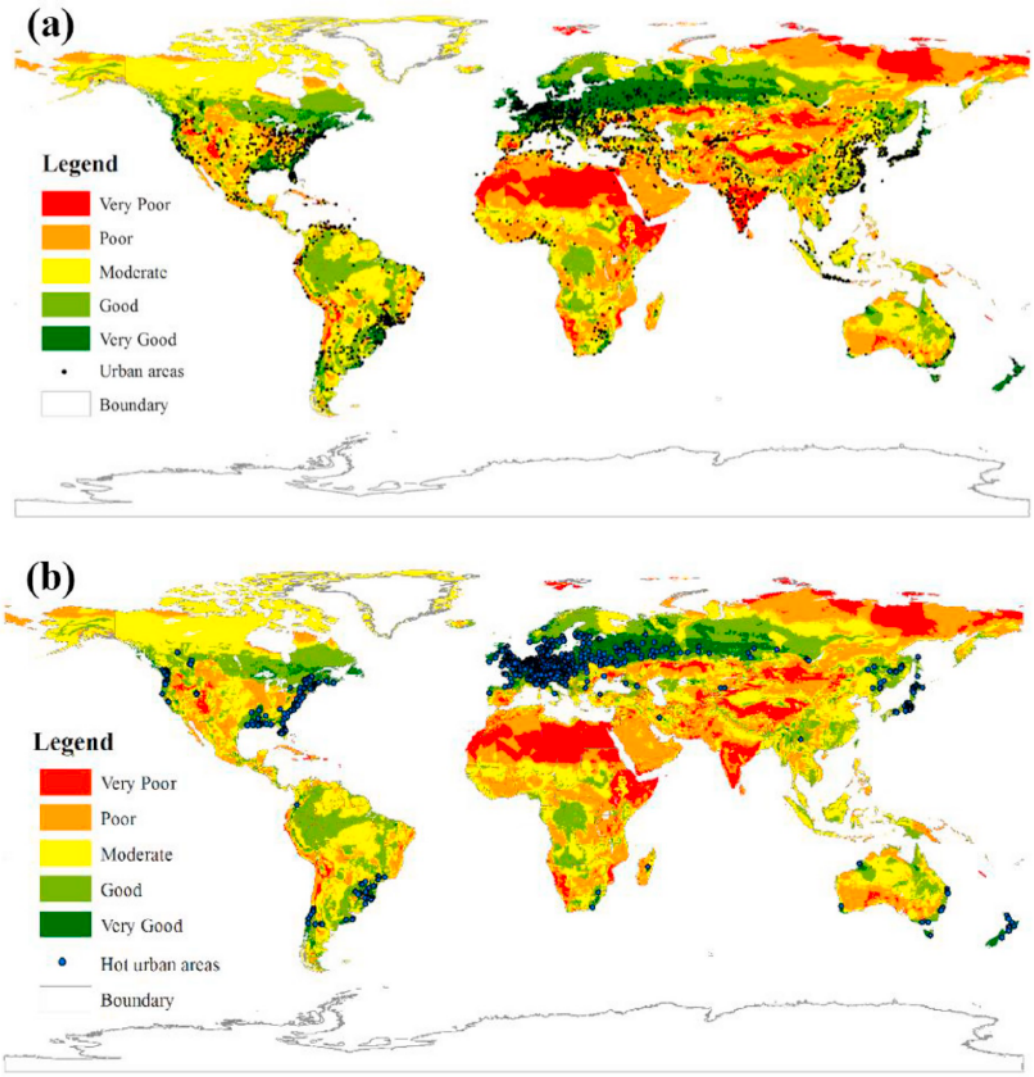


FIGURE 2.4 – Potentiel de développement des ATES dans le monde, (a) cartographie de toutes les aires urbaines du monde et (b) mise en évidence des aires urbaines avec un fort potentiel de développement des ATES (tiré de LU et al. 2019)

USA et de l'Asie (figure 2.4b). En prenant en compte le changement climatique, le pourcentage d'aires urbaines se trouvant dans des zones à très fort potentiel devrait descendre à 3% au cours du XXIe siècle. Le changement climatique n'entraînerait probablement pas de modification du pourcentage de zone ayant un bon et moyen potentiel (BLOEMENDAL et al. 2015).

Peu adapté à la réalité terrain locale, ce type d'analyse est surtout un moyen de sensibilisation pour cette technologie susceptible d'être une contribution non négligeable dans la lutte contre le changement climatique.

2.4 ... mais nécessitant une attention particulière

2.4.1 L'aléa hydrogéologique lors de l'implantation

Les ATES utilisent l'aquifère pour stocker l'énergie, par conséquent leur fonctionnement est fortement lié aux propriétés de ce dernier. La géologie, les propriétés physiques, les caractéristiques des flux souterrains et la chimie de l'eau sont les principaux éléments à analyser en détail afin de prédire le comportement thermique du sous-sol et d'estimer la quantité d'énergie stockable et exploitable (Lee 2013).

De manière générale, il est préférable d'être en présence d'une formation très perméable pour faciliter le pompage et l'injection d'eau. Il est aussi souhaitable que la vitesse naturelle d'écoulement de l'eau souterraine soit assez faible pour éviter les pertes thermiques par advection (Diao et al. 2004). La direction et la vitesse des écoulements naturels constituent une information préalable indispensable. L'angle d'orientation des forages par rapport à la direction du flux souterrain doit être choisi précautionneusement afin de limiter au maximum les pertes thermiques, les interférences entre les forages et optimiser les systèmes de grande taille (Nordell et al. 2015). Enfin, la géochimie de l'eau doit permettre de prévenir des éventuels problèmes de colmatage des crépines des forages et des équipements du système (voir sous-section 2.4.2).

Le dimensionnement de l'ATES nécessite d'anticiper la dynamique des flux thermiques. Cette phase peut être abordée par l'utilisation de modèles numériques (Nordell et al. 2015). Le développement de tels outils nécessite une caractérisation préalable la plus fine possible. En phase de dimensionnement, l'utilisation de modèles basiques permet de limiter les incertitudes du site et de réorienter les études sur les paramètres vraiment importants. Dans une phase plus avancée, une restitution la plus fidèle possible peut s'avérer utile pour mieux caractériser l'évolution à long terme du système et donc participer à sa gestion optimale.

2.4.2 Vieillissement et dégradation des composants du système

La problématique du vieillissement et de la dégradation des composants du système ATES (notamment des forages) est similaire à celle rencontrée dans le domaine de l'alimentation en eau potable. Cette problématique est reliée à deux

principaux phénomènes qui apparaissent dans les forages au cours du temps :

- La corrosion des éléments métalliques des forages et autres équipements. Dans des conditions naturelles, les métaux tendent à revenir sous l'état de composé minéral stable via des processus chimiques ou électrochimiques. Ce phénomène entraîne une détérioration des composants du système pouvant résulter à une dégradation généralisée du système ;
- Le colmatage correspond au comblement partiel ou total de l'ouverture des crépines du forage. Ce processus peut être biologique, chimique ou mécanique et entraîne une perte de productivité du système.

Les causes et conséquences de ces deux phénomènes sont détaillées ci-dessous.

Corrosion

La corrosion correspond à l'altération d'un composant métallique avec son environnement par réaction électro-chimique. Lorsqu'elle affecte des éléments constitutifs des puits (tubages, crépines), elle peut entraîner une détérioration de la productivité du système par un double phénomène : colmatage des parties ajourées, perçage des parties pleines (Houben et Treskatis 2007).
La corrosion détériore l'acier via deux mécanismes principaux : un processus électrochimique et dans une moindre mesure un processus microbien.
Les principaux éléments responsables de la corrosion sont la présence de gaz dissous dans l'eau (oxygène, dioxyde de carbone et H_2S), des concentrations en minéraux élevées (notamment en Chlore), ainsi qu'un pH élevé (Rees 2016).

La corrosion provoque en premier lieu un amincissement graduel du métal, pouvant mener jusqu'à la création de trous dans le matériau. Cette altération se traduit par plusieurs dysfonctionnements selon les parties du dispositif concernées :

- Tubes pleins : une perte d'intégrité du tubage peur provoquer des mélanges d'eau au sein des couches aquifères, posant des problèmes de qualité et de conformité administrative ;
- Crépines : des trous peuvent laisser passer le massif filtrant ou des éléments de l'aquifère dans la colonne d'eau. Ces particules peuvent ensuite être aspirées par la pompe, ce qui va entraîner sa détérioration. Les particules d'acier relâchées dans l'eau par la corrosion se retrouvent dans le circuit de l'ATES et vont dégrader par abrasion les tubes des forages lorsqu'ils sont en mode injection (Bakema 2001).

La limitation de ces processus passe en premier lieu par une réalisation correcte des ouvrages, avec un choix de matériaux adéquat. Il convient d'utiliser

des matériaux non corrosifs comme le Polychlorure de Vinyle (PVC) ou l'acier inoxydable. La solution PVC doit toutefois être considérée avec attention. Bien qu'il ne soit pas soumis à la corrosion, dans sa forme pure, ce matériau reste assez fragile et instable thermiquement. Des additifs peuvent être ajoutés au PVC pour améliorer ses propriétés thermo-mécaniques. Mais au cours du temps, ces produits peuvent se diffuser dans l'eau, particulièrement à haute température. Cela fragilise les tubes PVC qui peuvent rompre sous l'effet d'un impact ou du tassement des sols.

Colmatage

Il existe trois types de mécanismes pouvant causer le colmatage des éléments de l'ATES : biologique, chimique et mécanique. Les trois phénomènes sont souvent liés. En effet, un développement de matrice microbienne peut servir de support pour fixer des particules fines dans les équipements, et de catalyseur aux processus chimiques (Bakema 2001). En plus de colmater les équipements du système, le colmatage peut réduire la porosité de l'aquifère à proximité immédiate de l'ouvrage de production entraînant une diminution de perméabilité (Gjengedal et al. 2020).

Colmatage mécanique : Ce processus est généré par l'apparition de particules fines dans les forages, réduisant l'ouverture des parties captantes par la mise en place de "pont de sable" (figure 2.5).

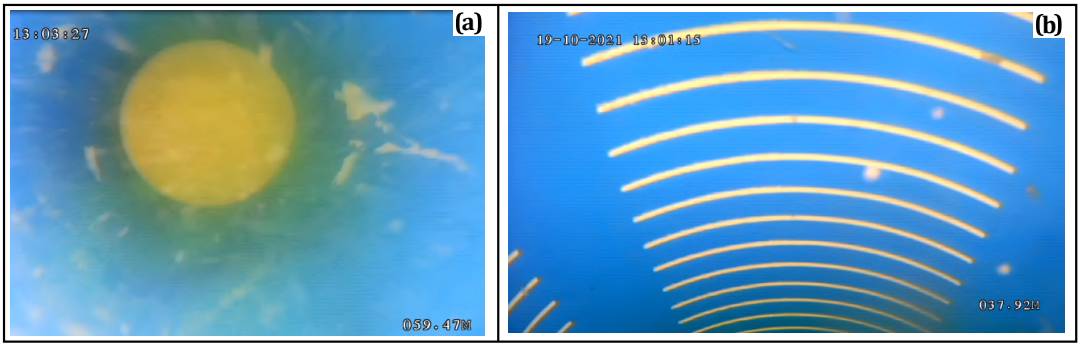


Figure 2.5 – Exemple d'un forage colmaté mécaniquement par des fines suite à un développement insuffisant (a) comblement du fond du forage et (b) crépines obstruées

La production de fines peut être entre autre liée à un défaut du massif filtrant ou à une dégradation des crépines. Un mauvais développement des forages après leur réalisation ou d'un débit de pompage trop élevé durant l'exploitation sont autant de causes à l'apparition de ce phénomène (Bakema 2001). La rupture

soudaine de ces ponts peut générer un apport de matériaux à l'intérieur de l'ouvrage et être aspiré par la pompe, ce qui accélère sa dégradation, et se retrouver à terme dans les tuyaux de circulation du système. Sinon, ce matériau va s'accumuler et sédimenter au fond du forage (figure 2.5a) obstruant la partie basse des crépines (Houben et Treskatis 2007).

Colmatage chimique : La qualité physico-chimique de l'eau souterraine est un facteur important pouvant impacter le fonctionnement des ATES. Une qualité d'eau inadaptée peut mener à la détérioration et au mauvais fonctionnement du dispositif. Le choix des matériaux, des équipements et les méthodes utilisés durant les travaux de forage sont aussi des éléments pouvant engendrer un dysfonctionnement des ATES. Le colmatage chimique correspond à une réduction des ouvertures des crépines par la précipitation de nouveaux matériaux, générée par la perturbation des équilibres physico-chimiques au sein de l'aquifère lors de la mise en production du dispositif.

Le pompage de l'eau dans les forages perturbe le quasi équilibre local qui existe à l'état naturel entre les minéraux dissous et ceux de la matrice poreuse. Ce pompage entraîne une accélération des flux d'eau, une diminution de la pression pouvant mener à un potentiel dégazage de CO_2. Ces processus vont favoriser des réactions chimiques à la périphérie et à l'intérieur des puits générant la précipitation de divers éléments dits encroûtants (figure 2.6) susceptibles de se déposer sur les parois des éléments du système (Bakema 2001).

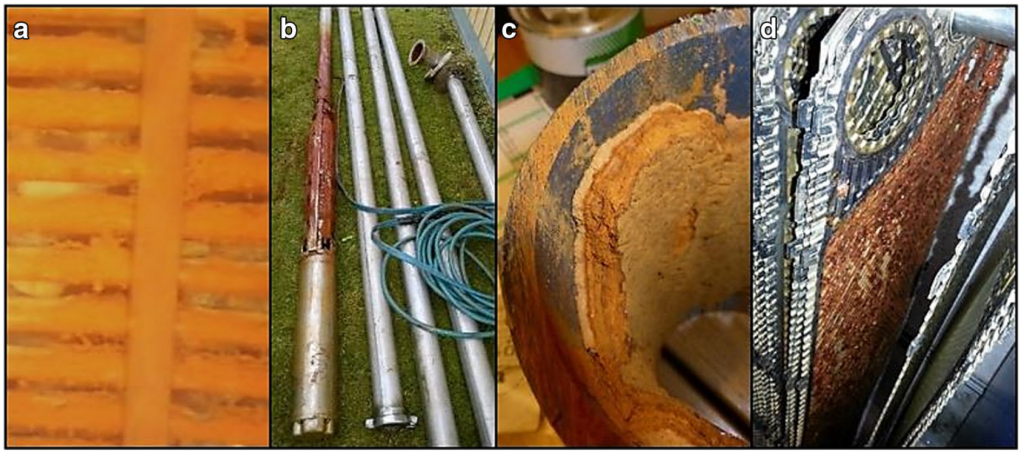


Figure 2.6 – Exemple d'équipements colmatés par des oxydes de fer dans un système géothermique open loop non réversible (a) crépines du forage de production, (b) pompe du forage, (c) tube PVC et (d) échangeur de chaleur (tiré de Gjengedal et al. 2020)

Les deux réactions classiquement rencontrées sont l'oxydation du fer et du manganèse (Beek 2018). Il est plus commun de rencontrer des encroûtements ferriques, le manganèse étant moins abondant que le fer dans le sous-sol et son oxydation nécessitant des potentiels d'oxydation supérieurs à ceux du fer (0.6 - 1.2 V vs 0.0 - 0.5V) (Houben et Treskatis 2007).
Un autre phénomène commun dans les environnements carbonatés est la précipitation de calcite favorisée par le dégazage de CO_2.

Colmatage biologique : Ce type de colmatage est de nature bactérienne. Les bactéries sont naturellement présentes dans le proche sous-sol, et 90 % d'entre elles sont liées autour des grains de la matrice en formant des biofilms, généralement peu développés. Les perturbations induites par la création de forages et les pompages qui accélèrent les flux d'eau et de nutriments peuvent entraîner la croissance des biofilms bactériens. Ces biofilms peuvent provoquer des encroûtements générant des structures qui colmatent les pores de l'aquifère et les crépines (Houben et Treskatis 2007). Les proliférations les plus communes sont celles des bactéries utilisant le fer (soit comme substrat, soit comme protection) et celles convertissant le sulfate en H_2S, qui va réagir avec le fer pour précipiter en sulfate de fer.

Colmatage par bulle d'air : Un dernier de type de colmatage apparaît uniquement dans les puits en phase d'injection. Il s'agit du colmatage par les bulles de gaz. Ce processus peut colmater le puits injecteur très rapidement après le début de la phase d'injection. Les bulles de gaz adhérent aux parties hydrophobes des grains pouvant ainsi bloquer le passage de l'eau dans les pores de l'aquifère. Ce gaz peut avoir une origine biogénique bactérienne ou des arrivées d'air du sol provenant d'une aération par dénoyage de l'aquifère dans le puits de pompage. Ce type de colmatage représente 10 % des problèmes de colmatages rencontrés (Song et al. 2020).

2.4.3 Évolution des conditions de surface

Dans le sous-sol, la température des horizons proches de la surface ($< 100\,\mathrm{m}$ de profondeur), est régie par la température du sol en surface (Ferguson et Beltrami 2006 ; Ferguson et Woodbury 2004). Or, la température à la surface suit une dynamique transitoire, grandement influencée par le réchauffement climatique (Bayer et al. 2016 ; Harris et Chapman 1997) et l'occupation des

sols (Ferguson et Beltrami 2006 ; Menberg et al. 2013 ; Previati et al. 2022 ; Rivera et al. 2015)

Les variations climatiques passées sur le long terme sont détectables dans le sous-sol jusqu'à une centaine de mètres de profondeur (Bayer et al. 2016 ; Harris et Chapman 1997). Dans un contexte de changement climatique tendant à la hausse globale des températures atmosphériques, la subsurface va avoir tendance à se réchauffer. Sur le long terme, un système ATES exploitant une nappe peu profonde doit donc composer avec le réchauffement de l'aquifère induit par l'augmentation des températures atmosphériques en surface.

Par ailleurs, l'occupation du sol a un rôle essentiel dans les transferts thermiques depuis l'atmosphère vers le sous-sol. Toute modification en surface entraîne une modification de la balance énergétique du sol. Par exemple, le déboisement d'une zone forestière modifie les propriétés du sol et notamment l'albédo, l'évapotranspiration et la teneur en eau. Cela génère des augmentations de température en très proche surface (Ferguson et Beltrami 2006) qui se propagent plus en profondeur. Le signal thermique peut impacter le profil de température jusqu'à une centaine de mètres de profondeur au droit de la zone modifiée.
Dans les villes, où une proportion de sol importante est occupée par des infrastructures anthropiques (routes, parkings, tunnels, bâtiments, canalisations), les propriétés thermiques de la surface sont fortement modifiées, engendrant un réchauffement du sous-sol très marqué. Cette anthropisation de surface génère des îlots de chaleur qui se propagent en profondeur. Ce phénomène est connu sous le nom d'îlot de chaleur souterrain (Sub Urban Heat Island : SUHI). La température du proche sous-sol peut en moyenne atteindre des valeurs 2 à 6.0 °C supérieures à celles des zones rurales (Arola et Korkka-Niemi 2014 ; Bayer et al. 2019 ; Blum et al. 2021 ; Taniguchi et al. 2007).
Ce phénomène apporte une quantité d'énergie considérable dans le sous-sol. Par exemple, pour la ville de Milan en Italie (Previati et al. 2022) et les villes allemandes de Karlsruhe et Cologne (Benz et al. 2015 ; Menberg et al. 2013), l'anthropisation génère des flux de chaleur supplémentaires de respectivement 1.4, 2.1 et $1.0 \times 10^{15}\,\mathrm{J\,an^{-1}}$.
Cet apport énergétique anthropique est bénéfique aux systèmes géothermiques produisant du chaud (Rivera et al. 2017). En revanche, les îlots de chaleur urbains diminuent la quantité d'énergie disponible pour répondre aux demandes de rafraîchissement des bâtiments (Arola et Korkka-Niemi 2014). L'augmentation de l'énergie disponible pour le chauffage et la diminution de l'énergie disponible pour le rafraîchissement pourraient avoir un impact non négligeable sur la

performance et le fonctionnement de ATES exploitant des nappes peu profondes en contexte urbain.

Le réchauffement climatique va aussi modifier la demande thermique des bâtiments. La demande en chauffage des bâtiments va avoir tendance à diminuer, et la demande en rafraîchissement devrait augmenter significativement (Isaac et Vuuren 2008). Le déséquilibre des demandes thermiques génère un déséquilibre thermique des bulles froide et chaude de l'ATES dans l'aquifère, pouvant impacter la performance générale de l'exploitation (Fleuchaus et al. 2019).

A ce jour, l'impact concret de l'anthropisation et du réchauffement climatique sur la performance des ATES exploitant des nappes peu profondes est peu documenté. La prise en compte de ces phénomènes semble primordiale pour comprendre et prédire les transferts thermiques proches de la surface.

CHAPITRE 3

Caractérisation et suivi des systèmes ATES : développement d'une technologie innovante

3.1 Hétérogénéité d'un aquifère et suivi du colmatage : deux facteurs cruciaux pour optimiser la performance des ATES

La performance des ATES et l'extension spatio-temporelle des bulles chaude et froide sont très dépendantes des propriétés thermiques et hydrodynamiques de l'aquifère exploité. Le fonctionnement des ATES est aussi impacté par le vieillissement des puits. Les principaux problèmes rencontrés sont relatifs à la corrosion, et au colmatage (mécanique, chimique ou biologique) qui peuvent entraîner des dégradations majeures des ouvrages et une baisse de leur productivité. L'estimation des hétérogénéités de l'aquifère et le suivi du développement du colmatage le long d'un ouvrage sont donc des enjeux cruciaux sur les sites soumis à l'exploitation d'un ATES.

Les propriétés hydrogéologiques et thermiques sont généralement déterminées à l'aide de diverses mesures et expériences sur site telles que les essais de pompages, les tests de traçages, les tests de réponse thermique (TRT) ou encore les diagraphies de puits. Les diagraphies classiquement utilisées pour les forages d'eau permettent d'obtenir des données distribuées le long du puits et sont adaptées pour estimer les hétérogénéités lithologiques (Gamma Ray) ou de productivité (Flowmètre). Il est cependant beaucoup plus rare d'obtenir des données distribuées des propriétés thermiques du sous-sol. Les valeurs moyennes des paramètres thermiques et hydrodynamiques sont classiquement déterminées à l'aide d'essais de pompages (pour la conductivité hydraulique) ou de TRT (pour la conductivité thermique). Ces tests nécessitent minimum 2 jours d'opération pour être correctement réalisés, mais ne fournissent que des valeurs moyennes des propriétés testées. Si un nombre de puits important sur site est disponible, un test de traçage peut être réalisé pour apporter plus de précisions sur le fonctionnement hydrogéologique/thermique du site. Toutefois, ces tests sont longs à réaliser et leur interprétation précise nécessite bien souvent le développement de modèles numériques complexes.
Lorsque les moyens économiques le permettent, des carottes sont prélevées à différentes profondeurs dans les forages afin de mesurer les propriétés des échantillons en laboratoire.

Concernant l'identification et l'impact du colmatage, la méthode classique consiste à descendre une caméra dans le puits afin de vérifier son état et/ou à réaliser des tests de pompage par paliers successifs. Cependant, cette opération

est très lourde à réaliser et nécessite l'arrêt du système ainsi que des moyens conséquents pour ouvrir le puits et remonter la pompe pour descendre la caméra. Ce type d'opération est généralement effectué durant les diagnostics des ouvrages qui interviennent tous les 10 ans. Plus récemment, une procédure basée sur le suivi de la pression dans les ouvrages et les circuits en direction du bâtiment a été développée pour estimer le développement du colmatage (Gjengedal et al. 2020). Cependant, cette technique ne permet pas de localiser précisément la zone colmatée qui peut tout aussi bien se trouver dans le forage ou dans le circuit général.

Face à ce constat, il semble primordial de développer des techniques simples et rapides à mettre en œuvre afin de :

1. Estimer la distribution des propriétés thermiques et hydrodynamiques le long des ouvrages exploités ;
2. Suivre à intervalles réguliers l'évolution et le développement de colmatage afin d'éviter une perte de productivité des ouvrages, voire leur détérioration.

3.2 La fibre optique : une technologie en plein essor pour caractériser des phénomènes complexes et hétérogènes appliqués aux géosciences

Face à cette problématique, les mesures distribuées par fibre optique (FO) offrent des opportunités intéressantes.

3.2.1 Principe de fonctionnement

La singularité de cette technologie repose sur sa faculté à acquérir simultanément des données le long du câble de fibre avec une fréquence élevée et une distribution spatiale pouvant atteindre la dizaine de centimètres. Le principe consiste à transformer une impulsion électrique en signal lumineux de caractéristique connue qui se propage le long de la fibre. Lorsqu'un signal lumineux incident est transmis par le cœur de la FO, une petite perturbation de l'environnement affecte la longueur, le diamètre et l'indice de réfraction de la fibre et provoque la rétrodiffusion du signal lumineux (figure 3.1). Les différentes composantes spectrales du signal rétrodiffusé sont ensuite analysées par une unité

de traitement (DTS unit). Ces composantes se classent en 2 catégories (Fenta et al. 2021 ; Simon 2020) :

- La diffusion élastique de Rayleigh, qui résulte des hétérogénéités de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Dans ce cas, l'intensité de la lumière rétrodiffusée est équivalente à celle émise ;
- La diffusion inélastique due à l'agitation des particules constitutives de la matière. Les caractéristiques des signaux de rétrodiffusion de Raman (sensible à la température) et de Brillouin (sensible à la pression et à la température) sont analysées par les unités de traitement. Contrairement à la rétrodiffusion élastique, l'énergie du signal renvoyée est soit :
  1. plus basse (plus grande longueur d'onde) que celles des photons incidents : c'est la composante Stokes ;
  2. plus haute (plus faible longueur d'onde) : c'est la composante anti-Stokes.

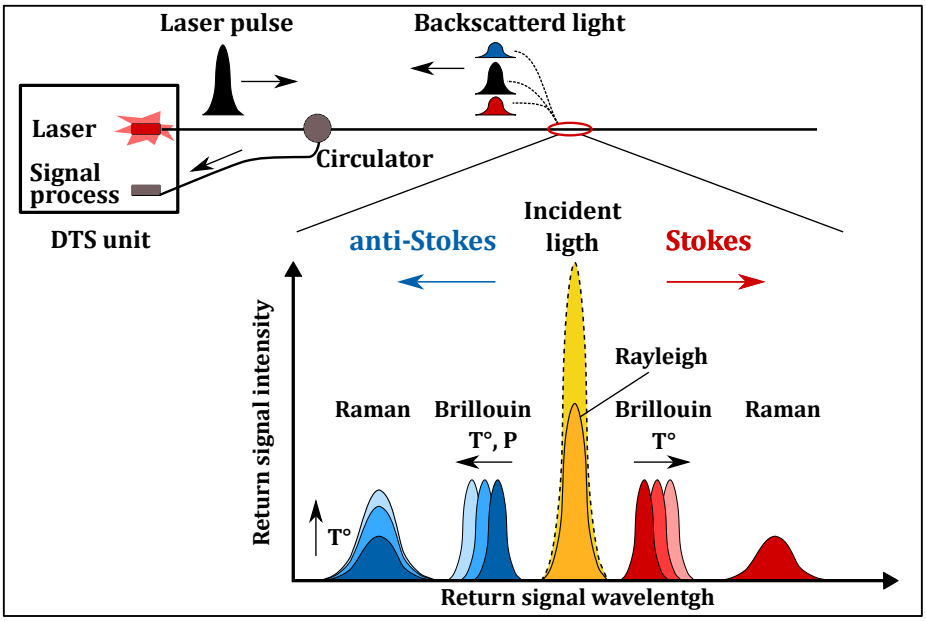


Figure 3.1 – Principe de la mesure de température distribuée par fibre optique (adapté de Fenta et al. 2021 ; Simon 2020)

Les modifications des propriétés des signaux de rétrodiffusion inélastiques sont directement dépendant des conditions du milieu (pression, température, humidité, etc) (Fenta et al. 2021). Les changements d'intensité, de phase et de fréquence du signal rétrodiffusé et son temps de retour, sont interprétés par l'unité de traitement pour déterminer l'emplacement et l'amplitude des paramètres physiques le long de la FO. La température du milieu impacte directement l'intensité de l'onde anti-Stokes de Raman, mais n'a aucun effet sur l'onde Stokes (figure 3.1).

L'analyse du rapport entre les signaux Stokes et anti-Stokes de Raman permet de déterminer la température. Les composantes de Brillouin sont aussi dépendantes de la température, mais également de la pression, rendant leur utilisation plus délicate pour des applications purement thermiques.

3.2.2 Domaines d'applications

La technologie de mesures distribuées le long d'un câble FO est initialement introduite dans les années 80 pour détecter des incendies dans le domaine industriel et plus particulièrement par les pétroliers pour détecter des fuites (Simon et al. 2020). Les capteurs distribués de FO analysant les caractéristiques des ondes de Brillouin sont les plus répandus. Ils permettent d'obtenir des données distribuées sur de très longues distances ($\approx$ 100 km) et sont particulièrement adaptés pour (P. Lu et al. 2019) :

- Suivre l'état structural d'un édifice ;
- Suivre des processus chimiques ;
- Détecter des variations de pression et de température le long de câble électrique ou des fuites le long des conduites ;
- Suivre l'état des réseaux de chemin de fer face aux variations importantes de température et de pression ;
- etc..

Dans les géosciences, cet outil est notamment utilisé pour effectuer des mesures distribuées de températures, de pressions et acoustiques. La FO est souvent employée dans les problématiques inhérentes aux rivières, forages et à l'estimation des paramètres du sol ou de l'air (Shanafield et al. 2018). Par exemple, son utilisation en laboratoire a permis de préciser le comportement d'un sol soumis à de la recharge et à de la drainance (Wu et al. 2017). Le déploiement d'un tronçon de câble en rivière peut aussi apporter des informations cruciales sur les échanges nappes rivières (Simon 2020).

Les premières utilisations en forage d'eau datent du début-milieu des années 90. Les objectifs étaient liés au suivi long terme de la température en forage et à la caractérisation de problèmes géotechniques (Hurtig et al. 1996). Pour ce type d'application, les ondes Stokes et anti-Stokes de Raman sont analysés. Depuis le début des années 2000, son utilisation dans les forages d'eau commence à se généraliser à l'échelle académique pour caractériser les propriétés des aquifères et identifier des fractures (Read et al. 2014 ; F. Selker et J. Selker 2018). L'utilisation de méthodes actives, consistant à chauffer directement le câble de FO et suivre l'évolution de la température (figure 3.2), permet d'établir des profils

de vitesse de Darcy (F. Selker et J. Selker 2018 ; B. F. d. Tombe et al. 2019 ; Val et al. 2021), ou de conductivités thermiques (Hakala et al. 2022 ; Zhang et al. 2020).

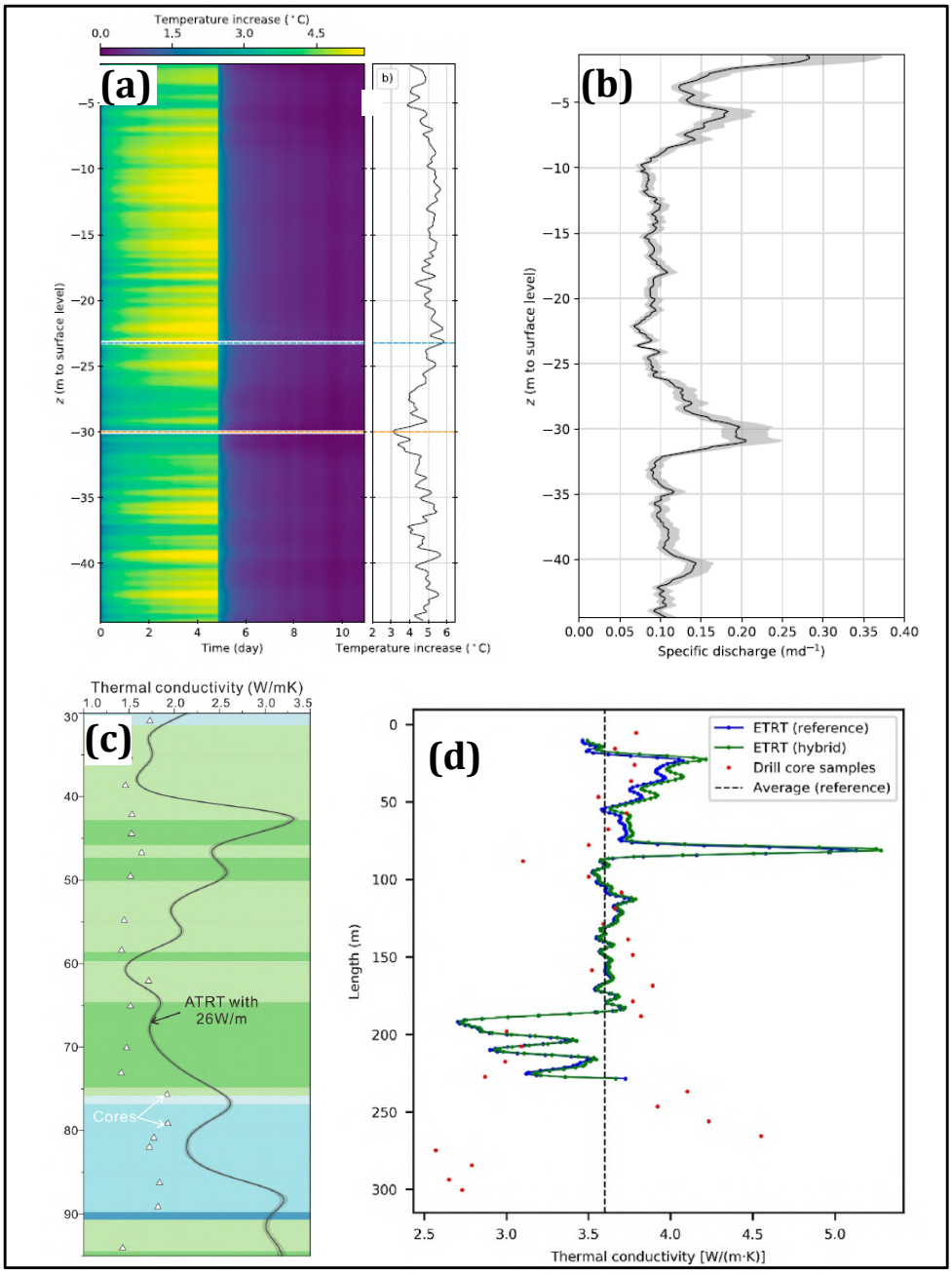


Figure 3.2 – Résultats d'expérience de mesures distribuées actives de température par fibre optique : (a) évolution de la température le long du forage (B. F. d. Tombe et al. 2019), (b) profil vitesse de Darcy issu de l'interprétation des mesures thermiques (B. F. d. Tombe et al. 2019), (c) et (d) profils de conductivité thermique issus de l'interprétation des résultats (Hakala et al. 2022 ; Zhang et al. 2020)

Outre l'estimation des propriétés thermiques autour du forage, un profil de conductivité thermique réalisé en forage pourrait s'avérer intéressant pour dé-

tecter d'éventuelles anomalies liées au développement de matériaux colmatant. Les conductivités thermiques de ces matériaux (bentonite, argile, hydroxyde de fer) sont particulièrement faibles (Cho et al. 2008 ; Dalla Santa et al. 2020 ; Gjengedal et al. 2020 ; Tang et al. 2008) et pourraient générer des anomalies si du colmatage se développait dans le puits au cours du temps. Malgré son potentiel évident, cette technologie n'est actuellement pas développée sur le marché industriel pour aider à la caractérisation et au suivi des sites géothermiques.

3.3 Détection du colmatage et des zones productrices le long d'un forage par utilisation de mesures actives thermiques distribuées

Afin d'étudier le potentiel des mesures thermiques actives pour caractériser un aquifère et suivre le vieillissement des forages, deux piézomètres de l'ENSEGID de 70 m de profondeur ont été équipés de FO. Les câbles utilisés sont des équipements de la marque *BruSens* contenant 4 brins de fibre optique, protégés par des armatures métalliques et plastiques. En amont du déploiement de l'expérience de terrain, deux connectiques électriques sont réalisées sur chaque câble de FO. Elles permettent de connecter des câbles électriques sur l'armature métallique et d'y injecter un courant pour la chauffer. Dans chaque forage, 250 m de fibre optique ont été installés (figure 3.3).

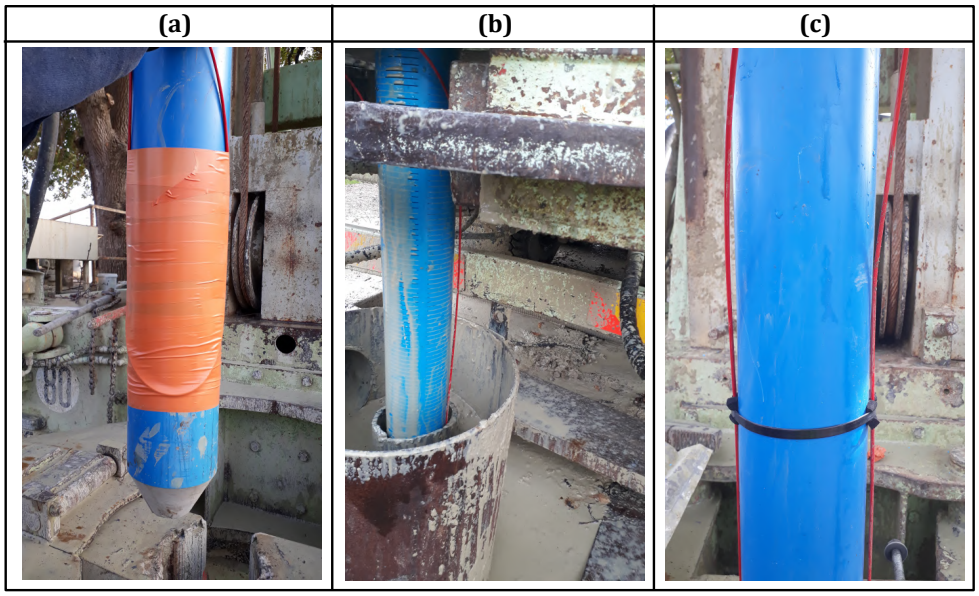


Figure 3.3 – Installation des câbles dans les forages : (a) fixation à la base du tube PVC, (b) descente du tube et (c) tension et fixation à 3 m d'intervalle avec un collier plastique

Les câbles ont été descendus dans les ouvrages au moment de leur création. Ils sont préalablement fixés à l'extérieur du tube, à sa base, de manière à former un U dans le forage (figure 3.3a). Au fur et à mesure de la descente des tubages dans le forage (figure 3.3b), le câble de FO est tendu le long du tube puis attaché tous les 3 mètres avec des colliers en plastique pour maintenir la tension (figure 3.3c). Une fois le dispositif installé, les connectiques électriques se retrouvent à 12 de m de profondeur, ce qui garantit leur immersion permanente dans l'eau. L'installation de la fibre n'a pas compliqué outre mesure la descente des tubages dans les forages.

Une fois le dispositif installé, le massif filtrant est ajouté à l'extrados du tubage et vient stabiliser le câble dans le forage. 50 m de câble dépassent du forage de part et d'autre des branches du U. Une telle longueur est nécessaire afin de plonger une partie des câbles dans deux bacs de calibration à température connue lors de l'acquisition des données (figure 3.4a).

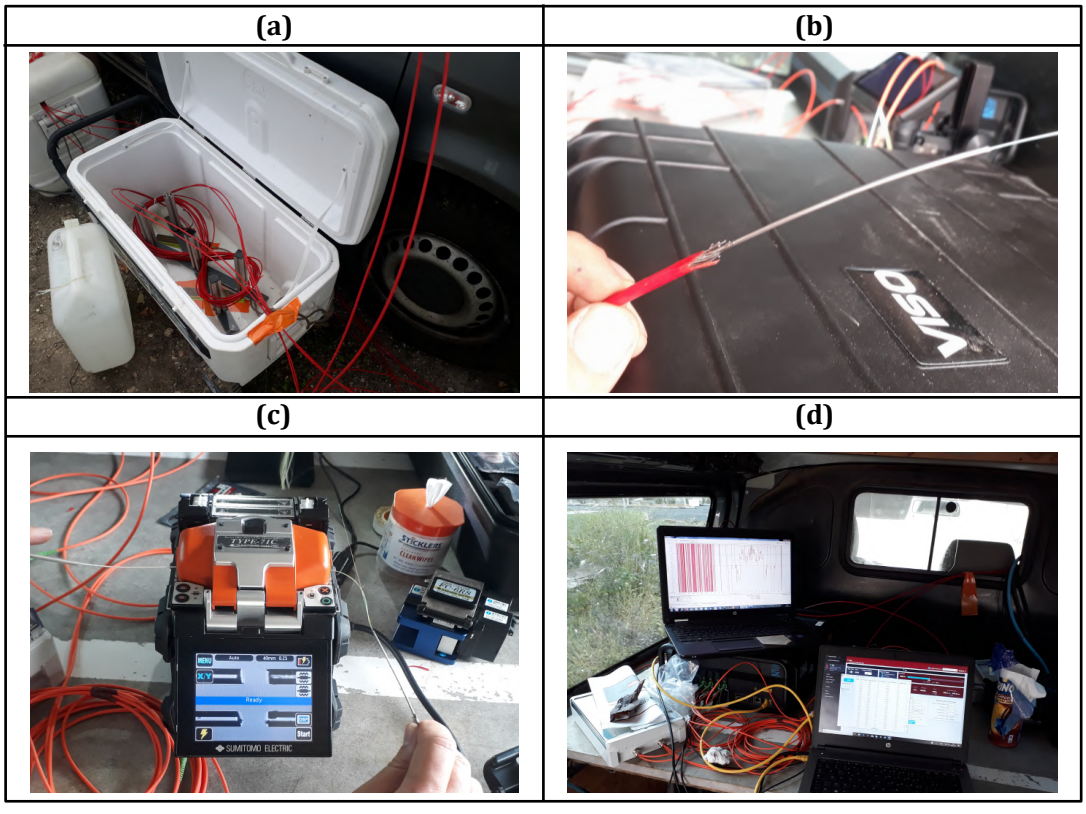


FIGURE 3.4 – Préparation de l'expérience : (a) câble aérien de fibre dans le bac de calibration, (b) mise à nu du câble de fibre, (c) fusion du câble avec celui de l'unité DTS et (d) unité DTS installée sur le terrain

Un premier bac de calibration est rempli de glace et d'eau pour être maintenu à 0 °C. Le deuxième bac est maintenu à 31.0 °C grâce à une résistance. Les bains sont homogénéisés avec des pompes d'aquarium. La configuration en U

du câble de fibre permet d'utiliser une connexion dite *double-ended* avec l'unité de traitement DTS de la marque *Silixa*. Cette configuration offre une meilleure précision lors de l'acquisition des données (Giesen et al. 2012). Pour connecter la fibre à l'unité DTS, les protections métalliques et plastiques des câbles ont été retirées et la fibre de verre mise à nu (figure 3.4b). La fibre du forage est ensuite fusionnée avec une fibre branchée sur l'unité DTS (figure 3.4c).

Les câbles électriques ont été reliés à une unité Heat Pulse qui permet de réguler et d'injecter un courant électrique à intensité constante. Le heat pulse, l'unité DTS et les bains de calibration sont placés dans un camion à proximité immédiate des ouvrages équipés (figure 3.5).

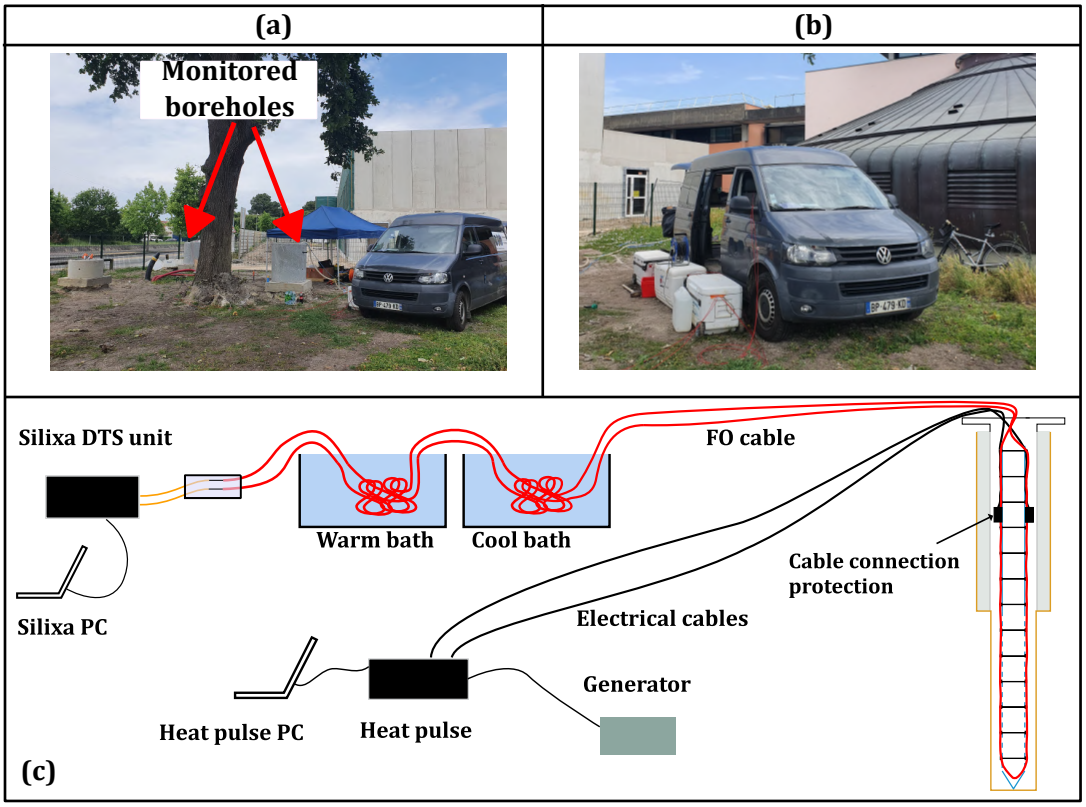


Figure 3.5 – Disposition du site expérimental : (a) Agencement du système d'acquisition (camion) par rapport à l'emplacement des forages, (b) camion et bac de calibration et (c) représentation schématique des équipements expérimentaux

Le principe de l'expérience consistait à chauffer le câble de la FO dans les forages à l'aide des câbles électriques et à suivre l'évolution de la température en fonction du temps le long du câble FO. L'évolution spatiale et temporelle de la température dépend à la fois de la distribution des flux circulant dans le forage et de la distribution de la conductivité thermique du milieu environnant. Les résultats de cette expérience ont été valorisés par la publication d'un article dans la revue *Journal of Hydrology* (Godinaud et al. 2023).

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

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

Research papers

Clogging detection and productive layers identification along boreholes using Active Distributed Temperature Sensing

J. Godinaud [a,*], M. Klepikova [b], F. Larroque [a], N. Guihéneuf [b,c], A. Dupuy [a], O. Bour [b]

[a] ENSEGID Bordeaux INP, CNRS, EPOC UMR 5805, Pessac, 33600, France
[b] Univ Rennes, CNRS, Geosciences Rennes - UMR 6118, Rennes, 35000, France
[c] INTERA, Limonest, 69760, France

ARTICLE INFO

This manuscript was handled by Corrado Corradini, Editor-in-Chief, with the assistance of Zhang Wen, Associate Editor.

Keywords:
Distributed temperature sensing
Groundwater flux
Thermal conductivity
Clogging
ATES

ABSTRACT

Fiber-Optic Active Distributed Temperature Sensing (FO-ADTS) experiments were performed on an Aquifer Thermal Energy Storage system (ATES) site located on the university campus of Bordeaux, France. The experiments consisted in heating the steel core of the FO cable while monitoring the rate of temperature increase during the heating periods. The changes in temperature, that were monitored through time at every depth under various hydraulic conditions and in different boreholes, were used to evaluate both aquifer properties and wells conditions. A first ADTS experiment was conducted under cross borehole configuration using a pumping well and a monitoring well separated by a distance of 8.5 meters. Then, to check the reciprocity of the results, a second experiment was conducted by switching the monitoring and the pumping well. The results obtained through the use of analytical solutions for reproducing and interpreting the data lead to the following conclusions: (i) ADTS can be used to estimate both thermal conductivity and Darcy velocity distribution along boreholes, crucial properties for ATES performance. (ii) The proposed method is a promising tool to detect clogging locations in the boreholes when it occurs. This can be of great practical interest to maintain systems performance, since, once FO cables deployed, experiments could be easily repeated without opening boreholes and stop the system operation.

1. Introduction

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) is an open loop geothermal system involving at least two reversible boreholes (Fleuchaus et al., 2018). This technology uses the subsurface as transient long-term storage of cold and warm water and it gains more and more popularity with a great potential to reduce green house gas emissions of the building sector (Vanhoudt et al., 2011; Gao et al., 2017; Ghaebi et al., 2017; Schüppler et al., 2019; Stemmle et al., 2021).

ATES performance is highly sensitive to hydrogeological conditions. It requires good aquifer permeability to pump and inject water into the aquifer, low natural groundwater flow to avoid stored energy losses due to advection and/or thermal interaction between wells. During system operation, storage efficiency and energy recovery rate depend on the cold and warm thermal plumes extension (Bloemendal and Hartog, 2018). The spatiotemporal distribution of temperature is particularly impacted by aquifer heterogeneity especially regarding the groundwater flux and thermal properties distribution (Ferguson, 2007; Sommer et al., 2013; Bridger and Allen, 2014; Ganguly and Mohan Kumar, 2014; Possemiers et al., 2015; Visser et al., 2015; Nguyen et al., 2016; Bloemendal and Hartog, 2018).

ATES performance also depends on wells sustainability which can be impacted by their aging. Among the main issues, corrosion, biological, chemical and physical clogging are major problems which could lead to well damages and performance decrease (Fleuchaus et al., 2018; Bloemendal and Olsthoorn, 2018). The causes and consequences of the boreholes clogging are well documented for open loop systems (Bakema, 2001; Song et al., 2020). A large clogging development is an additional source of geothermal system performance decrease. Quantification of the subsurface heterogeneity, and the surveillance of clogging evolution in wells, are therefore major concerns on ATES site.

Classically, thermal and hydrodynamic properties of aquifers are characterized from laboratory measurements on core samples. Moreover, some field surveys may be used in the context of ATES characterization. Among these surveys, pumping tests give an average value of aquifer transmissivity and specific storage. Their monitoring time ranges classically between 1 and 3 days and their well known interpretation provides a first overview of hydrogeological properties and context of a site (Kruseman and Ridder, 1994). Flowmeter logs are suited to obtain the vertical flow distribution at a particular point and

* Corresponding author.
E-mail address: jeremy.godinaud@bordeaux-inp.fr (J. Godinaud).

https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129113
Received 14 June 2022; Received in revised form 1 December 2022; Accepted 9 January 2023

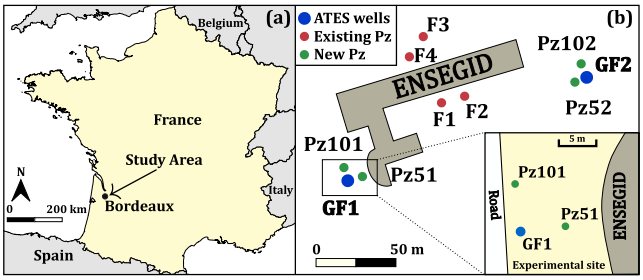


Fig. 1. Context maps : (a) Location of the experimental area and (b) ENSEGID site map with boreholes location and focus on the experimental area.

can provide information on fracture connectivity, transmissivity and storativity distribution (Molz et al., 1994; Paillet, 1998; Roubinet et al., 2015). These tests are simple to realize and can be performed in short time. Heat or solute tracer tests are used to investigate groundwater velocity, thermal and hydraulic dispersivity, or location of preferential groundwater paths (Bodin et al., 2003; Klepikova et al., 2016; Irvine et al., 2015). But they are more difficult to realize, and a robust interpretation could require a lot of observation points, as well as comprehensive numerical modeling. Thermal Response Tests (TRT) are used to estimate the average thermal conductivity of aquifers at the vicinity of the tested well, but the data collection could require a long time (Beier et al., 2011; Dong et al., 2022). Finally, cores collection is financially costly, time-consuming, and their analysis provides only local information which could not be representative of the global in-site aquifer dynamics (Sharqawy et al., 2013).

Preventive actions to tackle clogging development include reduction in the frequency of pump starts and stops, underground removal of iron, avoiding possible oxygen infiltration or reduction of water turbidity and organic content. Nevertheless, a certain clogging extension cannot be avoided during the recharge process, thus leading to the decrease of geothermal system performance (Song et al., 2020). Surveillance of the clogging evolution is thus a major challenge for ATES systems, and developing adapted countermeasures on site could significantly help to maintain their performance. Recently, a strategy was developed to follow its evolution (Gjengedal et al., 2020). The surveillance procedure aims to conduct a step-test with incremental increases in the groundwater flow rate while measuring the pressure and temperature responses in the system components. Nevertheless, it does not focus on clogging locations in the well, but gives an overall view of each component of the geothermal system (production wells, submersible pump and groundwater heat exchanger).

Distributive Thermal Sensing with Fiber Optic cable (FO-DTS) opens a timely opportunity to improve our understanding of the functioning of ATES systems. This technology enables to collect efficiently long data set and to monitor dynamics process (Bense et al., 2016). For geothermal application, it was first used to monitor temperature variations along production boreholes (Hurtig et al., 1996). DTS methods have seen further improvements with the use of the active mode (ADTS). It consists on deploying a heat source in the well and monitoring the induced temperature changes (Bense et al., 2016). The temperature elevation induced by the heat source and the subsequent cooling directly depends on thermal properties of the porous media and on water flux dissipating heat by advection. Among other, it can be used to achieve Enhanced Thermal Response Test (ETRT) to establish thermal conductivity profile for Borehole Heat Exchanger (BHE) application (Freifeld et al., 2008; Huber and Arslan, 2012; Vélez Márquez et al., 2018; Zhang et al., 2020; Hakala et al., 2022). Furthermore, the method proved its ability to measure groundwater flux distribution in the subsurface (Read et al., 2014; Bakker et al., 2015; des Tombe et al., 2019). Recent laboratory and field experiments demonstrate that analytical methods can be used to inspect the distribution of thermal conductivity and Darcy velocity along a fiber positioning in saturated porous media (Simon et al., 2021; del Val et al., 2021). These works enable the generalization of ADTS experiments interpretation.

Apart from aquifer thermal properties, the thermal conductivity profile established in a borehole could be also of major interest to inspect eventual low anomalies due to clogging development. Indeed, the value of thermal conductivity for clogging materials such as bentonite, clay or porous iron hydroxides provides a particular low signature useful for identification (Tang et al., 2008; Cho et al., 2008; Gjengedal et al., 2020; Dalla Santa et al., 2020).

To our knowledge, FO-ADTS experiments in boreholes have never been performed with a purpose of detecting both clogging development and productive layers. Most of the experiments achieved in boreholes mainly focus on fractured zone identification (La Bernardie et al., 2018; Maldaner et al., 2019; Klepikova et al., 2022), Darcy velocity estimation (Selker and Selker, 2018; del Val et al., 2021) or aquifer thermal conductivity (Zhang et al., 2020; Hakala et al., 2022).

In this context, a cross-borehole ADTS experiment was carried out on a site located at the university of Bordeaux in France, and planned to be exploited by a new ATES. The test was realized under constant pumping rate condition and replicated in two different boreholes to verify the reciprocity of the data. The main objectives were **(i)** to characterize the vertical distributions of thermal conductivity and Darcy velocity in two different boreholes, **(ii)** to reveal the preferential water pathways during injection **(iii)** to demonstrate the potential of ADTS to detect clogging area along well screens.

2. Experimental site

2.1. Context

The study area is located at the university of Bordeaux Pessac, France, (Fig. 1a), on the site of the Ecole Nationale Superieure en Environnement Georessources et Ingéniérie du Developpement Durable (ENSEGID). An ATES system was designed to supply both cooling and heating to a new building of 3600 m^2. The ATES consists of a pair of 70 m deep reversible pumping/injection wells, GF1 hot well and GF2 cold well, located 145 m apart (Fig. 1b). In addition to the production wells, four piezometers (Pz51, Pz101, Pz52 and Pz102) were created close to the main wells to monitor thermal plumes extension and to control piezometric heads. Piezometers Pz101 and Pz51 are used for the ADTS experiment. They are separated by a distance of 8.5 m and located 6.0 m and 6.5 m apart from the ATES hot production well GF1 . They were drilled to 66 m and 70 m deep respectively. Our experiments were achieved 8 months before the beginning of ATES operation.

Located in the North Aquitaine Basin, the experimental site corresponds to a large multi-layered aquifer system. The actual structure of this basin is the result of Pyrenees retro-foreland basin developed from the Campanian to the Miocene (Labat et al., 2021). The local geology corresponds to the top of the system formed by a succession of sedimentary deposits during multiple transgression/regression periods, leading to a vertical heterogeneous sequences of limestone, sandstone and clay from Eocene to Plio Quaternary times (Larroque et al., 2013). The proximal shore location of the site during Oligocene period results in highly horizontally and vertically heterogeneous limestone deposits (Sztrákos and Steurbaut, 2017). A part of the Oligocene formation, composed by highly porous and permeable fossiliferous limestones, constitutes the ATES aquifer target. Around the experimental site, the deep aquifer is confined, as pointed out by seasonal artesianism. Near the surface level, a 10 meters thick unconfined aquifer, made of Plio Quaternary sand and clay deposits, covers the Oligocene formation. At the site location, the Oligocene aquifer limestone is crossed from 12 m depth to 68 m depth.

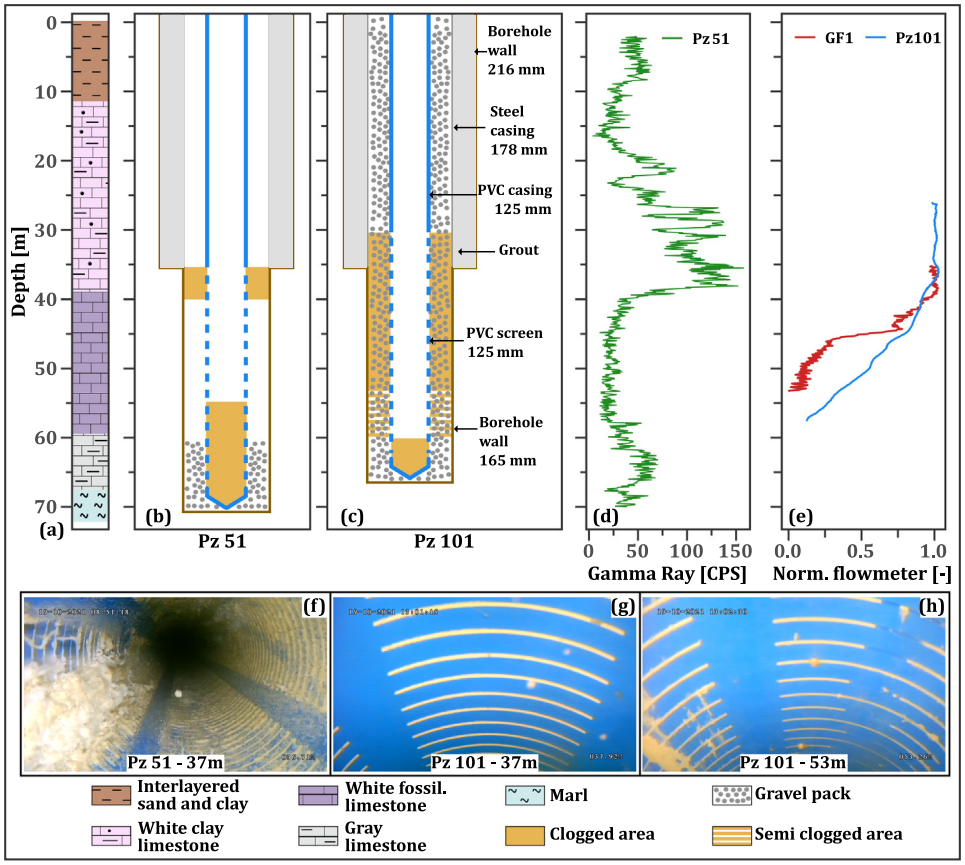


Fig. 2. Field data : (a) Geological section of the site, (b) and (c) technical logs of piezometers with clogged area detected during video inspection, (d) Pz51 gammma ray, (e) GF1 and Pz101 flowmeter logs, and (f,g,h) video inspection screenshots. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

2.2. Field data

The available field data, including gamma ray log, flowmeter logs and drill cuttings observations, highlight a heterogeneous limestone aquifer with a vertical and horizontal unequal distribution of incoming water fluxes. The layer crossed between the depth of 40–60 m (Fig. 2a), is made of fossiliferous white limestone. A developed porosity is identified from microscopic drill cuttings observation. In this layer, the Pz51 Gamma Ray values fluctuate around an average of 25.0 cps, which indicates a low clay content (Fig. 2d).

The GF1 flowmeter reveals that the incoming water is located from the depth of 40 m to 55 m. In this area, a layer of 2 m thick between the depth of 44 m and 46 m produces about the half of the total discharge (Fig. 2e). Another flowmeter realized in Pz101 one year after the end of borehole works completion (and before the beginning of ATES operation) indicates a more homogeneous flux distribution along this borehole (Fig. 2e). Between the depth of 60 m and 67 m, the drill cuttings observations emphasize gray limestones, a less developed porosity and a significant clay content. From 67 m, to 71 m, blue marl is encountered. A mean transmissivity value of 7.0×10^{-4} m^2 s^{-1} is estimated from a two days pumping test in GF1.

Borehole camera inspections show the presence of clogging material in piezometers Pz101 and Pz51 (Fig. 2f, g and h). From the depth of 35 m to 39 m, the Pz51 screens are totally clogged by a mix of yellow brown bentonite clay/mud and white bio-fouling bacteria (Fig. 2f). The screens are clean in the interval length 40–54 m. The Pz51 bottom is filled with clay and bentonite and encountered at the depth of 54.5 m instead of the 71 m initially drilled. We believe that the main reason for the fast clogging is related to the fact that these wells are planned only for monitoring purpose. As a consequence, the piezometers were not sufficiently developed. As for Pz101, the screens are totally clogged by bentonite and mud from the depth of 35 m to 53 m (Fig. 2 g). Below the depth of 53 m to the Pz101 bottom at 60 m, the screens are partially clogged (Fig. 2h). The clogged intervals of the piezometers are represented on the technical logs (Fig. 2b and c).

3. Experiment and methodology

3.1. Experimental set up

ADTS experiments were conducted in Pz101 and Pz51. A loop of BRUsens fiber-optic cable (SOLIFOS — Fiber Optic Systems AG, Switzerland) was lowered to their annular space. It contains two multimode fibers encased in a sealed stainless steel capillary and covered by wire rope and a PVC jacket (Fig. 3a). Two electrical cables were connected to the steel armor of both fiber branches of the loop, to allow the injection of electricity from a power controller. These connections were further sealed by epoxy resin. The induced temperature variation was monitored with a Silixa XT DTS unit reporting temperature every 25 cm at a 2 min sampling interval in Pz51 and 1 min sampling interval in Pz101 (Fig. 3b).

In order to ensure contact with the porous media, while deployed in the borehole, each branch of the FO cable was slightly stretched and attached outside the polyvinyl chloride (PVC) tube every 3 m (Fig. 3c). This installation was similar to a previous study in 25 m depth boreholes (del Val et al., 2021). For both piezometers, 50 m of FO cable of each side of the loop remained outside the borehole for connection to the DTS unit, and for calibration purposes. Once the whole equipment installed, the gravel pack was added down, which embedded the FO cable in the gravel and prevented any cable shaking.

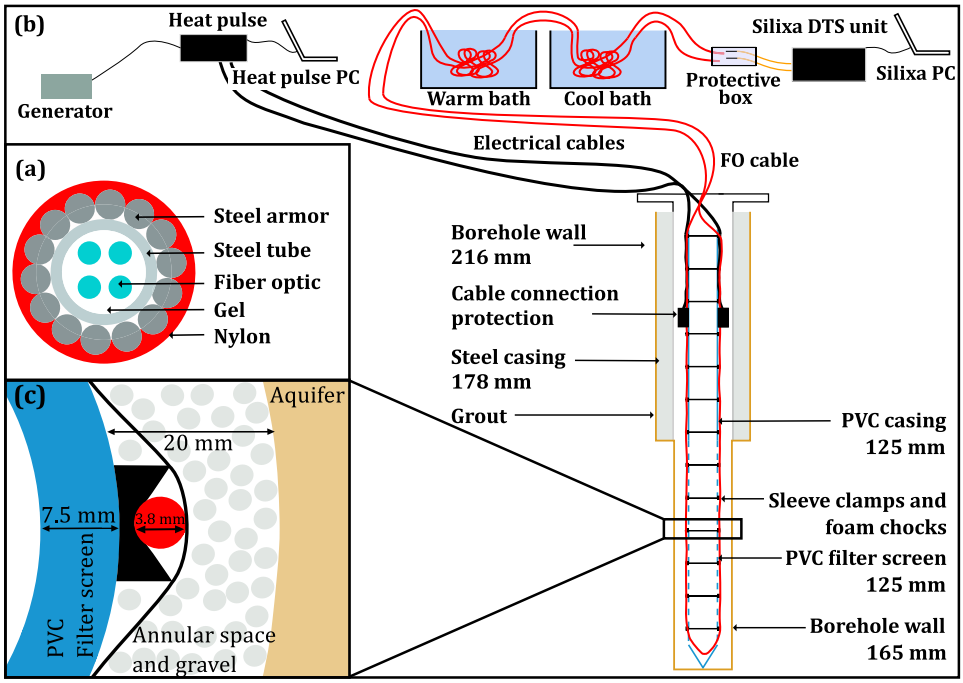


Fig. 3. Device installation scheme : (a) transverse section of the FO cable, (b) scheme of experimental configuration with acquisition well and FO-DTS set up, (c) traverse borehole section representing fiber configuration in annular space.

3.2. Temperature calibration process and DTS spatial resolution

During the experiment, 10 m of each branch from sticking out cables were immersed into separate warm and cold calibration baths for temperature calibration purposes. In order to cover the full range of temperatures that could be expected to be measured along the fiber optic cable, the cold bath was filled with ice and the warm bath was equipped with a resistance to maintain water temperature at 31 °C (Fig. 3). The temperature was recorded in each bath with a PT100 probe (0.1 °C accuracy) and two RBR SoloT probes (0.002 °C accuracy). The temperature in both baths was homogenized with small aquarium bubblers. The loop configuration of the fiber in the boreholes allowed to create a double-ended connection providing accurate temperature measurements under field conditions (van de Giesen et al., 2012). The Python toolbox (des Tombe et al., 2020) was used to check the quality of the DTS measurement and indicated a good calibration of the temperature measured by the DTS device.

The DTS spatial resolution (S.R) during the experience was estimated from the classical 90% step change (Tyler et al., 2009) and the derivative method (Simon et al., 2020). For Pz101, the S.R was estimated between 0.9 and 1.1 m. As the sampling time (S.T) was twice larger for Pz51 experiment, the S.R was better and range from 0.7 to 0.9 m. The S.R of these experiments were more precise than the 2–3 m S.R reported in the study of Tyler et al. (2009) and slightly less precise than the 0.5–0.9 m S.R reported in the laboratory study of Simon et al. (2020).

3.3. Experiments proceedings

The experiment was ran under cross-borehole configuration. It is a common practice for integrated aquifer characterization. It is an efficient method to explain complex hydraulic behavior of aquifers and investigate preferential flow-path in heterogeneous contexts (Butler and Zhan, 2004; Le Borgne et al., 2006a,b; Audouin and Bodin, 2008; Brauchler et al., 2010; Lods et al., 2020; Aliouache et al., 2021). This configuration is therefore of great interest to study thermal transfer by advection at the aquifer scale. The cross-borehole configuration was replicated into Pz101 and Pz51 to verify the reciprocity of the acquired data. The reciprocity can be used to interpret the dynamic of the aquifers and highlights continuity or not of the hydraulic system (Hariga et al., 2010; Delay et al., 2011, 2012; Marinoni et al., 2016; Sanchez-Vila et al., 2016).

The experiment started once the hydrodynamic pseudo-steady state was reached. The first stage consisted in heating the steel mantle of the fiber in the well Pz101 with a constant injection rate of power P trough electrical cables controlled by the Heat Pulse power controller. At the same time, the neighboring piezometer Pz51 was pumped at a constant rate Q varying in between 4.5 and 4.6 m^3/h depending on the experiment (Experiment 1 in Fig. 4). The water level was monitored with vented Level Troll probes (In Situ) in both piezometers. The temperature evolution along the FO cable induced by the heat injection was monitored by the DTS device. At the end of the first stage, without stopping the heating of the fiber, the pumped water was injected in the monitoring well to monitor thermal signals induced by the injection (Experiment 2 in Fig. 4). The injected water came from the aquifer under natural conditions, consequently it was colder than the water warmed by the fiber in the monitoring piezometer. Experiments 3 and 4 (Fig. 4) correspond to ADTS experiment replicated in Pz51.

4. Experimental data analysis

Before the heating phase, the initial temperature distribution was recorded. It represented a C-shape with a minimum temperature of 15.4 °C between the length interval of 35–65 m depth (Fig. 5a). Such a temperature profile is typical for subsurface temperature regime influenced by an increase in ground surface temperature caused by global warming and/or urbanization (Dědeček et al., 2012; Visser et al., 2015; Bayer et al., 2016). Fig. 5b represents transient temperature profiles along Pz51 (455 curves) acquired during the heating phase of the experiment.

As pointed out by the heat map, the U-shape of the cable provided two similar data sets at each sampling depth in Pz51. Data from Pz101 (423 curves, not displayed in Fig. 5) are analyzed further in the manuscript. When the heating started (Experiment 1 and 3), there was

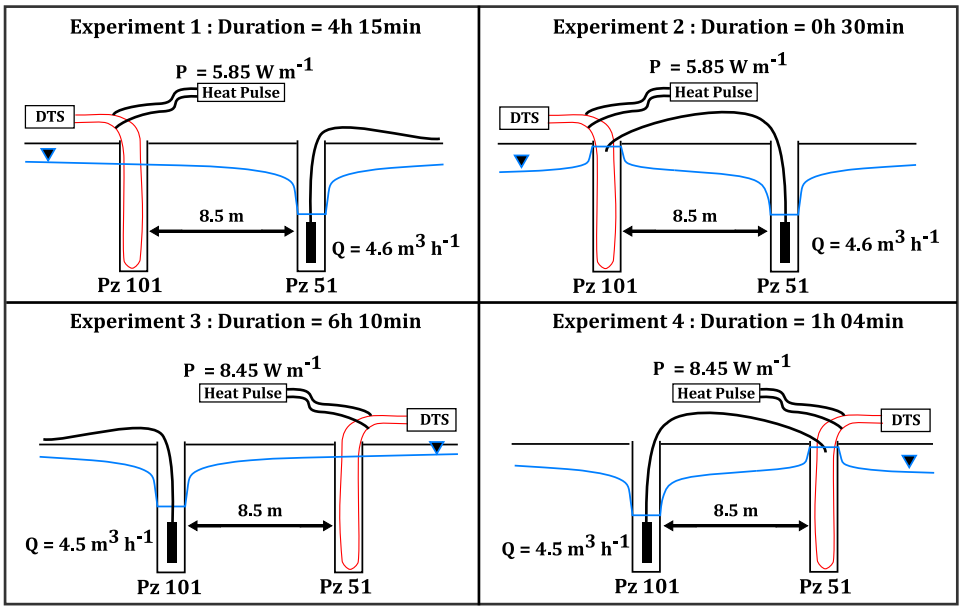


Fig. 4. Scheme of the four experiment configurations with the indicated injected power by the heat pulse P and the pumping rate Q.

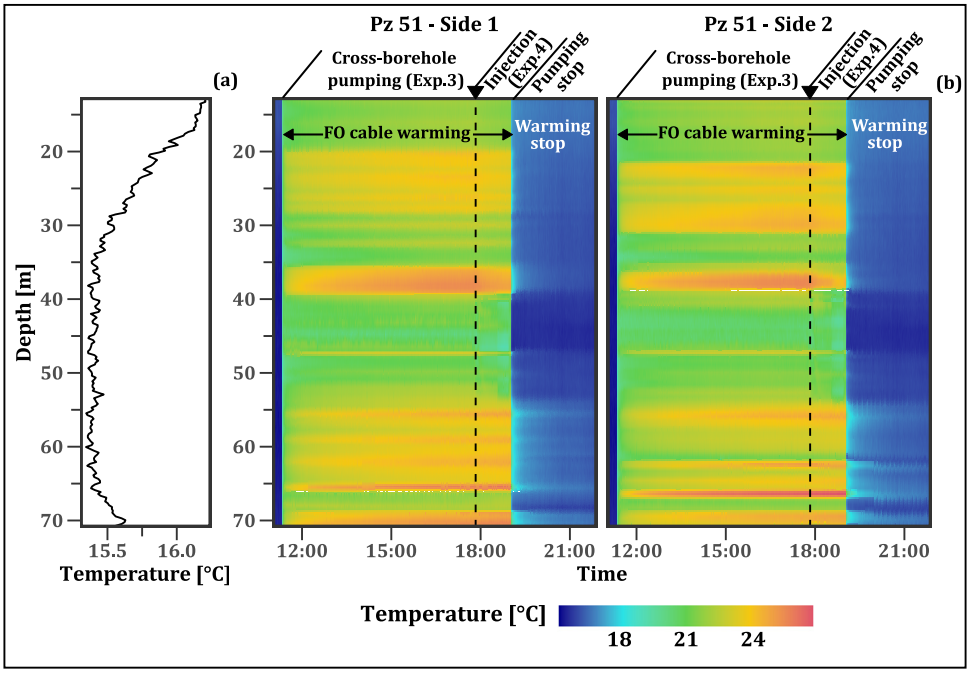


Fig. 5. Temperature distribution along the FO cable in Pz51: (a) natural *insitu* profile before the heating and (b) temperature variation with both time and depth along the two side of the FO loop. The temperatures measured at each side of the U cable are similar.

a quick temperature increase along the cable, followed by a phase of slow change. As expected, differences of temperature elevation along the wells were observed due to thermal and hydrodynamic properties contrasts of aquifer layers (Simon et al., 2021; Zhang et al., 2020). In some intervals, like 35–40 m depth the temperature reached a value of 25 °C, whereas at 45 m depth the temperature quickly stabilized around 18 °C. Such differences in thermal behavior along the well are analyzed in the following sections. During the water injection (Experiments 2 and 4) the temperature changes were less significant. Once the electrical power switched off, the temperature along the FO cable decreased drastically.

4.1. Preferential water flux pathways during reinjection

The temperature anomalies measured during reinjection Experiments 2 and 4 informed about the preferential flow paths in front of the screens during injection. These anomalies were emphasized by the relative temperature anomaly ΔT_{inj} (Eq. (1)) induced by the injected water:

$$\Delta T_{inj} = T_t - T_{inj.start} \quad (1)$$

where $T_{inj.start}$ is the temperature profile just before the beginning of water injection, and T_t the temperature profile measured at the time t after the beginning of the injection. The evolution of ΔT_{inj} profiles revealed three different zones in both piezometers (Fig. 6a and c).

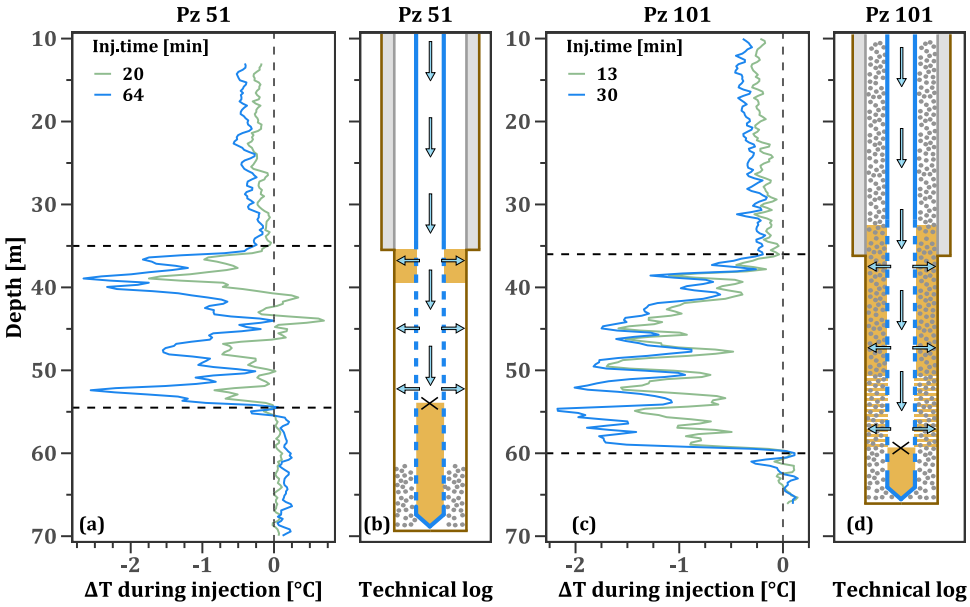


Fig. 6. Experimental injection results : (a) and (c) relative temperature anomaly profiles ΔT_{inj} at different times since the beginning of the injection; (b) and (d) technical logs with identified clogged areas from video inspection and flux pathways deduced from injection experiment represented by blue arrows. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

First, above the screens, i.e., at 35 m depth, in the grouted area, the injected water induced a slight temperature decrease less than 0.5 °C in both wells. This was related to conductive heat transfer due to colder water injection. For depths greater than 54.5 m in Pz51 and 60 m in Pz101, the water temperature continued to increase due to the cable heating. It indicated that, the injected water did not influence the evolution of borehole temperature. The latter means that the injected water did not infiltrate below these depths. Finally, in the middle parts of both wells, an overall significant temperature decrease induced by the local flow increase occurred in both piezometers. The water infiltration areas are identified on the technical log of both piezometers (Fig. 6b and d). The thermal response was heterogeneous along the screens in both piezometers. For example, the layers at the depths of 39 m and 53 m in Pz51, or 54 m in Pz 101 were more sensitive to the cooling and reached a ΔT_{inj} of −2.0 °C. Other layers, especially in Pz51 (41, 44 and 50 m), were barely affected by the cooling.

The short duration of the Experiments 2 and 4 (30 min and 64 min respectively) did not allow a quantitative interpretation of the temperature transients and only provided a qualitative overview about zones of enhanced groundwater flow.

4.2. Use of analytical solutions for parameter distribution estimation

4.2.1. General interpretation framework

ADTS data interpretation of Experiment 1 and Experiment 3 consisted on estimating vertically distributed parameters λ and q in the observation borehole. The parameters were calculated at each sampling depth. It was achieved through the assessment of experimental temperature evolution curves measured by the DTS device, following the theoretical approach developed by Simon et al. (2021). The interpretation framework was inspired from the one proposed by a free available Matlab Toolbox (Simon and Bour, 2022), and detailed further.

The two-dimensional heat transport in saturated porous media (Eq. (2)) involving conduction and advection processes is expressed as (Carslaw and Jaeger, 1959) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_t \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - q \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} \frac{\partial T}{\partial x}, \tag{2}$$

where T is the temperature [K], x and y are the coordinates [m], q is the Darcy velocity [m s^{-1}], $\rho_b c_b$ the volumetric heat capacity of the rock/fluid matrix [J m^{-3} K^{-1}], $\rho_w c_w$ the volumetric heat capacity of the water [J m^{-3} K^{-1}]. Ignoring thermal dispersion is a common practice for the interpretation of ADTS experiments (Bakker et al., 2015; Simon et al., 2021; del Val et al., 2021). The consequences of this choice on the estimation of the parameters are discussed in Section 5.2. Therefore, in Eq. (2), only thermal diffusivity D_t [m^2 s^{-1}] is involved. It depends on λ the bulk thermal conductivity [W m^{-1} K^{-1}] and is expressed as :

$$D_t = \frac{\lambda}{\rho_b c_b}. \tag{3}$$

Considering whether or not natural flow in the aquifer occured, Eq. (2) could be solved for a linear heating source involving the Instantaneous Line Source model (ILS) or Moving Instantaneous Line Source model (MILS) (Carslaw and Jaeger, 1959). The ILS solution expressed as follows (Eq. (4)), considers no-flow within the aquifer and is the solution to Eq. (2) without considering the second term:

$$\Delta T(r,t)_{ILS} = \frac{P}{4\pi\lambda} \left[E_i \left(\frac{-r^2}{4tD_t} \right) \right], \tag{4}$$

where ΔT is the temperature evolution, P [W m^{-1}] is the constant heating power per unit length, $r^2 = x^2 + y^2$ is the distance from the heating source.

The MILS solution (Eq. (5)) is adapted from the ILS and considers uniform flow across the heat source to take into account heat transfer by advection. It is expressed as :

$$\Delta T(r,t)_{MILS} = \frac{P}{4\pi\lambda} \exp\left[\frac{qr}{2D_t} \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \right] W(\alpha,\beta) \tag{5}$$

with $W(\alpha,\beta)$ the Hantush well function (Hantush, 1956). λ and q are estimated from these two solutions.

The previous equations did not consider thermal effects induced by the heating of the cable itself and the borehole material configuration. Just after heat injection in the FO cable, the temperature increase was mainly associated, first, to the conductive skin effect in the FO cable components and secondly to the borehole material arrangement (del Val et al., 2021; Simon et al., 2021). It generated a rapid increase of the temperature during the first time after heat injection. The effect of the cable was the same along the borehole. Nevertheless, the effect of the borehole material on the temperature increase could be different along the FO, depending on the cable position in the gravel pack and mud and its relative distance to the PVC tube. This aspect lead to a difference

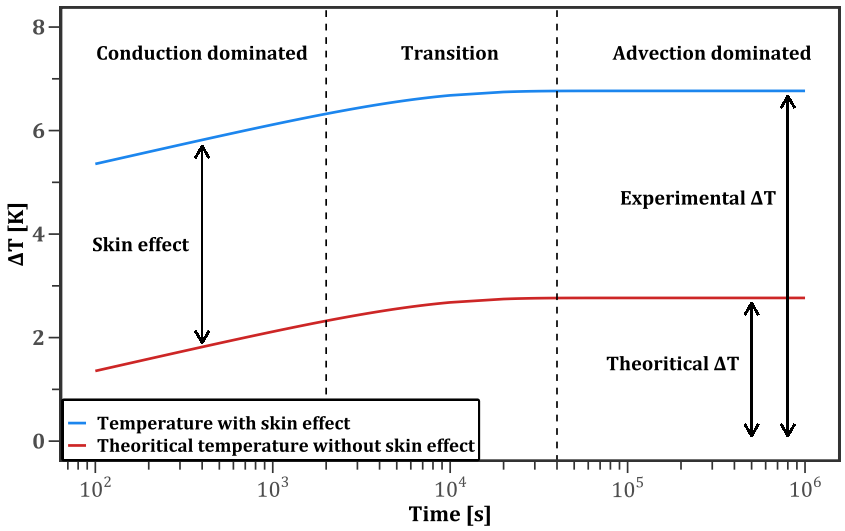


Fig. 7. Theoretical temperature evolution in response to a heat pulse in saturated porous media with and without skin effect of the FO cable. *Source:* Adapted from del Val et al. (2021).

between the theoretical temperature calculated with ILS and MILS and the ΔT_{exp} measured by FO-DTS. This difference was taken into account in a ΔT_{FO} term (Fig. 7). Thus, to model the temperature increase during the experiment, ΔT_{FO} was added to the ILS and MILS solutions. This was solved by trial/error adjustments between ILS model and experimental data.

4.2.2. Parameters quantification

The ILS and MILS solutions were adjusted on the experimental data to estimate the λ and q values associated with the temperature evolution (Fig. 8). The method consisted in reducing the Root Mean Square Error between the observed and modeled temperature using the Brent algorithm (Brent, 1974). Four typical thermal behaviors were identified during the ADTS experiments, ranging from no-flow and low-flow towards medium-flow and high-flow.

For no-, low- and medium-Darcy velocity ($<2.0 \times 10^{-5}$ m s^{-1}), the experimental points before 1000 s were assimilated to the skin effect. Thus, these points were excluded from λ fitting and estimation procedure (Fig. 8 a–c). When only conductive heat transfer occurred, (i.e. no-flow) the temperature increased linearly along a log time scale during the whole experimental time (Fig. 8a). In this case, the ILS solution was used to estimate λ. Advection transfer generated a transition phase until temperature stabilization (Fig. 8b and c), and both analytical solutions were used to estimate λ and q.

High groundwater flux generated quick temperature stabilization. When the Darcy velocity was too high ($>2.0 \times 10^{-5}$ m s^{-1}), the sampling time of the experiments was unsuited to visualize the linear part of the thermal evolution plot (an example is provided in Fig. 8d). Consequently, thermal conductivity λ could not be estimated properly and was fixed at 2.8 W m^{-1} K^{-1}. This value corresponds to an average value for limestone rocks (Dalla Santa et al., 2020). Further discussion about the impact of λ values on the estimated q value is given in Section 5.2.

The analytical models had a good fit to the field data, with the value of the Root Mean Square Error (RMSE) generally remaining low, i.e. RMSE<0.1. The maximum value of 0.15 was calculated for the high Darcy velocity interval.

Low q values below 3.0 $\times$ 10^{-6} m s^{-1} should be considered cautiously. It was demonstrated that an experimental time of 24 h with an error of $\pm$0.05 °C on the field temperature measurement, lead to errors above 20% on q estimation (Simon et al., 2021). This error grew exponentially with the decrease of estimated q.

4.2.3. Groundwater and thermal conductivity distribution

Vertical distribution of λ and q were computed for each sampling depth along the two branches of the U cable (Fig. 9). In each piezometer, the 2 branches gave similar parameter estimations, suggesting the consistency of the data acquisition and its processing. The uncertain q values below 3.0×10^{-6} m s^{-1} were represented in a shaded area on the corresponding profiles (Fig. 9a and c).

Despite the short distance between Pz101 and Pz51 (8.5 m), the estimated q profiles showed major discrepancies in front of the borehole screens. These q profiles were not equally distributed along the flowing areas of both piezometers, highlighting a reciprocity gap. In Pz51, high Darcy velocities of 5.0×10^{-5} m s^{-1} were estimated in the intervals of 43–46 m and 67–68 m (Fig. 9a). A lower peak of 1.0×10^{-5} m s^{-1} was detected in one branch at the depth of 62 m. From the depth of 46 m to 53 m, the q value decreased from 7.0×10^{-6} m s^{-1} to 4.0×10^{-6} m s^{-1}. As for Pz101, the ADTS experiment allowed to estimate a high Darcy velocity superior of 2.0×10^{-5} m s^{-1} only in the thin layer at the depth of 62 m. A medium flow of an average of 5.0×10^{-6} m s^{-1} was estimated between the length interval 54–61 m (Fig. 9c).

In front of the screens, the low λ values were always estimated in front of no- or low flux areas. In Pz51, a value close to 1.0 W m^{-1} K^{-1} was estimated in the length intervals 35–39 m and 54–67 m. On the contrary, high λ values were calculated where significant q values were calculated. This trend was also detected in Pz101. High λ values of 3.0 W m^{-1} K^{-1} were measured in front of the highest Darcy velocity area at the depth of 62 m, whereas the values fluctuated around 1.5 W m^{-1} K^{-1} in the rest of the piezometer.

5. Discussion

5.1. Consistency of the ADTS results in relation with available field data

The parameters profiles obtained from ADTS experiments were compared to available independent field data. The q profile in Pz51 emphasized the same high productive layer as the one detected in the GF1 flowmeter log at the depth of 44–46 m. The Darcy velocity reached a value of 5.0×10^{-5} m s^{-1} at this depth. Nevertheless, the flowmeter log achieved one year after borehole completion in Pz101 suggested a homogeneous flux distribution probably influenced by the clogging development along this borehole. But, the ADTS detected a medium Darcy velocity of 5.0×10^{-6} m s^{-1} where the screens are just partially clogged below the depth of 53 m.

In both piezometers, weak or zero Darcy velocity values were measured in front of clogged layers detected during video inspection

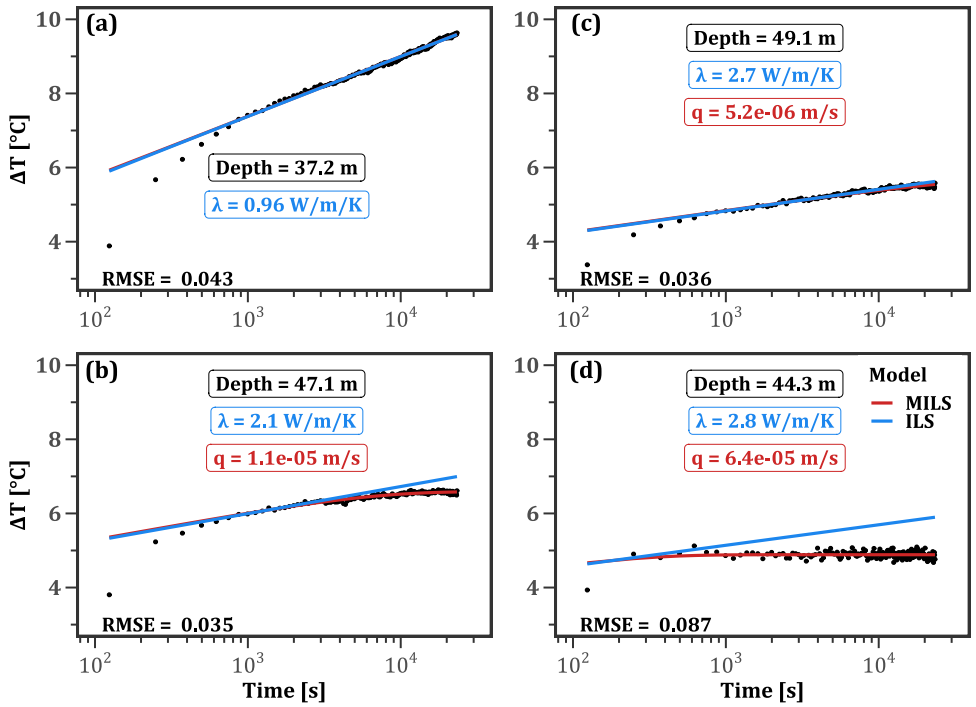


Fig. 8. Determination of thermal conductivity λ and Darcy velocity q (piezometer Pz51) when, (a) only conduction occurs, (b) low flux is detected, (c) medium flux and (d) high flux occur with an early temperature stabilization due to higher groundwater flow.

(Fig. 2f, g, and h). The λ values of these layers were always inferior to 1.5 $W\,m^{-1}\,K$ (Fig. 9b and d). It is typical for clogging materials like clay, bentonite and porous iron hydroxides (Dalla Santa et al., 2020; Cho et al., 2008; Tang et al., 2008; Gjengedal et al., 2020) and does not correspond to the typical values of the thermal conductivity of the limestone, i.e. 3.0 $W\,m^{-1}\,K$. These observations highlight the potential of ADTS experiments to locate zones of borehole clogging. We believe that the main reason for the clogging is related to the fact that these wells were planned only for monitoring purpose, and, as a consequence, were not sufficiently developed after their completion. The clogged materials did not have the same position along both boreholes. It seems to be the main explanation for reciprocity gaps between parameters distribution in Pz51 and Pz101. The drill cuttings assessment revealed the same geology in both boreholes. But, a fracture or a more productive area might be intercepted in Pz51 and GF1 and not in Pz101 and could be the reason of a high flux in Pz51 and GF1, involving the dilution of the bentonite in Pz51 and not in Pz101.

The video camera showed bentonite and clay at the bottom of both piezometers. The position of the plugs, at the depth of 54.5 m in Pz51 and 60 m in Pz101, corresponded exactly to the limits highlighted by Experiment 2 and Experiment 4 (Fig. 6). It confirmed that during injection, the water did not flow in the lower part of the piezometers. Nevertheless, during Experience 1 and Experience 3, some fluxes were detected below the well bottoms, at the depths of 62 m in Pz101 and 62 m and 68 m in Pz51 (Fig. 10). It may point out that at these depths, the boreholes were clogged but the deposits were not completely compacted/encrusted into the annular space. High thermal conductivity values (>3.0 $W\,m^{-1}\,K^{-1}$) may confirm a likely dilution of the mud in these intervals.

5.2. Uncertainty and resolution of parameters calculation

In highly productive layers, the groundwater flow generated a fast temperature stabilization. In this context, ADTS experiments with a sampling time of more than 1 min are unsuited to visualize the linear part of the ΔT_{exp} plot before the temperature stabilization (Fig. 8d). Consequently, it is not possible to accurately estimate the thermal conductivity λ. Consequently, values of thermal conductivity consistent with the properties of the porous material (Dalla Santa et al., 2020) encountered in the borehole must be chosen as the default value. However, in high productive context, it is possible to demonstrate the low impact of λ on the estimated Darcy velocity (Fig. 11). A sampling time of a few seconds would be necessary to visualize the conductive phase in this context. Nevertheless, a short sampling time produce noisier data which can also lead to high uncertainty (des Tombe et al., 2020).

As mentioned in Section 4.2.1, the analytical model used in this study ignored thermal dispersion. By doing this, the thermal diffusivity is overestimated. It could be another source of error that could lead to underestimating q, especially in high-flow areas. It was demonstrated that an estimated q of 5.0×10^{-6} $m\,s^{-1}$ without considering the thermal dispersion will yield a q of 9.0×10^{-6} $m\,s^{-1}$ if the longitudinal dispersivity is set at 0.1 m (des Tombe et al., 2019). Nevertheless, in our experiment, the effect of thermal dispersion should be very small, if not negligible, since here, we use the same cable as a heat source and for measuring temperature.

Moreover, the vertical resolution of the DTS is a limit to measure temperature variations induced by layers with a thickness ranging this resolution. Even if a thin layer is detected by the FO DTS experiment, the measured temperature in front of this layer is a result of the surrounding conditions leading to uncertainty in parameter estimation (des Tombe et al., 2019; Simon et al., 2020).

Finally, parameters estimation, especially λ estimation, is influenced by the test configuration. The resolved parameters are unlikely to provide the true aquifer properties since the FO cable is located in the borehole annular space, close to the PVC tube, surrounded by the gravel and clogging material. Despite these uncertainties, one should rather focus on relative parameter variation to identify clogging locations and productive layers along the borehole.

5.3. Advantages and limits of the proposed ADTS experiments

5.3.1. Comparison with common field surveys

These experiments demonstrated that ADTS could provide in short time information regarding two crucial concerns for ATES operation:

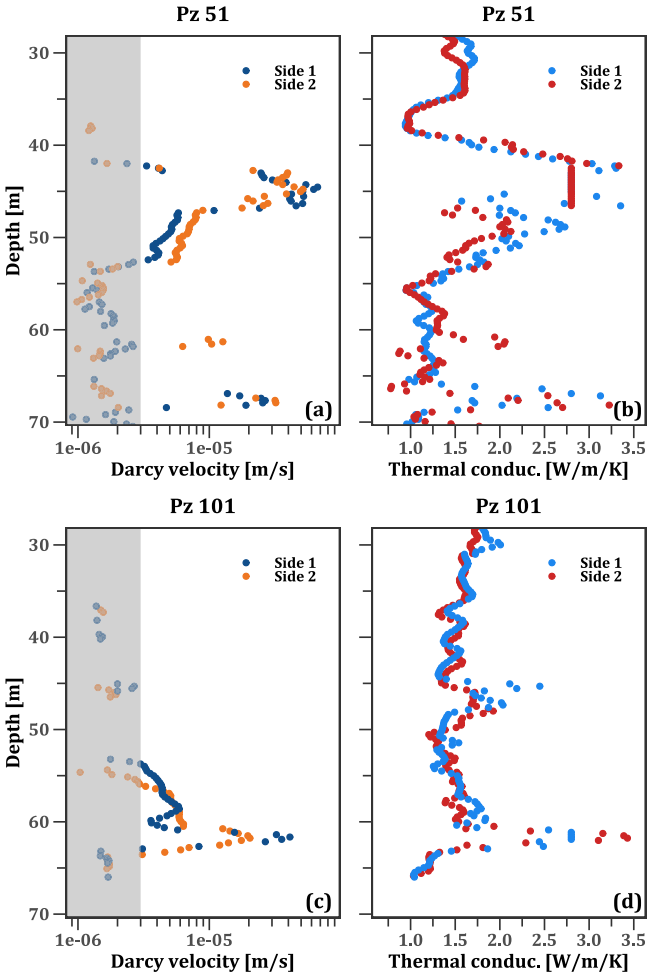


Fig. 9. Parameter profiles estimated from FO-ADTS experiments in front of screened areas : (a and c) groundwater flux profiles, shaded areas correspond to estimated values with high uncertainty, (b and d) thermal conductivity profiles.

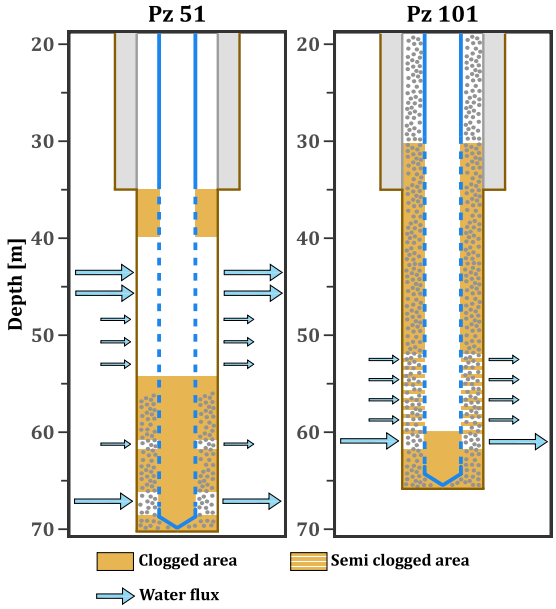


Fig. 10. Interpretation scheme of boreholes clogging and flux location according to video inspections, parameters distributions and injection flow paths.

(i) the method provides important insights regarding the aquifer heterogeneity in thermal and hydrodynamic properties and (ii) it enables the detection of clogging locations in the borehole. ADTS experiment presents the advantage to estimate a distribution of parameters while pumping tests and TRT give an average value of hydrodynamics and thermal properties. Moreover, these surveys require much longer time of data collection (i.e., at least 48 h versus 4–6 h required for the completion of ADTS tests). However, TRT and pumping tests are very simple to deploy, and their well-known and relatively quick interpretation can give a first overview of the global aquifer dynamics.

Unlike ADTS, flowmeter tests are not designed to provide information about conductive heat transfers which could be of great interest in geothermal projects. Nevertheless, the single-hole flowmeter is a common survey that can be achieved in a shorter time than ADTS, after a borehole completion. It has also the advantage of a more simple setup than the ADTS one. It provides a local vertical distribution of the fluxes at the logging well, and is used to estimate permeability variations along the aquifer (Molz et al., 1989, 1994; Paillet, 1998). The application of the flowmeter test in cross-borehole configuration proved to be also an efficient methodology to have a better characterization of aquifer dynamics at a large scale. It allows highlighting connectivity of preferential groundwater flow paths (Le Borgne et al., 2006a,b; Audouin and Bodin, 2008).

The ADTS experiments give thermal conductivity only in the vicinity of the monitoring well. To characterize aquifer heterogeneity and thermal diffusivity on large scales, heat tracer tests with multiple monitoring well may be more powerful experimental field test (Klepikova et al., 2016). It provides additional information compared to solute tracer tests, since the thermal diffusivity is higher than the solute dispersion (Irvine et al., 2015; La Bernardie et al., 2018). Consequently, heat tracer tests are more suited for geothermal sites. However, due to the ability of heat to propagate through solids by diffusion, completion of heat tracer tests may take much longer time compared to solute tracer tests (days vs. hours). Irvine et al. (2015) and La Bernardie et al. (2018). It can also be difficult to realize and interpret compared to ADTS experiments.

Recent studies (Gjengedal et al., 2020, 2021) based on short step-test combined with temperature and hydraulic performance monitoring, first demonstrated a new technique enabling the detection of clogging and its further evolution characterization in geothermal systems. While this method allows the detection of clogging in the entire system, it does not precise the clogging location in the boreholes. The new characteristic of our ADTS interpretation is to image clogging distribution in the monitoring well. Therefore, this new strategy and the one proposed by Gjengedal et al. (2020) could complement each other. Once deployed in the borehole, and all cable connections realized, ADTS technology could be used as a permanent *in-situ* device. It presents a certain advantage as it can collect a large amount of data without opening the borehole and removing the submersible pump. The aim would be to monitor clogging evolution and aquifer properties changes over time and to plan and adapt maintenance works before major deterioration of the wells. This aspect would be time and financial saving compared to diagnostic well works, or video camera inspections to visualize clogging development. It is also an advantage to have a permanent fiber in the borehole. It allows to warm the cable and collect the data with the DTS unit without deploying the fiber in the borehole before each experiment like the methodology proposed by Maldaner et al. (2019).

5.3.2. Potential limits of cross-borehole ADTS experiments in a geothermal operational context

Our experiments were achieved in wells made of PVC tubes and screens. This material has a low thermal conductivity of 0.2 $W\,m^{-1}\,K^{-1}$. It gives a limited impact on the temperature evolution generated by the warming of the fiber. This impact was included in the skin effect during our interpretation process. Nevertheless, a lot of wells are made

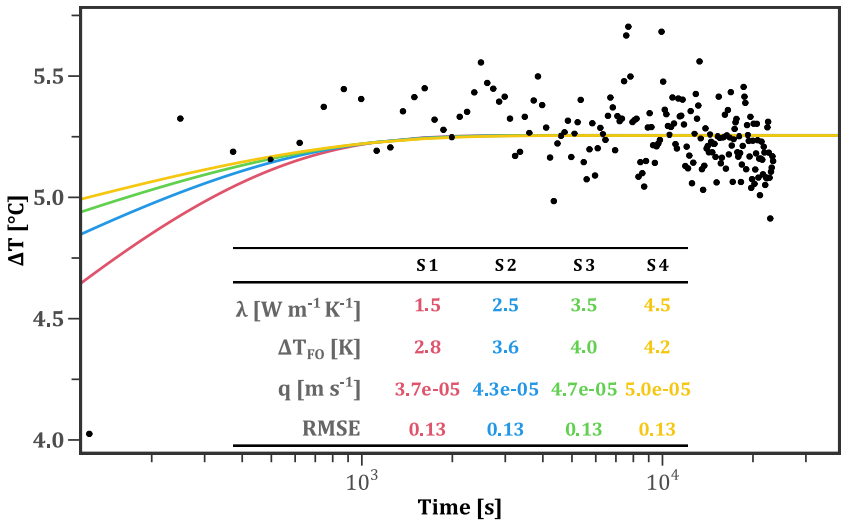


Fig. 11. Analytical solutions generated from the framework to reproduce experimental temperature evolution at 45.2 m in Pz51 with a large scale of λ from 1.5 to 4.5 W m^{-1} K^{-1}.

of steel or stainless steel. Because of the high thermal conductivity of this material (15–30 W m^{-1} K^{-1}), the energy demand may be significant to create a temperature increase detectable by the DTS device. A numerical model taking into account a well equipped with steel material would be necessary to inspect the feasibility of ADTS experiment in this configuration.

While on the ENSEGID site, the exploited aquifer is found at a shallow depth (35–65 m), in other sites, the geothermal target may be deeper. The longer cable length required for deeper applications will generate an additional economic cost, and the deployment of the technology in the borehole will be more time-consuming. Moreover, longer heated section of the cable will require more power injection to reach similar temperature variations. In this context, it is a major concern to provide suitable devices able to inject safely more electrical power.

Finally, the ENSEGID site is equipped with several wells close to each other, thus offering a good opportunity to perform ADTS experiments in cross-borehole configuration. Monitoring and pumping boreholes are only separated by a distance of 8.5 m and a flowrate inferior to 5.0 m^3 h^{-1} was enough to induce groundwater flux measurable by the ADTS experiment. Nevertheless, on geothermal sites just equipped with a warm and a cold well, the high distance (generally more than 100 m) between the wells to avoid thermal breakthrough, may be a limit to perform cross-borehole ADTS experiments. Depending on the hydrogeological context and the capacity of the installed submersible pump, the groundwater velocity at the monitoring well may not be detectable by the presented ADTS experiment configuration and interpretation scheme. In this case, a single-hole ADTS configuration, like the one proposed by Read et al. (2014), may be more suited.

6. Conclusion

This study demonstrated the potential of ADTS experiments to collect and interpret a large amount of data by placing a FO between the borehole screens and the porous media. Our study allowed to characterize simultaneously the distribution of thermal conductivity and Darcy velocity in a short time (4–6 h per experiment), and to get useful insights about the water injection pathways in boreholes. Moreover, the data provided information concerning the position of the clogging development along the screens.

In the future, it would be certainly of interest to test ADTS experiments on a new operational geothermal site. The aim would be to determine initial parameters profiles before the beginning of ATES operation in the production/injection wells, and then, monitor their evolution during a long-term operation to have an overview on the wells performance behavior.

CRediT authorship contribution statement

J. Godinaud: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Writing – original draft, Visualization. **M. Klepikova:** Writing – original draft, Writing – review & editing, Funding acquisition, Resources. **F. Larroque:** Writing – review & editing. **N. Guihéneuf:** Writing – review & editing, Conceptualization, Methodology, Resources. **A. Dupuy:** Supervision, Conceptualization, Project administration, Funding acquisition. **O. Bour:** Writing – review & editing, Conceptualization, Supervision, Funding acquisition, Resources.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This research was partly funded by the ANR project EQUIPEX CRITEX (grant number ANR-11-EQPX-0011). Jeremy Godinaud acknowledges financial and technical support by Storengy and Antea Group for technical support. Maria Klepikova acknowledges financial support by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Sklodowska Curie grant agreement No 838508.

References

Aliouache, M., Wang, X., Fischer, P., Massonnat, G., Jourde, H., 2021. An inverse approach integrating flowmeter and pumping test data for three-dimensional aquifer characterization. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 603, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126939.

Audouin, O., Bodin, J., 2008. Cross-borehole slug test analysis in a fractured limestone aquifer. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 348 (3–4), 510–523. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.021.

Bakema, G., 2001. Well and Borehole Failures and Solutions in Underground Thermal Energy Storage. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10214.98885.

Bakker, M., Caljé, R., Schaars, F., van der Made, K-J., de Haas, S., 2015. An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment. Water Resour. Res. (ISSN: 0043-1397) 51, 2760–2772. http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016632, 1944-7973.

Bayer, P., Rivera, J.A., Schweizer, D., Schärli, U., Blum, P., Rybach, L., 2016. Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. Geothermics (ISSN: 03756505) 64, 289–299. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.011.

Beier, R.A., Smith, M.D., Spitler, J.D., 2011. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. Geothermics (ISSN: 03756505) 40, 79–85. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.12.007.

Bense, V.F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Chalari, A., Mondanos, M., Ciocca, F., Selker, J.S., 2016. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology: SUBSURFACE DTS. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 52 (12), 9259–9273. http://dx.doi.org/10.1002/2016WR018869.

Bloemendal, M., Hartog, N., 2018. Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems. Geothermics (ISSN: 03756505) 71, 306–319. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.009.

Bloemendal, M., Olsthoorn, T., 2018. ATES systems in aquifers with high ambient groundwater flow velocity. Geothermics (ISSN: 03756505) 75, 81–92. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.005.

Bodin, J., Delay, F., de Marsily, G., 2003. Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: 2. mathematical formalism. Hydrogeol. J. (ISSN: 1431-2174) 11, 434–454. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-003-0269-1, 1435-0157.

Brauchler, R., Hu, R., Vogt, T., Al-Halbouni, D., Heinrichs, T., Ptak, T., Sauter, M., 2010. Cross-well slug interference tests: An effective characterization method for resolving aquifer heterogeneity. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 384 (1–2), 33–45. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.004.

Brent, R.P., 1974. Algorithms for minimization without derivatives. Math. Comp. (ISSN: 00255718) 28 (127), 865. http://dx.doi.org/10.2307/2005713.

Bridger, D.W., Allen, D.M., 2014. Influence of geologic layering on heat transport and storage in an aquifer thermal energy storage system. Hydrogeol. J. (ISSN: 1431-2174) 22, 233–250. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-013-1049-1, 1435-0157.

Butler, J.J., Zhan, X., 2004. Hydraulic tests in highly permeable aquifers. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 40 (12), http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002998.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Press, ISBN: 978-0-19-853368-9.

Cho, W., Lee, J.-O., Kwon, S., 2008. Thermal conductivity of compacted bentonite and bentonite-sand mixture. J. Korean Radioact. Waste Soc. URL https://www.semanticscholar.org/paper/Thermal-Conductivity-of-Compacted-Bentonite-and-Cho-Lee/3dcdbbee80e6104837c4961adfaf93f744b771b8.

Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., Bertermann, D., Mendrinos, D., Pasquali, R., Perego, R., Pera, S., Di Sipio, E., Cassiani, G., De Carli, M., Bernardi, A., 2020. An updated ground thermal properties database for GSHP applications. Geothermics (ISSN: 03756505) 85, 101758. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758.

del Val, L., Carrera, J., Pool, M., Martínez, L., Casanovas, C., Bour, O., Folch, A., 2021. Heat dissipation test with fiber-optic distributed temperature sensing to estimate groundwater flux. Water Res. (ISSN: 0043-1397) 57, http://dx.doi.org/10.1029/2020WR027228, 1944-7973.

Delay, F., Ackerer, P., Belfort, B., Guadagnini, A., 2012. On the emergence of reciprocity gaps during interference pumping tests in unconfined aquifers. Adv. Water Resour. (ISSN: 03091708) 46, 11–19. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.002.

Delay, F., Ackerer, P., Guadagnini, A., 2011. Theoretical analysis and field evidence of reciprocity gaps during interference pumping tests. Adv. Water Resour. (ISSN: 03091708) 34, 592–606. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.006.

des Tombe, B.F., Bakker, M., Smits, F., Schaars, F., Made, K-J., 2019. Estimation of the variation in specific discharge over large depth using distributed temperature sensing (DTS) measurements of the heat pulse response. Water Resour. Res. (ISSN: 0043-1397) 55, 811–826. http://dx.doi.org/10.1029/2018WR024171, 1944-7973.

des Tombe, B.F, Schilperoort, B., Bakker, M., 2020. Estimation of temperature and associated uncertainty from fiber-optic Raman-spectrum distributed temperature sensing. Sensors (ISSN: 1424-8220) 20, 2235. http://dx.doi.org/10.3390/s20082235.

Dong, J., Li, X., Han, B., Tian, R., Yu, H., 2022. A regional study of in-situ thermal conductivity of soil based on artificial neural network model. Energy Build. (ISSN: 03787788) 257, 111785. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111785.

Dědeček, P., Šafanda, J., Rajver, D., 2012. Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia. Clim. Change (ISSN: 0165-0009) 113 (3–4), 787–801. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0373-5, 1573-1480.

Ferguson, G., 2007. Heterogeneity and thermal modeling of ground water. Ground Water (ISSN: 0017-467X) 45, 485–490. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00323.x, 1745-6584.

Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P., 2018. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. Renew. Sustain. Energy Rev. (ISSN: 1364-0321) 94, 861–876. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057.

Freifeld, B.M., Finsterle, S., Onstott, T.C., Toole, P., Pratt, L.M., 2008. Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor. Geophys. Res. Lett. (ISSN: 0094-8276) 35 (14), L14309. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034762.

Ganguly, S., Mohan Kumar, M.S., 2014. Analytical solutions for movement of cold water thermal front in a heterogeneous geothermal reservoir. Appl. Math. Model. (ISSN: 0307904X) 38, 451–463. http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.06.031.

Gao, L., Zhao, J., An, Q., Wang, J., Liu, X., 2017. A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage. Energy Procedia (ISSN: 18766102) 142, 3537–3545. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.242.

Ghaebi, H., Bahadori, M.N., Saidi, M.H., 2017. Economic and environmental evaluation of different operation alternatives to aquifer thermal energy storage in Tehran, Iran. Sci. Iran. 14.

Gjengedal, S., Ramstad, R.K., Hilmo, B.O., Frengstad, B.S., 2020. Fouling and clogging surveillance in open loop GSHP systems: A systematic procedure for fouling and clogging detection in the whole groundwater circuit. Bull. Eng. Geol. Environ. (ISSN: 1435-9529) 79, 69–82. http://dx.doi.org/10.1007/s10064-019-01556-5, 1435-9537.

Gjengedal, S., Stenvik, L.A., Ramstad, R.K., Ulfsnes, Jan I., Hilmo, Bernt O., Frengstad, Bjørn S., 2021. Online remote-controlled and cost-effective fouling and clogging surveillance of a groundwater heat pump system: A case study from Lena Terrace in Melhus, Norway. Bull. Eng. Geol. Environ. (ISSN: 1435-9529) 80, 1063–1072. http://dx.doi.org/10.1007/s10064-020-01963-z, 1435-9537.

Hakala, P., Vallin, S., Arola, T., Martinkauppi, I., 2022. Novel use of the enhanced thermal response test in crystalline bedrock. Renew. Energy (ISSN: 09601481) 182, 467–482. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.020.

Hantush, M.S., 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Trans. AGU (ISSN: 0002-8606) 37, 702. http://dx.doi.org/10.1029/TR037i006p00702.

Hariga, N.T., Ben Abda, A., Bouhlila, R., de Dreuzy, J.-R., 2010. Definition and interests of reciprocity and reciprocity gap principles for groundwater flow problems. Adv. Water Resour. (ISSN: 03091708) 33, 899–904. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.04.015.

Huber, H., Arslan, U., 2012. Geothermal Field Tests with Forced Groundwater Flow. Stanford University, Stanford, California, p. 5.

Hurtig, E., Groswig, S., Kühn, K., 1996. Fibre optic temperature sensing: application for subsurface and ground temperature measurements. Tectonophysics (ISSN: 00401951) 257, 101–109. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(95)00124-7.

Irvine, D.J., Simmons, C.T., Werner, A.D., Graf, T., 2015. Heat and solute tracers: How do they compare in heterogeneous aquifers? Groundwater (ISSN: 0017467X) 53, 10–20. http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12146.

Klepikova, M., Brixel, B., Roubinet, D., 2022. Analysis of thermal dilution experiments with distributed temperature sensing for fractured rock characterization. J. Hydrol. (ISSN: 0022-1694) 610, 127874. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127874.

Klepikova, M., Wildemeersch, S., Hermans, T., Jamin, P., Orban, P., Nguyen, F., Brouyère, S., Dassargues, A., 2016. Heat tracer test in an alluvial aquifer: Field experiment and inverse modelling. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 540, 812–823. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.066.

Kruseman, G.P., Ridder, N.A. de, 1994. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, second ed. (compl. rev.), repr ed. In: ILRI Publication, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, ISBN: 978-90-70754-20-4, OCLC: 258203525.

La Bernardie, J., Bour, O., Le Borgne, T., Guihéneuf, N., Chatton, E., Labasque, T., Le Lay, H., Gerard, M.-F., 2018. Thermal attenuation and lag time in fractured rock: Theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests. Water Resour. Res. (ISSN: 0043-1397) 54, http://dx.doi.org/10.1029/2018WR023199, 1944-7973.

Labat, C., Larroque, F., de Grissac, B., Dupuy, A., Saltel, M., Bourbon, P., 2021. Influence of an anticline structure on hydrogeological functioning and aquifer interactions in a multilayered aquifer system: the case of Villagrains-Landiras anticline (Gironde, France). Hydrogeol. J. (ISSN: 1431-2174) 29, 1711–1732. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-021-02333-z, 1435-0157.

Larroque, F., Cabaret, O., Atteia, O., Dupuy, A., Franceschi, M., 2013. Vertical heterogeneities of hydraulic aquitard parameters: preliminary results from laboratory and *in situ* monitoring. Hydrol. Sci. J. (ISSN: 0262-6667) 58, 912–929. http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.783215, 2150-3435.

Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Caudal, J.-P., 2006a. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 328, 347–359. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029.

Le Borgne, T., Paillet, F., Bour, O., Caudal, J.-P., 2006b. Cross-Borehole flowmeter tests for transient heads in heterogeneous aquifers. Ground Water (ISSN: 0017-467X) 44, 444–452. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00150.x, 1745-6584.

Lods, G., Roubinet, D., Matter, J.M., Leprovost, R., Gouze, P., 2020. Groundwater flow characterization of an ophiolitic hard-rock aquifer from cross-borehole multi-level hydraulic experiments. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 589, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125152.

Maldaner, C.H., Munn, J.D., Coleman, T.I., Molson, J.W., Parker, B.L., 2019. Groundwater flow quantification in fractured rock boreholes using active distributed temperature sensing under natural gradient conditions. Water Resour. Res. (ISSN: 0043-1397) 55, 3285–3306. http://dx.doi.org/10.1029/2018WR024319, 1944-7973.

Marinoni, M., Delay, F., Ackerer, P., Riva, M., Guadagnini, A., 2016. Identification of groundwater flow parameters using reciprocal data from hydraulic interference tests. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 539, 88–101. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.019.

Molz, F.J., Boman, G.K., Young, S.C., Waldrop, W.R., 1994. Borehole flowmeters: field application and data analysis. J. Hydrol. (ISSN: 00221694) 163 (3–4), 347–371. http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(94)90148-1.

Molz, F.J., Morin, R.H., Hess, A.E., Melville, J.G., Güven, O., 1989. The Impeller Meter for measuring aquifer permeability variations: Evaluation and comparison with other tests. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 25, 1677–1683. http://dx.doi.org/10.1029/WR025i007p01677.

Nguyen, V.T., Graf, T., Guevara Morel, C.R., 2016. Free thermal convection in heterogeneous porous media. Geothermics (ISSN: 03756505) 64, 152–162. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.05.006.

Paillet, F.L., 1998. Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 34, 997–1010. http://dx.doi.org/10.1029/98WR00268.

Possemiers, M., Huysmans, M., Batelaan, O., 2015. Application of multiple-point geostatistics to simulate the effect of small-scale aquifer heterogeneity on the efficiency of aquifer thermal energy storage. Hydrogeol. J. 23, http://dx.doi.org/10.1007/s10040-015-1244-3.

Read, T., Bour, O., Selker, J.S., Bense, V.F., Borgne, T. Le, Hochreutener, R., Lavenant, N., 2014. Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 50, 3706–3713. http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015273.

Roubinet, D., Irving, J., Day-Lewis, F.D., 2015. Development of a new semi-analytical model for cross-borehole flow experiments in fractured media. Adv. Water Resour. (ISSN: 03091708) 76, 97–108. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.002.

Sanchez-Vila, X., Ackerer, P., Delay, F., Guadagnini, A., 2016. Characterization of reciprocity gaps from interference tests in fractured media through a dual porosity model. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 52, 1696–1704. http://dx.doi.org/10.1002/2015WR018171.

Schüppler, S., Fleuchaus, P., Blum, Philipp, 2019. Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. Geotherm Energy (ISSN: 2195-9706) 7, 11. http://dx.doi.org/10.1186/s40517-019-0127-6.

Selker, F., Selker, J., 2018. Investigating water movement within and near wells using active point heating and fiber optic distributed temperature sensing. Sensors (ISSN: 1424-8220) 18, http://dx.doi.org/10.3390/s18041023.

Sharqawy, M.H., Badr, H.M., Mokheimer, E.M., 2013. Investigation of buoyancy effects on heat transfer between a vertical borehole heat exchanger and the ground. Geothermics (ISSN: 03756505) 48, 52–59. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.04.003.

Simon, N., Bour, O., 2022. An ADTS toolbox for automatically interpreting active distributed temperature sensing measurements. Groundwater (ISSN: 0017-467X) gwat.13172. http://dx.doi.org/10.1111/gwat.13172, 1745-6584.

Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Porel, G., Nauleau, B., Pouladi, B., Longuevergne, L., 2020. A comparison of different methods to estimate the effective spatial resolution of FO-DTS measurements achieved during sandbox experiments. Sensors (ISSN: 1424-8220) 20, http://dx.doi.org/10.3390/s20020570.

Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Porel, G., Nauleau, B., Pouladi, B., Longuevergne, L., Crave, A., 2021. Numerical and experimental validation of the applicability of active-DTS experiments to estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media. Water Res. (ISSN: 0043-1397) 57, http://dx.doi.org/10.1029/2020WR028078, 1944-7973.

Sommer, W., Valstar, J., Gaans, P. van, Grotenhuis, T., Rijnaarts, H., 2013. The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage. Water Resour. Res. (ISSN: 1944-7973) 49, 8128–8138. http://dx.doi.org/10.1002/2013WR013677, Number: 12.

Song, W., Liu, X., Zheng, T., Yang, J., 2020. A review of recharge and clogging in sandstone aquifer. Geothermics (ISSN: 03756505) 87, 101857. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101857.

Stemmle, R., Blum, P., Schüppler, S., Fleuchaus, P., Limoges, M., Bayer, P., Menberg, K., 2021. Environmental impacts of aquifer thermal energy storage (ATES). Renew. Sustain. Energy Rev. (ISSN: 13640321) 151, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111560.

Sztrákos, K., Steurbaut, E., 2017. Révision lithostratigraphique et biostratigraphique de l'Oligocène d'Aquitaine occidentale (France). Geodiversitas (ISSN: 1280-9659) 39, 741–781. http://dx.doi.org/10.5252/g2017n4a6, 1638-9395.

Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Le, T.-T., 2008. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. Appl. Clay Sci. (ISSN: 0169-1317) 41, 181–189. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2007.11.001.

Tyler, S.W., Selker, J.S., Hausner, M.B., Hatch, C.E., Torgersen, T., Thodal, C.E., Schladow, S.G., 2009. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods: DTS FIBER-OPTIC SENSING. Water Resour. Res. (ISSN: 00431397) 45, http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007052.

van de Giesen, N., Steele-Dunne, S.C., Jansen, J., Hoes, O., Hausner, M.B., Tyler, S., Selker, J., 2012. Double-ended calibration of fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data. Sensors (ISSN: 1424-8220) 12, 5471–5485. http://dx.doi.org/10.3390/s120505471.

Vanhoudt, D., Desmedt, J., Van Bael, J., Robeyn, N., Hoes, H., 2011. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. Energy Build. (ISSN: 03787788) 43, 3657–3665. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.040.

Vélez Márquez, M., Raymond, J., Blessent, D., Mikael, P., Simon, N., Bour, O., Lamarche, L., 2018. Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing. Energies (ISSN: 1996-1073) 11 (11), 3059. http://dx.doi.org/10.3390/en11113059.

Visser, P.W., Kooi, H., Stuyfzand, P.J., 2015. The thermal impact of aquifer thermal energy storage (ATES) systems: a case study in the Netherlands, combining monitoring and modeling. Hydrogeol. J. (ISSN: 1431-2174) 23, 507–532. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1224-z, 1435-0157. Number: 3.

Zhang, B., Gu, K., Shi, B., Liu, C., Bayer, P., Wei, G., Gong, X., Yang, L., 2020. Actively heated fiber optics based thermal response test: A field demonstration. Renew. Sustain. Energy Rev. (ISSN: 13640321) 134, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110336.

3.4 Conclusion

Ces expériences permettent de démontrer l'intérêt de la FO pour caractériser rapidement (temps d'expérience 4-6 heures) la distribution des zones productrices, ainsi que la position des zones colmatées le long des ouvrages. Les résultats de productivité sont en accord avec ceux estimés à partir d'un flowmètre, et les faibles signatures de conductivités thermiques se retrouvent toujours en face de zones colmatées identifiées par inspections caméra. Ces expériences ont été réalisées dans des forages en PVC, or bon nombre de forages géothermiques sont tubés et crépinés en acier inoxydable. Compte tenu de la forte conductivité thermique de ce matériau, il semblerait pertinent de renouveler ce type d'expérience dans des ouvrages inox. Par ailleurs, le site de l'ENSEGID est doté de nombreux forages proches les uns des autres. Cet aspect a permis de réaliser l'expérience dans une configuration *cross-borehole* qui facilite la détection des flux souterrains. Cependant, à l'échelle d'installations industrielles, il est rare de trouver une telle densité de puits. Face aux coûts d'investissement d'un forage, le choix est souvent fait de concentrer les efforts sur les puits producteurs et injecteurs et de négliger l'aspect suivi du système. Face à ce constat, il semblerait pertinent d'étudier la possibilité d'utiliser la fibre optique en configuration *single-borehole* pour obtenir des profils de vitesse de Darcy et de conductivité thermique.

Cette expérience ouvre toutefois des perspectives intéressantes pour la caractérisation et le suivi d'un site ATES. En effet, à la création des forages d'exploitation, il pourrait être pertinent de les équiper avec le dispositif présenté. Des profils de vitesse de Darcy et de conductivités thermiques pourraient être obtenus afin de dresser un état initial des conditions au droit du puits qui permettront d'identifier les zones les plus productrices et la distribution des propriétés thermiques. Une fois installé et les connectiques mises en place, le dispositif de câbles de FO est pérenne. Il serait alors aisé de réitérer ce type d'expérience, en venant se brancher aux câbles avec l'unité de traitement sans ouvrir les forages et remonter les pompes. C'est un avantage intéressant qui permettrait d'acquérir des données de manière plus récurrentes et qui permettrait d'éviter les lourdes étapes de manutentions propres aux diagnostics de forage et à la réalisation de diagraphies. Enfin, le faible coût de la fibre (2-4 € le mètre) n'ajouterait qu'un très faible pourcentage d'investissement supplémentaire sur la somme que représente la création d'un forage.

CHAPITRE 4

Dynamique thermique du sous-sol urbain en contexte de changement climatique : outils de caractérisation et enjeux pour l'implantation des systèmes ATES

À l'échelle mondiale, les agglomérations concentrent la majeure partie de la consommation énergétique imputable à la demande thermique des bâtiments. Les systèmes ATES étant particulièrement adaptés pour satisfaire des besoins thermiques conséquents (Fleuchaus et al. 2019), ils sont principalement implantés dans les aires urbaines (quartiers avec réseaux de chaleur, hôpitaux, campus universitaires ou encore zones commerciales). Dans ces zones, la dynamique thermique des aquifères peu profonds susceptibles d'être exploités par les ATES est fortement impactée par deux facteurs : l'anthropisation des surfaces et le réchauffement climatique.

La modification anthropique de l'occupation des surfaces est un facteur réchauffant le sous-sol (Baker et Baker 2002 ; Bayer et al. 2016 ; Blum et al. 2021 ; Dědeček et al. 2012 ; Ferguson et Woodbury 2004 ; Previati et al. 2022). L'artificialisation du sol entraîne des modifications de ses propriétés thermiques et facilite le transfert de chaleur de la surface en direction du sous-sol. Au fur et à mesure du développement et de l'expansion des territoires urbanisés, des îlots de chaleur souterrains se forment (Subsurface Urban Heat Island : SUHI). Cela se traduit par une dynamique thermique du sous-sol en perpétuelle évolution, dépendant fortement de l'évolution des villes et des choix d'urbanisation. Dans certaines villes, les apports d'énergie se dirigeant vers le sous-sol sont considérables et peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{15} J an^{-1} (Menberg et al. 2013 ; Previati et al. 2022). En moyenne, cela se traduit par des températures 2 à 6 °C supérieures à celles observables aux mêmes profondeurs dans des zones plus rurales. Ces phénomènes transitoires modifient la dynamique thermique des aquifères urbains et peuvent impacter la distribution des températures jusqu'à une centaine de mètres de profondeur (Arola et Korkka-Niemi 2014 ; Bayer et al. 2019 ; Blum et al. 2021).
Or, lorsque le fonctionnement d'un système ATES est modélisé, la température dans le proche sous-sol est souvent considérée comme une résultante d'équilibre entre une température moyenne extérieure et un flux géothermique fixe. Il en ressort une vision statique permanente, souvent utilisée comme point de départ pour tout aménagement géothermique. Cette vision est prise en défaut en contexte urbain, et peut se révéler inadaptée pour modéliser le fonctionnement transitoire d'un ATES (Visser et al. 2015).

Le réchauffement climatique est aussi un facteur participant à l'augmentation des températures du sous-sol à l'échelle mondiale (Bayer et al. 2016 ; Dědeček et al. 2012 ; Harris et Chapman 1997 ; Yamano et al. 2009). Il est amplifié dans les villes par la prépondérance des surfaces minérales au détriment des

surfaces végétalisées (Mohajerani et al. 2017 ; Santamouris 2013). Cela se traduit par des températures atmosphériques pouvant atteindre des valeurs 5 à 15 °C supérieures à celles des zones rurales (Santamouris 2013). De fait, le sous-sol des villes est plus impacté par le réchauffement climatique que celui des zones rurales.
La vision stationnaire des conditions climatiques couramment utilisée pour définir la température de surface d'un modèle transitoire d'exploitation ATES pourrait être prise en défaut par l'impact du changement climatique.

Pour résumer, lorsqu'un ATES exploite une nappe peu profonde dans un contexte urbain soumis au réchauffement climatique, les stratégies de modélisation usuelles considérant **(i)** un état permanent préalable à la modélisation du fonctionnement de l'ATES ; et **(ii)** des conditions limites de températures statiques en surface durant la modélisation transitoire de l'ATES, peuvent être remises en question.
Ces deux constats mettent en avant la nécessité de :

- Mieux caractériser la dynamique thermique du sous-sol avant toute implantation de dispositif ATES (Visser et al. 2015) ;
- Estimer les tendances d'évolution des températures du sous-sol à long terme susceptibles d'influer sur le fonctionnement de l'ATES.

Ce chapitre présente dans une première partie les facteurs naturels et anthropiques régissant la distribution des températures dans le sous-sol.
Dans une seconde partie, deux outils complémentaires sont présentés pour simuler les transferts thermiques dans le sous-sol d'une zone anthropisée en contexte de changement climatique. La première méthode est basée sur l'utilisation d'une solution analytique et la deuxième méthode consiste à mettre au point un modèle numérique équivalent.
Dans la troisième partie, les résultats restitués par les deux méthodes sont détaillés. Afin d'intégrer cette approche dans la modélisation transitoire d'un ATES, les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont discutés.

4.1 Forçage des températures souterraines : les principaux phénomènes

Les roches et les sédiments du sous-sol ont une capacité thermique volumique élevée leur permettant de stocker facilement de l'énergie (tableau 4.1). Leur faible conductivité thermique ne favorise pas les transferts d'énergie dans le milieu géologique en profondeur. Par conséquent, en l'absence de phénomènes advectifs prépondérants, le sous-sol a tendance à stocker facilement, mais à transférer assez lentement un apport extérieur de chaud ou de froid.

Roche sédimentaire	$\boldsymbol{\lambda}$ ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$)			$\boldsymbol{\rho c}$ ($10^6\,\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$)	
	min	max	rec	min	max
Conglomérats	1.5	5.1	1.94	1.8	2.6
Grès	0.7	6.5	2.6	1.8	2.6
Argiles	0.6	3.5	2.13	2.1	2.4
Calcaires	0.6	5.0	2.5	2.1	2.4
Dolomites	0.6	5.7	3.6	2.1	2.4
Marnes	1.8	2.9	2.0	2.2	2.3

TABLE 4.1 – Propriétés thermiques des roches sédimentaires (issue de DALLA SANTA et al. 2020, rec = recommandée)

En profondeur, la distribution et les variations de température dépendent principalement de trois facteurs :

1. Les variations de température en surface liées aux conditions atmosphériques ;
2. Le gradient géothermique ;
3. L'occupation des sols.

Ces trois facteurs et leurs impacts sur la dynamique des températures dans le sous-sol sont présentés plus en détail dans cette partie.

4.1.1 Forçage atmosphérique

La température du sous-sol en proche surface est contrôlée en partie par la température moyenne annuelle du sol, elle-même liée à la température moyenne annuelle de l'atmosphère. Le sol est soumis à un apport d'énergie R ($\mathrm{W\,m^{-2}}$)

provenant des radiations solaires. Cette énergie pénètre ensuite plus en profondeur. Le bilan de l'apport net des radiations R ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) s'exprime par (Banks 2012) :

$$R = R_s(1 - \alpha_s) + R_a(1 - \alpha_a) - R_{back} \tag{4.1}$$

avec R_s ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) intensité des radiations solaires émises dans l'Ultra Violet (UV), R_a ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) intensité des radiations solaires émises dans l'Infra Rouge (IR), R_{back} ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) intensité des radiations atmosphériques réfléchies par le sol, α_s et α_a coefficients de réflexion de la surface de la Terre pour les UV et IR.
Seule une partie du rayonnement entrant dans l'atmosphère est absorbée par le sol (équation 4.1). Une partie de cet apport net est stocké directement dans le sol et contribue à le chauffer. L'autre partie est perdue par évapotranspiration ou convection/advection lors des infiltrations d'eau de pluie ou de fonte des neiges (Banks 2012).

Dans les zones tempérées du globe, une particularité du rayonnement solaire est sa cyclicité, associée aux variations saisonnières et aux alternances diurnes (figure 4.1).

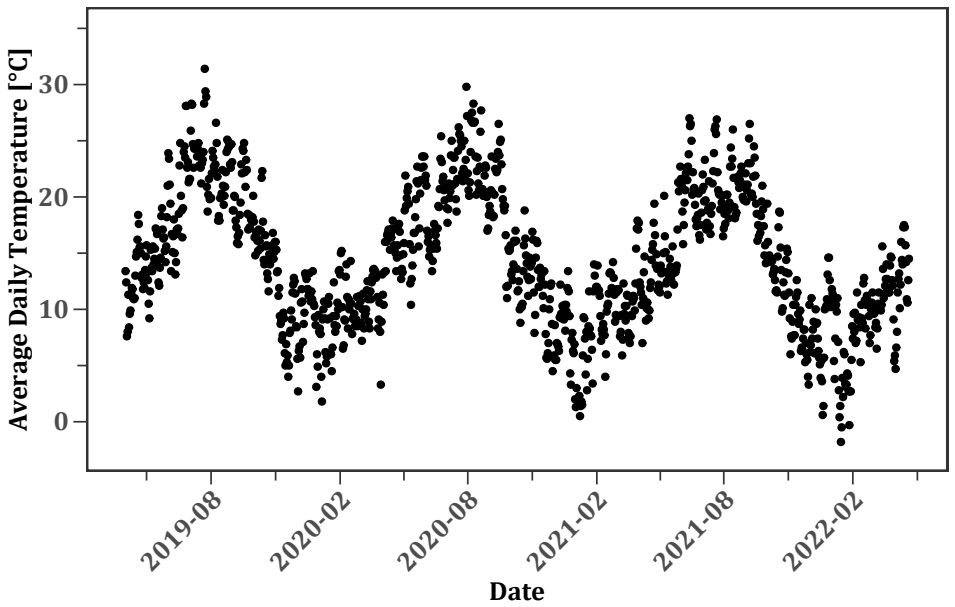


Figure 4.1 – Moyenne journalière des températures atmosphériques de surface montrant la fluctuation saisonnière (station météo de Villenave d'Ornon - Bordeaux - Données Météo-France)

Cette fluctuation saisonnière des températures se transmet par conduction en s'amortissant, jusqu'à une profondeur de 10-15 mètres en moyenne, selon les propriétés thermiques du sous-sol (Banks 2012 ; Taylor et Stefan 2009). Les

fluctuations saisonnières de température atmosphérique peuvent être approchées par une fonction trigonométrique périodique :

$$T_{surf}(t) = T_m + A\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{t_0} + L\right)\right] \tag{4.2}$$

avec t_0 la période d'une fluctuation (généralement 365 j), A l'amplitude thermique au cours du cycle de fluctuation (°C), T_m valeur moyenne de température en surface durant un cycle (°C), L un déphasage. L représente le déphasage calendaire qu'il faut prendre en compte pour que le cycle commence au premier janvier. En prenant comme repère temporel le jour le plus chaud de l'année, L s'obtient par :

$$L = \frac{365 - J_{chaud+}}{365} \tag{4.3}$$

avec J_{chaud+} l'index dans l'année du jour le plus chaud.

La résolution de l'équation de diffusivité thermique permet de modéliser la distribution de température liée à ce signal. Pour un milieu 1D vertical au sein duquel le transfert thermique se fait uniquement par conduction, cette équation se réduit à :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{4.4}$$

avec D ($m^2\,s^{-1}$) la diffusivité thermique du sous-sol.
En considérant l'équation 4.2 comme condition limite en surface, une solution à l'équation 4.4 permettant de restituer la distribution de température en profondeur est donnée par (Taylor et Stefan 2009) :

$$T(z,t) = T_m + Ae^{-2\pi z/\Lambda}\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{t_0} + L - \frac{z}{\Lambda}\right)\right) \tag{4.5}$$

avec z la profondeur (m), t le temps (j), $\Lambda = 2\sqrt{\pi D t_0}$ la longueur d'onde d'une oscillation de fluctuation de température.
L'équation 4.5 met en évidence que le signal thermique de surface (figure 4.2a) est transféré en profondeur et fluctue autour de la valeur T_m (figure 4.2b). L'amplitude de la fluctuation décroît avec la profondeur et devient imperceptible à partir d'une profondeur z_0, appelée point fixe. La zone au-dessus de z_0 est appelée zone d'hétérothermie et son épaisseur dépend de D (figure 4.2b). La température à z_0 est égale à T_m.

En régime climatique non stationnaire, comme généré par le changement climatique, T_m évolue dans le temps. Cette valeur tend à augmenter depuis le

début du 20^{ieme} siècle (figure 1.1). La température du point fixe va suivre cette tendance et l'augmentation des températures se répercute plus en profondeur. Ainsi, l'historique climatique depuis plusieurs dizaines d'années est enregistré par la distribution de la température dans le sous-sol (Bayer et al. 2016 ; Huang et al. 2000 ; Yamano et al. 2009). La tendance initiée depuis 100 ans souligne un réchauffement de la subsurface détectable jusqu'à 80 – 100 m de profondeur dans certaines régions (Dědeček et al. 2012 ; Harris et Chapman 1997 ; Yamano et al. 2009).

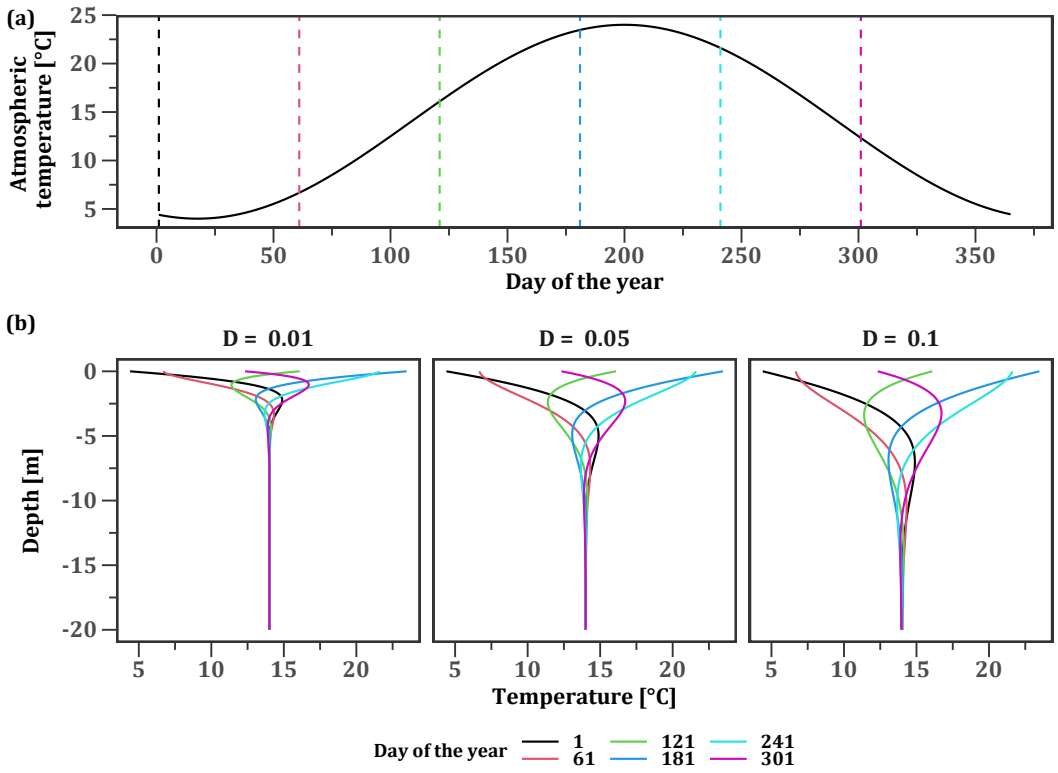


Figure 4.2 – Impact de la fluctuation annuelle des températures atmosphériques dans le sous-sol : (a) fluctuation annuelle de la température atmosphérique et (b) pénétration de l'onde thermique de surface en fonction du temps. Chaque panneau représente une valeur de diffusivité thermique D. Les points représentent l'influence d'un gradient géothermique de 3.0 °C/100m ($T_m = 14.0$ °C, $A = 10.0$ °C, $t_0 = 365$ j et L = 0.45 m)

4.1.2 Forçage géothermique naturel

Le profil de température de la Terre est influencé par le flux de chaleur provenant des roches du manteau terrestre et se propageant vers la surface. L'augmentation de la température en fonction de la profondeur définit le gradient géothermique.

Le gradient géothermique moyen en zone continentale est de 3.0 °C/100m (Bayer et al. 2019), pour un flux géothermique compris entre 0.04 et 0.1 W m^{-2} (Banks 2012). Ce flux géothermique est inférieur (deux ordres de grandeur) au flux net apporté par les radiations sur la surface du sol (sous-section 4.1.1). Son impact sur la température en proche surface, au-dessus de la zone d'hétérothermie, est extrêmement limité. En dessous de cette zone, l'évolution de la température est représentée par la distribution associée au transfert conductif et à la valeur locale du flux géothermique. Cette évolution, qui suit la loi de Fourier, est globalement linéaire dans les premiers kilomètres depuis la surface. Ensuite le régime change à des modes de transfert convectif. À l'échelle du globe, la valeur du gradient géothermique est hétérogène dans l'espace et dans le temps (figure 4.3).

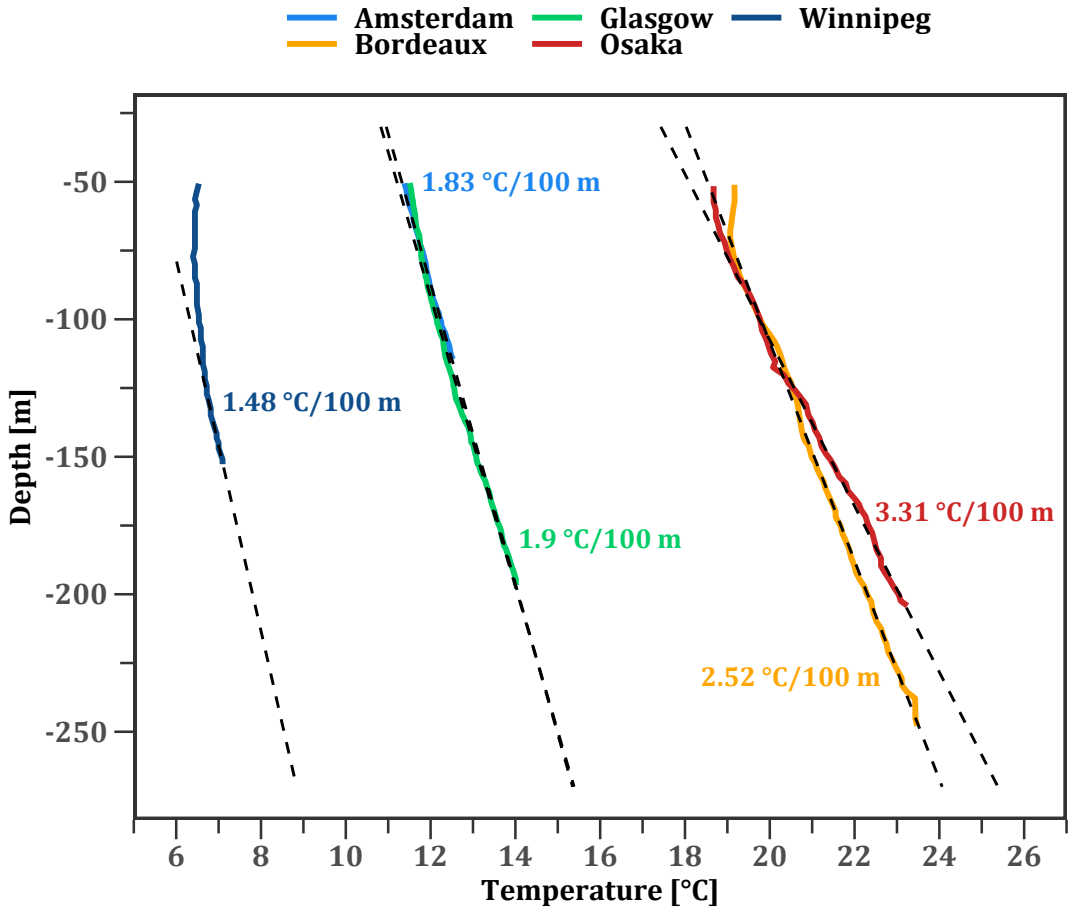


Figure 4.3 – Logs de température réalisés en différentes localisations et gradient géothermique associés (données issues de Bayer et al. 2019 ; Visser et al. 2020 ; Watson et Westaway 2020 pour les villes respectives d'Osaka et Winnipeg, Amsterdam et Glasgow). Pour Bordeaux, le profil a été fourni par Antea Group.

Cette hétérogénéité repose sur plusieurs facteurs, parmi lesquels (Hitchon 1984) :

- La présence ou non d'activité volcanique ;
- Les propriétés thermiques des roches ;
- Les sources de chaleur à l'intérieur des roches résultant de réactions chimiques, transformations minéralogiques ou radioactivité ;
- Les différences des flux géothermiques venant de sources d'intensité plus ou moins élevées selon les conditions géodynamiques ;
- Les effets des écoulements d'eau ou autre fluide, incluant les remontées d'eau juvénile des horizons profonds.

4.1.3 Forçage anthropique

Dans les zones urbanisées, le réchauffement du sous-sol est un phénomène commun. Par rapport à des zones rurales, en proche surface ($<$ 100 m de profondeur) l'augmentation de température se situe entre +2 et 6 °C (Bayer et al. 2019 ; Blum et al. 2021 ; Ferguson et Woodbury 2004 ; Watson et Westaway 2020). Ce phénomène est appelé îlot de chaleur suburbain (SUHI) et s'explique par de multiples causes. Tout d'abord, les températures atmosphériques dans les agglomérations sont supérieures aux températures des zones rurales (Mohajerani et al. 2017). Ce phénomène est causé par :

- la réduction des espaces végétalisés et de l'évapotranspiration ;
- la concentration d'activités anthropiques produisant de la chaleur ;
- l'artificialisation des surfaces avec des matériaux qui changent les propriétés thermiques du sol (notamment l'absorption, l'émission et la réflexion).

De plus, la présence de bâtiments, d'industries et de surfaces en asphaltes contribue directement au réchauffement du sol par des transferts thermiques conductifs au droit de leurs implantations. Ces transferts sont aussi observables aux niveaux de structures enterrées comme les tunnels, les métros, les parkings souterrains, les réseaux de chaleur etc... (Bayer et al. 2019 ; Blum et al. 2021 ; Tissen et al. 2019).

Les excès de chaleur du sol urbain générés par le réchauffement climatique et l'anthropisation sont partiellement transférés dans les horizons plus profonds du sol. Les profils de température associés présentent une forme en "C". La température décroît depuis la surface avant de reprendre un profil "normal" associé au gradient géothermique (figure 4.4).

A l'échelle de grandes agglomérations, les flux thermiques associés sont conséquents. À Milan (Italie), près de 85 % du réchauffement du sous-sol est associé à l'apport anthropique direct ou indirect (Previati et al. 2022). Des ordres de

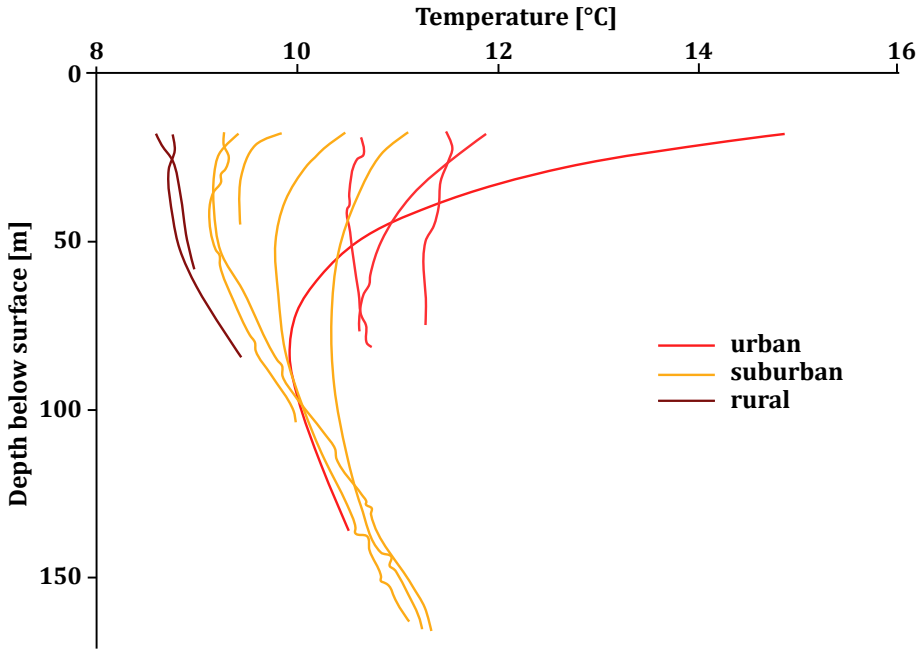


FIGURE 4.4 – Profils de température mesurés dans différents lieux de la ville de Berlin. L'occupation des sols joue un rôle majeur sur la forme des profils (adaptée de BLUM et al. 2021)

grandeur identiques ont pu être estimés pour les villes allemandes de Karlsruhe et Cologne (BENZ et al. 2015 ; MENBERG et al. 2013). Dans la ville de Glasgow (Écosse), les températures enregistrées dans un forage de 200 m de profondeur d'une zone industrielle mettent en évidence que le réchauffement climatique est responsable d'une augmentation des températures en surface de 2.0 °C par rapport à l'ère préindustrielle, et que l'anthropisation contribue à une augmentation de 0.7 °C (WATSON et WESTAWAY 2020).

Cette accumulation de chaleur dans le sous-sol est profitable à l'implantation des systèmes géothermiques fournissant du chauffage aux bâtiments (AROLA et KORKKA-NIEMI 2014 ; BIDARMAGHZ et al. 2021 ; PREVIATI et al. 2022). Par rapport à une zone rurale, le potentiel technique pour l'utilisation de la géothermie sur sondes est 40% supérieur en agglomération (RIVERA et al. 2017). Le réchauffement du sous-sol généré par l'urbanisation peut permettre de fournir des pics de puissance de chauffe 50 à 60 % supérieurs. A contrario, l'urbanisation peut être responsable d'une diminution de 40 à 50 % du pic de disponibilité de froid comparé à une zone rurale (AROLA et KORKKA-NIEMI 2014). Face à ce constat, la conception d'un système géothermique ATES doit intégrer une caractérisation de l'état thermique initial du sous-sol, mais également de sa dynamique future, susceptible d'être très impactée par l'évolution de l'occupation du territoire.

4.2 Caractérisation thermique du sous-sol : stratégie de modélisation

Cette partie détaille l'utilisation de deux méthodes de modélisation pour simuler les transferts thermiques de la surface vers le sous-sol au droit d'un site urbain soumis au réchauffement climatique.
La première méthode se base sur une approche analytique. Cette solution permet de restituer la distribution des températures enregistrées dans des forages profonds de zones urbaines en considérant des transferts de chaleur purement conductifs (Bayer et al. 2016). L'extension à un transfert advectif, pour des faibles vitesses de circulation ($1 \times 10^{-7}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$), a été validée numériquement pour des cas simples d'occupation des sols (Rivera et al. 2015). La deuxième méthode consiste à mettre au point un modèle numérique dans un contexte équivalent à celui de la solution analytique. Ce type de modèle est généralement utilisé à l'échelle des agglomérations pour comprendre les dynamiques thermiques du sous-sol liées à l'extension des îlots de chaleur souterrains (Benz et al. 2015 ; Bidarmaghz et al. 2021 ; Menberg et al. 2013 ; Previati et al. 2022). Les deux méthodes sont utilisées pour simuler la dynamique thermique du sous-sol d'un site théorique dans un large panel de vitesse d'écoulement naturelle. Absent dans la solution analytique, l'effet de la dispersion est étudiée numériquement.

4.2.1 Brève introduction aux transferts de fluide et de chaleur en milieu poreux

Dans un milieu poreux les transferts de fluide et de chaleur sont régis respectivement par les équations différentielles suivantes :

Équation de diffusivité hydraulique :

$$-\nabla \cdot (-K \nabla h) + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \tag{4.6}$$

avec $K(\mathrm{m\,s^{-1}})$ la conductivité hydraulique, $S_s(\mathrm{m^{-1}})$ le coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux, h (m) la hauteur piézométrique et $w(\mathrm{s^{-1}})$ le terme puits/source.

Équation de diffusivité thermique :

$$vc_w\rho_w \cdot \nabla T - (\lambda_{bulk} + \alpha \cdot c_{bulk}\rho_{bulk} \cdot v) \cdot \nabla^2 T + c_{bulk}\rho_{bulk}\frac{\partial T}{\partial t} - s = 0 \qquad (4.7)$$

avec v ($\mathrm{m\,s^{-1}}$) la vitesse d'écoulement naturelle de l'eau, $c_{bulk}\rho_{bulk}$ et $c_w\rho_w$ la capacité calorifique volumique du milieu poreux et de l'eau ($\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$), λ_{bulk} la conductivité thermique du milieu ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) et α le coefficient de dispersion (m). Il est d'usage d'utiliser une valeur de α 10 fois inférieure dans les directions orthogonales à l'écoulement. λ_{bulk} et $c_{bulk}\rho_{bulk}$ dépendent à la fois des propriétés de l'eau et de la matrice poreuse et sont calculées respectivement selon des moyennes géométrique et arithmétique (équation 2.4 et équation 2.14).

Pour résoudre ces équations différentielles, il existe deux types de méthodes, *i.e.* analytiques et numériques. Leurs spécificités sont résumées ci-dessous (Diersch 2013) :

1. Méthode analytique
   - Résolution mathématique des équations différentielles par choix de conditions limites adaptées et intégration (ou méthode équivalente) ;
   - Pas d'erreur d'approximation liée à la résolution ;
   - Exécution rapide pour des problèmes standards ;
   - Extension des solutions pour les problèmes linéaires ou pouvant être linéarisés ;
   - Inadaptée à la résolution de problèmes impliquant des géométries complexes.
2. Méthode numérique
   - Utilisation d'un schéma de discrétisation en temps et en espace pour résoudre les équations différentielles et obtenir des valeurs discrètes de solutions (alors que ce sont essentiellement des fonctions continues en temps et en espace) ;
   - Adaptée aux problèmes complexes (géométrie, hétérogénéités dans les paramètres, conditions limites complexes) ;
   - Erreurs d'approximation inhérentes au mode de résolution ;
   - Temps de calcul conséquent selon la complexité du problème.

4.2.2 Le site référence théorique

Le scénario de la modélisation se base sur un site théorique s'apparentant à une zone commerciale ou universitaire. L'historique de construction du site est pris en compte par la création successive de routes, parkings et bâtiments. L'évolution climatique au droit de la zone est restituée par une chronique de température reproduisant un réchauffement climatique graduel entre 1900 et 2050. Les propriétés du sous-sol sont homogènes sur tout le domaine modélisé. Les détails de ce scénario sont présentés dans les paragraphes suivants.

L'historique de l'occupation du sol

On considère un site occupé par un ensemble de bâtiments et de zones de parking reliés par un réseau de routes bitumées. Ce type d'occupation des sols est typique d'une zone industrielle, commerciale ou universitaire (figure 4.5). La superficie des bâtiments à vocation tertiaire est importante (entre 4000 et 15 000 m^2 selon le bâtiment).

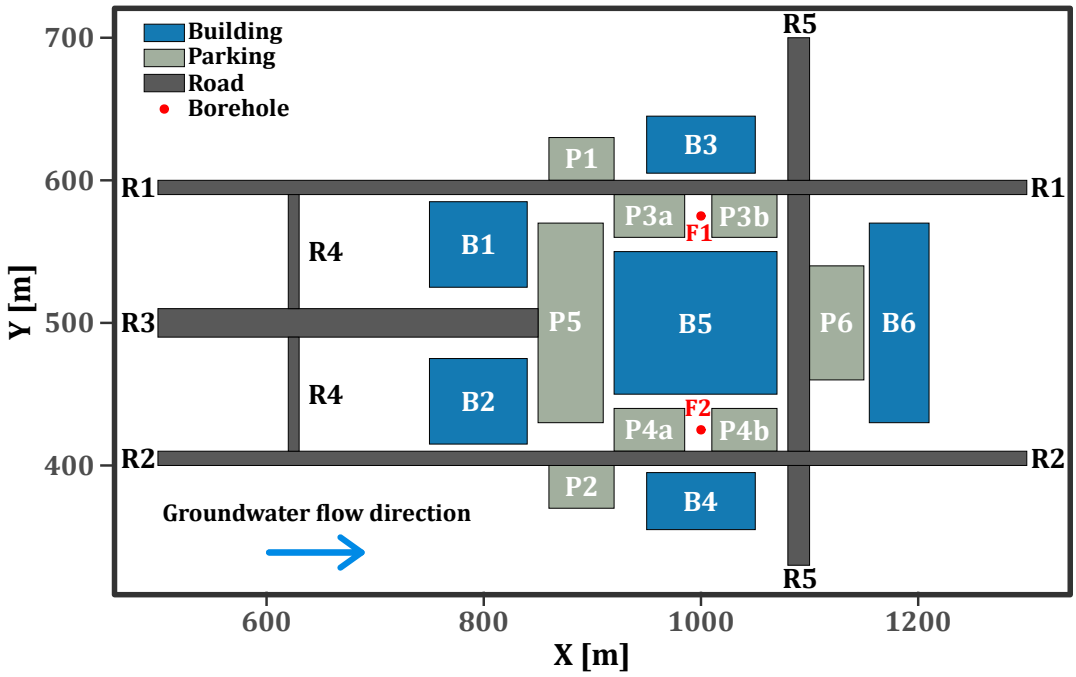


FIGURE 4.5 – Zone théorique : plan d'occupation des sols "actuel".

Afin de prendre en compte l'historique de construction de la zone, l'évolution temporelle de l'occupation des sols suivante est retenue :

- Avant 1980 : le sol de la zone est uniquement recouvert d'herbe et végétation rase ;

- Entre 1980 - 1990 : 5 routes et 8 parkings sont progressivement construits ;
- Après 1990 : 6 bâtiments sont ajoutés.

L'espace présent entre les nouvelles constructions reste enherbé.

Dynamique et évolution des températures atmosphériques retenue

Pour modéliser l'impact du réchauffement climatique, une chronique théorique de température atmosphérique moyenne annuelle est générée (figure 4.6).

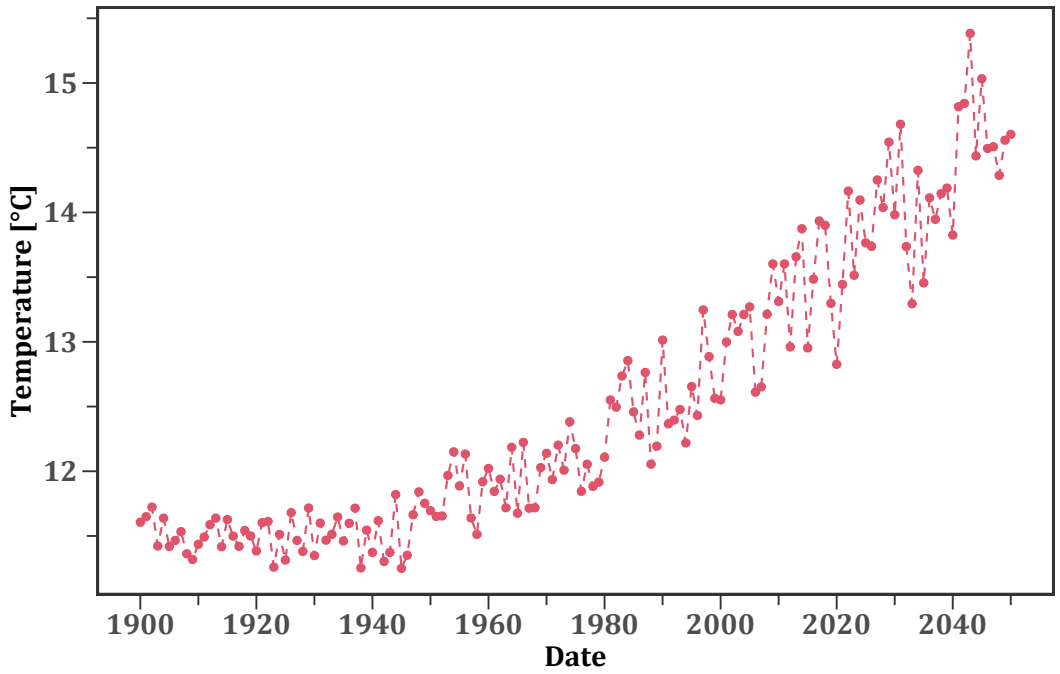


Figure 4.6 – Chronique synthétique des moyennes annuelles des températures atmosphériques

La chronique s'étend de 1900 à 2050. La période entre 1900 et 1950, se caractérise par des températures stables autour de 11.5 °C. Pour reproduire l'effet d'un réchauffement climatique graduel à partir de 1950, la température moyenne annuelle suit une tendance générale d'augmentation dont la vitesse s'accélère au cours du temps. Du bruit aléatoire est rajouté à la tendance générale afin de reproduire les variabilités annuelles observables dans les chroniques réelles. À l'horizon 2020, la chronique restitue une augmentation de température d'environ 1.5 °C par rapport à la période pré 1900, compatible avec les observations à l'échelle mondiale (sous-section 1.1.1).

Les propriétés du sous-sol :

Le sous-sol est considéré homogène à l'échelle de la zone (tableau 4.2). Les valeurs des paramètres thermiques et hydrauliques du milieu sont typiques des milieux sédimentaires. L'écoulement souterrain est orienté de l'ouest vers l'est et la dispersion est négligée (figure 4.5).

Paramètre	**Valeur**	**Unité**
Porosité (n)	0.30	–
Cond. thermique matrice poreuse (λ_s)	3.00	$\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Cond. thermique eau (λ_{eau})	0.65	$\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Capa. calo. vol. matrice poreuse ($c_s\rho_s$)	2.5×10^6	$\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$
Capa. calo. vol. eau ($c_w\rho_w$)	4.2×10^6	$\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$
Gradient géothermique (Φ)	0.03	$\mathrm{°C\,m^{-1}}$
Vitesse de Darcy (v)	1.6×10^{-7}	$\mathrm{m\,s^{-1}}$
Dispersion (α)	1×10^{-5} (négligeable)	m

Table 4.2 – Paramètres du sous-sol du modèle référence

4.2.3 Résolution par approche analytique

La résolution des équations différentielles détaillées sous-section 4.2.1 peut être approchée analytiquement. Lorsque le sol est considéré comme un milieu semi-infini, homogène, complètement saturé et limité par une surface plane, l'évolution temporelle de la température en n'importe quel point $X(x, y, z)$ de l'espace peut être décrit comme une superposition de différentes solutions analytiques (Rivera et al. 2015) :

$$T(X,t) = S_0(X,t) + S_s(X,t) + S_{ts}(X,t)) \tag{4.8}$$

où S_0 représente les conditions initiales connues, S_s un terme source continu, et $S_{ts}(X,t)$ l'apport des conditions de surface.

En prenant en compte les conditions initiales définies par le gradient géothermique, une température initiale en surface, et les apports de surface liés aux fluctuations climatiques et à l'occupation des sols, la distribution de température $T(X,t)$ devient (Bayer et al. 2016) :

$$T(X,t) = T_0(z,t) + T_{clim}(z,t) + T_{anth}(X,t) \tag{4.9}$$

où $T_0(z,t)$ représente les conditions liées au gradient géothermique Φ et à la température de surface du sol initiale T_s. Les membres $T_{clim}(z,t)$ et $T_{anth}(X,t)$ représentent les fluctuations de températures respectivement liées aux variations climatiques et à l'occupation des sols (figure 4.7). Le calcul et les paramètres à prendre en compte pour chaque membre de la solution sont détaillés dans les paragraphes suivants

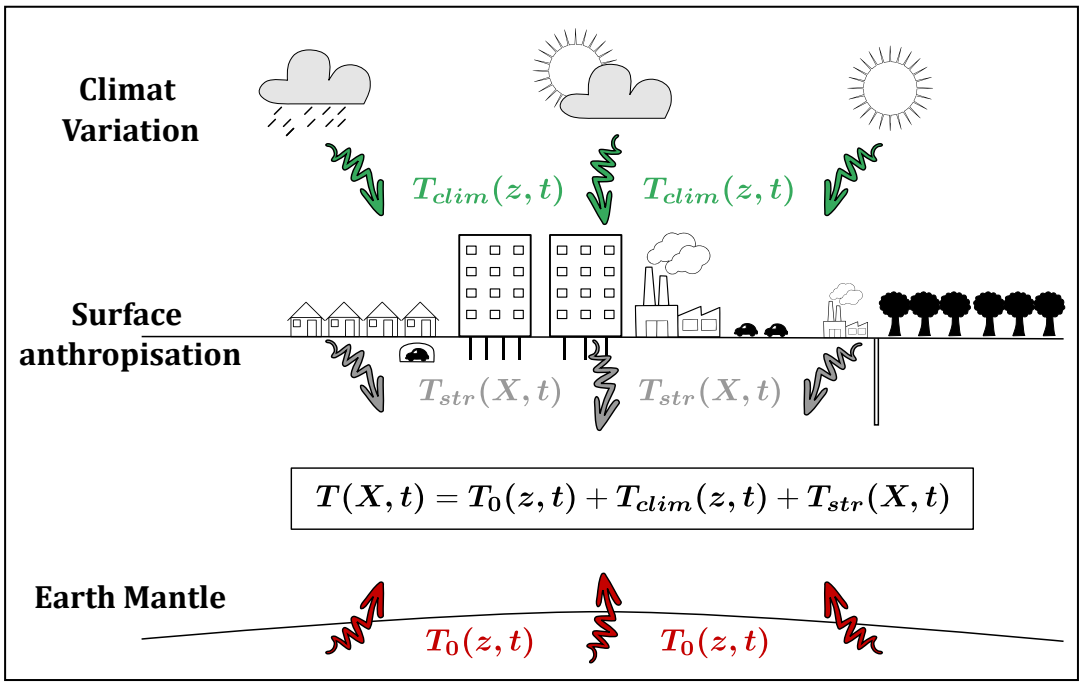


FIGURE 4.7 – Bilan thermique du sous-sol, approche conceptuelle

CONTRIBUTION DU GRADIENT GÉOTHERMIQUE ET DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DE SURFACE

La température initiale de surface T_s à $t = 0$ et la valeur du gradient géothermique Φ détermine la distribution naturelle non influencée de la température selon la profondeur z par (RIVERA et al. 2015) :

$$T_0(z,t) = T_s erf\left(\frac{z}{\sqrt{4Dt}}\right) + \Phi \times z \tag{4.10}$$

où D représente la diffusivité thermique définie par :

$$D = \frac{\lambda_{bulk}}{\rho_{bulk} c_{bulk}} \tag{4.11}$$

Contributions des variations climatiques

Pour une température de surface du sol transitoire différente de 0 °C, dépendant des fluctuations climatiques, l'impact thermique en fonction de la profondeur et du temps est donné par (Bayer et al. 2016) :

$$T_{clim}(z,t) = \frac{z}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^t \frac{\varphi_{GST}(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{z^2}{4D(t-\tau)}\right] d\tau \qquad (4.12)$$

où $\varphi_{GST}(t)$ est une fonction polynomiale ajustée aux variations de température de la surface du sol (Ground Surface Temperature : GST).
La GST est influencée par la température atmosphérique en surface (Surface Atmospheric Temperature : SAT). Généralement GST et SAT sont couplées mais diffèrent d'une valeur moyenne annuelle ΔT_{S-A}. Cette différence correspond aux conditions de surface spécifiques de la zone étudiée telles que le vent, le type de sol, l'altitude, l'évapotranspiration (Herb et al. 2008). La fonction $\varphi_{GST}(t)$ s'obtient à partir d'un lissage ou d'une régression polynomiale des SAT moyennes annuelles (figure 4.8), à laquelle s'ajoute l'écart moyen annuel ΔT_{S-A}.

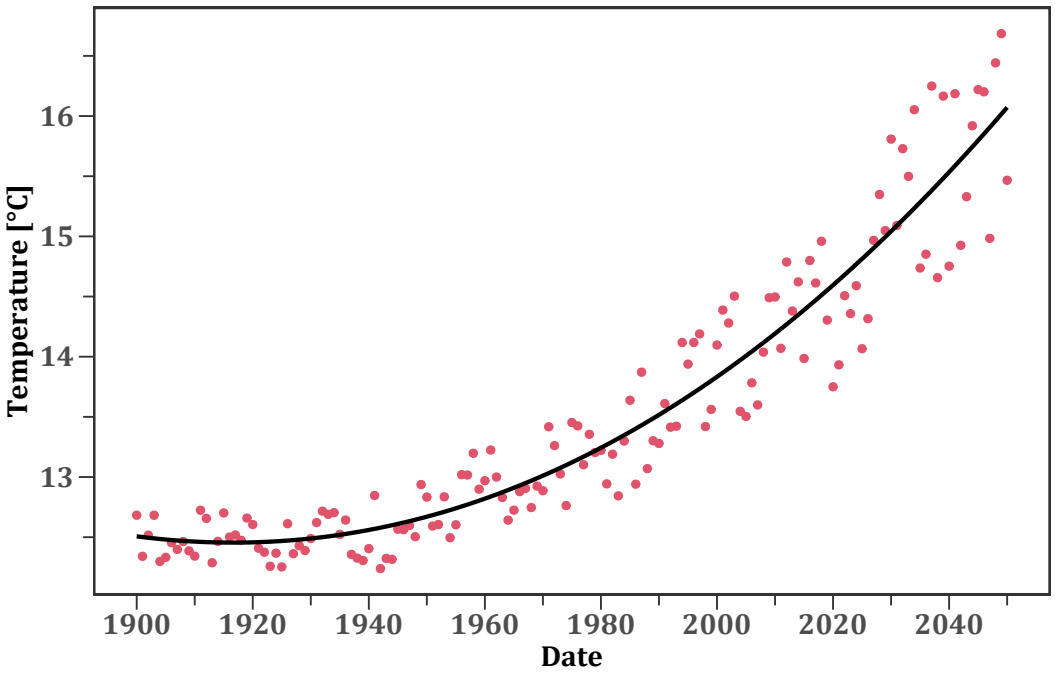


Figure 4.8 – Ajustement des moyennes de températures annuelles théoriques par un polynôme $\varphi_{SAT}(t)$ d'ordre 3

Ainsi, φ_{GST} s'exprime par :

$$\varphi_{GST}(t) = \varphi_{SAT}(t) + \Delta T_{S-A} \tag{4.13}$$

Les paramètres utilisés dans les équation 4.10, 4.12 et 4.13 afin de prendre en compte les conditions inhérentes au climat sont résumés dans le tableau 4.3.

Paramètres	**Valeurs**
ΔT_{S-A}	1.0 °C
$\varphi_{SAT}(t)$	Régression polynomiale ordre 3 (figure 4.8)
T_s	13.55 °C ($\varphi_{SAT}(t) + \Delta T_{S-A}$)
$\varphi_{GST}(t)$	$\varphi_{SAT}(t) + \Delta T_{S-A}$

TABLE 4.3 – Paramètres et fonctions utilisés pour représenter l'effet du climat

Avant 1900, la SAT était relativement stable (BAYER et al. 2016 ; YAMANO et al. 2009). L'évolution n'a débuté qu'avec l'avènement de l'ère industrielle et n'a été visible qu'à partir de 1900. C'est à partir de cette période que $\varphi_{GST}(t)$ est calculée.

CONTRIBUTION DE L'OCCUPATION DE LA SURFACE

On considère une zone rectangulaire définie par les coordonnées cartésiennes $[x_a, y_a]$ et $[x_b, y_b]$ avec des occupations de sol et/ou constructions distinctes du reste de la surface, considérée comme homogène et infinie. L'impact de cette hétérogénéité sur la distribution thermique en profondeur peut être estimé en tout point du sous-sol $X = (x, y, z)$ par l'équation suivante (RIVERA et al. 2015) :

$$\begin{aligned} T_{anth}(X,t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_{\frac{z^2}{4Dt}}^{\infty} \frac{\phi_{anth}\left(t - \frac{z^2}{4Du}\right)}{\sqrt{u}} \exp(-u) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y-y_b}{z}\sqrt{u}\right)\right. \\ \left. - \operatorname{erf}\left(\frac{y-y_a}{z}\sqrt{u}\right)\right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x-x_b}{z}\sqrt{u} - \frac{vz}{4D\sqrt{u}}\right)\right. \\ \left. - \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_a}{z}\sqrt{u} - \frac{vz}{4D\sqrt{u}}\right)\right] du \end{aligned} \tag{4.14}$$

où v est la vitesse de Darcy ($\mathrm{m\,s^{-1}}$) et $\varphi_{anth}(t)$ une fonction représentant l'apport thermique de la zone soumise à un changement d'occupation de sol.

Quand le climat est pris en compte, la fonction $\varphi_{anth}(t)$ est définie comme suit (Bayer et al. 2016) :

$$\varphi_{anth}(t) = \varphi_{str}(t) - \varphi_{GST}(t) \tag{4.15}$$

avec $\varphi_{str}(t)$ la fonction représentant la température de la surface du sol anthropisé. Elle se définit par (Rivera et al. 2015) :

$$\varphi_{str}(t) = T_m \left(b_1 + b_2 \cos \left(2\pi \left(\frac{t}{t_0} - L \right) \right) \right) \tag{4.16}$$

avec b_1 un facteur de pondération pour la température moyenne de la structure en surface, b_2 facteur qui prend en compte l'amplitude de variation annuelle de la température générée par la structure sur le sol, L le déphasage et t_0 la période du signal de température atmosphérique (sous-section 4.1.1). Les valeurs des paramètres b_1 et b_2 sont propres au type de structure construite (Taylor et Stefan 2009).
La fonction $\varphi_{str}(t)$ peut être approchée par une valeur de température moyenne représentative de l'impact annuel de la structure sur la surface du sol. Par exemple, la construction d'une route ou d'un parking en bitume réchauffe la surface du sol d'une température moyenne ΔT_a de 3-4 °C (Bayer et al. 2016 ; Dědeček et al. 2012). Pour ce type de structures $\varphi_{str}(t)$ suit la même tendance que $\varphi_{GST}(t)$ auquel il faut rajouter ΔT_a à partir de la date de construction (figure 4.9).

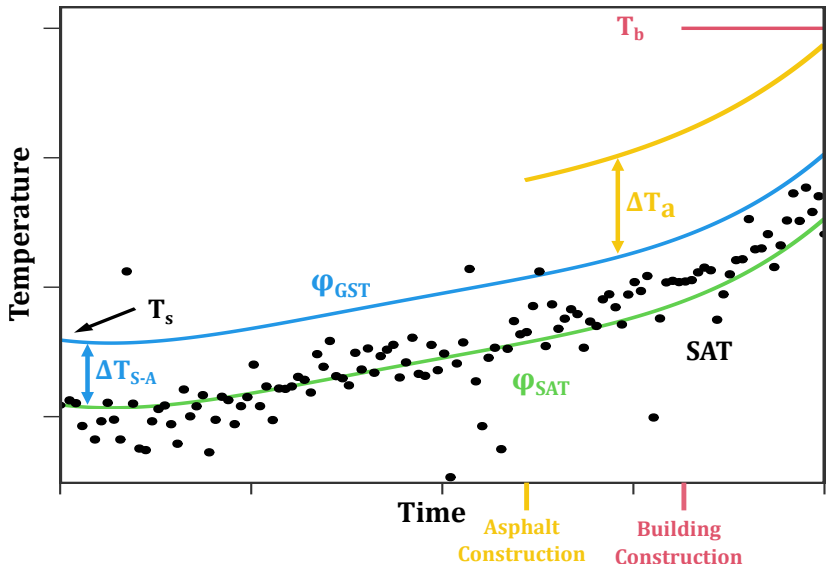


Figure 4.9 – Composantes des fonctions $\varphi_{anth}(t)$ et φ_{GST} (t) pour la prise en compte de l'occupation des sols dans le transfert thermique

Pour un bâtiment, on peut considérer que la température de l'assise reste fixe à une valeur T_b après sa construction. Cette valeur T_b est spécifique à chaque site, dépendant des conditions climatiques et de l'isolation du bâtiment (Bayer et al. 2016). Des valeurs comprises entre 17 °C et 23 °C sont classiquement utilisées (Bayer et al. 2016 ; Bidarmaghz et al. 2021 ; Menberg et al. 2013 ; Rivera et al. 2015, 2016).

Finalement, pour la zone d'étude, les paramètres retenus sont :

- Revêtement asphalte : $\Delta T_a = 3.5\,°C$;
- Construction bâtiment : $T_b = 20.0\,°C$.

Il est important de noter que la formulation analytique (équation 4.14) ne prend pas en compte la dispersion thermique.

4.2.4 Résolution par approche numérique

Un modèle numérique 3D équivalent est mis au point sous Feflow (version 8.0). Ce logiciel permet de simuler les écoulements souterrains et les transferts thermiques à travers un milieu poreux saturé/non saturé (Diersch 2013). Les équations de transfert de masse et d'énergie (équation 4.6 et équation 4.7) sont résolues à partir d'une discrétisation de temps et d'espace selon la méthode des éléments finis. L'utilisation d'un schéma de discrétisation permet de remplacer les équations différentielles par un jeu d'équations linéaires résolues numériquement à l'aide des conditions limites et initiales définies sur le domaine. Le modèle numérique est par ailleurs utilisé pour estimer l'impact de la dispersion et de la vitesse de Darcy sur la dynamique thermique du sous-sol urbain. Les paragraphes qui suivent détaillent la construction du modèle, ainsi que les propriétés et les conditions limites implémentées. Le maillage utilisé est ensuite détaillé.

Extension, propriétés et conditions limites

Le domaine retenu couvre une zone étendue centrée sur le site (figure 4.10) :

- Longueur 2000 mètres ;
- Largeur 1000 mètres ;
- Profondeur 400 mètres.

Le dimensionnement a été réalisé afin de limiter au maximum l'influence des conditions limites disposées en bordure du modèle.

Les conditions limites hydrauliques ont été choisies pour restituer un gradient hydraulique local orienté d'ouest en est de 6 ‰ :

- Limite hydraulique ouest : condition de Dirichlet $H_{ouest} = 20\,\mathrm{m}$

- Limite hydraulique est : condition de Dirichlet : $H_{est} = 8\,\mathrm{m}$

Les conditions limites thermiques sont les suivantes :

- Couche supérieure du modèle : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température associée à l'occupation des sols ;
- Face amont : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température modifiée par les variations climatiques ;
- Face inférieure du modèle : condition de Dirichlet fixe afin de restituer un gradient géothermique $0.03\,^{\circ}\mathrm{C\,m^{-1}}$.

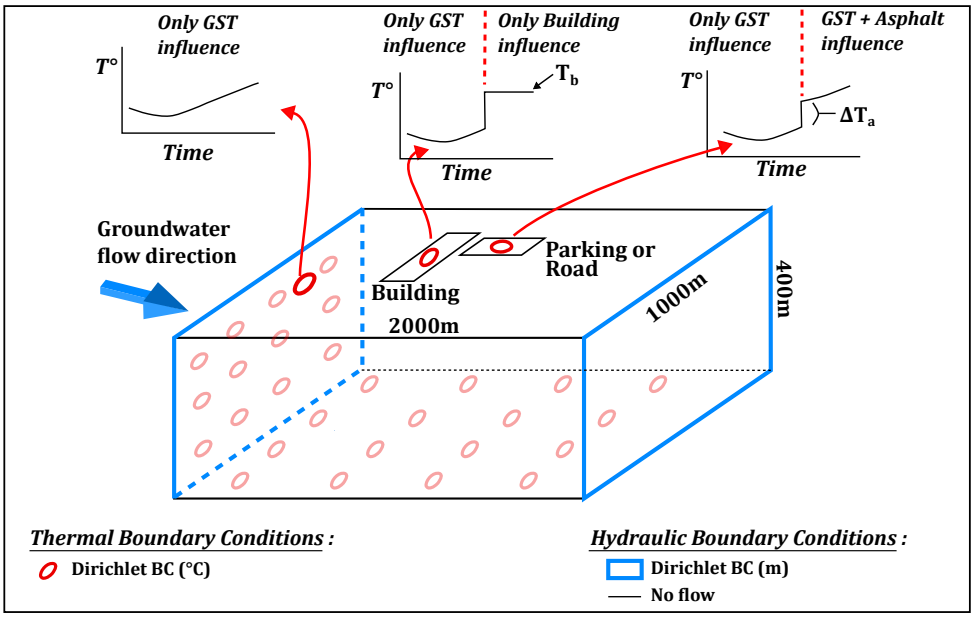


FIGURE 4.10 – Extension 3D du modèle numérique et conditions limites thermiques et hydrauliques utilisées dans FEFLOW

Les propriétés hydrodynamiques et thermiques du modèle de référence sont considérées homogènes sur tout le domaine (tableau 4.2).

INFLUENCE DE LA DISPERSION ET DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT :

Choix des valeurs de dispersion : l'effet de la dispersion est négligé dans la solution analytique. Son impact sur la dynamique du SUHI sous la zone modélisée est estimé avec la solution numérique. La dispersion thermique α peut être approchée par une fonction empirique de type puissance développée à partir d'une compilation de données issues de 109 auteurs différents (SCHULZE-MAKUCH 2005). La formule obtenue permet d'estimer α par :

$$\alpha = cL_c^m \tag{4.17}$$

où L_c (m) représente la longueur caractéristique du milieu, c est un paramètre caractéristique du milieu géologique et m est un exposant représentant la pente de la relation sur un graphique log/log.
Les valeurs des paramètres m et c sont fonctions du milieu géologique étudié (tableau 4.4).

Matrice	**m**	**c**	**Nombre de données**	**Coefficient régression**	$\boldsymbol{\alpha}$ ($L_c = 500$ m)
Non consolidée	0.81	0.085	156	0.77	13
Sable consolidé Grès	0.92	0.01	29	0.88	3
Calcaire	0.74	0.80	54	0.74	80

TABLE 4.4 – Paramètres pouvant être utilisés dans l'équation 4.2.4 et dispersion associée pour $L_c = 500$ m (adapté de SCHULZE-MAKUCH 2005)

La longueur caractéristique d'un modèle correspond à la distance entre la source d'un panache et le point d'observation (SCHULZE-MAKUCH 2005). Pour des vitesses faibles ($< 1 \times 10^{-7}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$) et des longueurs caractéristiques réduites, l'effet de la dispersion sur l'extension d'un panache thermique peut être négligée (MOLINA-GIRALDO et al. 2011).
Toutefois, le site étudié présente une longueur caractéristique importante de 500 m. Dans ce contexte, l'analyse de l'effet de la dispersion s'avère pertinent. Afin d'estimer son impact sur la dynamique du SUHI des valeurs de 1×10^{-5}, 5, 20, 50 et 80 m ont été retenues. Ce panel permet d'englober des valeurs de dispersion caractéristiques des milieux gréseux, calcaires ou non consolidés calculés avec l'équation 4.17 pour $L_c = 500$ m (tableau 4.4). Dans le scénario référence, elle a une valeur négligeable ($\alpha = 1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$) pour être dans des conditions similaires à la résolution analytique.

Vitesse d'écoulement naturelle : L'impact de la vitesse d'écoulement naturelle dans le sol sur la dynamique thermique au droit du site est aussi étudié. Pour cela, cinq valeurs de vitesse de Darcy comprises entre 3.2×10^{-8} et $2.0\times10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ (1-60 $\mathrm{m\,an^{-1}}$) ont été retenues. Ces vitesses correspondent à un panel assez représentatif des écoulements rencontrés en milieu sédimentaire non karstique. Dans le modèle numérique, ces vitesses sont obtenues en faisant varier la conductivité hydraulique et le gradient hydraulique (tableau 4.5).

Pour la gamme de vitesse de Darcy retenue, le nombre de Péclet (équation 2.3)

	K ($m\,s^{-1}$)	**i** (‰)	**v** ($m\,s^{-1}$)	**v** ($m\,an^{-1}$)
	5.3×10^{-6}	6.0	3.2×10^{-8}	1.0
Sc ref	2.6×10^{-5}	6.0	1.6×10^{-7}	5.0
	5.9×10^{-5}	8.0	4.8×10^{-7}	15.0
	9.5×10^{-5}	10.0	9.5×10^{-7}	30.0
	1.9×10^{-4}	10.0	1.9×10^{-6}	60.0

TABLE 4.5 – Tableau résumant les conductivités hydrauliques et les gradients hydrauliques utilisés dans le modèle numérique pour restituer les vitesses de Darcy, le scénario de référence correspond à la deuxième ligne

ne dépasse pas la valeur de 1 (figure 4.11), correspondant à un mécanisme de transfert d'énergie majoritairement conductif (DASSARGUES 2018 ; PREVIATI et al. 2022). Toutefois, même si le processus advectif est minoritaire dans notre cas, il reste pris en compte dans les approches retenues pour simuler le transport global d'énergie dans le sous-sol.

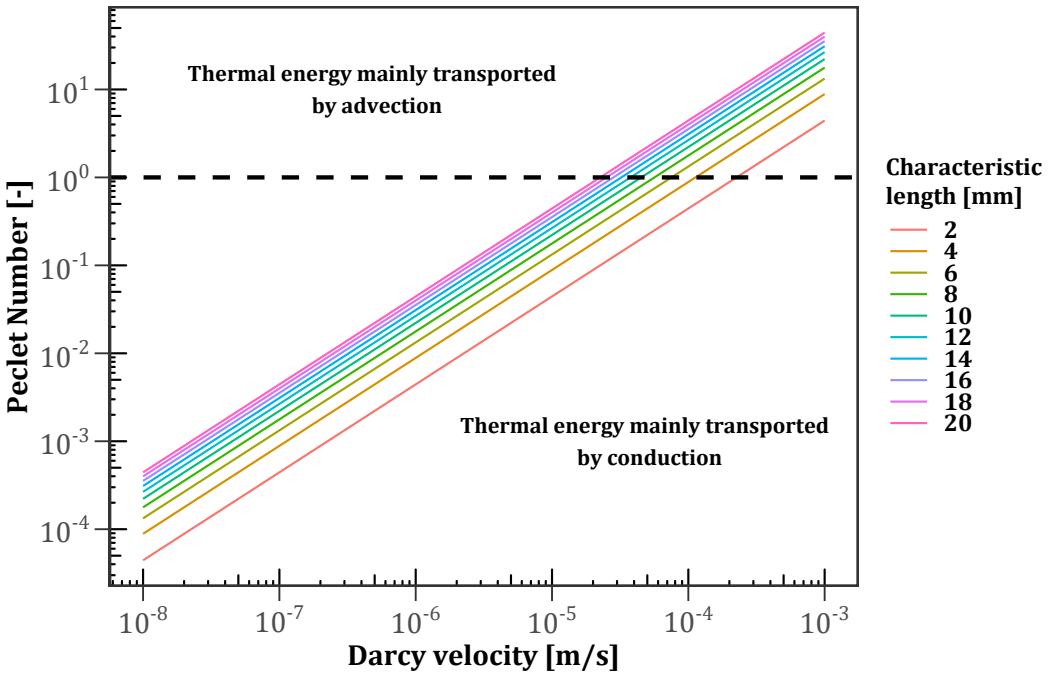


FIGURE 4.11 – Nombre de Péclet en fonction de la vitesse de Darcy et de la longueur caractéristique pour $\lambda_{bulk} = 3.0\,W\,m^{-1}\,K^{-1}$ (*ie* $\lambda_{solide} = 1.89\,W\,m^{-1}\,K^{-1}$ et $n = 0.3$). Lorsque le nombre de Péclet est inférieur à 1, l'énergie est majoritairement transportée par conduction

Maillage et stabilité numérique :

Le modèle numérique est constitué de 104 couches avec une discrétisation verticale décroissante en profondeur (tableau 4.6.) La grille horizontale créée possède 27795 noeuds, avec un raffinement plus important à proximité des structures (taille des éléments ≈ 2 m).

Profondeur	**Nombre de couches**	**Espacement**
0 - 2 m	4	0.5 m
2 - 56 m	55	1.0 m
56 - 100 m	22	2.0 m
100 - 150 m	10	5.0 m
150 - 200 m	5	10.0 m
200 - 400 m	8	25.0 m
Total	**104**	

Table 4.6 – Discrétisation verticale du maillage 3D Feflow

La taille des mailles, la longueur des pas de temps utilisés, les valeurs de dispersion et de vitesse de Darcy ont un impact direct sur la stabilité numérique d'un modèle. Elle peut être estimée à partir des nombres adimensionnels de *Péclet numérique* (Pe_{grid}) et de *Courant-Friedrich-Levy* (C_r). Afin de garantir la stabilité du modèle, il convient que $Pe_{grid} < 2$ et $C_r < 1$ (Dassargues 2018). Ces deux nombres s'expriment par :

$$Pe_{grid} = \frac{vd}{D^t} \tag{4.18}$$

et

$$C_r = \frac{v\delta t}{d} \tag{4.19}$$

avec v la vitesse de Darcy ($\mathrm{m\,s^{-1}}$), δt le pas de temps de calcul (s), d la longueur d'une maille (m) et D^t le coefficient de dispersion thermique ($\mathrm{m^2\,s^{-1}}$) qui inclue la diffusion thermique D et la dispersion α.
Lorsque les dispersions sont faibles et les vitesses de Darcy élevées, il convient de diminuer la taille des mailles et la durée des pas de temps pour garantir la stabilité numérique du modèle. Cette opération augmente considérablement le nombre de nœuds du maillage et le temps de calcul. Concrètement, dans les analyses de sensibilité, les scénarios incluant des vitesses élevées (30 et 60 $\mathrm{m\,an^{-1}}$) et des dispersions très faibles ($\alpha = 1 \times 10^{-5}$ m) n'ont pas été retenues.

4.3 Dynamique thermique du sous-sol : complémentarité des outils analytique et numérique

L'évolution et la dynamique thermique dans le sous-sol homogène du site théorique s'apparentant à une zone commerciale ou universitaire a été modélisée dans différents contextes hydrogéologiques. Un historique de construction de routes, parkings et bâtiments a été pris en compte et une chronique de réchauffement climatique graduel s'étalant de 1900 à 2050 a été utilisée. Les deux méthodes (analytique et numérique) de résolution des équations de transfert thermique détaillées dans la partie précédente ont été utilisées.
Il ressort que dans le scénario de référence, les résultats analytiques et numériques sont comparables. La solution analytique se montre même pertinente dans la totalité des scénarios testés. Mais ces deux outils s'avèrent en fait complémentaires selon la problématique et les objectifs pour lesquels la caractérisation est menée. Les avantages et inconvénients de chacune des méthodes sont discutés dans le cadre de l'intégration de la démarche dans un modèle visant à simuler le fonctionnement transitoire d'un ATES exploitant une nappe peu profonde.

4.3.1 Dynamique thermique du site

Présentation des résultats à l'échelle du site

L'évolution transitoire de la température dans le sous-sol du site met en évidence un réchauffement généralisé sous l'impact du changement climatique et de l'anthropisation des surfaces au cours de la période étudiée (figure 4.12 et figure 4.13). L'intensité du réchauffement est hétérogène dans les 3 dimensions de l'espace et augmente au cours du temps.

Sur un plan horizontal à 30 m de profondeur, 5 ans après la construction des routes, l'extension du SUHI est relativement faible (figure 4.12). Ce n'est qu'après la construction des bâtiments en 1990 que la dynamique de réchauffement s'accélère à cette profondeur. Par la suite, l'effet combiné des routes, des bâtiments et du réchauffement climatique génère une augmentation de température qui atteint 2.5 °C en 2050 au droit de la majeure partie de la surface anthropisée (figure 4.12). L'augmentation est même de 3.5 °C dans la partie centrale du domaine. Le sens de l'écoulement naturel ouest → est entraîne une légère progression du SUHI vers l'est au cours du temps.

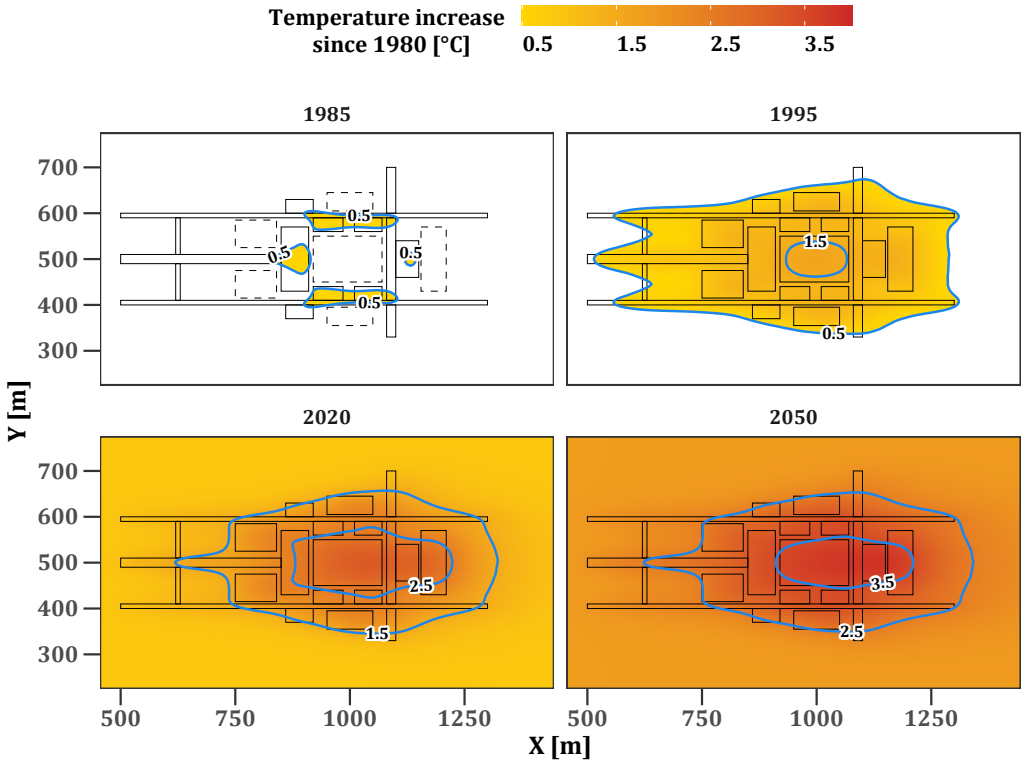


FIGURE 4.12 – Impact du SUHI sur le réchauffement du sous-sol à 30 m de profondeur : Plan horizontal représentant l'augmentation de température par rapport à l'état initial avant construction des routes et des bâtiments en 1980. Une augmentation en dessous de 0.5 °C est représentée en blanc. En 1985, les bâtiments ne sont pas encore construits et sont représentés en pointillés sur la carte.

Pour étudier la propagation et la dynamique du signal en profondeur, l'évolution des températures est analysée le long du profil F2 (figure 4.13). Avant 1980, le réchauffement climatique peu prononcé de la zone impacte légèrement les horizons proches de la surface, mais n'est pas perceptible plus en profondeur. À partir de 1980, l'anthropisation du sol génère une augmentation brusque de la température en proche surface et le signal thermique se propage en profondeur. À 30 m sous la surface du sol, la température atteint 17.3 °C en 2050, soit une augmentation de 3.0 °C (+20%) par rapport à 1980 (figure 4.13a). L'ampleur de l'augmentation de température décroît en profondeur. À 70 m, elle n'est plus que de 0.5 °C (+3%).

L'anomalie positive créée par les phénomènes en surface se propage en profondeur au cours du temps (figure 4.13b). En 1995, le SUHI perturbe l'équilibre thermique du sous-sol jusqu'à 60 m de profondeur. En 2050, l'anomalie s'étend jusqu'à 120 m de profondeur (figure 4.13b). Les formes des profils sont caractéristiques des diagraphies de température réalisées en zone urbanisées (figure 4.4), confirmant la pertinence de cette approche pour modéliser l'effet SUHI.

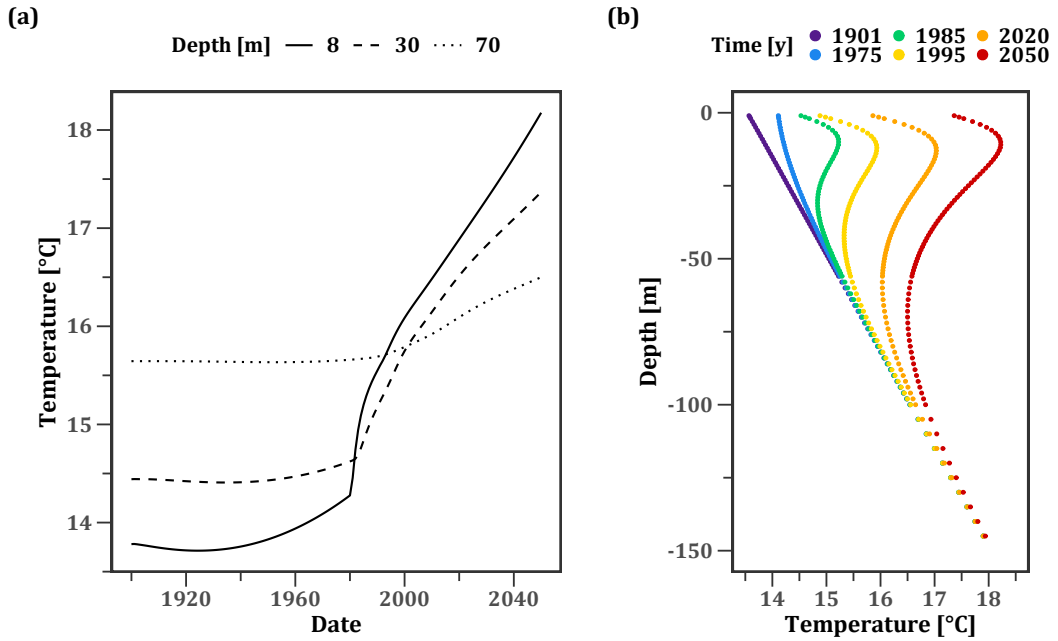


FIGURE 4.13 – Impact du SUHI sur l'évolution de la température dans le sous-sol au point F2 pour $v = 5.0\,\mathrm{m\,an^{-1}}$ et $\alpha = 1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$: (a) évolution transitoire de la température à différentes profondeurs et (b) évolution de la forme des profils de température en fonction du temps (résultats du modèle numérique)

Déconvolution des phénomènes de surface

La solution analytique permet de déconvoluer facilement l'effet de chaque structure et de chaque phénomène en n'importe quel point du sous-sol (figure 4.14).

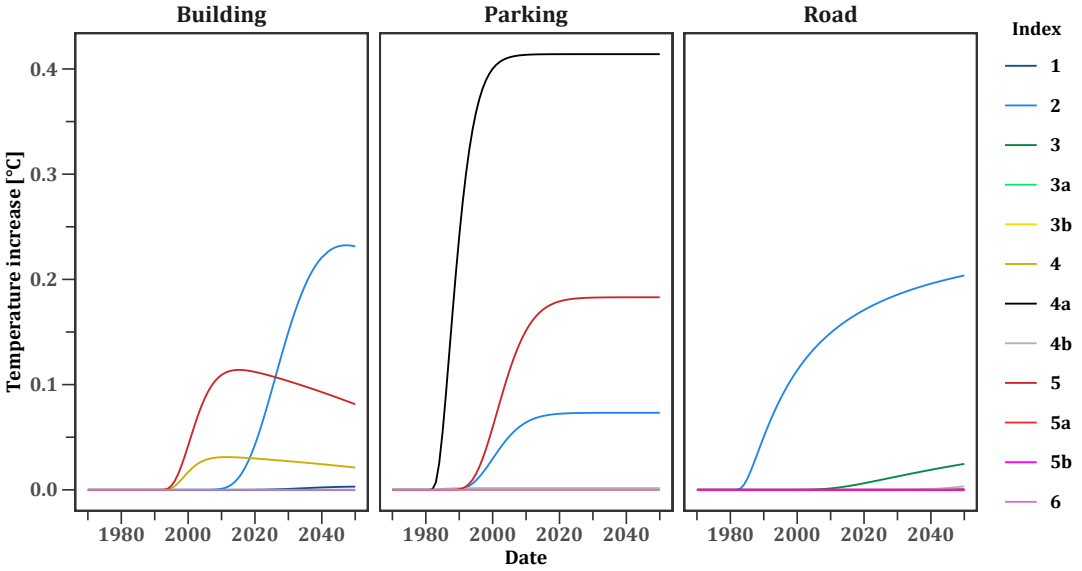


FIGURE 4.14 – Déconvolution du signal thermique dans le sous-sol à 30 m de profondeur au droit de F2 : apport de chaque structure en surface en fonction du temps (résultats analytiques)

Ainsi, dans le cas théorique présenté, le parking *P4a*, le bâtiment *B2* et la route *R2* sont les structures favorisant le plus l'augmentation des températures au point F2. La méthode analytique permet aussi de déconvoluer l'effet du climat et de l'anthropisation (figure 4.15). En 1995, les effets du climat et de l'anthropisation sont quasi équivalents au droit de F2. En revanche, en 2050, l'effet du climat devient majoritaire sur l'augmentation des températures dans les 50 premiers mètres du sous-sol.

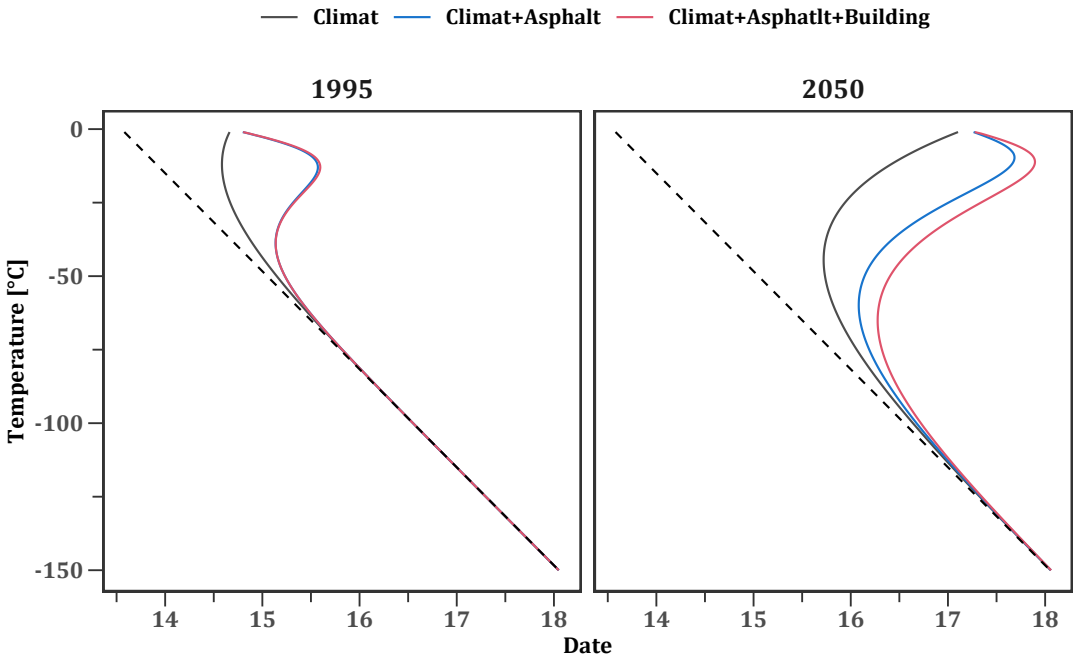


FIGURE 4.15 – Déconvolution des signaux thermiques le long du profil F2 : apport des différents phénomènes de surface en 1995 et 2050

Effet de la vitesse d'écoulement naturelle et de la dispersion sur l'extension et l'intensité du SUHI

L'impact de la dispersion et de la vitesse d'écoulement sur la dynamique du SUHI a été analysé grâce au modèle numérique. Pour chaque scénario, les températures moyennes obtenues dans plusieurs intervalles de profondeurs au droit de F2 en 1985 et 2050 sont comparées (figure 4.16).

Les résultats mettent en évidence que :

- Les valeurs de la dispersion et de la vitesse d'écoulement ont un impact très modéré sur les températures de la proche surface (1-10 m) ;
- La dispersion a un impact plus important en profondeur : en 2050, pour une vitesse de 30 m an^{-1} dans l'intervalle 25-50 m, la température moyenne

est de 16.5 °C pour $\alpha = 5$ m. Elle atteint 18.5 °C pour $\alpha = 80$ m ;

- L'influence de la vitesse d'écoulement est plus limitée. En effet, lorsque $v > 15\,\mathrm{m\,an^{-1}}$, les températures atteignent un plateau, quelle que soit la valeur de dispersion, l'horizon de temps considéré et la profondeur inspectée. Une vitesse d'écoulement élevée ne facilite donc pas la propagation du signal thermique.

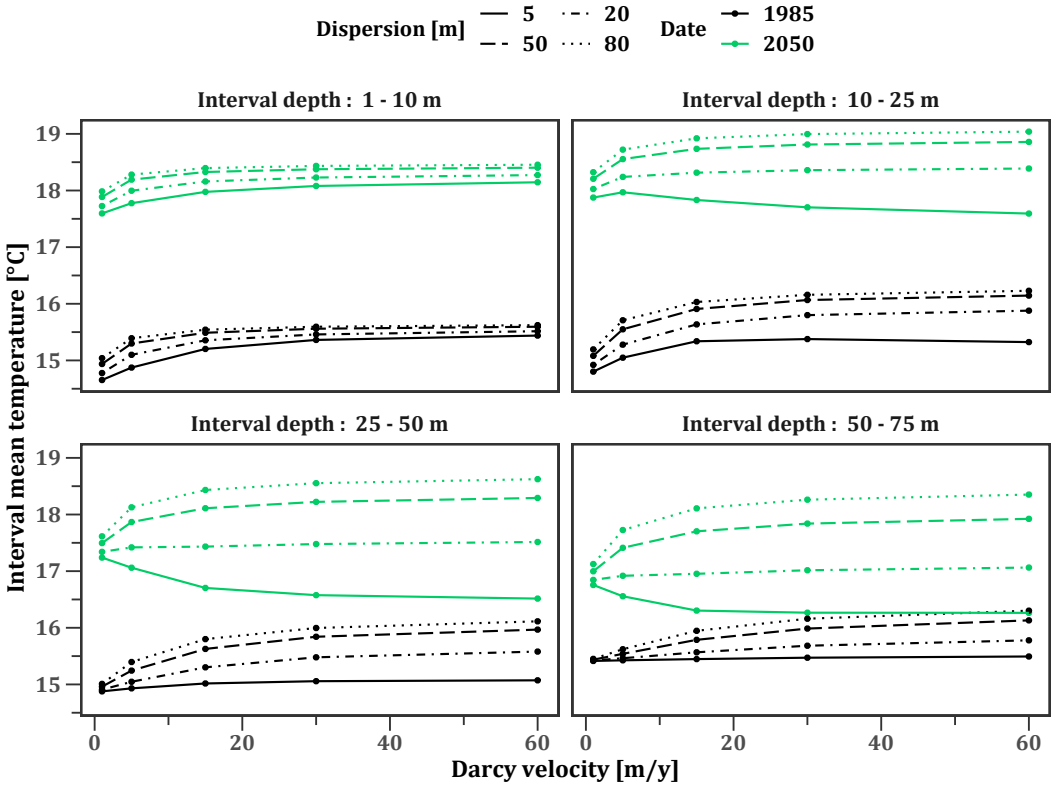


FIGURE 4.16 – Effet de la vitesse d'écoulement naturelle et de la dispersion sur la température moyenne de différents intervalles en profondeur au droit de F2. Les courbes noires correspondent à la date de 1985 et les vertes à 2050

Conclusion intermédiaire

L'évolution atypique des températures mise en avant par ces résultats montre la nécessité de considérer les transferts thermiques transitoires se dirigeant de la surface vers les horizons plus profonds. Or, pour modéliser le fonctionnement transitoire d'un ATES, une vision statique et permanente résultant d'un équilibre entre une température atmosphérique moyenne et le gradient géothermique est classiquement utilisée comme état initial. Par ailleurs, l'approche détaillée ici suggère que la prise en compte de conditions limites statiques en surface durant la modélisation transitoire d'un ATES pourrait se retrouver prise en défaut sur

le long terme. En effet, l'augmentation non négligeable des températures au-dessus de 100 m de profondeur pourrait perturber les transferts thermiques entre un gisement géothermique ATES peu profond et le milieu ambiant. Dans ce contexte d'exploitation peu profonde, la pérennité des bulles pourrait se retrouver particulièrement impacté par ce phénomène. L'absence de prise en compte de ces transferts dans les modélisations prospectives d'exploitation ATES pourrait mener à une mauvaise estimation de :

- L'impact thermique transitoire dans le sous-sol ;
- L'estimation de la performance de l'ATES.

L'intensité et l'extension d'un SUHI est propre aux propriétés thermiques et hydrogéologiques du sous-sol, mais aussi à l'occupation des sols en surface et à la dynamique climatique. Il n'est pas possible de généraliser les valeurs de température obtenues ici à d'autres sites. Cependant, la dynamique et tendance globales des SUHI en zone urbaine sont similaires d'une ville à l'autre (Benz et al. 2015 ; Bidarmaghz et al. 2021 ; Menberg et al. 2013 ; Previati et al. 2022).

4.3.2 Deux modes d'approches différents mais complémentaires

Les résultats décrits ci-dessus montrent qu'il apparaît pertinent de prendre en compte les phénomènes de surface pour modéliser le fonctionnement transitoire d'un ATES exploitant un aquifère peu profond en contexte urbain soumis au réchauffement climatique. Dans ce cadre, les méthodes analytiques et numériques permettent de restituer cette dynamique. Leurs résultats respectifs sont dans un premier temps comparé. Ensuite, les bénéfices et les inconvénients de chaque méthode sont présentés dans l'optique d'être intégré dans la modélisation transitoire d'un ATES exploitant un aquifère peu profond.

Résultats des deux méthodes pour α négligeable :

La formulation analytique ne prend pas en compte la dispersion. Dans un premier temps, les résultats analytiques sont comparés avec ceux des modèles numériques pour $\alpha = 1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$ (figure 4.17). Pour des raisons de stabilité numérique, seuls les 3 modèles ayant les vitesses les plus faibles sont lancés pour $\alpha = 1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$ (sous-section 4.2.4). Le modèle où $v = 15\,\mathrm{m\,an^{-1}}$ présente toutefois une très légère instabilité numérique qui reste acceptable.

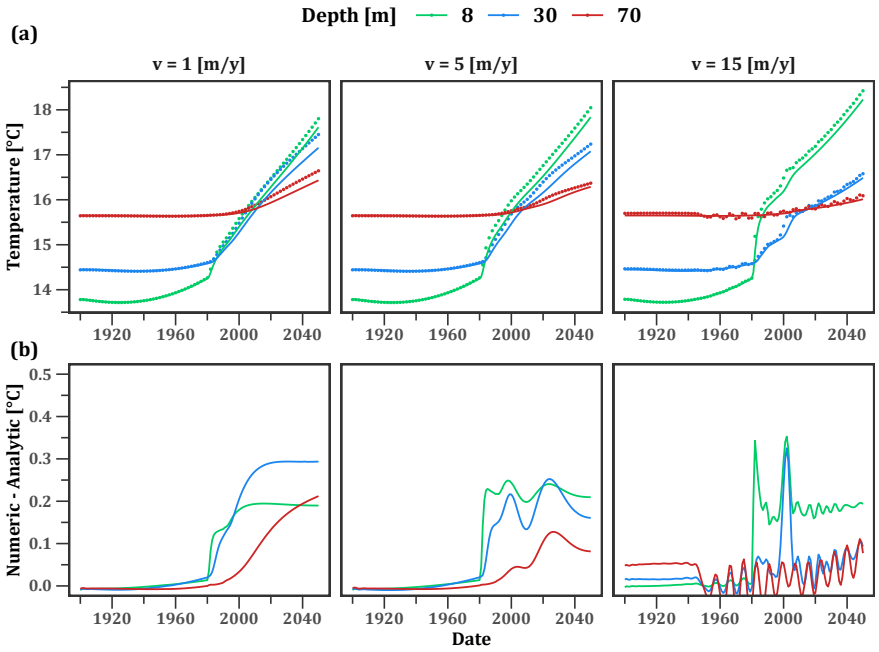


FIGURE 4.17 – Impact de l'anthropisation des sols et du réchauffement climatique sur la distribution de la température en profondeur restituée par modèles analytique et numérique : (a) Évolution de la température en fonction du temps à différentes profondeurs (lignes : modèle analytiques et points : modèle numérique 3D) et (b) différences de température entre le modèle numérique et le modèle analytique

L'évolution de la température en fonction du temps à différentes profondeurs montre des tendances très similaires entre les modèles analytique et numérique. Les deux solutions restituent des températures identiques avant le changement d'occupation du sol. Après la construction des différentes structures, le modèle analytique génère une augmentation de température légèrement moins prononcée. La différence entre les deux modèles tend à s'équilibrer avec le temps (figure 4.17b). Les différences sont plus importantes lorsque la vitesse d'écoulement est plus faible. Les RMSE calculées à l'horizon 2050 à partir des températures des profils restitués par les deux solutions sont toujours $< 0.2\,°C$, quelle que soit la vitesse d'écoulement. Ce résultat est en accord avec ceux de RIVERA et al. 2015.

LA SOLUTION ANALYTIQUE : UN OUTIL ADAPTÉ À UN LARGE PANEL DE PARAMÈTRES HDYROGÉOLOGIQUES...

Lorsque la dispersion est négligée, la solution analytique et le modèle numérique restituent des résultats quasi identiques. Toutefois, l'impact de la dispersion est non négligeable sur la distribution de température dans le sous-sol des zones

urbanisées (sous-section 4.3.1). Or, ce paramètre n'est pas pris en compte par la solution analytique. Pour comparer les résultats restitués par la solution analytique avec ceux des modèles numériques prenant en compte la dispersion, l'erreur relative (err) entre les deux modèles est analysée. err s'obtient par la formule suivante :

$$err = 100 \times \frac{T_{num} - T_{ana}}{T_{num}} \tag{4.20}$$

Si $err < 10\%$, l'utilisation du modèle analytique est adaptée pour le jeu de paramètres testés (Pophillat et al. 2020). Pour 10 % $< err <$ 30 %, l'emploi du modèle analytique est toujours considéré comme satisfaisant. Au-dessus de 30 %, l'utilisation de la solution analytique n'est plus appropriée.

Pour une vitesse donnée, l'erreur est estimée entre la solution analytique et le jeu de modèle numérique avec une dispersion variable. err est moyennée sur 4 intervalles distincts (figure 4.18).

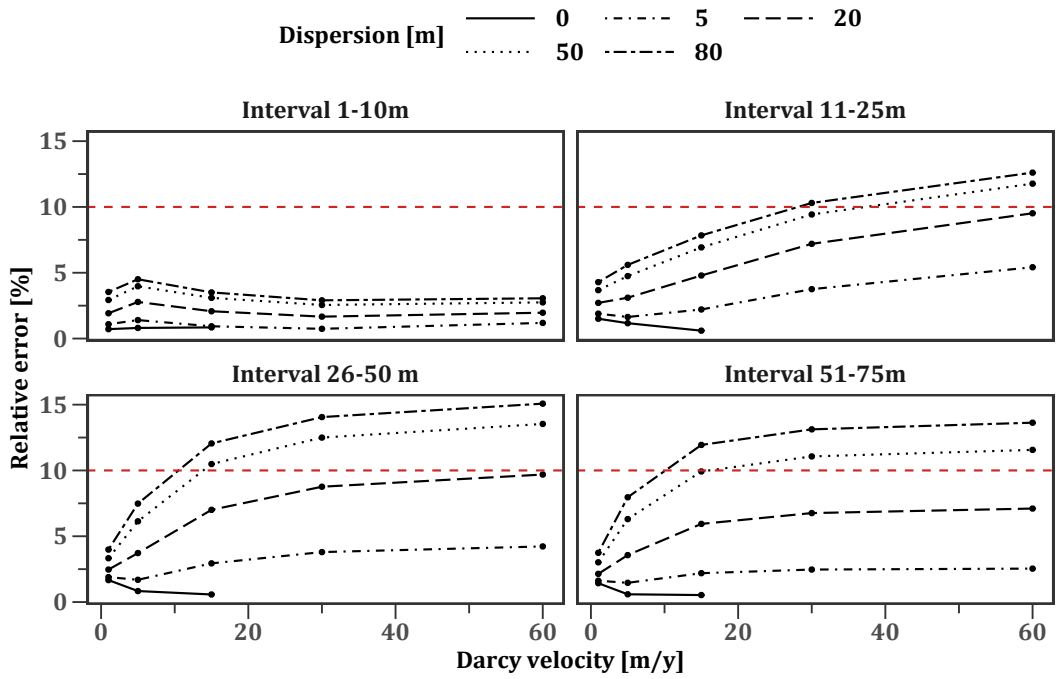


Figure 4.18 – Impact de la vitesse de Darcy et de la dispersion sur l'erreur relative de la solution analytique par rapport au modèle numérique en 2050. L'erreur en dessous de 10 % (trait rouge) est considérée comme acceptable (Pophillat et al. 2020). Observation au point F2.

Les résultats montrent que dans le contexte du site étudié :

- La solution analytique est adaptée pour $\alpha < 20$ m quelle que soit la vitesse considérée ;
- Quand $\alpha > 20$ m la solution est toujours adaptée pour $v < 15.0\,\mathrm{m\,an^{-1}}$. Elle reste satisfaisante pour $v > 15.0\,\mathrm{m\,an^{-1}}$.

Malgré la non prise en compte de α dans la méthode analytique, celle-ci reste pertinente par rapport à l'utilisation de méthode numérique.

... pouvant faciliter la caractérisation d'un site en prévision d'une exploitation ATES dans un aquifère peu profond ...

Bien que le modèle analytique ne prenne pas en compte la dispersion, il permet de restituer des résultats pouvant être considérés bons à satisfaisants par rapport à l'emploi d'une solution numérique dans les contextes étudiés. Une fois paramétrée, la technique analytique permet de calculer la distribution de la température en quelques secondes contre 2 h 30 à 5 h pour le modèle numérique (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v3 @ 2.30GHz). Ce gain de temps considérable et la précision des résultats pourraient permettre à cet outil d'être utilisé pour pré-calibrer un modèle numérique visant à simuler les transferts thermiques propres à l'exploitation d'un site ATES peu profond en zone urbaine. Elle peut aussi permettre d'obtenir un aperçu rapide de l'évolution future des transferts thermiques dans les sous-sols urbains et fournir des informations cruciales sur le choix du lieu d'implantation des forages et la profondeur à exploiter. Pour résumer la méthode analytique peut :

- Restituer rapidement et prédire l'évolution des profils de températures caractéristiques des sites dont la dynamique thermique du proche sous-sol (< 100 m) est fortement influencée par les phénomènes de surfaces ;
- Être utilisée comme outil de pré-calibration de modèles d'exploitation ATES transitoires ;
- Être utilisée comme outil de prospection rapide pour estimer l'influence des phénomènes de surface sur la dynamique thermique future d'un site ;
- Servir d'outil pour obtenir un aperçu rapide des impacts individualisés des différentes structures et des phénomènes en surface (déconvolution du signal) ;
- Permettre éventuellement de guider le choix des lieux d'implantation des forages et les profondeurs à cibler pour que le stockage opéré par un ATES ne soit pas trop impacté par les phénomènes de surface.

... mais présentant certaines limites

Les solutions analytiques sont des outils performants dans des contextes où les propriétés du sous-sol sont homogènes. Lorsque les géométries des corps sédimentaires sont plus complexes, et que le sous-sol présente une grande hétérogénéité, l'utilisation des solutions analytiques n'est plus adaptée.
La géométrie des bâtiments en surface du site théorique est relativement simple (formes rectangulaires, orthogonales au sens d'écoulement). Dans des cas d'occupation plus complexes (présence de réseau de chaleur enterré, tunnel, réseau routier dense à forme complexe), la solution analytique devrait aussi montrer des limites pour restituer des résultats robustes. Enfin, le principal problème des solutions analytiques est qu'elles ne sont pas adaptées pour modéliser l'exploitation transitoire des systèmes ATES, basée sur la réversibilité du mode de production des forages. Leur utilisation peut uniquement servir à caractériser l'état initial d'un site et à mener des pré-investigations sur son évolution long terme sans le fonctionnement de l'ATES.

L'outil numérique : décrire le réel complexe pour mieux le gérer

A contrario, les modélisations numériques sont des outils adaptés pour modéliser des contextes plus complexes et hétérogènes, aussi bien en sous-sol qu'en surface. Cette méthode peut être utilisée pour comprendre la dynamique thermique transitoire à l'échelle d'une ville ou d'un quartier (Benz et al. 2015 ; Bidarmaghz et al. 2021 ; Menberg et al. 2013 ; Previati et al. 2022). Cependant, les temps de calcul et de construction du modèle inhérents à cette méthode sont extrêmement longs par rapport à l'utilisation de la méthode analytique.

Malgré tout, la modélisation numérique est à ce jour la seule méthode pour simuler le fonctionnement transitoire d'un ATES. Toutefois, dans les contextes où la dynamique thermique du sous-sol est influencée par les phénomènes de surface, la solution analytique s'avère être un outil complémentaire intéressant pour caractériser et comprendre le fonctionnement du site avec plus de rapidité.

4.4 Conclusion

Ce chapitre détaille les différents phénomènes régissant la distribution des températures dans le sous-sol des agglomérations. Deux approches différentes ont été présentées pour simuler la dynamique des transferts thermiques dans le sous-sol des villes soumis au réchauffement climatique. Elles sont basées sur une modélisation analytique et une modélisation numérique d'un site théorique.

Ces stratégies de modélisation complémentaires aident à comprendre les mécanismes générant un SUHI et à prédire son évolution dans le temps. Sur le long terme, les deux approches mettent en évidence un réchauffement généralisé dans le sous-sol du site modélisé. La construction de routes ou de bâtiments et le réchauffement climatique génèrent une anomalie thermique en surface qui se propage progressivement vers les horizons plus profonds du sous-sol. Cette anomalie s'étend sur toute la zone anthropisée et atteint jusqu'à 120 m de profondeur 60 ans après la construction des différents éléments en surface.

De tels résultats mettent en évidence que la vision classique, qui considère les températures du sous-sol comme la résultante d'un équilibre entre une température moyenne extérieure et un flux géothermique fixe, n'est pas adaptée dans un contexte urbain. Or, pour modéliser le fonctionnement des ATES, l'approche classique consiste à utiliser cette vision classique permanente comme point de départ. De plus, les modélisations transitoires d'ATES considèrent des conditions limites thermiques de surface stationnaires. Cette approche est prise en défaut à la fois par le réchauffement climatique et l'historique de construction d'un site. À partir de ces deux constats, il semble pertinent d'intégrer l'approche détaillée dans ce chapitre dans les modélisations transitoires d'ATES exploitant des nappes peu profondes en contexte urbain.

Pour ce faire, la solution analytique présentée peut être utilisée **(i)** comme un outil d'aide à la compréhension rapide, actuelle et future du site et **(ii)** comme une aide à la pré-calibration du modèle numérique qui devra obligatoirement être utilisé pour simuler l'exploitation transitoire de l'ATES.

CHAPITRE 5

Le système ATES : un dispositif dépendant de son environnement

5.1 Introduction et problématique générale

Les conditions d'exploitation d'un système ATES dépendent des propriétés hydrodynamiques et thermiques de l'aquifère cible. Toutefois, la restitution précise et le fonctionnement de l'état thermique initial de la nappe est souvent négligé lors des phases de prédimensionnement. De même, l'évolution globale à long terme du système aquifère est rarement pris en compte, à la faveur de l'impact direct du dispositif géothermique.

Le réchauffement climatique et l'anthropisation des surfaces sont des facteurs qui impactent les températures dans le sous-sol et entraînent notamment l'extension d'îlots de chaleur dans le sous-sol. L'évolution transitoire et l'intensité de ce phénomène dépend à la fois :

- de l'historique de l'occupation de sols ;
- de la dynamique d'évolution des températures atmosphériques ;
- des propriétés thermiques et hydrogéologiques du sous-sol.

En plus de perturber l'équilibre thermique du sous-sol, le réchauffement climatique va entraîner des modifications sur la demande thermique future des bâtiments (Isaac et Vuuren 2008). Dès lors, il est nécessaire de prendre en compte ces effets dans la gestion quantitative à long terme des dispositifs d'exploitation géothermique (sondes thermiques, doublet, ATES). Concernant la performance des ATES, liée au développement et la gestion de bulles thermiques dans le sous-sol, il ne semble pas exister d'études détaillant l'effet combiné de ces deux phénomènes.

Comme présenté dans le chapitre précédent, la dynamique thermique du sous-sol peut être restituée assez précisément à partir de formulations analytiques, dans un panel assez large de propriétés hydrogéologiques. En complément, l'approche numérique peut se révéler pertinente pour des conditions de gisement plus complexes.

La modélisation analytique de systèmes géothermiques a été largement développée pour des systèmes d'exploitation directe non réversibles (Attard et al. 2020 ; Ganguly et Mohan Kumar 2014 ; K.-Y. Li et al. 2010 ; Lin et al. 2019 ; Molina-Giraldo et al. 2011 ; Nordbotten 2017 ; Pophillat et al. 2020). Pour la gestion des dispositifs réversibles, seule l'approche numérique est adaptée compte tenu de la complexité du fonctionnement du système. Le développement de tels modèles pour des zones urbaines nécessite de prendre en compte les singularités locales actuelles, mais également passées, et un cadre de projection susceptible d'intégrer les évolutions futures du climat.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'estimer la performance des forages d'un ATES et l'impact thermique dans le sous-sol pour différents scénarios. Ces scénarios sont basés sur l'anthropisation de la surface et la modification de la demande thermique d'un bâtiment en réponse au réchauffement climatique.
À cette fin, un modèle synthétique est développé, intégrant notamment les calculs de demande thermique d'un bâtiment et d'un dispositif ATES, selon différents scénarios climatiques et d'occupation des sols. Pour chaque scénario, l'impact thermique de l'exploitation de l'ATES sur le sous-sol est détaillé, puis la performance du dispositif ATES dans son environnement est estimée.

5.2 Dimensionnement de l'ATES en contexte de changement climatique

L'estimation de la demande thermique d'un bâtiment, aussi bien en chauffage qu'en refroidissement est une discipline à part entière. Ce travail nécessite des méthodes spécifiques et des logiciels dédiés afin d'estimer correctement la demande thermique des bâtiments. Ce n'est pas le propos direct de ce travail. Toutefois, cette partie présente une approche simplifiée permettant d'estimer la demande thermique de chaud et de froid d'un bâtiment en fonction de sa configuration, de son utilisation et des conditions climatiques. Cette approche est intégrée dans le contexte du cas théorique du chapitre précédent (figure 4.5). Le but est de construire des scénarios d'exploitation d'un dispositif ATES satisfaisant la demande énergétique chaud/froid du bâtiment B5. Cette demande est projetée sur un scénario de changement climatique basé sur le modèle journalier **RCP8.5** appliqué à Bordeaux (figure 5.1).

5.2.1 Méthode et hypothèses de calcul

Le bâtiment synthétique B5 est considéré comme un local à vocation tertiaire sans étage d'une superficie totale de $15\,000\,\mathrm{m}^2$. $7500\,\mathrm{m}^2$ sont utilisés par des bureaux. Le reste de la surface est répartie entre salles de réunion, salles de pause, salles de rangement/archivage, hall d'entrée, sanitaires et couloirs.

En période hivernale, l'estimation de la puissance nécessaire pour chauffer un bâtiment tertiaire se fait à partir du calcul des pertes thermiques depuis l'intérieur. Ces pertes sont liées à (ASHRAE 2021) :

- la conduction à travers les parois (vitres, murs, toit et plancher) ;
- l'apport d'air froid extérieur amené par la ventilation et les infiltrations.

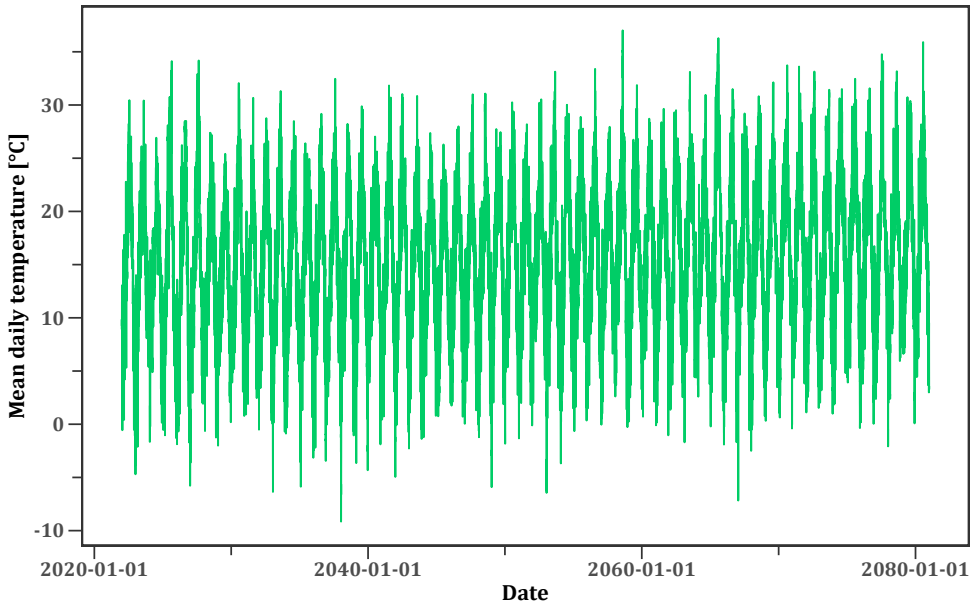


FIGURE 5.1 – Données de température journalière moyenne du scénario RCP 8.5 appliqué à Bordeaux (données issues de SOUBEYROUX et al. 2020)

Théoriquement la ventilation génère deux types d'énergies associées au flux d'air, (i) une énergie sensible liée à sa température et (ii) une énergie latente liée à son humidité. En hiver, la partie de l'énergie latente n'est généralement pas prise en considération pour effectuer les bilans thermiques (ASHRAE 2021).

En période estivale, la puissance de froid est égale à la somme des différents apports de chaleur. Ces apports sont plus complexes à estimer que les pertes de la périodes hivernale. Ils comprennent notamment :

- la conduction à travers le toit, les murs et les vitres,
- les radiations à travers les vitres,
- la ventilation (apport sensible et latent),
- les apports internes (équipements de bureautique, équipements électriques divers, présence humaine et éclairage).

Les pertes et les apports par infiltrations d'air au travers des parois sont négligés, aussi bien en hiver qu'en été. Généralement, les bâtiments non résidentiels sont maintenus à une pression légèrement supérieure à celle de l'atmosphère afin d'empêcher les infiltrations extérieures (ASHRAE 2021).

Les formules utilisées pour calculer les apports et les pertes thermiques du bâtiment sont listées dans le tableau 5.1. Les caractéristiques et propriétés du bâtiment utilisées pour les calculs sont listées en annexe A.

Durant l'hiver, le système de chauffage du bâtiment est supposé fonctionner en permanence pour fournir une température intérieure de 20 °C. En été, la

	Facteur	Équation	Symboles
ÉTÉ	Murs-Toit-vitres	$q = U \times A \times (T_{ext} - T_c)$	U = Coefficient de transfert thermique ($\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$) A = Surface des parois extérieures ($\mathrm{m^2}$) T_c = Température de consigne dans le bâtiment (°C) T_{ext} = Température max extérieure (°C)
	Ventilation	$q = 1.23 \times Q_{vent} \times (T_{ext} - T_c)$	Q_{vent} = Débit nécessaire par personne pour le renouvellement d'air ($\mathrm{L\,s^{-1}}$)
	Radiation vitres	$q = A \times SC \times SCL$	A = Surface des vitres ($\mathrm{m^2}$) SC = Coefficient d'ombre (–) SCL = Coefficient d'apport solaire par radiation ($\mathrm{W\,m^{-2}}$)
	Occupants	$q = N \times P_{occ} \times O$	N = Nombre d'occupants P_{occ} = Chaleur apportée par occupant (W) O = Pourcentage d'occupation
	Équipement divers	$q = N \times P_{eq}$	N = Nombre d'équipement P_{eq} = Chaleur apportée par équipement (W)
	Lumière	$q = A \times E_v \times \eta \times H_e$ (Suszanowicz 2017)	A = Surface éclairée ($\mathrm{m^2}$) E_v = Norme éclairage (lux) η = Efficacité lumineuse ($\mathrm{lm\ W^{-1}}$) H_e = Coeff. d'émission de chaleur ($\mathrm{W\,W^{-1}}$)
	Poste de travail	$q = N \times P_{po} \times A_{po} \times O$	N = Nombre de poste P_{po} = Chaleur dégagée par $\mathrm{m^2}$ ($\mathrm{W\,m^{-2}}$) A_{po} = Surface du poste ($\mathrm{m^2}$) O = Pourcentage d'occupation
HIVER	Dalle	$q = \Pi \times F_s \times (T_c - T_{ext})$	Π = Périmètre de la dalle (m) F_s = Coeff. de transfert thermique de la dalle ($\mathrm{W\,m^{-1}}$)
	Murs-Toit-vitres	$q = U \times A \times (T_c - T_{ext})$	cf ligne 1
	Ventilation	$q = 1.23 \times Q_{vent} \times (T_c - T_{ext})$	cf ligne 2

Table 5.1 – Résumé des facteurs à prendre en compte pour le calcul de la demande thermique du bâtiment B5 selon la saison (ASHRAE 1997, 2021)

climatisation fonctionne uniquement durant l'occupation des bureaux de 8h à 18h pour maintenir une température de 25 °C. Les calculs sont effectués jusqu'en

2080, en utilisant les projections des températures journalières du scénario RCP 8.5 appliqué à Bordeaux (figure 5.1). La période demandant des besoins en climatisation s'étale du 18 mai au 30 septembre. Le reste de l'année est consacré au chauffage des locaux. N'ayant pas d'informations sur l'évolution future de l'humidité à Bordeaux, l'apport de chaleur latent par ventilation en période estivale est supposé égal à l'apport sensible (les valeurs sont généralement proches dans des contextes tempérés (ASHRAE 2021).
L'augmentation (diminution) du nombre de jours de climatisation (chauffage) au fil des années est supposée négligeable.
Afin de vérifier cette dernière hypothèse, l'indice de Degrés Journalier Unifié (DJU) est utilisé sur la chronique de RCP 8.5 appliquée à Bordeaux (Méthode en annexe B).

5.2.2 Évolution des besoins thermiques à long terme

Pour l'année 2022, les besoins thermiques du bâtiment B5 sont constitués pour plus de moitié par la demande en climatisation, en réponse aux apports thermiques internes et aux radiations à travers les vitres (figure 5.2).

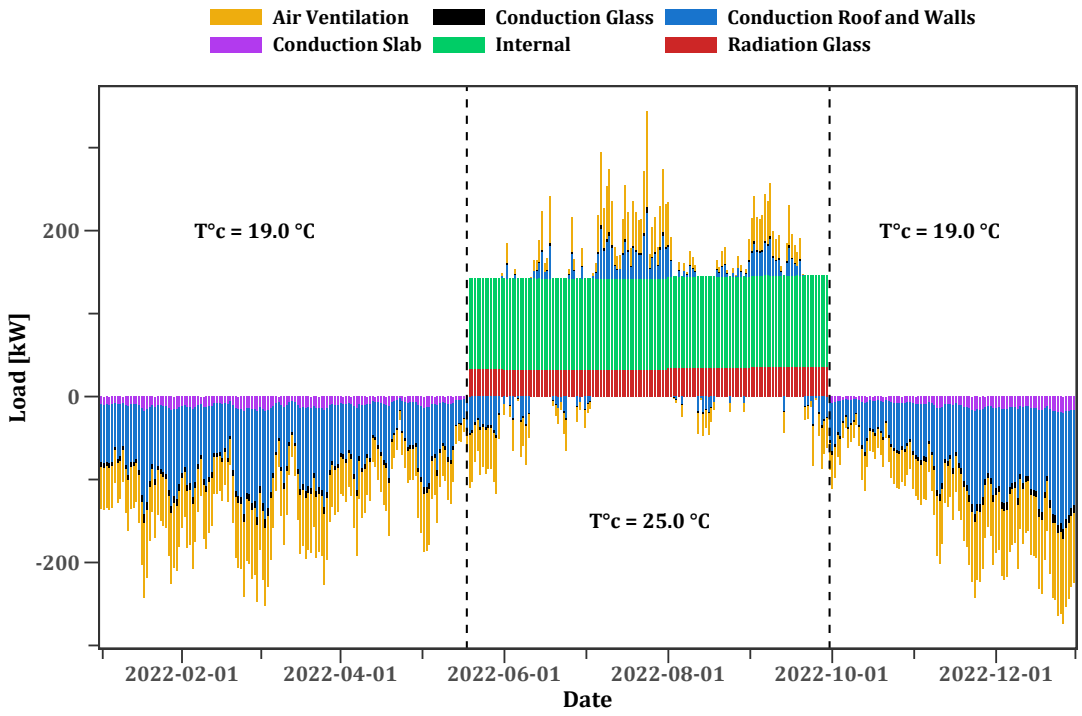


FIGURE 5.2 – Répartition de la demande thermique journalière pour l'année 2022

Les apports internes (en vert sur figure 5.2) sont fixes dans le temps. L'intensité des radiations (rouge) varie très légèrement en fonction du mois considéré.

En hiver, près de la moitié de la demande thermique est imputable à l'air injecté dans le bâtiment par ventilation. Ces résultats sont cohérents avec des cas synthétiques de locaux commerciaux décrits (ASHRAE 1997, 2021). Les pertes par conduction et ventilation visibles durant la période estivale certains jours sont induites par une température extérieure maximale en dessous de la température de consigne interne de 25.0 °C. Pour calculer la demande thermique totale (figure 5.3), ces pertes journalières sont soustraites aux autres apports journaliers.

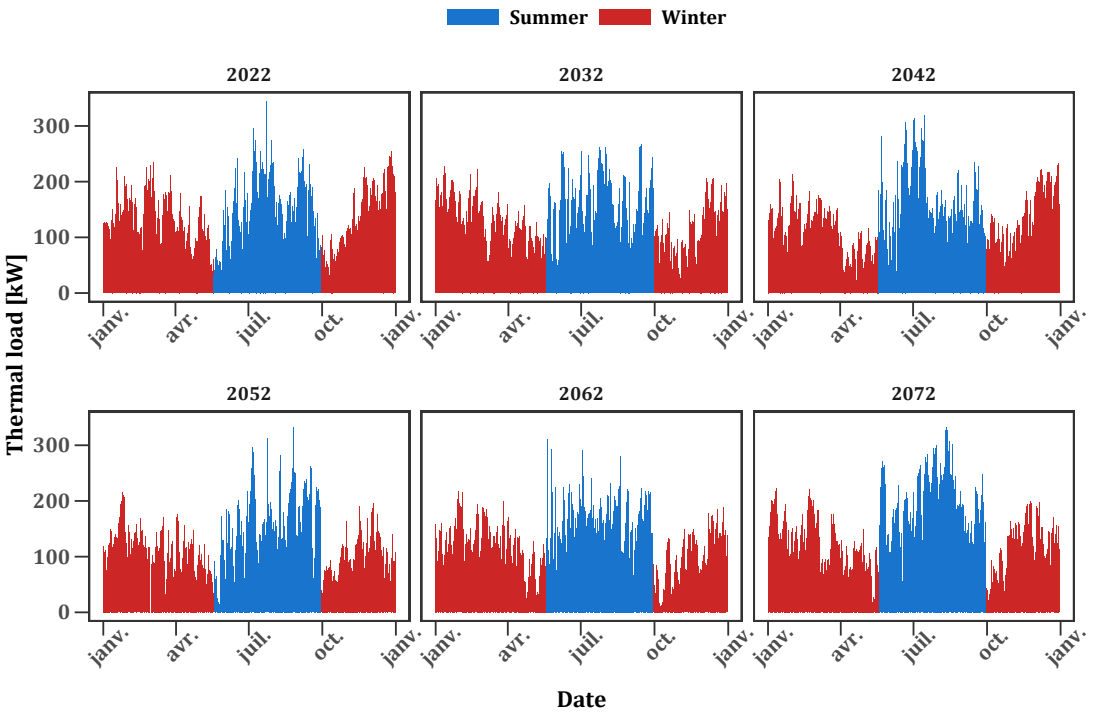


FIGURE 5.3 – Projection des demandes thermiques journalières pour le scénario climatique RCP 8.5

En 2022, selon la valeur du DJU, 94 % de la demande en climatisation se trouve dans la tranche du 18 mai au 30 septembre. Ce pourcentage baisse en 2080 (92 %), signe d'un léger étalement théorique de la période de climatisation future. Pour les besoins en chauffage, la période entre le 30 septembre et le 18 mai représente 92% de la demande en 2022 et 96% en 2080, signe d'un léger raccourcissement. Ces légers étalements et raccourcissements des temps de climatisation et chauffage sur 60 ans d'exploitation sont négligeables. L'hypothèse de période de chauffage et de climatisation de longueurs fixes utilisée ici pour l'estimation des besoins thermique futurs peut donc être validée.

La projection des demandes thermiques à partir de la chronique de température du RCP 8.5 met en évidence une augmentation des demandes journalières en période estivale et une diminution en période hivernale (figure 5.3). La période

estivale est marquée par des pics de plus en plus forts et plus longs.
Les demandes thermiques journalières obtenues ont été moyennées annuellement et par saison puis lissées. La demande thermique est plus importante en saison estivale (figure 5.4a) et relativement stable jusqu'en 2040 puis suit une tendance croissante. La demande de chauffage suit une décroissance linéaire dès la première année.
Les débits de pompage associés (figure 5.4b) à ces demandes thermiques sont calculés à partir des formules du tableau 2.1 en supposant $\Delta T = 5.0\,°C$ et un fonctionnement estival basé en totalité sur un mode actif (PAC avec un COP de 5). En 2022, pour le scénario RCP 8.5, les volumes pompés (réinjectés) par saison dans chaque forage sont équivalents et proches de $103\,000\,m^3$. Ensuite, ils suivent les tendances de leur courbe de puissances associée.

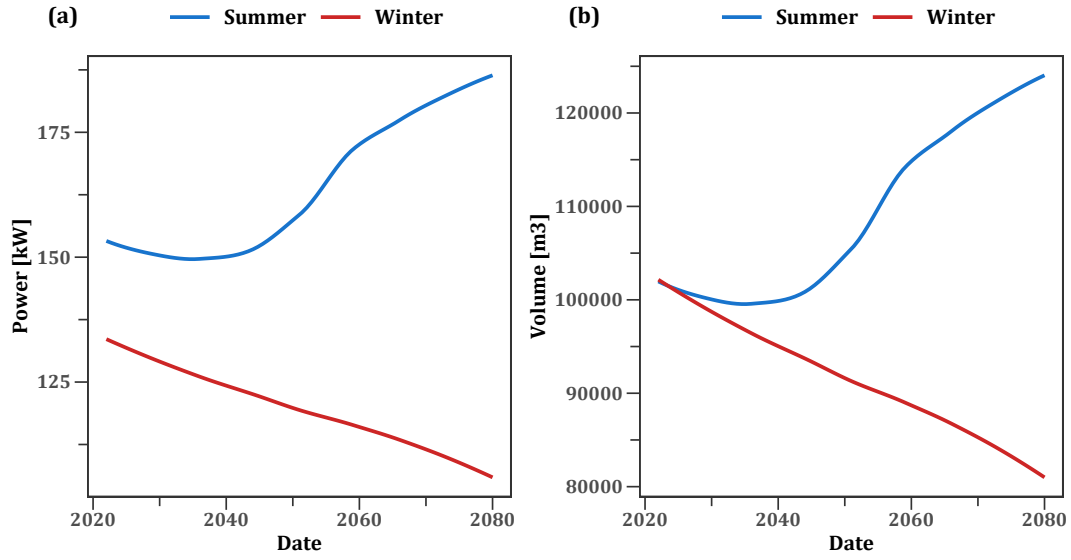
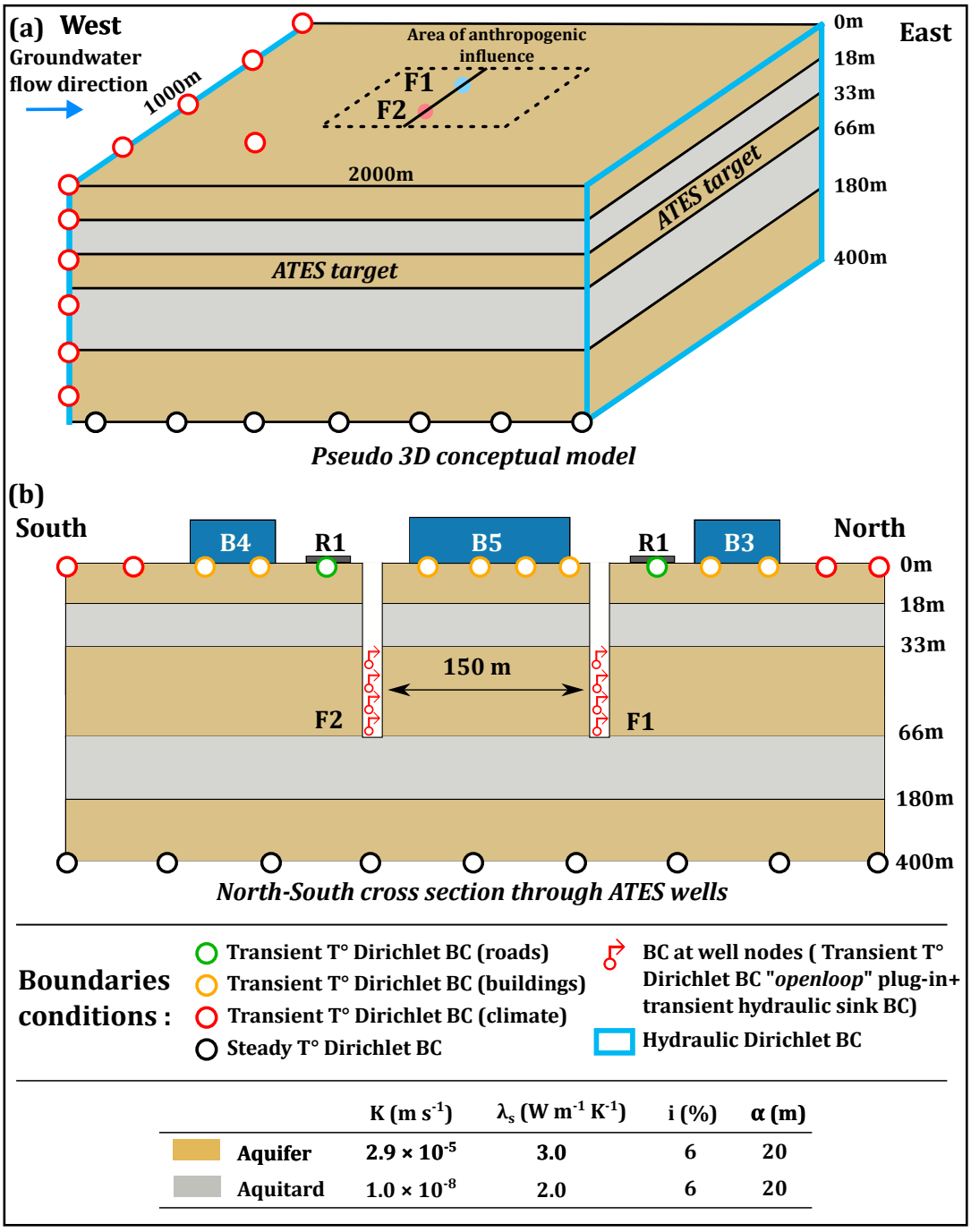


FIGURE 5.4 – Variables de fonctionnement de l'ATES pour le scénario RCP 8.5 en hiver et été : (a) projection des puissances moyennes nécessaires pour satisfaire les besoins thermiques et (b) volumes associés pompés aux ouvrages

5.3 Construction du modèle numérique et scénario de modélisation

À partir de l'approche présentée dans le chapitre précédent, un modèle théorique numérique est développé afin d'estimer l'impact de l'anthropisation et du réchauffement climatique sur l'exploitation d'un système ATES peu profond. La même occupation du sol est modélisée et les mêmes conditions limites thermiques

de surface sont utilisées (sous-section 4.2.4). Pour ce modèle, le sous-sol est composé d'une alternance d'unités aquifères et aquitards. Les paramètres du modèle sont présentés figure 5.5.



	K (m s^{-1})	λ_s (W m^{-1} K^{-1})	i (%)	α (m)
Aquifer	2.9×10^{-5}	3.0	6	20
Aquitard	1.0×10^{-8}	2.0	6	20

FIGURE 5.5 – Configuration et propriétés du sous-sol modélisé dans FEFLOW 8.0

Le domaine retenu couvre une zone étendue centrée sur la zone anthropisée (figure 5.5a) :

- Longueur 2000 mètres ;
- Largeur 1000 mètres ;
- Profondeur 400 mètres.

Le dimensionnement a été réalisé afin de limiter au maximum l'influence des conditions limites de bordures du modèle.

Les conditions limites hydrauliques ont été choisies pour restituer un gradient hydraulique local orienté d'ouest en est de 6 ‰ :

- Limite hydraulique ouest : condition de Dirichlet $H_{ouest} = 20\,\mathrm{m}$
- Limite hydraulique est : condition de Dirichlet : $H_{est} = 8\,\mathrm{m}$

Les conditions limites thermiques sont les suivantes :

- couche supérieure du modèle : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température associée à l'occupation des sols ;
- Face amont : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température modifiée par les variations climatiques ;
- Face inférieure du modèle : condition de Dirichlet fixe afin de restituer un gradient géothermique $0.03\,^{\circ}\mathrm{C\,m^{-1}}$.

L'ATES exploite un aquifère captif entre 33 et 66 m de profondeur grâce à deux forages espacés de 150 m situés à proximité immédiate de B5 (figure 5.5b). Pour simuler le fonctionnement de l'ATES, deux types de conditions limites sont utilisés :

- Une condition limite hydraulique terme puits source pour simuler les débits d'exploitation ;
- Une condition limite thermique de type Dirichlet pour maintenir un écart de température constant entre le forage de production et celui de réinjection. Le plug-in "*OpenLoop*" (Feflow) est utilisé pour maintenir cet écart constant à 5.0 °C.

Le maillage horizontal comporte 27995 nœuds par couche. Le raffinement est plus important à proximité des forages et des différentes structures en surface. La discrétisation verticale est assurée par 71 couches. Un raffinement vertical assure la transition des interfaces géologiques. Au total, le modèle est constitué de 1 987 645 nœuds.

Le régime transitoire est défini de 1906 à 2080. Les opérations sur l'ATES débutent en 2022. Afin d'étudier l'impact du climat et de l'anthropisation de la surface sur la performance d'un ATES, plusieurs scénarios sont pris en compte. Ils diffèrent selon les conditions climatiques et le mode d'occupation des sols.

Scénarios climatiques

Deux scénarios climatiques différents sont pris en compte. Dans les deux cas, les températures atmosphériques moyennes annuelles relevées à la station de Bordeaux-Mérignac entre 1906 et 2021 sont utilisées (figure 5.6) pour initialiser les calculs. Après 2022, deux évolutions des températures sont étudiées :

- Scénario **Stable** : stabilisation de la température à 13.9 °C ;
- Scénario **RCP8.5** : augmentation des températures issue du scénario du GIEC RCP 8.5 à l'échelle de la région Nouvelle Aquitaine (données DRIAS : Soubeyroux et al. 2020).

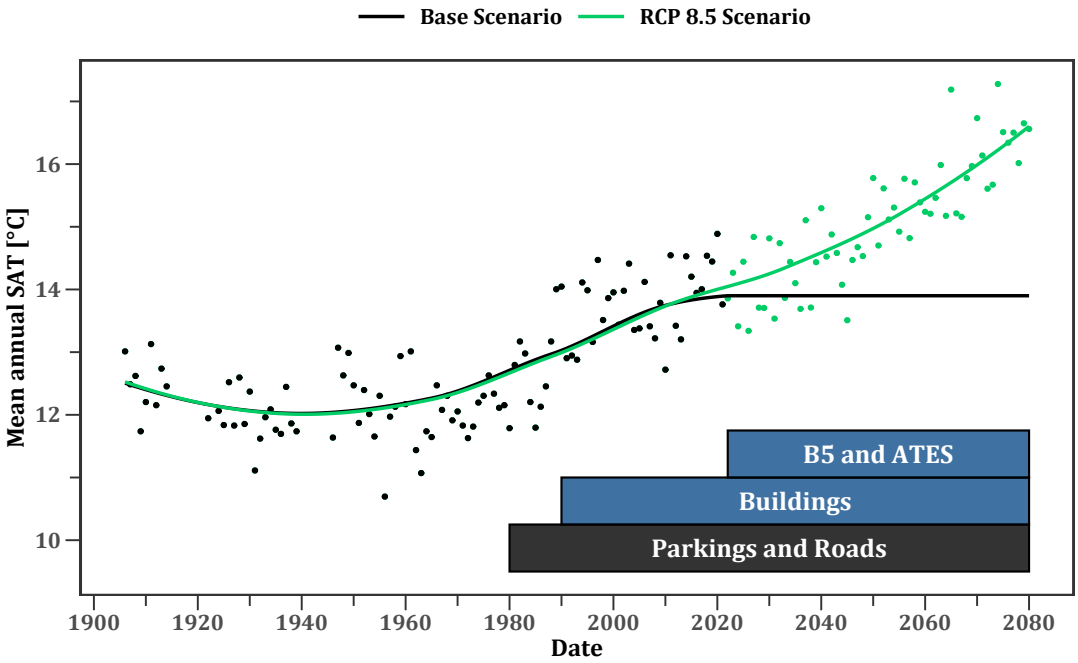


Figure 5.6 – Chroniques de $\varphi_{SAT}(t)$ utilisées pour les conditions limites de la première couche du modèle numérique, et ordre de création des différentes structures en surface du modèle. La courbe verte correspond au lissage des données de SAT moyennes annuelles issues de la station de Bordeaux Mérignac de 1906 à 2021 (données Météo France, points noirs) auxquelles s'ajoutent les projections du RCP 8.5 à partir de 2022 (point verts). La courbe noire correspond au lissage des données de la station de Bordeaux Mérignac de 1906 à 2022 suivie par une stabilisation de température à 13.9 °C à partir de 2022.

Les températures atmosphériques moyennes annuelles influencent directement ou indirectement **(i)** les conditions limites de température à la surface du sol (φ_{GST}) et **(ii)** la consommation/demande thermique du bâtiment.

Condition limite de température surface $\varphi_{GST}(t)$: d'après la procédure détaillée dans le chapitre précédent, la condition limite de température en surface $\varphi_{GST}(t)$ s'obtient par : $\varphi_{SAT}(t) + \Delta T_{S-A}$. La courbe verte figure 5.6 est utilisée

pour le scénario **RCP8.5** et la courbe noire pour le scénario **Stable**. Une valeur $\Delta T_{S-A} = 1.0\,°C$ est retenue.

Demande thermique du bâtiment et débits de pompages associés : dans le cadre du scénario **RCP8.5**, les débits de pompages associés à la demande thermique du bâtiment sont issus des calculs décrits section 5.2. Pour le scénario **Stable**, les débits calculés en 2022 dans la section 5.2 sont considérés constant sur la période modélisée.

Scénario d'occupation des sols

Les modèles $\textbf{Stable}_{\boldsymbol{Anthro}}$ et $\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Anthro}}$ prennent en compte l'apport du changement d'occupation des sols. La seule différence par rapport au contexte du chapitre précédent est la construction de B5 en 2022 et non en 1990. Ce bâtiment est alimenté par le système ATES.

Pour les scénarios $\textbf{Stable}_{\boldsymbol{Nat}}$ et $\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Nat}}$, l'effet des routes et parking n'est pas pris en compte. Les modèles utilisent le même maillage que $\textbf{Stable}_{\boldsymbol{Anthro}}$ et $\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Anthro}}$, mais les conditions limites thermiques spécifiques à l'apport des structures en surface sont désactivées.

En résumé, les spécificités des 4 scénarios sont les suivantes (tableau 5.2) :

Scénario	Évolution climatique	Occupation des sols
$\textbf{Stable}_{\boldsymbol{Nat}}$	**1906–2022** : ↗ des températures **Après 2022** : → des températures	Nue
$\textbf{Stable}_{\boldsymbol{Anthro}}$	**1906–2022** : ↗ des températures **Après 2022** : → des températures	Anthropisation
$\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Nat}}$	**1906–2022** : ↗ des températures **Après 2022** : ↗ des températures selon le **RCP 8.5** à Bordeaux	Nue
$\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Anthro}}$	**1906–2022** : ↗ des températures **Après 2022** : ↗ des températures selon le **RCP 8.5** à Bordeaux	Anthropisation

Table 5.2 – Synthèse des scénarios

5.4 Impact thermique dans le sous-sol et implication pour la performance de l'ATES : résultats des modélisations

Cette partie présente l'impact thermique dans le sous-sol généré par l'exploitation du système ATES sous différents forçages extérieurs (climat et anthropisation de la surface). L'impact sur la performance du système ATES est analysé. Les résultats sont détaillés pour chaque scénario retenu.

Dans un premier temps, l'objectif est d'analyser les perturbations et les transferts thermiques dans le sous-sol pour chaque scénario. Cette approche se base tout d'abord sur l'analyse de l'évolution des températures au droit des forages. Puis, afin d'étudier l'impact sur le domaine plus étendu, des cartes de température en coupe transversale sont présentées et analysées.
La deuxième partie se penche sur l'analyse de la performance de stockage des deux puits de l'ATES en fonction des 4 scénarios. Le paramètre de performance estimé dépend à la fois de la température au droit des forages et des volumes pompés/injectés, et permet de se prononcer sur la durabilité/viabilité de l'exploitation.

5.4.1 Impact de l'exploitation de l'ATES sur le régime thermique du sous-sol

Régime thermique pré-exploitation de l'ATES

Les profils de température restitués par le modèle numérique avant le lancement de l'ATES en 2022 présentent en dessous de 20 m de profondeur une forme caractéristique en C plus ou moins prononcée, signe d'influence des conditions de surface (figure 5.7).

Avant le lancement de l'ATES, l'évolution des températures atmosphériques est identique pour les 4 scénarios. La différence entre les scénarios avant 2022 est la prise en compte ou non de l'anthropisation de la surface. Par conséquent, l'évolution des profils **Stable**$_{Nat}$ et **RCP8.5**$_{Nat}$ sont identiques (courbes noires) et les profils des scénarios anthropiques sont aussi identiques (courbe verte). Pour les scénarios **Stable**$_{Nat}$ et **RCP8.5**$_{Nat}$, l'apport est moins important, car seul l'effet du réchauffement climatique entre 1906 et 2022 est pris en compte. Pour les scénarios **Stable**$_{Anthro}$ et **RCP8.5**$_{Anthro}$ prenant en compte le changement d'occupation des sols, la forme de "C" est plus prononcée. La température

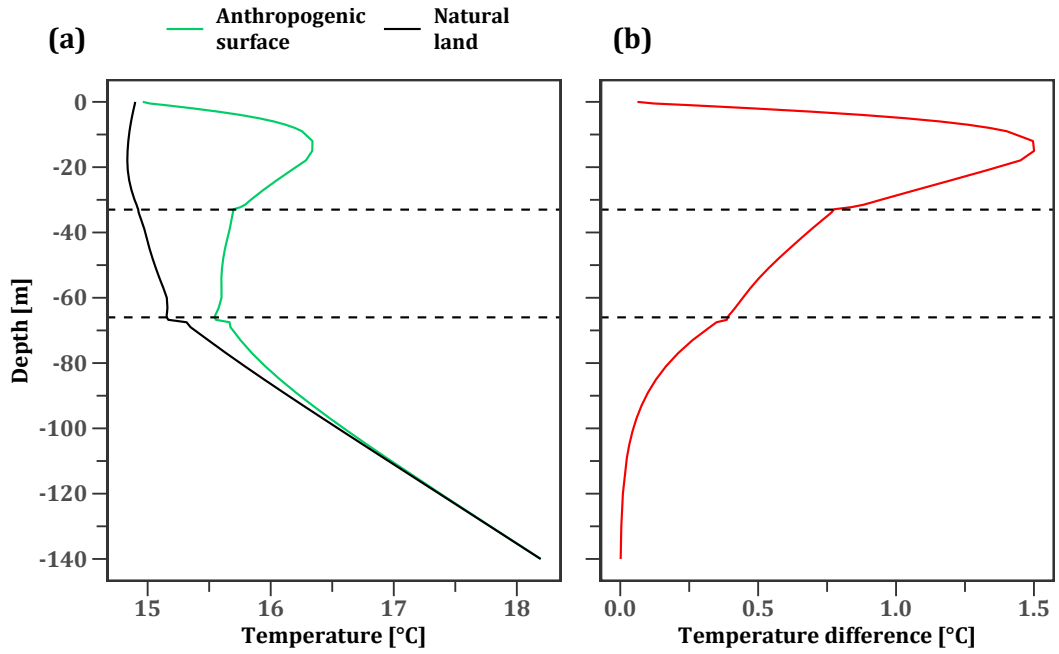


FIGURE 5.7 – Impact des conditions de surface sur la distribution des températures dans le sous-sol avant le lancement de l'ATES : (a) profil au droit de F2 en fonction des conditions de surface et (b) différence de température entre les scénarios de surface. Les pointillés représentent le toit et le mur de l'aquifère exploité.

moyenne initiale de la nappe avant exploitation est 0.6 °C supérieure à celle des scénarios **STABLE**$_{Nat}$ et **RCP8.5**$_{Nat}$ (15.7 °C contre 15.1 °C).

Les profils de température restitués par la simulation numérique présentent de légers artefacts au niveau du toit et du mur de l'aquifère. Cela correspond au contraste entre les paramètres de l'aquifère et des aquitards sous et sus jacent. Ils pourraient être minimisés en augmentant le raffinement vertical du maillage au niveau de ces interfaces, au détriment du temps de calcul et sans réel gain sur la compréhension des phénomènes.

IMPACT DE L'ANTHROPISATION DU SOL SUR L'ATES POUR UN CLIMAT STATIONNAIRE APRÈS 2022 : COMPARAISON DES SCÉNARIOS STABLE$_{Nat}$ ET STABLE$_{Anthro}$

Le fonctionnement de l'ATES démarre en 2022. L'exploitation est réalisée à écart de température constant de 5.0 °C entre puits chaud et froid. Les fluctuations de température à chaque puits sont dues à l'alternance des cycles de pompage/injection d'une saison à l'autre.
L'évolution des températures au droit des forages est analysée pour les scéna-

rios **STABLE**$_{Nat}$ et **STABLE**$_{Anthro}$ (figure 5.8). Durant les 5 premières années de fonctionnement, la température moyenne des forages décroît avant de présenter un régime pseudo-permanent. C'est la mise en place du régime thermique perturbé dans l'aquifère.

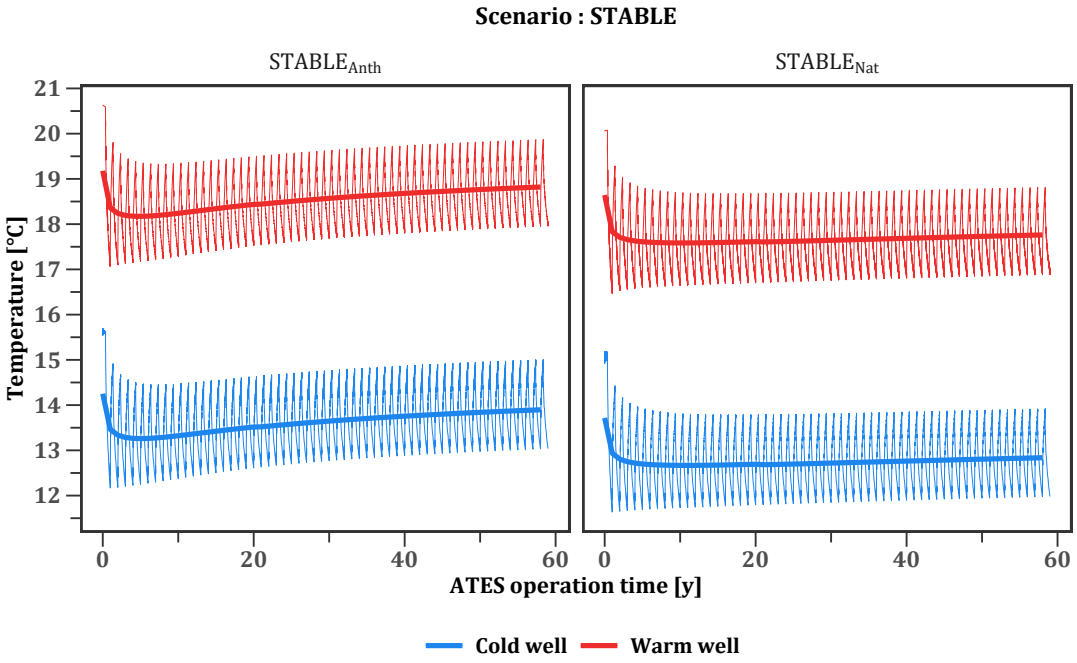


FIGURE 5.8 – Évolution de la température en face des crépines des forages pour les scénarios **STABLE**$_{Nat}$ et **STABLE**$_{Anthro}$. Le trait épais correspond à la température moyenne annuelle au forage

Après cette phase de mise à l'équilibre, le scénario **STABLE**$_{Nat}$ présente des températures moyennes stables au droit des deux forages (12.7 °C pour le puits froid et 17.7 °C pour le puits chaud). Pour le scénario **STABLE**$_{Anthro}$, l'anthropisation de la surface génère une légère augmentation de la température chaque année (0.01 °C an^{-1}). Elle passe de 13.3 °C à 13.9 °C au puits froid et de 18.2 °C à 18.8 °C au puits chaud.

Pour chaque scénario, les extensions des bulles chaude et froide stockées par l'ATES sont visualisées sur des cartes de chaleur en coupe transversale passant par les deux forages (selon l'axe Y-Z orthogonal à l'écoulement). La perturbation thermique générée dans la nappe par l'exploitation de l'ATES et les facteurs externes par rapport à l'état initial de 2022 sont visualisés sur une carte qui représente l'écart de températures entre un temps t et l'état initial juste avant exploitation. L'isotherme ±2.0 °C est choisie comme référence pour représenter l'extension de la perturbation. Les résultats sont détaillés ci-dessous.

Scénario* $\textsc{Stable}_{Nat}$ *: Dans ce scénario "référence", l'extension et l'intensité des bulles froides et chaudes en fin de période d'injection respectives sont comparables. Elles restent constantes dans le temps (figure 5.9), représentatives d'un fonctionnement équilibré et durable du système ATES.
A la fin de la période de pompage de chaque puits, la température à proximité de l'ouvrage est toujours supérieure (pour le puits chaud) et inférieure (pour le puits froid) à la température ambiante, signe que les réserves d'énergies stockées ne sont jamais complètement épuisées d'une saison à l'autre.

Les isothermes $\pm 2.0\,°C$ s'étendent de part et d'autres de l'aquifère (environ 5 m), dans un rayon de 30 m autour du forage chaud et 25 m autour du forage froid (figure 5.10). L'ATES génère un impact thermique relativement faible dans le sous-sol et équilibré dans le temps.

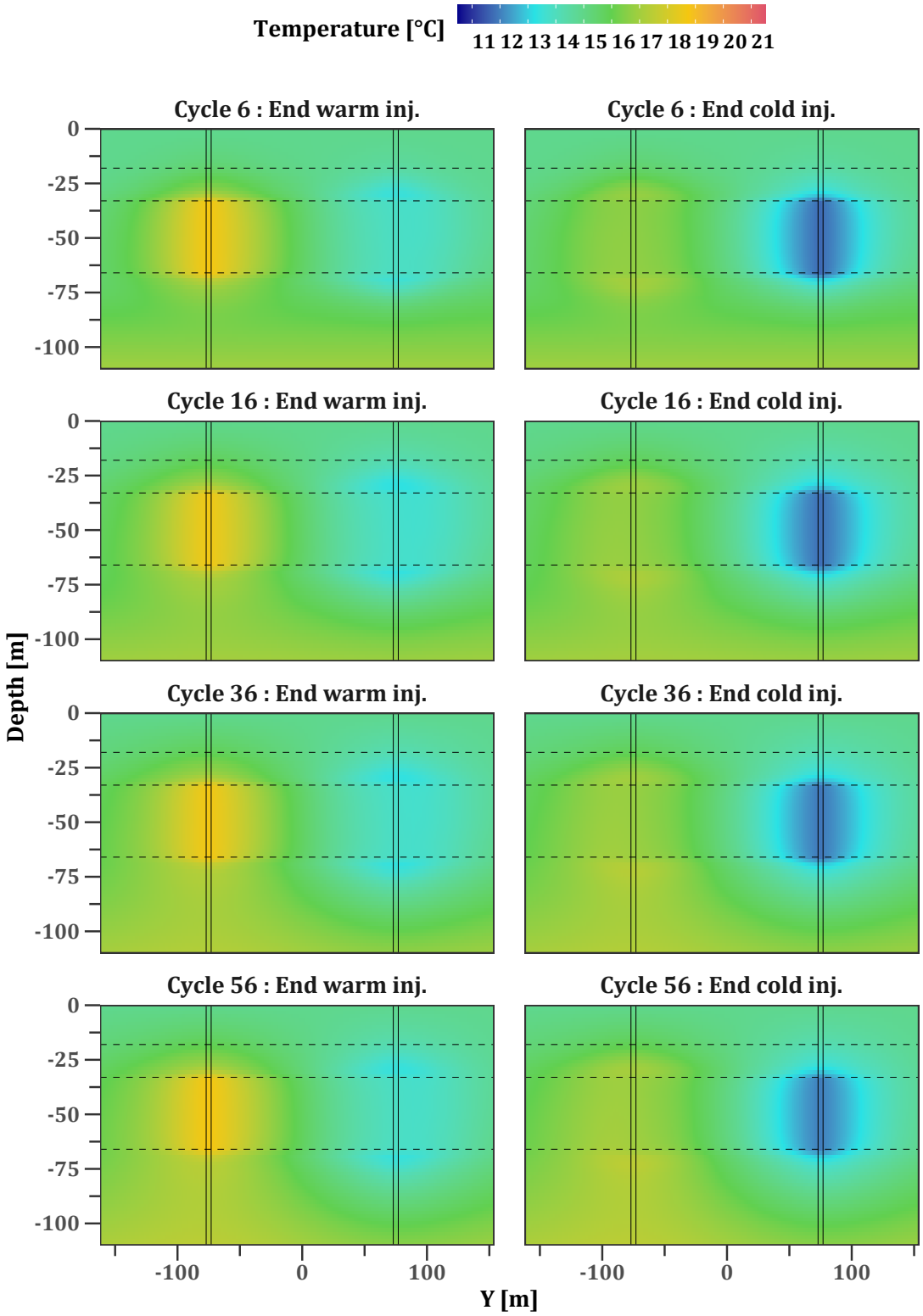


FIGURE 5.9 – Évolution de la température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires.

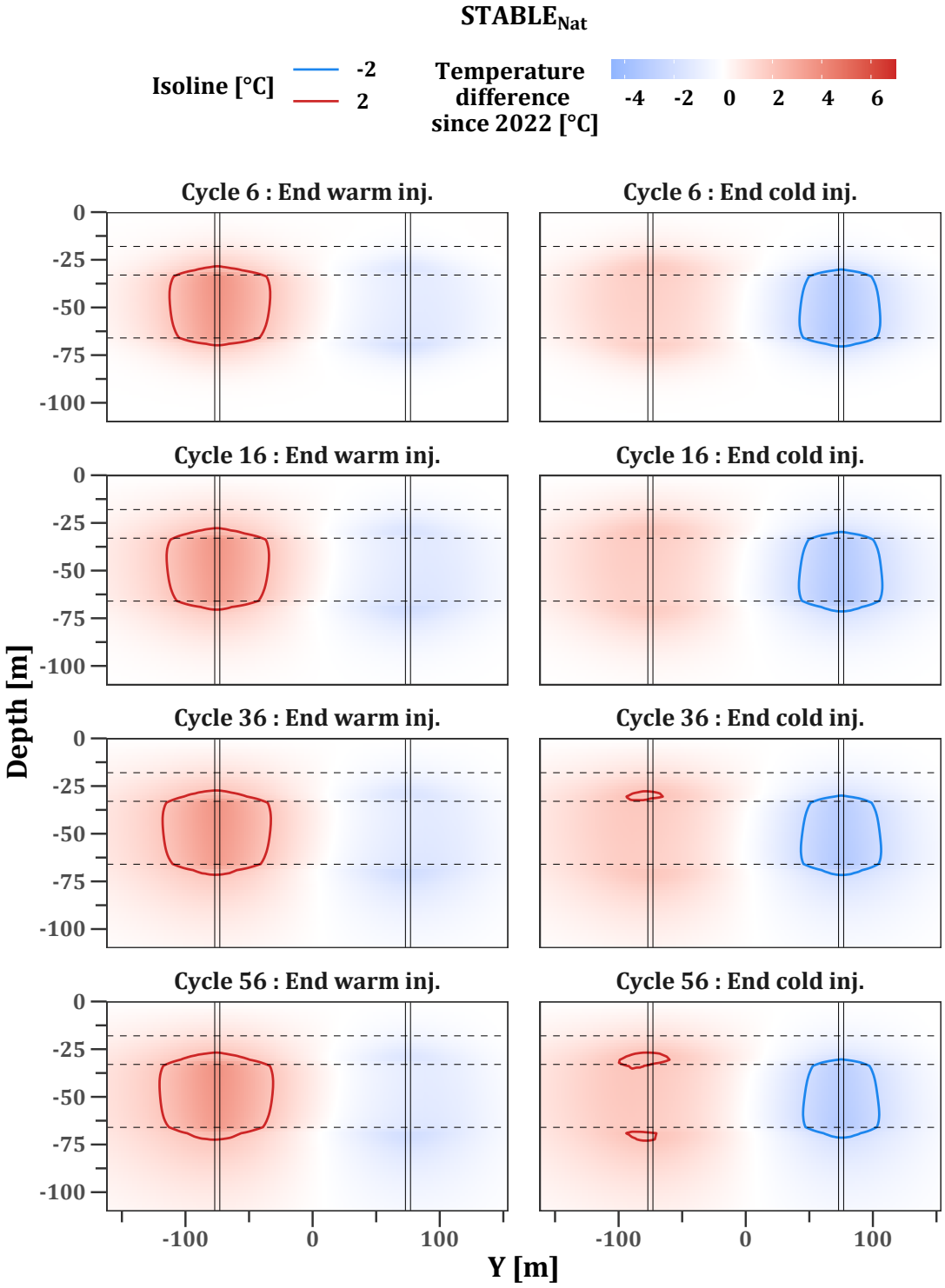


FIGURE 5.10 – Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **STABLE**$_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux les limites des différentes formations sédimentaires

***Scénario* $\textbf{STABLE}_{Anthro}$:** Dans ce scénario, le changement d'occupation de la surface induit la création d'un îlot de chaleur dans le sous-sol influençant de manière non négligeable l'extension et l'intensité des bulles thermiques de l'ATES.

Durant les 15 premiers cycles d'exploitation, l'extension et l'intensité des deux bulles en fin de périodes d'injection respectives sont comparables. Ensuite, elles suivent des tendances opposées dans le temps (figure 5.11). Le réchauffement du sous-sol opéré sous l'influence des structures en surface favorise l'extension de la bulle chaude au détriment de la bulle froide. Il en résulte une diminution de l'énergie disponible au forage froid, entraînant une vidange importante de la bulle froide durant la phase de pompage. En revanche, l'extension et l'intensité de la bulle chaude augmentent au fur et à mesure des périodes d'injection. Concomitamment à son extension, la bulle chaude se mélange avec l'îlot de chaleur, ce qui contribue au réchauffement à plus grande échelle du sous-sol.

En effet, contrairement au scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$, l'impact thermique prépondérant dans le sous-sol n'est plus seulement localisé autour des forages (figure 5.12). Dans ce contexte, l'extension des isothermes de différence $\pm 2.0\,°C$ est dissymétrique, en lien avec le réchauffement de la proche surface opéré par la construction de B5. Le bâtiment génère un apport de chaleur qui lisse le signal anomalique positif induit par le stockage depuis le puits chaud.
La bulle thermique au puits froid est de moins en moins prononcée avec le temps. L'extension de l'isotherme $-2.0\,°C$ passe d'environ 75 m de diamètre au cycle 6 à un peu moins de 50 m au cycle 56.

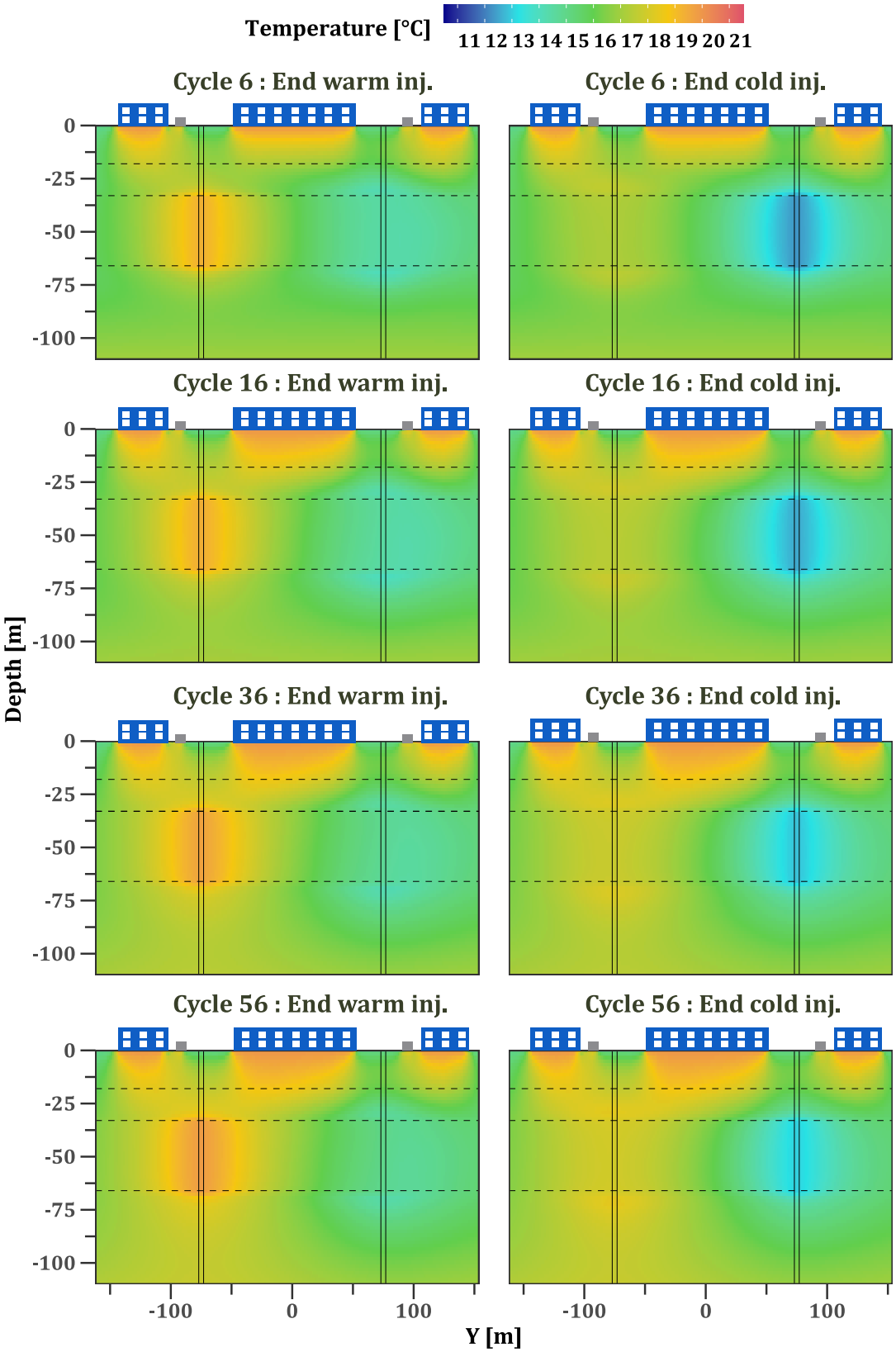


FIGURE 5.11 – Évolution de la température dans le sous-sol : scénario $\textbf{STABLE}_{Anthro}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires. Les bâtiments et routes sont représentés à la surface par les rectangles bleus et gris

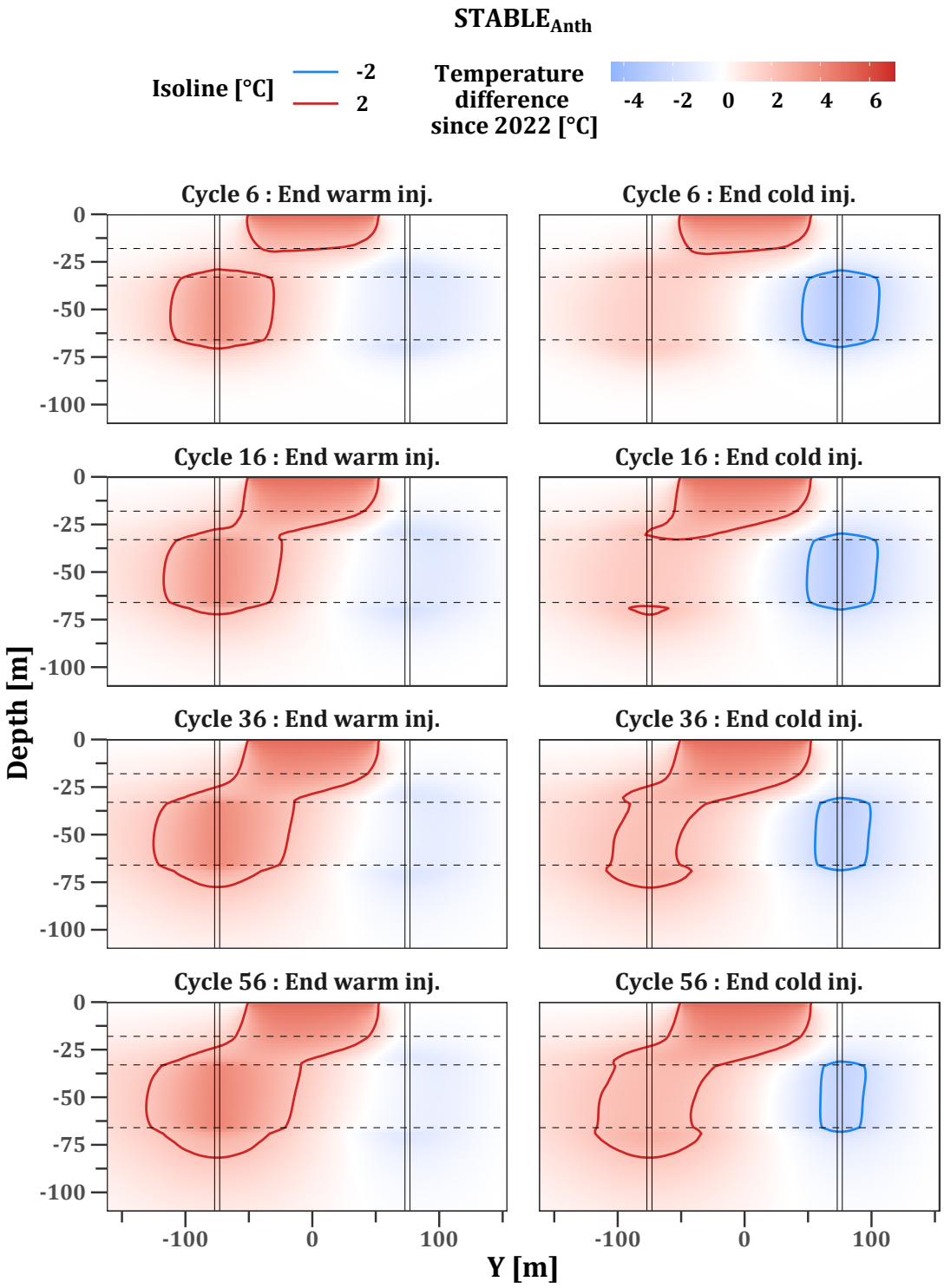


FIGURE 5.12 – Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **STABLE**$_{Anthro}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires.

Effet de l'anthropisation sur l'ATES pour la projection climatique RCP 8.5 : scénarios $\mathbf{RCP8.5_{Nat}}$ et $\mathbf{RCP8.5_{Anthro}}$

Dans les scénarios climatiques **RCP8.5**, la phase d'initialisation du stockage apparaît également durant les 5 premières années (figure 5.13). Après cette phase, la température moyenne au droit des puits suit une augmentation bien plus prononcée que pour les scénarios **Stable** .

Pour le scénario $\mathbf{RCP8.5_{Nat}}$, la température du sous-sol augmente faiblement jusqu'au cycle 20, puis lorsque la vitesse du réchauffement climatique s'accélère à partir de 2040, la température moyenne des forages suit une augmentation plus rapide de $0.055\,°C\,an^{-1}$. Elle évolue ainsi de 12.7 °C à 14.8 °C au puits froid, et de 17.6 °C à 19.7 °C au puits chaud.
Pour le scénario $\mathbf{RCP8.5_{Anthro}}$, la présence des bâtiments à la surface génère une augmentation des températures au droit des puits de $0.056\,°C\,an^{-1}$ dès la fin de la période d'initialisation du stockage, passant de 13.3 °C à 15.8 °C au puits froid, et de 18.2 °C à 20.7 °C au puits chaud.

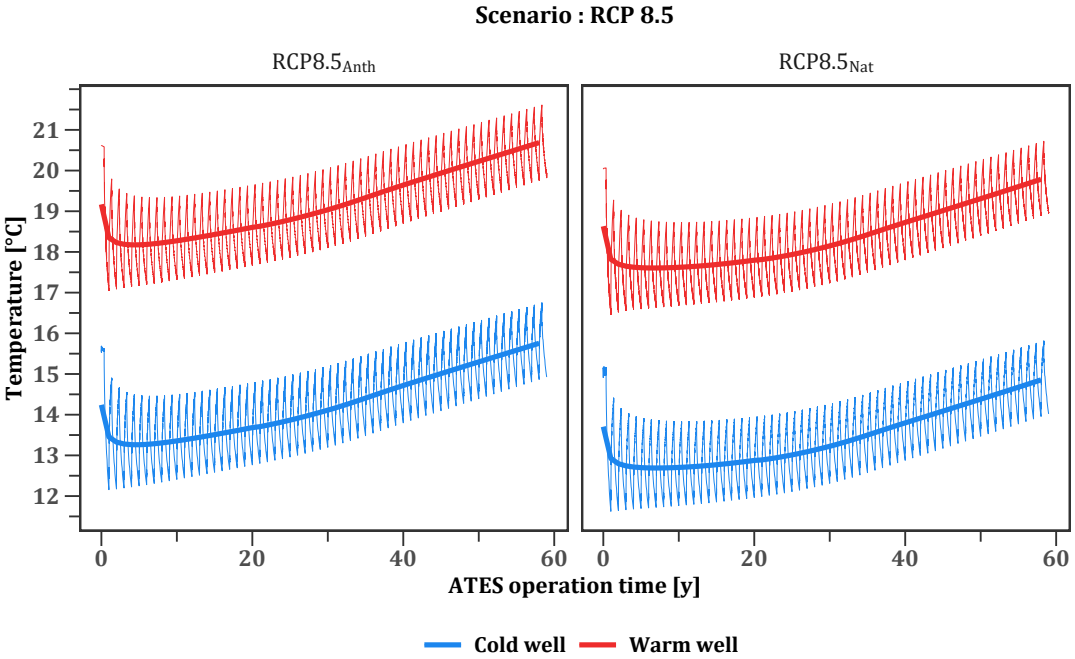


Figure 5.13 – Évolution de la température en face des crépines des forages pour les scénarios $\mathbf{RCP8.5_{Nat}}$ et $\mathbf{RCP8.5_{Anthro}}$. Le trait épais correspond à la température moyenne annuelle au forage

La cartographie de l'impact thermique des facteurs externes et de l'exploitation de l'ATES dans le sous-sol est détaillée ci-après pour les deux scénarios.

Scénario RCP8.5$_{Nat}$: Pour ce scénario prenant en compte uniquement la tendance climatique de la projection RCP 8.5, l'extension et l'intensité des bulles froide et chaude en fin de période d'injection respective, sont comparables durant les 15 premiers cycles (figure 5.14). Elles suivent ensuite des dynamiques différentes, en lien avec l'accélération du réchauffement climatique et l'évolution de la demande thermique du bâtiment.
À partir du cycle 16 en fin de période d'injection respective, la bulle chaude croît de plus en plus, signe d'une amélioration du stockage, alors que le stockage de la bulle froide est de moins en moins efficace.
À partir du cycle 36, les réserves de la bulle froide deviennent critiques à la fin du pompage et disparaissent complètement au cycle 56. La bulle chaude s'étend même jusqu'au forage froid. Le phénomène inverse se produit au forage chaud, où la bulle croît de plus en plus.
La divergence de comportement des bulles s'expliquent par l'évolution de la demande thermique du bâtiment en réponse au réchauffement climatique. Le bâtiment requiert de plus en plus de rafraîchissement et de moins en moins de chauffage. Cela génère un double effet négatif (positif) sur le stockage de la bulle froide (chaude). En effet, en période estivale, de plus en plus d'eau doit être pompée au puits froid, vidant les réserves préalablement stockées. En plus de cela, de moins en moins d'eau froide est injectée dans le puits en lien avec la diminution des volumes prélevés en hiver pour les besoins en chauffage.

L'impact du climat selon un RCP 8.5 sur la distribution thermique dans le sous-sol par rapport à 2022 est plus marqué et déséquilibré que pour les scénarios Stable. L'extension croissante de l'isotherme +2.0 °C (figure 5.15) illustre ce phénomène.
Ainsi, au cycle 56, il atteint la proche surface aussi bien en période de stockage de chaud que de pompage. Une telle extension témoigne du réchauffement global du sous-sol, réponse notamment à l'évolution climatique. La chute de l'efficacité de stockage du puits froid se traduit par une réduction constante de l'isotherme −2.0 °C autour du puits froid. Cette isotherme disparaît à l'issue du cycle 56.

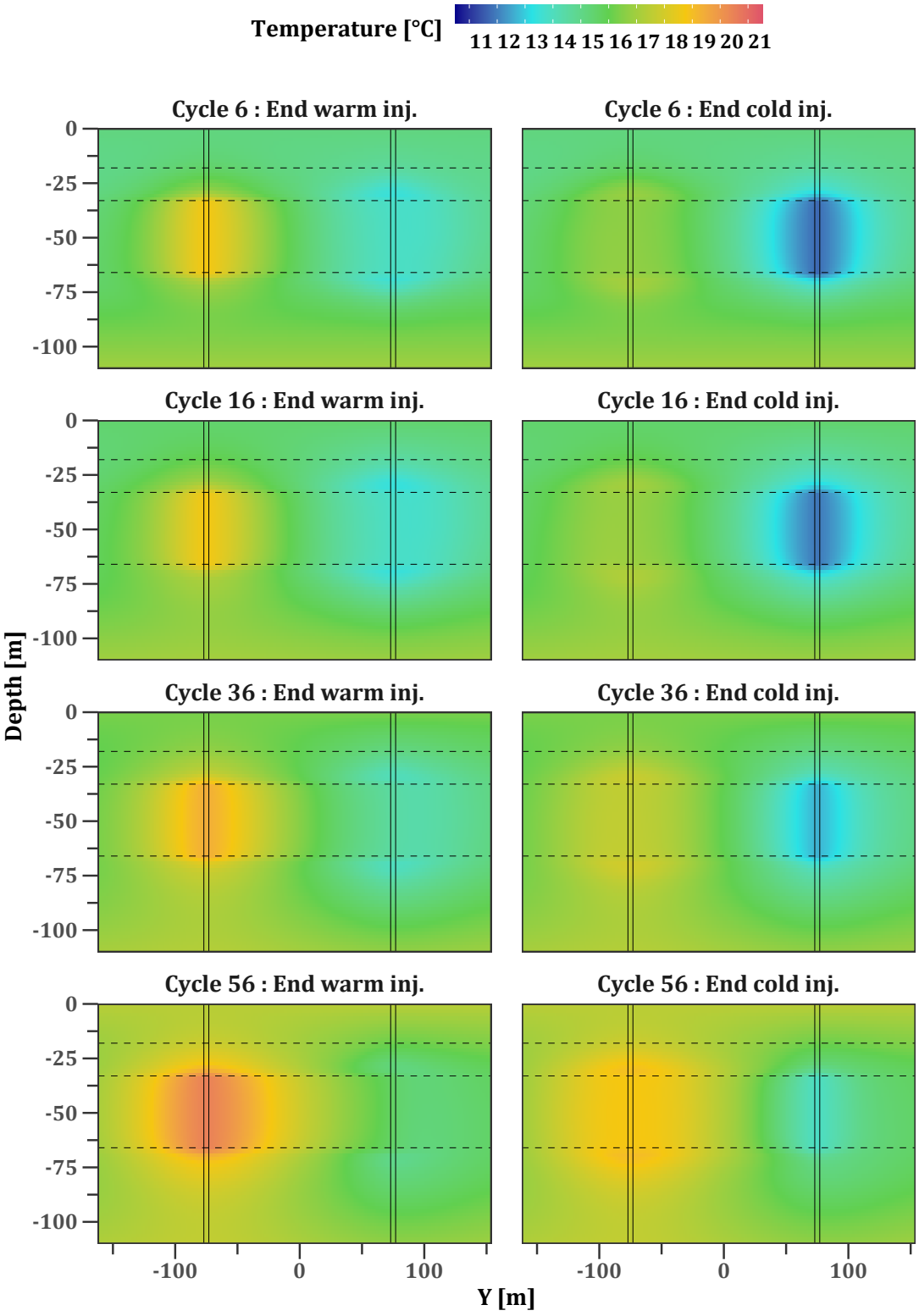


FIGURE 5.14 – Évolution transitoire de la distribution de température dans le sous-sol : **RCP8.5**$_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires.

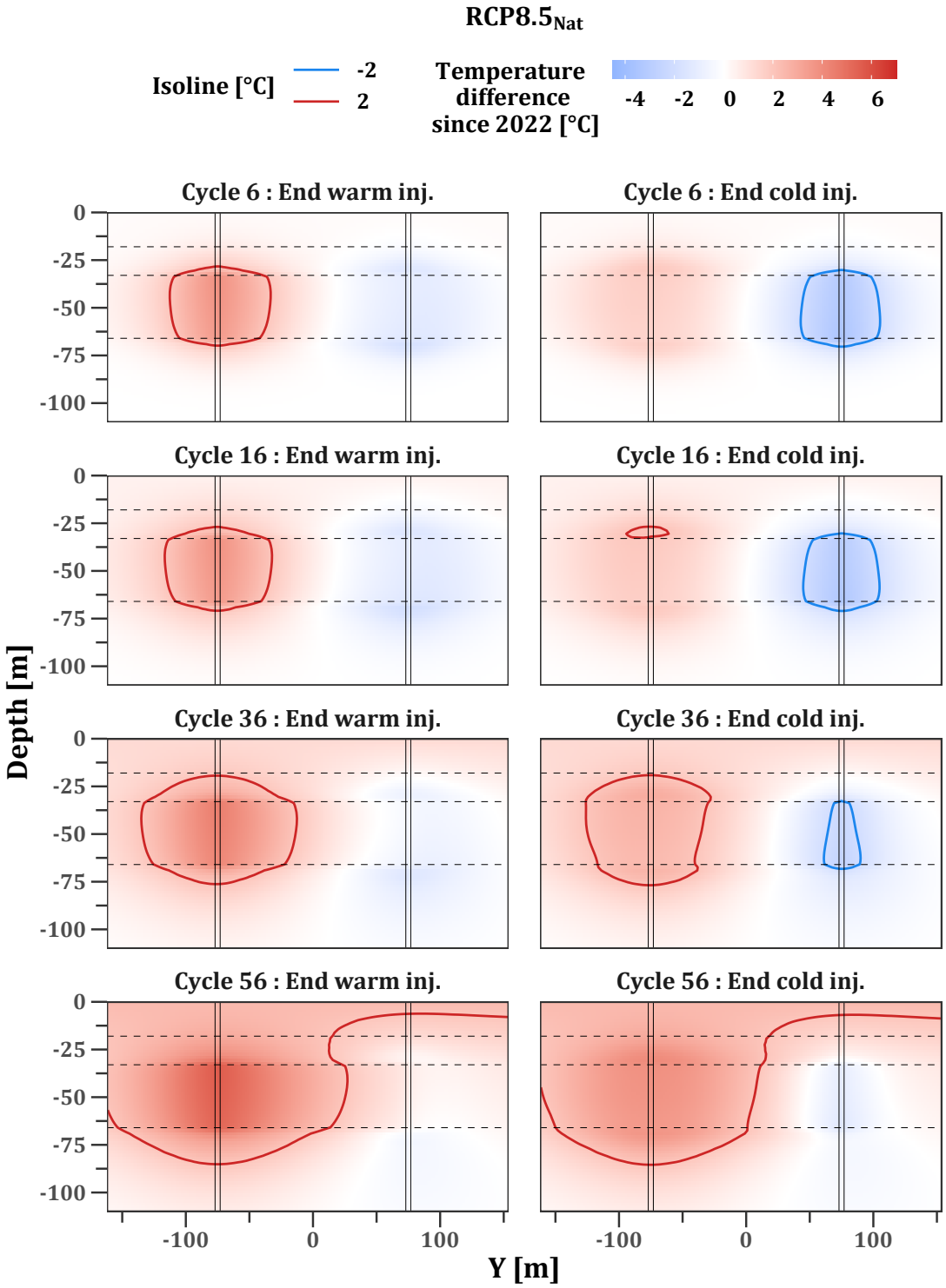


FIGURE 5.15 – Évolution de la température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : **RCP8.5**$_{Nat}$. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des différentes formations sédimentaires.

Scénario RCP8.5$_{Anthro}$: Sous l'effet cumulé de l'anthropisation de la surface et du réchauffement climatique, tous les phénomènes décrits dans **RCP8.5$_{Nat}$** sont amplifiés par l'effet SUHI (figure 5.16). Le déséquilibre entre les bulles chaudes et les bulles froides opère dès le début de l'exploitation de l'ATES. Le SUHI généré par l'anthropisation de la surface se mélange au fur et à mesure de l'exploitation de l'ATES avec la bulle chaude. Au cycle 56, la bulle chaude atteint le forage froid et une partie du stockage de chaud est exploité durant un cycle de pompage estival. Le stockage de froid n'opère quasiment plus à partir du cycle 36.

Par rapport à 2022, le réchauffement du sol-sol est important sur toute la zone (figure 5.17), illustré par l'extension considérable de l'isotherme 2.0 °C. L'isotherme −2.0 °C autour du puits froid n'est plus perceptible dès le cycle 36.

Les facteurs externes et l'exploitation de l'ATES induisent un réchauffement généralisé du sous-sol, engendrant une perte d'équilibre total entre la bulle froide et la bulle chaude de l'ATES. Ce mode de fonctionnement n'est pas viable sur le long terme.

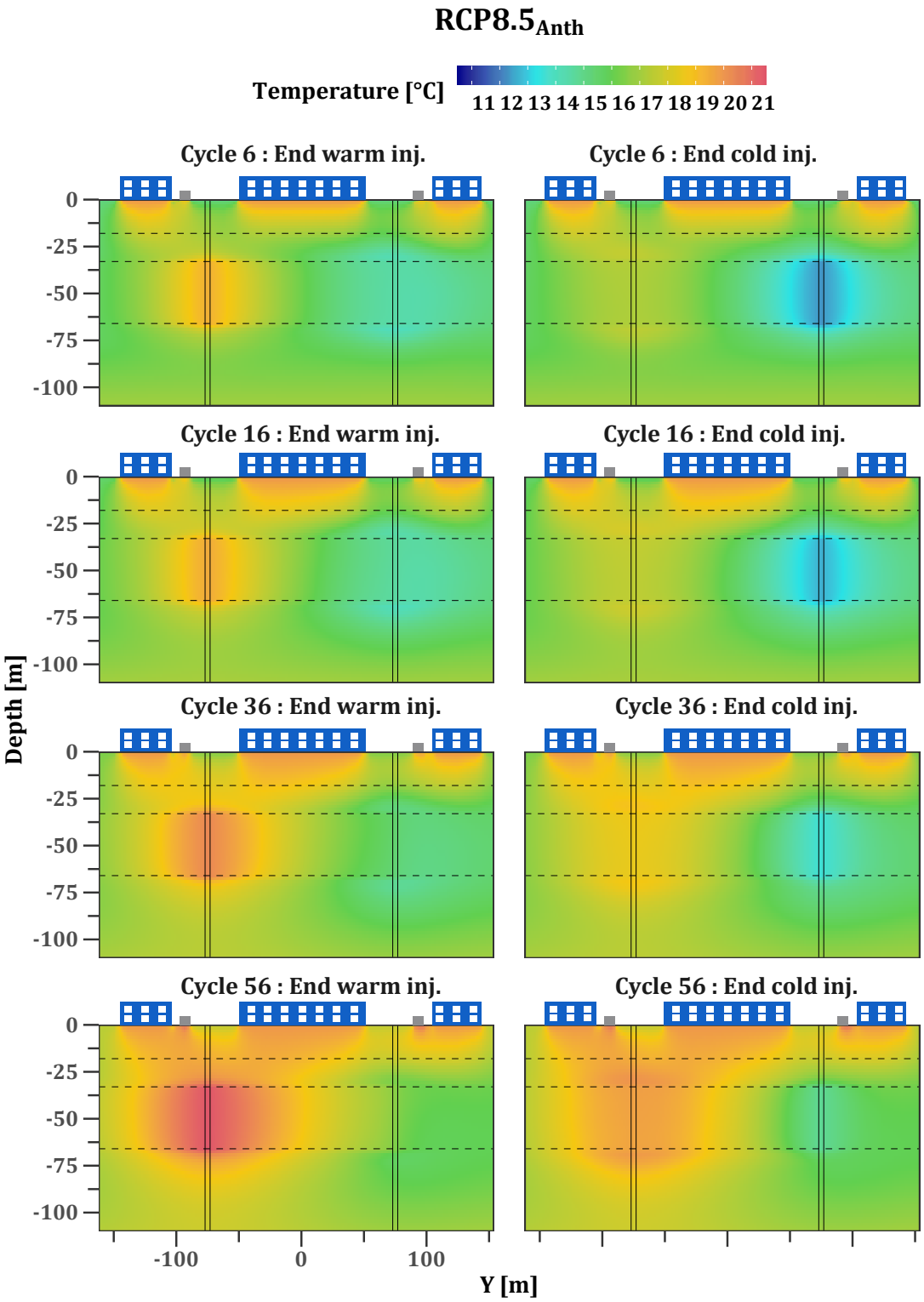


FIGURE 5.16 – Évolution de la distribution de température dans le sous-sol : **Scénario RCP8.5$_{Anthro}$**. Les bâtiments et les routes sont représentés sur la surface par les rectangles bleus et gris

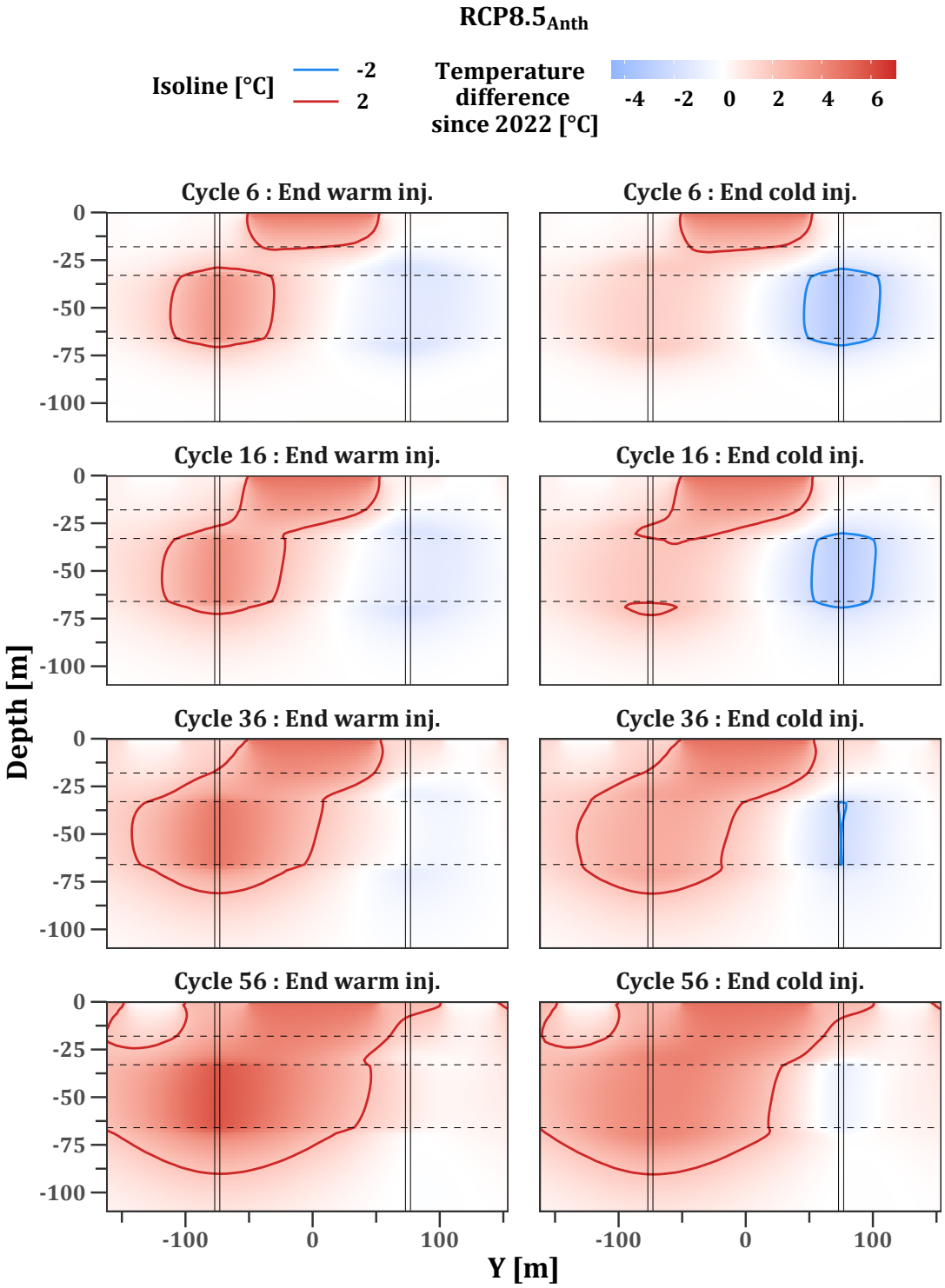


FIGURE 5.17 – Coupe transversale entre les deux forages montrant l'évolution de la distribution de température dans le sous-sol par rapport à l'état initial avant exploitation : **Scénario RCP8.5$_{Anthro}$**

5.4.2 Implications sur la performance de l'ATES

Pour chaque scénario, la performance des deux forages du système ATES est estimée grâce à l'indicateur η_e (sous-section 2.1.3). Cet indicateur est mesuré à chaque forage et peut être ré-exprimé (équation 5.1) comme le produit des ratios de températures R_T et de volumes R_V entre les phases d'injection et de pompage successives.

$$\eta_e = R_V \times R_T \tag{5.1}$$

Il permet de prendre en compte à la fois :

- La dynamique d'évolution des températures des bulles de stockage ;
- La dynamique de consommation thermique du bâtiment (qui impacte directement les volumes pompés/injectés).

Les deux ratios impliqués dans le calcul de η_e s'expriment par :

$$R_V = \frac{V_{pump}}{V_{inj}} \tag{5.2}$$

$$R_T = \frac{T_{pump} - T_{amb}}{T_{inj} - T_{amb}} \tag{5.3}$$

où T_{amb} représente la moyenne de la température de la nappe relevée à l'extérieur de la zone anthropisée.

Implications sur le ratio R_T : Pour les 4 scénarios, R_T augmente à chaque puits durant une dizaine d'années avant de suivre des comportements différents, fortement dépendant de l'anthropisation de surface (figure 5.18a).

Pour le scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$, ce ratio atteint une valeur stable dans le temps à 0,75 au droit des deux forages. Cela signifie que 75% de l'énergie injectée est récupérée durant le cycle de pompage suivant.
Pour le scénario $\textbf{STABLE}_{Anth}$, l'effet SUHI réchauffe l'eau injectée durant les périodes de stockage. Ce phénomène implique une diminution de R_T au forage froid et une augmentation au forage chaud, par rapport au scénario $\textbf{STABLE}_{Nat}$. Ce ratio de température reste constant au forage chaud à une valeur de 0,80. Il diminue pour le forage froid sur la durée d'exploitation, passant de 0,65 à 0,60.

Dans le cas des 2 scénarios en contexte climatique **RCP8.5**, la valeur de R_T s'effondre au forage froid à partir de 15 ans d'exploitation. Au forage chaud, cet indicateur est en constante augmentation est finie par atteindre des valeurs proches de 90% sur la fin de la période modélisée. L'effet de l'anthropisation suit

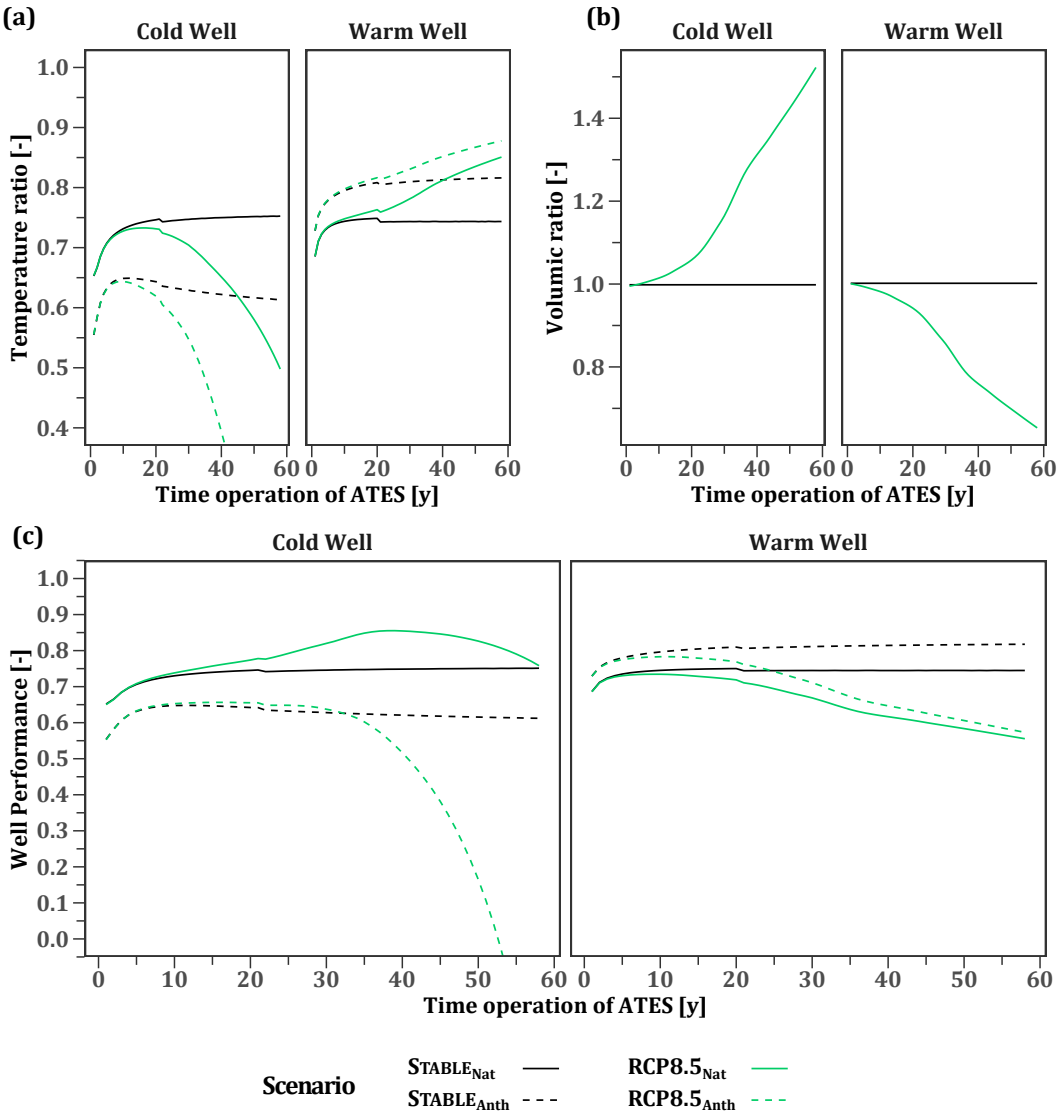


FIGURE 5.18 – Évolution de la performance de l'ATES au droit des deux forages en fonction des différents scénarios : (a) évolution du ratio de température, (b) évolution du ratio volumique et (c) évolution de la performance globale des ouvrages

la tendance de l'impact climatique, avec une amélioration de l'indicateur pour le puits chaud (environ 5%) et une dégradation pour le puits froid.

Implication sur le ratio volumique R_V : Si on considère la tendance climatique **STABLE**, la demande thermique des bâtiments est équilibrée entre le besoin de chauffage et de rafraîchissement et ces besoins n'évoluent pas dans le temps. Le ratio volumique est constant et égal à 1 (figure 5.18). Pour les tendances climatiques **RCP8.5**, le déséquilibre croissant entre les besoins de chaud et de froid au cours du temps implique un ratio volumique qui diverge fortement d'un puits à l'autre. À la fin de la période simulée, le puits froid pompe un vo-

lume d'eau 50% supérieur à celui injecté durant la période hivernale. Quant au puits chaud, il pompe 30% d'eau en moins par rapport au volume préalablement injecté. Cela traduit une sous-utilisation du puits chaud et une surexploitation du puits froid.

Effet global sur la performance de l'ATES : L'indicateur de performance η_e est obtenu en combinant les ratios thermiques R_T et volumiques R_V détaillés dans le paragraphe précédent.

Pour les scénarios $\textbf{STABLE}_{Anth}$ et $\textbf{STABLE}_{Nat}$, la stabilité des volumes pompés/injectés ($R_V = 1$) implique que $\eta_e = R_T$ (équation 5.1). Les valeurs de performance sont comprises entre 0,60 et 0,80. Cette gamme de valeur correspond à une exploitation durable et viable sur le long terme (Bloemendal et Hartog 2018 ; Fleuchaus et al. 2019). L'effet de l'anthropisation améliore la performance du puits chaud de 8% et diminue celle du puits froid de 12%.

Pour les scénarios **RCP8.5**, au puits chaud, l'augmentation des ratios de température est compensée par la baisse du ratio volumique. Il en résulte une tendance générale contrintuitive de diminution de la performance au cours du temps, malgré un réchauffement global du sous-sol. Cette décroissance de la performance est liée à baisse de la demande de chauffage qui conduit à une sous-exploitation du puits chaud.
Au puits froid, pour le scénario $\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Nat}}$ avec une augmentation de la demande en froid, la surexploitation du puits permet de compenser la diminution de l'efficacité du stockage. Il en résulte une augmentation de la performance jusqu'à 40 ans d'exploitation qui culmine à 85%. Après cette date, la performance diminue pour tomber à 75% à la fin de la période simulée.

Concernant le scénario $\textbf{RCP8.5}_{\boldsymbol{Anth}}$, le déséquilibre thermique dans l'aquifère est tel, que la surexploitation du forage ne permet pas d'améliorer la performance. Au contraire, après une performance stable durant 35 ans à 60%, l'indicateur chute brutalement, passant en dessous de la barre des 40% à peine 10 ans plus tard. En fin de simulation, la performance devient négative (la moyenne de la température injectée sur un cycle est supérieure à la température ambiante de la nappe à l'extérieur de la zone anthropisée), soulignant d'autant le phénomène de réchauffement intense de la nappe.

5.5 Discussion

Les résultats de ce chapitre mettent en évidence l'impact non négligeable du réchauffement climatique et de l'anthropisation de la surface sur la performance à long terme d'un dispositif ATES en contexte de nappe peu profonde. Négliger ces deux facteurs en phase de prédimensionnement dans ce contexte pourrait mener à surestimer le potentiel et la performance du dispositif, aussi bien pour fournir du froid que du chaud.
Cette étude ne prend pas en compte l'éventuelle recharge de la nappe libre. Il serait intéressant d'étudier les effets potentiels de cette recharge dans un tel contexte. Toutefois, dans les zones très anthropisées, une faible recharge est attendue en raison de l'imperméabilisation des sols.

En France, les permis d'exploitation des systèmes géothermiques sont délivrés pour une période minimale de 30 ans (renouvelable une fois pour 20 ans). Face à de telles durées d'exploitation, la prise en compte de ces phénomènes apparaît essentielle pour éviter des désagréments futurs.
Dans le cadre du scénario climatique du GIEC le plus pessimiste (RCP 8.5), cette approche montre que la notion de stockage d'énergie est ici remise en question, au moins pour les dispositifs peu profonds.

Plus généralement, les pistes de réflexion suivantes apparaissent :

1. **La pertinence du choix d'un système ATES par rapport à un doublet géothermique non réversible :** en contexte de réchauffement généralisé, le stockage froid devient inefficace au bout d'un certain temps, ne permettant plus au puits froid de pomper une eau suffisamment froide. Il pompe même une eau dont la température est influencée par la bulle chaude. Un doublet géothermique non réversible pompe uniquement l'eau à la température ambiante de la nappe, aussi bien pour fournir du chaud que du froid au bâtiment. La perturbation thermique autour du forage de réinjection qui se situe en aval hydraulique du pompage n'impacte généralement pas le forage de production. Toutefois, ce système sera aussi soumis à la problématique du réchauffement de la nappe en lien avec l'anthropisation et le réchauffement climatique. Compte tenu de l'investissement financier initial moins conséquent que pour un ATES (pas de complexité liée à la réversibilité du système), il serait pertinent d'étudier le fonctionnement à long terme de ce type de doublet dans les mêmes conditions que celles présentées dans le cadre de ce travail. Toutefois, ce type de système ne stocke pas d'énergie dans la nappe. La PAC a donc moins "*d'apport ini-*

tiaux" en termes de calories ou frigories, ce qui diminue inéluctablement sa COP.

2. **Les stratégies d'utilisation de l'ATES dans le contexte des besoins locaux :** l'étude réalisée porte uniquement sur l'exploitation d'un ATES alimentant un seul et unique bâtiment. Or, une évolution tendant vers un déséquilibre des demandes thermiques des bâtiments en lien avec le réchauffement climatique semble inévitable dans le futur. Il apparait essentiel dans ce contexte de penser à des stratégies de mutualisation des différents besoins des bâtiments d'une même zone. Ces approches pourraient permettre de tendre vers un équilibre des volumes chauds et froids réinjectés dans les forages de l'ATES. Pour l'étude détaillée ici, un raccordement à un bâtiment supplémentaire en hiver pourrait être envisagé. Ce bâtiment pourrait exploiter les surplus de chaud injecté l'été, et permettre une injection d'eau froide supplémentaire. Cela permettrait de rééquilibrer la dynamique thermique des bulles chaudes et froides. Par ailleurs, le recours à la ventilation des locaux la nuit se révèle être une technique efficace afin de réduire la demande thermique en froid des bâtiments (Bozkaya et Zeiler 2019) ;
3. **L'abaissement de la température de l'eau avant sa réinjection dans le puits froid :** Dans ce type de contexte, même si la demande de chauffage est satisfaite en hiver, il pourrait être intéressant de mettre en place des procédés afin d'abaisser la température de l'eau avant d'être réinjectée (tour de refroidissement Ghaebi et al. 2016, rafraichissement par le solaire thermique). Abaisser cette température de réinjection pourrait permettre de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur et le déséquilibre thermique induit par les demandes thermiques du bâtiment.
4. **Étudier le potentiel d'aquifères plus profonds :** Afin de s'affranchir de l'effet SUHI et du réchauffement du sol en surface lié au réchauffement climatique, il serait pertinent d'étudier le potentiel d'aquifères plus profond ($\approx$ 100 m), et d'estimer les bénéfices et/ou pertes de l'aspect stockage de froid en lien avec l'influence plus prononcé du gradient géothermique. Toutefois, il est important de rappeler que la réalisation de forage plus profond entraîne des investissements économiques supplémentaires. Quand il s'agit de creuser des forages plus profonds, les surcoûts économiques ne sont pas linéaires, ce qui augmente considérablement le coût du chantier.

CHAPITRE 6

Le système ATES : la solution énergétique retenue pour l'ENSEGID

6.1 Déploiement du dispositif sur le site de l'ENSEGID

Dans le cadre de la reconstruction de ses locaux, l'École Nationale Supérieure en Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement durable (ENSEGID) appartenant au groupement de l'Institut National Polytechnique de Bordeaux (Bordeaux INP), s'est pourvue d'un système ATES. L'établissement est situé à Pessac en Nouvelle-Aquitaine (figure 6.1a), sur le campus de Bordeaux (figure 6.1b). Le chantier de reconstruction a débuté fin 2019 et la mise en service du bâtiment a eu lieu en février 2022 (figure 6.1c).

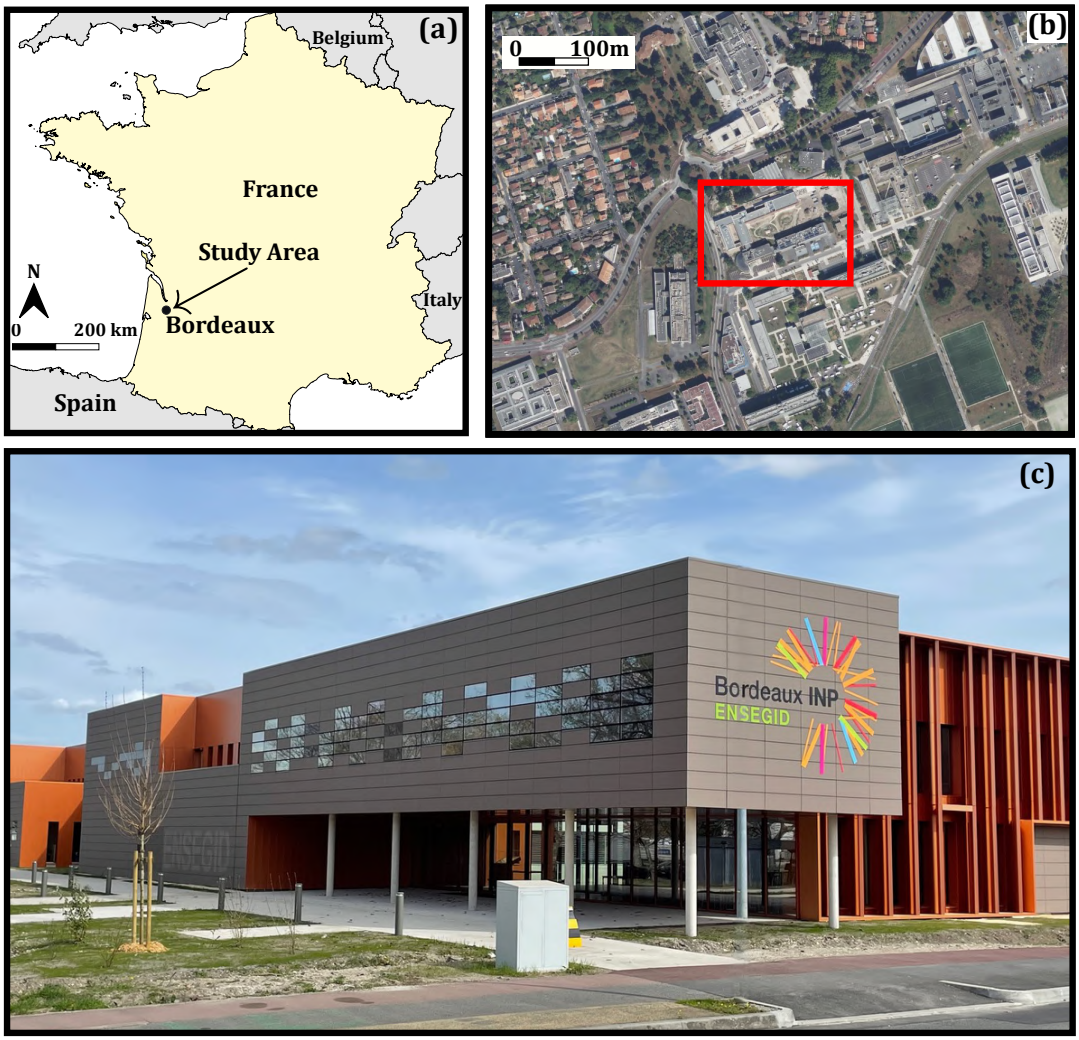


FIGURE 6.1 – Présentation du site d'étude (a) localisation du site, (b) vue aérienne du campus de Bordeaux centrée sur l'ENSEGID et (c) bâtiment livré en 2022

L'ATES est dimensionné pour subvenir aux besoins de chauffage et refroidissement de locaux abritant des activités de recherches, d'enseignements, et administratives. Le système est dans un premier temps prévu pour répondre aux besoins thermiques de la moitié du bâtiment, ce qui correspond à une superficie de 3600 m^2. L'extension du système à la totalité du bâtiment est prévue dans un second temps. Le système utilise deux forages de production/injection, GF1 et GF2, distant de 145 m. Ces ouvrages ont été forés jusqu'à 70 m de profondeur en parallèle de la construction des nouveaux locaux et ciblent la nappe des calcaires de l'Oligocène. Une machine rotary a été utilisée pour forer les trous (figure 6.2a et b).



FIGURE 6.2 – Chantier des forages de l'ATES (a) mat de la machine de forage durant la réalisation de GF2, (b) remontée de l'outil de forage pour nettoyage suite à la traversée d'un horizon "légèrement" argileux au droit de GF1 (c) récolte des cuttings en sortie de forage et (d) crépines inox installées dans les forages

La bentonite a été employée comme fluide de forage pour creuser jusqu'à 35 m de profondeur. Le réservoir sous-jacent a été foré avec la technique de la circulation inverse en utilisant de l'eau comme fluide de forage pour éviter toute contamination de l'aquifère. Les cuttings remontés durant les travaux ont été récupérés pour être analysés (figure 6.2c). Enfin, les forages ont été équipés avec des tubes et des crépines en acier inoxydable (figure 6.2d), dans l'optique de prévenir et de limiter les problèmes de corrosion. Ce matériau est aussi plus résistant sur le long terme que des tubes PVC.

À proximité immédiate de chaque ouvrage, deux piézomètres ont été forés pour mettre en place un suivi long terme de l'extension des bulles thermiques dans l'aquifère (figure 6.3a). De plus, l'ENSEGID disposait déjà de 4 forages, situés entre GF1 et GF2, ce qui permet de suivre la dynamique thermique de l'aquifère exploité en différents endroits du site.

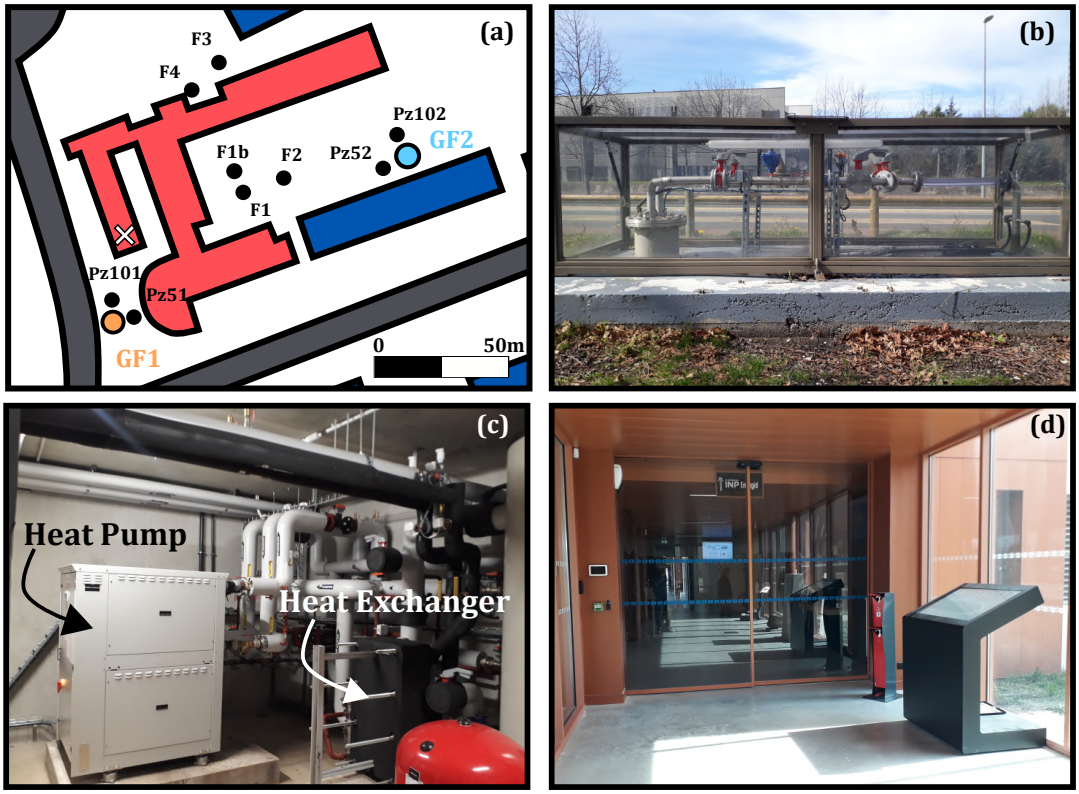


FIGURE 6.3 – Configuration du site et équipements installés à l'ENSEGID (a) plan de localisation des ouvrages sur site (les ronds colorés correspondent aux forages de l'ATES, et les points noirs aux différents piézomètres. L'emplacement du local technique est marqué par la croix blanche, et les locaux de l'ENSEGID sont colorés en rouge), (b) équipement de la tête de forage GF1, (c) disposition des équipements dans le local technique et (d) borne de visualisation de fonctionnement du système en temps réel.

Les têtes de forages de production/injection ont été équipées (figure 6.3b) afin d'être reliée au local technique comprenant l'échangeur de chaleur et la PAC (figure 6.3c). Une borne de suivi a été installée dans le hall d'entrée du bâtiment (figure 6.3d) afin de visualiser en temps réel le fonctionnement du système (figure 6.4).

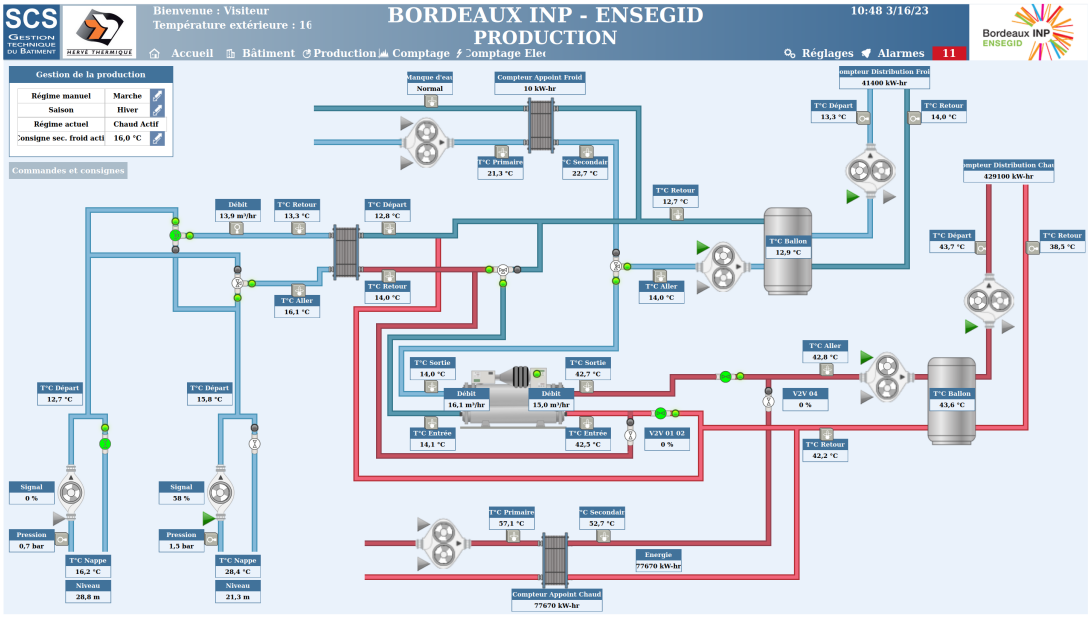


FIGURE 6.4 – Schéma du fonctionnement du système ATES affichée à la borne de visualisation avec les données de température, de débit et de pression en temps réel

La densité de forages sur site, le suivi en temps réel et l'enregistrement du fonctionnement de l'ATES confèrent à l'ENSEGID un rôle de site pilote particulièrement intéressant pour étudier et promouvoir la technologie en France.

Dans ce chapitre, l'impact de l'ATES sur la dynamique thermique du sous-sol, généré par le contexte local d'occupation des sols et la tendance climatique, est étudié. Dans un deuxième temps, des projections à très longs termes sont réalisées en intégrant les deux tendances climatiques enveloppes détaillées dans le chapitre précédent (**STABLE** et **RCP8.5**). Tout ce travail est effectué en amont du lancement du système et n'utilise pas les données de fonctionnement en raison d'un temps de recul trop court sur le fonctionnement du système ($<$ 1 an).

6.2 Cadre hydrogéologique du site de l'ENSEGID

6.2.1 Contexte préexistant

Le site est localisé dans le bassin sédimentaire nord Aquitain, qui est un large système multicouches composé d'alternance d'unités aquifères et d'unités aquitards. Les formations géologiques interceptées par les forages au droit du site correspondent aux dépôts les plus récents datant de l'Oligocène et du Pli-Quaternaire. Les formations de l'Oligocène sont constituées d'une succession d'unités calcaires plus ou moins marneuses. La position proximale au trait de côte de la région durant cette période a généré une grande hétérogénéité dans les faciès de dépôts (Sztrákos et Steurbaut 2017), plus ou moins soumis par la suite à une altération érosive. Les formations oligocènes ont été recouvertes par des dépôts silico-clastiques du Plio-Quaternaire. Préalablement à la réalisation des forages GF1 et GF2, cinq coupes lithologiques sont disponibles sur le site de l'ENSEGID (figure 6.5).

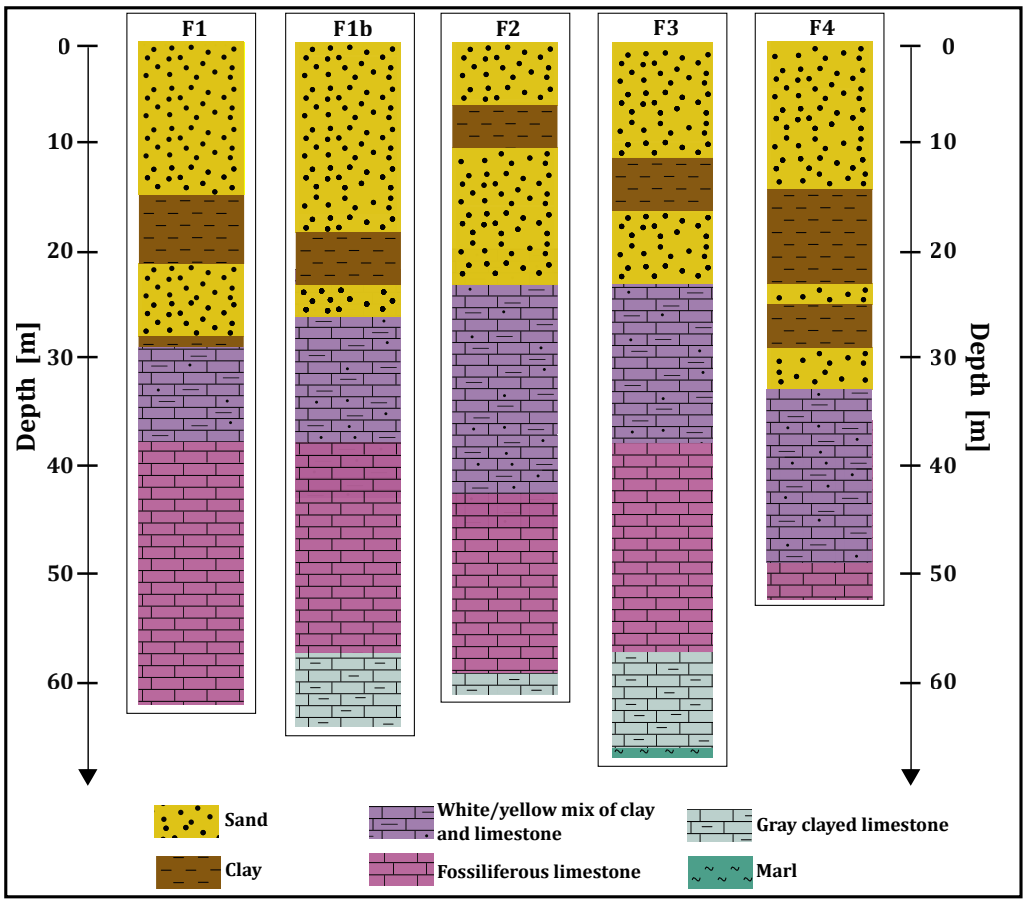


Figure 6.5 – Logs lithologiques disponibles sur le site de l'ENSEGID

Elles mettent en évidence l'existence d'une formation calcaire aquifère d'une épaisseur moyenne de 40 m reposant sur une formation marneuse bleue retrouvée à 68 m de profondeur au forage F3. Des forages plus profonds à moins d'un kilomètre de l'ENSEGID recoupent ces marnes sur une épaisseur d'environ 150 m. Selon les coupes disponibles sur le site de l'ENSEGID, la base de l'unité calcaire est constituée de dépôts gris plus ou moins argileux sur une épaisseur de 8 m. Cette couche grise est surmontée par une unité blanche/jaune très fossilifère et possède une épaisseur moyenne de 20 m, qui s'apparente à la zone la plus productive du réservoir. Au-dessus de 39 m, ces calcaires fossilifères deviennent de plus en plus argileux. Malgré la proximité entre les forages, le toit des calcaires est retrouvé à des profondeurs différentes sur site (25 m à F2 et 34 m à F3), signe d'une probable érosion différentielle intervenue durant une phase d'émersion post-oligocène. Les pseudo reliefs créés par cette érosion se sont comblés de dépôts silico-clastiques durant le Plio-Quaternaire.

L'unité calcaire identifiée à l'ENSEGID est un aquifère largement exploité dans les parties ouest et sud de la métropole bordelaise pour l'alimentation en eau potable. À l'ENSEGID, des essais pompage de 24 h réalisés annuellement dans le cadre d'activité d'enseignement sur le forage F1, mettent évidence une transmissivité comprise entre 5.0 et $8.0 \times 10^{-4}\,\mathrm{m^2\,s^{-1}}$. À l'échelle de la métropole, le sens d'écoulement au sein de la nappe oligocène s'effectue de l'ouest vers l'est en direction du fleuve de la Garonne (figure 6.6).

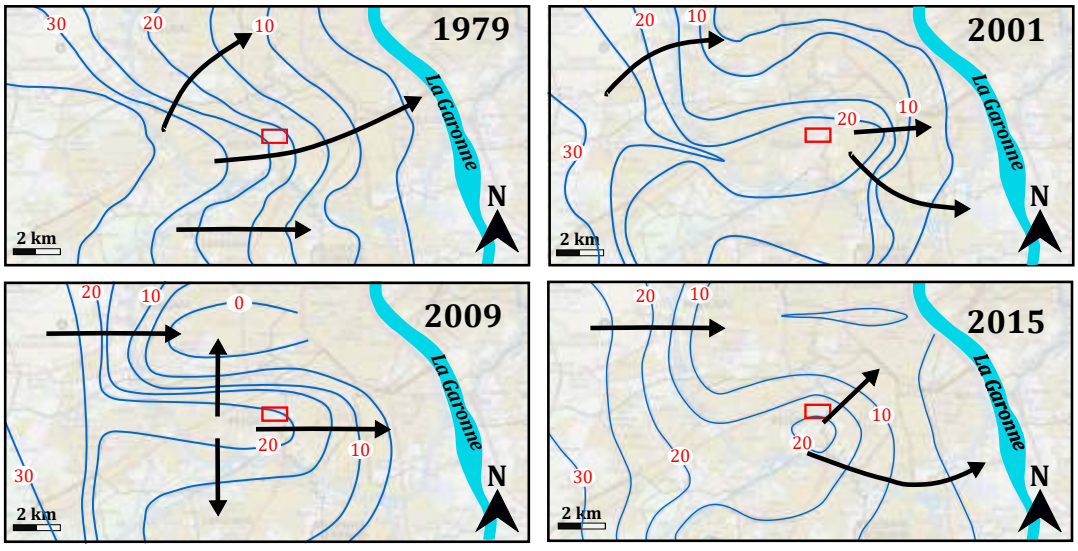


FIGURE 6.6 – Évolution de la piézométrie de la nappe oligocène et des sens d'écoulement au sud et à l'ouest de la métropole bordelaise. La localisation du site de l'ENSEGID est marquée par le carré rouge (données issues du SIGES Aquitaine https ://sigesaqi.brgm.fr)

Toutefois, depuis le début des années 80, la piézométrie de la nappe est en constante évolution, influencée par l'accroissement des pompages pour l'alimentation en eau potable de la métropole. Une ligne de crête piézométrique d'axe ouest-est apparait progressivement, centrée sur le site de l'ENSEGID (carré rouge). La dernière carte piézométrique de la région établie en 2015 montre l'apparition d'un dôme piézométrique proche du site de l'ENSEGID, rendant l'interprétation du sens d'écoulement de la nappe au droit du site relativement complexe.

6.2.2 Données nouvelles pour une vision affinée

Précisions sur la lithologie des faciès

Les déblais des forages GF1 et GF2 ont été récupérés et analysés en laboratoire à la loupe binoculaire et au microscope afin de dresser la coupe géologique détaillée au droit de ces deux ouvrages (figure 6.7).

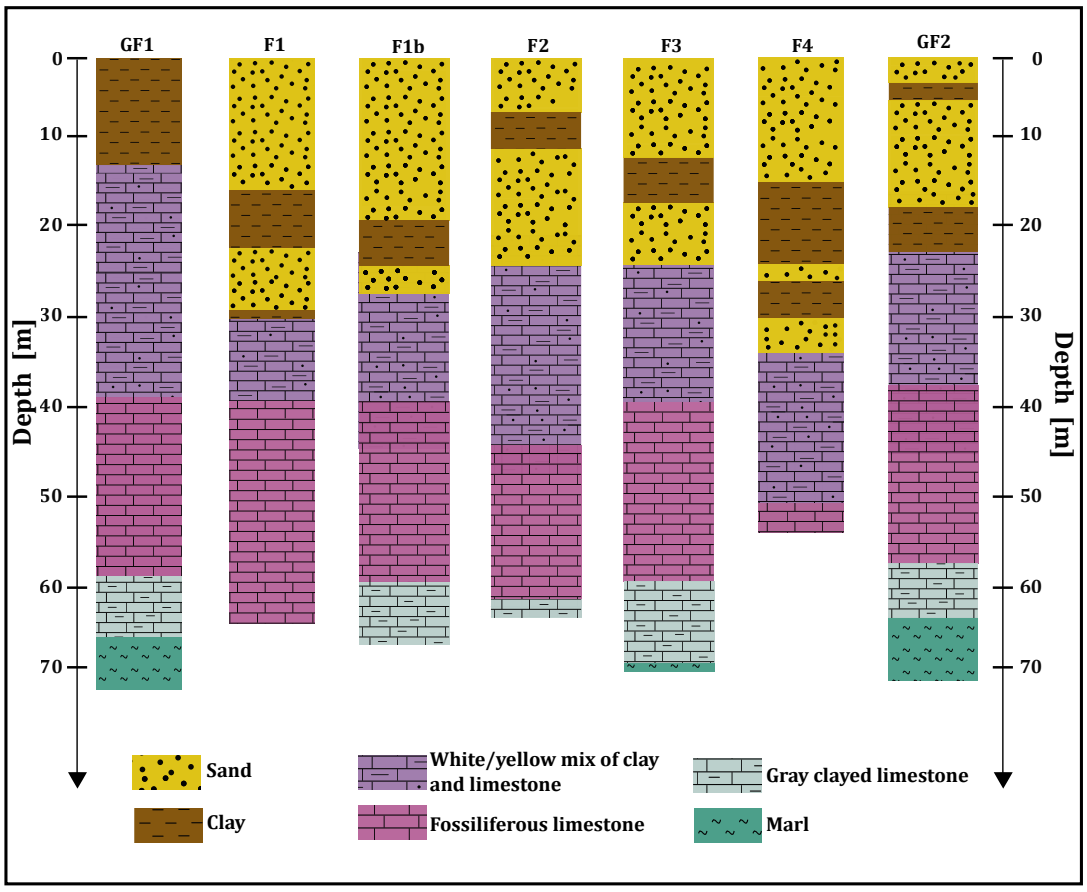


Figure 6.7 – Logs lithologiques existants sur le site de l'ENSEGID

Au total, sept coupes géologiques sont disponibles sur le site, à savoir les 2 coupes affinées GF1, GF2, et les 5 coupes F1, F2, F3, F4 et F1b. Les forages GF1

et GF2 atteignent l'horizon de marnes bleues sur lesquelles reposent les calcaires (figure 6.7). D'après les côtes des terrains, le toit de la formation calcaire a probablement subi une érosion différentielle. Il est retrouvé à 13 m au droit de GF1 (la plus faible profondeur sur site) et 25 m au droit de GF2.

L'observation macro et microscopique des déblais souligne la composante argileuse des faciès calcaires au-dessus de 39 m, avec une matrice développée qui limite la porosité (figure 6.8). Les principaux fossiles retrouvés dans cet horizon sont des algues rouges (rhodolites) et des foraminifères benthiques.

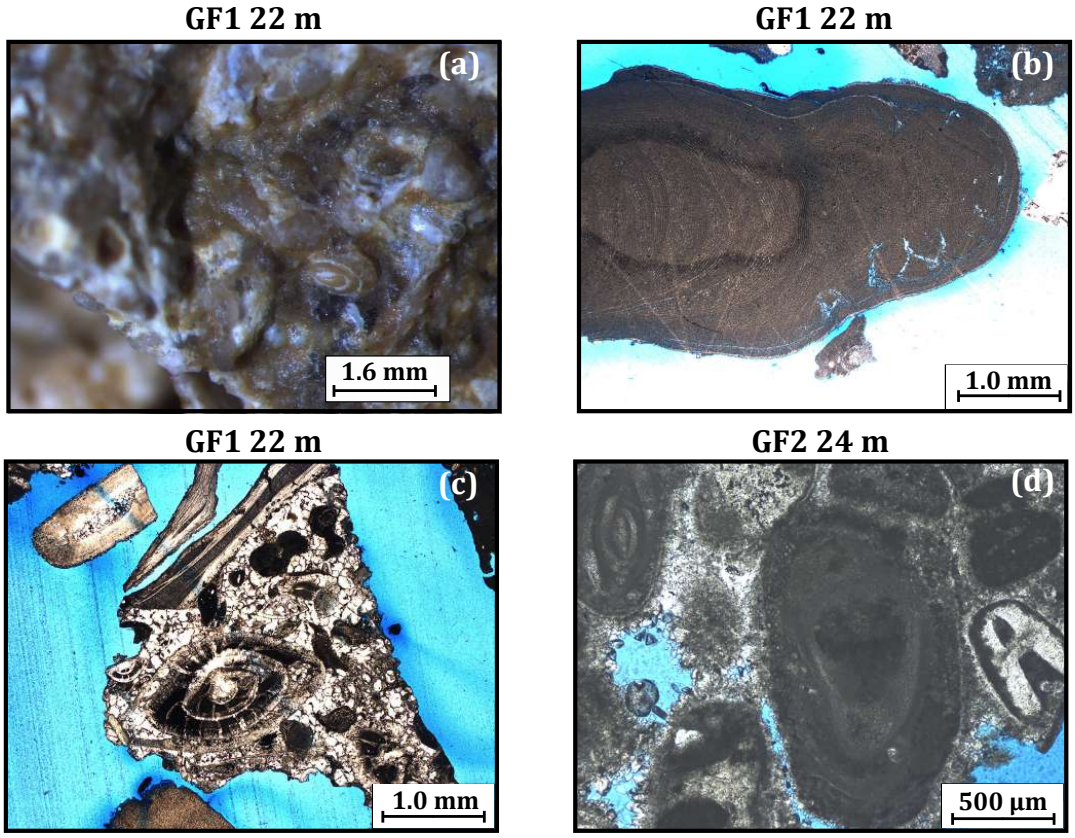


FIGURE 6.8 – Analyse microscopique des déblais de forage de la partie supérieure des calcaires : (a) débris calcaire (loupe binoculaire), (b) algue rouge (microscope électronique), (c) et (d) comblement de la porosité interstitielle par une matrice argileuse (microscope électronique)

Le réservoir à proprement parler se situe en moyenne entre 40 et 60 m de profondeur et se compose de calcaires beiges/blancs très fossilifères (bryozoaires, foraminifères, huitres, oursins). La matrice entre les différents fossiles est beaucoup moins développée, ce qui confère une meilleure porosité à cet horizon (figure 6.9).

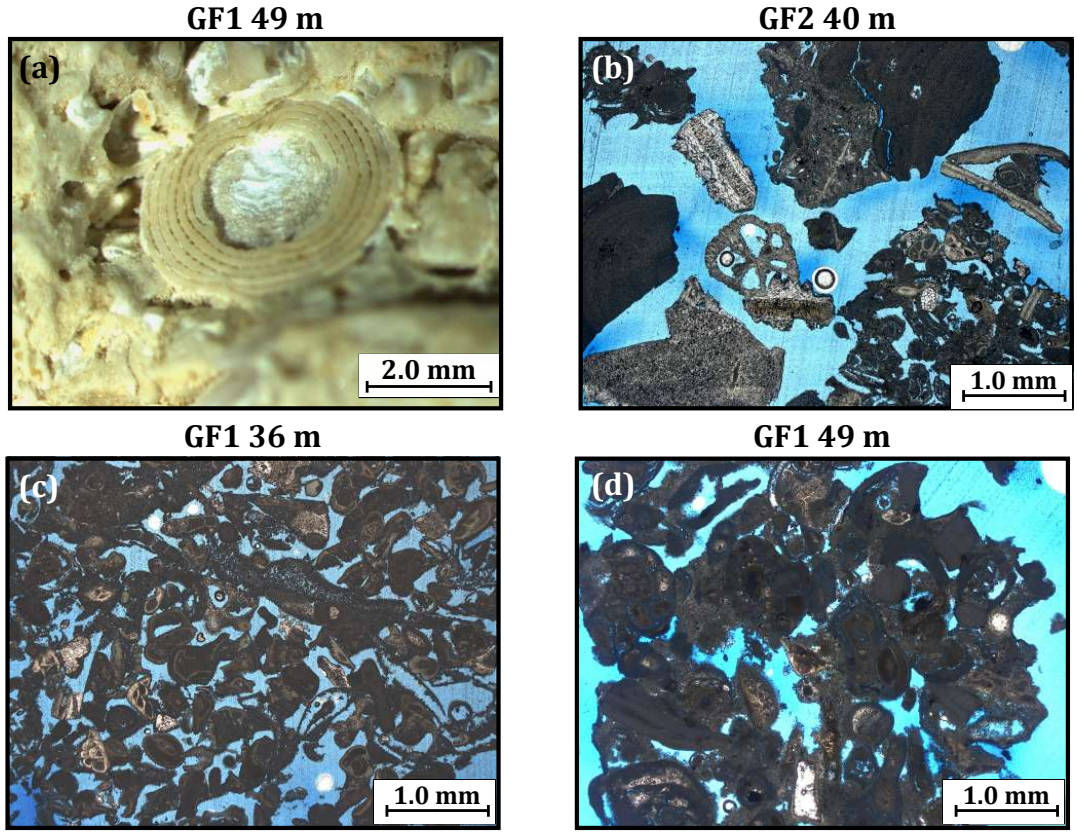


FIGURE 6.9 – Observation des cuttings de la partie réservoir des calcaires : (a) débris calcaire montrant une porosité importante autour d'un foraminifère (loupe binoculaire), (b), (c) et (d) mise en évidence d'une porosité interstitielle dans les débris calcaires (microscope électronique)

PROPRIÉTÉS RÉSERVOIR : APPORT DES DIAGRAPHIES

À la fin des travaux de réalisation de GF1 et GF2, des diagraphies de réception ont été effectuées pour apporter des précisions sur la lithologie des roches, leurs propriétés réservoir, ainsi que la position des écoulements préférentiels dans l'aquifère. Ces diagraphies consistent à effectuer des logs de :

- rayonnement γ (GR),
- résistivité,
- flowmétrie.

Au forage GF1 (figure 6.10), le GR chute à partir de 39 m de profondeur, signe d'une diminution de la teneur en argile des calcaires. À partir de 59 m, quand on rentre dans les calcaires gris, la valeur augmente légèrement. Au niveau de la résistivité, l'écart entre la grande (Res 64) et la petite (Res 16) normale est signe de la présence d'eau dans la porosité roches. Cette diagraphie montre que de l'eau est présente sur pratiquement toute l'épaisseur de la formation identifiée avec une faible signature GR. Ces deux diagraphies suggèrent de bonnes propriétés

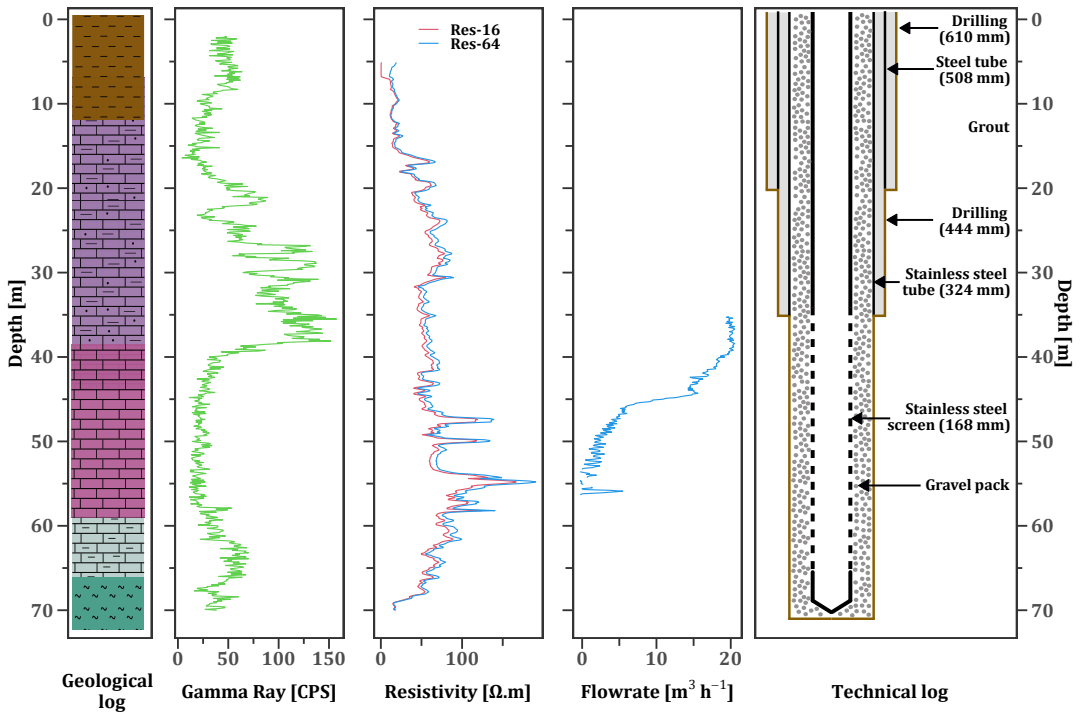


FIGURE 6.10 – Compilation des données acquises au forage GF1 : coupe géologique, diagraphies de réception et coupe technique

réservoir entre 39 et 60 m de profondeur. La diagraphie de flowmétrie réalisée dans ce puits montre qu'une importante zone de circulation d'eau dans l'aquifère est localisée entre 44 et 47 m de profondeur. Cette arrivée importante correspond avec l'horizon producteur identifié dans pz51 avec les expériences de fibre optique (chapitre 3). Le reste des arrivées d'eau sont localisées de manière homogène entre 40 et 44 m puis entre 47 et 56 m.

Au droit de GF2, le GR chute aussi à partir de 39 m de profondeur (figure 6.11). La valeur reste stable jusqu'à 52 m puis un pic apparaît jusqu'à 55 m. La même tendance qu'au droit de GF1 apparaît ensuite avec une augmentation du GR dans les calcaires gris à 60 m de profondeur. La diagraphie de résistivité montre une absence d'eau dans le pic identifié par le GR entre 52 et 55 m de profondeur. Le reste de la formation calcaire entre 40 et 60 m montre un écart entre les deux normales, signe de la présence d'eau dans la formation. La diagraphie de flowmétrie (assez bruitée) met en avant qu'une faible proportion des arrivées d'eau provient de l'intervalle entre 55-62 m. Le reste des arrivées est reparti de manière homogène jusqu'à 38 m de profondeur.

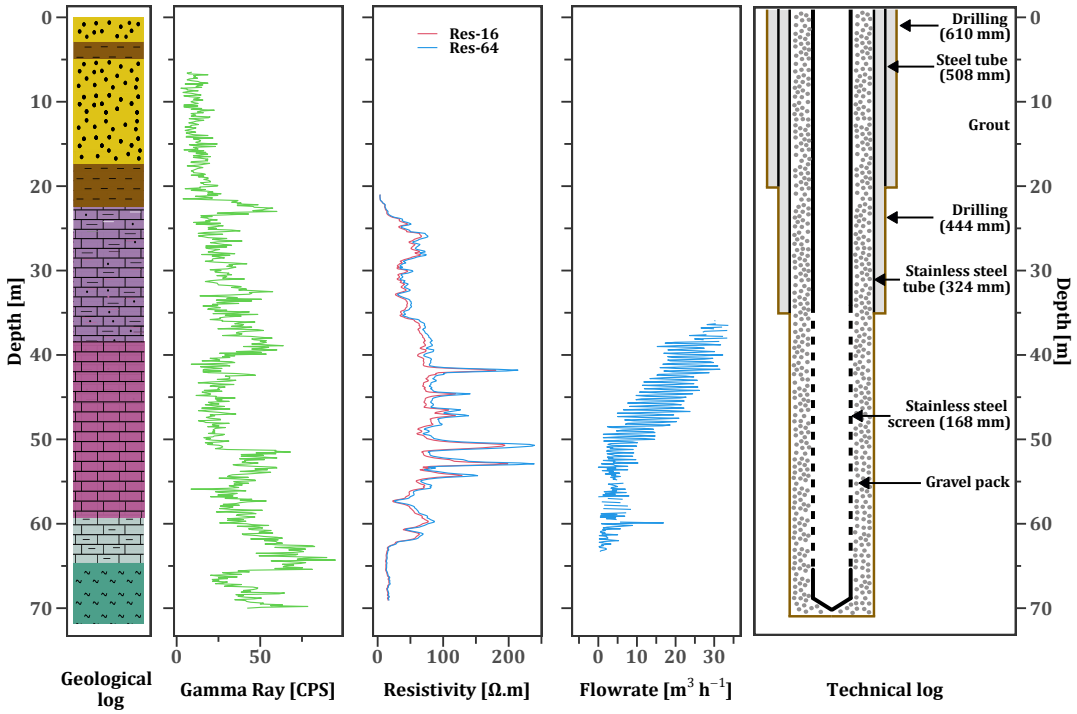


FIGURE 6.11 – Compilation des données acquises au forage GF2 : coupe géologique, diagraphies de réception et coupe technique

Complément sur l'écoulement local de la nappe Oligocène

Des mesures piézométriques ont été effectuées dans les ouvrages du site avant la mise en marche de l'ATES en avril 2021 (figure 6.12). Un piézomètre captant l'Oligocène situé à 300 m à l'est a aussi été mesuré. Ce dernier étant faiblement artésien, seule l'altitude de la tête de forage a été mesurée (25 mNGF), constituant une valeur minimale pour la piézométrie.

Les mesures semblent mettre en évidence un écoulement orienté du sud-ouest vers le nord-est au droit du site, avec une différence de charge hydraulique de 1 m entre les forages GF1 à l'ouest et GF2 à l'est. Cette direction confirme le sens d'écoulement régional se dirigeant vers la Garonne à l'est. De prime abord, l'implantation des forages ne semble pas être adaptée au paradigme relatif aux configurations ATES, à savoir un axe GF1-GF2 perpendiculaire au sens d'écoulement de la nappe. Pour satisfaire cette préconisation, les forages auraient dû être positionnés selon un axe nord-sud. Toutefois, sur site, la disposition du bâti a été un choix limitant les possibilités d'implantation des ouvrages.

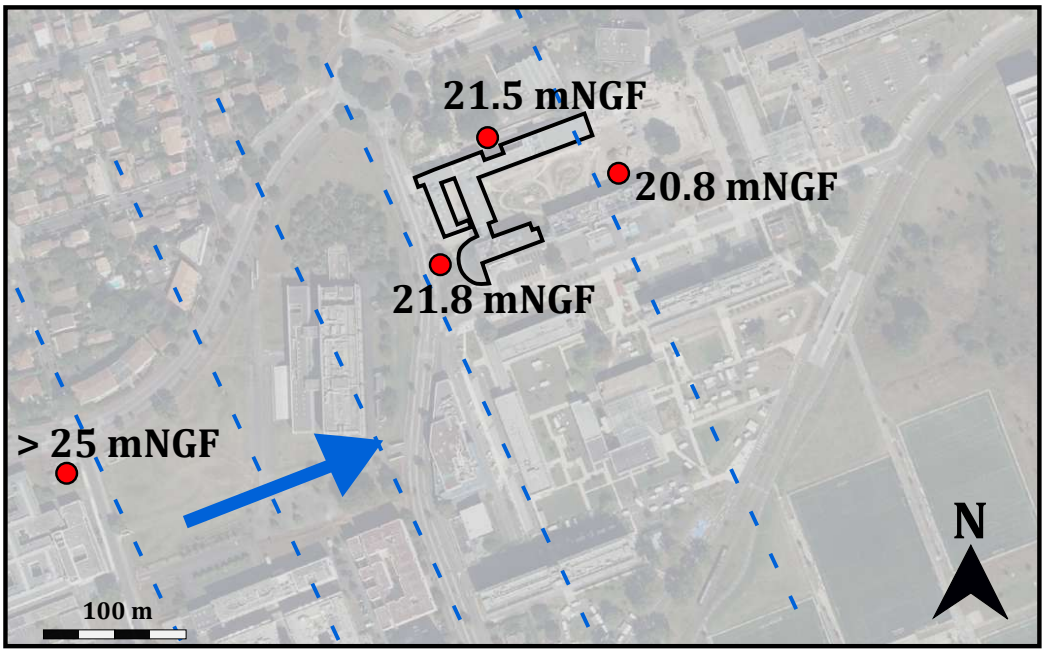


FIGURE 6.12 – Esquisse piézométrique du site de l'ENSEGID (mesures avril 2021)

FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE : APPORT DES ESSAIS DE NAPPE

Les essais de nappes consistent à pomper à débit constant un forage captant une unité aquifère. Le rabattement du niveau piézométrique induit par ce pompage est suivi au droit du forage et/ou à différents piézomètres du site captant la même unité aquifère. L'analyse du rabattement permet de déterminer les propriétés moyennes du gisement local et de choisir un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la zone.

Afin de comprendre le fonctionnement hydrogéologique du complexe aquifère de l'ENSEGID et de calculer ses propriétés hydrodynamiques (conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement), deux essais de pompage de 48 heures ont été réalisés suite à la création de GF2 (juillet 2020) et GF1 (décembre 2020). Le rabattement a été suivi au droit des ouvrages pompés et à différents piézomètres site grâce à des sondes automatiques ventilées Level Troll et des sondes Diver (In Situ). Ces mesures automatiques ont été vérifiées avec des relevés à la sonde piézométrique manuelle. Les caractéristiques de ces deux essais sont résumées dans le tableau 6.1

Bien que les débits de pompage soient très proches pour les deux essais, le rabattement à la fin de la période de pompage est beaucoup plus important pour GF2 (22.8 m) que pour GF1 (environ 8.7 m). De légers sauts de rabattement

Essai	GF1	GF2
Durée de pompage (h)	48	48
Débit moyen ($m^3\,h^{-1}$)	21	20
Forage de production suivi	oui	oui
Rabattement au forage à la fin du pompage (m)	8.7	22.8
Nombre de piézomètres suivis	7 (pz51, pz101, pz102, GF2, F3,F4, F2)	2 (F1 et F2)
Temps de suivi de la remontée (h)	22	5
Type d'acquisition de données	Automatique et manuel	Automatique et manuel
Pas de temps d'acquisition automatique (min)	1	1

TABLE 6.1 – Résumé des caractéristiques des essais de pompages GF1 et GF2

se sont produits en début de pompage, traduisant des variations soudaines (vite rectifiées) du débit pompé (figure 6.13). Des variations plus faibles ont aussi eu lieu sur la fin des essais.

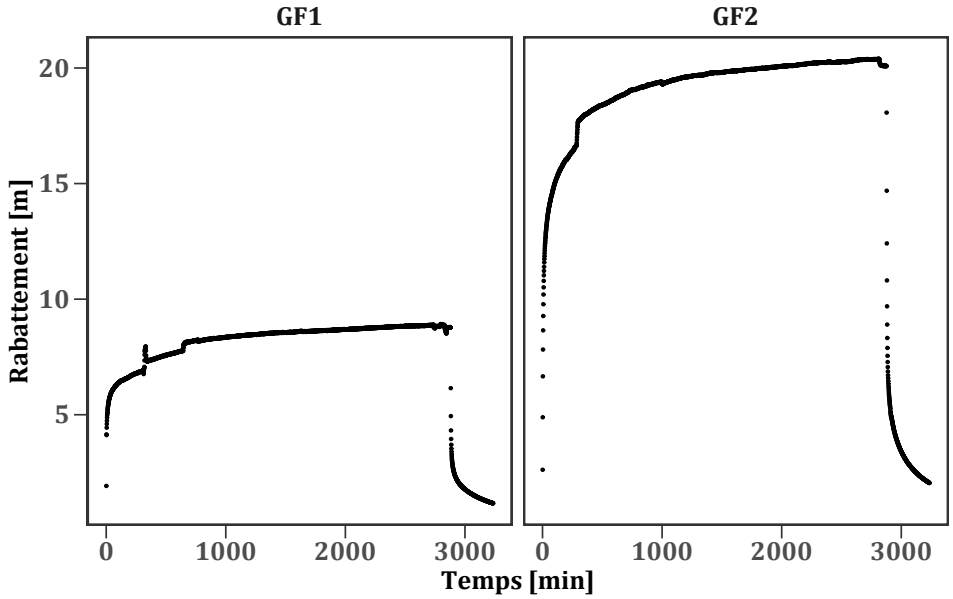


FIGURE 6.13 – Rabattements enregistrés aux forages de production durant leur essai de nappe. Les sauts brusques de rabattement correspondent à des variations de débit (variations non enregistrées durant les essais).

Analyse des essais de pompage : apport de la dérivée logarithmique

L'analyse et l'interprétation des essais de pompage consiste à représenter graphiquement le rabattement de la nappe (s en m) mesuré à un ouvrage en fonction du temps et de calibrer une solution analytique sur ces données en choisissant les paramètres adéquats. Il existe une quantité de solution analytique représentant le rabattement en fonction du temps lorsqu'un aquifère est soumis à un pompage, selon les conditions de gisement de la nappe et les caractéristiques du complexe de pompage/observation.

L'évolution du rabattement en fonction du temps au cours d'un essai de nappe dépend de la configuration hydrogéologique de l'aquifère. Cependant, certaines configurations peuvent être différentes, mais générer des réponses de rabattement assez similaires lorsque que l'aquifère est soumis à un pompage. Cette équivalence de solutions complique le choix du modèle conceptuel à appliquer à l'aquifère.

Afin de réduire les erreurs sur le choix du modèle conceptuel, une méthode complémentaire d'interprétation a été développée, basée sur l'exploitation de la dérivée du rabattement par rapport au logarithme du temps. Initialement introduite par les pétroliers (D. Bourdet et al. 1983), cette méthode d'interprétation a été appliquée ponctuellement en hydrogéologie (Larroque 2004) puis adoptée de manière plus générale (Renard et al. 2009).

Le principe de cette technique consiste à afficher sur le même graphique le rabattement s et sa dérivée logarithmique en fonction du temps ($\frac{ds}{d\ln t}$) (graphique *diagnostic plot*).

La dérivée logarithmique est calculée de la manière suivante :

$$\frac{ds}{d\ln t} = \frac{s_i - s_{i-1}}{\ln(t_i) - \ln(t_{i-1})} \tag{6.1}$$

où s_i représente le rabattement au temps t_i et s_{i-1} le rabattement mesuré au pas de temps précédent t_{i-1}.

La dérivée logarithmique est très sensible aux faibles variations de rabattement. Il est possible d'associer ces variations à des signatures types correspondant à des régimes successifs d'écoulement propres à des types d'aquifère ou des configurations puits/aquifères. L'utilisation du "*diagnostic plot*" permet d'identifier visuellement des différents modes d'écoulement en les rapprochant de courbes signatures (Renard et al. 2009).

La dérivée logarithmique $\frac{\partial s}{\partial \ln t}$ peut être sujette à un bruit critique lorsque la durée entre deux mesures est trop importante ou lorsque l'incertitude sur le rabattement mesuré est du même ordre de grandeur que la variation de rabattement entre deux points. Pour limiter ce bruit, il convient de filtrer les données

de rabattement brutes avant d'afficher la dérivée logarithmique (Bourdet et al. 1989 ; Ramos et al. 2017 ; Renard et al. 2009 ; Tago et Hernández-Espriú 2017).
Le pas de temps d'enregistrement (1 min) génère des diagnostics plot très bruités, en particulier à la fin du pompage, lorsque les variations de rabattement sont très faibles. Pour limiter ce problème, les données acquises à chaque piézomètre ont été filtrées par un ré-échantillonage logarithmique (Renard et al. 2009). Il faut une densité de points suffisamment importante pour être en capacité de restituer une dérivée représentative tout en évitant que les données ne soient trop bruitées (figure 6.14).

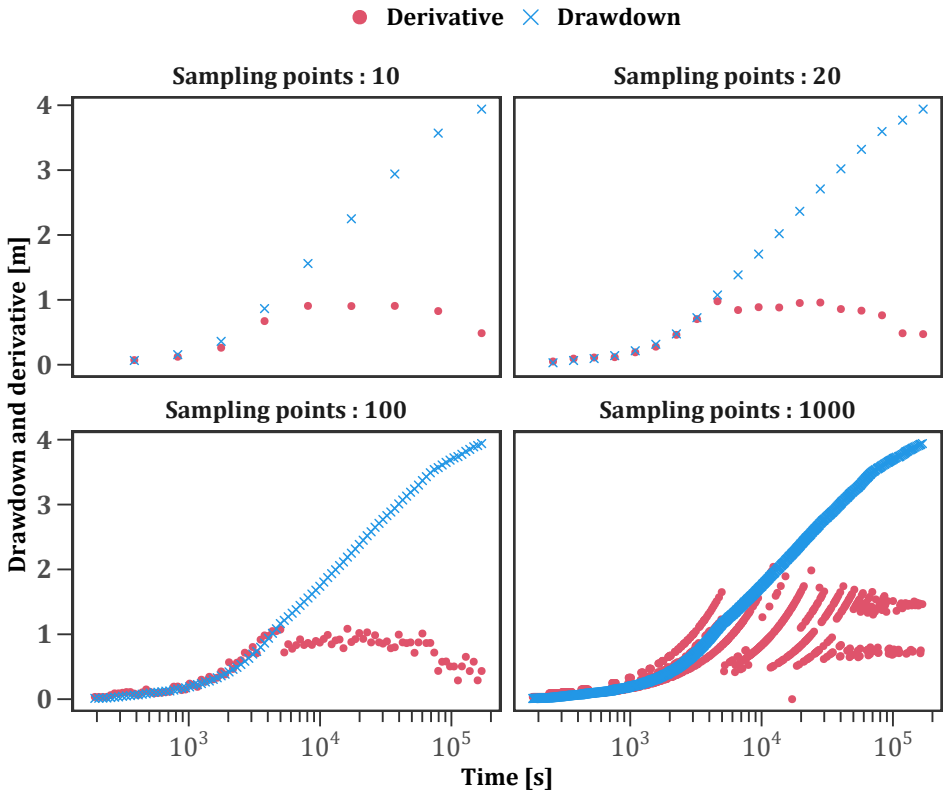


Figure 6.14 – Sensibilité du "diagnostic plot" à l'échantillonnage (essai de pompage GF2, piézomètre F2) : un nombre de points trop faible (10) génère une courbe dérivée à la signature potentiellement ambiguë, alors qu'un nombre de points important (1000) génère une dérivée excessivement bruitée.

Bien que des techniques de filtrages plus complexes existent (Ramos et al. 2017 ; Tago et Hernández-Espriú 2017), cette technique de filtrage est jugée satisfaisante pour obtenir un diagnostic plot lisible.
Ainsi, pour interpréter les essais de pompage, 100 points ont été ré-échantillonnés pour chaque piézomètre instrumenté. Pour les piézomètres pz102 et GF2, durant l'essai de pompage GF1, compte tenu des très faibles rabattements enregistrés,

un nombre plus faible de 50 points a été retenu pour diminuer le bruit de la dérivée logarithmique.

Modèles conceptuels testés

Compte tenu du contexte hydrogéologique du site, deux solutions analytiques sont testées. La première solution correspond au modèle conceptuel de Theis (Theis 1935) et la deuxième au modèle semi-captif de Hantush (Hantush 1956).

Solution de Theis : la solution de Theis (Kruseman et Ridder 1994) calcule le rabattement en fonction du temps à un piézomètre situé à une distance r (m) d'un forage parfaitement pénétrant et de diamètre considéré infinitésimal, pompant à un débit moyen Q ($m^3\,s^{-1}$) un aquifère parfaitement confiné entre deux épontes strictement imperméable figure 6.15.

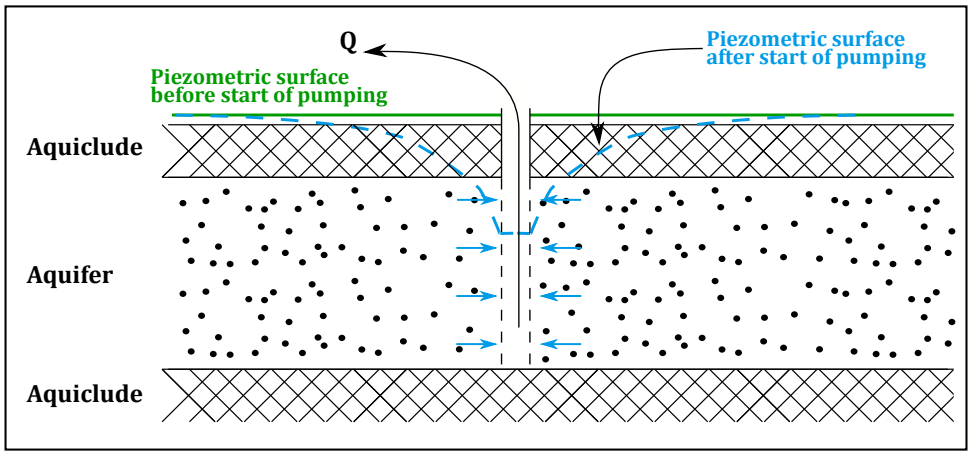


Figure 6.15 – Modèle conceptuel de Theis : pompage dans un aquifère strictement confiné (adapté de Kruseman et Ridder 1994

L'écoulement généré par ce pompage est horizontal, radial et convergent vers le forage. L'aquifère est homogène et isotrope, d'extension infinie et d'épaisseur constante dans l'espace. Le rabattement $s(r,t)$ s'exprime par :

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}\frac{\exp(-y)}{y}dy \tag{6.2}$$

avec t le temps (s), r la distance entre le puits pompé et le point d'observation, T la transmissivité de l'aquifère ($m^2\,s^{-1}$), et u s'exprime par :

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \tag{6.3}$$

avec S le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (-).

Solution de Hantush : le modèle de Hantush (KRUSEMAN et RIDDER 1994) correspond à un complexe de 3 unités (aquifère 1 - aquitard - aquifère 2) reposant sur une éponte strictement imperméable. Un puits parfaitement pénétrant capte l'aquifère 2. Le puits est crépiné sur l'épaisseur totale de l'aquifère 2 (figure 6.16).

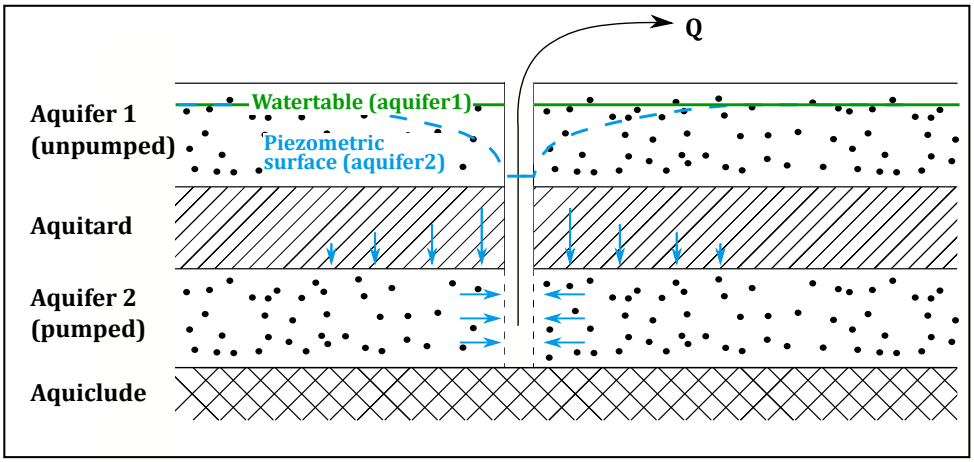


FIGURE 6.16 – Modèle conceptuel de Hantush : pompage dans un aquifère semi-captif (adapté de KRUSEMAN et RIDDER 1994

Soumis à un pompage constant, l'aquifère 2 va dans un premier temps fournir l'eau qu'il contient puis drainer l'aquifère 1 à travers l'aquitard semi-imperméable.

Pour ce modèle, l'aquifère et l'aquitard sont parfaitement homogènes, isotropes, d'extension infinie et d'épaisseur constante. Le forage est parfaitement pénétrant sur la hauteur de l'aquifère. L'écoulement dans l'aquifère 2 est horizontal, radial et convergent vers le forage, alors que l'écoulement dans l'aquitard est vertical. Par ailleurs, le coefficient d'emmagasinement de l'aquitard est négligé et le niveau dans l'aquifère 1 non pompé est constant. Ainsi, le rabattement $s(r,t)$ en fonction du temps peut être exprimé par :

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^\infty \frac{1}{y}\exp(-y - \frac{r^2}{4L^2 y})dy \tag{6.4}$$

avec L (m) le facteur de drainance qui s'exprime par :

$$L = \sqrt{Tc} \tag{6.5}$$

avec c la résistance hydraulique de l'aquitard qui s'exprime par :

$$c = e'/K' \tag{6.6}$$

avec e' l'épaisseur de l'aquitard (m) et K' la conductivité hydraulique de l'aquitard ($\mathrm{m\,s^{-1}}$).

Diagnostic plots expérimentaux

Les *diagnostic plots* sont réalisés pour chaque essai et les solutions de Theis et d'Hantush sont ajustées sur le rabattement enregistré sur le terrain durant le pompage et la remontée (figure 6.17).

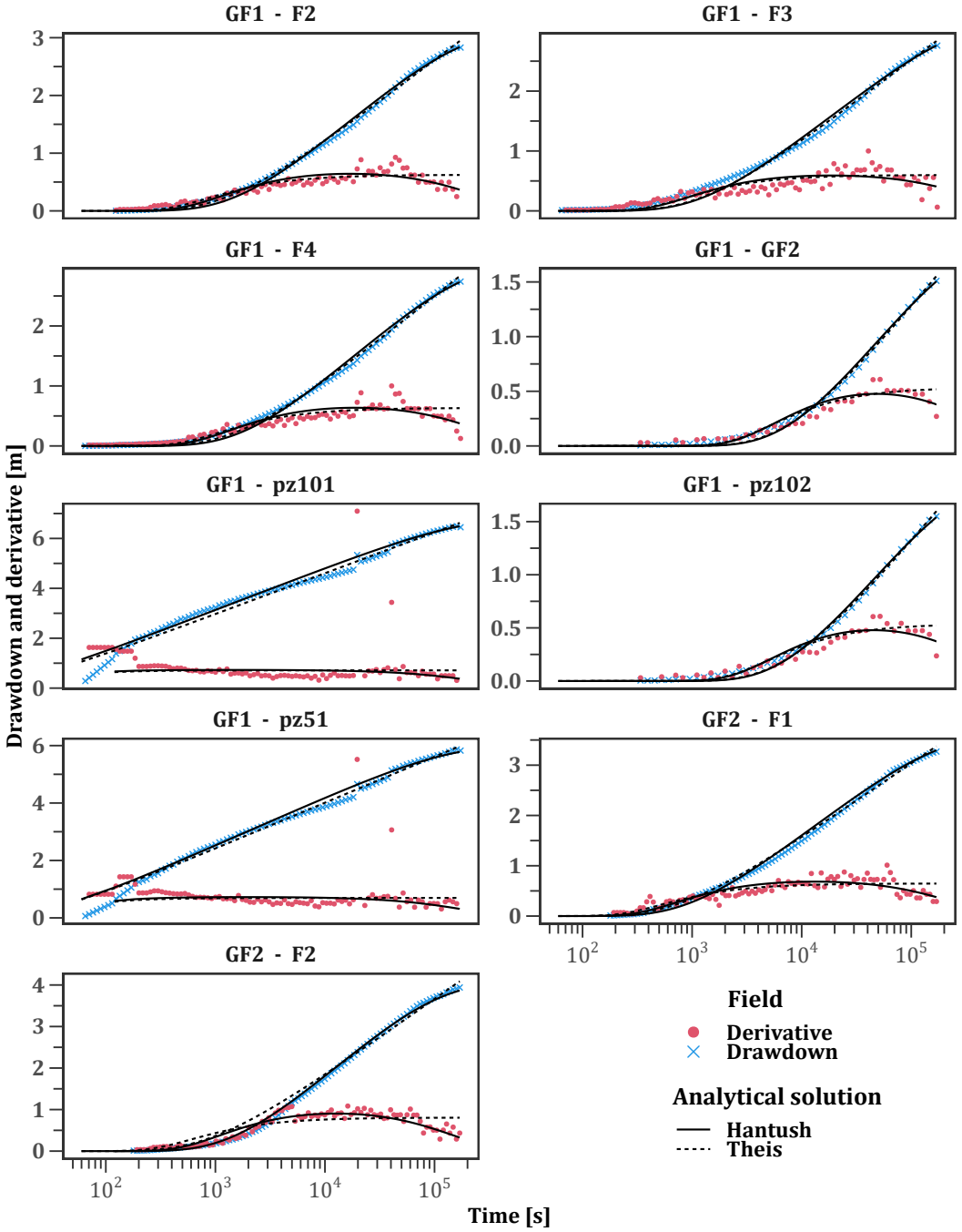


FIGURE 6.17 – *Diagnostic plots* aux différents piézomètres suivis durant les deux essais de pompage et modèles analytiques de Theis et Hantush ajustés sur les rabattements mesurées

L'ajustement est effectué avec le logiciel *OUAIP* développé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Le principe consiste à optimiser les paramètres hydrodynamiques de la solution analytique de manière à minimiser l'écart entre les valeurs de rabattements modélisées et les valeurs mesurées sur le terrain. Les courbes analytiques obtenues pour les deux modèles, ainsi que les dérivées logarithmiques qui en découlent, sont affichées sur le diagnostic plot filtré des données de terrain (figure 6.17).

Les deux solutions analytiques permettent d'estimer des transmissivités relativement proches (tableau 6.2 et tableau 6.3). La solution de Theis surestime les rabattements. L'aquifère oligocène présente une meilleure transmissivité à proximité immédiate de GF1 par rapport à GF2. Les valeurs de transmissivité pour l'aquifère oligocène calculées grâce à ces deux essais de pompage se situent dans la fourchette basse des transmissivités de l'aquifère retrouvées dans la région bordelaise (Larroque 2004).

Puits mesuré	**Puits pompé**	**r** (m)	**T** ($m^2\,s^{-1}$)	**S (-)**
F2	GF1	84.6	7.4×10^{-4}	3.6×10^{-4}
F3	GF1	80.9	7.7×10^{-4}	3.0×10^{-4}
F4	GF1	92.2	7.3×10^{-4}	4.9×10^{-4}
GF2	GF1	144.5	8.7×10^{-4}	9.0×10^{-4}
pz102	GF1	145.8	8.6×10^{-4}	8.2×10^{-4}
pz101	GF1	6.5	6.5×10^{-4}	5.4×10^{-4}
pz51	GF1	6.0	6.7×10^{-4}	1.3×10^{-3}
Moyenne GF1			7.6×10^{-4}	6.7×10^{-4}
F2	GF2	63.7	5.5×10^{-4}	3.3×10^{-4}
F1	GF2	78.2	6.8×10^{-4}	2.3×10^{-4}
Moyenne GF2			6.2×10^{-4}	2.8×10^{-4}

Table 6.2 – Paramètres hydrodynamiques estimés à partir de l'interprétation des essais de pompage en utilisant la solution de Theis

L'étude des *diagnostic plots* oriente le choix du modèle conceptuel de la zone vers un système aquifère drainant (figure 6.16). En effet, à partir d'environ $6.0 - 7.0 \times 10^4$ secondes, la dérivée décroît sur tous les ouvrages suivis (figure 6.17). Ce comportement est bien restitué par forme de la dérivée logarithmique pour la solution d'Hantush. La diminution de la dérivée du rabattement calculée pour pz51 et pz101 est moins marquée.

L'interprétation des essais de pompage des forages géothermiques GF1 et GF2 de l'ENSEGID par la technique des dérivées logarithmiques met en évidence l'effet probable d'un aquifère superficiel drainé via un aquitard sus-jacent. Ces deux essais de 48 h auraient cependant mérité d'être prolongés 24 heures supplémentaires afin d'avoir plus de certitude sur le modèle conceptuel à employer.

Puits de mesure	**Puits pompé**	**r** (m)	**T** ($m^2\,s^{-1}$)	**S (-)**	**L** (m)	**K'** ($m\,s^{-1}$)
F2	GF1	84.6	6.3×10^{-4}	4.1×10^{-4}	615	2.5×10^{-8}
F3	GF1	80.9	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	924	1.2×10^{-8}
F4	GF1	92.2	6.3×10^{-4}	5.3×10^{-4}	551	3.1×10^{-8}
GF2	GF1	144.5	7.6×10^{-4}	8.7×10^{-4}	580	3.4×10^{-8}
pz102	GF1	145.8	7.6×10^{-4}	7.9×10^{-4}	595	3.2×10^{-8}
pz101	GF1	6.5	6.3×10^{-4}	4.8×10^{-4}	575	2.9×10^{-8}
pz51	GF1	6.0	6.3×10^{-4}	1.3×10^{-3}	310	9.8×10^{-8}
Moyenne GF1			6.8×10^{-4}	6.7×10^{-4}	592	3.7×10^{-8}
F2	GF2	63.7	4.1×10^{-4}	3.3×10^{-4}	360	4.7×10^{-8}
F1	GF2	78.2	5.8×10^{-4}	2.3×10^{-4}	720	1.7×10^{-8}
Moyenne GF2			5.0×10^{-4}	2.8×10^{-4}	540	3.2×10^{-8}

TABLE 6.3 – Paramètres hydrodynamiques estimés à partir de l'interprétation des essais de pompage en utilisant la solution de d'Hantush

6.3 Contexte thermique du site de l'ENSEGID : un héritage du passé

6.3.1 Le constat actuel

Distribution des températures du sous-sol sur site

Des profils de températures ont été réalisés à intervalles réguliers durant une année dans cinq forages du site (pz51, pz101, pz52, pz102 et F3) avant la mise en fonctionnement de l'ATES. La période d'acquisition de données s'étend d'avril 2021 à mars 2022. Ces mesures permettent de disposer d'un état thermique initial avant mise en fonction de l'ATES (figure 6.18).

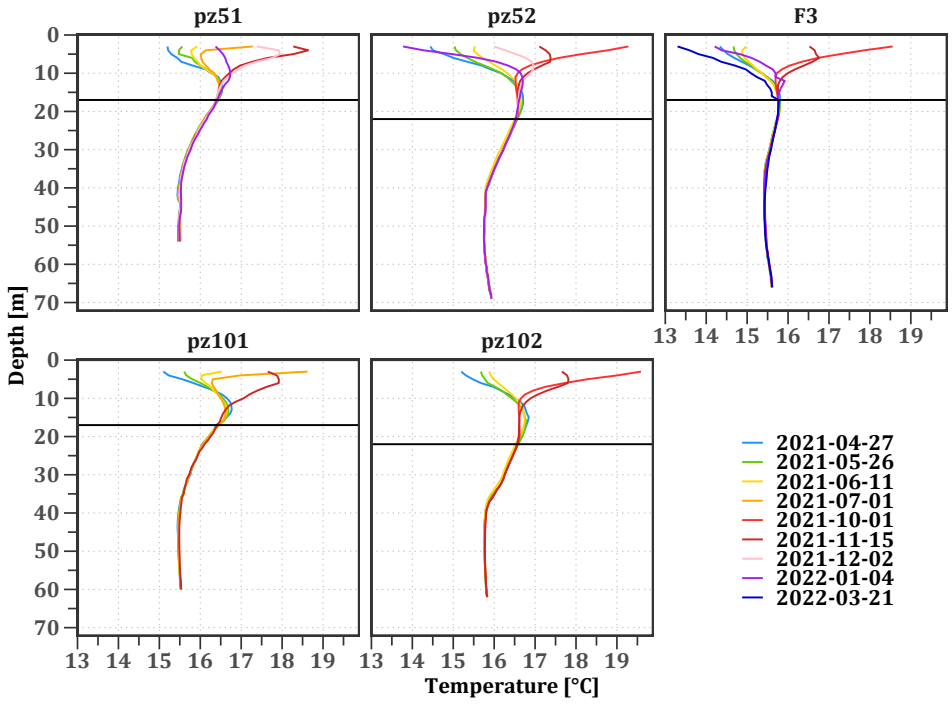


Figure 6.18 – Profils de températures mensuels sur 5 forages du site de l'ENSEGID. La droite horizontale représente la profondeur du point fixe

Ces profils de température mettent en évidence une variabilité temporelle des températures dans les premiers mètres du sous-sol, imputable aux variations saisonnières des températures atmosphériques (sous-section 4.1.1). Dans les forages F3, pz51 et pz101, le point fixe se trouve à 17 m sous la surface du sol. Pour pz52 et pz102, il est retrouvé plus en profondeur, à 22 m, signe d'une diffusivité thermique plus élevée à cet endroit.

Par ailleurs, il existe une disparité de températures entre les points fixes :

16.6 °C pour pz102 et pz52, 16.4 °C pz51 et pz101, et 15.8 °C pour F3. Les formes des profils observées à l'ENSEGID sont atypiques. En effet, en dessous du point fixe, la température décroît jusqu'à environ 40 m de profondeur, puis se stabilise jusqu'à 60 m, contrairement à l'évolution linéaire standard attendue. En dessous de cette limite, la température augmente avec la profondeur.

Caractérisation du gradient géothermique local

Les formes atypiques de profils à l'ENSEGID ne permettent pas d'estimer le gradient géothermique local. Il a donc été estimé à partir des données de températures disponibles sur les puits profonds les plus proches(figure 6.19).

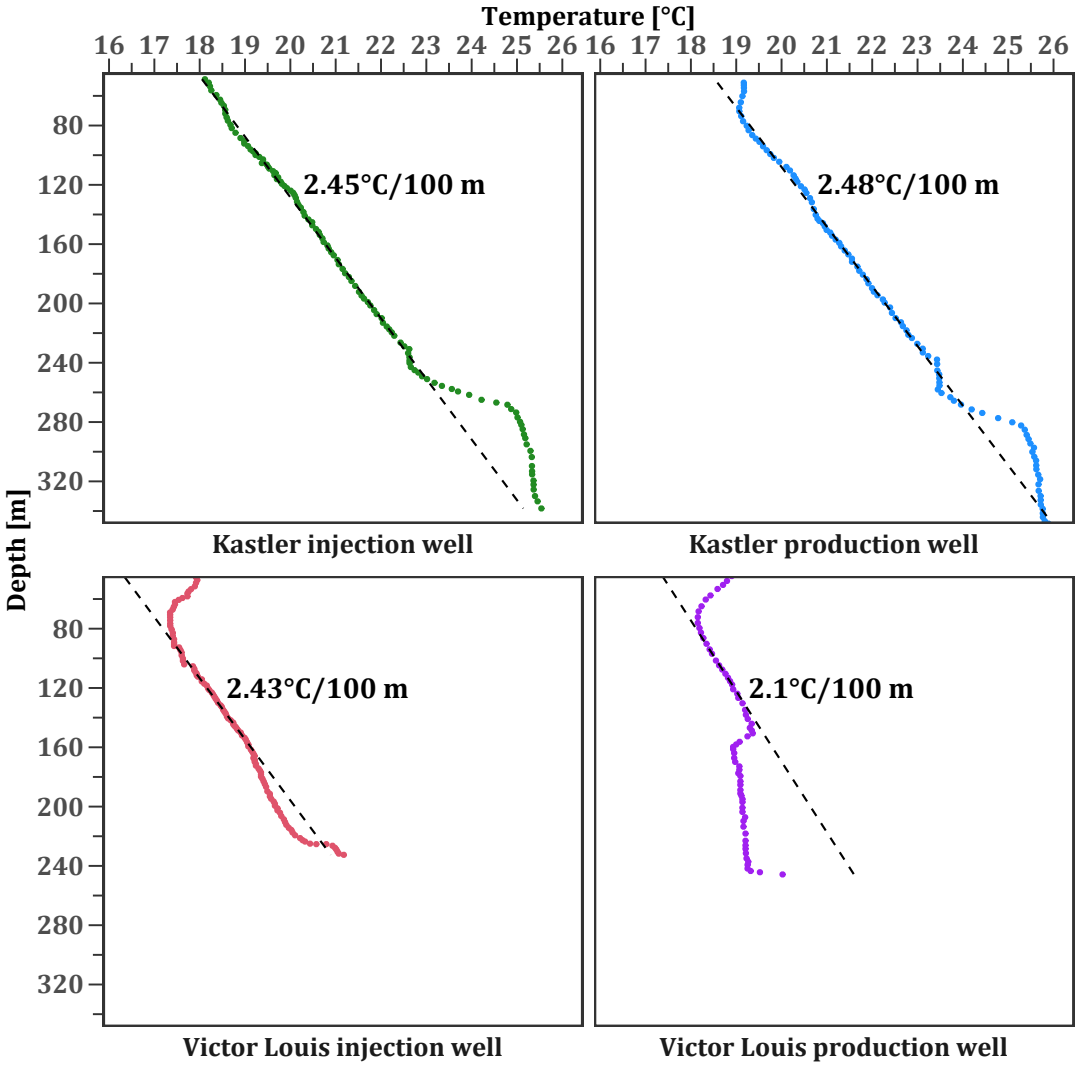


Figure 6.19 – Profils de températures relevés dans les forages géothermiques des lycées de Talence. La droite en pointillé représente la distribution de la température estimée à partir du calcul du gradient géothermique (Données Antea Group)

Ces forages sont utilisés par des systèmes géothermiques non réversibles et se situent au :

- Lycée Kastler, Talence (800 mètres de distance du site) : deux forages de 360 m de profondeur captant de la nappe de l'Éocène inférieur ;
- Lycée Victor Louis, Talence (1300 mètres de distance du site) : deux forages de 250 m captant la nappe calcaire de l'Éocène moyen.

Les 4 profils de température ont été réalisés à la réception des ouvrages en 2020 et 2021 Pour l'estimation du flux géothermique, la variation linéaire de la température en fonction de la profondeur a été retenue. Les autres portions de courbe correspondent vraisemblablement à l'impact thermique de la surface et à des phénomènes de renouvellement thermique à hauteur des zones crépinées ont été écartés.

Trois ouvrages possèdent une valeur similaire autour de 2.45 °C/100 m. Au forage de production de Victor Louis, le gradient estimé est inférieur avec une valeur de 2.1 °C/100 m. Toutefois, le profil est bien plus perturbé en face de la partie crépinée dans ce forage que dans les trois autres. Cela suggère une influence trop forte du pompage pour estimer le gradient réel sur site. La valeur moyenne $\Phi = 2.45\,°C/100$ m est donc retenue.

La dynamique thermique de l'ENSEGID : un équilibre influencé par des facteurs anthropiques ?

Les profils de température relevés sur site montrent qu'en dessous du point fixe, l'évolution de la température ne suit pas le gradient géothermique local. On observe une décroissance de la température jusqu'à 40 m de profondeur. Cette décroissance varie entre les forages, puisque F3 présente une diminution moindre de sa température entre 15 et 40 m de profondeur. En dessous de 40 m, la température se stabilise sur 20 m d'épaisseur avant de commencer à croître à partir de 60 m.

La forme en "C" des profils, les différences de courbures et de valeur de température à des mêmes profondeurs (notamment au niveau de F3) suggèrent que la distribution de température dans le sous-sol de l'ENSEGID est influencée par l'anthropisation du sol et/ou une évolution à long terme des conditions thermiques de surface.

Selon la carte d'occupation des sols établie à partir de la classification du Corine Land Cover (figure 6.20), l'ENSEGID se trouve dans une zone dite "*Industrielle, commerciale ou publique*", caractérisée par des "*Zones bâties et recouvertes artificiellement (zones cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées :*

terre battue, par exemple). Ces zones peuvent comprendre de la végétation ou d'autres surfaces non imperméabilisées. Elles servent à une utilisation industrielle ou commerciale, ou bien à des équipements de service public".

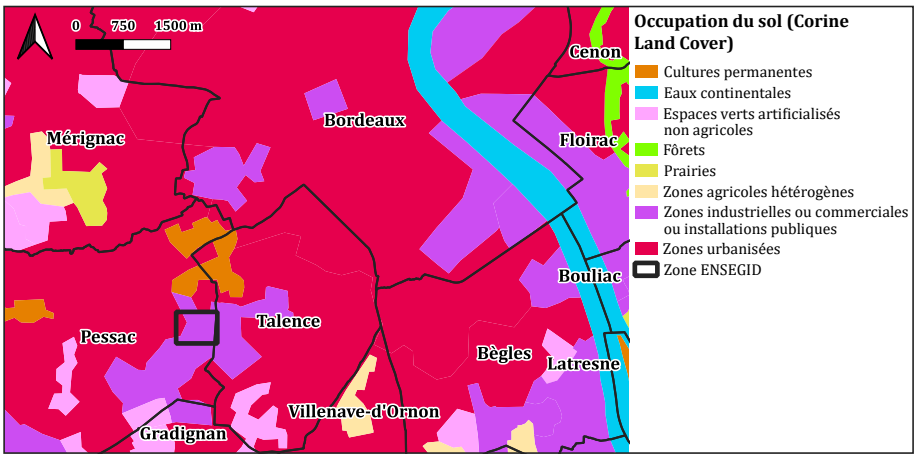


FIGURE 6.20 – Occupation des sols dans le sud de Bordeaux (Corine Land Cover, version 2012) et localisation de l'ENSEGID (rectangle noir)

Ces types de zones sont caractérisés par une anthropisation de surface qu'on peut classifier comme "moyenne", en comparaison à un centre-ville où très peu d'espaces verts naturels sont présents.

Les tendances climatiques passées peuvent être un facteur supplémentaire expliquant la distribution atypique des températures observées à l'ENSEGID. En effet, l'agglomération bordelaise n'est pas épargnée par l'augmentation des températures atmosphériques depuis les années 70. Les stations météos de l'agglomération indiquent des températures moyennes actuelles supérieures de 2.0 °C à celles enregistrées dans les années 70.

6.3.2 Héritage climatique et occupation des sols : deux facteurs explicatifs

Les profils réalisés à l'ENSEGID suggèrent une influence de l'anthropisation du sol et des tendances climatiques passées sur la distribution de la température dans le sous-sol. Dans un contexte urbain, ces deux facteurs sont particulièrement importants à intégrer pour restituer la distribution des températures sur site préalable à la modélisation de l'ATES. Par ailleurs, ces phénomènes doivent être pris en compte dans les démarches de prospection à long terme visant à comprendre l'impact thermique de l'ATES dans le sous-sol.

Afin de tester l'influence de l'artificialisation progressive des sols autour de

l'ENSEGID et l'impact des tendances climatiques passées au niveau de la métropole bordelaise, la stratégie de modélisation analytique détaillée dans le chapitre 4 est appliquée sur le site de l'ENSEGID.

La méthode est décomposée comme suit :

- Reconstitution de l'historique de construction de la zone ;
- Caractérisation de l'évolution des températures atmosphériques passées sur la plus longue période possible ;
- Développement d'un modèle analytique permettant de quantifier les processus dans l'évolution thermique à long terme du sous-sol.

Historique de construction du site

L'historique des constructions sur le site étendu de l'ENSEGID a été établi à partir des photos aériennes obtenues auprès de l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) et du site Internet Géoportail (figure 6.21).

Les dates de construction précises de certains bâtiments ont été obtenues auprès des administrations de l'Université de Bordeaux et de Bordeaux INP. Au début du XXe siècle, l'occupation de la zone était constituée de champs cultivés, d'espaces boisés et herbeux. Un quartier résidentiel a vu le jour durant l'entre deux guerres au nord ouest de la zone. À partir des années 60 le secteur a subi une évolution marquée. Une clinique a été construite en 1961 et le campus de Bordeaux s'étend jusqu'à cette zone à partir de 1965. À cette époque, des premières routes bitumées, des parkings et plusieurs bâtiments sont construits. L'ancien bâtiment qui hébergeait l'ENSEGID est construit en 1969. Peu de changement impactent la zone jusqu'au début des années 2000, si ce n'est la construction de deux bâtiments au nord de l'ENSEGID dans les années 1990. Le début des années 2000 débute une seconde phase de constructions majeures autour de l'ENSEGID. Deux bâtiments sont créés au sud ouest de l'ENSEGID, dont un à proximité immédiate de l'ENSEGID qui sera récupéré et incorporé dans les nouveaux locaux lors de la reconstruction du site en 2020. L'allée boisée nord/sud entre les deux nouveaux bâtiments est remplacée pour une route bitumée. Ces nouvelles constructions s'accompagnent de parkings.

Début des années 2010, un grand bâtiment et un parking sont érigés à proximité immédiate au sud de l'ENSEGID. L'année 2020 est marquée par la destruction des anciens locaux de l'école et la construction du nouveau bâtiment sur une emprise légèrement différente de l'implantation historique. Les forages GF1 et GF2 sont aussi créés à cette date. Au nord de la zone, la clinique s'étend en construisant de nouveaux bâtiments proches de la route.

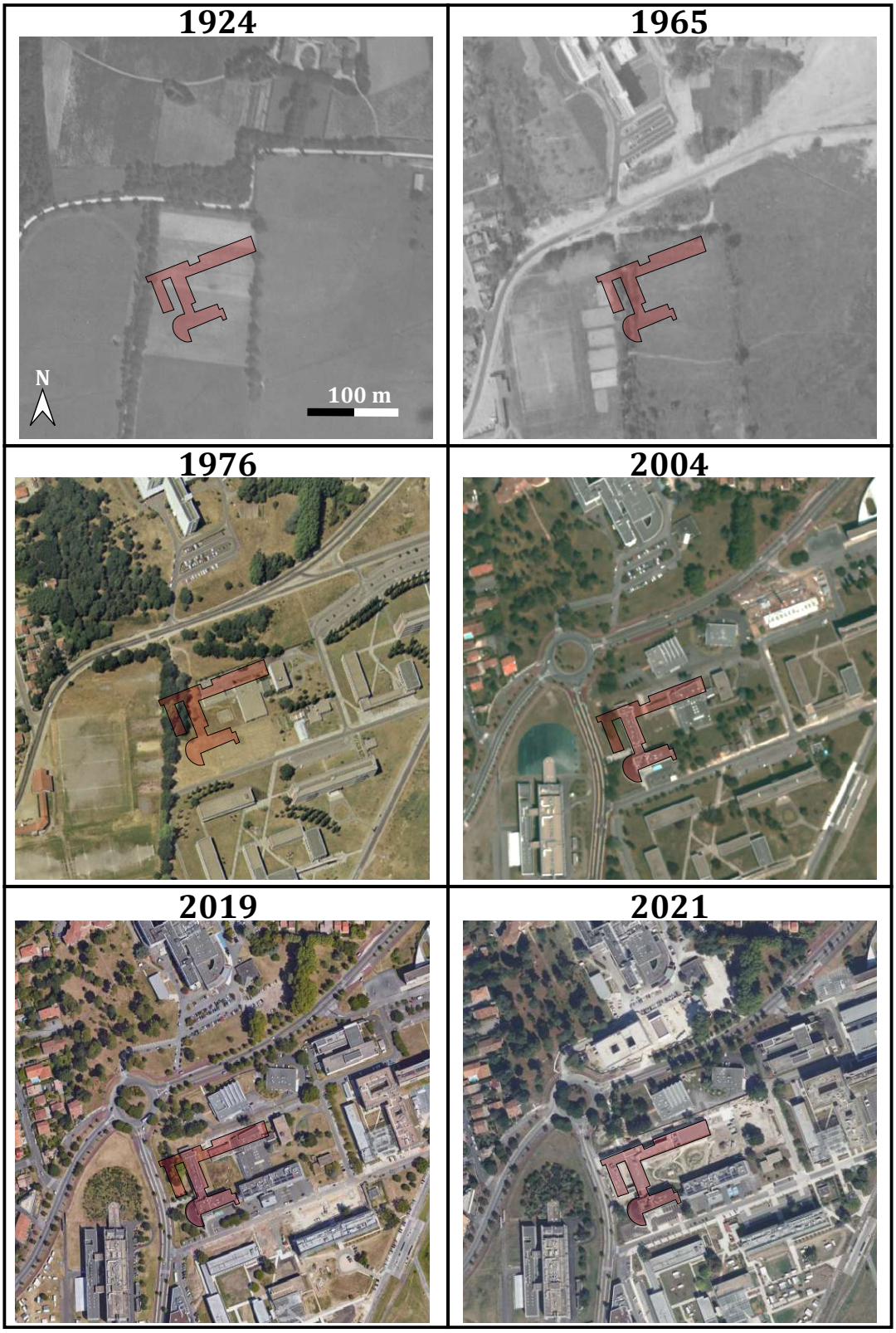


FIGURE 6.21 – Évolution du bâti sur la zone d'étude depuis 1924. Le polygone rouge représente l'emprise des nouveaux locaux ENSEGID sur la zone à partir de 2021

La tendance climatique de la métropole bordelaise

L'agglomération de Bordeaux est dotée de plusieurs stations météorologiques. Parmi ces stations, celle à proximité de l'aéroport de Mérignac possède la plus longue période d'enregistrement et permet de remonter jusqu'en 1906 (figure 6.22). Cette station météo se situe à 7.1 km au nord-est de l'ENSEGID, dans une zone industrielle. La chronique des températures moyennes annuelles met en évidence une faible diminution des températures entre 1906 et 1940, passant de 12.5 à 12.1 °C. Il s'ensuit une période de stabilisation autour d'une valeur moyenne de 12.1 °C jusqu'en 1970. Après cette date, une tendance nette à l'augmentation des températures apparaît. Les températures ne cessent d'augmenter sur la période 2010 – 2021 pour atteindre 14.0 °C en 2021, soit environ +2.0 °C en 50 ans.

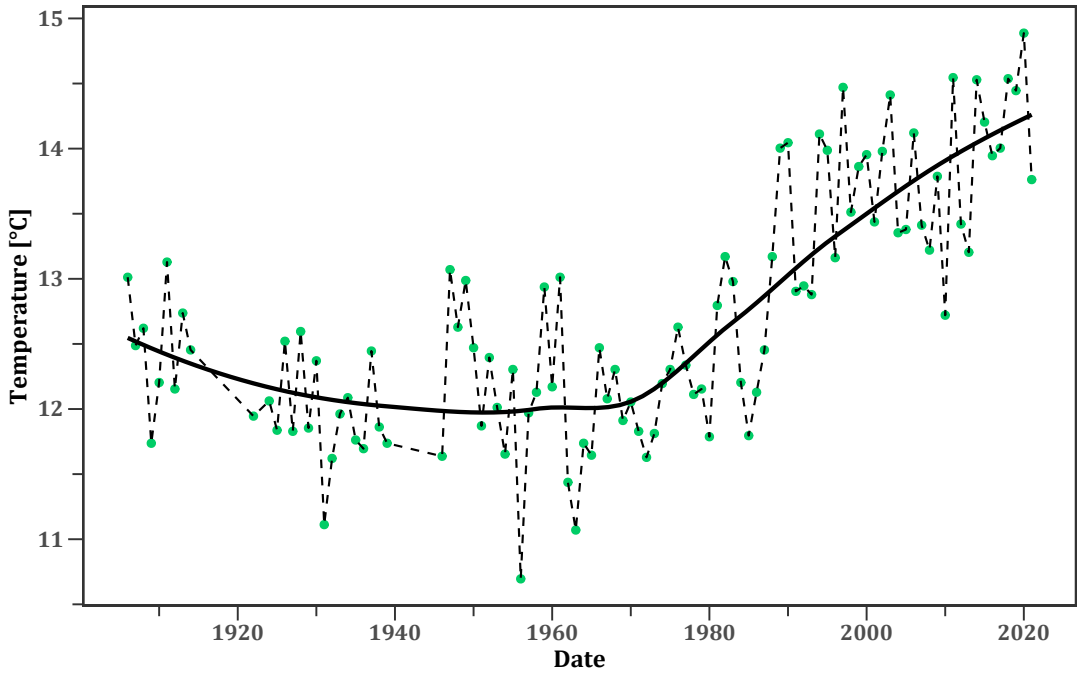


FIGURE 6.22 – Moyenne annuelle des températures atmosphériques relevées à la station météo de Mérignac (33) et courbe de tendance associée (Données Météo France)

Modèle conceptuel retenu

Le modèle analytique retenu est présenté en sous-section 4.2.3 (équation 4.10, 4.12 et 4.14). Toutes les dénominations correspondent à celles présentées dans cette partie.

Prise en compte des fluctuations climatiques passées : un polynôme d'ordre 4 est ajusté sur les températures moyennes annuelles mesurées à la sta-

tion météorologique de Mérignac depuis 1906 pour générer la fonction $\varphi_{SAT}(t)$ à intégrer dans le modèle analytique. L'hypothèse est faite que la température était stationnaire avant 1906 (Bayer et al. 2016 ; Yamano et al. 2009).

Pour estimer l'écart entre la température atmosphérique et la température du sol ($\boldsymbol{\Delta T_{S-A}}$), deux sondes ont été disposées sur le site de l'ENSEGID (figure 6.23d). La première sonde enregistre la température atmosphérique et la deuxième la température à la surface du sol. Les deux chroniques suivent les mêmes grandes tendances. Néanmoins, l'amplitude des variations journalières est bien moindre dans le sol, signe d'un effet tampon important (figure 6.23a). L'écart moyen journalier sur la période de mesure de mai à octobre met en évidence une différence $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}}$ de 1.0 °C (figure 6.23b et c). À partir d'octobre, la sonde dans le sol a dû être déplacée pour une raison logistique. Les données ne sont donc pas disponibles pour une année complète, générant une incertitude sur la valeur estimée. Des valeurs enveloppes de 0.8 et 1.2 °C sont retenues pour la modélisation.

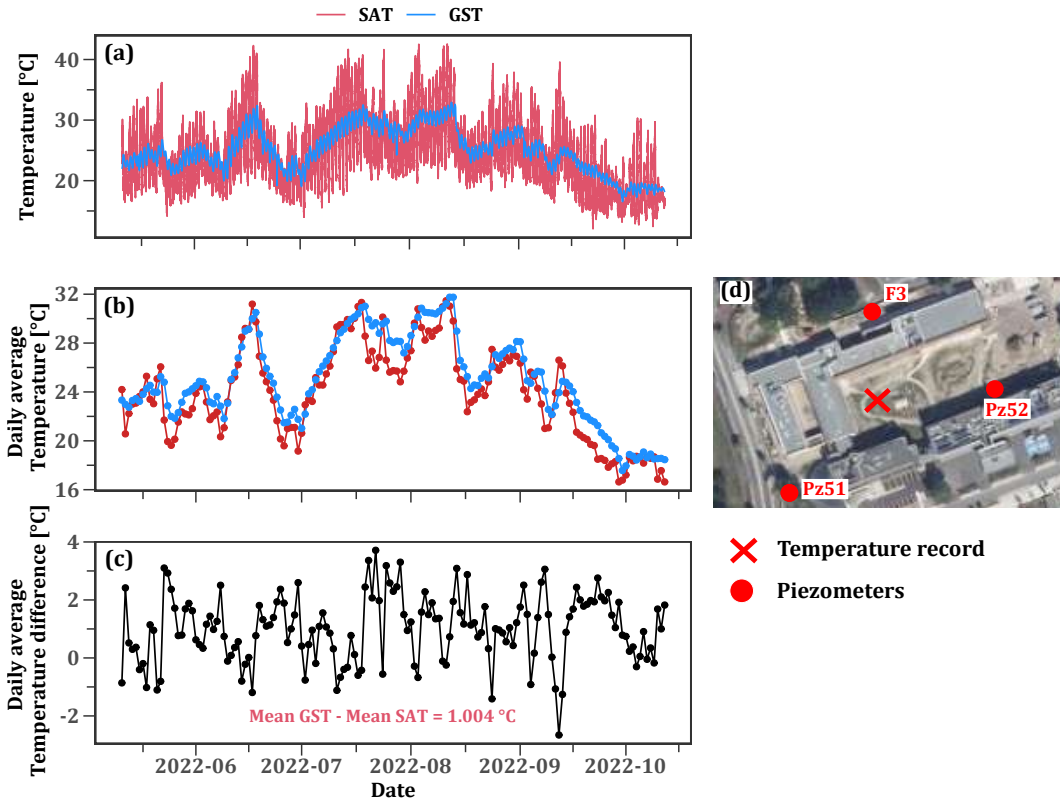


Figure 6.23 – Comparaison de la température atmosphérique (SAT) et de la température à la surface du sol (GST) sur le site de l'ENSEGID : (a) évolution en fonction du temps des températures au pas de temps 5 minutes (b) moyenne journalière des températures en fonction du temps, (c) différence entre les moyennes journalières GST et SAT et (d) localisation du point d'enregistrement des températures sur site

Schéma retenu pour la prise en compte de l'historique d'artificialisation des sols : toutes les structures (routes et bâtiments) se trouvant dans un périmètre de 500 m de long et 250 m de large autour du site ont étés retenus (figure 6.24a). En raison du sens d'écoulement de la nappe de l'ouest vers l'est, la zone a été étendue et le nombre de structures retenues augmenté à l'ouest en amont hydraulique des forages (figure 6.24b).

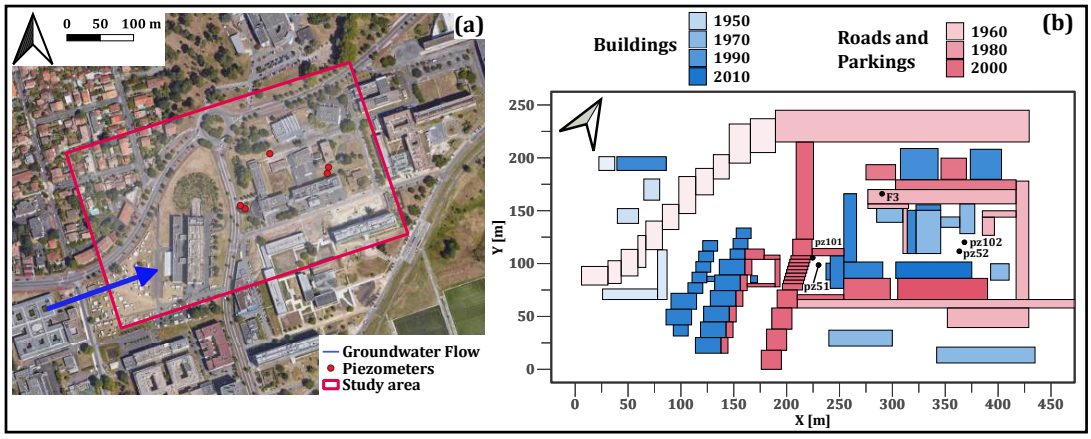


FIGURE 6.24 – Stratégie élaborée pour prendre en compte les structures anthropiques de surface : (a) Définition du système de coordonnées délimité par le rectangle rouge (le coin inférieur sud correspond à la coordonnée (0,0)) et (b) délimitation des structures prises en compte pour la modélisation selon leur année de construction

Les effets des bâtiments et des routes sur la température de surface du sol au droit des structures n'ont pas pu être analysés sur site. Par conséquent, des valeurs similaires à celles retrouvées dans la littérature ont été retenues. Une valeur $\boldsymbol{T_b} = 20.0\,°\text{C}$, comprise entre les valeurs enveloppes de 17.0 °C et 23.2 °C utilisées dans d'autres études (BAYER et al. 2016 ; MENBERG et al. 2013 ; RIVERA et al. 2015), a été retenue.

Pour l'effet des routes, une valeur moyenne $\boldsymbol{\Delta T_a} = 4.0\,°\text{C}$ relevée dans la littérature (DĚDEČEK et al. 2012) est prise en compte.

Paramètres thermiques et hydrodynamiques du site : pour établir l'état thermique actuel, en première approche, le sous-sol est considéré homogène et isotrope. La succession de formations aquifères/aquitards a été ramenée à une couche équivalente de 125 m d'épaisseur (l'influence des bâtiments et du climat sur la température du sous-sol étant perceptible jusqu'à 100 m de profondeur). La conductivité hydraulique équivalente K_{eq} a été obtenue pour un écoulement en parallèle (FETTER 2014) :

$$K_{eq} = \frac{\sum_{n=1}^{N} K_n b_n}{b} \tag{6.7}$$

Les propriétés des couches considérées sont réunies dans le tableau 6.4.

Unité	**K** ($\mathrm{m\,s^{-1}}$)	**b** (m)	Données source
Plio-Quaternaire	1.3×10^{-4}	15	Delottier 2017
Aquitard	3.5×10^{-8}	20	Essai de nappe
Aquifère	2.3×10^{-5}	30	Essai de nappe
Marnes	1.0×10^{-10}	60	Fetter 2014
Milieu équivalent ($\boldsymbol{K_{eq}}$)	$\mathbf{4.1 \times 10^{-5}}$	**125**	

Table 6.4 – Conductivté hydraulique et épaisseur des différentes formations choisies pour estimer K_{eq}

Sous les hypothèses du système homogène envisagé, la vitesse de Darcy v (ou flux spécifique), représentant le débit unitaire transitant par unité de surface d'aquifère, s'écrit pour une conductivité hydraulique équivalente K_e sous l'action d'un gradient hydraulique local i :

$$v = K_e i \tag{6.8}$$

Le gradient hydraulique local estimé d'après les rares mesures varie entre 5 et 10 ‰ pour la nappe de l'Oligocène. Pour la nappe du Plio-Quaternaire, le gradient hydraulique régional est de l'ordre de 6 ‰ (données www.sigesaqui.fr). Une valeur moyenne de gradient local $i = 8.0$ ‰ est retenue. En appliquant l'équation 6.8 pour le site de l'ENSEGID, la vitesse moyenne de Darcy v est estimée à $1.7 \times 10^{-7}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

La valeur de conductivité thermique retenue est issue de la formule de conductivité équivalente (équation 6.7), appliquée à la conductivité thermique. Les valeurs utilisées pour chaque horizon sont issues des gammes retrouvées dans la littérature (Dalla Santa et al. 2020). Les valeurs utilisées sont résumées dans le tableau 6.5. Pour le calcul de conductivité thermique et de capacité calorifique volumique prenant en compte le système matrice poreuse saturé d'eau, une porosité ω de 20 % est retenue sur le domaine.

Unité	$\boldsymbol{\lambda}$ ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$)	**b** (m)
Plio-Quaternaire	2.0	15
Aquitard	2.5	20
Aquifère	3.5	30
Marnes	2.0	60
Milieu équivalent ($\boldsymbol{\lambda_{eq}}$)	**2.5**	**125**

TABLE 6.5 – Conductivité thermique λ et épaisseur b des formations retenues pour estimer λ_{eq}

En résumé, les paramètres retenus pour l'utilisation du modèle analytique sont les suivants :

- $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}} = \in [0.8; 1.2]$
- $\boldsymbol{\Delta T_a} = 4.0\,^{\circ}\mathrm{C}$
- $\boldsymbol{T_b} = 20.0\,^{\circ}\mathrm{C}$
- $\boldsymbol{v} = 1.7 \times 10^{-7}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$
- $\boldsymbol{\lambda_{eq}} = 2.5\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
- $\boldsymbol{\lambda_w} = 0.65\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
- $\boldsymbol{c_s\rho_s} = 2.2 \times 10^6\,\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$
- $\boldsymbol{c_w\rho_w} = 4.2 \times 10^6\,\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$
- $\boldsymbol{\omega} = 0.2$
- $\boldsymbol{\Phi} = 2.45\,^{\circ}\mathrm{C}/100$ mètres

Résultat de la simulation analytique des températures du sous-sol de l'ENSEGID

Les solutions générées avec l'enveloppe $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}} \in [0.8; 1.2]$ reproduisent correctement les profils de température mesurés dans les différents piézomètres (figure 6.25).

Plus en détail, la distribution mesurée dans le piézomètre F3 est fidèlement restituée pour $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}} = 1.2\,^{\circ}\mathrm{C}$. Les distributions à pz51 et pz101 sont comprises dans les courbes enveloppes. Les températures mesurées dans pz102 et pz52 sont très légèrement supérieures à la solution analytique calculée pour $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}} = 1.2\,^{\circ}\mathrm{C}$. Ces différences sont probablement des indices de l'hétérogénéité des propriétés de la surface du sol qui n'absorbe pas les radiations solaires de la même manière.

Par ailleurs, le sous-sol est assimilé dans le modèle analytique à un milieu homogène avec des propriétés isotropes, ce qui génère des incertitudes plus élevées sur

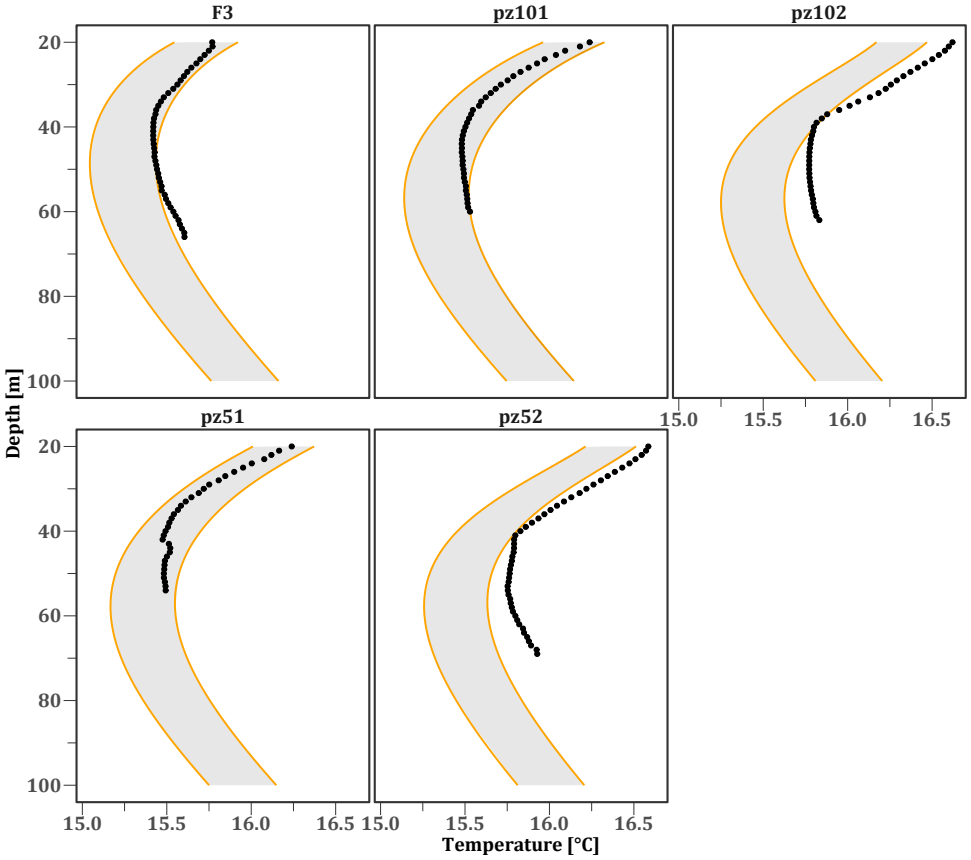


FIGURE 6.25 – Profils de température mesurés (points noirs) et simulés avec les valeurs enveloppes de 0.8 et 1.2 °C pour $\boldsymbol{\Delta T_{S-A}}$ (courbes oranges) dans les 5 piézomètres du site de l'ENSEGID

les valeurs des paramètres choisis, notamment pour v, i et λ.
Il existe par ailleurs une incertitude pour les valeurs $\boldsymbol{T_b}$ et $\boldsymbol{\Delta T_a}$ qui n'ont pas été mesurées sur site.

Pour finir, le campus de Bordeaux est alimenté par un réseau de chaleur enterré dans le sous-sol. La position des tuyaux n'a pas été récupérée auprès des services patrimoniaux et n'est donc pas prise en compte dans l'étude. Les deux piézomètres pz102 et pz52 étant relativement proches de la chaufferie du campus, il se pourrait que la température dans le sous-sol soit influencée par les conduites qui en sortent.

Globalement, la démarche appliquée ici permet de restituer des profils de températures très proches de ceux observés sur le site de l'ENSEGID. Cela traduit l'influence du réchauffement climatique ayant lieu à Bordeaux depuis les années 1970 et de l'artificialisation progressive du sol du campus.

6.4 Exploitation de l'ATES de l'ENSEGID dans un contexte de changement climatique

Les données récoltées sur le site de l'ENSEGID avant la mise en fonctionnement de l'ATES mettent en évidence les singularités hydrogéologiques et thermiques du site, à savoir :

- un aquifère calcaire peu profond (35 - 65 m) aux propriétés hydrogéologiques relativement homogènes, présentant tout de même une zone très productive localisée entre 44 et 47 m de profondeur au droit de GF1 ;
- l'existence d'un système aquifère semi-captif en relation avec une nappe libre ;
- une surface d'érosion très hétérogène au niveau du toit des formations calcaires oligocènes ;
- un sens d'écoulement souterrain localement complexe à déterminer en raison de la présence d'un dôme piézométrique à proximité immédiate de l'ENSEGID. Les dernières mesures piézométriques réalisées avant la mise en marche du système ATES mettent en évidence un sens d'écoulement quasi parallèle à la direction GF1-GF2 ; ce qui pourrait engendrer une potentielle percée thermique entre les bulles de l'ATES, pénalisant le fonctionnement du système ;
- une distribution spatiale des températures en profondeur influencée par les conditions de surface de site (température atmosphérique et anthropisation de la surface).

Une stratégie de modélisation numérique est développée afin de prendre en compte ces particularités pour évaluer la performance actuelle du système ATES et réaliser des projections en fonction de tendances climatiques hypothétiques. La simulation actuelle intègre les propriétés hydrogéologiques du sous-sol et l'historique thermique lié au réchauffement climatique passé et aux différentes étapes d'urbanisation du secteur. Enfin, deux scénarios climatiques prospectifs sont utilisés pour analyser les effets du climat dans le futur.

6.4.1 Développement du modèle numérique de l'ENSEGID

Estimation de la demande thermique de l'ENSEGID dans un contexte de changement climatique

Lors de la phase de dimensionnement de l'ATES, la demande thermique de l'ENSEGID a été calculée par un bureau d'étude. Le détail des calculs a été mis à disposition. Les hypothèses de calculs sont basées sur un fonctionnement avec une PAC ayant un COP de 5 en hiver et un recours au géocooling durant la totalité de la période nécessitant du rafraîchissement, sur les mois de juin, juillet, août et septembre. La période de chauffage correspond au reste de l'année. Il en résulte une consommation annuelle de 132 MWh de chaud et de 78 MWh de froid, qui se traduisent par des débits saisonniers moyens respectifs de 3.4 et 4.6 $m^3\,h^{-1}$ (figure 6.26).

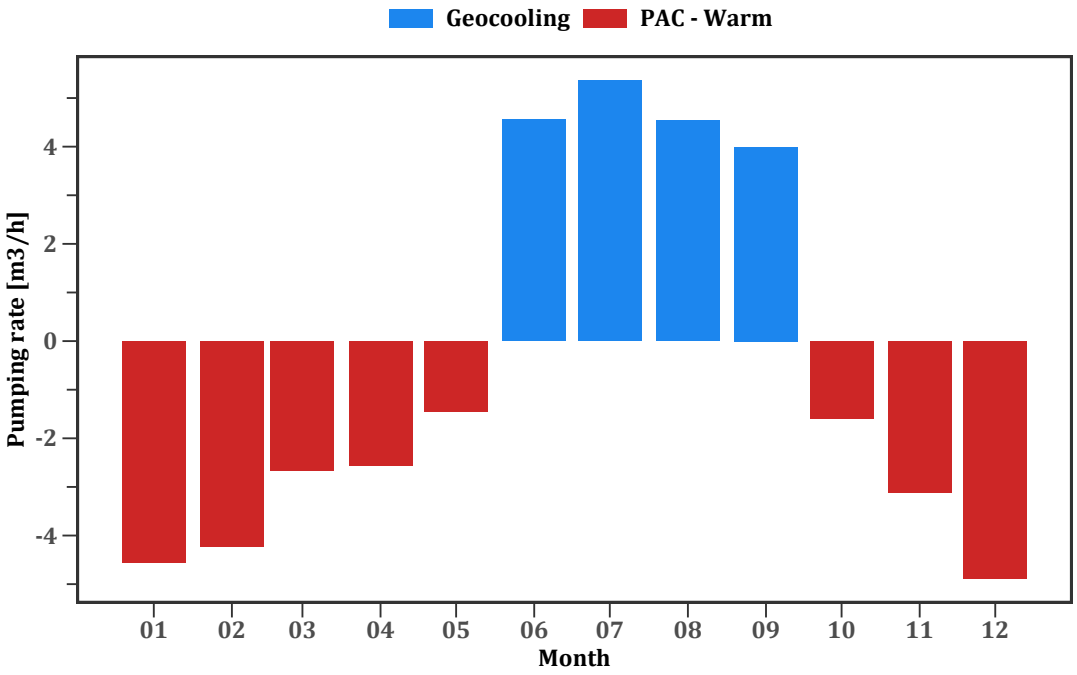


Figure 6.26 – Débits de pompage mensuels moyens estimés lors du dimensionnement de l'ATES ENSEGID (source INGEROP)

Cette demande thermique et les débits associés sont faibles par rapport à la majorité des ATES décrits dans la littérature (Bloemendal et Hartog 2018 ; Fleuchaus et al. 2019 ; Schüppler et al. 2019 ; Stemmle et al. 2021 ; Vanhoudt et al. 2011). À titre d'exemple, en prenant en compte 73 ATES néerlandais, Fleuchaus et al. 2019 estime une énergie moyenne extraite depuis

6 fois supérieure à celle de l'ENSEGID en période de rafraichissement et 4.3 fois supérieure en période de chauffage (figure 6.27). Certaines études mettent en avant que les ATES sont en capacité de satisfaire des demandes thermiques pouvant être 30 à 40 fois supérieures à celle de l'ENSEGID (Schüppler et al. 2019 ; Stemmle et al. 2021).

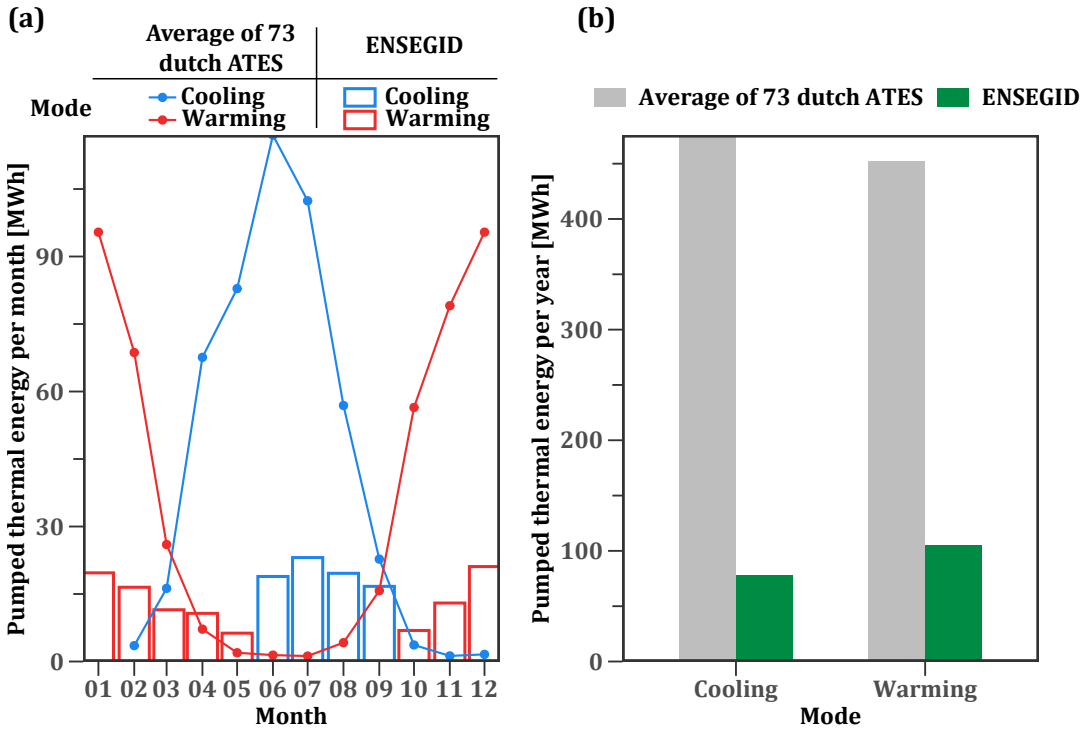


Figure 6.27 – Comparaison de l'énergie extraite de l'aquifère entre l'ATES ENSEGID et la moyenne de 73 ATES néerlandais (données Fleuchaus et al. 2019) : (a) données mensuelles et (b) données annuelles

Les débits saisonniers moyens estimés lors du dimensionnement initial ont été retenus pour la modélisation de l'ATES. Afin d'estimer l'impact du changement climatique sur la demande thermique du bâtiment, les deux scénarios climatiques présentés dans le chapitre précédent ont été retenus et projetés jusqu'en 2080 :

- scénario climatique **Stable** : les débits de pompages sont constants ;
- scénario climatique **RCP8.5** : les débits sont calculés en intégrant les températures du scénario prospectif dans le dimensionnement du bureau d'études INGEROP. Il en résulte une augmentation des volumes pompés durant la saison estivale de 15000 à 16 600 m^3, et une diminution durant la période hivernale 16000 à 11 800 m^3 (figure 6.28).

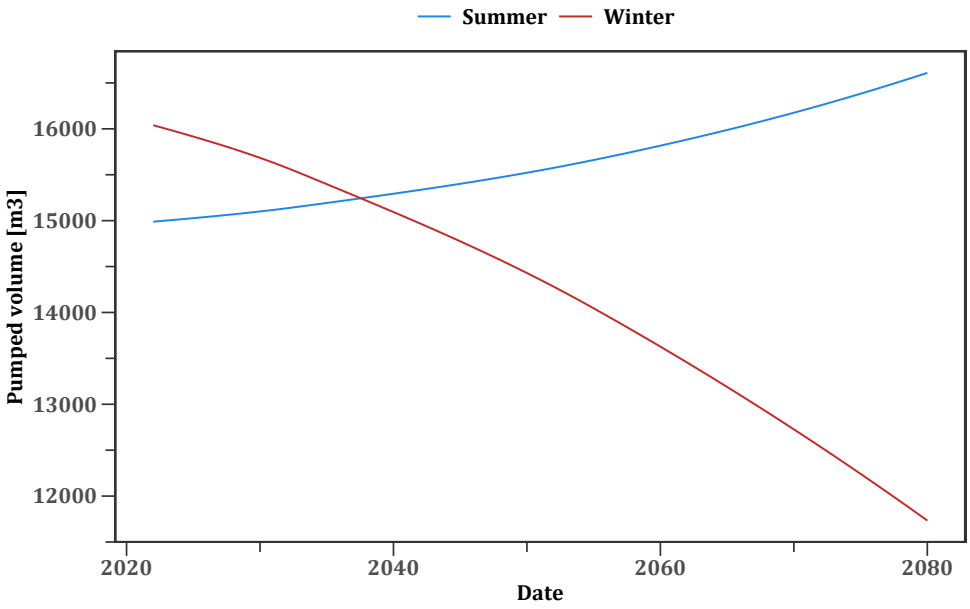


FIGURE 6.28 – Projection sur les débits pompés à l'ENSEGID pour le scénario RCP 8.5

CONSTRUCTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Le domaine retenu couvre une zone étendue centrée sur la zone de l'ENSEGID (figure 6.29a) :

- Longueur 3000 mètres ;
- Largeur 2000 mètres ;
- Profondeur 255 mètres.

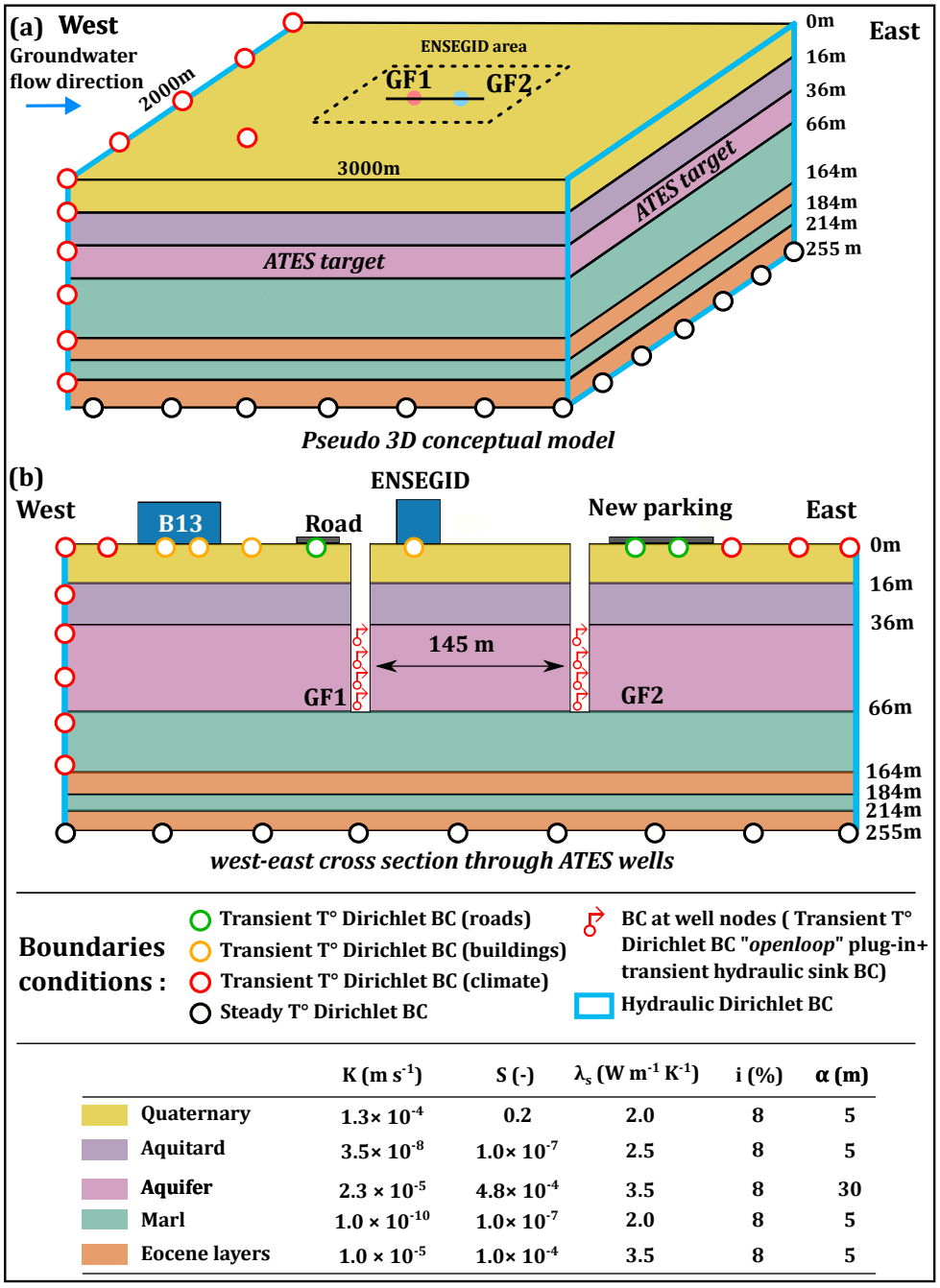
Le dimensionnement a été réalisé afin de limiter au maximum l'influence des conditions limites en bordures du modèle.

Les différentes formations géologiques identifiées sur site sont individualisées en couches tabulaires avec des paramètres homogènes représentatifs (figure 6.29). Les conditions limites hydrauliques ont été choisies pour restituer un gradient hydraulique local orienté d'ouest en de 8 ‰ :

- Limite hydraulique ouest : condition de Dirichlet $H_{ouest} = 30\,\mathrm{m}$
- Limite hydraulique est : condition de Dirichlet : $H_{est} = 6\,\mathrm{m}$

Les conditions limites thermiques sont les suivantes :

- couche supérieure du modèle : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température associée à l'occupation des sols ;
- Face amont : condition de Dirichlet transitoire afin de restituer la température modifiée par les variations climatiques ;
- Face inférieure du modèle : condition de Dirichlet fixe afin de restituer un gradient géothermique $0.0245\,^{\circ}\mathrm{C\,m^{-1}}$.



	K (m s^{-1})	S (-)	λ_s (W m^{-1} K^{-1})	i (%)	α (m)
Quaternary	1.3×10^{-4}	0.2	2.0	8	5
Aquitard	3.5×10^{-8}	1.0×10^{-7}	2.5	8	5
Aquifer	2.3×10^{-5}	4.8×10^{-4}	3.5	8	30
Marl	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-7}	2.0	8	5
Eocene layers	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	3.5	8	5

FIGURE 6.29 – Modèle conceptuel retenu pour la modélisation numérique de l'ATES ENSEGID : (a) vue pseudo-3D et (b) vue latérale passant par les puits de l'ATES

Les deux puits GF1 et GF2 de l'ATES sont simulés par deux types de condition limite :

- Une condition limite hydraulique de type Neuman (condition de flux) pour simuler les débits d'exploitation ;
- Une condition limite thermique de type Dirichlet pour maintenir un écart de température constant entre le forage de production et celui de réinjec-

tion. Le plug-in "*OpenLoop*" (Feflow) est utilisé pour maintenir cet écart constant à 5.0 °C.

L'analyse des nouvelles données disponibles sur le site de l'ENSEGID (flowmètre et fibre optique) mettent en avant la présence potentielle d'une zone très productrice de faible épaisseur entre 44 et 47 m de profondeur au droit de GF1. Par ailleurs, les coupes lithologiques établies mettent en évidence une forte discontinuité du toit de la formation calcaire aquitard. Ces singularités ne sont pas intégrées dans ce travail de modélisation prospective, notamment pour une raison d'échelle de discrétisation spatiale.

Le maillage utilisé dans Feflow est un bloc 3D composé de 79 couches. Le maillage final comprend 1 7394 801 nœuds (figure 6.30a). La discrétisation du maillage est augmentée à proximité des forages et des structures en surface (figure 6.30b).

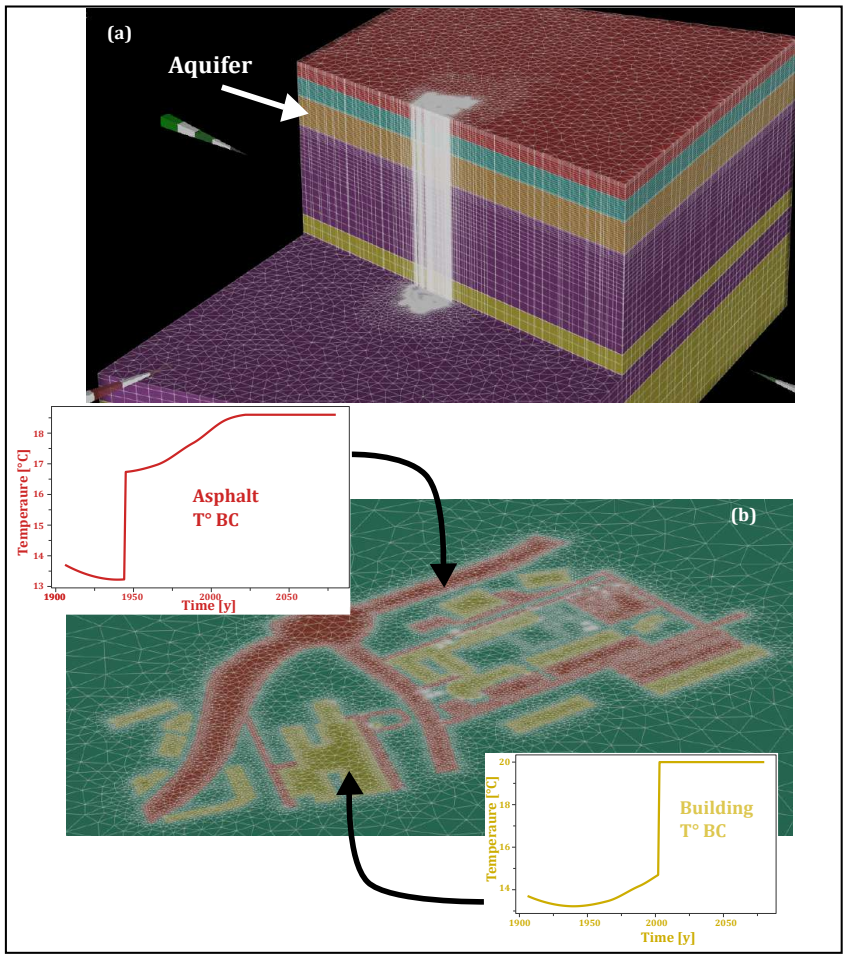


FIGURE 6.30 – Détail du modèle réalisé dans Feflow : (a) maillage 3D montrant l'épaisseur des différentes couches et (b) zoom sur le maillage 2D en surface montrant le schéma de discrétisation autour des différentes structures. Des exemples de conditions limites de température appliquées aux différentes structures sont présentés.

6.4.2 Analyse actuelle et prospective de l'ATES de l'ENSEGID

Restitution de l'état thermique initial avant le démarrage de l'ATES

Avant la mise en marche de l'ATES, le modèle numérique permet de restituer des distributions de températures proches de celles mesurées sur site à chaque piézomètre. L'écart maximum observé est de 0.4 °C au niveau du pz52 (figure 6.31).

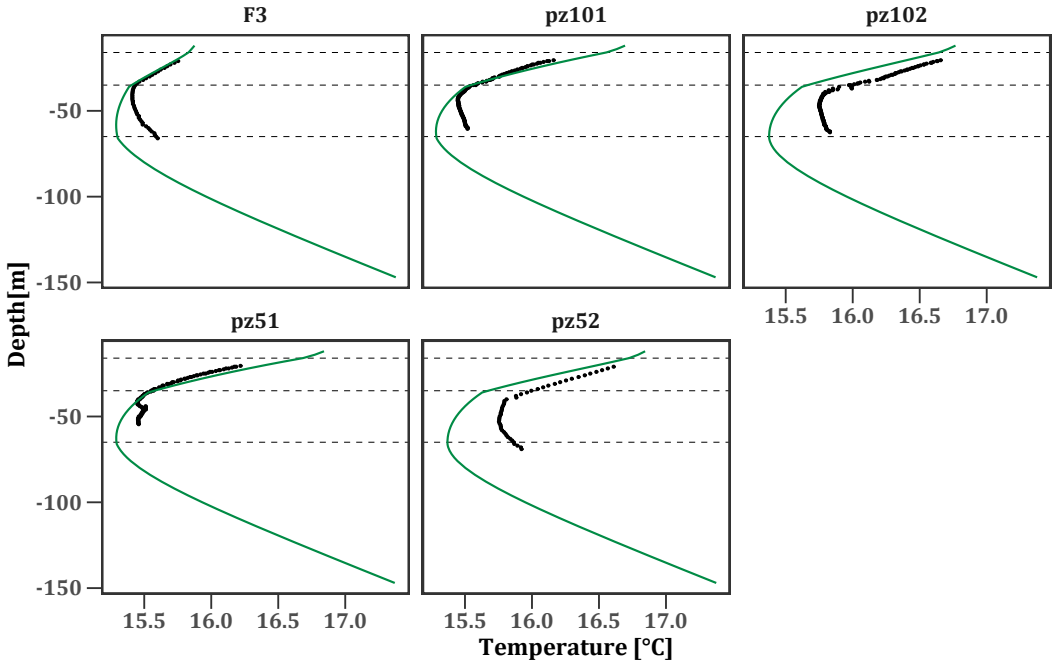


FIGURE 6.31 – Distribution de la température au droit de chaque piézomètre avant le lancement de l'ATES (températures calculées : traits verts, relevés de terrain en 2021 : points noirs). Les lignes pointillées représentent les limites des formations géologiques

La forme en "C" caractéristique des profils est reproduite et le modèle permet de restituer la décroissance des températures entre 15 et 35 m au droit de chaque piézomètre (la décroissance plus "lente" de cette température est bien reproduite à F3). Toutefois, à chaque piézomètre, les températures modélisées dans l'aquifère sont inférieures à celles mesurées sur le terrain.

L'impact de la couche de marnes de grande épaisseur (150m) sous les calcaires pourrait avoir une influence importante. En effet, la conductivité thermique de cette couche va jouer un rôle sur la conduction de la chaleur venant de la base du modèle, ce qui pourrait influencer la distribution de la température dans les horizons supérieurs. En l'état actuel, le modèle numérique présenté est satisfaisant

puisqu'il permet de restituer les phénomènes observés sur le site de l'ENSEGID avec un degré de précision suffisant.

Impact de l'exploitation de l'ATES sur la dynamique thermique du site

L'utilisation de l'ATES démarre en 2022. L'exploitation est réalisée à écart de température constant de 5.0 °C entre puits chaud (GF1) et froid (GF2). Les fluctuations de température à chaque puits sont dues à l'alternance des cycles de pompage/injection d'une saison à l'autre.
Dans les deux scénarios climatiques testés, la température moyenne en face des crépines des forages décroit durant les trois premières années de fonctionnement, puis présente un régime pseudo-permanent. C'est la mise en place du régime thermique perturbé dans l'aquifère.

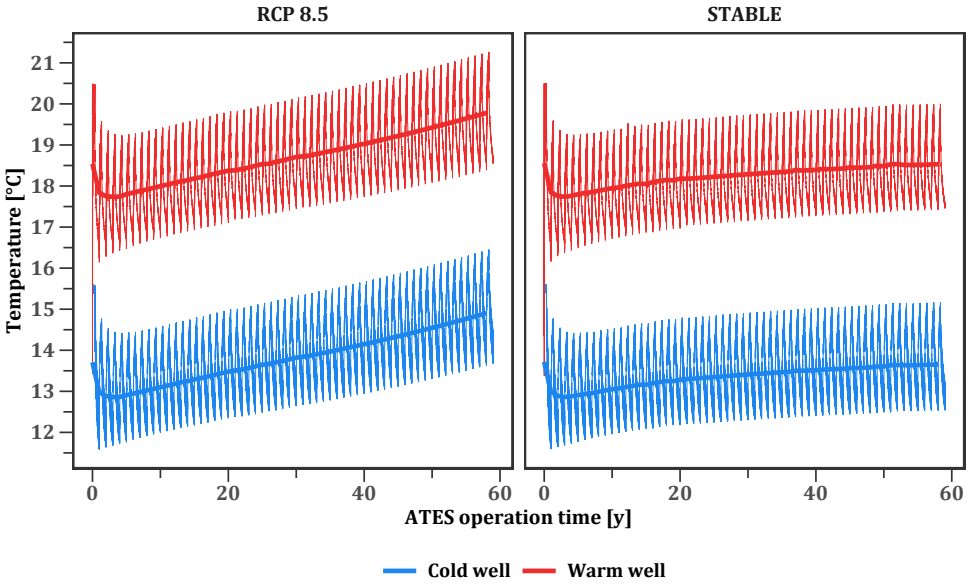


Figure 6.32 – Évolution de la température moyenne en face des crépines des forages dans les deux scénarios **Stable** et **RCP 8.5** simulés

Après cette phase de mise à l'équilibre, le scénario **Stable** présente des températures moyennes qui augmentent légèrement ($<$ 0.2 °C sur 60 ans) au droit des deux forages. Cette augmentation sous un climat stationnaire est en partie due aux transferts thermiques venant des structures en surface.
Pour le scénario **RCP8.5**, la température augmente linéairement au droit des deux forages. Elle passe de 13.0 °C à 14.0 °C au puits froid, et de 18.0 °C à 19.0 °C au puits chaud.

Malgré les faibles volumes pompés et injectés, le stockage thermique opère dans l'aquifère pour les deux scénarios. Ce stockage est assez équilibré durant les 15 premiers cycles (figure 6.33 et 6.35). L'évolution du stockage dépend ensuite des scénarios. Dans les deux cas, la vitesse d'écoulement importante dans l'aquifère Plio-Quaternaire lessive les apports thermiques venant de la surface en direction de l'est.

Pour le scénario **Stable**, les apports thermiques venant de la subsurface sont relativement faibles en raison de la stabilité du climat sur la période modélisée (figure 6.33). Le faible flux entrant, majoritairement imputable aux bâtiments et à l'asphalte, a un impact limité sur l'extension des bulles, et reste limité aux horizons les moins profonds.

Toutefois, le volume de la bulle froide en fin de période d'injection diminue au fur et à mesure du temps, alors que le volume de la bulle chaude suit le comportement inverse. Ce phénomène s'explique par le sens d'écoulement de la nappe. En effet, sur la carte des différences de température par rapport à l'état thermique avant exploitation (figure 6.34), les isolignes $\pm 2.0\,°C$ illustrent le déséquilibre qui s'opère en fonction du temps. L'écoulement de la nappe lessive la bulle chaude en direction de la bulle froide. La bulle froide est aussi lessivée en direction de l'est. Ce phénomène semble être le principal facteur expliquant la diminution du stockage de froid au cours du temps. Si ce stockage diminue, des réserves de froid sont toujours disponibles, même après 56 ans d'exploitation. Le stockage de chaud est quant à lui plus favorisé durant l'exploitation, malgré sa dissipation advective.

Pour le scénario **RCP8.5**, l'effet du réchauffement climatique amplifie les phénomènes décrits dans le scénario **Stable**. Le réchauffement de la subsurface est accentué par l'augmentation des températures atmosphériques et son impact se propage plus en profondeur (figure 6.35). L'îlot de chaleur généré se mélange avec la bulle chaude au fur et à mesure de l'extension de celle-ci et réduit le développement de la bulle froide. Les étés plus sévères favorisent l'exploitation d'eau froide et donc du stockage de chaud. Le déséquilibre thermique créé est plus prononcé dans la nappe que pour le scénario **Stable**.
Pour le scénario **RCP8.5**, les cartes d'écart thermique par rapport à l'état initial mettent en avant la diminution du stockage de froid (figure 6.36). Cela se traduit par la disparition totale au cycle 56 de l'isoligne $-2.0\,°C$. À la fin d'une période de pompage d'eau froide, les réserves sont totalement diluées, entraînant le pompage de l'eau à la température ambiante de la nappe.

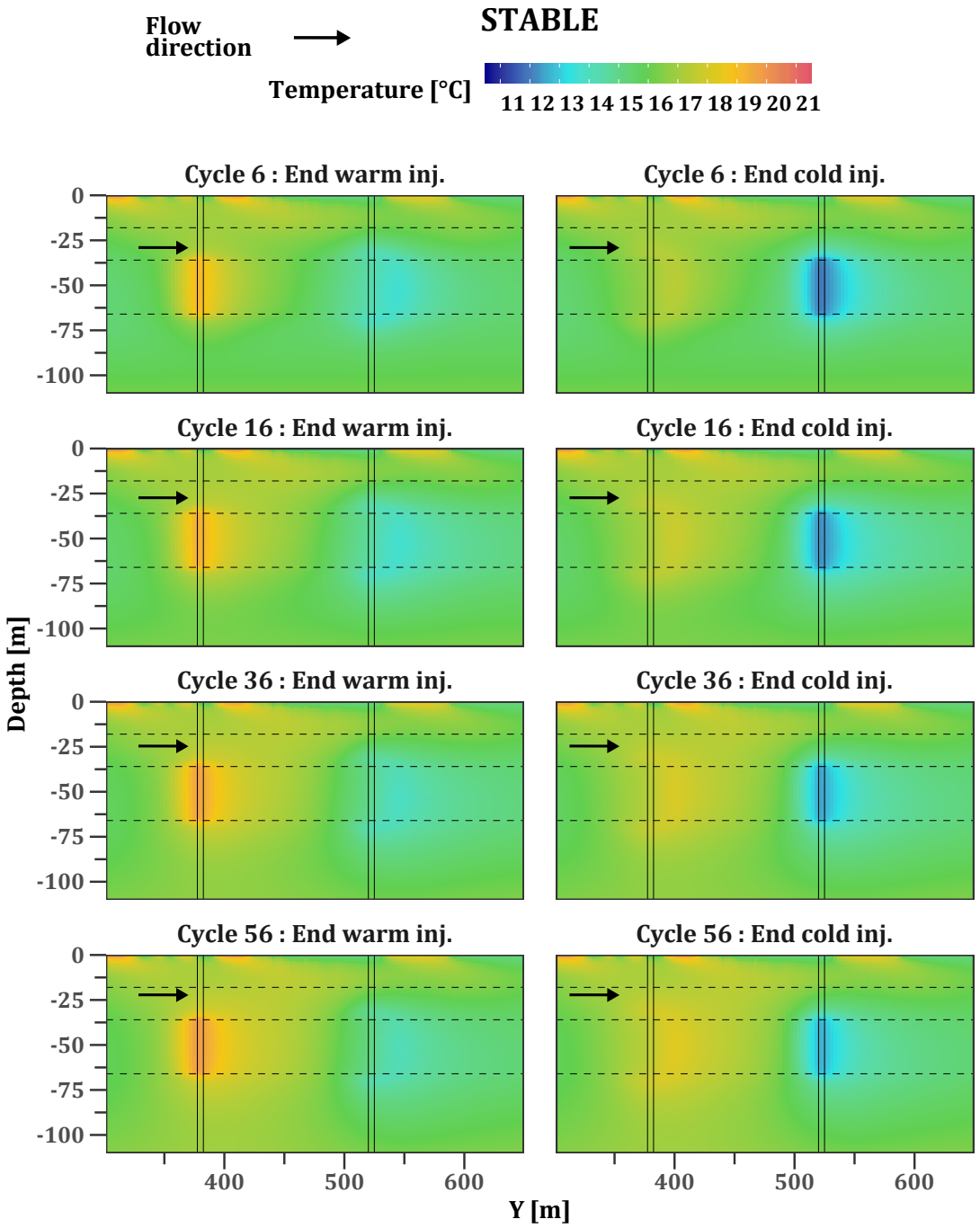


FIGURE 6.33 – Évolution de la température dans le sous-sol : scénario **STABLE**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques.

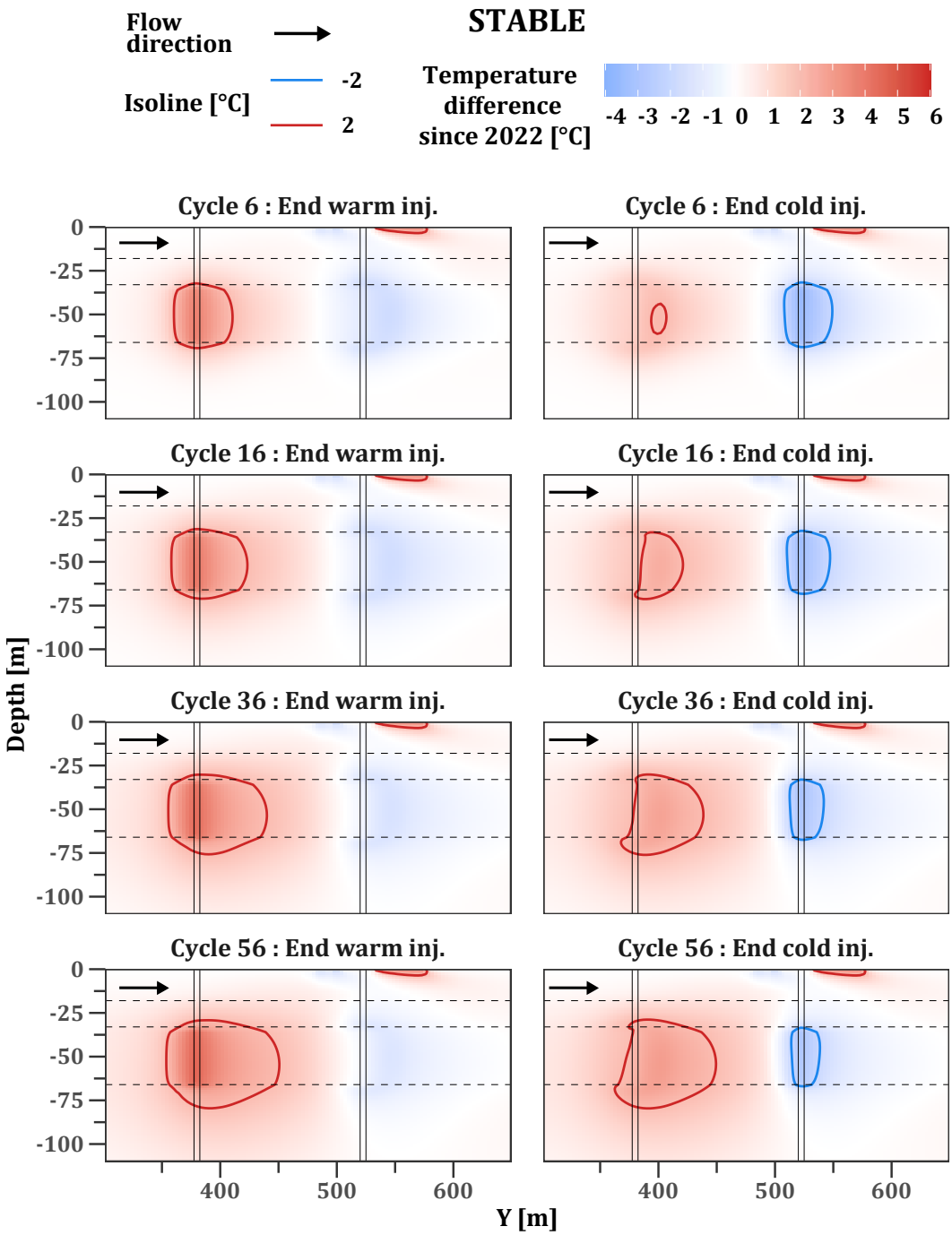


FIGURE 6.34 – Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **STABLE**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques.

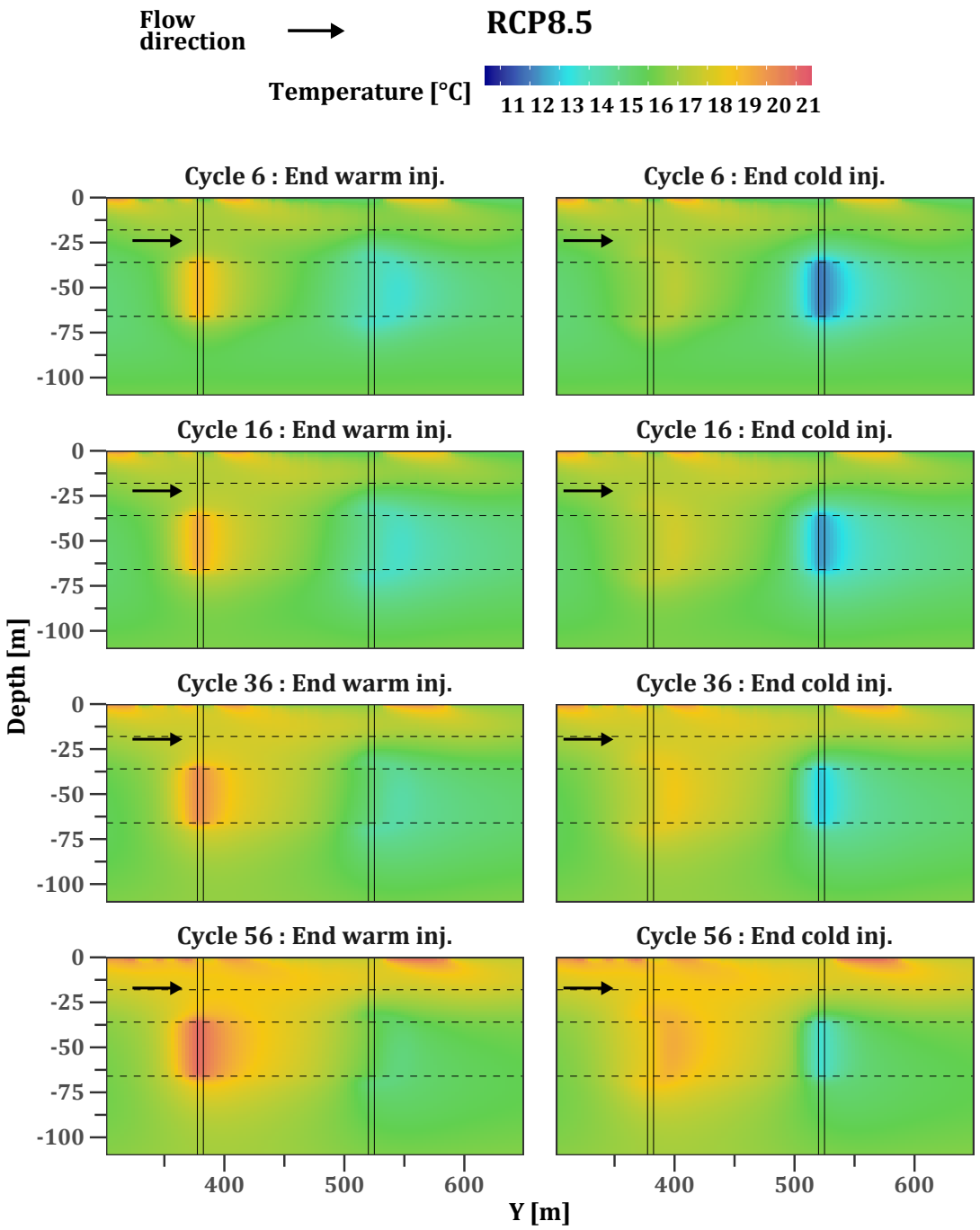


FIGURE 6.35 – Évolution de la température dans le sous-sol : scénario **RCP8.5**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques.

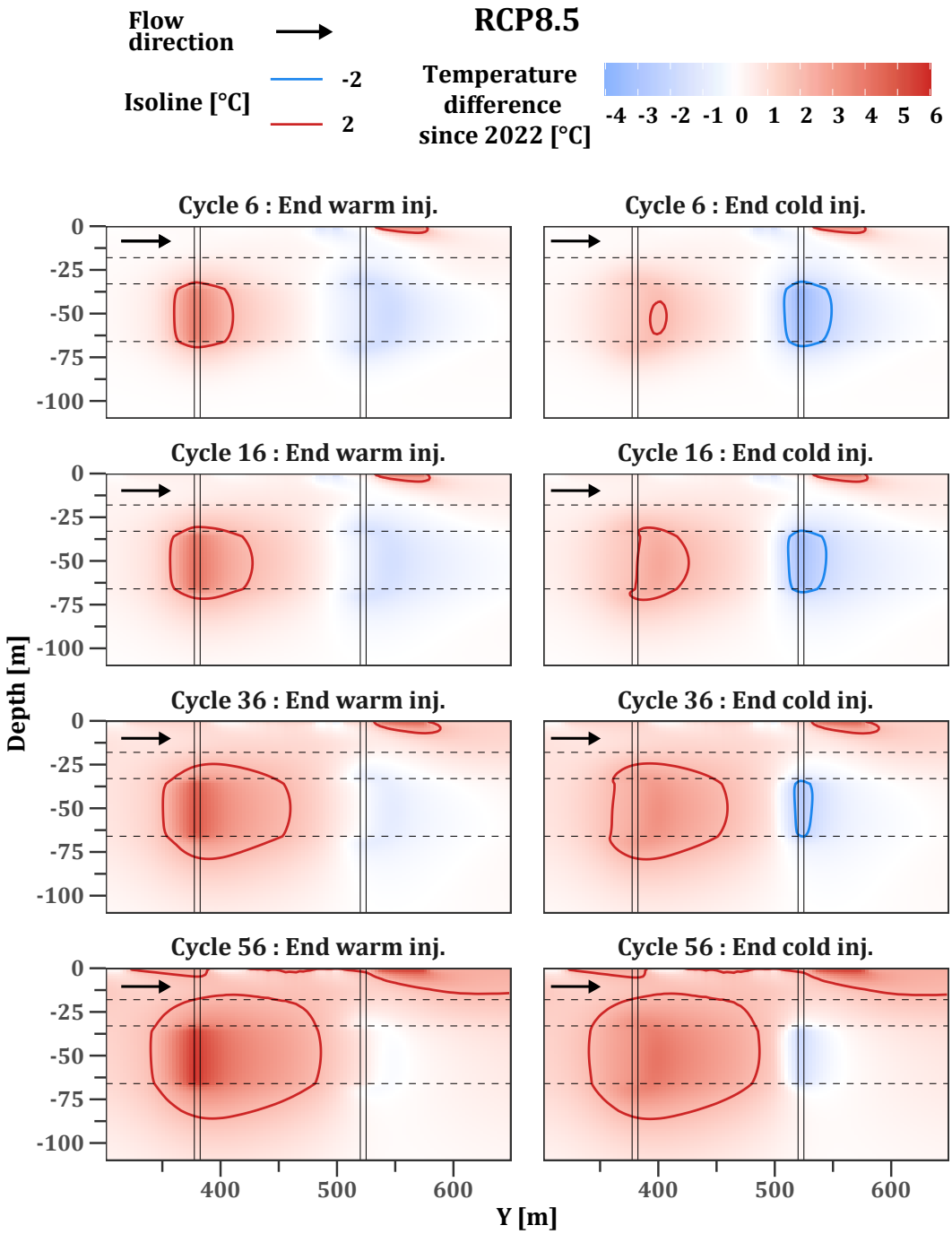


FIGURE 6.36 – Écart thermique entre les situations de pré-exploitation et exploitation : scénario **RCP8.5**. Les traits pleins verticaux représentent la position des forages, et les traits horizontaux pointillés les limites des formations géologiques.

Implication sur la performance du système

Afin d'analyser l'impact de chaque scénario sur la performance des forages du système ATES, l'indicateur η_e est utilisé. Cet indicateur est le produit du ratio volumique R_v et du ratio de température R_T (détaillés sous-section 5.4.2).

Dans le scénario **Stable**, le ratio de température est stable à partir de 10 ans d'exploitation au puits chaud à une valeur de 0.72 (figure 6.37a). En revanche, la valeur au puits froid diminue à partir de 10 ans, passant de 0.55 à 0.49. Cette diminution peut s'expliquer par le lessivage partiel de la bulle chaude en direction de la bulle froide. Les ratios volumiques sont quant à eux stables (figure 6.37b). Cela se traduit par une performance qui se stabilise au puits chaud à une valeur de 0.80 (figure 6.37c). C'est une valeur représentative d'une exploitation pérenne pour le puits chaud. En revanche, même si la performance du forage froid ne chute que légèrement en fonction du temps, le sens d'écoulement de la nappe ne permet pas de dépasser une valeur de 0.5. C'est une valeur qui se situe dans la fourchette basse des données de la littérature (Bloemendal et Hartog 2018 ; Fleuchaus et al. 2019). Cette valeur est symptomatique d'un fonctionnement non optimal du dispositif.

Dans le scénario **RCP8.5**, l'effet du climat engendre une chute du ratio de température au puits froid et une augmentation limitée au puits chaud (figure 6.37a). L'évolution de la demande thermique du bâtiment génère des évolutions temporelles divergentes pour les ratios volumiques (figure 6.37b). Le ratio monte à 1.4 pour le puits froid (40 % d'eau pompée en plus par rapport au volume qui est injecté) et diminue à 0.7 pour le puits chaud. La chute du ratio volumique au puits chaud entraîne une diminution de la performance, qui passe sous 0.6 à partir de 45 ans d'exploitation (figure 6.37c). Malgré l'accroissement des volumes stockés, le forage est exploité de manière non optimale où beaucoup plus d'eau est injectée que pompée. Pour le puits froid, l'augmentation du ratio volumique qui traduit une surexploitation du forage ne suffit pas à compenser la diminution du ratio de température. Après 10 ans, la performance est en décroissance constante. Cette décroissance s'accélère après 40 ans d'exploitation pour finir en dessous de 0.4.

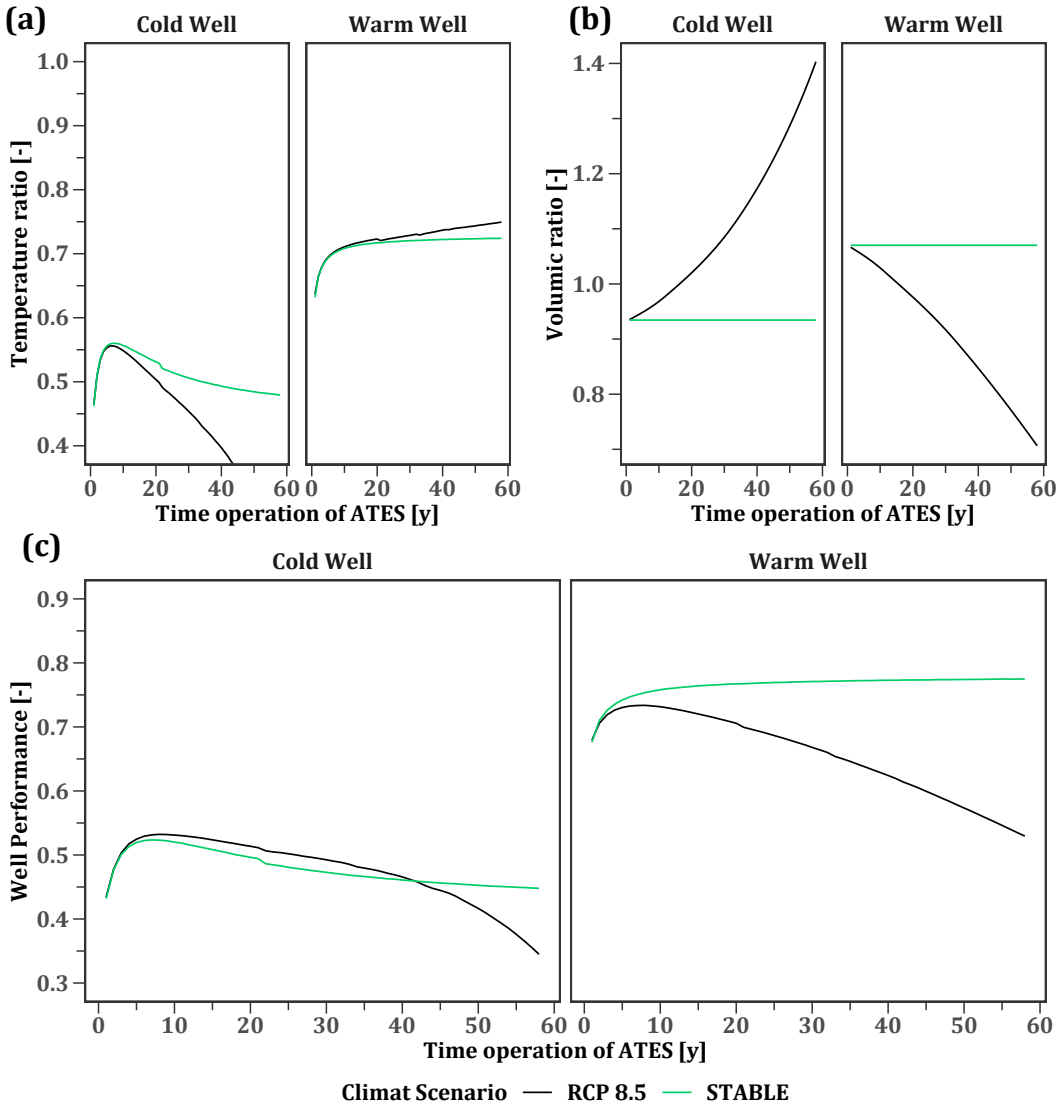


FIGURE 6.37 – Estimation de la performance aux puits froid et chaud pour le scénario **STABLE** et **RCP8.5** : (a) évolution du ratio de température, (b) évolution du ratio volumique et (c) évolution de la performance globale

6.5 Premier bilan prospectif de l'exploitation de l'ATES ENSEGID

L'analyse combinée des données existantes et des données récoltées durant la phase de chantier de l'ATES de l'ENSEGID a permis d'apporter des précisions sur les fonctionnements hydrogéologiques et thermiques du site. L'aquifère oligocène cible de l'ATES et l'unité calcairo-argileuse le surmontant forment un système drainant. La conductivité hydraulique moyenne de l'aquifère est estimée à $2.3 \times 10^{-5}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. L'implantation des forages de l'ATES ne semble pas suivre les

règles de l'art qui stipulent que l'axe entre les deux ouvrages doit être perpendiculaire au sens d'écoulement local de la nappe. En effet, pour des problématiques liées au foncier, les forages sont implantés selon un axe quasi-parallèle à l'écoulement.

Les profils de température mesurés dans les piézomètres du site avant le lancement de l'ATES mettent en évidence une forme caractéristique en "C" synonyme de l'influence des phénomènes de surface sur la dynamique thermique du site. Le rôle de l'occupation des sols depuis la création du campus au milieu des années 1960 et de l'évolution des conditions atmosphériques depuis les années 1970 a pu être mis en évidence à l'aide d'un modèle analytique.

Afin d'étudier l'impact thermique du fonctionnement de l'ATES dans le sous-sol de l'ENSEGID et la performance des deux puits, un modèle numérique haute résolution a été développé. Ce modèle prend en compte de manière simplifiée la géométrie des corps sédimentaires identifiés sur site ainsi que leurs propriétés hydrogéologiques et thermiques. En intégrant l'artificialisation progressive du sol sur site et la dynamique thermique de la région bordelaise, le modèle permet de restituer l'état thermique du sous-sol observé sur site avant le lancement de l'ATES.

Sous l'hypothèse d'un scénario climatique **Stable**, les apports thermiques générés par l'artificialisation des sols ne semblent pas avoir d'impact majeur sur le fonctionnement de l'ATES. La vitesse d'écoulement importante dans la nappe libre du Plio-Quaternaire lessive rapidement ses apports et les cantonne à la très proche surface. Toutefois, cette nappe a été modélisée comme un bloc homogène, or les données de terrain montre que cette unité présente de nombreux changements latéraux de faciès entre des sables et des argiles. Il pourrait être intéressant d'étudier l'influence de ces hétérogénéités sur l'extension de l'îlot de chaleur. Néanmoins, dans ce scénario **Stable**, le développement de la bulle froide est pénalisé par le sens d'écoulement de l'aquifère qui lessive la bulle chaude en direction de la bulle froide. Dans ce contexte, la performance du puits chaud est proche des 0.8, signe de la pérennité de la bulle thermique autour du puits. En revanche, la performance au puits froid se trouve en dessous de 0.5.

Le fonctionnement de l'ATES est plus impacté par les phénomènes de surface dans le contexte d'un réchauffement climatique suivant le scénario **RCP8.5**. On observe la même tendance que pour le scénario **Stable** dans lequel la bulle chaude est lessivée en direction du forage froid. Dans le scénario **RCP8.5**, l'augmentation des températures atmosphériques en surface se répercute en profondeur et impacte directement la dynamique thermique des bulles de l'ATES. L'ex-

tension de la bulle chaude est favorisée par ce phénomène alors que celle de la bulle froide est pénalisée.

Par ailleurs, le réchauffement climatique induit des modifications de la demande thermique du bâtiment. Ces modifications engendrent un déséquilibre de la demande thermique du bâtiment. Le forage froid se retrouve surexploité (plus d'eau pompée qu'injectée) et le forage chaud sous-exploité. Il en résulte une diminution constante de la performance des deux puits au cours du temps.
Toutefois, dans ce scénario "pessimiste", la performance des ouvrages ne chute pas autant que les performances estimées dans le chapitre théorique.

Le modèle numérique développé sur le site de l'ENSEGID se base uniquement sur les observations pré-lancement de l'ATES. La volonté de l'ENSEGID de promouvoir les ATES à l'échelle nationale a permis de mettre en place un important réseau de mesure sur le site. Ainsi, les deux forages GF1 et GF2 sont équipés de capteur de température, de pression et de débits permettant de suivre le fonctionnement du système en temps réel. En parallèle, suite au lancement de l'ATES les piézomètres à proximité des ouvrages (pz51, pz101, pz52 et pz102) sont chacun équipés de plusieurs capteurs de température afin de suivre l'extension des bulles thermiques au cours du temps. Les forages F2, F3 et F4, plus éloignés des ouvrages de production, sont équipés d'un seul capteur. Les données issues de ce réseau de mesure, intégrées au modèle, ne pourront qu'améliorer la compréhension des phénomènes qui régissent la dynamique thermique durant l'exploitation de l'ATES à l'échelle du site.

CHAPITRE 7

Estimation des impacts environnementaux de l'ATES de l'ENSEGID par l'Analyse du Cycle de Vie

Dans l'objectif de promouvoir la technologie ATES en France et dans le monde, il existe un réel enjeu autour de l'analyse et de la compréhension des impacts environnementaux engendrés par de tels systèmes. Il n'existe que très peu d'études dans la littérature détaillant avec précision la totalité des impacts environnementaux d'un ATES, prenant en compte notamment la phase de chantier pour réaliser les forages et les raccorder aux bâtiments.

Ce chapitre présente l'utilisation de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie, appliquée au contexte de l'ATES de l'ENSEGID. Ce type d'étude permet d'estimer les impacts environnementaux totaux (réchauffement climatique, santé humaine, exploitation des ressources, etc) d'un système, de son "berceau à sa tombe", selon l'expression consacrée. Ce travail va permettre dans un premier temps d'analyser si les objectifs de réduction d'émission de GES fixés pour l'ENSEGID sont atteints. Différents scénarios, issus de la littérature ou élaborés dans ce chapitre, sont ensuite comparés avec la solution retenue afin d'évaluer la pertinence de l'installation de ce type de système.

7.1 Généralités et principes de l'Analyse du cycle de vie

L'ACV permet de quantifier/modéliser l'impact environnemental "du berceau à la tombe" des produits, services et systèmes de production utilisés par un système donné. Selon les normes ISO 14040 et ISO 14044 en vigueur, (Finnveden et al. 2009) l'ACV se décompose en quatre étapes :

- Définition des objectifs et du champ/frontières de l'étude ;
- Inventaire du Cycle de Vie (ICV) qui consiste à lister et à analyser tous les processus impliqués dans l'étude ;
- Évaluation/modélisation des impacts environnementaux inhérents aux processus ;
- Interprétation des résultats.

Les méthodes de calcul permettent d'observer/analyser les impacts environnementaux selon plusieurs catégories. Ces catégories sont fonction des objectifs recherchés et de l'échelle pris en compte. Les impacts sont observés selon deux catégories principales :

- Les *Midpoints* qui quantifient les effets globaux des substances consommées ou émises lors d'un processus. Les effets similaires sont regroupés dans des catégories d'impacts intermédiaires, par exemple la toxicité marine, l'eutrophisation terrestre, la déplétion des ressources fossiles, etc ...

- Les *Endpoints* ou "dommages" qui regroupent les effets de plusieurs *Midpoints* en une ou plusieurs catégories finales (la santé humaine, la qualité des écosystèmes, l'impact sur les ressources).

Dans la littérature recensée, peu d'ACV ont été réalisées sur des systèmes ATES (Moulopoulos 2014 ; Ni et al. 2020 ; Stemmle et al. 2021 ; Tomasetta et al. 2015). L'ACV effectuée par Tomasetta et al. 2015 n'étudie que l'aspect chauffage du système. L'ATES étudié par Ni et al. 2020 est couplé à un dispositif de remédiation biologique des sols. Les deux ACV se rapprochant du contexte de l'ENSEGID, à savoir fourniture d'un bâtiment en chauffage et en rafraîchissement, utilisent les méthodes de calcul d'impact environnemental ***ReCiPe*** (Moulopoulos 2014), et ***Impact2002+*** (Stemmle et al. 2021).

L'ACV de l'ATES de l'ENSEGID se base sur la méthode de calcul ***Impact 2002+*** (v2.1) développée par Jolliet et al. 2003 (figure 7.1).

Cette méthode permet à la fois d'estimer les impacts au niveau des *Midpoints* et des *Endpoints*. Pour la suite de ce travail, seuls les *Endpoints* seront analysés.

Impact 2002+ regroupe les impacts selon 4 *Endpoints*. La particularité de la méthode est d'individualiser le réchauffement climatique au niveau des *Endpoints* et de ne pas l'intégrer dans les impacts sur la qualité des écosystèmes et sur la santé humaine. C'est un aspect intéressant pour modéliser les impacts de l'ATES de l'ENSEGID où l'enjeu majeur de l'installation du système était de réduire les émissions de GES du nouveau bâtiment par rapport à une solution standard de chauffage au gaz. Les 4 catégories *Endpoints* analysées grâce à la méthode ***Impact2002+*** *sont* :

- **les impacts sur la santé humaine**, exprimés en DALY (*Disability Adjusted Life Years*). Cette unité prend en compte à la fois la mortalité (temps de vie perdue en raison d'une mort prématurée) et la morbidité (temps de vie de moindre qualité en raison des maladies). Ce *Endpoint* regroupe plusieurs *Midpoints* : effets cancérigènes et/ou non-cancérigènes, effets respiratoires, radiations ionisantes et destruction de la couche d'ozone stratosphérique. Par exemple, un DALY de 2 représente une diminution de l'espérance de vie de 2 ans appliquée à toute la population européenne (cela ne signifie pas une diminution de l'espérance de vie de 2 ans par personne). L'espérance de vie par personne est obtenue en divisant par la totalité de la population européenne ;
- **les impacts sur les écosystèmes**, exprimés en PDF m^2 an (*Potentially Disappeared Fraction of species over a certain amount of* m^2 *during a certain amount of year*). Cette unité représente la fraction d'espèces dis-

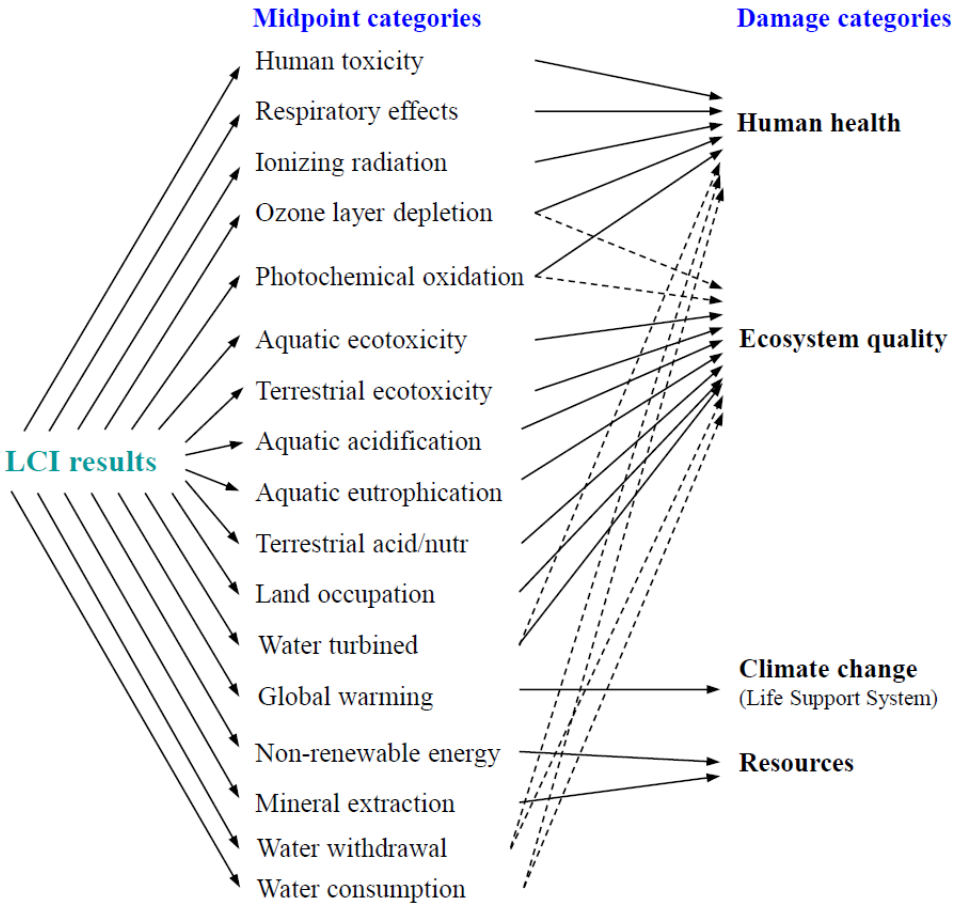


FIGURE 7.1 – Schéma d'ensemble de la méthode Impact 2002+ qui relie les impacts de chaque processus d'un système aux *Midpoints* et aux *Endpoints*. Les flèches en pointillés représentent un impact supposé exister, mais qui n'est pas modélisé pour cause de connaissances trop faibles ou qui est en cours de développement (issue de HUMBERT 2014, LCI = Life Cycle Inventory : Inventaire du Cycle de Vie).

paraissant sur une année dans une surface d'1 m^2. Ce *Endpoint* regroupe les *Midpoints* suivants : qualité des écosystèmes terrestres (écotoxicité et acidification), qualité des écosystèmes aquatiques (acidification, écotoxicité et eutrophisation) ainsi que l'occupation des sols ;

- **les impacts sur le changement climatique**. Cette catégorie à l'échelle *Midpoint* se retrouve dans les *Endpoint* car selon les auteurs de la méthode ***Impact2002+***, il est difficile d'estimer correctement les impacts directs du changement climatique sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes (JOLLIET et al. 2003). L'unité est exprimée en $kgCO_{2eq}$ émis dans l'atmosphère ;
- **l'impact sur les ressources** qui estime la quantité d'énergie extraite ou utilisée pour extraire la ressource. Cette catégorie regroupe les deux *Midpoints* : extraction des minerais et des ressources fossiles. L'unité est

exprimée en MJ. Il est important de noter que le mode de calcul inhérent à ***Impact2002+*** donne une part bien plus importante aux effets de l'extraction des ressources fossiles par rapport à l'extraction des ressources minérales (Humbert 2014). Lorsque l'utilisation des minerais occupe une place importante dans le système modélisé, il est intéressant d'observer l'impact Ressources aux deux *Midpoints*.

Actuellement, certains impacts retrouvés en *Midpoints* ne sont pas intégrés au niveau des *Endpoints*, malgré des implications supposées. C'est par exemple le cas de l'exploitation de l'eau, qui est supposée impacter la qualité des écosystèmes et la santé humaine, mais qui n'est pas prise en compte dans ces *Endpoints* à cause de connaissances trop faibles sur les impacts réels (figure 7.1)

7.2 Méthode de l'Analyse du Cycle de Vie appliquée à l'ATES de l'ENSEGID

7.2.1 Délimitation des frontières du système et Inventaire du Cycle de Vie

Pour réaliser une ACV, il convient premièrement de délimiter les frontières du système étudié. Cette démarche permet d'obtenir un aperçu des différentes étapes et phases à modéliser le long du cycle de vie du système. Pour l'ATES de l'ENSEGID, la réalisation des forages et divers équipements propres à l'ATES, le fonctionnement du système et sa maintenance sont pris en compte (figure 7.2). La phase de fin de vie correspondant à l'éventuel recyclage des têtes de forages et des tuyaux horizontaux enterrés dans la subsurface, ainsi qu'au comblement des puits, n'est pas pris en compte. En effet, une incertitude importante subsiste sur la manière dont seront recyclés ces éléments dans 50 ans, ainsi que sur les matériaux utilisés pour combler les puits à cette date. Par ailleurs, lorsque cette fin de vie est prise en compte pour un ATES, son impact environnemental par rapport aux autres étapes est largement négligeable (Stemmle et al. 2021).

L'installation du système de distribution de l'énergie à l'intérieur du bâtiment (divers tuyaux, ventilation et pompes) n'est pas modélisée, car considérée identique à celle d'un approvisionnement énergétique conventionnel (Stemmle et al. 2021).

Une fois les étapes et phases listées, il convient d'identifier tous les flux entrants et sortant des limites du système à chaque étape. Cette étape primordiale correspond à **l'Inventaire du Cycle de Vie** (ICV) du système. Les impacts

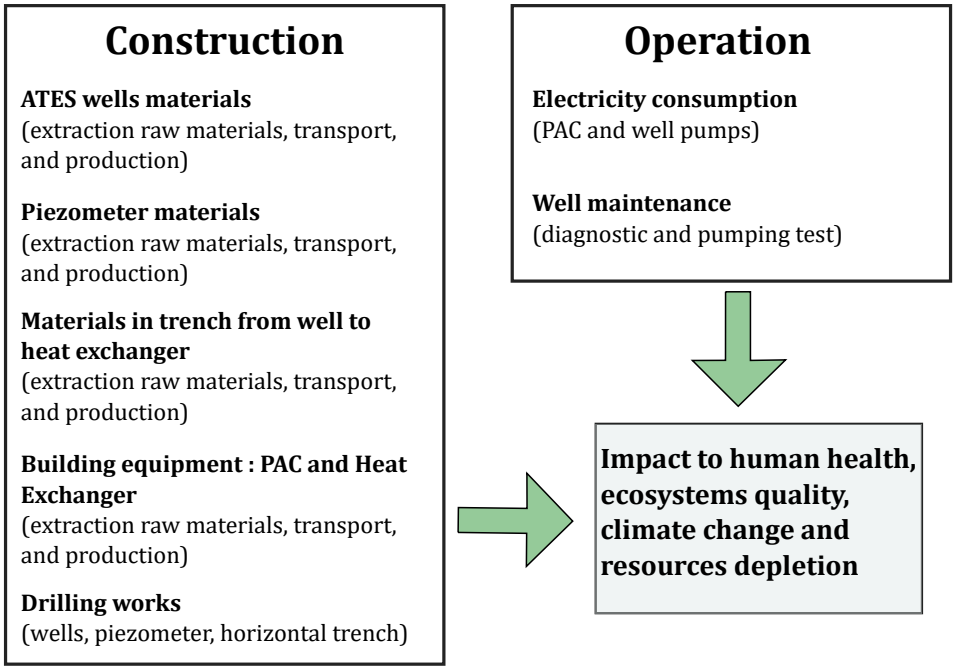


FIGURE 7.2 – Choix des frontières du système ATES de l'ENSEGID pour réaliser l'ACV

environnementaux de chaque flux ou processus de l'ICV sont disponibles dans des bases de données conçues spécialement pour effectuer des ACV. Pour dresser l'ICV de l'ATES de l'ENSEGID, la base de données EcoInvent 3.5 a été utilisée (WERNET et al. 2016).
L'ICV de l'ATES est découpée en 6 étapes regroupant leurs propres processus :

1. Création des forages ;
2. Création des piézomètres ;
3. Création des équipements intérieurs au bâtiment ;
4. Création du réseau de raccordement entre les forages et le bâtiment ;
5. Fonctionnement de l'ATES ;
6. Maintenance.

Les processus issus de la base de données EcoInvent pour modéliser la création des forages et la consommation électrique lors du fonctionnement de l'ATES sont résumés dans les tableau 7.1 et 7.2. Les processus utilisés dans les autres étapes sont disponibles en annexe C.
La modélisation est effectuée avec le logiciel libre accès *Open LCA* qui permet d'intégrer les processus de la base de données EcoInvent.

Création forage géothermique

Composant	Processus ACV	Quantité par puits	Provenance données
Bentonite	market for bentonite | bentonite | APOS,U - GLO	2000 kg	Suivi chantier
Ciment	market for concrete, normal | concrete, normal | APOS,U - RoW	5500 kg	Suivi chantier
Tube acier inox	market for chromium steel pipe | chromium steel pipe | APOS,U - GLO	1139 kg	Suivi chantier
Tube acier	- market for drawing of pipe, steel | drawing of pipe, steel | APOS,U - GLO -market for reinforcing steel | reinforcing steel | APOS,U - GLO	630 kg	Suivi chantier
Tete de forage	market for steel, chromium steel 18/8 | steel, chromium steel 18/8 | APOS,U - GLO	650 kg	Stemmle et al, 2021
Chape béton	market for concrete, normal | concrete, normal | APOS,U - RoW	0.2 m^3	Suivi chantier
Massif filtrant	market for gravel, round | gravel, round | APOS,U - RoW	9000 kg	Suivi chantier
Acide chlorhydrique	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | APOS,U - RoW	5000 kg	Suivi chantier
Diesel pour machines (forage+ manutention)	market for diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | APOS,U - GLO	2550 L	Suivi chantier
Diesel pour groupe électrogène	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | APOS,U - GLO	1000 L	Suivi chantier
Eau pour forer	tap water production, underground water with chemical treatment | tap water | APOS,U - Europe without Switzerland	100 t	Données approximative (panne compteur)
Rejet eau égout essai de pompage	market for wastewater, unpolluted | wastewater, unpolluted | APOS,U - RoW	2730 m^3	

TABLE 7.1 – Inventaire du cycle de vie d'un forage géothermique

L'unité fonctionnelle choisie pour comparer les résultats de la modélisation avec d'autres études ou d'autres systèmes énergétiques correspond à "*fournir un kWh d'énergie thermique au bâtiment (kWh_{th}) sur une période de 20 ans*". Ainsi, les impacts environnementaux seront exprimés en fonction de cette unité fonc-

Fonctionnement du système ATES

Composant	Nomenclature Processus ACV (EcoInvent 3.5 Wernet et al. 2016)	Quantité annuelle	Provenance données
Consommation électrique pompe de forage	market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | APOS,U - FR	30 MWh	Bureau étude dimensionnement système
Consommation électrique PAC	market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | APOS,U - FR	26.4 MWh	Bureau étude dimensionnement système

Table 7.2 – Inventaire du cycle de vie du fonctionnement du système

tionnelle. Par exemple, si l'impact mesuré concerne le réchauffement climatique, l'unité sera exprimée en : kg CO_{2eq} kW_{th}^{-1}.

7.2.2 Scénario de fonctionnement de l'ATES

L'étude de prédimensionnement des besoins thermiques de l'ENSEGID estime une demande thermique annuelle de 78 MWh de rafraîchissement et de 132 MWh de chauffage. Pour rappel, actuellement, l'ATES fournit de l'énergie thermique à seulement la moitié des locaux de l'ENSEGID. Les hypothèses établies sur le fonctionnement de l'ATES pour répondre à ce besoin et les consommations électriques qui en découlent sont résumées dans le tableau 7.3.

	Mode chauffage	Mode refroidissement
Besoin thermique annuel	132 MWh	78 MWh
Puissance moyenne	22.6 kW	26.6 kW
Fourni par	PAC avec COP = 5	Géocooling
Consommation électrique annuelle PAC	26.4 MWh	-
Consommation électrique annuelle pompe forage	20 MWh	10 MWh
Consommation électrique totale sur 20 ans	928 MWh	200 MWh

Table 7.3 – Consommation électrique inhérente au design de l'ATES à l'ENSEGID

Le mode chauffage fonctionne d'octobre à mai, alors que le mode rafraîchissement fonctionne sur les 4 autres mois de l'année uniquement en mode *géocooling*. L'électricité utilisée à l'ENSEGID est issue du réseau électrique urbain. La durée de vie des composants du bâtiment (PAC et échangeur de chaleur) et des pompes de forages est estimée à 20 ans.

7.3 Impact environnemental de l'ATES de l'ENSEGID

L'analyse des résultats permet d'estimer la part de chaque étape du cycle de vie dans les impacts environnementaux générés par l'ATES au niveau des *Endpoints*. La valeur totale des impacts de l'ATES dans chaque catégorie est aussi calculée pour un kWh d'énergie thermique restitué au bâtiment. Afin de vérifier la cohérence des résultats présentés, la répartition des impacts et leur valeur sont comparées avec les impacts environnementaux issus de la littérature (ACV ou estimations plus basiques).

7.3.1 Détails de l'ACV de l'ATES ENSEGID

L'ACV réalisée montre que la phase de fonctionnement du système est responsable de la majorité des impacts (figure 7.3).

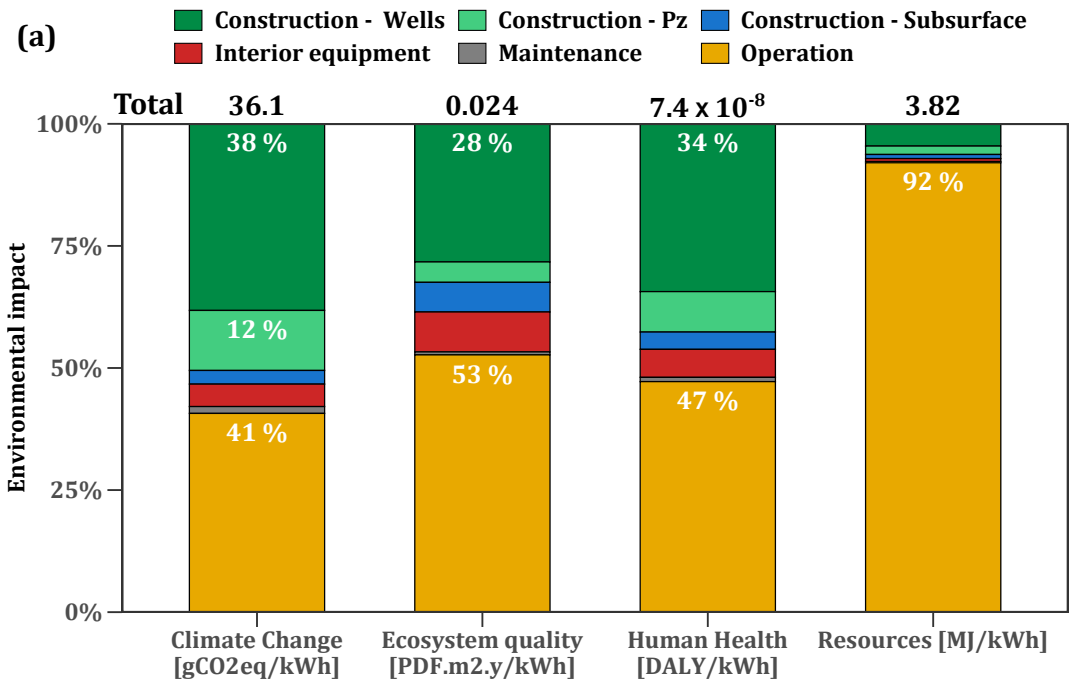


FIGURE 7.3 – *Endpoints* de l'ACV - ATES ENSEGID

Les impacts dus à cette étape de fonctionnement sont majoritairement associés à la production d'électricité et sont inhérents à la composition du mix électrique français, grandement dominé par le nucléaire. Le fonctionnement est responsable d'un peu moins de la moitié des impacts sur la "santé humaine". Les principaux facteurs sont les particules émises lors du traitement des résidus d'uranium ex-

traits pour le fonctionnement des centrales nucléaires et par les particules émises par les centrales électriques fonctionnant au charbon. En effet, même si la part de charbon utilisée est très faible dans le mix électrique français (< 2 %), les impacts environnementaux associés sont non négligeables.
Concernant les impacts sur la "qualité des écosystèmes", le fonctionnement est responsable de 53 % des impacts à cause du traitement des résidus d'uranium et la construction du réseau de distribution électrique.
Pour la catégorie "Ressources", l'utilisation de l'électricité durant le fonctionnement de l'ATES représente 92 % des impacts, principalement en lien avec l'extraction de l'uranium nécessaire au fonctionnement des centrales nucléaires. Toutefois, le mode de calcul de ***Impact2002+*** (section 7.1) donne une part très importante à l'extraction des ressources fossiles dans ce *Endpoint*, et ne permet pas de visualiser l'impact sur les ressources minérales utilisées dans les étapes du cycle de vie de l'ATES. Afin de préciser ces deux catégories, il est nécessaire d'observer l'aspect "Ressources" aux *Midpoints* (figure 7.4).

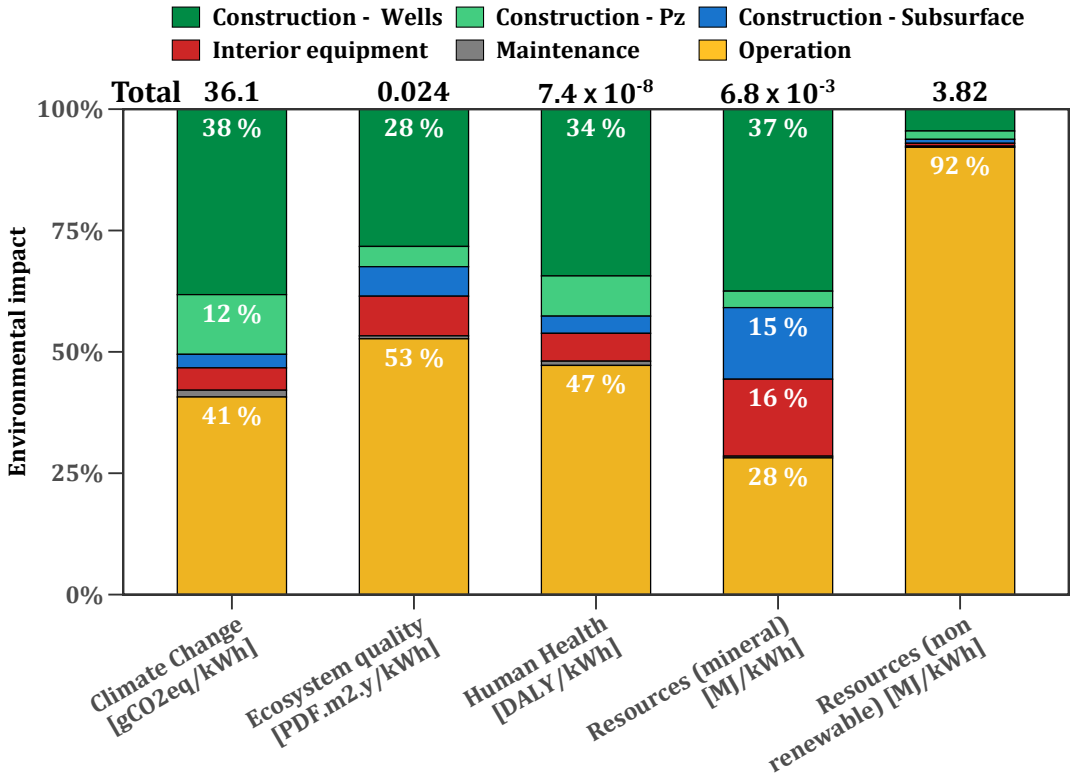


FIGURE 7.4 – Impacts environnementaux avec analyse de la catégorie "Ressources" aux *Midpoints* - ATES ENSEGID

Cette analyse montre **(i)** un écart d'un facteur 1000 entre l'impact sur les ressources fossiles et celui sur les ressources minérales et, **(ii)** que le fonctionnement n'est responsable que de 28 % des impacts sur l'extraction des minerais (impu-

table au cuivre utilisé pour confectionner les câbles du réseau de distribution électrique).
En raison de l'utilisation du mix électrique français faiblement carboné, le fonctionnement ne représente que 42 % des impacts dans la catégorie "réchauffement climatique". Le faible pourcentage de charbon utilisé pour produire de l'électricité en France (< 2 %) induit un impact plus important que la production d'électricité via les centrales nucléaires ; alors que ces dernières génèrent tout de même environ de 80 % de l'électricité française.

Les travaux de construction extérieurs, plus particulièrement des forages géothermiques et des piézomètres, représentent aussi une part importante de l'impact environnemental de l'ATES de l'ENSEGID. Ces travaux sont responsables d'environ 50 % des impacts sur le changement climatique et la santé humaine et de plus d'1/3 des impacts sur la qualité des écosystèmes. Ces impacts correspondent majoritairement au carburant consommé par les machines de chantiers, au ciment et tubes en acier et acier inox utilisés pour les forages, ainsi qu'à l'acide chlorhydrique utilisé pour développer les ouvrages. L'extraction des minerais nécessaires à la confection des tubes aciers et acier inox des forages est responsable de 40 % de l'impact sur les ressources minérales.

Enfin, la production de la PAC et de l'échangeur thermique représente une part moins importante dans chaque catégorie (toujours inférieure à 5 %). Toutefois, elle représente 16 % des impacts dans la catégorie *Midpoint* "ressources minérales" en lien avec les minerais nécessaires à la création de ces produits. L'impact de la maintenance est négligeable dans toutes les catégories par rapport à toutes les autres étapes.

La valeur la plus démonstrative pour le grand public et les décideurs est probablement l'impact estimé sur le réchauffement climatique mesuré en gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}. Pour un fonctionnement de 20 ans de l'ATES ENSEGID, le système émet 36.2 g de CO_{2eq} par kWh d'énergie thermique fourni au bâtiment. Ce résultat permet de justifier l'installation d'un ATES pour les nouveaux locaux de l'ENSEGID, un des buts affichés par l'ENSEGID étant de diminuer l'empreinte carbone du bâtiment par rapport à celle des anciens locaux chauffés avec une chaudière au gaz. Même s'il n'existe pas d'ACV sur l'ancien bâtiment de l'ENSEGID, ce but semble être atteint puisque selon la base de données "*Base Carbone*®" de l'ADEME (ADEME 2022), la production d'1 kWh de chauffage grâce à une chaudière au gaz génère en France une émission de CO_{2eq} proche de 230 g.

7.3.2 Confrontation de l'ATES ENSEGID aux autres dispositifs ATES

Impact sur le changement climatique

Si les ordres de grandeurs des impacts estimés à l'ENSEGID via l'ACV sont globalement comparables à ceux de la littérature estimés pour d'autres systèmes ATES (Moulopoulos 2014 ; Schüppler et al. 2019 ; Stemmle et al. 2021 ; Vanhoudt et al. 2011), certaines valeurs présentent des différences significatives.

C'est le cas de la catégorie "réchauffement climatique" (impact le plus souvent analysé). Le système de l'ENSEGID émet 36.2 g de CO_{2eq} par kWh d'énergie thermique fournie au bâtiment, ce qui est inférieur aux résultats issus de la littérature, même lorsque seule la phase de fonctionnement sert d'estimation pour l'impact CO_{2eq}(tableau 7.4).

Etude	**Demande thermique annuelle (MWh)**	**Emissions (gCO_{2eq} kW_{th}^{-1})**	**Methode de calcul**
ENSEGID (France)	210	34	ACV
Moulopoulos, 2014 (Pays-Bas)	410	137	ACV
Stemmle et al, 2019 (Allemagne)	6164	96	ACV
Schuppler et al, 2019 (Allemagne)	8485	54 (moyenne)	Facteur d'émission CO_2 de l'électricité (uniquement phase de fonctionnement)
Vandhout et al, 2011 (Européen)	6222	79	Facteur d'émission CO_2 de l'électricité (uniquement phase de fonctionnement)

Table 7.4 – Impact sur le réchauffement climatique : comparaison de l'ATES ENSEGID et des systèmes existants documentés. Le mix électrique utilisé est précisé entre parenthèse

Ces faibles émissions de CO_2 de l'ATES ENSEGID comparées aux autres ATES s'expliquent principalement par la composition du mix électrique utilisé lors de la phase de fonctionnement. Les ATES décrits dans la littérature fonctionnent grâce aux mix allemand (Schüppler et al. 2019 ; Stemmle et al. 2021), néerlandais (Moulopoulos 2014) ou encore européen (Vanhoudt et al. 2011) qui utilisent une part importante de ressources fossiles carbonées (tableau 7.5). Le mix français est quant à lui composé en majorité d'énergie nucléaire (79 %) et d'énergie provenant des centrales hydroélectriques (12 %). Cette particularité française permet de fournir une énergie électrique largement décarbonée par

Source	France	Allemagne
Charbon	1.7	17.9
Lignite	0	23.2
Gas	1.8 (biogaz <0.05)	11.5 (biogaz = 5.1)
Pétrole	<0.05	0.3
Nucléaire	78.2	14.9
Hydroélectrique	12.8	4.1
Eolienne	3.0	9.3
Solaire	0.8	8.9
Biomasse	0.1	1.3
Incinération déchet	0	2.2
Géothermie	0	<0.05
Import pays voisins	1.5	6.4

TABLE 7.5 – Part (en %) des sources d'énergie dans le mix électrique de la France et de l'Allemagne dans la base de données EcoInvent en 2014

rapport aux voisins européens. Ces aspects sont pris en compte dans la base de données EcoInvent utilisée pour effectuer l'ACV. Par conséquent, le fonctionnement de l'ATES de l'ENSEGID émet beaucoup moins de CO_2 qu'un ATES allemand ou néerlandais pour la même quantité d'énergie fournie au bâtiment. Cette singularité explique le faible impact sur le changement climatique estimé au travers de l'ACV de l'ATES ENSEGID.

Répartition des impacts le long du cycle de vie

La répartition des impacts de l'ATES de l'ENSEGID diffère des répartitions observées dans les ACV de STEMMLE et al. 2021 et MOULOPOULOS 2014, qui sont les deux études de la littérature comparable au contexte de l'ENSEGID. Les deux ACV utilisées pour cette étude comparative intègrent les processus issus de la base de données EcoInvent. La première (STEMMLE et al. 2021) utilise la même méthode de calcul que celle employée pour l'ENSEGID (figure 7.5a), et la deuxième (MOULOPOULOS 2014) est basée sur l'approche "***ReCiPe*** - visualisation aux *Midpoints*"(figure 7.5b).

Pour STEMMLE et al. 2021, le fonctionnement de l'ATES représente une part plus importante dans les impacts environnementaux. En effet, 80 % de l'impact sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes et près de 98 % de l'impact sur le changement climatique sont imputables au fonctionnement de l'ATES.

En revanche, cette étape n'apparaît pas dans la catégorie d'impact "Ressources", où la création du réseau horizontal de subsurface connectant les forages

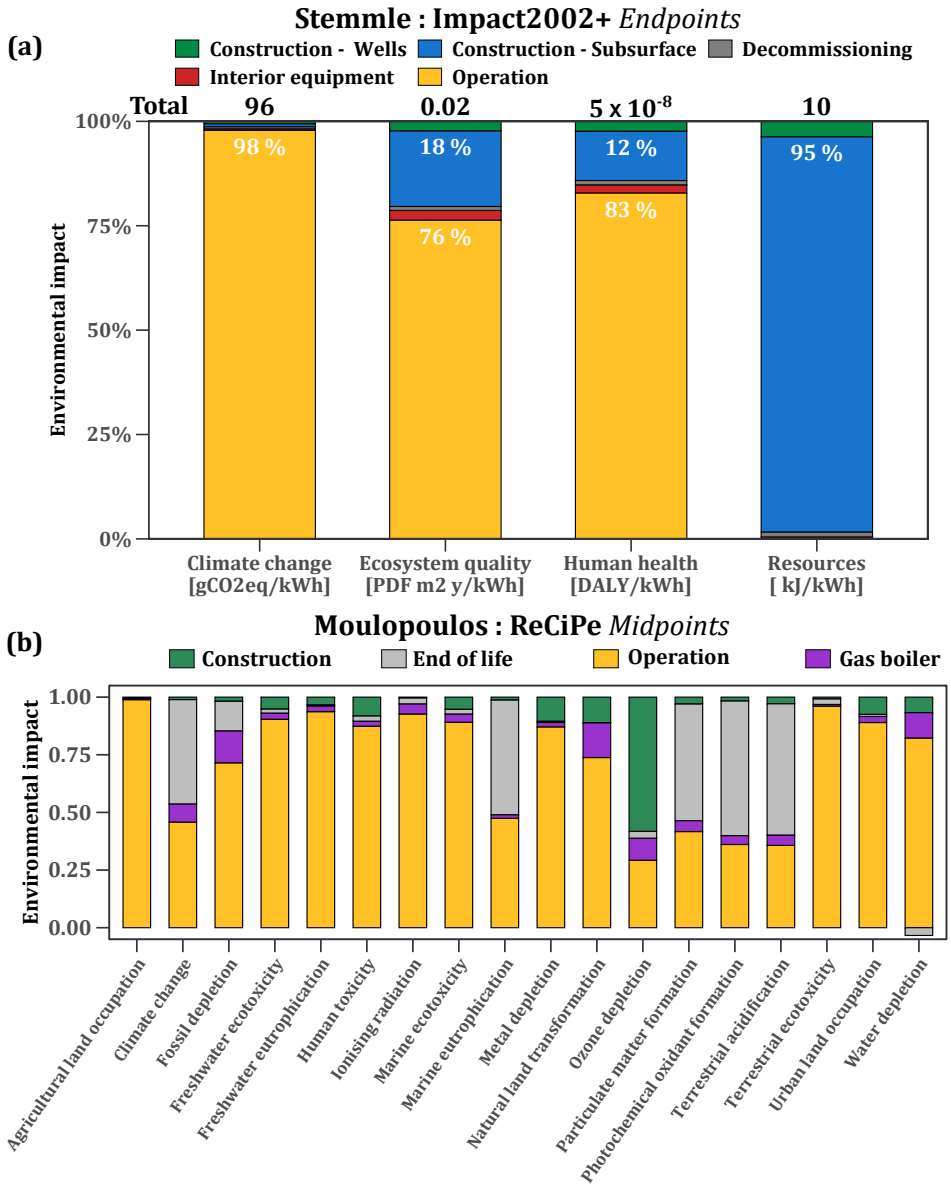


FIGURE 7.5 – Résultats d'ACV d'ATES comparables à l'ENSEGID : (a) STEMMLE et al. 2021 et (b) MOULOPOULOS 2014

aux bâtiments est responsable de 95 % des impacts dans cette catégorie. Certes, la longueur du réseau de tuyaux en polyéthylène qui connecte les bâtiments aux forages est plus importante que celle de l'ENSEGID (6 forages à connecter répartis sur un site plus étendu que celui de l'ENSEGID), mais la valeur absolue retenue pour cet impact (10 kJ kW_{th}^{-1}) pose question. Cette valeur est dans le même ordre de grandeur que la valeur estimée à l'ENSEGID pour l'extraction des minerais. Il semblerait que l'impact présenté dans l'étude de Stemmle se rapporte plutôt au *Midpoint* "exploitation des ressources minérales" et non au *Endpoint* de la catégorie "Ressources". Il semblerait alors plus logique que cet

impact soit dominé par la longueur importante du réseau de raccord entre les bâtiments et les forages (cette étape ne représente que 15% de l'impact sur les minerais dans l'ACV de l'ENSEGID).

La méthode de calcul ***ReCipe*** basée sur la visualisation des impacts aux *Midpoints* a été utilisée par Moulopoulos 2014. Il est plus délicat d'effectuer une comparaison directe des résultats avec l'ACV de l'ENSEGID basée sur les *Endpoints*. Globalement, la phase de fonctionnement est aussi l'étape ayant le plus d'impact environnemental (figure 7.5b). Toutefois, de manière surprenante, l'étape de fin de vie a une importance non négligeable dans plusieurs catégories d'impacts (acidification terrestre, eutrophisation marine, formation de particules fines), notamment pour le réchauffement climatique (45 % des émissions de CO_2). Ces résultats singuliers s'expliquent car l'étude considère que l'eau pompée dans les puits durant les phases de maintenance annuelle ($24 \times 10^3\,m^3$ sur 15 ans) est envoyée à l'égout et se retrouve dans le processus de traitement des eaux usées domestiques qui émet du CO_2. Les choix retenus par Moulopoulos 2014 semblent discutables :

1. la quantité d'eau pompée représente annuellement $1600\,m^3$ soit un débit par forage de $33\,m^3\,h^{-1}$ durant 24 h. Ces débits semblent excessifs au regard d'une maintenance de forage classique ;
2. le choix de renvoyer automatiquement l'eau à l'égout et de la considérer comme une eau domestique usée semble peu approprié. En effet, cette étude date de 2014 et à cette époque, il n'existait pas de processus dans EcoInvent permettant de rejeter une eau à l'égout en la considérant comme peu polluée. Ce processus est depuis disponible (et utilisé pour l'étape de maintenance de l'ACV ENSEGID) et permettrait probablement de diminuer l'impact de la maintenance dans cette étude ;
3. La réalisation d'une maintenance annuelle sur les ouvrages semble assez loin des pratiques courantes en France.

Hormis les aspects liés au traitement de l'eau (Moulopoulos 2014) et à la longueur du réseau horizontal de connexion (Stemmle et al. 2021), les différences sur la répartition des impacts durant le cycle de vie et sur la quantité de CO_2 émise peuvent être expliquées par deux facteurs.
Le premier facteur est inhérent à la composition du mix électrique utilisé lors de la phase de fonctionnement. Les mix allemand (Stemmle et al. 2021) et néerlandais (Moulopoulos 2014), très carbonés, sont utilisés dans ces deux ACV, ce qui génère des impacts environnementaux plus importants sur le réchauffement climatique, mais aussi sur la santé humaine et les écosystèmes (en lien avec

les émissions de particules fines). Il en résulte une proportion plus importante du fonctionnement dans chaque catégorie d'impact, par rapport à la part du fonctionnement estimée pour l'ATES ENSEGID.

Le deuxième facteur qui peut expliquer la moindre importance du fonctionnement de l'ENSEGID dans la part des impacts environnementaux est lié à la faible demande thermique de l'ENSEGID comparée aux deux autres systèmes étudiés. Outre une bonne isolation régie par les normes de construction les plus récentes, cette faible demande par rapport aux autres études s'explique en grande partie par une surface de bâti plus petite : 3600 m^2 pour l'ENSEGID contre 6000 m^2 pour Moulopoulos 2014 et plusieurs bâtiments (hôtel, bureaux, centre médical et data center) pour Stemmle et al. 2021.

7.4 Pertinence de l'utilisation d'un ATES dans le contexte de demande énergétique de l'ENSEGID

Dans cette partie, différents scénarios sont étudiés afin de se prononcer sur la pertinence de l'utilisation d'un ATES pour satisfaire les besoins thermiques d'un bâtiment ayant des besoins similaires à l'ENSEGID. Les résultats de l'ACV de l'ATES ENSEGID présentés dans la partie précédente sont utilisés en tant que scénario de référence. À travers les différents scénarios proposés, deux facteurs distincts sont étudiés :

- l'influence du mix électrique utilisé sur les impacts générés par l'ATES ;
- l'utilisation de solution énergétiques conventionnelles (climatisation électrique, chauffage gaz ou biomasse) alternatives à la géothermie.

7.4.1 Influence du mix électrique

L'influence majeure du mix électrique sur les impacts environnementaux a été démontrée précédemment. Dans sa politique de développement, l'ENSEGID va prochainement installer des panneaux solaires photovoltaïques sur son toit afin de tendre vers une autonomie électrique. Un premier scénario est étudié avec une électricité 100 % issue des panneaux photovoltaïques. En parallèle, la pertinence de l'installation d'un ATES pour satisfaire la demande énergétique d'un bâtiment comparable à l'ENSEGID dans un pays ayant un mix électrique fortement carboné est étudiée, via l'utilisation d'un mix énergétique comparable

au mix allemand.

La comparaison des résultats entre les trois scénarios est faite aux *Endpoints*, sauf pour la catégorie "Ressources" qui est détaillée aux *Midpoints* afin d'estimer l'impact sur les minerais relatifs à la création des panneaux.

Après simulation, pour le scénario "électricité 100 % photovoltaïque", les impacts durant le cycle de vie relatifs aux catégories "changement climatique", "santé humaine" et "qualité des écosystèmes" sont très proches du scénario de référence de l'ENSEGID (figure 7.6a1) avec des valeurs absolues d'impact très proches dans ces différentes catégories (figure 7.6b). Ces impacts sont majoritairement imputables aux processus de fabrications des panneaux.

Les principales différences entre les deux scénarios s'observent sur les ressources.

En effet, avec une électricité 100 % photovoltaïque, la part du fonctionnement sur les impacts diminue de 92 % à 50 % pour les ressources fossiles. L'utilisation de l'électricité photovoltaïque permet de s'affranchir de l'extraction de l'uranium, responsable de la majeure partie des impacts sur les ressources fossiles. Toutefois, les matériaux nécessaires à la confection des panneaux photovoltaïques augmentent la part du fonctionnement dans l'impact sur l'extraction des minerais, passant de 28 % pour le scénario référence à 46 %. La valeur absolue de cet impact reste proche de celle du scénario de référence, soit 8.4×10^{-3} MJ kW_{th}^{-1} contre 6.8×10^{-3} MJ kW_{th}^{-1}.

Le rôle du mix électrique est important, comme l'illustre la comparaison avec l'utilisation du mix allemand (figure 7.6a3). Pour toutes les catégories d'impact, le fonctionnement dans ce scénario possède une part supérieure à celle du fonctionnement pour le scénario de référence (hormis sur l'aspect ressource fossile ou les valeurs sont très proches 89 % versus 92 %). La différence la plus marquante est relative à l'impact sur le réchauffement climatique où le mix allemand amène pour le fonctionnement à une part de 88 % de l'impact, contre 41 % pour le scénario de référence. Cela se traduit pour l'ATES par une émission 5 fois plus élevée à 175 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}, valeur proche des émissions d'un système énergétique alimenté par du gaz. L'installation d'un ATES pour fournir de l'énergie thermique à un bâtiment ayant des besoins similaires à l'ENSEGID dans un pays où le mix électrique est fortement carboné ne semble pas justifiable en terme d'objectif de réduction des émissions de CO_2

La méthode ***Impact2002+*** permet de normaliser les résultats estimés aux *Endpoints* pour comparer l'importance des catégories d'impact entre elles. La normalisation s'effectue en divisant la valeur de l'impact calculé par l'impact d'un

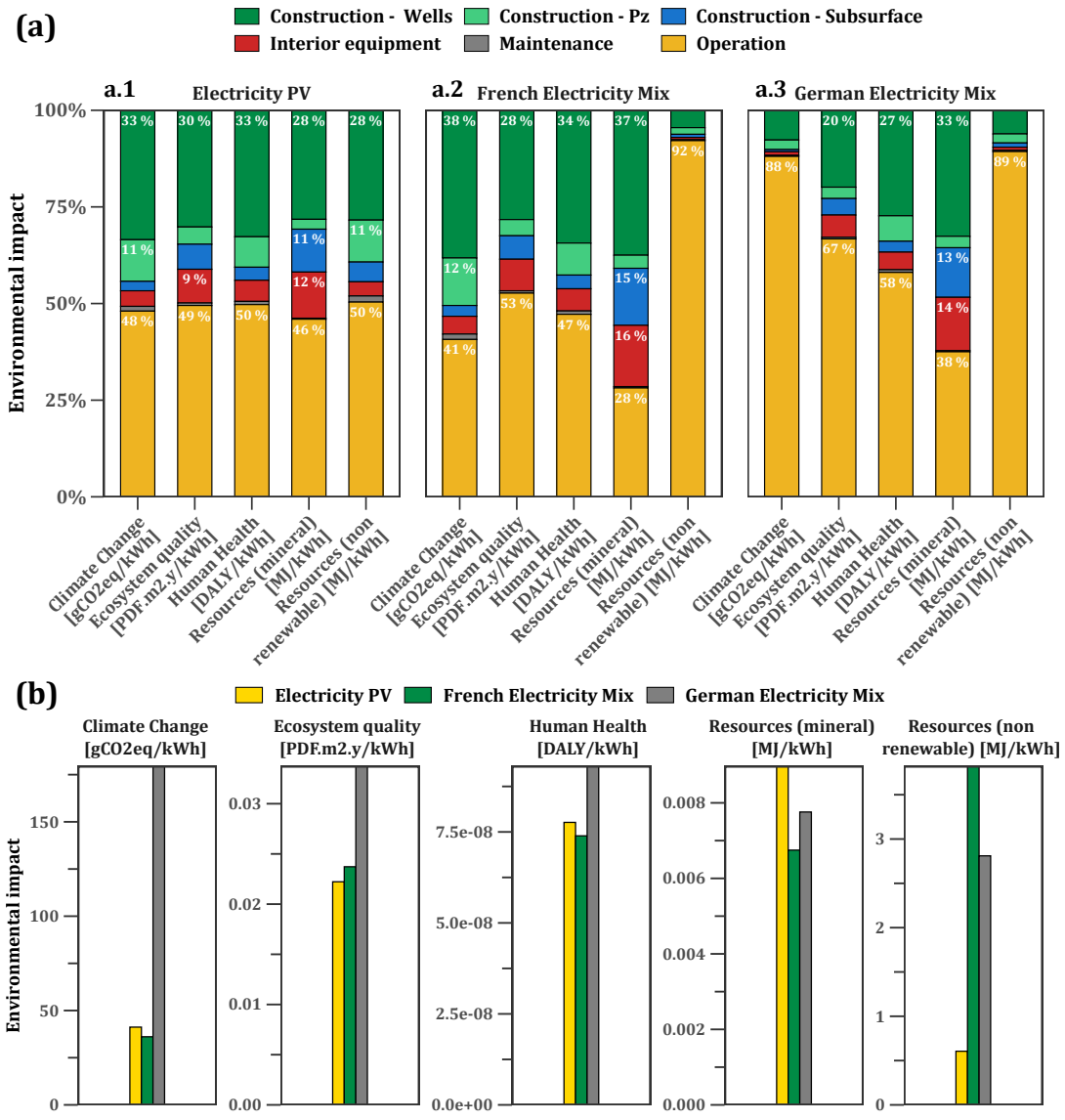


FIGURE 7.6 – Influence du mix électrique : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix

citoyen européen moyen sur une année. Par exemple, pour normaliser l'impact sur le réchauffement climatique, il convient de diviser la valeur absolue estimée par l'ACV par 9950 kg, qui correspond à l'empreinte carbone moyenne d'un citoyen européen sur une année.

Les autres facteurs de normalisation de la méthode ***Impact2002+*** sont disponibles dans le tableau 7.6. L'unité des valeurs normalisées s'exprime en *point*. Après normalisation, le scénario "électricité 100 % photovoltaïque" apparait comme ayant le moins d'impact global sur l'environnement (figure 7.7).

Ce scénario obtient un meilleur score que les scénarios "référence" et "mix allemand" en raison de son faible impact sur l'exploitation des ressources. Il est

Impact	Facteur de Normalisation	Unité
Santé humaine	0.0071	DALY/point
Qualité des écosystèmes	13700	PDF m^2 an/point
Changement climatique	9950	$kgCO_{2eq}$/point
Ressources	152000	MJ/point

TABLE 7.6 – Facteurs de normalisation utilisés dans la méthode ***Impact2002+*** (v2.1)

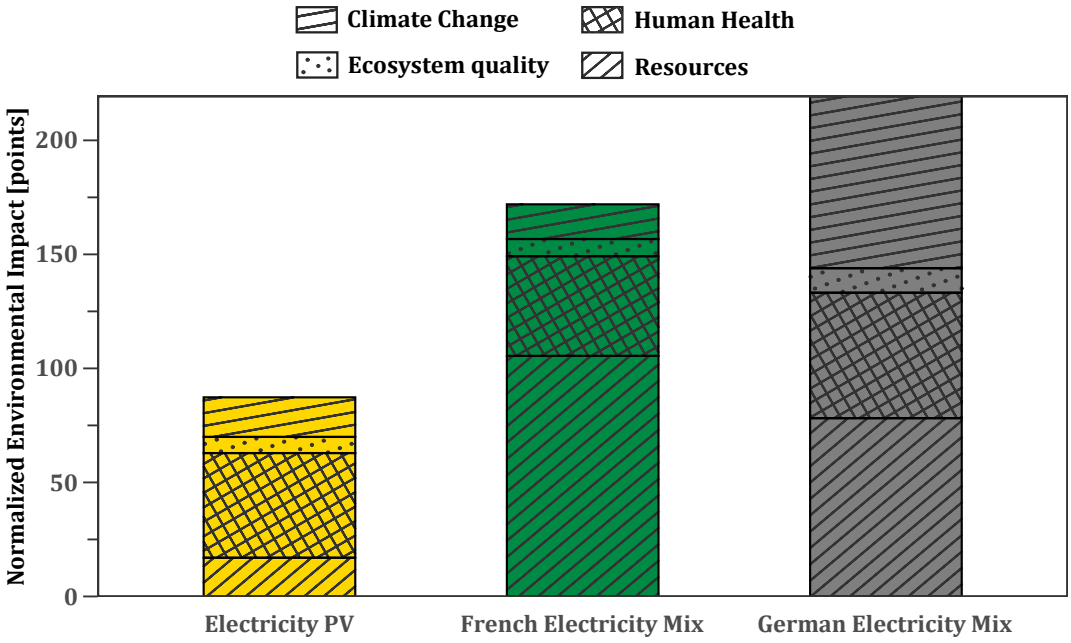


FIGURE 7.7 – Influence du mix électrique choisi sur les résultats de l'ACV de l'ATES ENSEGID : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix

important de rappeler qu'***Impact2002+*** assigne la majorité des impacts sur les ressources en *Endpoints* à l'extraction des ressources fossiles. L'aspect sur les ressources minérales ne peut donc être visualisé en normalisant les données.

Malgré un score normalisé très intéressant pour le scénario 100 % photovoltaïque, il faut souligner qu'en raison de l'intermittence du rayonnement solaire, et sans solution de stockage d'électricité, il est peu probable que des panneaux photovoltaïques puissent fournir 100 % de l'électricité nécessaire pour faire fonctionner le système ATES tout au long de l'année (particulièrement en hiver lors du fonctionnement de la PAC). Il apparait peu judicieux de dimensionner un

système ATES fonctionnant uniquement avec de l'électricité photovoltaïque. Une solution intéressante serait d'utiliser l'apport photovoltaïque en complément du mix électrique fourni à l'ATES. Cela permettrait à l'ENSEGID d'être plus autonome en électricité, sans toutefois engendrer un surplus conséquent d'émissions de CO_2. L'impact sur l'extraction de ressources minérales serait limité, tout en réduisant la dépendance à l'énergie nucléaire et à l'extraction de l'uranium.

La normalisation fait logiquement ressortir le scénario "mix électrique allemand" comme celui ayant le plus d'impacts globaux (2,5 fois plus que le scénario "électricité 100 % photovoltaïque" et 1,3 fois plus que le scénario "référence" utilisant le mix français).

7.4.2 Le dispositif ATES face à d'autres solutions énergétiques

Le choix d'un type d'approvisionnement énergétique peut se faire sur la base de critères environnementaux. Ainsi, l'ADEME met à disposition une base de données ("*Base Carbone*®") permettant d'obtenir les valeurs des émissions carbone pour différentes solutions énergétiques. Toutefois, il n'est pas fait état des impacts sur la santé, les écosystèmes et les ressources mesurables. Ces impacts peuvent être estimés grâce à l'ACV. Ce large panel d'indicateurs permet de justifier la pertinence d'un choix énergétique au regard de son empreinte environnementale.

Cette approche a été menée pour le bâtiment de l'ENSEGID en confrontant la solution ATES à des ACV de solutions énergétiques conventionnelles. Les solutions conventionnelles testées correspondent à des scénarios où la demande en froid est fournie par un climatiseur électrique classique. La demande en chaud est quant à elle satisfaite soit par une solution 100 % gaz ou, soit par une solution 100 % biomasse (combustion de copeaux de bois ou de pellets). Les systèmes et scénarios testés sont listés dans le tableau 7.7.

Les demandes thermiques modélisées sont similaires à celle de l'ENSEGID (78 MWh an^{-1} de froid et 132 MWh an^{-1} de chaud). Dans tous les scénarios, la demande de climatisation est prise en compte en intégrant un processus de création de climatiseur et en utilisant le mix électrique français pour le faire fonctionner. Les processus choisis dans EcoInvent pour ces scénarios sont disponibles en annexe C. Les processus utilisés pour modéliser le chauffage au gaz, aux pellets et aux copeaux de bois se basent sur des chaudières ayant des puissances proches

Combustible (chauffage)	Rendement chauffage	Rafraichissement
Gas naturel	0.95	Climatiseur électrique COP = 4 (100kW)
Biomasse (pellet)	0.92	Climatiseur électrique COP = 4 (100kW)
Biomasse (copeaux de bois)	0.92	Climatiseur électrique COP = 4 (100kW)

TABLE 7.7 – Détail des systèmes énergétiques comparé à l'ATES de l'ENSEGID. Les rendements sont issues de données fabricants

de celle nécessaire à l'ENSEGID. Dans la base *Ecoinvent*, il n'existe pas de processus gaz et biomasse propres à la France. Des processus à l'échelle suisse ou européenne sont donc choisis

Tous ces processus intègrent la création d'une chaudière. Les résultats montrent qu'en termes d'impact sur le climat, les solutions biomasse+climatiseur sont équivalentes à celle de l'ATES de l'ENSEGID (figure 7.8), l'utilisation de copeaux de bois ayant un impact légèrement plus élevé. Ces résultats sont cohérents avec la base de l'ADEME qui indique une émission de 30 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}.

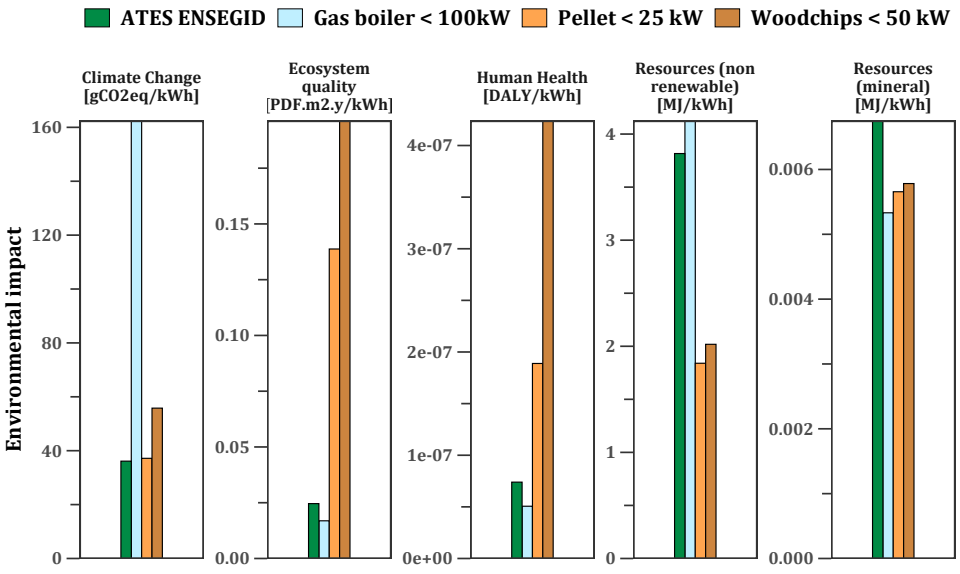


FIGURE 7.8 – Comparaison des impacts environnementaux de l'ATES ENSEGID avec les solutions conventionnelles Biomasse et Gaz (le système de refroidissement utilisé dans les scénarios conventionnels correspond à un climatiseur électrique alimenté par de l'électricité française.)

Avec une émission 4 fois supérieure, aux alentours de 160 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}, la solution gaz n'est pas compétitive sur cet impact particulier. En revanche, les

solutions biomasses ont des impacts sur la santé humaine et les écosystèmes plus importants que les scénarios gaz et ATES. Ces impacts sont principalement liés aux particules fines rejetées dans l'atmosphère lors de la combustion du bois, ainsi qu'au processus de traitement des cendres. La solution biomasse a cependant moins d'impact sur les ressources (minérales et fossiles) que les deux autres solutions.
Lorsque les résultats sont normalisés, les solutions biomasses présentent les impacts environnementaux les plus élevés (figure 7.9). Globalement, les gains sur les émissions de CO_2 et l'exploitation des ressources sont contrebalancés par le trop fort impact sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes.

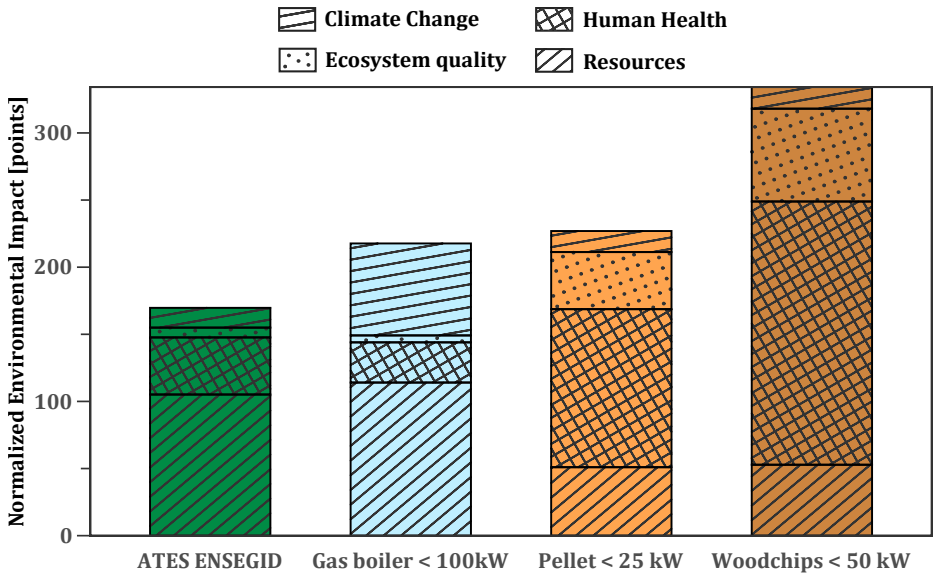


FIGURE 7.9 – Normalisation des impacts environnementaux pour les solutions énergétiques conventionnelles

7.5 L'ATES : un système performant pour répondre aux demandes thermiques importantes

Dans le futur, la totalité du bâtiment de l'ENSEGID devrait être reliée au système ATES. La surface avoisinerait 5500 m^2 . Par ailleurs, il n'est pas exclu que des bâtiments supplémentaires de Bordeaux INP soient aussi alimentés par un dispositif ATES (en se greffant aux forages ENSEGID ou en réalisant de nouveaux ouvrages).

A l'ENSEGID, les forages pompent un débit moyen de 7 - 8 $m^3 h^{-1}$ alors que les essais de pompage par paliers ont montré que le débit critique était 3

fois supérieur à cette valeur. En gardant le même fonctionnement (*géocooling* en été et PAC avec une COP = 5), les deux forages de l'ENSEGID pourraient donc potentiellement être utilisés pour répondre à une demande thermique 3 fois supérieure, propice pour fournir suffisamment d'énergie pour tous les locaux de l'ENSEGID et possiblement un autre bâtiment.

Afin d'estimer l'impact environnemental lié à une multiplication par trois de la capacité de production énergétique de l'ATES ENSEGID, une nouvelle ACV est effectuée.

On suppose que les deux pompes des forages sont remplacées par des pompes de puissance supérieure consommant trois fois plus d'électricité pour satisfaire les débits nécessaires. En réalité, la puissance électrique nécessaire pour pomper plus d'eau n'est pas linéaire avec l'augmentation du débit. L'hypothèse retenue surestime donc la consommation électrique des pompes des forages. On stipule que la PAC sera en capacité de répondre à ce besoin thermique en consommant trois fois plus d'électricité. Les processus de fabrication des pompes de forages et de la PAC ne sont pas modifiés dans l'ICV, seule la consommation électrique durant le fonctionnement est multipliée par 3, et le nombre de forages et la longueur du réseau de connexion restent identiques.

Les résultats montrent logiquement que la part du fonctionnement augmente dans toutes les catégories d'impacts (figure 7.10). Cette part reste cependant inférieure aux proportions observées dans la littérature, notamment pour l'aspect "réchauffement climatique" (68% de l'impact contre 98% pour (Stemmle et al. 2021)). Dans cette étude, 6 forages permettent de fournir au complexe qu'ils alimentent 30 fois plus d'énergie thermique que celle fournie à l'ENSEGID par ces deux forages, augmentant ainsi considérablement la part du fonctionnement dans les impacts.

En multipliant par trois l'énergie thermique fournie par l'ATES ENSEGID, l'impact environnemental par kW d'énergie thermique fourni au bâtiment est sensiblement réduit. L'impact estimé par kWh produit dans les catégories "santé humaine", "qualité des écosystèmes" et "réchauffement climatique" est réduit d'environ un tiers. Pour le "réchauffement climatique", multiplier par 3 la production énergétique de l'ATES en gardant uniquement 2 forages de production/injection permet de passer de 36.2 à 21.4 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}. Ces résultats soulignent l'importance de maximiser le débit de production des ouvrages de l'ATES afin d'atteindre le meilleur rendement environnemental. Notons qu'un aquifère plus productif que celui exploité à l'ENSEGID permettrait d'atteindre des performances environnementales théoriques encore meilleures.

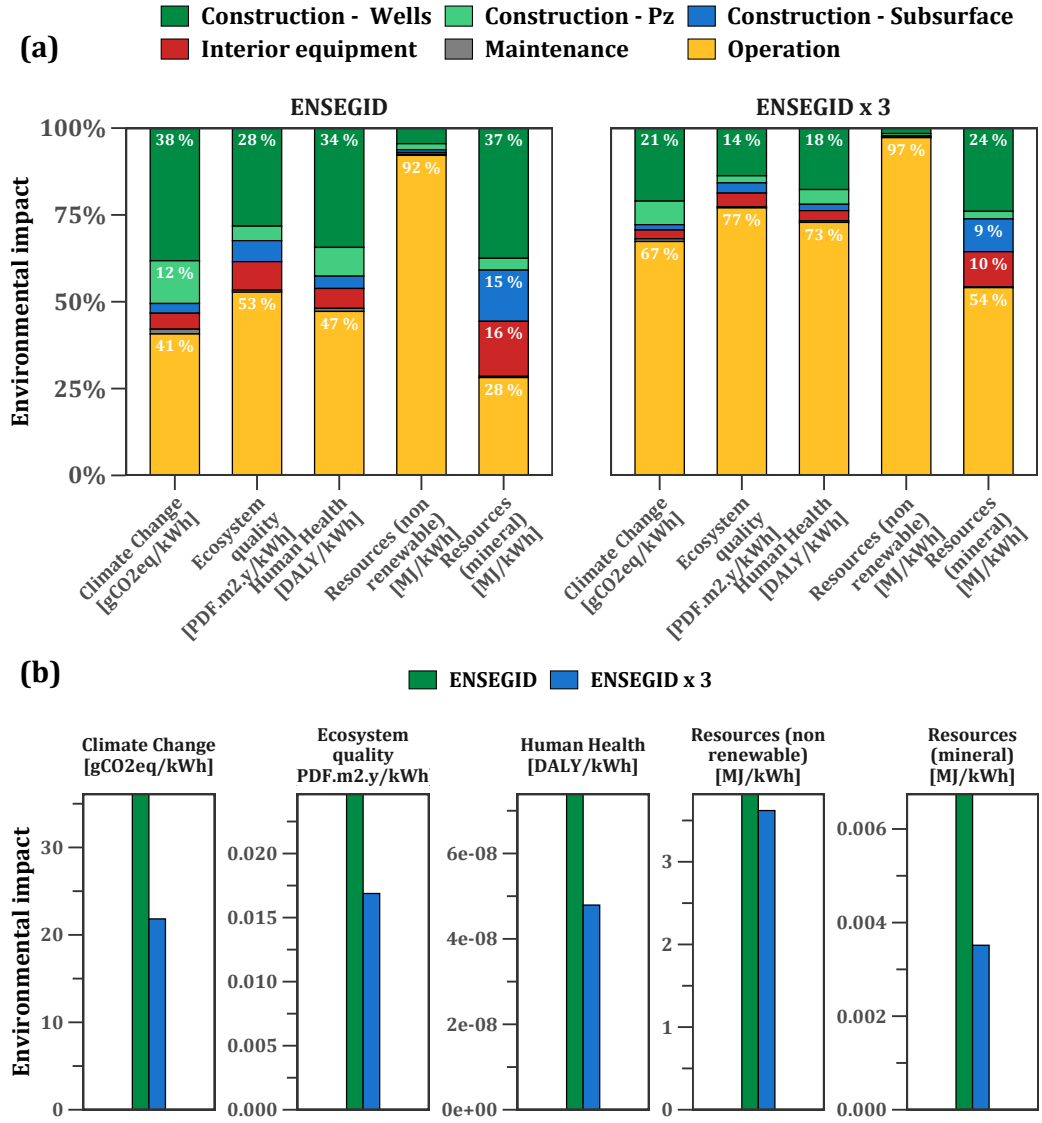


FIGURE 7.10 – Influence de la demande thermique sur les résultats l'ACV de l'ATES ENSEGID : (a) part des étapes du cycle de vie dans chaque catégorie d'impact et (b) valeur absolue des impacts en fonction du mix électrique

7.6 Bilan environnemental de l'ATES ENSEGID

L'ACV réalisée sur l'ATES de l'ENSEGID a permis d'estimer les impacts environnementaux de ce système en prenant en compte toutes les étapes de son cycle de vie.

Le faible impact sur le réchauffement climatique, avec une émission de 36.2 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}, permet d'atteindre les objectifs de réduction de GES recherchés par l'ENSEGID. Les résultats globaux de l'ACV sur le scénario de référence mettent en évidence que la phase de fonctionnement et la construction des forages

sont les deux étapes ayant le plus d'impacts environnementaux. Néanmoins, pour les dispositifs ATES en exploitation en Europe, on observe des impacts liés au fonctionnement plus importants. Cela peut s'expliquer par deux facteurs :

- l'empreinte carbone élevée de leur mix électrique ;
- des productions thermiques plus élevées que celle de l'ENSEGID.

Selon les résultats de l'ACV, en intégrant une électricité issue de panneaux photovoltaïques dans son mix électrique, l'ENSEGID devrait contribuer à diminuer les impacts environnementaux sur l'exploitation des ressources fossiles. L'impact sur l'exploitation des ressources minérales n'augmenterait que très légèrement. Le mix électrique français étant déjà largement décarboné, l'utilisation des panneaux photovoltaïques ne peut en revanche être justifiée comme une solution permettant de diminuer l'impact de l'ATES sur le réchauffement climatique. C'est en revanche une solution limitant l'impact sur l'extraction de l'uranium qui pourrait permettre à l'ENSEGID d'être plus autonome en électricité sans pour autant augmenter son empreinte carbone.
Enfin, comparée à des solutions énergétiques plus conventionnelles (climatiseur électrique couplé à un chauffage gaz ou biomasse), la solution ATES ENSEGID possède l'impact environnemental global le plus faible. L'utilisation de la biomasse, malgré des impacts sur le réchauffement climatique comparables à ceux de l'ATES, est fortement pénalisée par son impact sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes. En cause, les particules fines qui sont émises lors de la combustion du bois. La solution gaz est quant à elle trop émettrice de CO_2 pour concurrencer l'ATES ENSEGID alimenté par un mix électrique français faiblement carboné.

L'extension des volumes de l'ENSEGID envisagée dans un futur proche devrait permettre d'augmenter le rendement du dispositif ATES et minimiser son empreinte environnementale par kWh d'énergie thermique produit.

Gardons à l'esprit que la performance environnementale globale du dispositif ATES est largement dépendante du mix électrique utilisé pour son fonctionnement. Ainsi, pour un mix électrique basé sur la combustion de ressources fossiles émettrices de CO_2, équiper un bâtiment ayant une faible demande thermique comme celui de l'ENSEGID ne serait pas pertinent pour atteindre des objectifs de réduction d'émissions de GES ambitieux.

Conclusion Générale

À l'heure actuelle, le réchauffement climatique est une réalité se traduisant par une augmentation de la température moyenne mondiale de + 1.1 °C par rapport à la période de référence 1850-1900 (IPCC 2023). Il est plus qu'urgent de mettre en œuvre toutes les solutions pour limiter au maximum ces impacts. La réduction des émissions de GES apparait comme le levier majeur. Le secteur du bâtiment, responsable de 20 % des émissions à l'échelle mondiale, est un secteur prioritaire. La consommation énergétique des bâtiments (environ 40 %) est allouée au confort thermique interne des locaux (chauffage et rafraichissement). Il est indispensable de tendre vers des stratégies visant à la fois (***i***) à réduire la consommation d'énergie thermique en rénovant les bâtiments, en adoptant des bonnes pratiques de construction et en stockant l'énergie non utilisée pour la restituer en période de besoin et (***ii***) à décarboner l'énergie thermique fournie aux bâtiments.

Face à ces enjeux, le premier chapitre explore la solution du stockage d'énergie thermique appliqué au bâtiment, qui apparaît comme un moyen efficace permettant de réduire leurs émissions de GES. À l'échelle européenne, l'utilisation de ces technologies dans un scénario de déploiement relativement lent, mais réaliste, permettrait d'atteindre des réductions d'émission de GES avoisinant les 6 % par rapport aux niveaux de 2005 (Arce et al. 2011). C'est une réduction non négligeable qui participerait à atteindre les objectifs fixés à l'échelle européenne.

Le chapitre 2 présente une vision globale du dispositif ATES, fil rouge de ce travail thèse. Ce système permet de stocker et de fournir de l'énergie thermique aux bâtiments à l'aide d'un minimum de deux forages de pompage/injection et d'une pompe à chaleur. C'est une technique adaptée pour subvenir aux besoins thermiques des bâtiments de taille conséquente, tout en permettant d'atteindre des réductions d'émissions de GES significatives par rapport à des systèmes conventionnels. Les pays du nord de l'Europe, et particulièrement les Pays-Bas, sont les pionniers de cette technologie. D'après les retours d'expériences, les ATES permettent d'atteindre des réductions d'émissions de GES comprises entre 40 et 70 % par rapport à des solutions conventionnelles dans le contexte énergétique propre à ces pays. En dépit de retours sur investissement relativement courts (inférieurs à 10 ans Vanhoudt et al. 2011), voire très court (inférieurs à 3 ans Schüppler et al. 2019), le développement de ces dispositifs l'échelle mondiale peine. Plusieurs raisons peuvent être avancées (Fleuchaus et al. 2018) :

- l'investissement économique initial important ;
- les risques liés aux incertitudes hydrogéologiques et géologiques qui peuvent

engendrer l'inefficacité du système ou des impacts thermiques dans le sous-sol contre productifs ;
- la méconnaissance de cette technologie auprès des décideurs et du grand public ;
- l'absence ou l'insuffisance de politiques incitatives.

Réduire ces freins, en améliorant la connaissance globale du fonctionnement de ces systèmes, pourrait constituer une contribution au développement et au déploiement de ces dispositifs. Dans cette optique, la suite de la thèse amène des éléments de réponse sur trois problématiques identifiées quant à la pérennité des ATES sur le long terme, à savoir :

- le diagnostic et le suivi des installations de production, en proposant une méthode de caractérisation du dispositif, notamment des cépines de production/injection et le développement éventuel de colmatage ;
- l'impact thermique dans le sous-sol et la performance de systèmes ATES exploitant des aquifères peu profonds dans des zones soumises à des transferts de chaleur venant de la surface en lien avec l'artificialisation des sols et le réchauffement des températures atmosphériques ;
- l'étude de l'influence de scénarios climatiques futurs sur la demande thermique des bâtiments et les implications engendrées sur le fonctionnement global des ATES.

L'objectif du chapitre 3 est de développer un outil de diagnostic des ouvrages de pompage et d'injection de l'ATES. Le dispositif a été déployé sur des piézomètres proximaux aux forages et basé sur l'acquisition de données de température par fibre optique. Le dispositif a permis d'identifier les zones productives des ouvrages et de dresser des profils de conductivité thermiques. Ces profils sont intéressants pour identifier des horizons potentiellement colmatés.
Une fois installé, le dispositif est pérenne et l'acquisition peut être réalisée sans manutention sur les ouvrages. Dans un contexte d'exploitation, l'évolution temporelle des paramètres pourrait être un indicateur précieux pour la prévention d'une éventuelle dégradation de l'ouvrage, en complément des techniques classiques de diagnostic de forage.

À travers le chapitre 4, une stratégie a été mise en place pour étudier l'impact de l'artificialisation des surfaces et du réchauffement climatique sur la dynamique thermique du proche sous-sol (< 150 m). Ces deux phénomènes sont largement documentés dans la littérature comme étant des facteurs générant des îlots de chaleur dans le sous-sol urbain. Afin d'étudier leurs impacts sur le fonctionnement d'un ATES peu profond, des modèles analytiques et numériques ont été mis au

point pour caractériser les processus en jeu. La modélisation analytique est un outil permettant de restituer la dynamique thermique du sous-sol. Cette approche est toutefois limitée à un contexte dans lequel le sous-sol est ramené à un milieu homogène, et elle ne peut être utilisée pour estimer l'impact thermique d'un système ATES caractérisé par un fonctionnement transitoire et réversible.

Le chapitre 5 présente le développement d'un modèle numérique synthétique afin d'analyser l'influence de l'artificialisation des sols et du réchauffement climatique sur la performance à long terme d'un système ATES peu profond. Il apparait que le réchauffement de la surface généré par l'artificialisation des sols et l'augmentation des températures atmosphériques pénalisent l'extension de la bulle froide et favorise l'extension de la bulle chaude. En parallèle, dans un scénario de réchauffement climatique à long terme, la demande thermique du bâtiment se retrouve déséquilibrée, engendrant une demande thermique en froid beaucoup plus conséquente et entrainant une vidange complète des réserves de froid dans l'aquifère. A contrario, la bulle chaude s'étend grandement, favorisée par les transferts thermiques venant de la surface. Dans un tel scénario, le système ne stocke plus d'énergie "froide" et se comporte plutôt comme un doublet géothermique classique en exploitant de l'eau à la température ambiante de la nappe.
En raison des coûts d'investissement supplémentaires liés à la réversibilité de l'ATES, la pertinence d'un tel système par rapport à l'utilisation d'un doublet classique se pose. Afin de continuer à bénéficier pleinement de l'aspect stockage d'énergie propre à l'ATES, des stratégies de rééquilibrage de stockage de chaud et de froid sont nécessaires. Cela pourrait passer par la mise en place de moyens visant à diminuer la température de l'eau avant sa réinjection (tour de refroidissement ou augmentation du ΔT au niveau de l'échangeur thermique), ou encore ventiler les locaux la nuit pour réduire la demande de froid en journée (Bozkaya et Zeiler 2019).
Enfin, pour s'affranchir des apports thermiques venant de la surface, il peut être souhaitable d'exploiter des aquifères plus profonds. Toutefois, l'augmentation des coûts financiers n'étant pas proportionnels à l'augmentation de la profondeur, il convient d'analyser en détail les avantages et inconvénients de cette solution.

Dans le chapitre 6, les développements théoriques détaillés dans les chapitres 4 et 5 ont été appliqués au contexte réel de l'ENSEGID. Cet établissement universitaire s'est doté d'un ATES mis en service depuis début 2022. Ce dispositif exploite un aquifère calcaire entre 35 et 65 m de profondeur. Il alimente en chauffage et rafraîchissement pour l'instant la moitié des locaux.
Les données acquises durant la création des deux forages et des 4 piézomètres

du site ont permis de préciser le fonctionnement hydrogéologique de la zone. Il s'avère que la disposition des forages sur site (choix limité par le foncier) ne suit pas les préconisations d'usage pour garantir un fonctionnement optimal. En parallèle, la dynamique thermique du site s'est révélée être influencée par l'augmentation des températures à Bordeaux et par l'artificialisation progressive du site.
Les spécificités hydrogéologiques et thermiques du site ont été intégrées dans un modèle numérique haute résolution pour étudier leurs effets sur la performance long terme de l'ATES dans différents scénarios climatiques. Dans un scénario climatique où les températures sont stables après 2022, l'îlot de chaleur généré par les structures en surface ne semble pas impacter la dynamique thermique de l'aquifère exploité par l'ATES. Les vitesses d'écoulement rapide dans la nappe libre évitent que les apports thermiques de surface ne se propagent trop en profondeur. Toutefois, si la performance du forage chaud se montre satisfaite sur le long terme, celle du forage froid est pénalisée par le sens d'écoulement qui lessive la bulle chaude en direction de la bulle froide.
Dans un scénario climatique suivant une tendance long terme pessimiste (**RCP8.5**), l'îlot de chaleur généré atteint des profondeurs plus importante malgré les vitesses d'écoulement importante dans la nappe libre. Le fonctionnement de l'ATES s'en retrouve impacté par une diminution de l'extension de la bulle froide et une augmentation de la bulle chaude. En parallèle, l'augmentation des températures atmosphériques sur le long terme induit un besoin de rafraîchissement de plus en plus important dans le bâtiment. Cela se traduit par une vidange importante de la bulle froide, et une sous exploitation du forage chaud, synonyme d'un fonctionnement non optimal sur le long terme.
Dans ces conditions, le déploiement de dispositifs de mesures complémentaires sur le site contribuera à une meilleure caractérisation des processus en vue de leur gestion optimale future.

Le chapitre final de cette thèse détaille les impacts environnementaux de l'ATES de l'ENSEGID via une Analyse du Cycle de Vie. En se basant sur les données de prédimensionnement du système, l'ATES génère un faible impact sur le réchauffement climatique, avec une émission de 36.2 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}. Ce résultat est meilleur que des solutions conventionnelles modélisées (chaudière gaz et climatiseur électrique : 160 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}), et proche des solutions intégrant de la biomasse. En revanche, les émissions de particules fines dans l'atmosphère pénalisent la biomasse sur les impacts relatifs à la santé humaine et la qualité des écosystèmes bien plus importants.

La performance environnementale d'un ATES dépend grandement de l'origine du mix électrique utilisé pour alimenter les équipements du système. Ainsi, l'ATES de l'ENSEGID possède une meilleure performance environnementale que les ATES des Pays-Bas et de l'Allemagne (environ 100 gCO_{2eq} kW_{th}^{-1}), l'électricité de ces pays étant majoritairement issue par la combustion de gaz et de charbon, alors que l'électricité française est générée via la filière nucléaire, très peu émettrice de GES.
Dans le futur, l'ATES de l'ENSEGID devrait être étendu à la totalité des locaux de l'ENSEGID. L'extension des volumes devrait permettre d'augmenter le rendement du dispositif ATES et minimiser son empreinte environnementale par kWh d'énergie thermique produit.

En conclusion, ces travaux proposent une synthèse de phénomènes susceptibles de perturber le développement et l'exploitation d'un système ATES, en domaine urbain, dans un contexte de changement climatique. L'ATES pilote opérationnel de l'ENSEGID constitue une première à l'échelle nationale et démontre la faisabilité de ce type de système. Les projections intégrant les évolutions climatiques soulignent les problèmes associés au déséquilibre des demandes de chaud/froid au cours du temps. Avec un suivi des ouvrages constitutifs au cours de leur vie, pour lequel une méthodologie inédite a été proposée, il ressort que ces systèmes nécessitent une expertise importante pour accompagner leur exploitation pérenne, seule gage d'une contribution importante à la réduction des gaz à effet de serre et donc à l'atténuation du changement climatique.
À l'échelle nationale, la communication sur les atouts environnementaux indéniables de ces dispositifs clairement mis en avant devrait être couplée avec une approche économique donnant des clés susceptibles de lever les derniers verrous freinant encore les décideurs.

À l'heure de la rédaction de ce manuscrit, la dernière synthèse du GIEC résumant les travaux réalisés depuis 2015 vient d'être mise à disposition (IPCC 2023). Principal constat, le fonctionnement actuel de nos sociétés et les politiques de réduction de GES déjà mises en place maintiendraient les émissions aux alentours de 60 $GtCO_{2eq}an^{-1}$ durant le reste du 21e siècle (figure 7.11). Un tel scénario est loin des objectifs affichés lors de la COP de Paris en 2015 (limiter le réchauffement à 2.0 °C, voire 1.5 °C) puisqu'il mènerait à un réchauffement climatique de 3.2 °C par rapport à la période 1850-1900.

Il est peu probable que les politiques planifiées à l'horizon 2030 soient suffisantes pour atteindre ces objectifs (NDCs figure 7.11). Il existe un réel décalage

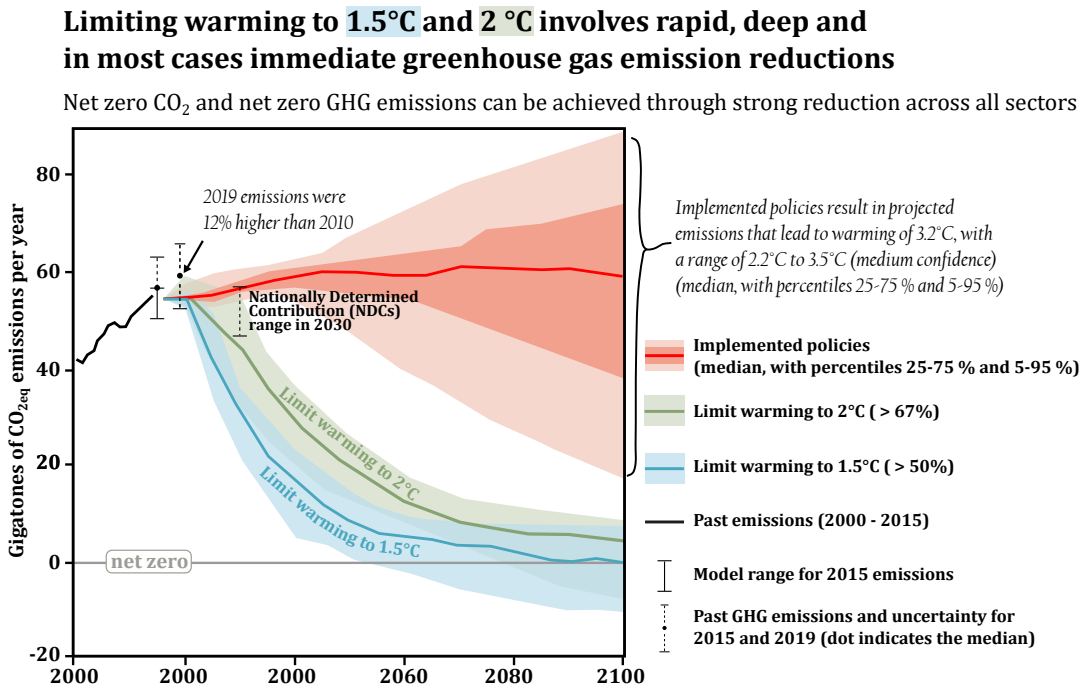


FIGURE 7.11 – Trajectoire des émissions de GES en accord avec les politiques implantées et les stratégies de réduction. Les NDCs sont les politiques de réductions d'émissions actuellement planifiées à l'horizon 2030 (figure issue de IPCC 2023)

entre les politiques mises en œuvre et celles qui seraient efficaces pour atteindre ces objectifs. Par ailleurs, le GIEC rappelle que les flux financiers actuels ne sont pas suffisants pour arriver à ces résultats (IPCC 2023). Ce dernier rapport sonne comme une véritable alerte et il semble plus que jamais urgent de mettre en œuvre des actions efficaces pour aller dans le sens des recommandations du GIEC. La communauté scientifique a un rôle indéniable à jouer dans ce domaine pour étudier, analyser, explorer de nouvelles pistes tendant à réduire les émissions, mais doit aussi tenir un rôle de conseil et d'aide à la décision politique et de vulgarisation auprès du grand public.

Bibliographie

ADEME (2022). *Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone ®(version 22.0.0)*.

Alva, Guruprasad, Yaxue Lin et Guiyin Fang (2017). « An overview of thermal energy storage systems ». *Energy* 144, p. 341-378. doi : 10.1016/j.energy.2017.12.037.

Andersson, Olof (2007). « AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE (ATES) ». In : *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*. Sous la dir. d'Halime Ö Paksoy. NATO Science Series. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 155-176. doi : 10.1007/978-1-4020-5290-3_8.

Arce, Pablo, Marc Medrano, Antoni Gil, Eduard Oró et Luisa F. Cabeza (2011). « Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe ». *Applied Energy* 88.8, p. 2764-2774. doi : 10.1016/j.apenergy.2011.01.067.

Arola, Teppo et Kirsti Korkka-Niemi (2014). « The effect of urban heat islands on geothermal potential : examples from Quaternary aquifers in Finland ». *Hydrogeol J* 22.8, p. 1953-1967. doi : 10.1007/s10040-014-1174-5.

ASHRAE (1997). *1997 ASHRAE Handbook : Fundamentals*. Atlantic Books.

— (2021). *2021 ASHRAE Handbook – Fundamentals*. Ashrae.

Attard, Guillaume, Peter Bayer, Yvan Rossier, Philipp Blum et Laurent Eisenlohr (2020). « A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities ». *Renewable Energy* 145, p. 914-924. doi : 10.1016/j.renene.2019.06.095.

Bakema, Guido (2001). « Well and Borehole Failures and Solutions in Underground Thermal Energy Storage ». Publisher : Unpublished. doi : 10.13140/RG.2.2.10214.98885.

Baker et Baker (2002). « Long-Term Ground Heat Flux and Heat Storage at a Mid-Latitude Site », p. 9.

Banks, David (2012). *An introduction to thermogeology : ground source heating and cooling*. 2nd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Ltd.

Bayer, Peter, Guillaume Attard, Philipp Blum et Kathrin Menberg (2019). « The geothermal potential of cities ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, p. 17-30. doi : 10.1016/j.rser.2019.02.019.

Bayer, Peter, Jaime A. Rivera, Daniel Schweizer, Ulrich Schärli, Philipp Blum et Ladislaus Rybach (2016). « Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles ». *Geothermics* 64, p. 289-299. doi : 10.1016/j.geothermics.2016.06.011.

Beek, C. G. E. M. van (2018). « Well-screen and well-head clogging by hydrous ferric oxides ». *Hydrogeol J* 26.8, p. 2919-2932. doi : 10.1007/s10040-018-1822-2.

Beernink, Stijn, Martin Bloemendal, Rob Kleinlugtenbelt et Niels Hartog (2022). « Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas : effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions ». *Applied Energy* 311, p. 118587. doi : 10.1016/j.apenergy.2022.118587.

Bense, V. F. et al. (2016). « Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology : SUBSURFACE DTS ». *Water Resour. Res.* 52.12, p. 9259-9273. doi : 10.1002/2016WR018869.

Benz, Susanne A., Peter Bayer, Kathrin Menberg, Stephan Jung et Philipp Blum (2015). « Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers ». *Science of The Total Environment* 524-525, p. 427-439. doi : 10.1016/j.scitotenv.2015.04.003.

Bidarmaghz, Asal, Ruchi Choudhary, Guillermo Narsilio et Kenichi Soga (2021). « Impacts of underground climate change on urban geothermal potential : Lessons learnt from a case study in London ». *Science of The Total Environment* 778. doi : 10.1016/j.scitotenv.2021.146196.

Bloemendal, Martin et Niels Hartog (2018). « Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems ». *Geothermics* 71, p. 306-319. doi : 10.1016/j.geothermics.2017.10.009.

Bloemendal, Martin, Marc Jaxa-Rozen et Theo Olsthoorn (2018). « Methods for planning of ATES systems ». *Applied Energy* 216, p. 534-557. doi : 10.1016/j.apenergy.2018.02.068.

Bloemendal, Martin, Theo Olsthoorn et Frans van de Ven (2015). « Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage ». *Science of The Total Environment* 538, p. 621-633. doi : 10.1016/j.scitotenv.2015.07.084.

Blum, Philipp, Kathrin Menberg, Fabien Koch, Susanne A. Benz, Carolin Tissen, Hannes Hemmerle et Peter Bayer (2021). « Is thermal use of groundwater a pollution ? » *Journal of Contaminant Hydrology* 239, p. 103791. doi : 10.1016/j.jconhyd.2021.103791.

Borri, Emiliano, Gabriel Zsembinszki et Luisa F. Cabeza (2021). « Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment : A bibliometric analysis and systematic review ». *Applied Thermal Engineering* 189, p. 116666. doi : 10.1016/j.applthermaleng.2021.116666.

Bourdet, J. A. Ayoub et Y. M. Plrard (1989). « Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation ». *SPE Formation Evaluation* 4.02, p. 293-302. doi : 10.2118/12777-PA.

Bourdet, D, T.M Whittle, A.A Douglas et Y.M Pirard (1983). « A new set of type curves simplifies well test analysis ». *World Oil*.

Bozkaya, Basar et Wim Zeiler (2019). « The effectiveness of night ventilation for the thermal balance of an aquifer thermal energy storage ». *Applied Thermal Engineering* 146, p. 190-202. doi : 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.106.

Cabeza, L.F., I. Martorell, L. Miró, A.I. Fernández et C. Barreneche (2015). « Introduction to thermal energy storage (TES) systems ». In : *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier, p. 1-28. doi : 10.1533/9781782420965.1.

Cabeza, Luisa F. et al. (2015). « CO2 mitigation accounting for Thermal Energy Storage (TES) case studies ». *Applied Energy* 155, p. 365-377. doi : 10.1016/j.apenergy.2015.05.121.

Caliskan, Hakan, Ibrahim Dincer et Arif Hepbasli (2012). « Thermodynamic analyses and assessments of various thermal energy storage systems for buildings ». *Energy Conversion and Management* 62, p. 109-122. doi : 10.1016/j.enconman.2012.03.024.

Cho, W., Jae-Owan Lee et Sangki Kwon (2008). « Thermal Conductivity of Compacted Bentonite and Bentonite-Sand Mixture ». *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*.

Colclough, Shane et Teresa McGrath (2015). « Net energy analysis of a solar combi system with Seasonal Thermal Energy Store ». *Applied Energy* 147, p. 611-616. doi : 10.1016/j.apenergy.2015.02.088.

Dalla Santa, Giorgia et al. (2020). « An updated ground thermal properties database for GSHP applications ». *Geothermics* 85, p. 101758. doi : 10.1016/j.geothermics.2019.101758.

Dassargues, Alain (2018). *Hydrogeology : goundwater science and engineering*. First Edition. Boca Raton, Florida : Taylor & Francis, A CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa plc.

Dědeček, Petr, Jan Šafanda et Dušan Rajver (2012). « Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia ». *Climatic Change* 113.3-4, p. 787-801. doi : 10.1007/s10584-011-0373-5.

Delottier, Hugo (2017). « Quantification et réduction des incertitudes associées aux modèles hydrodynamiques de gestion quantitative des eaux souterraines ». Thèse de doct. Bordeaux III : Université Michel de Montaigne.

Diao, Nairen, Qinyun Li et Zhaohong Fang (2004). « Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection ». *International Journal of Thermal Sciences* 43.12, p. 1203-1211. doi : 10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009.

Diersch, Hans-Jörg G (2013). *FEFLOW : finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.

Dinçer, İbrahim et Marc A. Rosen (2010a). « Numerical Modeling and Simulation of Thermal Energy Storage Systems ». In : *Thermal Energy Storage*. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, p. 335-412. doi : 10.1002/9780470970751.ch7.

— (2010b). *Thermal Energy Storage (TES) Methods*. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, p. 83-190. doi : 10.1002/9780470970751.ch3.

Drenkelfort, Gregor, Stefan Kieseler, André Pasemann et Frank Behrendt (2014). « Aquifer thermal energy storages as a cooling option for German data centers ». *Energy Efficiency* 8.2, p. 385-402. doi : 10.1007/s12053-014-9295-1.

Faraj, Khaireldin, Mahmoud Khaled, Jalal Faraj, Farouk Hachem et Cathy Castelain (2020). « Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings : A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119, p. 109579. doi : 10.1016/j.rser.2019.109579.

Fenta, M.C., D. K. Potter et J. Szanyi (2021). « Fibre Optic Methods of Prospecting : A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics ». *Surv Geophys* 42, p. 551-584. doi : 10.1007/s10712-021-09634-8.

Ferguson, G et H Beltrami (2006). « Transient lateral heat flow due to land-use changes ». *Earth and Planetary Science Letters* 242.1-2, p. 217-222. doi : 10.1016/j.epsl.2005.12.001.

Ferguson, Grant et Allan D. Woodbury (2007). « Urban heat island in the subsurface : SUBSURFACE URBAN HEAT ISLAND ». *Geophys. Res. Lett.* 34.23, n/a-n/a. doi : 10.1029/2007GL032324.

Ferguson et Woodbury (2004). « Subsurface heat flow in an urban environment : SUBSURFACE URBAN HEAT FLOW ». *J. Geophys. Res.* 109.B2. doi : 10.1029/2003JB002715.

Fetter, C. W. (2014). *Applied hydrogeology*. Fourth edition, new international edition. Pearson custom library. Harlow, Essex : Pearson Education.

Finnveden, Göran, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington et Sangwon Suh (2009). « Recent developments in Life Cycle Assessment ». *Journal of Environmental Management* 91.1, p. 1-21. doi : 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

Fleuchaus, Godschalk, Stober et Blum (2018). « Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, p. 861-876. doi : 10.1016/j.rser.2018.06.057.

Fleuchaus, Schüppler, Godschalk, Bakema et Blum (2019). « Performance analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) ». *Renewable Energy* 146, p. 1536-1548. doi : 10.1016/j.renene.2019.07.030.

Fujino, Junichi, Rajesh Nair, Mikiko Kainuma, Toshihiko Masui et Yuzuru Matsuoka (2006). « Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model ». *The Energy Journal* 27, p. 343-353.

Ganguly, Sayantan et M.S. Mohan Kumar (2014). « Analytical solutions for movement of cold water thermal front in a heterogeneous geothermal reservoir ». *Applied Mathematical Modelling* 38, p. 451-463. doi : 10.1016/j.apm.2013.06.031.

Ghaebi, H, M N Bahadori et M H Saidi (2016). « Economic and environmental evaluation of di erent operation alternatives to aquifer thermal energy storage in Tehran, Iran ». *Scientia Iranica*, p. 14.

Giesen, Nick van de, Susan C. Steele-Dunne, Jop Jansen, Olivier Hoes, Mark B. Hausner, Scott Tyler et John Selker (2012). « Double-Ended Calibration of Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data ». *Sensors* 12, p. 5471-5485. doi : 10.3390/s120505471.

Gjengedal, Sondre, Randi K. Ramstad, Bernt O. Hilmo et Bjørn S. Frengstad (2020). « Fouling and clogging surveillance in open loop GSHP systems : A systematic procedure for fouling and clogging detection in the whole groundwater circuit ». *Bull Eng Geol Environ* 79, p. 69-82. doi : 10.1007/s10064-019-01556-5.

Godinaud, J., M. Klepikova, F. Larroque, N. Guihéneuf, A. Dupuy et O. Bour (2023). « Clogging detection and productive layers identification along boreholes using Active Distributed Temperature Sensing ». *Journal of Hydrology* 617, p. 129113. doi : 10.1016/j.jhydrol.2023.129113.

Grynning, Steinar, Elisabeth Wærnes, Tore Kvande et Berit Time (2017). « Climate adaptation of buildings through MOM- and upgrading - State of the art and research needs ». *Energy Procedia*. 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway 132, p. 622-627. doi : 10.1016/j.egypro.2017.09.693.

Hakala, Petri, Sami Vallin, Teppo Arola et Ilkka Martinkauppi (2022). « Novel use of the enhanced thermal response test in crystalline bedrock ». *Renewable Energy* 182, p. 467-482. doi : 10.1016/j.renene.2021.10.020.

Hantush, Madih Salih (1956). « Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers ». *Trans. AGU* 37.6, p. 702. doi : 10.1029/TR037i006p00702.

Harris, Robert N. et David S. Chapman (1997). « Borehole Temperatures and a Baseline for 20th-Century Global Warming Estimates ». *Science* 275.5306, p. 1618-1621. doi : 10.1126/science.275.5306.1618.

Heier, Johan, Chris Bales et Viktoria Martin (2015). « Combining thermal energy storage with buildings – a review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, p. 1305-1325. doi : 10.1016/j.rser.2014.11.031.

Herb, William R., Ben Janke, Omid Mohseni et Heinz G. Stefan (2008). « Ground surface temperature simulation for different land covers ». *Journal of Hydrology* 356.3-4, p. 327-343. doi : 10.1016/j.jhydrol.2008.04.020.

Hill, Mark et Zahir DeHouche (2017). « A comparative analysis of the effectiveness of aquifer thermal energy storage in Expeditionary Campaign Infra-

structure ». *Applied Thermal Engineering* 114, p. 271-278. DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.133.

HITCHON, Brian (1984). « Geothermal Gradients, Hydrodynamics, and Hydrocarbon Occurrences, Alberta, Canada ». *Bulletin* 68. DOI : 10.1306/AD461377-16F7-11D7-8645000102C1865D.

HOES, Hans, Johan DESMEDT, Nico ROBEYN et Johan VAN BAEL (2006). *Experiences with ATES applications in Belgium Operational results and energy savings*.

HOUBEN, Georg et Christoph TRESKATIS (2007). *Water well rehabilitation and reconstruction*. OCLC : ocm72470726. New York : McGraw-Hill.

HUANG, Shaopeng, Henry N. POLLACK et Po-Yu SHEN (2000). « Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures ». *Nature* 403.6771, p. 756-758. DOI : 10.1038/35001556.

HUMBERT, Sébastien (2014). « IMPACT 2002+ : User Guide : draft for version Q2.21 ». Publisher : Quantis. DOI : 10.22005/BCU.224812.

HURTIG, E., S. GROSWIG et K. KÜHN (1996). « Fibre optic temperature sensing : application for subsurface and ground temperature measurements ». *Tectonophysics* 257, p. 101-109. DOI : 10.1016/0040-1951(95)00124-7.

INRS (2007). *Fiche Pratique de Sécurité ED 23 - L'aménagement des bureaux*. Rapp. tech.

IPCC (1996). *SAR Climate Change 1995 : The Science of Climate Change — IPCC*. Rapp. tech.

— (2014a). « Buildings ». In : *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi :10.1017/CBO9781107415416.015. Cambridge : Cambridge University Press, p. 671-738.

— (2014b). *Climate change 2014 : synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. OCLC : 914851124. Geneva, Switzerland : Core Writing Team, Pachauri, Rajendra Kumar et Meyer, Leo A.

— (2014c). « Introductory Chapter ». In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom et New York, USA : Cambridge University Press, p. 111-150. DOI : 10.1017/CBO9781107415416.007.

— (2014d). « Sustainable Development and Equity ». In : *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Fifth*

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press. DOI : 10.1017/CBO9781107415416.010.

IPCC (2018a). « Framing and context ». In : *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In Press, p. 51-83.

— (2018b). « Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems ». In : *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In Press, p. 175-311.

— (2023). *SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*. Rapp. tech. AR6 SYR, p. 36.

Isaac, Morna et Detlef P. van Vuuren (2008). « Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change ». *Energy Policy* 37.2, p. 507-521. DOI : 10.1016/j.enpol.2008.09.051.

Jolliet, Olivier, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer et Ralph Rosenbaum (2003). « IMPACT 2002+ : A new life cycle impact assessment methodology ». *Int J LCA* 8.6, p. 324. DOI : 10.1007/BF02978505.

Karasu, Huseyin et Ibrahim Dincer (2020). « Life cycle assessment of integrated thermal energy storage systems in buildings : A case study in Canada ». *Energy and Buildings* 217, p. 109940. DOI : 10.1016/j.enbuild.2020.109940.

Kilkiş, Şiir, Cong Wang, Folke Björk et Ivo Martinac (2017). « Cleaner energy scenarios for building clusters in campus areas based on the Rational Exergy Management Model ». *Journal of Cleaner Production*. Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems 155, p. 72-82. DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.10.126.

Kruseman, G. P. et N. A. de Ridder (1994). *Analysis and evaluation of pumping test data*. 2. ed. (compl. rev.), repr. ILRI publication 47. OCLC : 258203525. Wageningen : International Institute for Land Reclamation et Improvement.

Lan, X, K.W Thoning et E.J Dlugokencky (2022). *Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements*. URL : https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10.

Larroque, François (2004). « Gestion globale d'un système aquifère complexe. Application à l'ensemble aquifère multicouche médocain ». Thèse de doct.

Lee, Kun Sang (2013). « Aquifer Thermal Energy Storage ». In : *Underground Thermal Energy Storage*. London : Springer London, p. 59-93. DOI : 10.1007/978-1-4471-4273-7_4.

Li, Gang (2015). « Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, p. 897-923. DOI : 10.1016/j.rser.2015.09.006.

Li, Kuang-Yi, Shaw-Yang Yang et Hund-Der Yeh (152010). « An analytical solution for describing the transient temperature distribution in an aquifer thermal energy storage system ». *Hydrological Processes* 24.25, p. 3676-3688. DOI : 10.1002/hyp.7779.

Lin, Ye-Chen, Ting-Fang Hu et Hund-Der Yeh (2019). « Analytical Model for Heat Transfer Accounting for Both Conduction and Dispersion in Aquifers With a Robin-Type Boundary Condition at the Injection Well ». *Water Resources Research* 55.8, p. 7379-7399. DOI : 10.1029/2019WR024966.

Lisø, Kim Robert (2006). « Building Envelope Performance Assessments in Harsh Climates : Methods for Geographically Dependent Design ». Thèse de doct. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi.

Lu, Ping, Nageswara Lalam, Mudabbir Badar, Bo Liu, Benjamin T. Chorpening, Michael P. Buric et Paul R. Ohodnicki (2019). « Distributed optical fiber sensing : Review and perspective ». *Applied Physics Reviews* 6.4, p. 041302. DOI : 10.1063/1.5113955.

Lu, Tian et He (2019). « Evaluating the global potential of aquifer thermal energy storage and determining the potential worldwide hotspots driven by socio-economic, geo-hydrologic and climatic conditions ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112, p. 788-796. DOI : 10.1016/j.rser.2019.06.013.

Menberg, Kathrin, Philipp Blum, Axel Schaffitel et Peter Bayer (2013). « Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island ». *Environ. Sci. Technol.* 47.17, p. 9747-9755. DOI : 10.1021/es401546u.

Miró, Laia, Sarah Brückner et Luisa F. Cabeza (2015). « Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries ». *Re-*

newable and Sustainable Energy Reviews 51, p. 847-855. DOI : 10.1016/j.rser.2015.06.035.

MOHAJERANI, Abbas, Jason BAKARIC et Tristan JEFFREY-BAILEY (2017). « The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete ». *Journal of Environmental Management* 197, p. 522-538. DOI : 10.1016/j.jenvman.2017.03.095.

MOLINA-GIRALDO, Nelson, Peter BAYER et Philipp BLUM (2011). « Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions ». *International Journal of Thermal Sciences* 50.7, p. 1223-1231. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.004.

MOULOPOULOS, Alexandros (2014). « Life Cycle Assessement of an Aquifer Thermal Energy Storage system ». MSc Thesis report. Utrecht University.

NI, Zhuobiao, Yue WANG, Yafei WANG, Shaoqing CHEN, Manxi XIE, Tim GROTENHUIS et Rongliang QIU (2020). « Comparative Life-Cycle Assessment of Aquifer Thermal Energy Storage Integrated with in Situ Bioremediation of Chlorinated Volatile Organic Compounds ». *Environmental Science & Technology* 54.5, p. 3039-3049. DOI : 10.1021/acs.est.9b07020.

NORDBOTTEN, Jan Martin (2017). « Analytical solutions for aquifer thermal energy storage ». *Water Resources Research* 53.2, p. 1354-1368. DOI : 10.1002/2016WR019524.

NORDELL, B., A. SNIJDERS et L. STILES (2015). « The use of aquifers as thermal energy storage (TES) systems ». In : *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier, p. 87-115. DOI : 10.1533/9781782420965.1.87.

POPHILLAT, William, Guillaume ATTARD, Peter BAYER, Jozsef HECHT-MÉNDEZ et Philipp BLUM (2020). « Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems ». *Renewable Energy* 147, p. 2696-2707. DOI : 10.1016/j.renene.2018.07.148.

PREVIATI, Alberto, Jannis EPTING et Giovanni B. CROSTA (2022). « The subsurface urban heat island in Milan (Italy) - A modeling approach covering present and future thermal effects on groundwater regimes ». *Science of The Total Environment* 810, p. 152119. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2021.152119.

RALUY, Rosa Gemma, Luis M. SERRA, Mateo GUADALFAJARA et Miguel A. LOZANO (2014). « Life Cycle Assessment of Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage ». *Energy Procedia* 48, p. 966-976. DOI : 10.1016/j.egypro.2014.02.110.

Ramos, Gustavo, Jesus Carrera, Susana Gómez, Carlos Minutti et Rodolfo Camacho (2017). « A stable computation of log-derivatives from noisy drawdown data : COMPUTATION OF NOISY LOG-DERIVATIVES ». *Water Resour. Res.* 53.9, p. 7904-7916. doi : 10.1002/2017WR020811.

Read, T., O. Bour, J. S. Selker, V. F. Bense, T. Le Borgne, R. Hochreutener et N. Lavenant (2014). « Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes ». *Water Resour. Res.* 50, p. 3706-3713. doi : 10.1002/2014WR015273.

Rees, Simon (2016). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*.

REN21 (2017). *Renewables 2017 : Global Status Report*.

Renard, Philippe, Damian Glenz et Miguel Mejias (2009). « Understanding diagnostic plots for well-test interpretation ». *Hydrogeol J* 17.3, p. 589-600. doi : 10.1007/s10040-008-0392-0.

Riahi, Keywan, Arnulf Grübler et Nebojsa Nakicenovic (2007). « Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization ». *Technological Forecasting and Social Change* 74.7, p. 887-935. doi : 10.1016/j.techfore.2006.05.026.

Rivera, Jaime A., Philipp Blum et Peter Bayer (2015). « Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers ». *Applied Energy* 146, p. 421-433. doi : 10.1016/j.apenergy.2015.02.035.

— (2016). « Influence of spatially variable ground heat flux on closed-loop geothermal systems : Line source model with nonhomogeneous Cauchy-type top boundary conditions ». *Applied Energy* 180, p. 572-585. doi : 10.1016/j.apenergy.2016.06.074.

— (2017). « Increased ground temperatures in urban areas : Estimation of the technical geothermal potential ». *Renewable Energy* 103, p. 388-400. doi : 10.1016/j.renene.2016.11.005.

Rohde, Robert A. et Zeke Hausfather (172020). « The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record ». *Earth System Science Data* 12.4, p. 3469-3479. doi : 10.5194/essd-12-3469-2020.

Rostampour, Vahab, Marc Jaxa-Rozen, Martin Bloemendal, Jan Kwakkel et Tamás Keviczky (2019). « Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) smart grids : Large-scale seasonal energy storage as a distributed energy management solution ». *Applied Energy* 242, p. 624-639. doi : 10.1016/j.apenergy.2019.03.110.

Santamouris, M (172013). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Routledge. doi : 10.4324/9781315073774.

Schulze-Makuch, Dirk (2005). « Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior ».

Schüppler, Fleuchaus et Blum (2019). « Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany ». *Geotherm Energy* 7, p. 11. doi : 10.1186/s40517-019-0127-6.

Schwarz, Marius, Christina Nakhle et Christof Knoeri (2019). « Innovative designs of building energy codes for building decarbonization and their implementation challenges ». *Journal of Cleaner Production* 248, p. 119260. doi : 10.1016/j.jclepro.2019.119260.

Seddegh, Saeid, Xiaolin Wang, Alan D. Henderson et Ziwen Xing (2015). « Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium : A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, p. 517-533. doi : 10.1016/j.rser.2015.04.147.

Selker, Frank et John Selker (2018). « Investigating Water Movement Within and Near Wells Using Active Point Heating and Fiber Optic Distributed Temperature Sensing ». *Sensors* 18. doi : 10.3390/s18041023.

Sethi, V.P. et S.K. Sharma (2007). « Greenhouse heating and cooling using aquifer water ». *Energy* 32.8, p. 1414-1421. doi : 10.1016/j.energy.2006.10.022.

Shanafield, M., E. W. Banks, J. W. Arkwright et M. B. Hausner (2018). « Fiber-Optic Sensing for Environmental Applications : Where We Have Come From and What Is Possible ». *Water Resour. Res.* 54, p. 8552-8557. doi : 10.1029/2018WR022768.

Simon, Nataline (2020). « Développement des méthodes actives de mesures distribuées de température par fibre optique pour la quantification des écoulements souterrains : apports et limites pour la caractérisation des échanges nappe/rivière. » Thèse de doct. Rennes : Université Rennes.

Simon, Nataline, Olivier Bour, Nicolas Lavenant, Gilles Porel, Benoît Nauleau, Behzad Pouladi et Laurent Longuevergne (2020). « A Comparison of Different Methods to Estimate the Effective Spatial Resolution of FO-DTS Measurements Achieved during Sandbox Experiments ». *Sensors* 20. doi : 10.3390/s20020570.

Skogsberg, Kjell (2002). « The Sundsvall Regional Hospital snow cooling plant—results from the first year of operation ». *Cold Regions Science and Technology* 34.2, p. 135-142. doi : 10.1016/S0165-232X(01)00067-2.

Smith, Steven J. et T.M.L. Wigley (2006). « Multi-Gas Forcing Stabilization with Minicam ». *The Energy Journal* 27, p. 373-391.

Sommer, W., J. Valstar, P. van Gaans, T. Grotenhuis et H. Rijnaarts (2013). « The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage ». *Water Resources Research* 49. Number : 12, p. 8128-8138. doi : 10.1002/2013WR013677.

Song, Wei, Xiaoxiu Liu, Tuanfeng Zheng et Jiaming Yang (2020). « A review of recharge and clogging in sandstone aquifer ». *Geothermics* 87, p. 101857. doi : 10.1016/j.geothermics.2020.101857.

Soubeyroux, J-M et al. (2020). *Les nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole*. Rapp. tech. DRIAS.

Stemmle, Ruben, Philipp Blum, Simon Schüppler, Paul Fleuchaus, Melissa Limoges, Peter Bayer et Kathrin Menberg (2021). « Environmental impacts of aquifer thermal energy storage (ATES) ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151, p. 111560. doi : 10.1016/j.rser.2021.111560.

Suszanowicz, Dariusz (2017). « Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems ». *E3S Web Conf.* 19. Sous la dir. de M. Wzorek, G. Królczyk et A. Król, p. 01024. doi : 10.1051/e3sconf/20171901024.

Sztrákos, Károly et Etienne Steurbaut (2017). « Révision lithostratigraphique et biostratigraphique de l'Oligocène d'Aquitaine occidentale (France) ». *Geodiversitas* 39, p. 741-781. doi : 10.5252/g2017n4a6.

Tago, Josue et Antonio Hernández-Espriú (2017). « A B-Spline Framework for Smooth Derivative Computation in Well Test Analysis Using Diagnostic Plots ». *Groundwater* 56. doi : 10.1111/gwat.12579.

Talmatsky, Ella et Abraham Kribus (2008). « PCM storage for solar DHW : An unfulfilled promise ? » *Solar Energy* 82.10, p. 861-869. doi : 10.1016/j.solener.2008.04.003.

Tang, Anh-Minh, Yu-Jun Cui et Trung-Tinh Le (2008). « A study on the thermal conductivity of compacted bentonites ». *Applied Clay Science* 41, p. 181-189. doi : 10.1016/j.clay.2007.11.001.

Taniguchi, Makoto, Takeshi Uemura et Karen Jago-on (2007). « Combined Effects of Urbanization and Global Warming on Subsurface Temperature in Four Asian Cities ». *Vadose Zone Journal* 6.3, p. 591-596. doi : 10.2136/vzj2006.0094.

Tans, P et Ralph Keeling (2022). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxyde*. url : https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html.

Taylor, Craig A. et Heinz G. Stefan (2009). « Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization ». *Journal of Hydrology* 375.3-4, p. 601-612. doi : 10.1016/j.jhydrol.2009.07.009.

Theis, Charles V. (1935). « The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage ». *Trans. AGU* 16.2, p. 519. doi : 10.1029/TR016i002p00519.

Tissen, Carolin, Susanne A Benz, Kathrin Menberg, Peter Bayer et Philipp Blum (2019). « Groundwater temperature anomalies in central Europe ». *Environ. Res. Lett.* 14.10, p. 104012. doi : 10.1088/1748-9326/ab4240.

Tomasetta, C., C. C. D. F. Van Ree et J. Griffioen (2015). « Life Cycle Analysis of Underground Thermal Energy Storage ». In : *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*. Sous la dir. de Giorgio Lollino, Andrea Manconi, Fausto Guzzetti, Martin Culshaw, Peter Bobrowsky et Fabio Luino. Cham : Springer International Publishing, p. 1213-1217. doi : 10.1007/978-3-319-09048-1_232.

Tombe, Bas F. des, Mark Bakker, Frank Smits, Frans Schaars et Kees-Jan Made (2019). « Estimation of the Variation in Specific Discharge Over Large Depth Using Distributed Temperature Sensing (DTS) Measurements of the Heat Pulse Response ». *Water Resour. Res.* 55, p. 811-826. doi : 10.1029/2018WR024171.

Tombe, Bas.F des (2021). « Measuring horizontal groundwater flow with distributed temperature sensing along cables installed with direct-push equipment ». Thèse de doct. Delft : Delft University of Technology.

United-Nations (2015). *Adoption of the Paris agreements*.

Urge-Vorsatz, Diana, Ksenia Petrichenko, Miklos Antal, Maja Staniec, Eren Ozden et Elena Labzina (2012). *Best Practice Policies for Low Energy and Carbon Buildings. A Scenario Analysis. Research report prepared by the Center for Climate Change and Sustainable Policy (3CSEP) for the Global Buildings Performance Network*. Rapp. tech. Global Buildings Performance Network.

Val, Laura del, Jesús Carrera, María Pool, Lurdes Martínez, Carlos Casanovas, Olivier Bour et Albert Folch (2021). « Heat Dissipation Test With Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing to Estimate Groundwater Flux ». *Water Res* 57. doi : 10.1029/2020WR027228.

Vanhoudt, D., J. Desmedt, J. Van Bael, N. Robeyn et H. Hoes (2011). « An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital : Long-term expe-

rimental evaluation of energy and cost savings ». *Energy and Buildings* 43, p. 3657-3665. DOI : 10.1016/j.enbuild.2011.09.040.

VERBEKE, Stijn et Amaryllis AUDENAERT (2018). « Thermal inertia in buildings : A review of impacts across climate and building use ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, p. 2300-2318. DOI : 10.1016/j.rser.2017.08.083.

VISSER, Philip W., Henk KOOI, Victor BENSE et Emiel BOERMA (2020). « Impacts of progressive urban expansion on subsurface temperatures in the city of Amsterdam (The Netherlands) ». *Hydrogeol J* 28.5, p. 1755-1772. DOI : 10.1007/s10040-020-02150-w.

VISSER, Philip W., Henk KOOI et Pieter J. STUYFZAND (2015). « The thermal impact of aquifer thermal energy storage (ATES) systems : a case study in the Netherlands, combining monitoring and modeling ». *Hydrogeol J* 23.3. Number : 3, p. 507-532. DOI : 10.1007/s10040-014-1224-z.

VUUREN, Detlef P. van, Michel G. J. den ELZEN, Paul L. LUCAS, Bas EICKHOUT, Bart J. STRENGERS, Bas van RUIJVEN, Steven WONINK et Roy van HOUDT (2007). « Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels : an assessment of reduction strategies and costs ». *Climatic Change* 81.2, p. 119-159. DOI : 10.1007/s10584-006-9172-9.

WATSON, Sean M. et Rob WESTAWAY (2020). « Borehole temperature log from the Glasgow Geothermal Energy Research Field Site : a record of past changes to ground surface temperature caused by urban development ». *SJG* 56.2, p. 134-152. DOI : 10.1144/sjg2019-033.

WELSCH, Bastian, Laura GÖLLNER-VÖLKER, Daniel O. SCHULTE, Kristian BÄR, Ingo SASS et Liselotte SCHEBEK (2018). « Environmental and economic assessment of borehole thermal energy storage in district heating systems ». *Applied Energy* 216, p. 73-90. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.02.011.

WERNET, Gregor, Christian BAUER, Bernhard STEUBING, Jürgen REINHARD, Emilia MORENO-RUIZ et Bo WEIDEMA (2016). « The ecoinvent database version 3 (part I) : overview and methodology ». *Int J Life Cycle Assess* 21.9, p. 1218-1230. DOI : 10.1007/s11367-016-1087-8.

WORTHINGTON, Mark A (2011). « Aquifer thermal energy storage : an enabling green technology for campus district energy systems ». In : *Proceedings of 24th annual campus energy conference*. Miami, US.

WU, Jing-hong, Bin SHI, Ding-feng CAO, Hong-tao JIANG, Xue-fan WANG et Kai GU (2017). « Model test of soil deformation response to draining-recharging

conditions based on DFOS ». *Engineering Geology* 226, p. 107-121. DOI : 10.1016/j.enggeo.2017.04.025.

WWF (2020). *Bending the curve of biodiversity loss*. Living planet report 2020. Gland : WWF.

YAMANO, Makoto, Shusaku GOTO, Akinobu MIYAKOSHI, Hideki HAMAMOTO, Rachmat Fajar LUBIS, Vuthy MONYRATH et Makoto TANIGUCHI (2009). « Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution ». *Science of The Total Environment* 407.9, p. 3120-3128. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2008.11.019.

ZHANG, Bo, Kai GU, Bin SHI, Chun LIU, Peter BAYER, Guangqing WEI, Xülong GONG et Lei YANG (2020). « Actively heated fiber optics based thermal response test : A field demonstration ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134. DOI : 10.1016/j.rser.2020.110336.

Annexes

ANNEXE A

Modélisation demande thermique B5 : Caractéristiques du bâtiment

Apports Externes		
Entité	**Caractéristiques**	**Références**
Toit	$U = 0.33\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$ Longueur = 150 m Largeur = 100 m	Toit avec une bonne isolation type RT 2012
Mur N et S	$U = 0.33\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$ Longueur = 150.0 Hauteur = 3.0	Mur avec une bonne isolation type RT 2012
Mur E et W	$U = 0.33\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$ Longueur = 100.0 Hauteur = 3.0	Mur avec une bonne isolation type RT 2012
Vitre N	$U = 1.71\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$, SC = 0.3, A = 75 SCL = 115–150–118–109–90 Mai–Juin–Juillet–Aout–Sept	ASHRAE Fundamental Handbook 1997 (Table 5 & 11 Chap-29, Table 36-D Chap 28)
Vitre S	U = 1.71, SC = 0.3, A = 75 SCL = 420–366–407–525–671 Mai/Juin/Juillet/Aout/Sept	ASHRAE Fundamental Handbook 1997 (Table 5 & 11 Chap-29, Table 36-D Chap 28)
Vitre E et W	U = 1.71 , SC = 0.3, A = 50 SCL = 697/684/684/681/630 Mai/Juin/Juillet/Aout/Sept	ASHRAE Fundamental Handbook 1997 (Table 5 & 11 Chap-29, Table 36-D Chap 28)
Dalle	$F_p = 1.63\,W\,m^{-1}\,K^{-1}$ Longueur = 150 m Largeur = 100 m	ASHRAE Fundamental Handbook 2021 (Table 24 Chap-18)

Apports Internes		
Entité	**Caractéristiques**	**Références**
Occupants	$N = 652$ $P_{occ} = 117$ W O= 0.7	ASHRAE Fundamental Handbook 2021 (Table 1 Chap-18)
Postes de travail	$N = 652$ $P_{po} = 0.69\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ $A_{po} = 11.5\,\mathrm{m^2}$ O= 0.7	Poste de travail : 1 ordinateur portable par poste + 2 écrans + 1 imprimante pour 10 postes ASHRAE Fundamental Handbook 2021 (Table 11 Chap-18)
Éclairage	$A = 15\,000\,\mathrm{m^2}$ $E_v = 500$ lux $\eta = 140$ lm W^{-1} $H_e = 0.08$ W W^{-1}	Référence pour des LED et E_v d'éclairage de bureau (Suszanowicz 2017)
Equipements divers	5 Machines à café (P = 376 W) 5 Micro-ondes (P = 700 W) 5 Refrigérateurs (P = 400 W) 5 Distrib. de boisson (P = 600 W) 10 Vidéos projecteurs (P = 300) 10 Micros (P = 15W)	ASHRAE Fundamental Handbook 2021 (Table 10 Chap-18)
Ventilation	$Q_{vent} = 7.0\,\mathrm{L\,s^{-1}}$ personne^{-1}	(INRS 2007)

ANNEXE B

L'indice Degré Journalier Unifié : une information sur la sévérité du climat pour l'estimation des demandes thermiques du bâtiment

L'indice de Degré Journalier Unifié est un indicateur utilisé pour analyser la sévérité du climat sur une période de 1 an et permet de classer un lieu dans une certaine zone climatique (ASHRAE 2021). C'est aussi un indicateur utilisé pour estimer la demande thermique des bâtiments en chauffage et rafraichissement. Il s'exprime de la manière suivante en hiver :

$$DJU_{chauffage} = \sum_{i=1}^{N} (T_{base} - T_i) \tag{B.1}$$

En été, la formule devient :

$$DJU_{climatisation} = \sum_{i=1}^{N} (T_i - T_{base}) \tag{B.2}$$

Avec N le nombre de jours considéré dans une période estivale ou hivernale, T_{base} la température de base (°C) requise dans un bâtiment pour le chauffage ou la climatisation, T_i la température moyenne d'un jour i. Si la valeur du DJU à un jour $i < 0$, elle n'est pas comptabilisée dans la somme.

ANNEXE C

Détail des processus utilisés dans Écoinvent

C.1 Processus utilisés dans le scénarios de comparaison à l'ATES ENSEGID

Processus utilisés dans les scénarios testant l'influence du mix électrique

- *electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted | electricity, low voltage | APOS,U - FR*,
- *market for electricity, low voltage|electricity, low voltage|APOS,U - DE* ;

Le processus de Ecoinvent concernant la production d'électricité via des panneaux photovoltaïques permet d'estimer la superficie de panneaux nécessaire pour fournir la demande électrique. Ainsi, tous les processus inhérents à la fabrication des panneaux sont pris en compte dans cette étape.

Processus utilisés dans les scénarios ACV solutions énergétiques conventionnelles

Climatisation

- *absorption chiller production, 100kW | absorption chiller, 100kW | APOS,U - RoW*
- *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | APOS,U - FR*

Chauffage

- *heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW | heat, central or small-scale, natural gas | APOS,U - Europe without Switzerland*
- *heat production, wood pellet, at furnace 25kW, state-of-the-art 2014 | heat, central or small-scale, other than natural gas | APOS,U - CH*
- *heat production, wood chips from industry, at furnace 50kW, state-of-the-art 2014 | heat, central or small-scale, other than natural gas | APOS,U - CH*

C.2 Processus utilisés dans l'ICV de l'ATES ENSEGID

Création forage géothermique

Composant	Processus ACV	Quantité par puits	Provenance données
Bentonite	market for bentonite | bentonite | APOS,U - GLO	2000 kg	Suivi chantier
Ciment	market for concrete, normal | concrete, normal | APOS,U - RoW	5500 kg	Suivi chantier
Tube acier inox	market for chromium steel pipe | chromium steel pipe | APOS,U - GLO	1139 kg	Suivi chantier
Tube acier	- market for drawing of pipe, steel | drawing of pipe, steel | APOS,U - GLO -market for reinforcing steel | reinforcing steel | APOS,U - GLO	630 kg	Suivi chantier
Tete de forage	market for steel, chromium steel 18/8 | steel, chromium steel 18/8 | APOS,U - GLO	650 kg	Stemmle et al, 2021
Chape béton	market for concrete, normal | concrete, normal | APOS,U - RoW	0.2 m^3	Suivi chantier
Massif filtrant	market for gravel, round | gravel, round | APOS,U - RoW	9000 kg	Suivi chantier
Acide chlorhydrique	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | APOS,U - RoW	5000 kg	Suivi chantier
Diesel pour machines (forage+ manutention)	market for diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | APOS,U - GLO	2550 L	Suivi chantier
Diesel pour groupe électrogène	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | APOS,U - GLO	1000 L	Suivi chantier
Eau pour forer	tap water production, underground water with chemical treatment | tap water | APOS,U - Europe without Switzerland	100 t	Données approximative (panne compteur)
Rejet eau égout essai de pompage	market for wastewater, unpolluted | wastewater, unpolluted | APOS,U - RoW	2730 m^3	

TABLE C.1 – Inventaire du cycle de vie d'un forage géothermique

Creation piézomètre

Composant	Processus ACV	Quantité par puits	Provenance données
Bentonite	market for bentonite | bentonite | APOS,U - GLO	525kg	Suivi chantier
Ciment	market for concrete, normal | concrete, normal | APOS,U - RoW	740 kg	Suivi chantier
Tube PCV	- market for polyvinylchloride, bulk polymerised | polyvinylchloride, bulk polymerised | APOS,U - GLO - market for extrusion, plastic pipes | extrusion, plastic pipes | APOS,U - GLO	233 kg	Suivi chantier
Tube acier	- market for drawing of pipe, steel | drawing of pipe, steel | APOS,U - GLO -market for reinforcing steel | reinforcing steel | APOS,U - GLO	460 kg	Suivi chantier
Massif filtrant	market for gravel, round | gravel, round | APOS,U - RoW	1000 kg	Suivi chantier
Diesel pour machines (forage+ manutention)	market for diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | APOS,U - GLO	500 L	Suivi chantier
Diesel pour groupe électrogène	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | APOS,U - GLO	250 L	Suivi chantier
Eau pour forer	tap water production, underground water with chemical treatment | tap water | APOS,U - Europe without Switzerland	50 t	Données approximative (panne compteur)

TABLE C.2 – Inventaire du cycle de vie d'un piézomètre

Equipement intérieur

Composant	Processus ACV	Quantité	Provenance données
Pompe à chaleur	market for heat pump, 30kW | heat pump, 30kW | APOS,U - GLO	1	
Isolation sonore	market for polyurethane, flexible foam | polyurethane, flexible foam | APOS,U - RoW	50 kg	Stemmle et al, 2021
Gaz réfrigérant pour PAC	refrigerant R134a production | refrigerant R134a | APOS,U - RoW	25 kg	Stemmle et al, 2021
Echangeur thermique	steel production, electric, chromium steel 18/8 | steel, chromium steel 18/8 | APOS,U - RER	1000 kg	Stemmle et al, 2021
Isolation echangeur	market for polyurethane, rigid foam | polyurethane, rigid foam | APOS,U - RoW	30 kg	Stemmle et al, 2021

TABLE C.3 – Inventaire du cycle de vie des équipements intérieurs

Chantier subsurface

Composant	Processus ACV	Quantité	Provenance données
Tube PVC horizontaux	market for earth tube heat exchanger, polyethylene, DN 200 | polyethylene pipe, DN 200, SDR 41 | APOS,U - GLO	300 m	Estimation de la longueur du réseau creusé
Câbles électrique	market for cable, three-conductor cable | cable, three-conductor cable | APOS,U - GLO	300 m	Estimation de la longueur du réseau creusé
Diesel pelle mécanique	market for diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | APOS,U - GLO	50 L	Estimation de la consommation de la pelle mécanique pour 1 jour

TABLE C.4 – Inventaire du cycle de vie du chantier de raccord réseau en subsurface

Fonctionnement du système

Composant	Processus ACV	Quantité	Provenance données
Consommation électrique pompe de forage	market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | APOS,U - FR	600 MWh	Bureau étude dimensionnement système
Consommation électrique PAC	market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | APOS,U - FR	528 MWh	Bureau étude dimensionnement système

TABLE C.5 – Inventaire du cycle de vie du fonctionnement du système

Maintenance

Composant	Processus ACV	Quantité	Provenance données
Acide chlorhydrique	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | hydrochloric acid, without water, in 30% solution state | APOS,U - RER	1000 kg	Estimation
Diesel groupe electrogene	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | APOS,U - GLO	120 L	Estimation
Eau pompé rejetée à l'égout	market for wastewater, unpolluted | wastewater, unpolluted | APOS,U - RoW	250 m^3	Estimation

TABLE C.6 – Inventaire du cycle de vie de la maintenance