

---

**MODÉLISATION DE L'EFFET CUMULÉ DE PLUSIEURS  
SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES OUVERTS UTILISANT LES  
AQUIFÈRES PEU PROFONDS EN ZONE URBAINE**

---

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master  
Ingénieur Civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de  
l'ingénieur et de l'environnement

par Caroline DE PAOLI

**PROMOTEUR ACADÉMIQUE : Alain DASSARGUES**

**PROMOTEUR INDUSTRIEL : Thierry DUREN**

Année académique 2021-2022

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration et à la rédaction de mon travail de fin d'études.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon promoteur académique, M. Alain Dassargues, pour ses conseils, sa disponibilité, et sa compréhension.

La réalisation de ce travail de fin d'études n'aurait pas non plus été possible sans la présence de mon promoteur industriel, M. Thierry Duren. Je voudrais lui exprimer ma gratitude pour son aide, sa patience et le partage de ses connaissances, qui m'ont permis d'avancer dans mes réflexions.

Je voudrais également remercier le personnel de chez Artesia, qui m'a permis de travailler sur la présente problématique, et qui m'a accueillie lors d'un stage très enrichissant pendant une période compliquée de pandémie.

Je remercie mes parents, pour leur soutien sans faille, leurs encouragements, leur écoute et leur aide dans les moments de doute, durant toutes mes études et bien au-delà.

Enfin, je remercie tous mes proches et mes amis qui ont su m'apporter leur soutien durant la réalisation de ce travail.

# Résumé

La géothermie à faible profondeur en système ouvert consiste à créer des réserves de chaleur et de froid dans un aquifère, via des doublets de puits de pompage et de réinjection. Durant la saison chaude, l'eau est extraite des puits froids afin d'être exploitée pour la climatisation avant d'être réintroduite dans les puits chauds. Lors de la saison froide, le cycle est inversé, et les puits chauds jouent le rôle de puits d'extraction, avec injection dans les puits froids. Ce type de géothermie constitue une source d'énergie renouvelable, sans altérer la qualité ni diminuer la quantité de l'eau souterraine.

Trois bâtiments adjacents ont adopté ce système de chauffage et de refroidissement à Tour & Taxis, dans la Région de Bruxelles-Capitale. Deux d'entre eux exploitent le même aquifère, et ont fait l'objet d'un modèle hydrogéologique développé par Bulté (2020) dans le logiciel FEFLOW. Ce travail consiste donc à ajouter le second aquifère, ainsi que l'aquitard intermédiaire, à ce premier modèle. Après avoir été calibré, le modèle hydrogéologique résultant a permis de simuler l'effet cumulé des trois installations géothermiques dans les deux aquifères exploités. Les résultats des simulations ont permis de montrer que bien que les interactions entre le niveau piézométrique des deux aquifères soient très faibles, il existe des échanges de chaleur entre les deux unités, s'opérant à travers l'aquitard. Néanmoins, ces échanges de chaleur ne sont pas suffisants pour avoir un impact significatif sur les systèmes géothermiques individuels.

---

## Abstract

Shallow open-loop geothermal systems consist in creating heat and cold reserves in an aquifer, via doublets of pumping and reinjection wells. During the warm season, water is extracted from the cold wells and used for cooling, before being reintroduced into the warm wells. During the cold season, the cycle is reversed, and the warm wells act as extraction wells, while water is injected into the cold wells. This type of geothermal energy is a renewable source of energy, without altering the quality or decreasing the quantity of groundwater.

This heating and cooling system has been adopted by three adjacent buildings in Tour & Taxis, in the Brussels-Capital Region. Two of them exploit the same aquifer, and were the subject of a hydrogeological model developed by Bulté (2020) in the FEFLOW software. This work consists in adding the second aquifer, as well as the intermediate aquitard, to this first model. After being calibrated, the resulting hydrogeological model was used to simulate the cumulative effect of the three geothermal installations in the two exploited aquifers. The results of the simulations showed that although the interactions between the piezometric level of the two aquifers are very low, heat exchanges occur between the two units, through the aquitard. However, these heat exchanges are not sufficient to have a significant impact on the individual geothermal systems.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Systèmes géothermiques ouverts à Tour &amp; Taxis</b>	<b>14</b>
2.1	Principe de la géothermie . . . . .	15
2.1.1	Types de géothermie . . . . .	15
2.1.2	Géothermie à faible profondeur en système ouvert . . . . .	16
2.2	Bâtiments exploitant la géothermie ouverte peu profonde à Tour & Taxis	18
<b>3</b>	<b>Contexte environnemental</b>	<b>20</b>
3.1	Contexte géographique . . . . .	20
3.2	Contexte géomorphologique . . . . .	21
3.3	Occupation du sol . . . . .	21
3.4	Contexte hydrologique . . . . .	22
3.5	Contexte géologique . . . . .	24
3.5.1	Géologie régionale . . . . .	24
3.5.2	Géologie locale . . . . .	28
3.6	Contexte hydrogéologique . . . . .	28
3.6.1	Hydrogéologie régionale . . . . .	28
3.6.2	Hydrogéologie locale . . . . .	30
3.6.3	Système aquifère du socle paléozoïque . . . . .	31
3.6.4	Aquifère des sables du Landénien . . . . .	33
3.7	Conclusion . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Modèle conceptuel</b>	<b>37</b>
4.1	Processus modélisés . . . . .	37
4.2	Frontières du modèle . . . . .	37
4.2.1	Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle . . . . .	38
4.2.2	Frontières latérales . . . . .	38
4.2.3	Visualisation des frontières du modèle . . . . .	40
4.3	Conditions aux frontières du modèle . . . . .	41
4.3.1	Conditions aux frontières pour l'écoulement . . . . .	41
4.3.1.1	Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle . . . . .	42
4.3.1.2	Frontière latérales . . . . .	43
4.3.2	Conditions aux frontières pour le transport de chaleur . . . . .	46
4.3.2.1	Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle . . . . .	47
4.3.2.2	Frontières latérales . . . . .	47
4.4	Sollicitations . . . . .	49
4.4.1	Sollicitations pour l'écoulement . . . . .	49
4.4.2	Sollicitations pour le transport de chaleur . . . . .	52

4.5	Conditions initiales . . . . .	52
4.5.1	Conditions initiales pour l'écoulement . . . . .	52
4.5.2	Conditions initiales pour le transport de chaleur . . . . .	53
4.6	Conclusion . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Construction du modèle et définition des paramètres</b>	<b>55</b>
5.1	Géométrie du modèle . . . . .	55
5.2	Définition des propriétés matérielles . . . . .	59
5.2.1	Propriétés matérielles pour l'écoulement . . . . .	59
5.2.2	Propriétés matérielles pour le transport de chaleur . . . . .	63
5.3	Conclusion . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Calibration du modèle</b>	<b>67</b>
6.1	Calibration du modèle d'écoulement en régime permanent . . . . .	67
6.1.1	Points d'observation . . . . .	68
6.1.2	Calibration manuelle . . . . .	69
6.1.3	Calibration automatique . . . . .	72
6.2	Calibration du modèle d'écoulement en régime transitoire . . . . .	75
6.2.1	Approche considérée . . . . .	75
6.2.2	Scénario de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3 . . . . .	76
6.2.3	Calibration . . . . .	77
6.3	Conclusion . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Simulations de transport de chaleur</b>	<b>80</b>
7.1	Scénario 1 : scénario de référence . . . . .	80
7.1.1	Paramètres de la simulation . . . . .	80
7.1.2	Résultats . . . . .	82
7.1.2.1	Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques . . . . .	83
7.1.2.2	Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque . . . . .	85
7.2	Scénario 2 : déséquilibre des besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment 3 . . . . .	93
7.2.1	Paramètres de la simulation . . . . .	93
7.2.2	Résultats . . . . .	94
7.2.2.1	Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques . . . . .	94
7.2.2.2	Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque . . . . .	96
7.3	Scénario 3 : $\Delta T$ constant pour le système géothermique du bâtiment 3 . . . . .	101
7.3.1	Paramètres de la simulation . . . . .	101
7.3.2	Résultats . . . . .	101
7.3.2.1	Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques . . . . .	101
7.3.2.2	Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque . . . . .	104
7.4	Scénario 4 : augmentation de la conductivité thermique de l'aquitard de Gulpen . . . . .	106

7.4.1	Paramètres de la simulation . . . . .	106
7.4.2	Résultats . . . . .	106
7.4.2.1	Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques . . . . .	106
7.4.2.2	Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque . . . . .	108
7.5	Scénario 5 : augmentation de la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen . . . . .	110
7.5.1	Paramètres de la simulation . . . . .	110
7.5.2	Résultats . . . . .	111
7.5.2.1	Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques . . . . .	111
7.5.2.2	Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque . . . . .	113
7.6	Conclusion . . . . .	115
<b>8</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>Références</b>	<b>119</b>

# Table des figures

2.1	Situation de Tour & Taxis le long du Canal Bruxelles-Charleroi, à proximité du centre historique de Bruxelles (CIRB-CIBG, 2021).	14
2.2	Principe de fonctionnement des systèmes géothermiques ouverts peu profonds (modifié d'après van Hoegaerden & Hagedoorn, 2007).	16
2.3	Localisation des 3 bâtiments exploitant la géothermie ouverte peu profonde à Tour & Taxis, et situation des puits froids et des puits chauds (CIRB-CIBG, 2021).	19
2.4	Disposition des doublets de puits froids et de puits chauds des 3 bâtiments (CIRB-CIBG, 2021).	19
3.1	Localisation du site de Tour & Taxis dans la Région de Bruxelles-Capitale en Belgique (CIRB-CIBG, 2021).	20
3.2	Carte topographique de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021).	21
3.3	Occupation du sol de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021).	22
3.4	Carte hydrographique de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	22
3.5	Carte géologique de la Région de Bruxelles-Capitale et trait de coupe NO-SE (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	27
3.6	Coupe géologique NO-SE de la Région de Bruxelles-Capitale selon le trait de coupe de la Figure 3.5 (BELB, 2021).	27
3.7	Carte hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale (système aquifère du quaternaire non représenté ; CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	30
3.8	Localisation des différents piézomètres dans le système aquifère du socle paléozoïque dans la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	31
3.9	Évolution du niveau piézométrique du système aquifère du socle paléozoïque observée dans divers piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale (BELB, 2021).	32
3.10	Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien en mai 2013 (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	34
3.11	Localisation des différents piézomètres dans l'aquifère des sables du Landénien dans la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).	34
3.12	Évolution du niveau piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien observée dans divers piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale (BELB, 2021).	35

4.1	Frontières latérales du modèle (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021). . . . .	40
4.2	Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021). . . . .	41
4.3	Conditions aux frontières délimitant l'étendue verticale du modèle pour l'écoulement, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021). . .	42
4.4	Conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquifère des sables du Landénien (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021). . . . .	43
4.5	Conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquitard de Gulpen (CIRB-CIBG, 2021). . . . .	44
4.6	Carte piézométrique du socle paléozoïque en mars 2013, obtenue par interpolation des données piézométriques ponctuelles (d'après CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021). . . . .	45
4.7	Conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquifère du socle paléozoïque (CIRB-CIBG, 2021). . . . .	46
4.8	Conditions aux frontières délimitant l'étendue verticale du modèle pour le transport de chaleur, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021). . . . .	47
4.9	Conditions aux frontières latérales pour le transport de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien, l'aquifère du socle paléozoïque et l'aquitard de Gulpen (CIRB-CIBG, 2021). . . . .	48
4.10	Captages dans l'aquifère du socle paléozoïque dans la région modélisée (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021). . . . .	49
4.11	Captages dans l'aquifère des sables du Landénien dans la région modélisée (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021). . . . .	50
4.12	Puits de pompage et de réinjection des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis (CIRB-CIBG, 2021). . . . .	51
5.1	Cadre géométrique général du modèle construit dans le logiciel FEFLOW (d'après Bulté, 2020). . . . .	56
5.2	Maillage d'éléments finis du modèle construit dans le logiciel FEFLOW, et zoom sur le site de Tour & Taxis (d'après Bulté, 2020). . . . .	57
5.3	Visualisation schématique des interfaces (en italique) et des couches formant le modèle. . . . .	59
5.4	Vue 3D du modèle avec le maillage d'éléments finis, et zoom sur Tour & Taxis d'une coupe NO-SE du modèle. . . . .	59
5.5	Valeurs de conductivité hydraulique initialement prescrites au modèle pour le Membre de Grandglise (d'après Bulté, 2020). . . . .	60
5.6	Valeurs de coefficient d'emménagement spécifique initialement prescrites au modèle pour le Membre de Grandglise (d'après Bulté, 2020). .	62
6.1	Points d'observation dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque (BELB, 2021). . . . .	68
6.2	Valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration manuelle pour le Membre de Grandglise. . . . .	69
6.3	Valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration manuelle pour la partie supérieure (plus perméable) du socle paléozoïque. . . . .	70
6.4	Résultats d'écoulement en régime permanent et résidus le 1 <sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère des sables du Landénien, après calibration manuelle. . .	71

6.5	Résultats d'écoulement en régime permanent et résidus le 1 <sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère du socle paléozoïque, après calibration manuelle. . . . .	71
6.6	Distribution uniforme des 30 points pilotes dans le modèle pour la calibration automatique avec PEST. . . . .	72
6.7	Conductivité hydraulique obtenue par calibration automatique à l'aide du logiciel PEST dans le Membre de Grandglise. . . . .	73
6.8	Conductivité hydraulique obtenue par calibration automatique à l'aide du logiciel PEST dans la partie supérieure (plus perméable) de l'aquifère du socle paléozoïque. . . . .	73
6.9	Résultats d'écoulement en régime permanent le 1 <sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère des sables du Landénien, après calibration automatique. . . .	74
6.10	Résultats d'écoulement en régime permanent le 1 <sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère du socle paléozoïque, après calibration automatique. . . . .	74
6.11	Évolution du niveau piézométrique simulé au sein des puits 1C4 et 1W4 du bâtiment 1 sous le scénario de fonctionnement du système géothermique ouvert du bâtiment 3. . . . .	77
7.1	Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. . . . .	83
7.2	Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. . . . .	84
7.3	Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. . . . .	85
7.4	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2020. . . . .	86
7.5	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2020. . . . .	87
7.6	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2021. . . . .	88
7.7	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2024. . . . .	90
7.8	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2025. . . . .	90
7.9	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2029. . . . .	91
7.10	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2030. . . . .	92
7.11	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2039. . . . .	92
7.12	Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2040. . . . .	93
7.13	Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. . . . .	94

7.14	Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. . . . .	95
7.15	Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. . . . .	96
7.16	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2021. . . . .	97
7.17	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2024. . . . .	98
7.18	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2025. . . . .	98
7.19	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2034. . . . .	99
7.20	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2039. . . . .	100
7.21	Scénario 2 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2040. . . . .	100
7.22	Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. . . . .	102
7.23	Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. . . . .	102
7.24	Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. . . . .	103
7.25	Scénario 3 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2024. . . . .	104
7.26	Scénario 3 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2025. . . . .	105
7.27	Scénario 3 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2039. . . . .	105
7.28	Scénario 3 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2040. . . . .	106
7.29	Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. . . . .	107
7.30	Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. . . . .	107
7.31	Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. . . . .	108
7.32	Scénario 4 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2020. . . . .	109
7.33	Scénario 4 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2029. . . . .	109
7.34	Scénario 4 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2030. . . . .	110

7.35	Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. . . . .	111
7.36	Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. . . . .	112
7.37	Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. . . . .	112
7.38	Scénario 5 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2020.	113
7.39	Scénario 5 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> octobre 2029. . . . .	114
7.40	Scénario 5 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1 <sup>er</sup> avril 2030.	114

# Liste des tableaux

3.1	Interprétation stratigraphique de la géologie observée lors des forages à Tour & Taxis (Wynants & Petitclerc, 2019a).	28
3.2	Interprétation de l'hydrogéologie locale grâce aux forages réalisés à Tour & Taxis (AGT, 2018a).	30
3.3	Valeurs de conductivité hydraulique et de coefficient d'emménagement de l'aquifère du socle paléozoïque à différentes localisations (Ruthy <i>et al.</i> , 2017 ; Ruthy & Dassargues, 2015).	33
3.4	Valeurs de transmissivité hydraulique du socle paléozoïque, calculées à partir de données d'essais de pompage réalisés par AGT (2019) dans 6 puits sur le site de Tour & Taxis (localisation des puits Figure 2.4).	33
3.5	Valeurs de conductivité hydraulique de l'aquifère des sables du Landénien à différentes localisations (Roland <i>et al.</i> , 2016 ; Ruthy <i>et al.</i> , 2017).	35
3.6	Conductivité hydraulique de l'aquifère des sables du Landénien calculée par IFTech (2010) sur le site de Tour & Taxis.	36
4.1	Profondeur, profondeur de tubage et hauteur des crépines des puits géothermiques du bâtiment 3 (AGT, 2019 ; localisation des puits Figure 2.4).	51
5.1	Valeurs de conductivité hydraulique attribuées aux unités modélisées.	61
5.2	Coefficients d'emménagement spécifique initialement attribués aux différentes couches du modèle.	63
5.3	Valeurs de porosité, de capacité thermique volumique et de conductivité thermique attribuées à chaque unité modélisée.	65
6.1	Hauteurs piézométriques mesurées aux points d'observation dans l'aquifère des sables du Landénien et dans l'aquifère du socle paléozoïque (BELB, 2021).	69

# Chapitre 1

## Introduction

Depuis plusieurs décennies, les inquiétudes et préoccupations environnementales ne cessent de croître, en particulier concernant le changement climatique. Ce dernier est notamment causé par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) depuis le début de l'ère industrielle. D'après le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) relatif aux éléments scientifiques datant d'août 2021, la température à la surface de la Terre augmentera de plus de 1.5 °C, voire 2 °C, au cours du 21<sup>e</sup> siècle si aucune réduction drastique des GES, et en particulier du CO<sub>2</sub>, n'est réalisée dans les prochaines années (Climat.be, 2019).

Selon Bloemendal *et al.* (2018), environ 40 % de l'énergie fossile totale est utilisée pour le chauffage et la climatisation d'infrastructures à l'échelle mondiale. Ce secteur représente donc un enjeu majeur dans les mesures prises afin de réduire les émissions de GES.

Parmi les alternatives aux énergies fossiles pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments figure la géothermie, qui consiste à exploiter la chaleur du sous-sol. En effet, à faible profondeur, la température du sol reste constante tout au long de l'année, et tend vers la température moyenne annuelle de l'air, soit entre 11 et 13 °C en Belgique. A partir de 50 m de profondeur environ, un gradient géothermique apparaît, et la température du sol augmente de approximativement 3 °C tous les 100 m (Dassargues, 2019).

A faible profondeur, la chaleur du sol peut notamment être exploitée en système ouvert. Ce type de géothermie est appelée ATES (Aquifer Thermal Energy Storage), et consiste à créer des réserves de chaleur et de froid dans le sol de manière saisonnière, par l'utilisation de doublets de puits de pompage et de réinjection dans un aquifère. La ressource de froid peut être utilisée en été pour la climatisation, et la réserve de chaleur en hiver, pour le chauffage. Un tel système, s'il est géré de manière adéquate, représente une source d'énergie renouvelable, sans diminuer la quantité ni la qualité de l'eau souterraine exploitée (Dassargues, 2019). Aux Pays-Bas, la consommation d'énergies fossiles par les infrastructures a été réduite de 11 % grâce à ce type d'installations (Bloemendal *et al.*, 2018).

La géothermie à faible profondeur en système ouvert a été adoptée par trois bâtiments à Tour & Taxis pour leur système de chauffage et de refroidissement. En effet, Tour & Taxis est un ancien pôle ferroviaire, portuaire et douanier de la Région de Bruxelles-Capitale. Il est aujourd'hui en pleine reconversion, visant à devenir un quartier urbain

durable. Les infrastructures présentes sur le site doivent donc atteindre de hautes performances énergétiques (perspective.brussels, 2022). Les trois bâtiments utilisant des systèmes ATES exploitent deux aquifères différents, séparés par un aquitard (unité peu perméable).

L’objectif de ce travail est de modéliser l’effet cumulé de ces trois systèmes géothermiques ouverts adjacents. Un premier modèle incluant un seul aquifère, exploité par deux des trois installations, a été développé dans le logiciel FEFLOW par Bulté (2020), qui a étudié les éventuelles interférences entre ces deux systèmes. Ce travail consiste donc à ajouter le second aquifère, exploité par le troisième bâtiment, ainsi que l’aquitard les séparant. L’effet cumulé des trois installations peut alors être évalué. En effet, bien que les doublets de puits du troisième bâtiment s’établissent dans un aquifère différent des deux premiers, des échanges de chaleur sont susceptibles de s’opérer à travers l’aquitard intermédiaire. Les trois infrastructures étant adjacentes, il est nécessaire d’évaluer l’existence de possibles interactions entre les différents systèmes à travers un modèle d’écoulement des eaux souterraines et de transport de chaleur.

Dans ce but, tout d’abord, une brève introduction sur le projet de revitalisation de Tour & Taxis ainsi que le principe de la géothermie ouverte à faible profondeur sont présentés. Ensuite, le contexte environnemental de Tour & Taxis est développé. Il permet notamment de prendre connaissance de la géologie et de l’hydrogéologie de la zone étudiée. De plus, un chapitre est consacré au développement du modèle conceptuel. Ce dernier représente une simplification du système réel. Il définit donc les processus à inclure dans le modèle, ainsi que son étendue et les conditions attribuées à ses frontières. Il détermine également les sollicitations et conditions initiales à imposer au modèle. En outre, l’implémentation du modèle dans le logiciel de modélisation FEFLOW ainsi que la définition des paramètres d’écoulement et de transport de chaleur attribués au modèle constituent également un chapitre de ce travail. De plus, le modèle d’écoulement a fait l’objet d’une calibration, décrite dans un chapitre également. Finalement, diverses simulations de transport de chaleur ont été exécutées, envisageant différents scénarios possibles d’utilisation des systèmes géothermiques. Un dernier chapitre apporte une conclusion ainsi que des perspectives éventuelles pour la continuation de ce travail.

## Chapitre 2

# Systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis

Tour & Taxis est un ancien site ferroviaire de la Région de Bruxelles-Capitale, au nord de la Belgique. D’une superficie d’environ 45 ha, il est situé à proximité du centre historique de Bruxelles, le long du Canal Bruxelles-Charleroi. Sa localisation est visible à la Figure 2.1. Sa position stratégique a contribué au développement de nombreuses activités économiques durant le 20<sup>e</sup> siècle. Tour & Taxis servait alors de pôle ferroviaire, portuaire et douanier (Ateliers Lion & MSA, 2008 ; perspective.brussels, 2020).

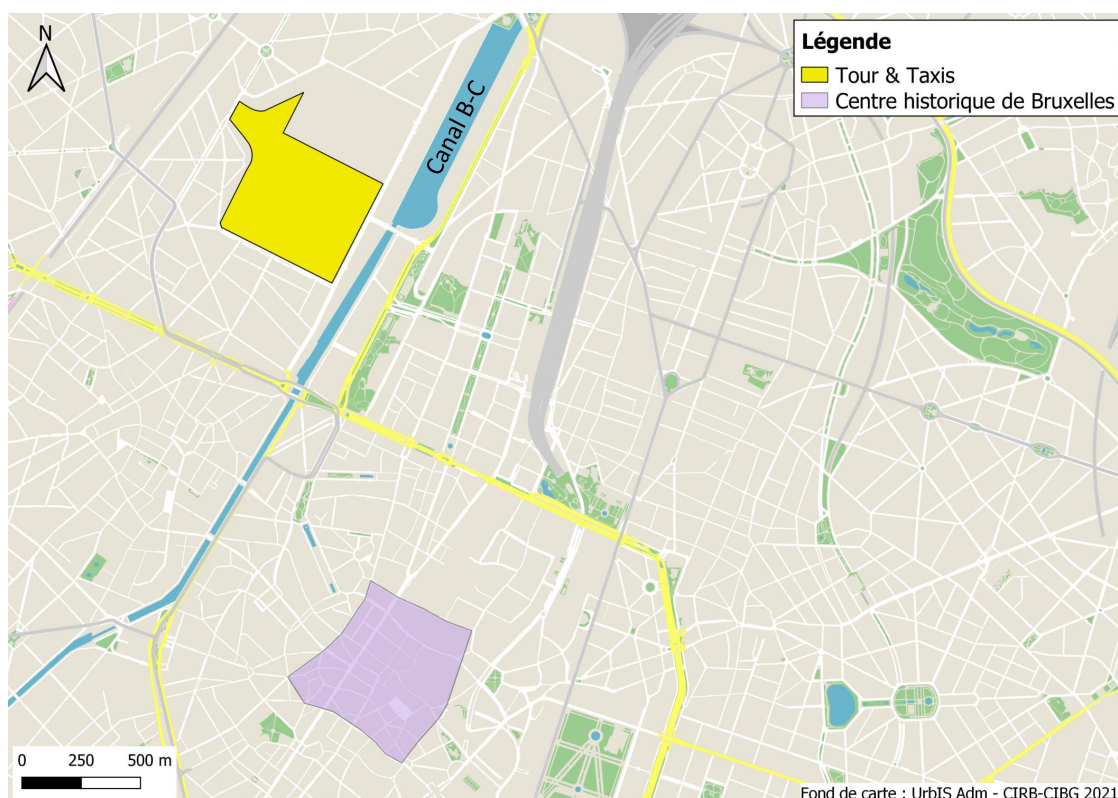


FIGURE 2.1 – Situation de Tour & Taxis le long du Canal Bruxelles-Charleroi, à proximité du centre historique de Bruxelles (CIRB-CIBG, 2021).

Néanmoins, dans les années 1990, l’avènement du transport par camion et l’ouverture des frontières européennes entraînent le déclin des activités à Tour & Taxis. 42 ha du

site sont alors mis en vente, puis achetés par Project T&T en 2001. Cet événement marque la naissance d'un projet de reconversion de Tour & Taxis, dont le redéveloppement est centré sur son patrimoine industriel conséquent (Vanderhulst, 2008).

Un schéma directeur a été établi en 2008 pour la revitalisation de Tour & Taxis, approuvé en 2017 par le PPAS (Plan Particulier d'Aménagement du Sol). Il prévoit que le site accueillera des projets économiques, incluant des bureaux, des activités de l'Horeca ou encore des projets d'agriculture urbaine, ainsi que des logements sur au moins 50 % du territoire (perspective.brussels, 2022).

La reconversion de Tour & Taxis vise à transformer le site en un quartier urbain durable. L'écomobilité, la conception d'espaces verts ou encore la création d'infrastructures sociales sont donc au cœur de ce projet. En particulier, les nouveaux bâtiments s'établissant sur le site ainsi que les anciens bâtiments reconvertis doivent atteindre de hautes performances énergétiques (perspective.brussels, 2022).

Dans cette optique de quartier durable, 3 bâtiments à Tour & Taxis ont opté pour la géothermie peu profonde en système ouvert comme système de chauffage et de refroidissement. Dans la suite de ce travail, ils seront appelés bâtiment 1, bâtiment 2 et bâtiment 3. Dans ce chapitre, après avoir détaillé le fonctionnement de la géothermie peu profonde en système ouvert, quelques précisions seront apportées concernant les 3 bâtiments exploitant la géothermie à Tour & Taxis.

## 2.1 Principe de la géothermie

La géothermie consiste à exploiter la chaleur du sous-sol. En effet, entre 5 et 50 m de profondeur environ, la température du sol est stable et tend vers la température locale moyenne annuelle de l'air. En Belgique, cette valeur est comprise entre 11 et 13 °C environ. Ensuite, lorsque la profondeur augmente, la température du sol augmente également. Ce gradient géothermique s'élève à 3 °C/100 m. La chaleur du sol peut alors être exploitée pour le chauffage et le refroidissement d'infrastructures (Dassargues, 2019).

### 2.1.1 Types de géothermie

Traditionnellement, il existe trois types de géothermie (Dassargues, 2019) :

- La géothermie à faible profondeur, qui exploite la chaleur du sol jusqu'à environ 150 m de profondeur ;
- La géothermie à profondeur intermédiaire, qui exploite la chaleur du sol entre 150 et 1000 m de profondeur environ ;
- La géothermie à grande profondeur, qui exploite la chaleur du sol à des profondeurs supérieures à 1000 m.

A faible profondeur, il existe deux types d'installations : les systèmes ouverts, et les systèmes fermés. La géothermie peu profonde en système fermé consiste à créer un réseau de tuyaux enterrés dans le sol. La circulation d'un fluide caloporteur à travers

ceux-ci permet d'exploiter la chaleur du sol. Ce type de systèmes est appelé BTES (Borehole Thermal Energy Storage ; Dassargues, 2019).

### 2.1.2 Géothermie à faible profondeur en système ouvert

En système ouvert, la géothermie peu profonde consiste en un système de pompage et de réinjection d'eau souterraine dans un ou plusieurs doublets de puits. Le principe de fonctionnement d'un tel système est présenté à la Figure 2.2.

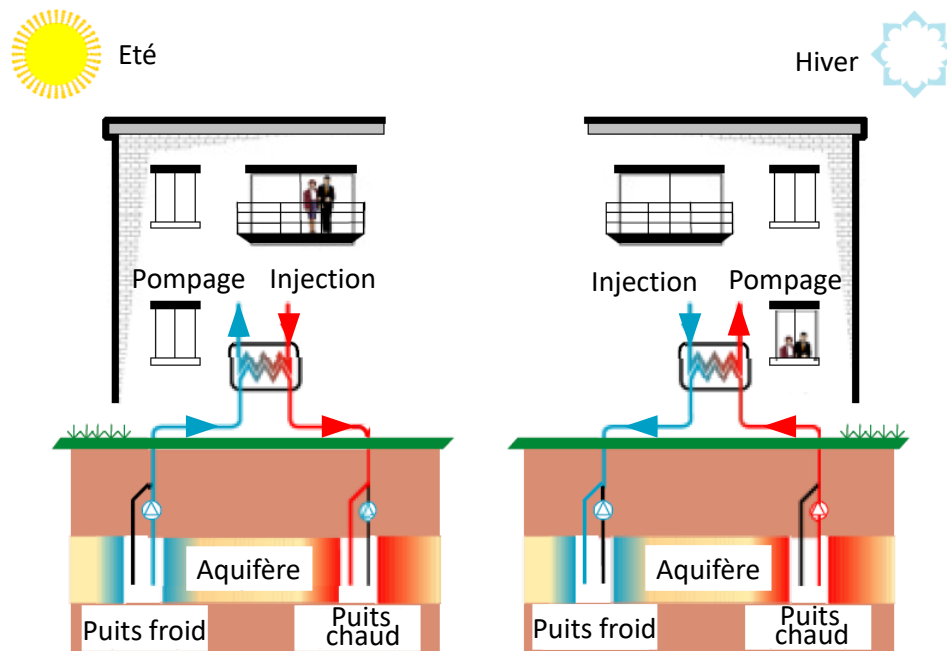


FIGURE 2.2 – Principe de fonctionnement des systèmes géothermiques ouverts peu profonds (modifié d'après van Hoegaerden & Hagedoorn, 2007).

Un doublet est composé d'un puits chaud et d'un puits froid. En été, l'extraction a lieu dans le puits froid. L'eau pompée est utilisée pour le refroidissement de l'infrastructure, ce qui entraîne l'augmentation de sa température. Elle est alors réinjectée dans le puits chaud, à une température généralement comprise entre 15 et 25 °C. Cela permet de créer, autour du puits chaud, une réserve de chaud dans le sol dont la température naturelle avoisine 12 °C. Ensuite, en hiver, le cycle de pompage et de réinjection est inversé. Le puits chaud sert donc de puits d'extraction, afin de répondre à la demande de chauffage du bâtiment en exploitant la réserve de chaud créée en été. Au cours du processus de chauffage de l'infrastructure, la température de l'eau pompée diminue. Elle est donc réinjectée dans le puits froid à une température située entre 5 et 10 °C environ. Le puits froid devient donc une source de froid pour l'été suivant (Dassargues, 2019 ; Bloemendal *et al.*, 2018 ; van Hoegaerden & Hagedoorn, 2007).

Ce type de système requiert donc la présence d'un aquifère peu profond présentant les deux caractéristiques suivantes (Dassargues, 2019) :

- L'aquifère doit être suffisamment perméable afin de permettre des cycles de pompage et de réinjection efficaces. La conductivité hydraulique  $K$  de l'aquifère

doit donc être suffisamment élevée ;

- Le gradient piézométrique de l’aquifère doit être relativement faible. En effet, dans le sol, la chaleur se déplace notamment par advection, c’est-à-dire avec le déplacement de l’eau souterraine. Un gradient piézométrique faible entraîne un faible déplacement par advection des panaches de température créés autour des puits de pompage et de réinjection. Cela permet donc un emmagasinement efficace de la chaleur (chaud et froid).

Ce type d’installation est appelé ATES (Aquifer Thermal Energy Storage ; Dassargues, 2019 ; Bloemendal *et al.*, 2018 ; van Hoegaerden & Hagedoorn, 2007).

Généralement, une pompe à chaleur est utilisée en association avec les systèmes géothermiques ouverts. En effet, cela permet d’amener l’eau pompée à une température adéquate, c’est-à-dire suffisamment faible pour le refroidissement en été et suffisamment élevée pour le chauffage en hiver (Bloemendal *et al.*, 2018). La puissance  $P$  (en W) est alors calculée selon l’équation 2.1 (Dassargues, 2019) :

$$P = \frac{Q \Delta T \rho_w c_w}{\left(1 - \frac{1}{COP}\right)} \quad (2.1)$$

où  $Q$  est le débit d’extraction (et de réinjection) en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta T$  la différence de température entre l’entrée et la sortie de la pompe à chaleur en  $^\circ\text{K}$ ,  $\rho_w$  la masse volumique de l’eau en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c_w$  la capacité thermique de l’eau en  $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{K}$  et  $COP$  le coefficient de performance de la pompe à chaleur (adimensionnel).

Le fonctionnement des systèmes géothermiques ouverts peu profonds (ATES) est optimal dans les régions tempérées, où les températures n’atteignent pas de valeurs extrêmes. En effet, ce type d’installation permet de répondre à la demande alternante entre chauffage et refroidissement, selon la saison. De plus, ce système est particulièrement adapté aux infrastructures présentant des demandes de chauffage et de refroidissement importantes et relativement constantes au cours de l’année. Dans un scénario idéal, ces demandes sont en équilibre sur toute l’année, c’est-à-dire que la demande annuelle de froid est égale à la demande annuelle de chaud. La chaleur extraite et réinjectée dans le sol est alors en équilibre, et les panaches de température autour des puits froids et des puits chauds sont identiques (en ne considérant pas l’advection ici) et restent localisés autour de ces puits (Schüppler *et al.*, 2019 ; Dassargues, 2019).

Comme mentionné précédemment, un faible gradient piézométrique est préconisé pour les systèmes ATES, car le déplacement des panaches de température par advection est à proscrire. En effet, d’une part, l’installation géothermique ne doit pas avoir d’influence sur la température de l’aquifère, excepté à proximité immédiate des puits d’exploitation. Cela pourrait avoir des conséquences sur d’autres systèmes (tels que des captages d’eau souterraine par exemple) dépendant de cet aquifère. En particulier, avec le développement de cette technologie, l’utilisation de systèmes géothermiques ouverts par des bâtiments adjacents, ou géographiquement proches, devient envisageable. Des interactions entre ces différentes installations sont, généralement, à éviter. D’autre part, des interférences entre les doublets d’un même système géothermique peuvent également survenir, si le phénomène d’advection est localement important. Ce type d’interaction

correspond au panache de température d'un premier puits (chaud ou froid) qui se déplace jusqu'au second puits du doublet (froid ou chaud respectivement). Les doublets doivent donc être suffisamment espacés afin d'éviter ce phénomène, qui diminue l'efficacité du système ATES (Dassargues, 2019 ; Bloemendal *et al.*, 2018).

Ainsi, l'efficacité des systèmes ATES dépend en grande partie des conditions hydrogéologiques de l'aquifère dans lequel s'établit l'installation. Néanmoins, si l'équilibre géothermique est atteint, la géothermie ouverte à faible profondeur constitue une source d'énergie renouvelable, sans impact sur la quantité ni la qualité de l'eau souterraine (Dassargues, 2019).

## 2.2 Bâtiments exploitant la géothermie ouverte peu profonde à Tour & Taxis

A Tour & Taxis, 3 bâtiments utilisent la géothermie ouverte à faible profondeur afin de répondre à leur demande de chauffage et de refroidissement. L'objectif de ce travail est de modéliser l'effet cumulé de ces 3 systèmes géothermiques adjacents.

D'après Bulté (2020), le premier bâtiment à avoir eu recours à ce type d'installation est appelé bâtiment 1. Son système géothermique fonctionne depuis mars 2014 à l'aide de 4 doublets de puits chauds et de puits froids, qui exploitent l'aquifère des sables du Landénien. La nature de cet aquifère est explicitée dans le Chapitre 3 relatif au contexte environnemental de l'étude. Le second bâtiment, appelé bâtiment 2, opère également avec 4 doublets de puits sollicitant l'aquifère des sables du Landénien. Ce système est en fonctionnement depuis août 2017. Les interférences entre ces deux systèmes géothermiques ont été modélisées par Bulté (2020).

Enfin, le troisième bâtiment est appelé bâtiment 3. La date de début d'opération de son système ATES n'est pas connue, mais l'inauguration du bâtiment ayant eu lieu en mai 2020, l'utilisation de la géothermie a probablement commencé en mars ou avril 2020. Néanmoins, il est possible que le fonctionnement de l'installation ait débuté plus tard en raison de la pandémie de Covid-19. Le système géothermique de ce bâtiment exploite un second aquifère, l'aquifère du socle paléozoïque, via 5 doublets de puits chauds et froids. Le présent travail consiste donc, en grande partie, à ajouter cette troisième installation ATES au modèle précédemment développé par Bulté (2020).

La localisation des 3 bâtiments à Tour & Taxis ainsi que la position des puits froids et des puits chauds sont présentées à la Figure 2.3. De plus, la Figure 2.4 montre la disposition des doublets de puits pour chaque bâtiment. La dénomination des différents puits s'organise comme suit :

- Le premier caractère correspond au numéro du bâtiment ;
- Le second caractère renseigne sur la nature du puits : C pour les puits froids (*cold*), et W pour les puits chauds (*warm*) ;
- Le dernier caractère représente le numéro du doublet du puits.

Ainsi, à titre d'exemple, le troisième puits chaud du bâtiment 2 est noté 2W3, et le

puits froid correspondant 2C3.

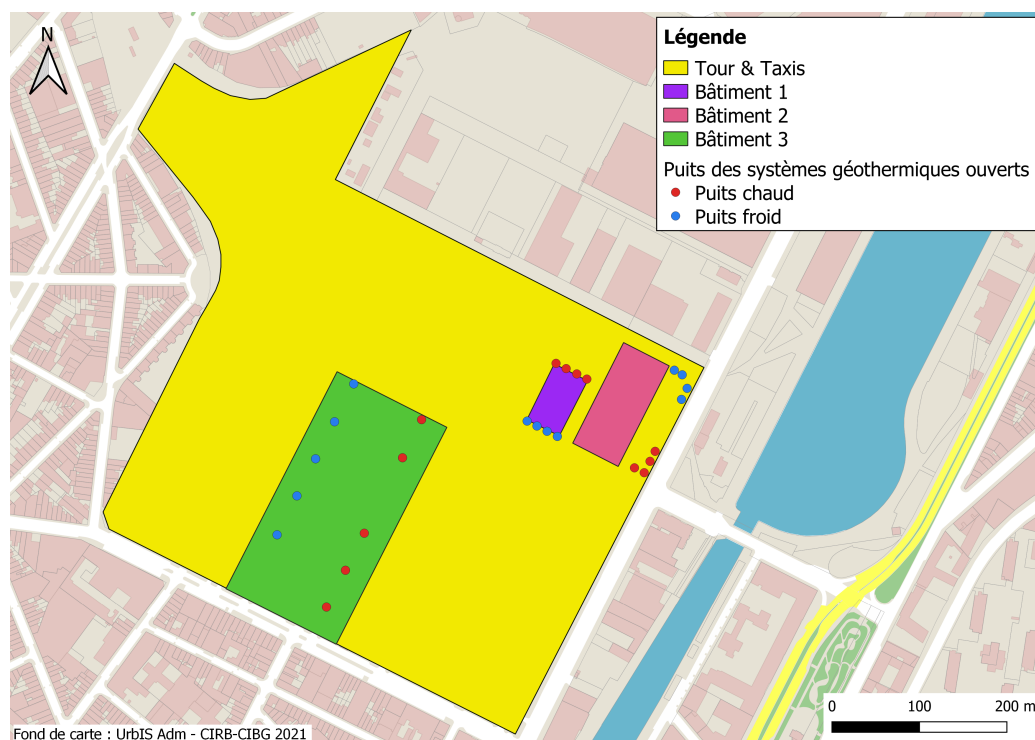


FIGURE 2.3 – Localisation des 3 bâtiments exploitant la géothermie ouverte peu profonde à Tour & Taxis, et situation des puits froids et des puits chauds (CIRB-CIBG, 2021).

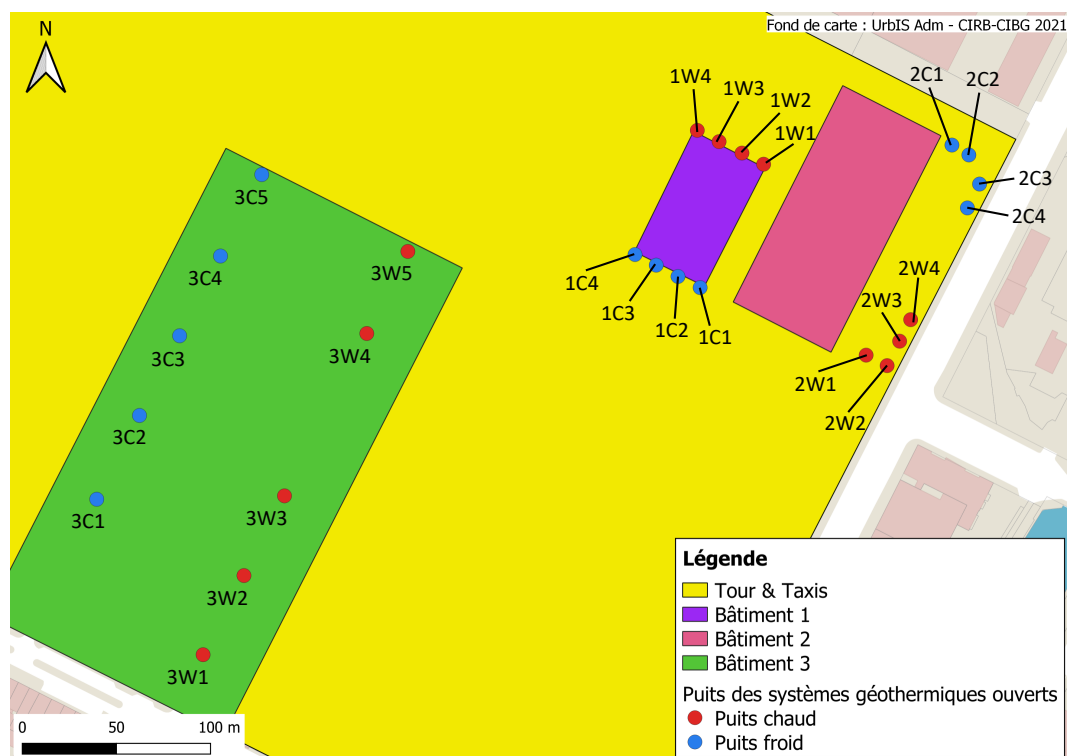


FIGURE 2.4 – Disposition des doublets de puits froids et de puits chauds des 3 bâtiments (CIRB-CIBG, 2021).

# Chapitre 3

## Contexte environnemental

La construction d'un modèle hydrogéologique nécessite une étude préliminaire du contexte environnemental de la région d'intérêt. En effet, la connaissance du contexte dans lequel s'inscrit la zone étudiée est indispensable pour la compréhension du problème. De plus, cela permet de définir l'étendue du modèle, ainsi que les propriétés à lui conférer.

Divers aspects sont abordés dans ce chapitre consacré à l'étude du contexte environnemental de Tour & Taxis, tels que sa situation géographique, la géomorphologie, l'occupation du sol et l'hydrographie de la région. Ensuite, les contextes géologique et hydrogéologique de la zone sont étudiés plus en profondeur.

### 3.1 Contexte géographique

Le site de Tour & Taxis est localisé dans la partie nord de la Région de Bruxelles-Capitale, au nord de la Belgique. Sa situation est visible à la Figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Localisation du site de Tour & Taxis dans la Région de Bruxelles-Capitale en Belgique (CIRB-CIBG, 2021).

## 3.2 Contexte géomorphologique

La carte topographique de la Région de Bruxelles-Capitale est présentée à la Figure 3.2. La topographie de la région est caractérisée par la présence de vallées encaissées au sud, avec une altitude variant de 40 à 140 m. Des altitudes plus faibles, comprises entre 10 et 70 m environ, sont observées au nord (Devleeschouwer *et al.*, 2017). Le site de Tour & Taxis est situé à une altitude d'environ 20 m.

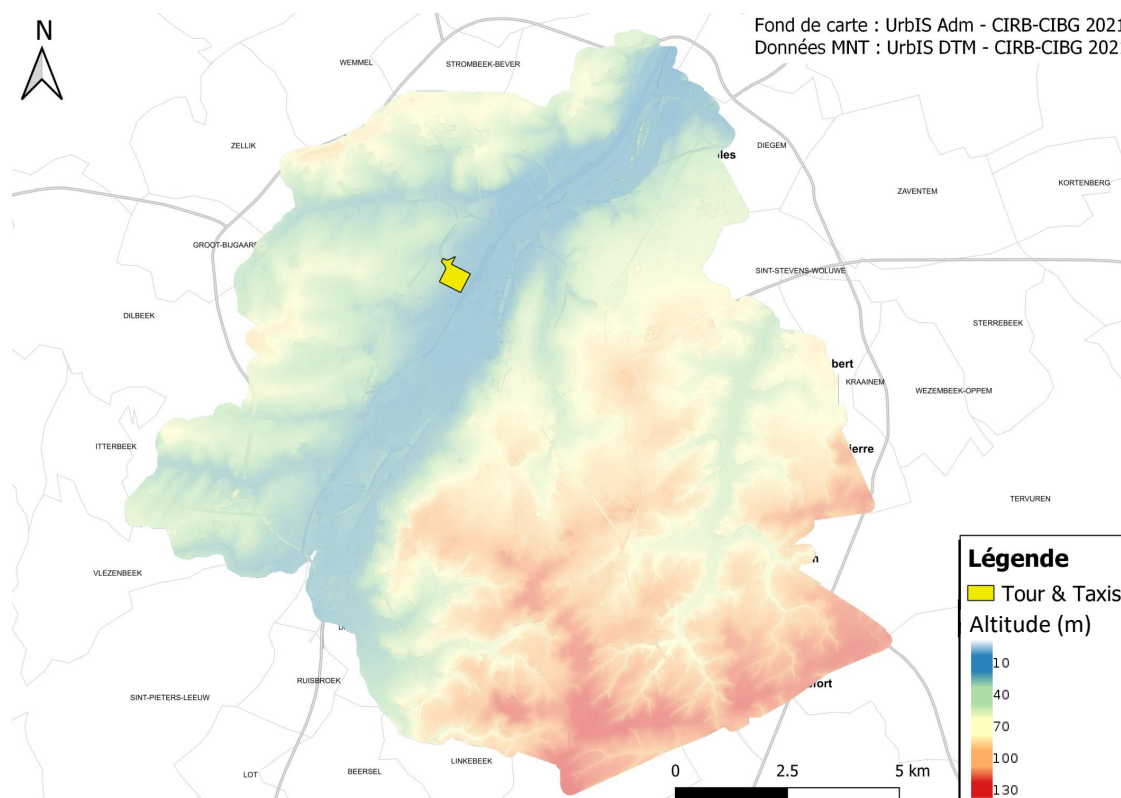


FIGURE 3.2 – Carte topographique de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021).

## 3.3 Occupation du sol

La Figure 3.3 présente l'occupation du sol de la Région de Bruxelles-Capitale. Cette dernière est principalement urbanisée, bien que le sud-est soit caractérisé par la présence de bois et forêts. De plus, la région comporte différents parcs. Le site de Tour & Taxis est situé dans une zone urbanisée, le long de deux cours d'eau de surface : le Canal Bruxelles-Charleroi et la Senne (voir Figure 3.4).

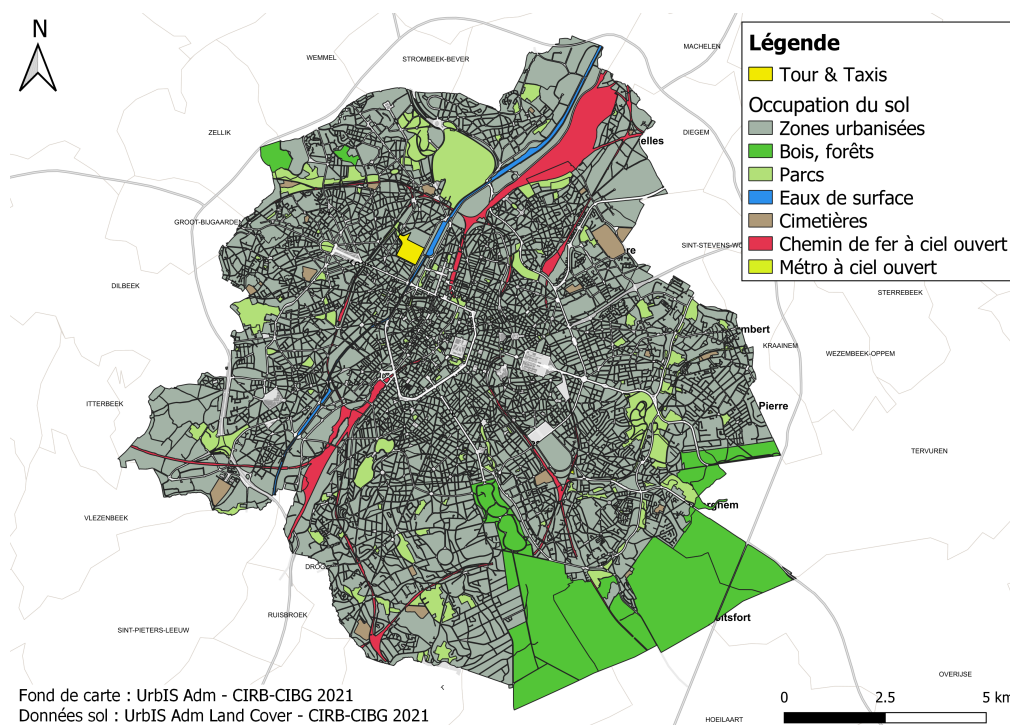


FIGURE 3.3 – Occupation du sol de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021).

### 3.4 Contexte hydrologique

La Figure 3.4 montre le réseau hydrographique de la Région de Bruxelles-Capitale.

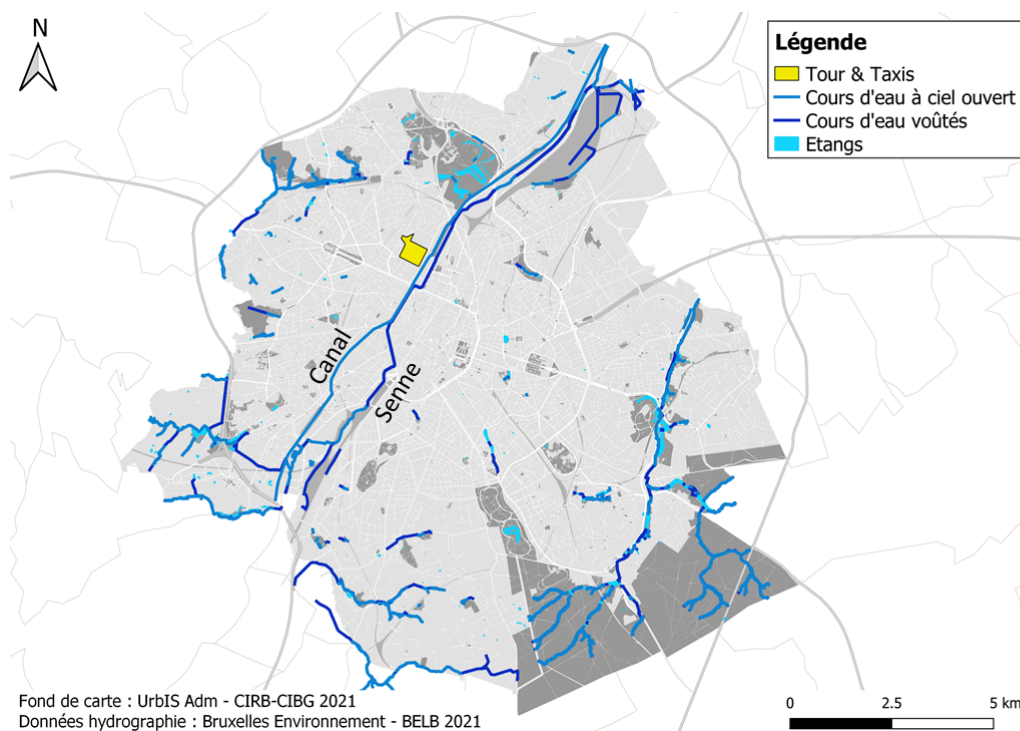


FIGURE 3.4 – Carte hydrographique de la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

Au total, 108 km de cours d'eau sont présents dans la région, dont seulement 38 km (soit 35 %) sont à ciel ouvert. Les 65 % restants sont voûtés, c'est-à-dire couverts. La région compte également des étangs recouvrant environ 1 km<sup>2</sup>. Le plus important est celui du Bois de la Cambre, qui se trouve au sud de la région. La Senne et le Canal Bruxelles-Charleroi constituent les principaux cours d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale (Bologna, 2017).

**Senne** La Senne traverse la Région de Bruxelles-Capitale sur une longueur de 15 km environ, dont seulement 30 % (soit 4.5 km) sont à ciel ouvert. En effet, la rivière a été couverte sur la majorité de son parcours dans la capitale pour des raisons sanitaires et urbanistiques au 19<sup>e</sup> siècle. Elle traverse les trois Régions de Belgique et fait partie du bassin de l'Escaut. Elle possède différents affluents traversant la Région de Bruxelles-Capitale (Bologna, 2017) :

- Le Vogelzangbeek, qui la rejoint depuis la rive gauche. Il traverse la Région de Bruxelles-Capitale sur une longueur de 6 km, entièrement à ciel ouvert et constitue une frontière avec la Région Flamande ;
- Le Molenbeek, qui la rejoint également depuis la rive gauche. Dans les années 90, ce cours d'eau a été asséché sur plusieurs parties de son parcours ;
- Le Linkebeek, dont le parcours bruxellois atteint une longueur d'environ 4 km, dont 2 sont voûtés. Il rejoint la Senne sur la rive droite ;
- La Woluwe, qui traverse la Région de Bruxelles-Capitale sur 8 km. Environ la moitié de son parcours dans la capitale est à ciel ouvert ;
- Le Geleytsbeek, qui se jette dans la Senne en amont de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- Le Leibeek-Hollebeek, qui rejoint la Senne au sein de la Région de Bruxelles-Capitale à Haren.

D'autres cours d'eau de la région alimentent indirectement la Senne, après avoir subi un traitement dans une station d'épuration (Bologna, 2017).

**Canal Bruxelles-Charleroi** La construction du Canal Bruxelles-Charleroi dans la capitale a débuté au 16<sup>e</sup> siècle, principalement pour des raisons économiques. Aujourd'hui, il traverse la Région de Bruxelles-Capitale sur 14 km à ciel ouvert, et constitue l'unique voie navigable de la région. Il relie la ville de Charleroi en Wallonie à Anvers en Flandre, où il se jette dans l'Escaut. Au sein de la région bruxelloise, le canal est alimenté par d'anciens affluents de la Senne qui ont été déviés, dont le Molenbeek (Bologna, 2017).

Comme le montre la carte du réseau hydrographique de la Région de Bruxelles-Capitale (Figure 3.4), le site de Tour & Taxis se trouve sur la rive gauche du Canal Bruxelles-Charleroi et de la Senne (passage voûté), à proximité immédiate de ceux-ci.

## 3.5 Contexte géologique

### 3.5.1 Géologie régionale

La géologie de la Région de Bruxelles-Capitale est caractérisée par un socle datant du Paléozoïque, recouvert en discordance par des dépôts du Méso-Cénozoïque (Devleeschouwer *et al.*, 2017).

**Paléozoïque** Le Massif du Brabant constitue le soubassement de la Région de Bruxelles-Capitale. Datant du Paléozoïque, le socle est uniquement constitué de roches sédimentaires et a été déformé lors de l’orogénèse calédonienne. Le Cambrien qui constitue la partie centrale du Massif est ainsi séparé de l’Ordovicien et du Silurien sur les flancs par des zones de cisaillement (Devleeschouwer *et al.*, 2017).

Les différentes formations du socle Paléozoïque présentes dans la Région de Bruxelles-Capitale sont détaillées ci-dessous, de la plus ancienne à la plus récente (Devleeschouwer *et al.*, 2017) :

- Formation de **Blanmont** : quartzites pâles avec de possibles intercalations de phyllades. Cette formation relativement homogène de pendage pseudo-vertical représente le Paléozoïque Inférieur dans la Région de Bruxelles-Capitale, et plus particulièrement le Cambrien.
- Formation de **Tubize** : séquences de turbidites verdâtres. Les sédiments à granulométrie plus fine tels que les siltites sont prédominants dans ces séquences, bien que des grès grossiers soient également présents.
- Formation d’**Oisquercq** : phyllades argileuses et siltites mauves, grises et verdâtres.

Une première phase de soulèvement du Massif du Brabant au Jurassique a probablement érodé le Carbonifère du socle. Un second épisode de soulèvement au Paléocène a également contribué à l’érosion partielle du Sénonien (Crétacé Supérieur). La couverture du socle Paléozoïque est donc discordante, composée de dépôts Méso-Cénozoïques (Devleeschouwer *et al.*, 2017).

**Mésozoïque** Le Mésozoïque est uniquement représenté par le Crétacé Supérieur dans la Région de Bruxelles-Capitale, à travers la Formation de **Gulpen**. Il s’agit de craies blanches à grises du Sénonien avec une présence de silex noirs (Devleeschouwer *et al.*, 2017). A certains endroits, cette formation comporte des marnes sous-jacentes aux craies (Herbosch & Blockmans, 2012). Ces dépôts du Crétacé sont absents au sud de la Région de Bruxelles-Capitale alors que leur épaisseur augmente vers le nord (Devleeschouwer *et al.*, 2017).

**Cénozoïque** Le Cénozoïque est l’ère géologique la plus représentée dans la Région de Bruxelles-Capitale, par des dépôts tertiaires et quaternaires.

D’abord, les dépôts sédimentaires du Tertiaire datent du Paléocène Supérieur au Miocène Supérieur et sont d’origine marine. Ils forment une alternance de sables, de silts

et d'argiles sur une épaisseur d'environ 50 à 150 m. Les différentes formations du Tertiaire présentes dans la Région de Bruxelles-Capitale sont détaillées ci-dessous, de la plus ancienne à la plus récente (Devleeschouwer *et al.*, 2017) :

- Formation de **Hannut** : datant du Paléocène Supérieur, cette formation présente deux membres dans la Région de Bruxelles-Capitale. Le premier, situé à la base de la formation, est le Membre de Lincent qui est argileux et glauconieux. Le second, constituant la partie supérieure de la formation, est le Membre de Grandglise. Ce dernier correspond plutôt à des sables. L'épaisseur totale de la Formation de Hannut varie de 15 à 20 m au sud de la Région de Bruxelles-Capitale jusqu'à 28 m au nord.
- Formation de **Kortrijk** : datant de l'Éocène Inférieur, cette formation est divisée en trois membres : Saint-Maur, Moen et Aalbeke. Le Membre de Saint-Maur constitue la base de la Formation de Kortrijk. Il est formé d'argiles et son épaisseur est de 30 m. Ensuite, le Membre de Moen forme la partie intermédiaire de la formation. D'une épaisseur de 35 m, il est composé de sables avec des passes d'argiles parfois sur plusieurs mètres d'épaisseur. Finalement, le Membre d'Aalbeke est constitué d'argiles et est épais de 4 m. Néanmoins, dans le nord-ouest de la Région de Bruxelles-Capitale, son épaisseur diminue jusqu'à 2 à 2.5 m. La Formation de Tielt sus-jacente protège généralement ce membre.
- Formation de **Tielt** : datant de l'Éocène Inférieur, cette formation est composée de sables et d'argiles sur une épaisseur de 20 m.
- Formation de **Gent** : datant de l'Éocène Inférieur, cette formation comporte deux membres dans la Région de Bruxelles-Capitale, sur une épaisseur de 8 m au total. Le Membre de Merelbeke en constitue la base et est composé d'argiles. La partie supérieure de la formation correspond au Membre de Vlierzele, composé de sables.
- Formation de **Bruxelles** : datant de l'Éocène Moyen, cette formation est constituée de sables jaunes. Ces derniers possèdent une granulométrie relativement élevée. A certains endroits, des sables silicifiés et des lentilles gréseuses sont observés à la base de la formation, alors que la partie supérieure peut présenter des sables plus carbonatés. De plus, l'altération a rendu ces sables plus argileux par endroits, qui adoptent alors une couleur blanchâtre. La Formation de Bruxelles possède une épaisseur d'environ 30 à 35 m.
- Formation de **Lede** : datant du Miocène Moyen, cette formation épaisse de 7 m en moyenne est composée de sables et de calcaires gréseux.
- Formation de **Maldegem** : datant de l'Éocène Moyen, cette formation est composée de 7 membres dont seuls 3 sont présents dans la Région de Bruxelles-Capitale. Il s'agit des 3 membres constituant la partie inférieure de la formation. A la base se trouve le Membre de Wemmel, épais de 5 m. Il est formé de sables à glauconies grisâtres, alors que la teneur en argile croît dans la partie supérieure. Ensuite, le Membre d'Asse recouvre le Membre de Wemmel. Il est composé d'argiles homogènes grises à vertes. Finalement, le Membre d'Ursel est également formé d'argiles homogènes. Ensemble, le Membre d'Asse et le Membre d'Ursel possèdent une épaisseur de 12 m.
- Formation de **Sint-Huibrechts-Hern** : datant de l'Éocène Supérieur, cette formation est composée de sables. Son épaisseur est variable dans la Région de Bruxelles-Capitale, excédant 10 m dans la partie sud-est alors qu'elle est faible

au nord.

- Formation de **Bolderberg** : datant du Miocène Supérieur, cette formation est constituée de sables et est présente au nord de la Région de Bruxelles-Capitale. Partiellement érodée, son épaisseur peut néanmoins atteindre 10 m.
- Formation de **Diest** : datant du Miocène Supérieur, cette formation est semblable à la Formation de Bolderberg sous-jacente. En effet, elle est également composée de sables pouvant atteindre une épaisseur de 10 m, et elle est aussi présente au nord de la Région de Bruxelles-Capitale.

Ensuite, les dépôts quaternaires possèdent diverses origines et sont divisés en deux catégories, détaillées ci-dessous de la plus ancienne à la plus récente (Devleeschouwer *et al.*, 2017) :

- Les sédiments du **Pléistocène** : il s’agit principalement de loess d’origine éolienne, de limons et de dépôts fluviaux. L’épaisseur de ces sédiments est très variable, allant de dizaines de centimètres à une dizaine de mètres dans les vallées alluviales.
- Les sédiments de l’**Holocène** : il s’agit d’argiles, de silts, de sables, de graviers, de limons et de tourbes présents dans les vallées. Leur épaisseur s’élève jusqu’à 10 à 20 m.

Finalement, des remblais d’origine anthropique recouvrent presque toute la Région de Bruxelles-Capitale, sur une épaisseur variant de quelques dizaines de centimètres à 20 m environ (Devleeschouwer *et al.*, 2017).

La Figure 3.5 présente la carte géologique de la Région de Bruxelles-Capitale, sur laquelle les dépôts quaternaires ne sont pas représentés. En effet, ils recouvrent l’ensemble de la région.

Ainsi, à Tour & Taxis, les dépôts quaternaires surmontent le Membre de Moen de la Formation de Kortrijk.

De plus, la coupe géologique NO-SE de la Région de Bruxelles-Capitale (trait de coupe sur la Figure 3.5) est visible à la Figure 3.6, selon les données de BELB (2021).

Selon cette coupe, le site de Tour & Taxis est ainsi établi sur des dépôts quaternaires épais de 20 m recouvrant le Membre de Moen de la Formation de Kortrijk. Ce dernier, présent sur une épaisseur approximative de 10 m, surmonte le Membre de Saint-Maur s’établissant sur une épaisseur d’environ 40 m. Vient ensuite la Formation de Hannut, avec les Membres de Grandglise (environ 10 m d’épaisseur) et Lincent (environ 20 m d’épaisseur) respectivement. La Formation de Gulpen arrive ensuite, d’une épaisseur approximative de 10 m. Finalement, le socle paléozoïque est atteint à une altitude d’environ -80 m, soit environ à 100 m de profondeur.

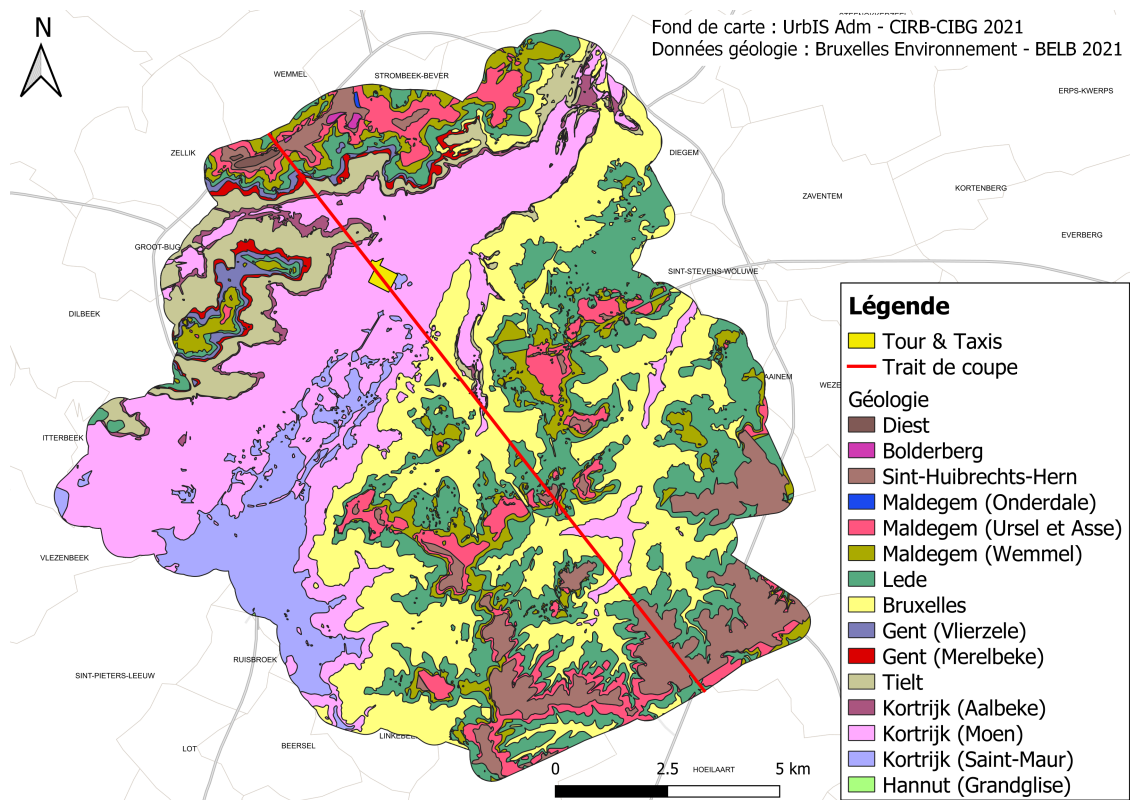


FIGURE 3.5 – Carte géologique de la Région de Bruxelles-Capitale et trait de coupe NO-SE (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

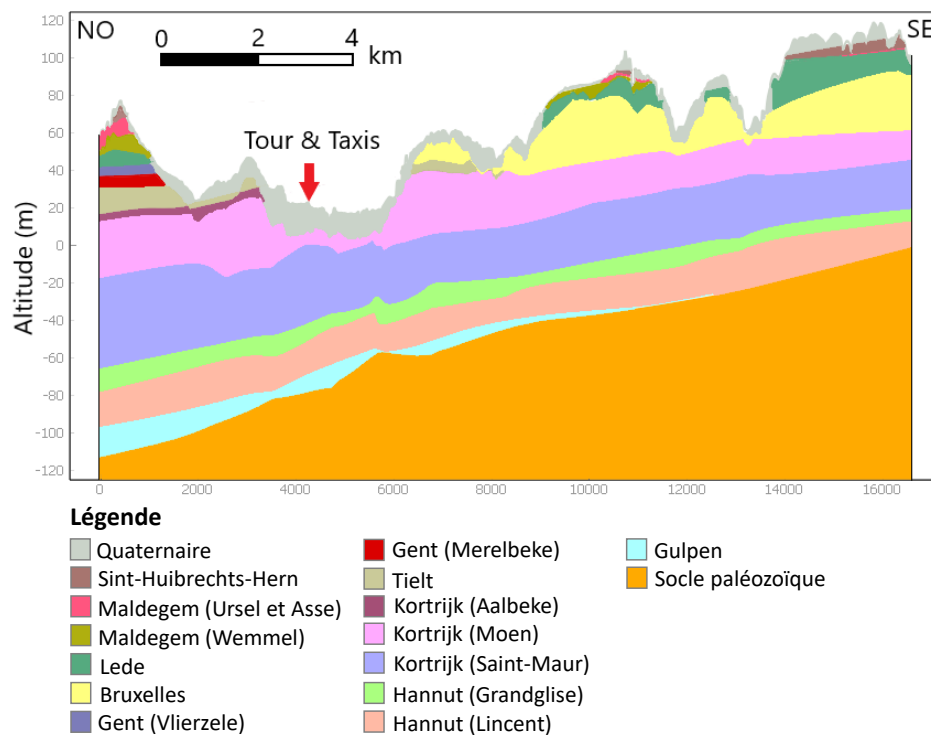


FIGURE 3.6 – Coupe géologique NO-SE de la Région de Bruxelles-Capitale selon le trait de coupe de la Figure 3.5 (BELB, 2021).

### 3.5.2 Géologie locale

Les différents forages réalisés sur le site de Tour & Taxis ont permis d’approfondir la connaissance de la géologie locale. La Table 3.1 décrit l’interprétation stratigraphique de ces forages selon Wynants & Petitclerc (2019a).

Profondeur (m)	Altitude (m)	Interprétation géologique
0 à 19.5	+20.55 à +1.05	Dépôts du quaternaire
19.5 à 28	+1.05 à -7.45	Membre de Moen (Formation de Kortrijk)
28 à 62.5	-7.45 à -41.95	Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk)
62.5 à 71.5	-41.95 à -50.95	Membre de Grandglise (Formation de Hannut)
71.5 à 84	-50.95 à -63.45	Membre de Lincet (Formation de Hannut)
84 à 85.5	-63.45 à -64.95	Formation de Gulpen
85.5 à 124	-64.95 à -103.45	Socle paléozoïque fracturé et oxydé
124 à 150	-103.45 à -129.45	Socle paléozoïque fracturé

TABLE 3.1 – Interprétation stratigraphique de la géologie observée lors des forages à Tour & Taxis (Wynants & Petitclerc, 2019a).

Ainsi, selon cette interprétation, les dépôts du quaternaire forment une couverture d’environ 20 m sur le site de Tour & Taxis. Le Membre de Moen, sous-jacent à cette couverture, possède une épaisseur approximative de 8 m. Le Membre de Saint-Maur est quant à lui présent sur environ 35 m, surmontant le Membre de Grandglise. Ce dernier possède une épaisseur de 9 m et recouvre le Membre de Lincet, qui compte une épaisseur approximative de 13 m. La Formation de Gulpen sous-jacente possède une épaisseur faible, de 1.5 m. Finalement, le socle paléozoïque (fracturé dans la zone de Tour & Taxis) est atteint à 85.5 m de profondeur, soit une altitude de -64.95 m. Il est d’abord oxydé sur une épaisseur de 39 m, avant d’atteindre le socle non altéré à 124 m de profondeur.

Cette interprétation géologique des forages correspond relativement bien à la coupe géologique NO-SE de la Région de Bruxelles-Capitale passant par Tour & Taxis (Figure 3.6). Les différences notables sont les épaisseurs du Membre de Lincet et de la Formation de Gulpen, tous deux possédant une épaisseur observée plus faible que celle attendue. Cela engendre l’atteinte réelle du socle paléozoïque à une profondeur moins élevée que ce qui était attendu (85.5 m de profondeur au lieu de 100 m).

## 3.6 Contexte hydrogéologique

### 3.6.1 Hydrogéologie régionale

La Région de Bruxelles-Capitale comporte de nombreuses unités hydrogéologiques, décrites ci-dessous de la plus ancienne à la plus récente (Bruxelles Environnement, 2021a) :

- **Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque** : il s’agit d’un système aquifère captif regroupant les Formations de Tubize et de Gulpen. Cette unité hydrogéologique peut elle-même être divisée en deux sous-unités :

- L'aquifère ou aquitard du socle Paléozoïque correspondant à la Formation de Tubize. En effet, selon les endroits, cette formation correspond à un aquifère captif ou à un aquitard ;
- L'aquifère des craies du Crétacé (captif) correspondant à la Formation de Gulpen.
- **Système aquifère des sables du Landénien** : cette unité hydrogéologique est un aquifère captif correspondant à la Formation de Hannut. Elle peut néanmoins être divisée en deux sous-unités concordant avec les deux membres de la formation :
  - L'aquiclude des argiles du Landénien correspondant au Membre de Lincent ;
  - L'aquifère des sables du Landénien (captif) correspondant au Membre de Grandglise.
- **Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk** : il s'agit d'un aquitard concordant avec la Formation de Kortrijk. Chaque membre de la formation peut néanmoins être considéré comme une sous-unité hydrogéologique :
  - L'aquiclude des argiles de Saint-Maur ;
  - L'aquitard des sables et argiles de Moen, principalement libre et localement captif ;
  - L'aquiclude des argiles de Aalbeke.
- **Aquitard des sables et argiles de Tielt** : il s'agit d'un aquitard principalement libre mais localement captif correspondant à la Formation de Tielt.
- **Aquiclude des argiles de Merelbeke** : cette unité hydrogéologique est constituée du Membre de Merelbeke de la Formation de Gent.
- **Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele** : cet aquifère libre regroupe le Membre de Vlierzele de la Formation de Gent, la Formation de Bruxelles, la Formation de Lede ainsi que le Membre de Wemmel de la Formation de Maldegem.
- **Aquiclude des argiles de Ursel et Asse** : les Membres de Ursel et de Asse de la Formation de Maldegem constituent cet aquiclude.
- **Système aquifère sableux perché** : il s'agit d'un aquifère libre composé des Membres de Onderdale et de Zomergem (argiles) de la Formation de Maldegem, et des Formations de Sint-Huibrechts-Hern, de Bolderberg et de Diest.
- **Système aquifère du quaternaire** : cet aquifère libre correspond à l'ensemble des dépôts quaternaires. Il peut néanmoins être subdivisé en deux sous-unités hydrogéologiques :
  - L'aquifère des limons, sables et graviers alluviaux qui est un aquifère semi-captif ;
  - Le système aquitard quaternaire superficiel, qui est composé des argiles alluviales ainsi que de la couverture limoneuse et des remblais. Ces différentes lithologies constituent un aquitard libre.

La Figure 3.7 présente la carte hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale, sur laquelle le système aquifère du quaternaire n'est pas représenté. Le site de Tour & Taxis repose donc sur ce système aquifère du quaternaire, qui recouvre toute la Région de Bruxelles-Capitale. Sous cet aquifère se trouve le système aquitard des sables et argiles de Kortrijk.

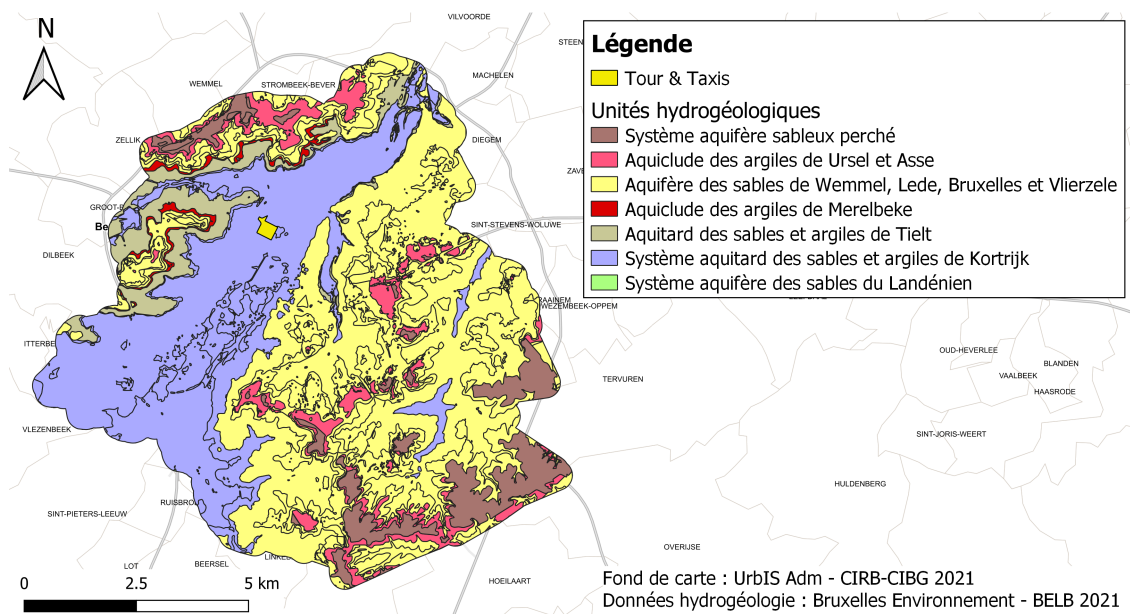


FIGURE 3.7 – Carte hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale (système aquifère du quaternaire non représenté ; CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

### 3.6.2 Hydrogéologie locale

Les forages réalisés sur le site de Tour & Taxis permettent l'interprétation de l'hydrogéologie locale présentée à la Table 3.2 (AGT, 2018a).

Profondeur (m)	Altitude (m)	Interprétation hydrogéologique
0 à 7	+18 à +11	Système aquitard quaternaire superficiel
7 à 20	+11 à -2	Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux (quaternaire)
20 à 23	-2 à -5	Aquitard des sables et argiles de Moen
23 à 58	-5 à -40	Aquiclude des argiles de Saint-Maur
58 à 64	-40 à -46	Aquifère des sables du Landénien (Grandglise)
64 à 74	-46 à -56	Aquiclude des argiles du Landénien (Lincent) Sables et argiles
74 à 85.5	-56 à -67.5	Argiles indurées du Landénien (Lincent) pouvant être assimilées à un aquifère
85.5 à 94.5	-67.5 à -76.5	Aquiclude des marnes de Gelinden
A partir de 94.5	A partir de -76.5	Aquifère du socle paléozoïque

TABLE 3.2 – Interprétation de l'hydrogéologie locale grâce aux forages réalisés à Tour & Taxis (AGT, 2018a).

Ainsi, un aquiclude formé de marnes sépare le système aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque à Tour & Taxis. La présence de cette couche n'était pas connue avant les forages réalisés sur le site.

De plus, la partie inférieure du Membre de Lincent de la Formation de Hannut peut être assimilée à un aquifère à Tour & Taxis, alors qu'il s'agit habituellement d'un aquiclude. En effet, ces argiles sont localement indurées et très altérées, et peuvent donc se

comporter comme un aquifère. Cela reste néanmoins un phénomène local, observé sur une épaisseur de 10 m à Tour & Taxis (IFTech, 2010).

Les bâtiments utilisant la géothermie en système ouvert à Tour & Taxis exploitant l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque, seules ces deux unités hydrogéologiques sont étudiées plus en profondeur dans ce travail.

### 3.6.3 Système aquifère du socle paléozoïque

Les roches du Massif du Brabant peuvent localement constituer des aquifères, si celles-ci sont suffisamment fracturées ou altérées. Elles forment alors des aquifères de porosité de fissures (Ruthy *et al.*, 2017).

Dans la Région de Bruxelles-Capitale, le socle est fracturé et, dans sa partie supérieure, oxydé. Il forme donc un aquifère pouvant être exploité. Néanmoins, la connaissance de ce système aquifère dépend des forages profonds atteignant le socle réalisés dans la région. Or, ceux-ci sont peu nombreux et les données sont donc limitées.

**Piézométrie** A ce jour, il n'existe pas encore de carte piézométrique de l'aquifère du socle paléozoïque. Néanmoins, différents piézomètres atteignant le socle dans la région bruxelloise permettent de suivre l'évolution du niveau piézométrique. Leur localisation est visible à la Figure 3.8.

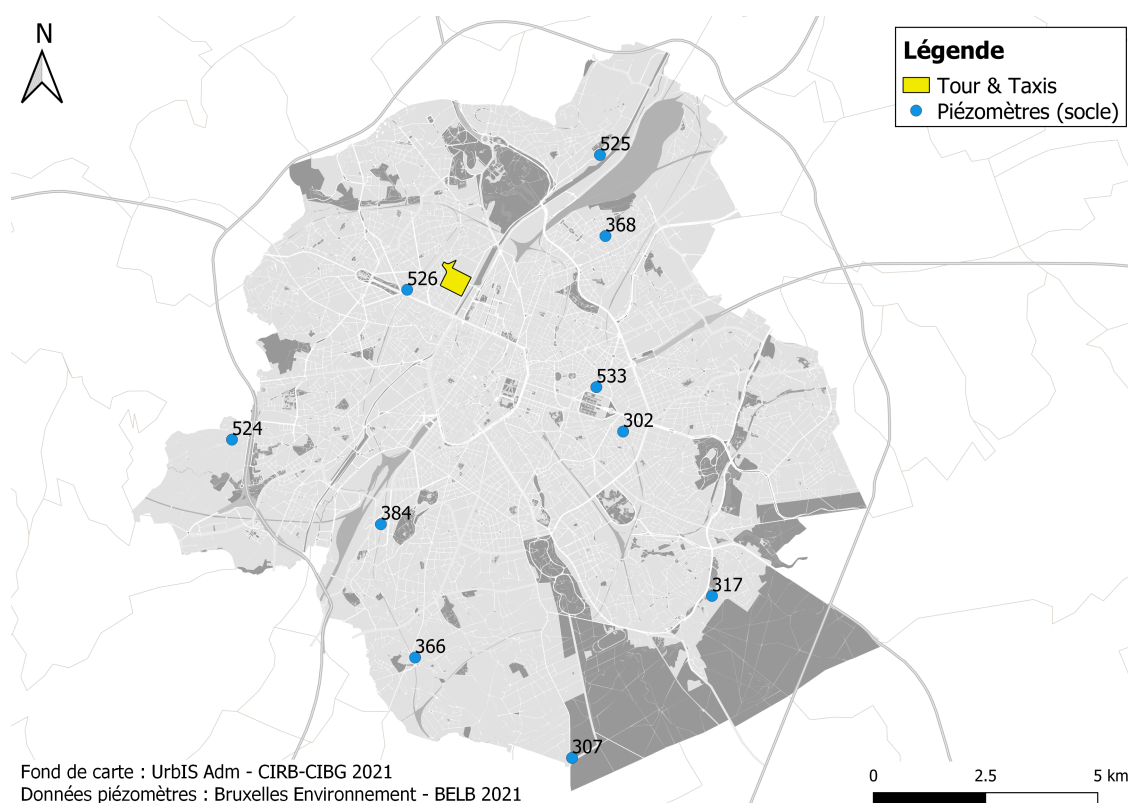


FIGURE 3.8 – Localisation des différents piézomètres dans le système aquifère du socle paléozoïque dans la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

L'évolution de la piézométrie au sein de ces piézomètres est présentée à la Figure

3.9. Tout d’abord, de manière générale, le niveau piézométrique est plus élevé au sud-est de la Région de Bruxelles-Capitale et diminue vers le nord-ouest. Cela suggère donc un écoulement dans cet aquifère dirigé du sud-est vers le nord-ouest. De plus, les piézomètres situés à l’est de la région semblent montrer une piézométrie stable au cours du temps, alors que des variations significatives sont observées au sein des piézomètres localisés à l’ouest de la Région de Bruxelles-Capitale. En particulier, le niveau d’eau dans les piézomètres 384 et 525 croît jusqu’en 2011 (voire 2012), avant de se stabiliser. En outre, un événement semble avoir eu un impact sur la piézométrie du socle dans le nord-est de la région en 2012, comme le montrent les piézomètres 368 et 525 au sein desquels un rabattement est visible. Il s’agit probablement d’un pompage dans la nappe du Massif du Brabant, dont l’effet n’est pas visible sur les autres piézomètres, trop éloignés de la source du pompage.

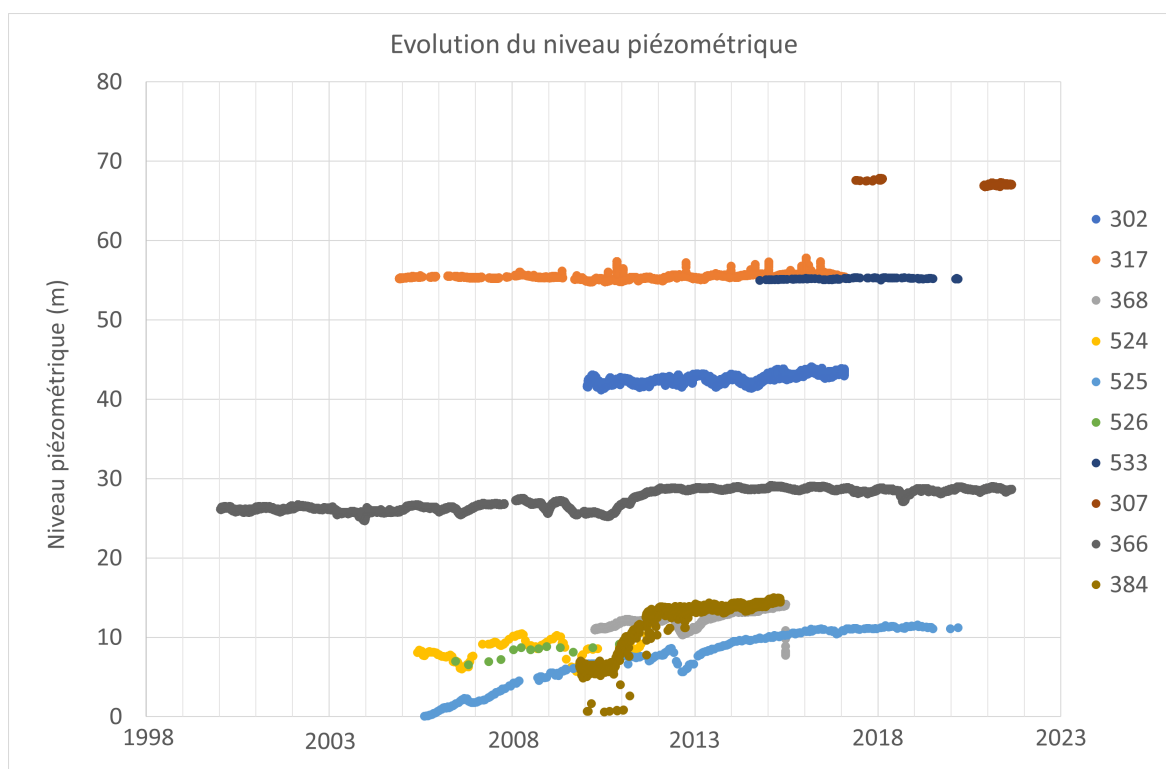


FIGURE 3.9 – Évolution du niveau piézométrique du système aquifère du socle paléozoïque observée dans divers piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale (BELB, 2021).

**Paramètres d’écoulement** Les roches du socle paléozoïque formant des aquifères discontinus et donc localisés, les paramètres hydrauliques de cette unité hydrogéologique possèdent une grande variabilité géographique. A titre d’exemple, la Table 3.3 présente différentes valeurs de conductivité hydraulique et de coefficient d’emmagasinement calculés sur base d’essais de pompage menés à divers endroits.

Localisation	Conductivité hydraulique $K$ (m/s)	Coefficient d'emmagasinement $S$ (/)
Wavre (Ruthy <i>et al.</i> , 2017)	$1.28 \times 10^{-3}$ à $9.74 \times 10^{-3}$	/
Mont-Saint-Guibert (Ruthy & Dassargues, 2015)	$2.8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
Gembloux (Ruthy & Dassargues, 2015)	$8 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-4}$

TABLE 3.3 – Valeurs de conductivité hydraulique et de coefficient d'emmagasinement de l'aquifère du socle paléozoïque à différentes localisations (Ruthy *et al.*, 2017 ; Ruthy & Dassargues, 2015).

Localement, des essais de pompage de moyenne durée ont été réalisés dans le socle paléozoïque par AGT (2019) dans 6 puits de pompage situés sur le site de Tour & Taxis. Il s'agit d'essais de pompage par paliers, pour lesquels les débits pompés, les rabattements stabilisés associés ainsi que la période de temps écoulée sont renseignés. Ces données ont permis de déterminer, pour chaque puits, une valeur de transmissivité  $T$  par la méthode de Birsoy-Summers. Ces valeurs de transmissivité sont présentées à la Table 3.4. De plus, la valeur de conductivité hydraulique étant dépendante de l'épaisseur de l'aquifère, celle-ci sera discutée dans le chapitre concernant la définition des paramètres du modèle (Chapitre 5), puisque le socle n'est pas modélisé sur l'entièreté de son épaisseur.

Puits	Transmissivité $T$ (m <sup>2</sup> /s)
3W1	$2.9 \times 10^{-4}$
3W4	$1.7 \times 10^{-4}$
3W5	$2.6 \times 10^{-4}$
3C1	$1.2 \times 10^{-4}$
3C2	$1.5 \times 10^{-4}$
3C5	$2.9 \times 10^{-4}$

TABLE 3.4 – Valeurs de transmissivité hydraulique du socle paléozoïque, calculées à partir de données d'essais de pompage réalisés par AGT (2019) dans 6 puits sur le site de Tour & Taxis (localisation des puits Figure 2.4).

### 3.6.4 Aquifère des sables du Landénien

L'aquifère des sables du Landénien représente une importante source d'eau dans la Région de Bruxelles-Capitale. Il est relativement bien connu grâce aux divers captages et piézomètres dans la région.

**Piézométrie** La Figure 3.10 présente la carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien dans la Région de Bruxelles-Capitale en mai 2013. L'écoulement est ainsi dirigé du sud-est vers le nord-ouest. Le gradient est élevé au sud de la région et diminue vers le nord.

Selon cette carte, le niveau piézométrique de l'aquifère du Landénien varie donc entre 12 et 14 m environ à Tour & Taxis.

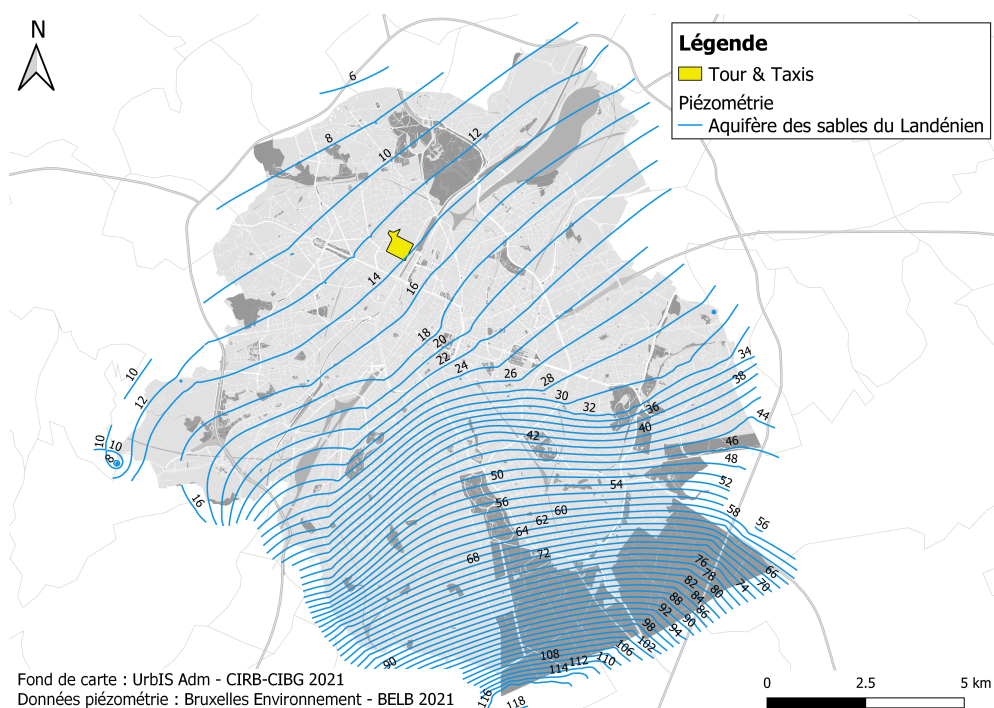


FIGURE 3.10 – Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien en mai 2013 (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

De plus, différents piézomètres permettent de suivre l'évolution du niveau piézométrique dans la région. Leur localisation est présentée à la Figure 3.11.

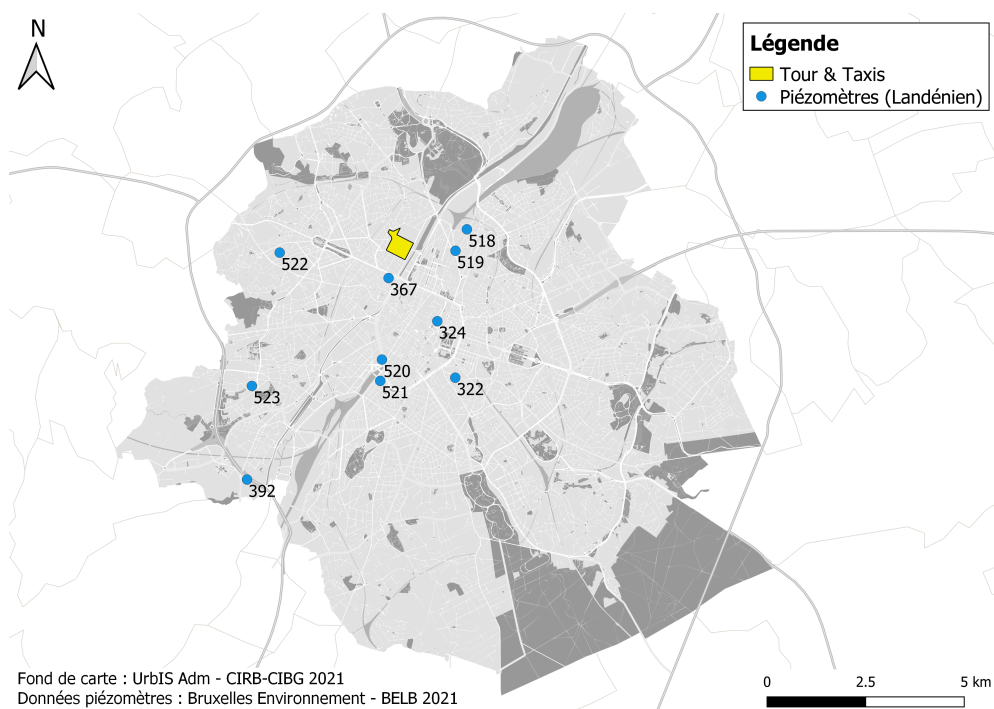


FIGURE 3.11 – Localisation des différents piézomètres dans l'aquifère des sables du Landénien dans la Région de Bruxelles-Capitale (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

La Figure 3.12 montre quant à elle l'évolution du niveau piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien. Tout d'abord, les piézomètres 322, 324, 367, 518, 519 et 522 présentent un niveau piézométrique croissant au cours du temps. De plus, les piézomètres 367, 518, 519, 520, 521 et 523 montrent un niveau piézométrique similaire, avec un niveau situé entre 10 et 18 m environ. Cependant, seuls les piézomètres 324, 367, 518 et 519 présentent deux phénomènes de rabattement observés simultanément, en 2013 et 2016.

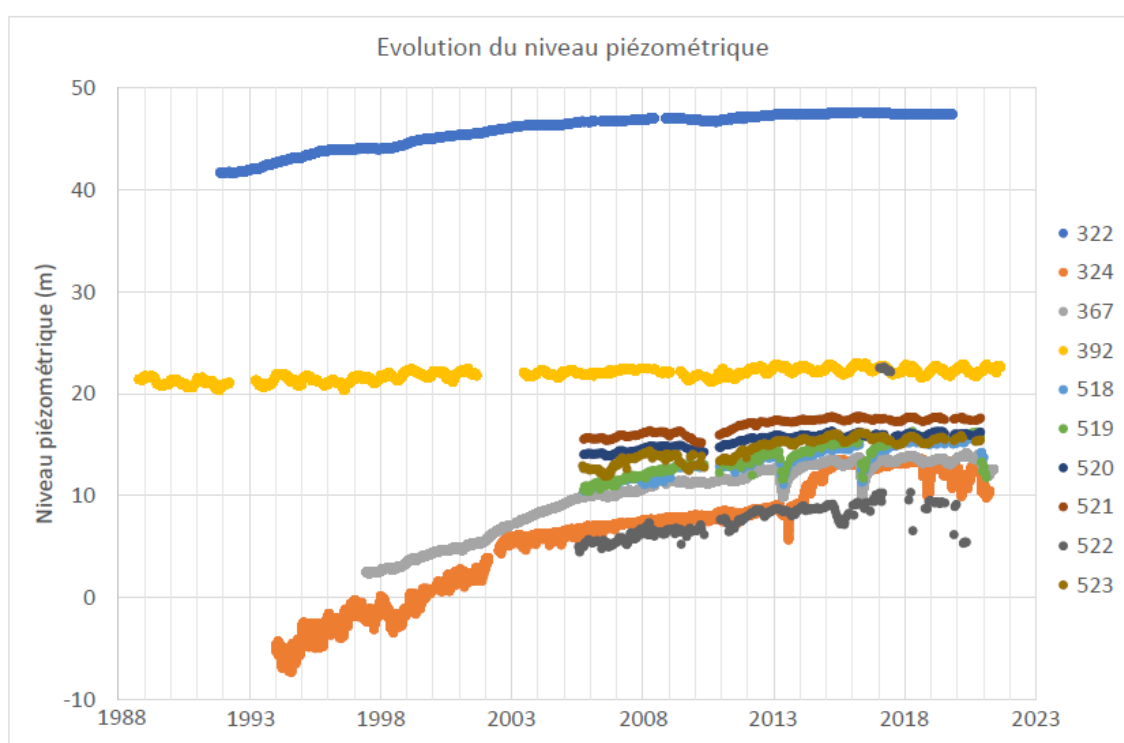


FIGURE 3.12 – Évolution du niveau piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien observée dans divers piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale (BELB, 2021).

**Paramètres d'écoulement** La conductivité hydraulique de l'aquifère des sables du Landénien possède également une variabilité spatiale. En guise d'exemple, la Table 3.5 présente des valeurs de conductivité hydraulique calculées à différentes localisations, sur base d'essais de pompage.

Localisation	Conductivité hydraulique $K$ (m/s)
Flandre (sables et argiles du Paléocène; Roland <i>et al.</i> , 2016)	$1.2 \times 10^{-6}$ à $2.3 \times 10^{-6}$
Wavre (Ruthy <i>et al.</i> , 2017)	$3.8 \times 10^{-7}$ à $1.1 \times 10^{-3}$

TABLE 3.5 – Valeurs de conductivité hydraulique de l'aquifère des sables du Landénien à différentes localisations (Roland *et al.*, 2016; Ruthy *et al.*, 2017).

Localement, la conductivité hydraulique de la Formation de Hannut a été calculée par IFTech (2010) en divisant celle-ci selon ses caractéristiques hydrogéologiques locales. Une valeur a donc été calculée pour le Membre de Grandglise, pour la partie argileuse du Membre de Lincen et pour la partie indurée du Membre de Lincen. Les différentes valeurs sont reprises à la Table 3.6.

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique $K$ (m/s)
Membre de Grandglise	$2.4 \times 10^{-5}$
Membre de Lincen (partie argileuse)	$1 \times 10^{-8}$
Membre de Lincen (partie indurée)	$1.6 \times 10^{-5}$

TABLE 3.6 – Conductivité hydraulique de l’aquifère des sables du Landénien calculée par IFTech (2010) sur le site de Tour & Taxis.

### 3.7 Conclusion

Tour & Taxis est localisé au nord de la Région de Bruxelles-Capitale, région largement urbanisée. Le site se trouve dans la plaine alluviale de la Senne, à une altitude d’environ 20 m. Le Canal Bruxelles-Charleroi, seule voie navigable de la région bruxelloise, longe également Tour & Taxis.

La géologie de la Région de Bruxelles-Capitale est principalement constituée de formations datant du Cénozoïque. Celles-ci recouvrent le Massif du Brabant en discordance, car le Mésozoïque est également présent à certains endroits. En particulier, à Tour & Taxis, des dépôts quaternaires sont établis sur une épaisseur d’environ 20 m. Sous ces dépôts se trouve la Formation de Kortrijk, épaisse d’environ 50 m et principalement constituée d’argiles. La Formation de Hannut, sous-jacente à la Formation de Kortrijk, est composée de deux membres : Grandglise, constitué de sables et épais de 10 m, et Lincen, formé d’argiles sur environ 10 m également. Vient ensuite la Formation de Gulpen, peu perméable à Tour & Taxis. En effet, elle est constituée de craies mais également d’argiles et de marnes. Elle est présente sur une épaisseur d’environ 1 à 2 m. Finalement, le socle paléozoïque, composé de phyllades et quartzites, est atteint à environ 100 m de profondeur.

Les 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis exploitent deux aquifères différents : l’aquifère des sables du Landénien et l’aquifère du socle paléozoïque. Le premier est composé du Membre de Grandglise de la Formation de Hannut, et de la partie inférieure du Membre de Lincen. En effet, bien que ce dernier soit formé d’argiles, celles-ci sont très indurées et fracturées à Tour & Taxis dans la partie inférieure du membre. Elles constituent donc un aquifère local. Entre ces deux niveaux aquifères se trouve une partie aquiclude, composée des argiles de Lincen non indurées. Les deux aquifères (Landénien et socle) sont séparés par un aquitard, correspondant à la Formation de Gulpen. Ils possèdent tous deux un écoulement dirigé du SE vers le NO, et leurs paramètres d’écoulement ont été calculés localement à partir d’essais de pompage réalisés sur le site de Tour & Taxis.

# Chapitre 4

## Modèle conceptuel

Après avoir pris connaissance du contexte environnemental de la région d'intérêt, le modèle conceptuel peut être développé pour le problème considéré.

Le modèle hydrogéologique permet de représenter le comportement hydrogéologique du système étudié. Cependant, dans la réalité, de nombreux processus complexes conditionnent le fonctionnement du système. En pratique, il n'est pas possible de tenir compte de l'ensemble de ces phénomènes de manière précise. Ainsi, le modèle conceptuel consiste à définir une simplification des conditions réelles, mais qui permet néanmoins de correctement représenter le comportement du système. Il s'agit donc de définir les processus qui doivent impérativement être modélisés, l'étendue du modèle, les conditions imposées à ses frontières, les sollicitations ainsi que les conditions initiales (Geolys, 2021).

### 4.1 Processus modélisés

L'objectif de ce travail étant d'évaluer l'effet cumulé des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis, les phénomènes à inclure dans le modèle sont l'écoulement des eaux souterraines et le transport de chaleur.

### 4.2 Frontières du modèle

Les étendues latérale et verticale du modèle doivent être définies.

A chaque frontière du modèle sera imposée une condition appelée condition aux frontières. A proximité des limites du modèle, les résultats des simulations sont grandement influencés par ces conditions aux frontières. Ainsi, lorsque cela est possible, les frontières du modèle doivent être choisies telles qu'elles correspondent à des limites physiques du sol. En effet, les frontières physiques sont indépendantes des conditions hydrogéologiques et représentent donc des conditions stables pour l'écoulement, connues avec précision. Généralement, il s'agit de la limite entre roches présentant des caractéristiques hydrogéologiques très différentes, par exemple un aquifère (unité modélisée) et un aquiclude (Follin & Grundtenik, 1999).

Si les limites physiques sont trop éloignées de la région d'intérêt, d'autres frontières

peuvent être choisies. Néanmoins, il est primordial de s'assurer que dans la zone d'intérêt, les résultats ne soient pas influencés par les conditions imposées aux frontières du modèle, qui sont alors liées à des incertitudes. Les limites doivent donc être suffisamment éloignées de la région d'intérêt.

#### 4.2.1 Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle

Les systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis exploitant l'aquifère des sables du Landénien (bâtiments 1 et 2) et l'aquifère du socle paléozoïque (bâtiment 3), il s'agit de modéliser, au minimum, ces deux unités hydrogéologiques ainsi que l'aquitard les séparant.

**Frontière supérieure** Le choix de la frontière supérieure du modèle est identique à celui de Bulté (2020). Celle-ci correspond au sommet du Membre de Grandglise de la Formation de Hannut. En effet, celui-ci constitue la partie supérieure de l'aquifère des sables du Landénien, et il est recouvert par l'aquiclude des argiles de Saint-Maur. Ce dernier formant une barrière quasi imperméable (Bruxelles Environnement, 2021b), les échanges verticaux entre le Membre de Grandglise (aquifère) et le Membre de Saint-Maur (aquiclude) ainsi que les unités sus-jacentes peuvent être négligés. La frontière supérieure du modèle correspond donc à une limite physique.

**Frontière inférieure** Concernant la frontière inférieure du modèle, le choix semble moins évident car il n'est pas possible de déterminer une limite physique engendrant une épaisseur de modèle acceptable. En effet, les lithologies du socle paléozoïque observées lors des différents forages à Tour & Taxis sont relativement homogènes. Il s'agit de phyllades gris foncés et de quartzites verdâtres, qui sont présents à partir du sommet du socle jusqu'à 200 m de profondeur, qui constitue l'arrêt du forage le plus profond (Wynants & Petitclerc, 2019b).

Néanmoins, 3 essais de pompage de moyenne durée réalisés à Tour & Taxis dans l'aquifère du socle paléozoïque par AGT (2018b) ont permis de montrer que les profondeurs les plus élevées sont peu productives et ne contribuent qu'à une faible partie du débit obtenu, en particulier à partir de 140 m de profondeur. Une limite hydrogéologique semble donc se dessiner lorsque la profondeur augmente. Il a donc été choisi d'établir la frontière verticale inférieure du modèle à une altitude de -150 m, correspondant à une profondeur d'environ 170 m.

#### 4.2.2 Frontières latérales

L'aquifère des sables du Landénien ainsi que l'aquifère du socle paléozoïque sont tous deux présents sur l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale. Ainsi, comme pour la frontière inférieure du modèle, il n'est pas possible de choisir une limite physique pour ses frontières latérales. En effet, cela engendrerait un modèle possédant une étendue horizontale trop importante, associée à des temps de calcul très conséquents. Il s'agit alors de choisir des frontières latérales suffisamment éloignées de la zone d'intérêt pour que les conditions aux frontières n'aient pas d'influence sur les résultats dans cette zone, tout en s'assurant que les temps de calcul restent raisonnables.

Le choix des limites latérales est développé en deux parties : d'abord pour l'aquifère des sables du Landénien, et ensuite pour l'aquifère du socle paléozoïque. Le choix final des frontières du modèle devant être commun pour les deux aquifères, si l'un des deux impose un choix de frontières plus éloignées de la région d'intérêt (Tour & Taxis) que l'autre, ce sont ces frontières plus distantes de la zone qui devront être choisies.

**Aquifère des sables du Landénien** Le choix des frontières latérales pour l'aquifère des sables du Landénien est identique à celui de Bulté (2020), dont le raisonnement est expliqué ci-dessous.

Deux essais de pompage de longue durée ont été menés à Tour & Taxis dans l'aquifère des sables du Landénien, pour les études concernant les systèmes géothermiques ouverts des bâtiments 1 et 2. Le premier essai (bâtiment 1) a été réalisé de début mars à mi-mai 2013, et le second (bâtiment 2) de début avril à mi-mai 2016 (Bulté, 2020).

Le rabattement engendré par chacun de ces pompages au sein de chaque piézomètre dans l'aquifère des sables du Landénien dans la Région de Bruxelles-Capitale a été évalué par Bulté (2020). En guise de rappel, leur localisation est présentée à la Figure 3.11. Le piézomètre le plus distant de Tour & Taxis ayant subi un rabattement lors des deux essais de pompage est le piézomètre 521, dont le rabattement était inférieur à 10 cm pour le premier essai et égal à 20 cm pour le second. Ce piézomètre est situé à 3.5 km de Tour & Taxis (Bulté, 2020).

Ainsi, les frontières latérales ont été choisies à une distance supérieure à 3.5 km de Tour & Taxis par Bulté (2020). En effet, à partir de cette distance, les pompages à Tour & Taxis n'ont plus d'impact sur la piézométrie de l'aquifère. Par conséquent, les conditions aux frontières imposées à cette distance de 3.5 km n'auront pas non plus d'influence sur les résultats dans la région d'intérêt, à savoir Tour & Taxis (Bulté, 2020).

**Aquifère du socle paléozoïque** L'aquifère du socle paléozoïque est exploité par le bâtiment 3 pour son système géothermique ouvert. 4 essais de pompage de moyenne durée ont été réalisés à Tour & Taxis par AGT (2018b) entre septembre et octobre 2018. En particulier, un essai a été réalisé du 5 au 7 septembre 2018, alors que les 3 autres ont été réalisés les 19, 29 et 31 octobre 2018 respectivement. Aucune donnée concernant un éventuel essai de pompage de longue durée à Tour & Taxis n'est à disposition.

Pour rappel, la Figure 3.9 montre l'évolution du niveau piézométrique dans l'aquifère du socle paléozoïque dans divers piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale. Néanmoins, seuls les piézomètres 307, 366, 525 et 533 disposent de données pour 2018, 2019 et 2020.

L'impact des 4 essais de pompage ne peut être évalué que sur le piézomètre 366. En effet, il s'agit du seul piézomètre pour lequel des données continues sont disponibles entre le 5 et 7 septembre 2018, et les 19, 29 et 31 octobre 2018. L'influence de l'ensemble de ces pompages sur le niveau piézométrique au sein du piézomètre 366 est considérée nulle. En effet, les fluctuations observées sont si faibles qu'elles ne sont pas attribuables

à un pompage dans l'aquifère. Il est intéressant de noter qu'un rabattement dû à un pompage est visible sur le niveau piézométrique de 366, mais que celui-ci est dû à un pompage de source inconnue, indépendante de Tour & Taxis. En effet, la piézométrie commence à diminuer à partir du 29 août 2018, soit avant le début de l'essai de pompage pour le bâtiment 3.

De plus, l'existence d'un essai de pompage de longue durée réalisé à Tour & Taxis ayant une influence sur les piézomètres du socle paléozoïque ne peut être mise en évidence par la Figure 3.9. En effet, aucun phénomène de rabattement n'est visible à partir de 2018, excepté celui mentionné ci-dessus.

Finalement, pour l'aquifère du socle paléozoïque, la seule information à disposition est que le piézomètre 366 est situé à une distance suffisante de Tour & Taxis pour ne pas subir d'impact dû à un pompage de moyenne durée. La distance entre ce piézomètre et le site de Tour & Taxis est de 8.4 km.

**Choix final** En l'absence d'informations supplémentaires plus précises concernant l'aquifère du socle paléozoïque, le choix de Bulté (2020) est maintenu.

### 4.2.3 Visualisation des frontières du modèle

Les frontières latérales du modèle sont présentées à la Figure 4.1. Le choix est identique à celui de Bulté (2020). Les frontières NO et SE ont été placées selon la carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien (Figure 3.10). En effet, la première correspond à l'isopièze 8 m et la seconde à l'isopièze 22 m. Les frontières NE et SO ont quant à elles été choisies perpendiculaires aux deux autres.

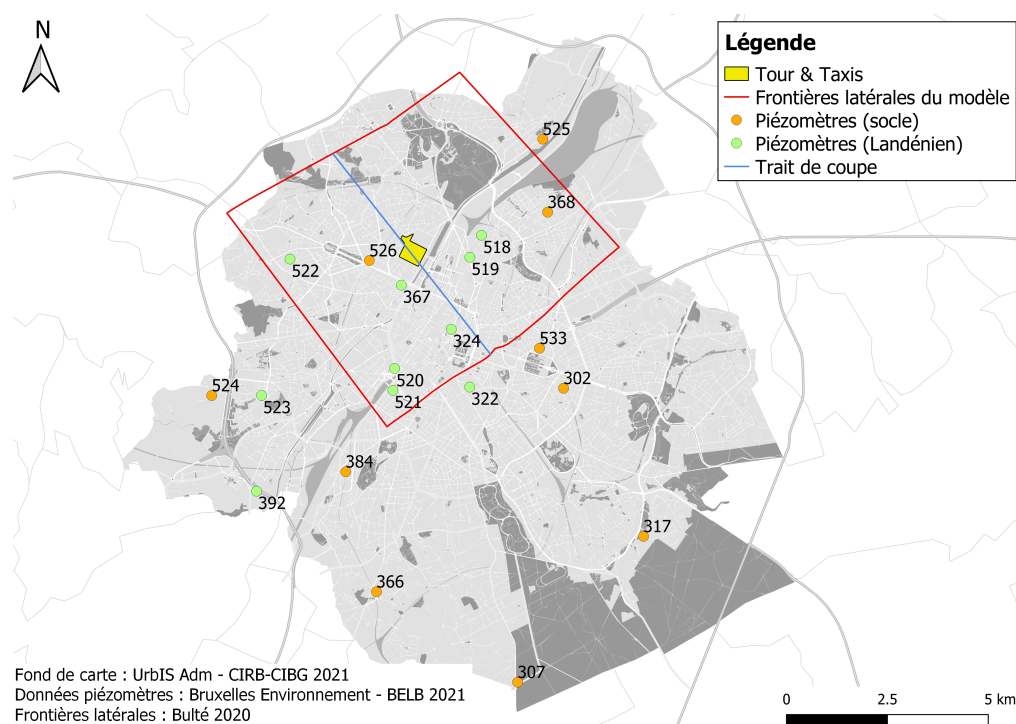


FIGURE 4.1 – Frontières latérales du modèle (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

De plus, les frontières inférieure et supérieure du modèle, délimitant son étendue verticale, sont visibles sur la Figure 4.2. La coupe est réalisée selon le trait de coupe dessiné sur la Figure 4.1 des frontières latérales.

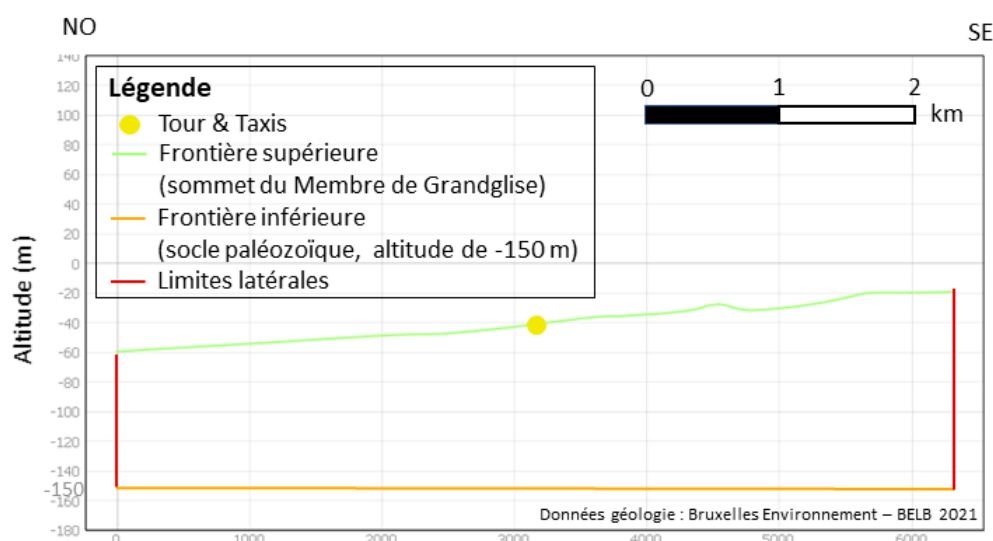


FIGURE 4.2 – Frontières délimitant l’étendue verticale du modèle, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021).

## 4.3 Conditions aux frontières du modèle

Ensuite, des conditions aux frontières doivent être imposées au modèle pour chaque processus modélisé, à savoir l’écoulement des eaux souterraines et le transport de chaleur.

### 4.3.1 Conditions aux frontières pour l’écoulement

Dans le logiciel FEFLOW, les conditions aux frontières pour l’écoulement peuvent être représentées à l’aide de trois types de conditions (FEFLOW, 2021a) :

- **Hydraulic-head BC** : une valeur de hauteur piézométrique est imposée aux nœuds d’une frontière. Dans ce cas, le niveau piézométrique aux nœuds concernés n’est pas calculé lors de la simulation, mais il reste égal à la valeur prédéfinie. Ce type de condition aux frontières est également appelé condition de Dirichlet.
- **Fluid-flux BC** : une valeur de flux (ou débit spécifique) de Darcy est prescrite aux nœuds d’une frontière. Dans ce cas, lors de la simulation, le niveau piézométrique le long de la frontière concernée est calculé en tenant compte du débit spécifique imposé. Celui-ci peut représenter une entrée d’eau dans le modèle, ou au contraire une sortie d’eau. Ce type de condition aux frontières est également appelé condition de Neumann.
- **Fluid-transfer BC** : une valeur de hauteur piézométrique est imposée aux nœuds d’une frontière, ainsi qu’une valeur de conductance. Ce type de condition est utilisé lorsque l’unité hydrogéologique modélisée est séparée d’une autre masse d’eau (associée à un niveau piézométrique de référence) par une couche de colmatage. C’est notamment le cas le long des cours d’eau pour lesquels des

murs de soutènement ou épis sont construits. La conductance représente le taux de transfert entre les nœuds du modèle situés à proximité de la frontière, et l'extérieur du modèle. Ce type de condition aux frontières est également appelé condition de Cauchy.

Ainsi, une condition de Dirichlet, de Neumann ou de Cauchy doit être imposée à chaque frontière du modèle, délimitant ses étendues latérale et verticale.

#### 4.3.1.1 Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle

Des conditions sont prescrites aux frontières supérieure et inférieure du modèle.

**Frontière supérieure** Une condition de flux nul (condition de Neumann) est prescrite à la frontière supérieure du modèle. En effet, cette dernière correspond à la limite entre l'aquifère des sables du Landénien et la base de l'aquiclude des argiles de Saint-Maur. Cet aquiclude formant une barrière quasi-imperméable, les échanges verticaux entre les deux unités peuvent être négligés, ce qui correspond à un débit spécifique nul (Bulté, 2020).

**Frontière inférieure** Une condition de flux nul (condition de Neumann) est également imposée à la frontière inférieure du modèle. En effet, comme mentionné précédemment, les profondeurs plus élevées du socle paléozoïque sont peu productives et ne contribuent qu'à une faible partie du débit obtenu. Ce phénomène peut être interprété comme la diminution de la perméabilité du socle lorsque la profondeur croît suffisamment. Les échanges verticaux entre la partie modélisée du socle, qui correspond à sa partie supérieure jusqu'à une altitude de -150 m, et sa partie inférieure peuvent donc être négligés.

Finalement, les conditions aux frontières supérieure et inférieure du modèle pour l'écoulement sont présentées à la Figure 4.3, selon le trait de coupe de la Figure 4.1.

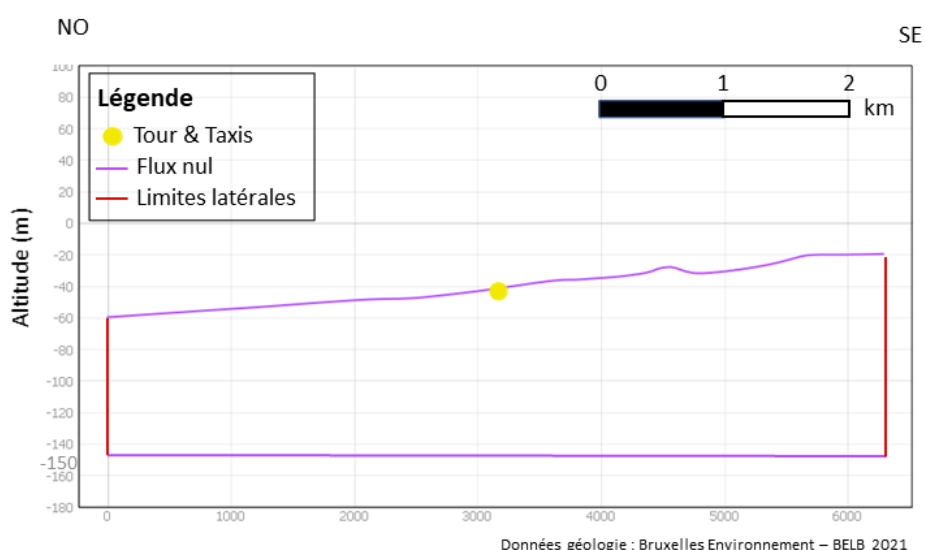


FIGURE 4.3 – Conditions aux frontières délimitant l'étendue verticale du modèle pour l'écoulement, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021).

#### 4.3.1.2 Frontière latérales

Chaque unité hydrogéologique modélisée (aquifère des sables du Landénien, aquitard de Gulpen et aquifère du socle paléozoïque) possède ses propres conditions hydrogéologiques. Ainsi, des conditions aux frontières latérales différentes doivent être attribuées à chacune d'entre elles.

**Aquifère des sables du Landénien** Le choix de ces conditions aux frontières est identique à celui de Bulté (2020). Les frontières NO et SE du modèle ont été choisies le long des isopièzes 8 m et 22 m respectivement. Ainsi, des hauteurs piézométriques imposées de 8 m et de 22 m sont prescrites à la frontière NO et à la frontière SE respectivement, ce qui correspond à une condition de Dirichlet.

Concernant les deux autres frontières latérales, à savoir les frontières NE et SO, des conditions de flux nul (condition de Neumann) ont été choisies par Bulté (2020). En effet, l'écoulement possédant une direction du SE vers le NO, les échanges latéraux entre les frontières NE et SO et le reste de l'aquifère peuvent être négligés. Ce choix est donc maintenu dans ce travail.

Finalement, les conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquifère des sables du Landénien sont présentées à la Figure 4.4.

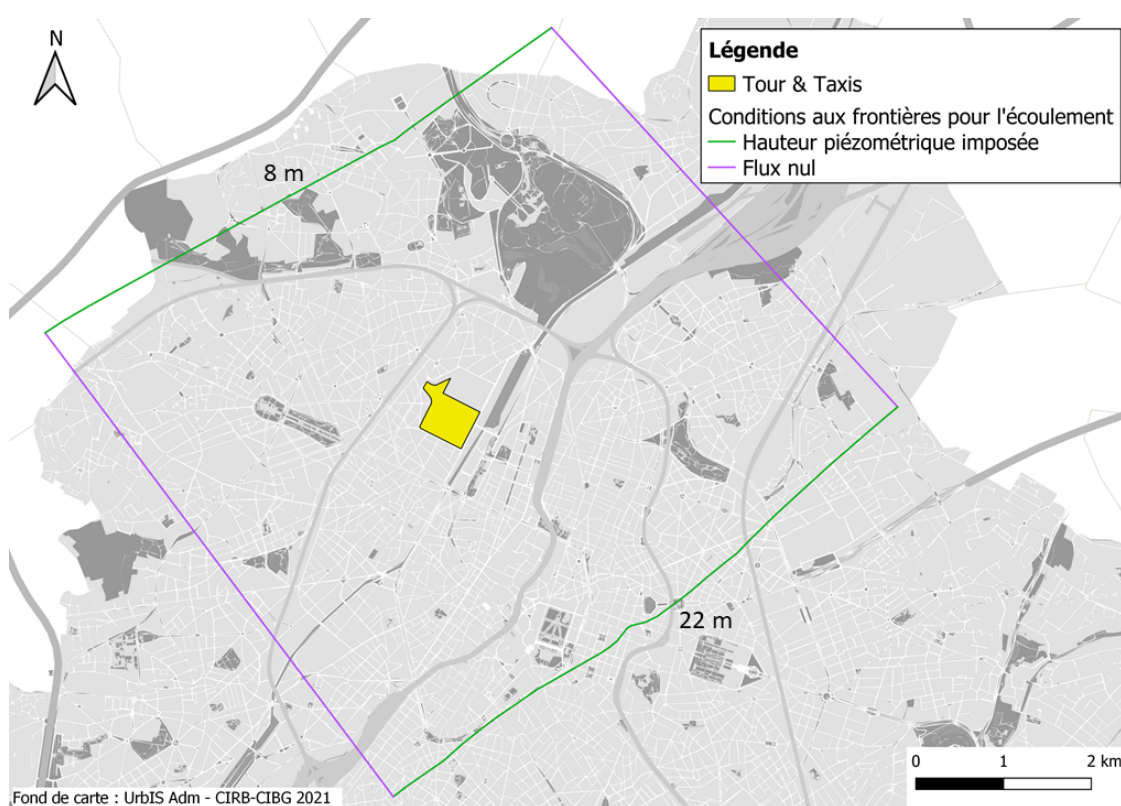


FIGURE 4.4 – Conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquifère des sables du Landénien (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021).

**Aquitard de Gulpen** La Formation de Gulpen séparant l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque peut être considérée comme un aquitard. En effet, elle est constituée d'argiles, de craies et de marnes selon les forages profonds réalisés à Tour & Taxis. Ainsi, cette couche est peu perméable et les échanges avec l'extérieur du modèle à travers ses frontières sont négligeables. Un flux nul (condition de Neumann) est donc imposé le long des 4 frontières latérales pour cette unité hydrogéologique.

Les conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquitard de Gulpen sont présentées à la Figure 4.5.

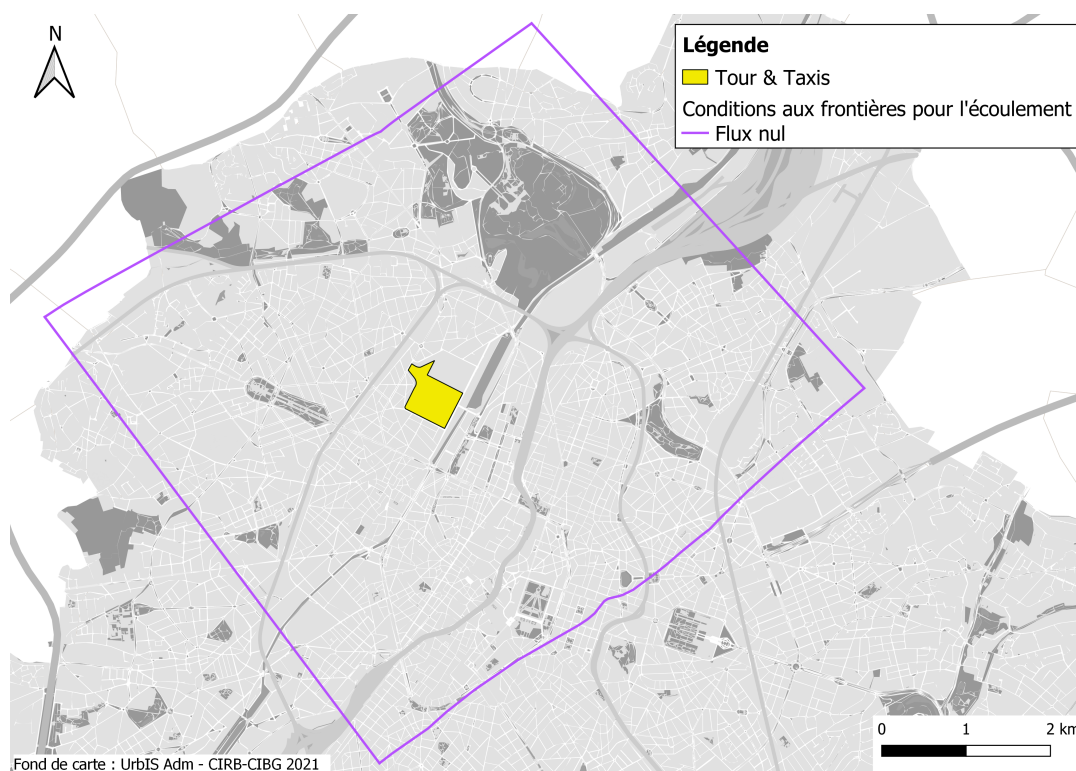


FIGURE 4.5 – Conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquitard de Gulpen (CIRB-CIBG, 2021).

**Aquifère du socle paléozoïque** Des conditions aux frontières similaires à celles de l'aquifère des sables du Landénien sont prescrites pour cette unité hydrogéologique. En effet, les niveaux piézométriques observés dans différents piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale (Figure 3.9) suggèrent un gradient et donc un écoulement dirigé du SE vers le NO. Ainsi, des niveaux piézométriques sont imposés à ces deux frontières (condition de Dirichlet), alors que les échanges latéraux sont négligés aux frontières NE et SO avec des flux nuls (condition de Neumann).

Afin de déterminer les valeurs de hauteur piézométrique à imposer aux frontières NO et SE, l'interpolation de données ponctuelles de niveau piézométrique en mars 2013 a été réalisée. Le résultat de cette interpolation est présenté à la Figure 4.6, qui correspond donc à la carte piézométrique de l'aquifère du socle paléozoïque dans la Région de Bruxelles-Capitale en mars 2013. Néanmoins, cette carte n'est pas exacte puisqu'elle résulte d'une interpolation, mais elle permet toutefois d'avoir une idée générale de

la piézométrie de l'aquifère ainsi que de la direction de l'écoulement et du gradient. En réalité, elle n'est exacte qu'aux points auxquels une donnée ponctuelle de hauteur piézométrique est disponible pour mars 2013.

Selon cette carte, l'écoulement dans l'aquifère du socle est dirigé du SE vers le NO, tout comme dans l'aquifère du Landénien. De plus, le niveau piézométrique est légèrement inférieur à 5 m le long de la frontière NO. Quant à la frontière SE, le niveau piézométrique est variable, situé entre 18 et 29 m environ.

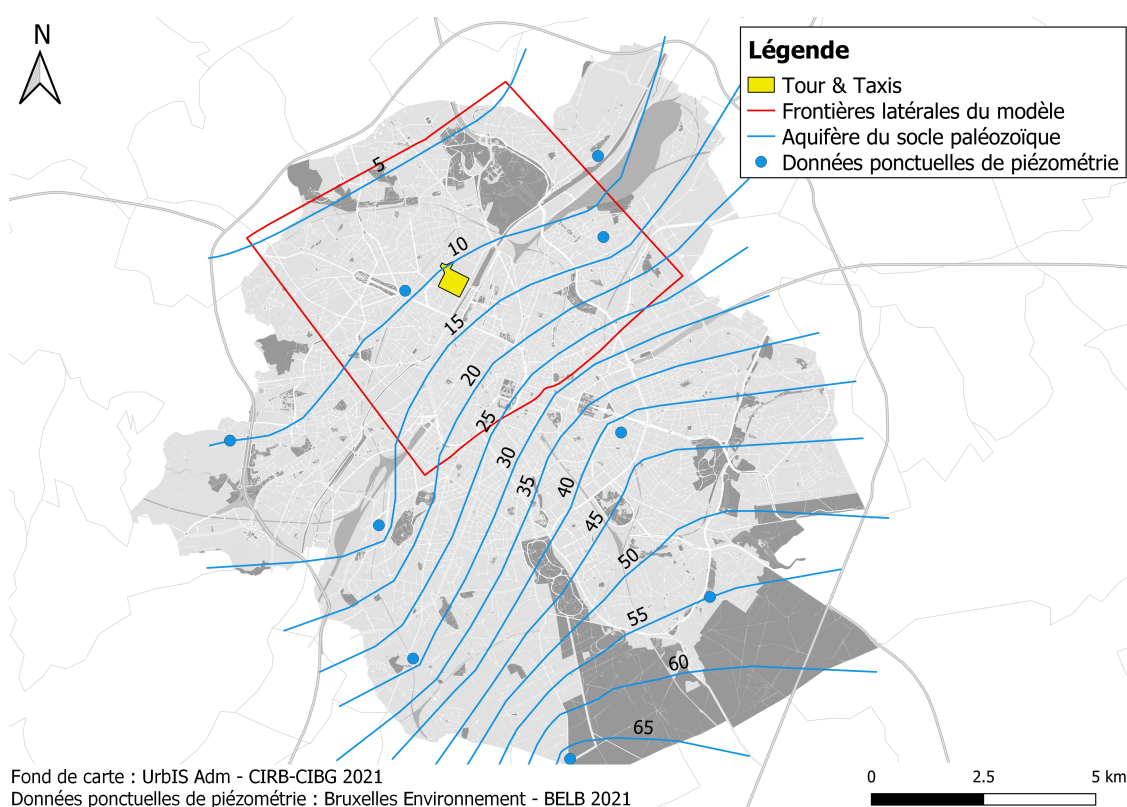


FIGURE 4.6 – Carte piézométrique du socle paléozoïque en mars 2013, obtenue par interpolation des données piézométriques ponctuelles (d'après CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

Finalement, les conditions aux frontières latérales pour l'écoulement dans l'aquifère du socle paléozoïque sont présentées à la Figure 4.7. Les points représentent les nœuds auxquels une valeur de hauteur piézométrique est imposée au modèle. Ils correspondent, autant que possible, aux points d'intersection entre les isopièzes de l'aquifère du socle paléozoïque et les frontières du modèle. Entre ces points, le logiciel FEFLOW réalise une interpolation linéaire.

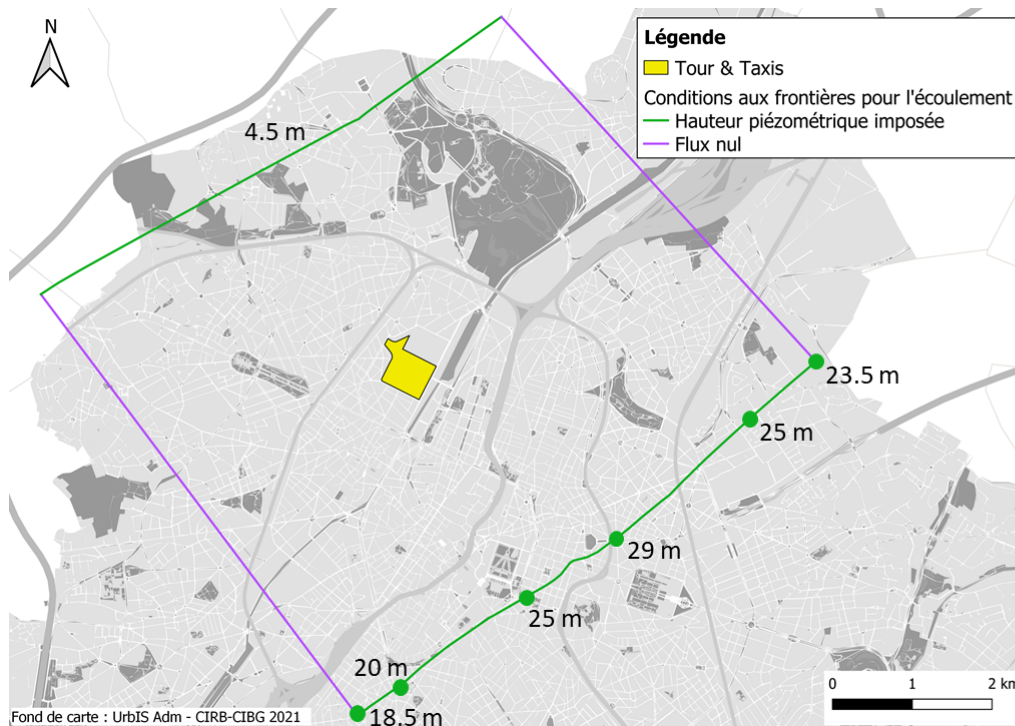


FIGURE 4.7 – Conditions aux frontières latérales pour l’écoulement dans l’aquifère du socle paléozoïque (CIRB-CIBG, 2021).

### 4.3.2 Conditions aux frontières pour le transport de chaleur

Il existe également 3 types de conditions permettant de représenter les conditions aux frontières pour le transport de chaleur dans le logiciel **FEFLOW** (FEFLOW, 2021b) :

- **Temperature BC** : il s’agit de la condition de Dirichlet pour le transport de chaleur. Ainsi, une valeur de température est imposée aux nœuds d’une frontière. Lors de la simulation, la température aux nœuds concernés n’est pas calculée et reste égale à la valeur prescrite.
- **Heat-flux BC** : il s’agit de la condition de Neumann pour le transport de chaleur. Un flux de conduction et de dispersion thermique est prescrit aux nœuds d’une frontière. Le flux d’advection thermique est quant à lui calculé lors de la simulation, indépendamment de la condition imposée pour le transport de chaleur. Ainsi, un flux d’advection thermique existe à cette frontière uniquement si celle-ci n’est pas imperméable pour l’écoulement. Le calcul de la température aux nœuds de cette frontière lors de la simulation est réalisé en tenant compte de ce flux de conduction et de dispersion thermique.
- **Heat-transfer BC** : il s’agit de la condition de Cauchy pour le transport de chaleur. Ce type de condition est donc choisi lorsque l’unité hydrogéologique modélisée, possédant sa propre température, est séparée d’un milieu possédant une température de référence, par un milieu conducteur de chaleur. La température de référence ainsi que le terme de conductance sont imposés aux nœuds de la frontière concernée.

Il s’agit donc de prescrire, à chaque frontière délimitant les étendues verticale et latérale du modèle, une condition de Dirichlet, de Neumann ou de Cauchy pour le transport

de chaleur.

#### 4.3.2.1 Frontières délimitant l'étendue verticale du modèle

**Frontière supérieure** Le choix de la condition imposée à la frontière supérieure est identique à celui de Bulté (2020). Cette frontière étant la limite entre l'aquifère des sables du Landénien et l'aquiclude des argiles de Saint-Maur, les échanges de chaleur entre ces deux unités peuvent être négligés par rapport au transport de chaleur survenant dans le modèle. Ainsi, un flux nul est imposé à cette frontière (condition de Neumann).

**Frontière inférieure** Le socle paléozoïque devient moins perméable lorsque la profondeur augmente suffisamment. Ainsi, les échanges de chaleur entre les unités hydrogéologiques modélisées et la partie inférieure du socle, située sous l'altitude de -150 m correspondant à la limite inférieure du modèle, sont également négligés. En effet, ceux-ci sont faibles par rapport au phénomène de transport de chaleur existant au sein du modèle. Un flux nul est donc imposé à la frontière inférieure (condition de Neumann).

Finalement, les conditions aux frontières inférieure et supérieure du modèle pour le transport de chaleur sont présentées à la Figure 4.8, selon le trait de coupe de la Figure 4.1.

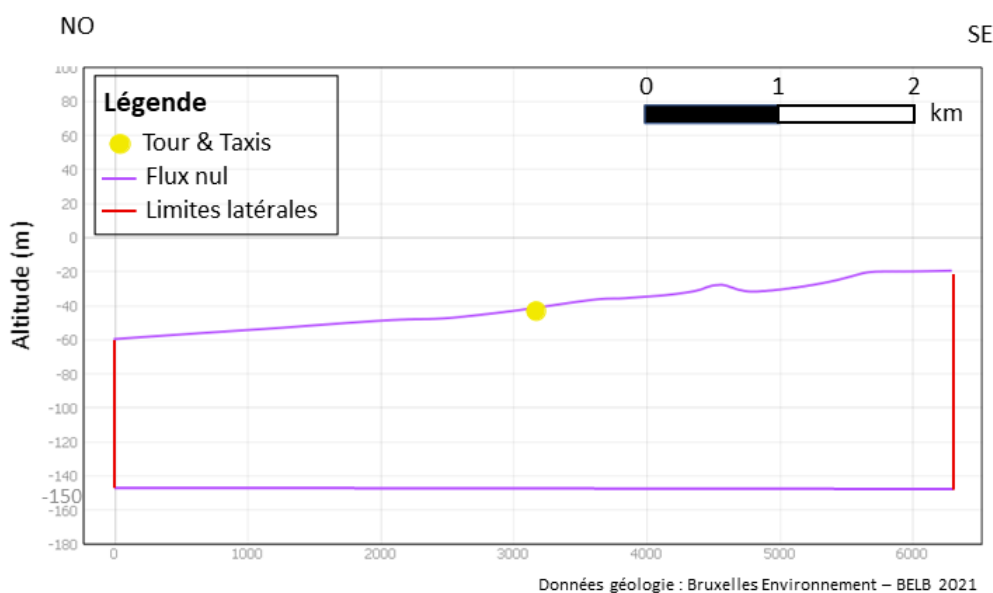


FIGURE 4.8 – Conditions aux frontières délimitant l'étendue verticale du modèle pour le transport de chaleur, selon le trait de coupe de la Figure 4.1 (BELB, 2021).

#### 4.3.2.2 Frontières latérales

Comme Bulté (2020), des valeurs de température sont attribuées à chaque frontière latérale du modèle (condition de Dirichlet). Il s'agit, pour chaque unité hydrogéologique, de la température naturelle de l'aquifère ou de l'aquitard.

**Aquifère des sables du Landénien** D'après Bulté (2020), la température naturelle de l'aquifère des sables du Landénien est de 12.4 °C. Il s'agit de la température de l'eau pompée dans l'aquifère durant la première saison de fonctionnement du système géothermique ouvert du bâtiment 1. Les puits de pompage n'avaient donc pas encore joué le rôle de puits de réinjection. La température de l'eau pompée correspond donc à la température naturelle de l'aquifère.

**Aquifère du socle paléozoïque et aquitard de Gulpen** Seul le système géothermique ouvert du bâtiment 3 exploite l'aquifère du socle paléozoïque. Cependant, aucune donnée relative au fonctionnement de ce système n'est à disposition. De plus, aucune donnée de température n'est disponible pour l'aquitard correspondant aux argiles, craies et marnes de Gulpen à Tour & Taxis. Néanmoins, les profondeurs modélisées de ces unités hydrogéologiques étant relativement faibles, la température du sol peut être considérée comme constante au sein du modèle. Ainsi, une valeur de température s'élevant à 12.4 °C est également prescrite aux frontières latérales du modèle dans l'aquifère du socle et dans l'aquitard de Gulpen.

Finalement, les conditions aux frontières latérales pour le transport de chaleur sont identiques pour chaque unité hydrogéologique modélisée. Elles sont présentées à la Figure 4.9.

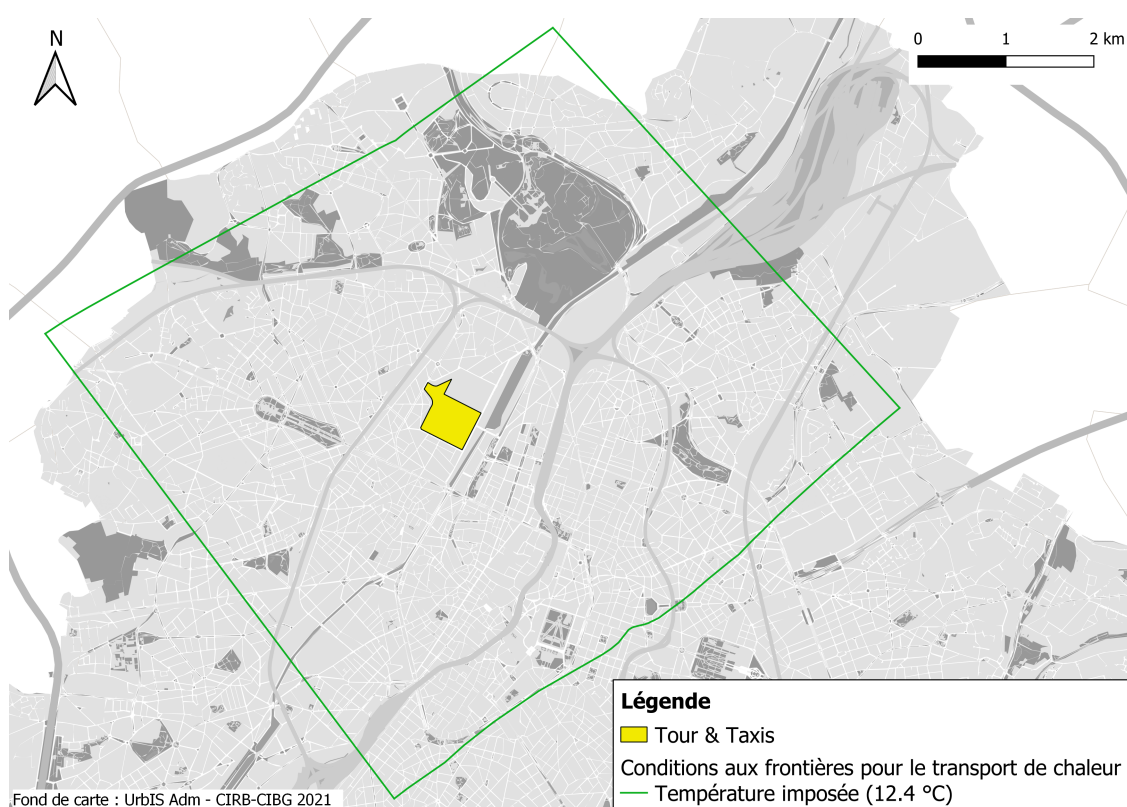


FIGURE 4.9 – Conditions aux frontières latérales pour le transport de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien, l'aquifère du socle paléozoïque et l'aquitard de Gulpen (CIRB-CIBG, 2021).

## 4.4 Sollicitations

Les sollicitations représentent des flux entrants ou sortants prescrits au modèle. Elles doivent être définies pour chaque processus modélisé, c'est-à-dire pour l'écoulement des eaux souterraines ainsi que le transport de chaleur.

### 4.4.1 Sollicitations pour l'écoulement

Les sollicitations pour l'écoulement correspondent aux captages exploitant les aquifères du Landénien et du socle dans la région modélisée, ainsi qu'aux puits de pompage et de réinjection des systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis.

**Captages d'eau souterraine** Divers captages exploitant l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque sont recensés dans l'étendue latérale du modèle. BELB (2021) renseigne le type d'autorisation (permanente ou non) et, le cas échéant, les dates de début et de fin du permis d'exploitation pour l'ensemble des captages.

Concernant les captages exploitant l'**aquifère du socle paléozoïque**, BELB (2021) donne le débit journalier maximal autorisé. De plus, la profondeur de chacun des puits est connue. Aucune information n'étant disponible concernant la hauteur des crépines, les puits sont supposés crépinés sur toute l'épaisseur traversée du socle. De plus, un rayon de 25 cm est considéré pour l'ensemble des puits. La localisation des captages exploitant l'aquifère du socle paléozoïque dans la région modélisée est présentée à la Figure 4.10.

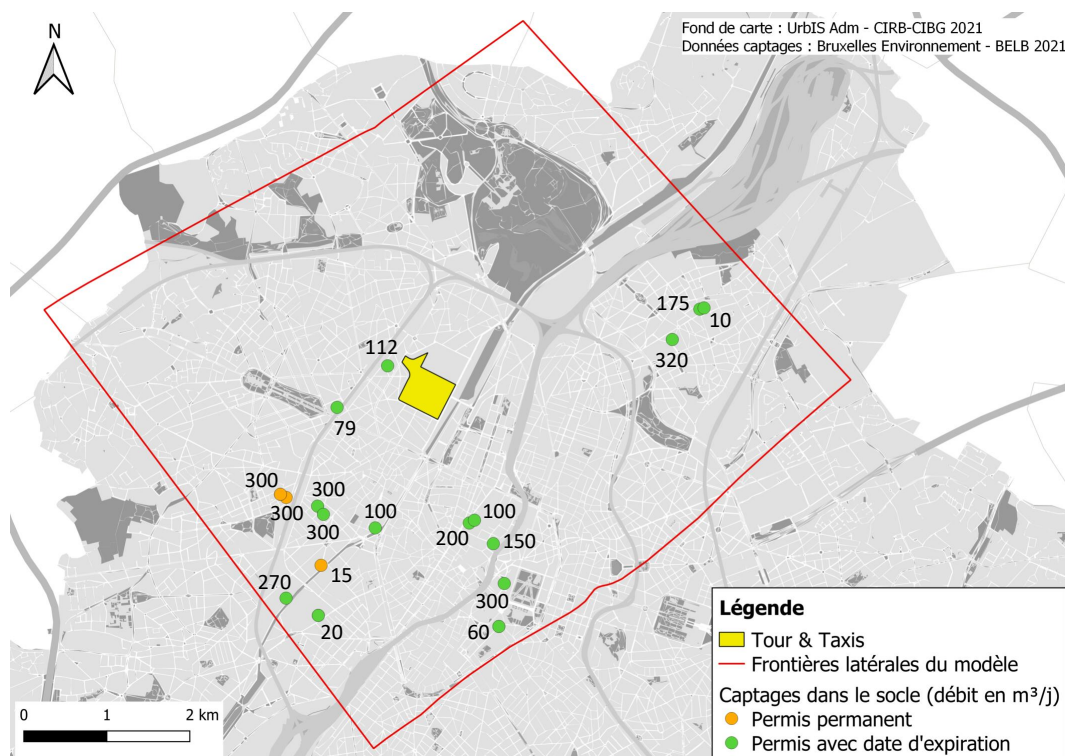


FIGURE 4.10 – Captages dans l'aquifère du socle paléozoïque dans la région modélisée (CIRB-CIBG, 2021 ; BELB, 2021).

Le débit de pompage en  $\text{m}^3/\text{j}$  associé à chaque captage est renseigné. De plus, ceux-ci sont différenciés selon leur type de permis : permanent, ou associé à une date de début et de fin d'autorisation. Dans ce cas, le débit associé à ces captages varie au cours du temps dans les simulations.

Les captages exploitant l'**aquifère des sables du Landénien** sont définis selon Bulté (2020). Ils sont donc crépinés sur toute l'épaisseur des Membres de Grandglise et de Lincent. De plus, les débits de pompage en  $\text{m}^3/\text{j}$  correspondent aux débits obtenus après le processus de calibration du modèle d'écoulement. En effet, lors de cette étape, la modification de certains débits de captage avait permis à Bulté (2020) d'obtenir des valeurs de piézométrie simulées par le modèle plus proches de celles observées dans la réalité. La localisation des captages exploitant l'aquifère des sables du Landénien dans la région modélisée est présentée à la Figure 4.11.

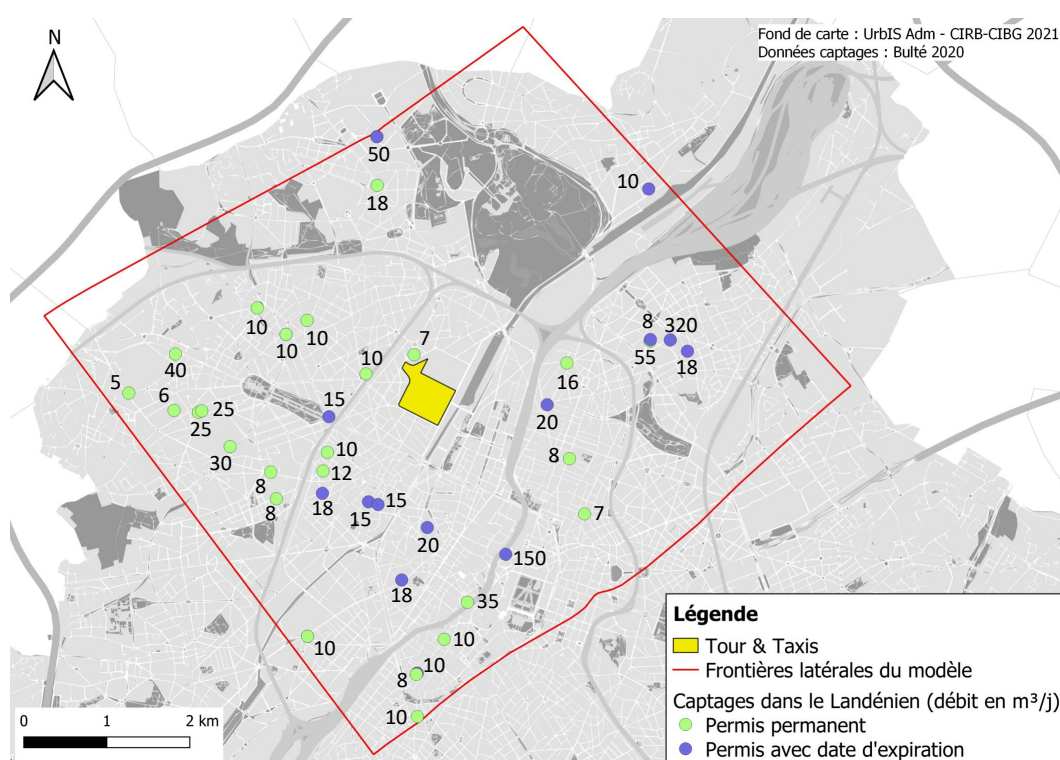


FIGURE 4.11 – Captages dans l'aquifère des sables du Landénien dans la région modélisée (d'après Bulté, 2020 ; CIRB-CIBG, 2021).

## Systèmes géothermiques ouverts

Le système géothermique du bâtiment 3 exploite l'**aquifère du socle paléozoïque**. Les puits de pompage et de réinjection sont d'abord tubés dans toutes les formations géologiques rencontrées, jusqu'au socle dans lequel ils sont à paroi nue (AGT, 2019). Dans le modèle, les puits sont donc considérés crépinés à partir de la fin du tubage, jusqu'à leur profondeur maximale. La Table 4.1 reprend la profondeur, la profondeur du tubage et la hauteur des crépines pour chaque puits.

Puits	Profondeur (m)		Profondeur du tubage (m)		Altitude des crépines (m)
	Profondeur relative	Altitude	Profondeur relative	Altitude	
3W1	150	-129.45	89.5	-68.95	De -68.95 à -129.45
3W2	151	-130.45	95	-74.45	De -74.45 à -130.45
3W3	139	-118.45	85.7	-65.15	De -65.15 à -118.45
3W4	150	-129.45	86	-65.45	De -65.45 à -129.45
3W5	150	-129.45	100.5	-79.95	De -79.95 à -129.45
3C1	200	-177.45	83.5	-60.95	De -60.95 à -177.45
3C2	166	-143.95	84	-61.95	De -61.95 à -143.95
3C3	130	-107.95	85	-62.95	De -62.95 à -107.95
3C4	148	-125.95	91	-68.95	De -68.95 à -125.95
3C5	160	-137.95	89.5	-67.45	De -67.45 à -137.95

TABLE 4.1 – Profondeur, profondeur de tubage et hauteur des crépines des puits géothermiques du bâtiment 3 (AGT, 2019 ; localisation des puits Figure 2.4).

Les puits géothermiques des bâtiments 1 et 2 exploitent quant à eux l'**aquifère des sables du Landénien**. Ils sont définis selon Bulté (2020), et sont donc supposés crépinés sur toute l'épaisseur de ce système aquifère (Membres de Grandglise et de Lincen). De plus, un rayon de 25 cm est considéré pour l'ensemble des puits.

Finalement, la Figure 4.12 présente les puits de pompage et de réinjection des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis.



FIGURE 4.12 – Puits de pompage et de réinjection des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis (CIRB-CIBG, 2021).

### 4.4.2 Sollicitations pour le transport de chaleur

Les sollicitations pour le transport de chaleur correspondent à l'injection de chaleur dans les puits géothermiques des bâtiments 1, 2 et 3 à Tour & Taxis.

Dans le logiciel FEFLOW, il existe un module additionnel permettant de modéliser les systèmes géothermiques ouverts de manière explicite. Ce module, appelé *Open-Loop Design*, permet de représenter simultanément l'extraction ou l'injection d'eau, ainsi que l'extraction ou l'injection d'énergie thermique au sein de doublets de puits géothermiques.

Le principe de fonctionnement de ce module est le suivant. L'évolution de la demande de puissance pour le chauffage et le refroidissement du système est fournie au module, ainsi que les températures de réinjection. Ces dernières sont soit constantes, soit dépendantes de la température d'extraction. Ainsi, un  $\Delta T$  constant peut par exemple être prescrit. Le débit d'extraction (et par conséquent, de réinjection) nécessaire afin de répondre à la demande de chaleur et de refroidissement du système est alors calculé selon l'équation 4.1 suivante, en considérant une pompe à chaleur de coefficient de performance  $COP$  et un échangeur de chaleur d'efficacité  $\eta$  (FEFLOW, 2022) :

$$Q [\text{m}^3/\text{j}] = \frac{P \times \left(1 - \frac{1}{COP}\right)}{\frac{1.16}{24} \times (T_{\text{injection}} - T_{\text{extraction}}) \times \eta} \quad (4.1)$$

où la capacité thermique volumique de l'eau  $\rho_w c_w$  est égale à 1.16 kWh/m<sup>3</sup>°K, soit 4.175 MJ/m<sup>3</sup>°K.

De plus, pour un système composé de plusieurs doublets, chacun d'eux se voit attribuer la proportion du débit nécessaire à fournir afin de répondre à la demande de chaleur ou de refroidissement du système (FEFLOW, 2022).

Les paramètres des 3 systèmes géothermiques ouverts sont discutés dans le Chapitre 7 relatif aux simulations de transport de chaleur.

## 4.5 Conditions initiales

Des conditions initiales doivent être imposées à chaque nœud du modèle, pour l'écoulement des eaux souterraines et pour le transport de chaleur. Cela permet au logiciel de résoudre le problème de manière itérative. Ainsi, pour l'écoulement, il s'agit de prescrire une hauteur piézométrique alors que pour le transport de chaleur, une température doit être imposée.

### 4.5.1 Conditions initiales pour l'écoulement

En régime transitoire, les conditions initiales doivent être représentatives de la réalité afin d'assurer la convergence du modèle vers la solution. Néanmoins, en régime perma-

ment, la convergence est assurée, quelles que soient les conditions initiales.

Ainsi, pour chaque scénario, une première simulation est exécutée en régime permanent en considérant les sollicitations initiales pour la période simulée. La valeur considérée par défaut dans le logiciel FEFLOW pour la hauteur piézométrique est de 0 m. Dans le cas présent, cette valeur assure qu'aucun nœud ne soit considéré comme sec (c'est-à-dire, associé à une hauteur piézométrique inférieure à son altitude). Cette valeur par défaut égale à 0 m est donc conservée comme condition initiale pour l'ensemble du modèle en régime permanent.

Ensuite, la simulation est exécutée en régime transitoire, avec comme conditions initiales les résultats du modèle d'écoulement en régime permanent.

#### 4.5.2 Conditions initiales pour le transport de chaleur

Pour le transport de chaleur, les conditions initiales correspondent à la température naturelle du sol, soit 12.4 °C.

### 4.6 Conclusion

Le développement du modèle conceptuel est une étape cruciale lors de l'élaboration d'un modèle hydrogéologique. En effet, il s'agit d'une simplification de la réalité qui permet néanmoins de représenter le comportement hydrogéologique du système.

Dans ce travail, les processus modélisés sont l'écoulement des eaux souterraines ainsi que le transport de chaleur. En effet, l'objectif est d'évaluer l'effet cumulé des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis.

Le modèle s'étend verticalement de la limite entre l'aquifère des sables du Landénien et l'aquiclude des argiles de Saint-Maur, au socle paléozoïque à -150 m d'altitude. Les frontières latérales sont quant à elles choisies à une distance d'environ 3.5 km de Tour & Taxis, distance suffisante afin que les résultats des simulations dans la région d'intérêt (Tour & Taxis) ne soient pas influencés par les conditions imposées aux frontières latérales du modèle.

Pour l'écoulement des eaux souterraines, des conditions de flux nul sont imposées aux deux frontières délimitant l'étendue verticale du modèle, ainsi qu'aux frontières latérales dans l'aquitard de Gulpen. Concernant l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque, des hauteurs piézométriques sont imposées aux frontières NO et SE, selon leur carte piézométrique respective. Des flux nuls sont également prescrits aux frontières NE et SO.

Pour le transport de chaleur, des valeurs de température sont imposées à chaque frontière latérale du modèle, qui correspondent à la température naturelle de chaque unité hydrogéologique. Des flux nuls sont quant à eux prescrits aux deux frontières délimitant l'étendue verticale.

De plus, les captages présents dans la région modélisée sont définis selon BELB (2021) pour l'aquifère du socle paléozoïque, et selon Bulté (2020) pour le Landénien. Les systèmes géothermiques ouverts des 3 bâtiments à Tour & Taxis sont quant à eux représentés à l'aide du module *Open-Loop Design* disponible dans le logiciel FEFLOW.

Finalement, des conditions initiales sont également imposées au modèle pour l'écoulement et le transport de chaleur. Concernant l'écoulement, chaque simulation est d'abord exécutée en régime permanent avec une hauteur piézométrique initiale de 0 m pour l'ensemble du modèle. Ensuite, la simulation est exécutée en régime transitoire avec comme conditions initiales les résultats du modèle en régime permanent. Pour le transport de chaleur, la température naturelle du sol de 12.4 °C est attribuée à l'ensemble du modèle.

# Chapitre 5

## Construction du modèle et définition des paramètres

Lorsque le modèle conceptuel est défini, le modèle numérique peut être implémenté dans le logiciel de modélisation adéquat. Le modèle numérique représente la matérialisation du modèle conceptuel. Il est donc construit selon les choix conceptuels, afin de produire des résultats représentant au mieux le comportement du système hydrogéologique (Geolys, 2021).

Dans ce chapitre, la construction de la géométrie du modèle est détaillée. De plus, les propriétés des unités hydrogéologiques modélisées relatives à l'écoulement et au transport de chaleur sont discutées.

### 5.1 Géométrie du modèle

Dans le logiciel de modélisation FEFLOW, la géométrie du modèle est définie en trois étapes : la génération du cadre géométrique général, la génération d'un maillage d'éléments finis, et l'extension du modèle à la 3D (DHI, 2017). Les deux premières étapes ont été réalisées par Bulté (2020).

**Cadre géométrique général** Le cadre géométrique doit contenir toutes les informations relatives à la géométrie 2D du modèle. Au minimum, il est défini par un polygone représentant les frontières latérales du modèle. Néanmoins, il peut également être formé de polygones supplémentaires ainsi que de lignes et de points. Ces composantes supplémentaires permettent de représenter des éléments réels dans la région modélisée, tels que des captages (points) ou des cours d'eau (lignes). Ils peuvent également délimiter différentes zones au sein du modèle, auxquelles des propriétés distinctes seront attribuées. Il s'agit alors de polygones (DHI, 2015a).

Le cadre géométrique défini pour la modélisation des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis est présenté à la Figure 5.1. Il s'agit du cadre construit par Bulté (2020), formé d'un polygone correspondant à l'étendue latérale du modèle, et de 96 points. Ces derniers représentent les puits de captage dans la zone modélisée, dans l'aquifère des sables du Landénien et dans l'aquifère du socle paléozoïque, ainsi que les puits de pompage et de réinjection des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis.

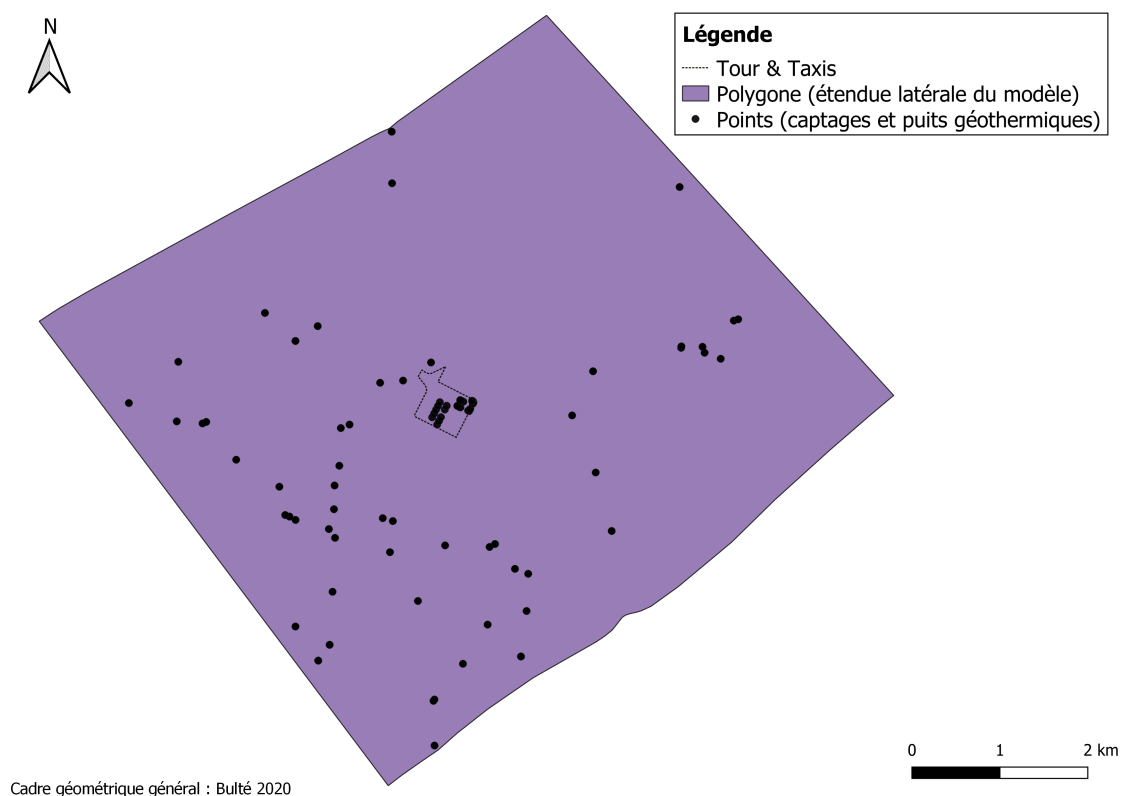


FIGURE 5.1 – Cadre géométrique général du modèle construit dans le logiciel FEFLOW (d’après Bulté, 2020).

**Maillage d’éléments finis** Le maillage d’éléments finis correspond à la discrétisation spatiale du modèle. Plus le maillage est fin, plus le modèle comporte d’éléments. Par conséquent, la précision des résultats augmente, mais au prix d’un temps de calcul qui augmente également (DHI, 2015a).

Le maillage d’éléments finis est généré par un algorithme qui tient compte de la géométrie générale du modèle. En particulier, l’algorithme assure que l’ensemble des points définis dans la géométrie générale forment des nœuds du maillage d’éléments finis (DHI, 2015a).

Pour la modélisation des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis, le maillage a été généré par Bulté (2020) en utilisant des éléments finis triangulaires. De plus, le maillage a subi un raffinement autour des points distingués dans le cadre géométrique général, ainsi que dans la zone de Tour & Taxis. En effet, cela permet d’augmenter le nombre d’éléments dans la région d’intérêt, et donc la précision des résultats dans cette zone.

Le maillage du modèle est présenté à la Figure 5.2, avec un zoom sur le site de Tour & Taxis.

Maillage d'éléments finis : Bulté 2020

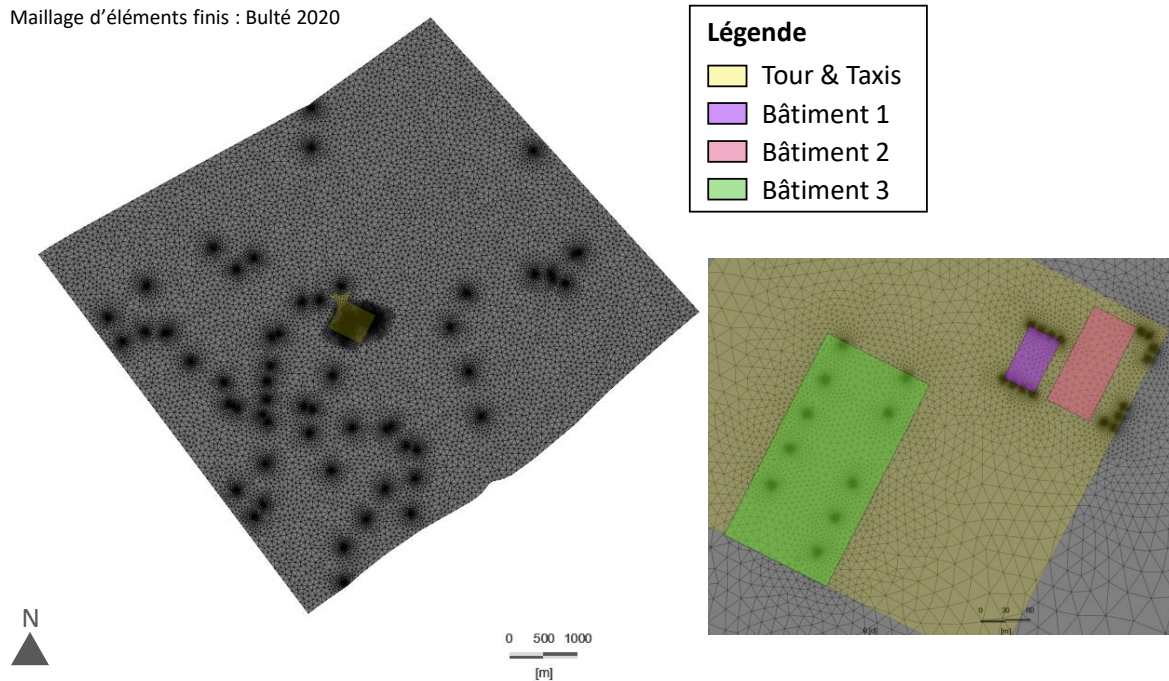


FIGURE 5.2 – Maillage d'éléments finis du modèle construit dans le logiciel **FEFLOW**, et zoom sur le site de Tour & Taxis (d'après Bulté, 2020).

**Extension en 3D** Dans le logiciel **FEFLOW**, une couche est délimitée par deux interfaces. Ainsi, le modèle doit contenir au minimum 5 interfaces afin de pouvoir représenter les 4 couches modélisées : le Membre de Grandglise, le Membre de Lincen, l'aquitard de Gulpen, et le socle paléozoïque.

Le modèle implémenté par Bulté (2020) comporte 11 interfaces délimitant 10 couches. Il se présente comme suit :

- L'interface 1 correspond à la frontière supérieure du modèle, soit le sommet du Membre de Grandglise ;
- L'interface 6 correspond à la limite entre les 2 membres de la Formation de Hannut, soit le sommet du Membre de Lincen ;
- L'interface 11 correspond au sommet de la Formation de Gulpen.

Ainsi, le Membre de Grandglise est modélisé par 5 couches, comprises entre les interfaces 1 et 6. Chaque couche possède la même épaisseur, c'est-à-dire  $1/5$  de l'épaisseur totale du membre. Le Membre de Lincen est également représenté par 5 couches de même épaisseur, entre les interfaces 6 et 11.

Dans ce travail, l'aquitard de Gulpen ainsi que l'aquifère du socle paléozoïque doivent donc être ajoutés au modèle.

Tout d'abord, 2 nouvelles interfaces (12 et 13) sont insérées dans le modèle. L'altitude (ou élévation) appropriée est attribuée à chacune d'elles :

- Interface 12 : sommet du socle paléozoïque ;

- Interface 13 : -150 m, qui correspond à l'altitude de la limite inférieure du modèle.

L'altitude des toits de l'ensemble des unités stratigraphiques présentes dans la Région de Bruxelles-Capitale est disponible sur BELB (2021). Il s'agit de résultats d'interpolations basées sur les données de forages disponibles.

Tout d'abord, l'altitude du sommet du socle paléozoïque (interface 12) d'après BELB (2021) a été modifiée aux alentours de Tour & Taxis, d'après les nouvelles données disponibles grâce aux forages profonds réalisés sur le site. Par ailleurs, le sommet du Membre de Grandglise (interface 1), du Membre de Lincen (interface 6) et de la Formation de Gulpen (interface 11) ont également été modifiés d'après ces nouvelles données de forages. L'altitude des interfaces intercalaires a donc été adaptée, afin de conserver des couches de même épaisseur pour Grandglise et Lincen (à chaque fois, 1/5 de l'épaisseur totale).

De plus, dans certaines régions de la zone modélisée, l'aquitard de Gulpen est absent, et le socle paléozoïque est donc directement en contact avec le Membre de Lincen. Cependant, dans le logiciel FEFLOW, une couche d'épaisseur nulle entraîne des complications et problèmes lors des simulations. Ainsi, lorsque c'était le cas, l'altitude du sommet de Gulpen (interface 11) a été augmentée de 30 cm. Cela permet d'obtenir une couche d'épaisseur non nulle.

Enfin, des interfaces supplémentaires ont été ajoutées au modèle afin de diviser les 2 nouvelles unités hydrogéologiques en plusieurs couches chacune :

- L'aquitard de Gulpen est modélisé par 3 couches d'épaisseur identique (1/3 de l'épaisseur totale de la formation) entre les interfaces 11 et 14 ;
- L'aquifère du socle paléozoïque est modélisé par 7 couches d'épaisseurs différentes. Tout d'abord, la partie moins perméable du socle présente dans le modèle, comprise entre -130 et -150 m, est représentée par deux couches d'épaisseur identique entre les interfaces 19 et 21. Ensuite, la partie supérieure du socle, plus perméable, est modélisée par 5 couches d'épaisseur identique, entre les interfaces 14 et 19. Cette épaisseur correspond à 1/5 de l'épaisseur comprise entre le sommet du socle paléozoïque et le sommet de sa partie moins perméable.

Finalement, le modèle définitif est composé de 21 interfaces et de 20 couches. Une visualisation schématique de celles-ci est présentée à la Figure 5.3, sans tenir compte des échelles.

De plus, la Figure 5.4 présente une vue 3D du modèle avec le maillage d'éléments finis, ainsi qu'un zoom d'une coupe réalisée selon la direction NO-SE passant par Tour & Taxis.

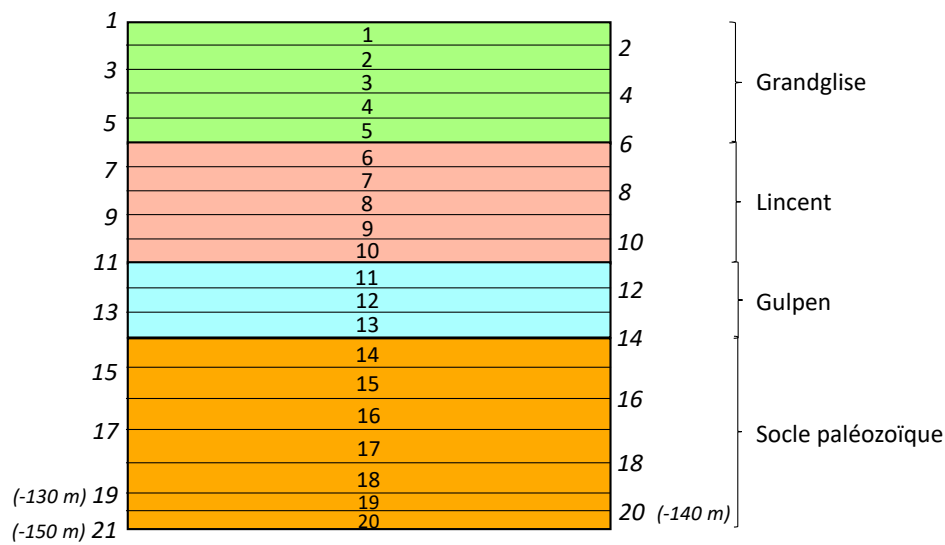


FIGURE 5.3 – Visualisation schématique des interfaces (en italique) et des couches formant le modèle.

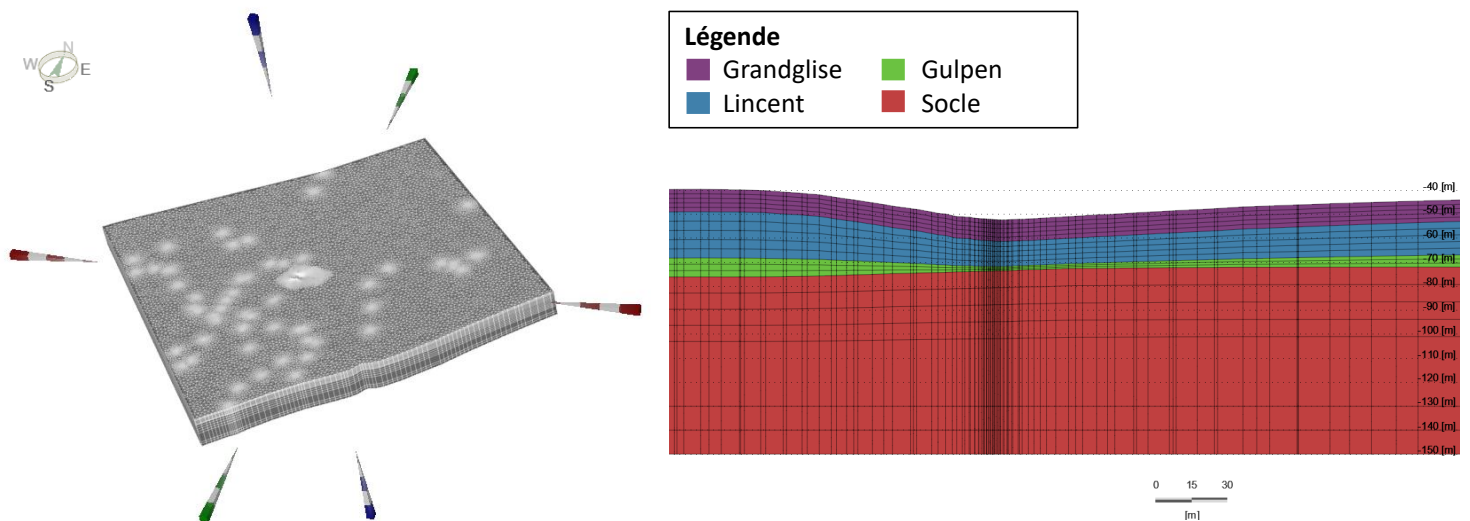


FIGURE 5.4 – Vue 3D du modèle avec le maillage d'éléments fins, et zoom sur Tour & Taxis d'une coupe NO-SE du modèle.

## 5.2 Définition des propriétés matérielles

Les propriétés matérielles sont ensuite définies pour l'ensemble du modèle, pour l'écoulement et le transport de chaleur. Il s'agit des caractéristiques hydrogéologiques des milieux modélisés, ainsi que du fluide considéré.

### 5.2.1 Propriétés matérielles pour l'écoulement

**Régime permanent** En régime permanent, l'écoulement des eaux souterraines est défini selon l'équation 5.1 ci-dessous (Dassargues, 2020) :

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla h) + q' = 0 \quad (5.1)$$

où  $q'$  désigne le terme de source/disparition. Il correspond à un débit entrant ou sortant du modèle par unité de volume, et comprend notamment les captages dans la zone modélisée. Cette équation est valable en conditions saturées et si la masse volumique du fluide est constante (Dassargues, 2020).

Ainsi, la propriété matérielle à définir pour l'écoulement en régime permanent est la conductivité hydraulique  $K$ . Dans le logiciel **FEFLOW**, elle doit être spécifiée dans les 3 directions spatiales principales ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ). L'hypothèse considérée est que les deux composantes horizontales (selon  $x$  et  $y$ ) de la conductivité hydraulique sont égales, alors que la composante verticale (selon la direction  $z$ ) est égale au dixième de ces valeurs.

Comme mentionné précédemment, des valeurs de conductivité hydraulique ont été déterminées localement à Tour & Taxis par IFTech (2010) pour l'ensemble de la Formation de Hannut (Table 3.6). De plus, pour le Membre de Grandglise, des valeurs supplémentaires ont été définies dans certaines zones du modèle par Bulté (2020) lors de la calibration en régime permanent. Ces valeurs sont celles initialement prescrites au modèle pour le Membre de Grandglise. Elles sont présentées à la Figure 5.5.

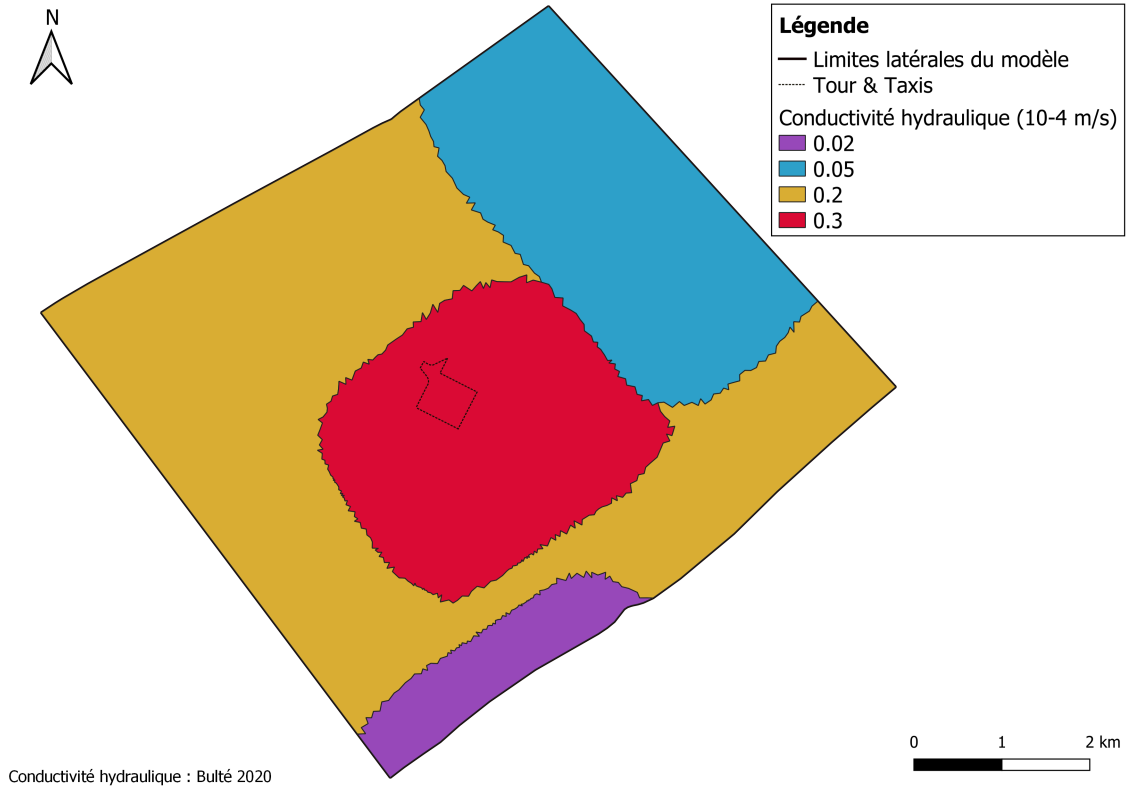


FIGURE 5.5 – Valeurs de conductivité hydraulique initialement prescrites au modèle pour le Membre de Grandglise (d'après Bulté, 2020).

Concernant l'aquifère du socle paléozoïque, des valeurs de transmissivité  $T$  ont pu être calculées localement à partir de 6 essais de pompage de moyenne durée réalisés par AGT (2018b). En guise de rappel, elles sont reprises à la Table 3.4. La moyenne géométrique de ces différentes valeurs mène à une transmissivité moyenne  $T = 2 \times 10^{-4}$

m<sup>2</sup>/s.

La conductivité hydraulique est liée à la transmissivité hydraulique par l'épaisseur de l'aquifère selon l'équation 5.2 ci-dessous :

$$K = \frac{T}{e} \quad (5.2)$$

où  $e$  est l'épaisseur de l'aquifère. La partie du socle modélisée étant composée de deux parties de propriétés hydrogéologiques et d'épaisseurs différentes, le calcul de la conductivité hydraulique est réalisé pour les deux parties individuellement :

- La partie inférieure du socle, située entre -130 et -150 m d'altitude (couches 19 et 20), est bien moins perméable que sa partie supérieure. Ainsi, 5 % de la transmissivité totale sont attribués à ces couches. L'épaisseur totale des deux couches s'élevant à 20 m, cela mène à une conductivité hydraulique  $K$  de  $5.1 \times 10^{-7}$  m/s pour chacune des couches.
- La partie supérieure du socle (couches 14 à 18) contribue alors aux 95 % restants de la transmissivité. Ensemble, les 4 couches possèdent une épaisseur moyenne de 49 m. Ainsi, sous les hypothèses citées, elles possèdent chacune une conductivité hydraulique  $K$  de  $3.9 \times 10^{-6}$  m/s.

Quant à l'aquitard formé par la Formation de Gulpen, une conductivité hydraulique de  $1 \times 10^{-7}$  m/s lui est attribuée. Cette valeur est relativement élevée pour l'aquitard. Cela permet d'envisager le scénario le plus défavorable, dans lequel l'aquitard séparant les deux aquifères exploités par les systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis est relativement perméable. Des interactions entre la piézométrie des deux aquifères ne sont donc pas totalement exclues, cas le plus défavorable pour la modélisation de l'effet cumulé des 3 installations géothermiques.

Finalement, la Table 5.1 reprend les valeurs de conductivité hydraulique initialement attribuées à chaque unité hydrogéologique modélisée.

Unité hydrogéologique	Couches du modèle	Conductivité hydraulique $K$ (m/s)
Membre de Grandglise	1 à 5	De $2 \times 10^{-6}$ à $3 \times 10^{-5}$ (voir Figure 5.5)
Membre de Lincent Partie argileuse aquiclude	6 et 7	$1 \times 10^{-8}$
Membre de Lincent Partie indurée aquifère	8 à 10	$1.6 \times 10^{-5}$
Aquitard de Gulpen	11 à 13	$1 \times 10^{-7}$
Socle paléozoïque Partie supérieure plus perméable	14 à 18	$3.9 \times 10^{-6}$
Socle paléozoïque Partie inférieure moins perméable	19 et 20	$5.1 \times 10^{-7}$

TABLE 5.1 – Valeurs de conductivité hydraulique attribuées aux unités modélisées.

**Régime transitoire** En régime transitoire, l'écoulement est décrit selon l'équation 5.3 ci-dessous (Dassargues, 2020) :

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla h) + q' = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.3)$$

où  $S_s$  désigne le coefficient d'emménagement spécifique. Celui-ci représente le volume d'eau libéré (ou emmagasiné) par unité de volume du milieu poreux, pour une modification unitaire de la hauteur piézométrique. A nouveau, cette équation est valable en conditions saturées et pour un fluide de masse volumique constante (Dassargues, 2020).

Ainsi, pour l'écoulement en régime transitoire, un nouveau paramètre doit être défini : le coefficient d'emménagement spécifique  $S_s$ .

Pour l'aquifère des sables du Landénien, les valeurs de coefficient d'emménagement spécifique initialement prescrites au modèle correspondent aux valeurs obtenues par Bulté (2020) suite à la calibration en régime transitoire. Pour le Membre de Grandglise, différentes valeurs ont été définies dans certaines zones du modèle. Elles sont présentées à la Figure 5.6. Quant au Membre de Lincet, la valeur de coefficient d'emménagement spécifique résultant de la calibration s'élève à  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ .



FIGURE 5.6 – Valeurs de coefficient d'emménagement spécifique initialement prescrites au modèle pour le Membre de Grandglise (d'après Bulté, 2020).

Concernant l'aquitard de Gulpen et l'aquifère du socle paléozoïque, aucune donnée locale n'est disponible pour Tour & Taxis. Pour les aquifères captifs et sous un certain nombre d'hypothèses, le coefficient d'emménagement spécifique peut être calculé selon l'équation 5.4 ci-dessous (Dassargues, 2020) :

$$S_s = \rho \times g \times \alpha \quad (5.4)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide (soit  $1000 \text{ kg/m}^3$  pour l'eau),  $g$  l'accélération gravitationnelle et  $\alpha$  la compressibilité volumique du milieu poreux en  $\text{Pa}^{-1}$ . Cette équation est valable sous les conditions suivantes (Dassargues, 2020) :

- les conditions sont isothermiques ;
- le fluide est homogène ;
- la compressibilité volumique du milieu poreux décrit son comportement géomécanique ;
- la contrainte totale est constante ;
- le principe de Terzaghi est utilisé ;
- le concept de l'EVR (élément de volume représentatif) est utilisé ;
- le débit spécifique de Darcy constitue un débit relatif à travers le milieu poreux.

Toutes ces conditions ne peuvent être vérifiées. L'équation 5.4 permet néanmoins d'obtenir une approximation pour le coefficient d'emmagasinement spécifique, en l'absence de données supplémentaires.

Selon ARTESIA, une compressibilité volumique de  $1 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$  est représentative du Massif du Brabant. Cette valeur mène à un coefficient d'emmagasinement spécifique de l'ordre de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  pour l'aquifère du socle paléozoïque. Cette valeur est également considérée pour l'aquitard de Gulpen.

Finalement, les coefficients d'emmagasinement spécifique initialement prescrits à l'ensemble des couches du modèle sont repris à la Table 5.2.

Unité hydrogéologique	Couches du modèle	Coefficient d'emmagasinement spécifique $S_s$ ( $\text{m}^{-1}$ )
<b>Membre de Grandglise</b>	1 à 5	De $1 \times 10^{-5}$ à $5 \times 10^{-4}$ (voir Figure 5.6)
<b>Membre de Lincent</b>	6 à 10	$5 \times 10^{-5}$
<b>Aquitard de Gulpen</b>	11 à 13	$1 \times 10^{-5}$
<b>Socle paléozoïque</b>	14 à 20	$1 \times 10^{-5}$

TABLE 5.2 – Coefficients d'emmagasinement spécifique initialement attribués aux différentes couches du modèle.

### 5.2.2 Propriétés matérielles pour le transport de chaleur

Dans un milieu poreux, le transport de chaleur s'opère à travers les pores et fissures du milieu, mais également à travers la matrice solide. En réalité, 3 processus sont à considérer : la conduction thermique, l'advection thermique et la dispersion thermique (Dassargues, 2018).

**Conduction thermique** La conduction thermique correspond au transport de chaleur des zones de température élevée vers des zones de température plus faible. Ce phénomène existe donc sans écoulement de l'eau, et est seulement dû à la présence d'un gradient thermique. Le flux de conduction thermique est décrit par l'équation 5.5 suivante (Dassargues, 2018) :

$$\mathbf{f}_{cond} = -\lambda_b \nabla T \quad (5.5)$$

où  $\lambda_b$  est la conductivité thermique du milieu poreux (en W/m°K) et  $\nabla T$  le gradient de température en °K/m (Dassargues, 2018).

La conductivité thermique du milieu poreux est la moyenne géométrique pondérée des conductivités thermiques de l'eau  $\lambda_w$  et de la matrice solide  $\lambda_s$ . En effet, elle peut être calculée selon l'équation 5.6 (Dassargues, 2018) :

$$\lambda_b = \lambda_s^{(1-\theta)} \times \lambda_w^\theta \quad (5.6)$$

où  $\theta$  est la teneur en eau du milieu (Dassargues, 2018).

**Advection thermique** L'advection thermique correspond au transport de chaleur avec l'écoulement. La chaleur se déplace donc avec l'eau. Le flux d'advection thermique est régi par l'équation 5.7 ci-dessous (Dassargues, 2018) :

$$\mathbf{f}_{adv} = \rho_w c_w \mathbf{q} T \quad (5.7)$$

où  $\rho_w$  est la masse volumique de l'eau en kg/m<sup>3</sup>,  $c_w$  la capacité thermique de l'eau en J/kg°K et  $\mathbf{q}$  le flux total d'eau en m/s (Dassargues, 2018).

Le produit  $\rho_w c_w$  est également appelé la capacité thermique volumique de l'eau, en J/m<sup>3</sup>°K (Dassargues, 2018).

**Dispersion thermique** La dispersion thermique correspond au transport de chaleur à travers les hétérogénéités de la matrice solide. Le flux de dispersion thermique est décrit par l'équation 5.8 suivante (Dassargues, 2018) :

$$\mathbf{f}_{disp} = -\rho_b c_b \mathbf{D} \cdot \nabla T \quad (5.8)$$

où  $\rho_b$  est la masse volumique du milieu poreux,  $c_b$  la capacité thermique du milieu poreux et  $\mathbf{D}$  le tenseur de dispersion thermique qui contient les différentes valeurs de dispersivité du milieu (Dassargues, 2018).

Comme pour la conductivité thermique, la masse volumique ainsi que la capacité thermique du milieu poreux sont liées à celles de l'eau et de la matrice solide par les équations 5.9 et 5.10 respectivement (Dassargues, 2018) :

$$\rho_b = (1 - \theta) \rho_s + \theta \rho_w \quad (5.9)$$

$$c_b = (1 - \theta) c_s + \theta c_w \quad (5.10)$$

Le produit  $\rho_b c_b$  est également appelé capacité thermique volumique du milieu poreux, en J/m<sup>3</sup>°K (Dassargues, 2018).

**Équation de transport** Finalement, en régime transitoire, le transport de chaleur au sein d'un milieu poreux est régi par l'équation 5.11 suivante qui tient compte des 3 processus de transport (Dassargues, 2018) :

$$\frac{\partial \rho_b c_b T}{\partial t} = -\nabla \cdot [\rho_w c_w \mathbf{q} T - (\lambda_b + c_b \rho_b \mathbf{D}) \cdot \nabla T] + Q_T \quad (5.11)$$

où  $Q_T$  désigne le terme de source/disparition (en W/m<sup>3</sup>). Il représente un flux thermique entrant ou sortant du modèle par unité de volume (Dassargues, 2018).

**Définition des propriétés matérielles** Finalement, de nombreux paramètres sont à définir pour le transport de chaleur. Dans le logiciel FEFLOW, les propriétés à spécifier sont les suivantes :

- la porosité  $\theta_a$  : dans le logiciel FEFLOW, seule la porosité contribuant à l'écoulement doit être considérée. Cette porosité correspond à la porosité d'advection (FEFLOW, 2021c), notée  $\theta_a$  par la suite ;
- la capacité thermique volumique du fluide  $\rho_w c_w$ , égale à 4.18 MJ/m<sup>3</sup>°K pour l'eau ;
- la capacité thermique volumique de la matrice solide  $\rho_s c_s$  ;
- la conductivité thermique du fluide  $\lambda_w$ , égale à 0.6 W/m°K pour l'eau ;
- la conductivité thermique de la matrice solide  $\lambda_s$  ;
- l'anisotropie de la conductivité thermique de la matrice solide : le milieu est considéré isotrope par rapport à la conduction thermique dans le modèle. Ce paramètre est donc égal à 1 ;
- la dispersivité longitudinale  $a_L$  : la valeur choisie par Bulté (2020) correspond à celle par défaut dans FEFLOW. Elle est égale à 5 m, et ce choix est maintenu dans ce travail ;
- la dispersivité transversale  $a_T$  : elle est laissée égale à la valeur par défaut dans FEFLOW, soit 0.5 m, comme Bulté (2020).

Ainsi,  $\theta_a$ ,  $\rho_s c_s$  et  $\lambda_s$  doivent encore être spécifiés pour chaque unité hydrogéologique modélisée. Concernant l'aquifère des sables du Landénien, les valeurs considérées sont celles prescrites au modèle par Bulté (2020). Quant à l'aquitard de Gulpen et l'aquifère du socle paléozoïque, des valeurs habituelles pour les types de lithologie sont choisies (Dassargues, 2018 ; Gerard *et al.*, 2020). La Table 5.3 présente les valeurs prescrites au modèle pour ces 3 paramètres.

Unité hydrogéologique	Couches du modèle	$\theta_a$ (/)	$\rho_s c_s$ (MJ/m <sup>3</sup> °K)	$\lambda_s$ (W/m°K)
Membre de Grandglise	1 à 5	0.1	2	2.5
Membre de Lincent Partie argileuse aquiclude	6 et 7	0.03	3	2
Membre de Lincent Partie indurée aquifère	8 à 10	0.1	3	2
Aquitard de Gulpen	11 à 13	0.01	2	2
Socle paléozoïque	14 à 20	0.03	3	3

TABLE 5.3 – Valeurs de porosité, de capacité thermique volumique et de conductivité thermique attribuées à chaque unité modélisée.

## 5.3 Conclusion

Le modèle numérique correspond à la matérialisation du modèle conceptuel. Dans ce travail, le modèle numérique est implémenté dans le logiciel **FEFLOW**. Il est composé de 21 interfaces qui délimitent 20 couches. Les 5 premières couches représentent le Membre de Grandglise, les 5 suivantes le Membre de Lincen, les 3 suivantes l'aquitard de Gulpen, et enfin les 7 dernières l'aquifère du socle paléozoïque.

De plus, les propriétés des unités hydrogéologiques modélisées quant à l'écoulement des eaux souterraines et au transport de chaleur ont été définies. Les valeurs considérées pour l'aquifère des sables du Landénien correspondent à celles obtenues par Bulté (2020) après le processus de calibration du modèle. Pour l'aquitard de Gulpen et l'aquifère du socle paléozoïque, les propriétés sont définies selon des mesures locales quand elles sont disponibles, et selon des valeurs typiques pour les lithologies dans le cas contraire.

# Chapitre 6

## Calibration du modèle

La calibration consiste à s'assurer que le modèle reproduise correctement le comportement du système modélisé. Les résultats des simulations sont donc comparés à des valeurs observées, qui correspondent à des mesures effectuées dans le système.

Bien que le modèle développé par Bulté (2020) soit calibré, cette calibration est affinée suite à l'ajout de l'aquitard de Gulpen et de l'aquifère du socle paléozoïque. Le modèle simulant l'écoulement et le transport de chaleur pour Tour & Taxis, deux types de calibration sont à considérer :

- La calibration pour l'écoulement : les valeurs de hauteur piézométrique simulées par le modèle sont comparées à des valeurs mesurées de hauteur piézométrique.
- La calibration pour le transport de chaleur : les valeurs de température simulées par le modèle sont comparées à des valeurs mesurées de température.

Cependant, en l'absence de données suffisantes relatives à la température dans les puits des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis, seul le modèle d'écoulement est calibré dans ce travail.

Tout d'abord, la calibration du modèle d'écoulement est effectuée en régime permanent par deux méthodes : la méthode manuelle, et la méthode automatique. Ensuite, une seconde étape de calibration est réalisée en régime transitoire de manière manuelle.

### 6.1 Calibration du modèle d'écoulement en régime permanent

En régime permanent, le paramètre d'écoulement à adapter lors de la calibration du modèle d'écoulement est la conductivité hydraulique  $K$ . Si nécessaire, d'autres éléments peuvent également être modifiés afin d'obtenir des résultats plus proches des mesures effectuées, tels que les conditions aux frontières ou les sollicitations.

Lors de la calibration, seules les conductivités hydrauliques du Membre de Grandglise (couches 1 à 5) et de la partie supérieure plus perméable du socle paléozoïque (couches 14 à 18) ont été modifiées. En effet, seules les valeurs pour le Membre de Grandglise ont été adaptées par Bulté (2020) lors de la calibration du modèle représentant l'aquifère

des sables du Landénien. La conductivité hydraulique du Membre de Lincent est donc restée inchangée. Ce choix est conservé pour le présent modèle. De plus, la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen et de la partie inférieure moins perméable du socle paléozoïque n'ont pas non plus été adaptées lors de la calibration.

### 6.1.1 Points d'observation

La Figure 6.1 montre les piézomètres présents dans la zone modélisée, pour l'aquifère des sables du Landénien et pour l'aquifère du socle paléozoïque. Ces piézomètres constituent donc les points d'observation pour la calibration du modèle.

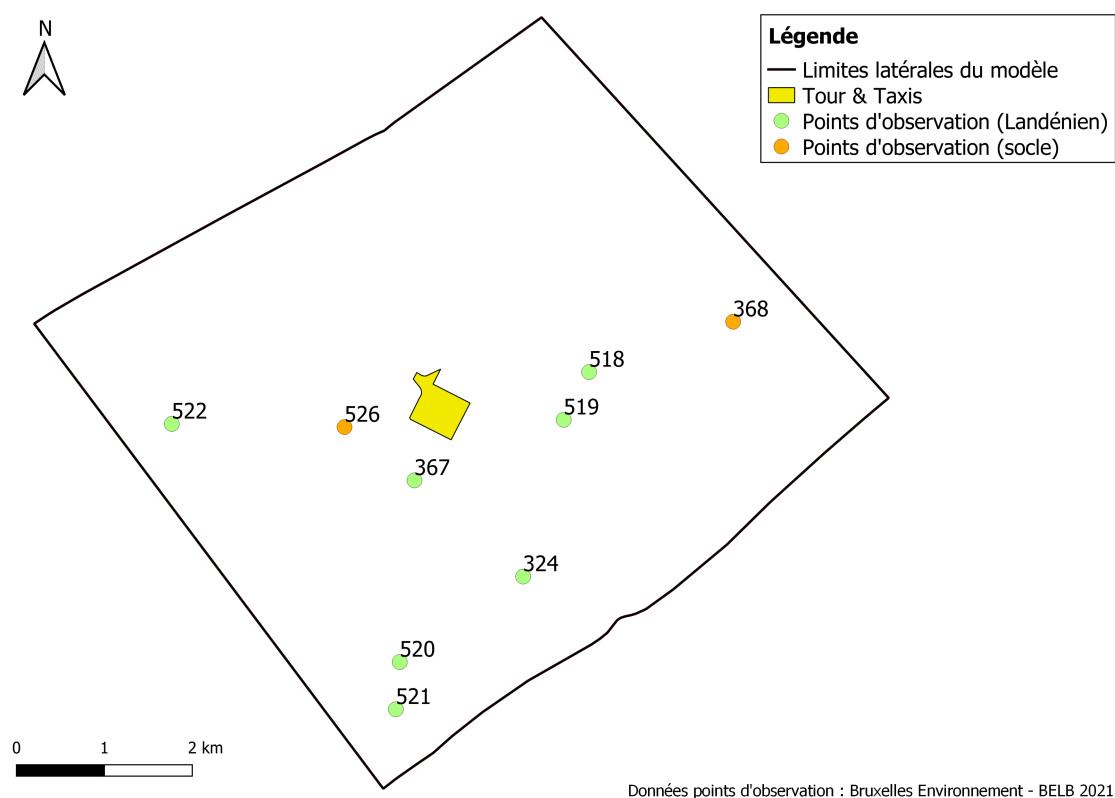


FIGURE 6.1 – Points d'observation dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque (BELB, 2021).

Comme Bulté (2020), la calibration du modèle d'écoulement en régime permanent est effectuée selon des mesures de piézométrie réalisées le 1<sup>er</sup> mars 2013. Les valeurs de hauteur piézométrique observées dans chacun de ces piézomètres sont présentées à la Table 6.1.

Aquifère	Point d'observation	Hauteur piézométrique mesurée (m)
Aquifère des sables du Landénien	324	8.88
	367	12.72
	518	13.93
	519	14.42
	520	15.94
	521	17.4
	522	8.69
Aquifère du socle paléozoïque	368	11.98
	526	9

TABLE 6.1 – Hauteurs piézométriques mesurées aux points d'observation dans l'aquifère des sables du Landénien et dans l'aquifère du socle paléozoïque (BELB, 2021).

### 6.1.2 Calibration manuelle

Tout d'abord, la calibration a été réalisée de manière manuelle. Cela consiste à modifier manuellement la valeur du paramètre, et adapter celle-ci au fur et à mesure des résultats des simulations afin d'obtenir des valeurs calculées aussi proches que possible des valeurs observées.

Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration manuelle sont présentées aux Figures 6.2 et 6.3 pour le Membre de Grandglise et la partie supérieure du socle paléozoïque respectivement.

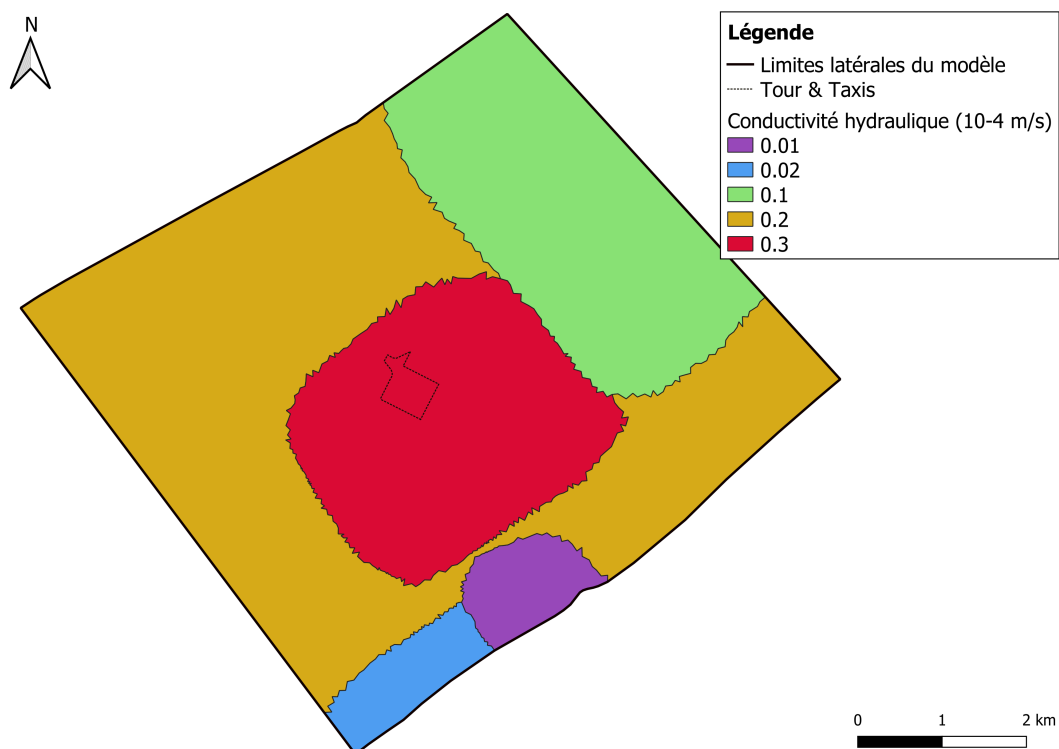


FIGURE 6.2 – Valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration manuelle pour le Membre de Grandglise.

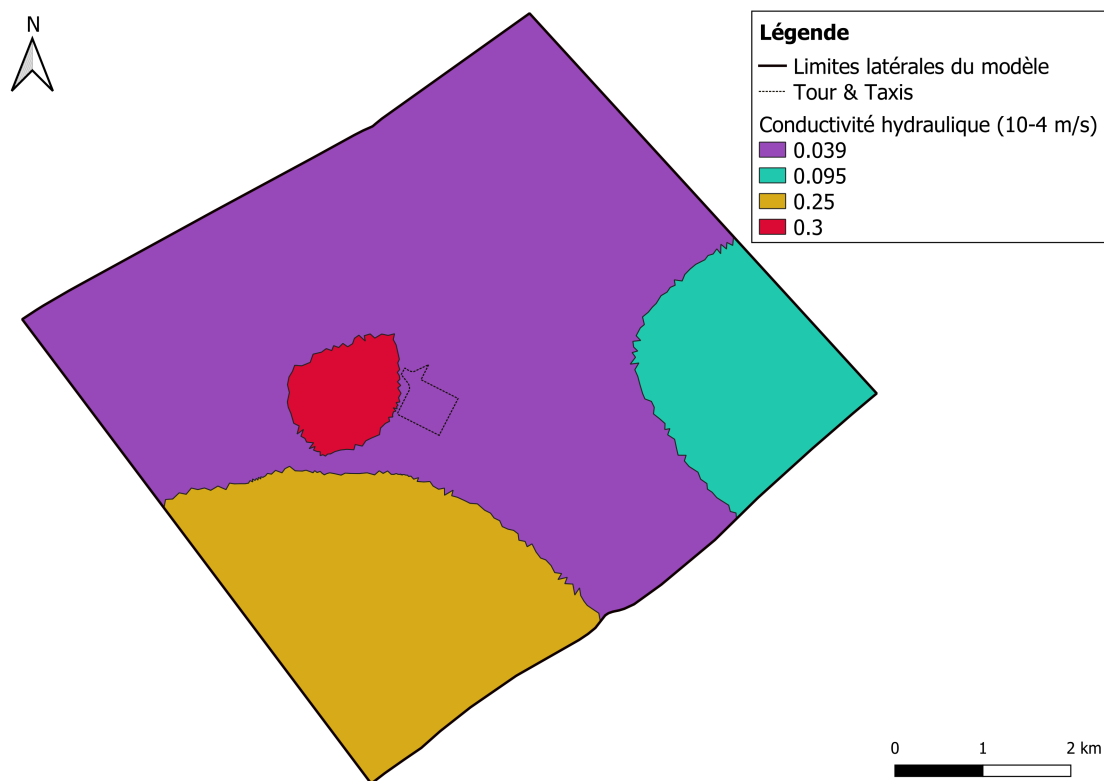


FIGURE 6.3 – Valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration manuelle pour la partie supérieure (plus perméable) du socle paléozoïque.

Pour le Membre de Grandglise, les valeurs sont comprises dans l'intervalle défini par Bulté (2020) lors de la calibration du précédent modèle, à l'exception de la zone associée à une conductivité hydraulique de 0.01 m/s. En effet, la valeur minimale considérée par Bulté (2020) s'élevait à 0.02 m/s. Néanmoins, il s'agit du même ordre de grandeur.

Concernant la partie supérieure du socle paléozoïque, des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s ont été observées à Biestebroek (Anderlecht, environ 4.5 km de Tour & Taxis) par ARTESIA, dont une valeur maximale de  $4.7 \times 10^{-5}$  m/s. Les valeurs obtenues par calibration manuelle sont comprises dans l'intervalle défini par cette valeur maximale, et la valeur calculée grâce aux essais de pompage de moyenne durée réalisés par AGT (2018b) à Tour & Taxis.

De plus, un débit de captage dans l'aquifère des sables du Landénien a été augmenté de 150 à 155 m<sup>3</sup>/j. En effet, le débit journalier autorisé est calculé à partir du débit annuel maximal autorisé, en considérant un pompage continu. Cependant, en pratique, l'extraction n'est pas continue et les débits pompés sont variables. Une faible modification du débit de captage reste donc réaliste.

Les résultats d'écoulement en régime permanent le 1<sup>er</sup> mars 2013, après calibration manuelle, sont présentés aux Figures 6.4 et 6.5 pour l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque respectivement. Les résidus, correspondant à la différence entre hauteur piézométrique simulée et hauteur piézométrique mesurée, sont indiqués à côté de chaque point d'observation.

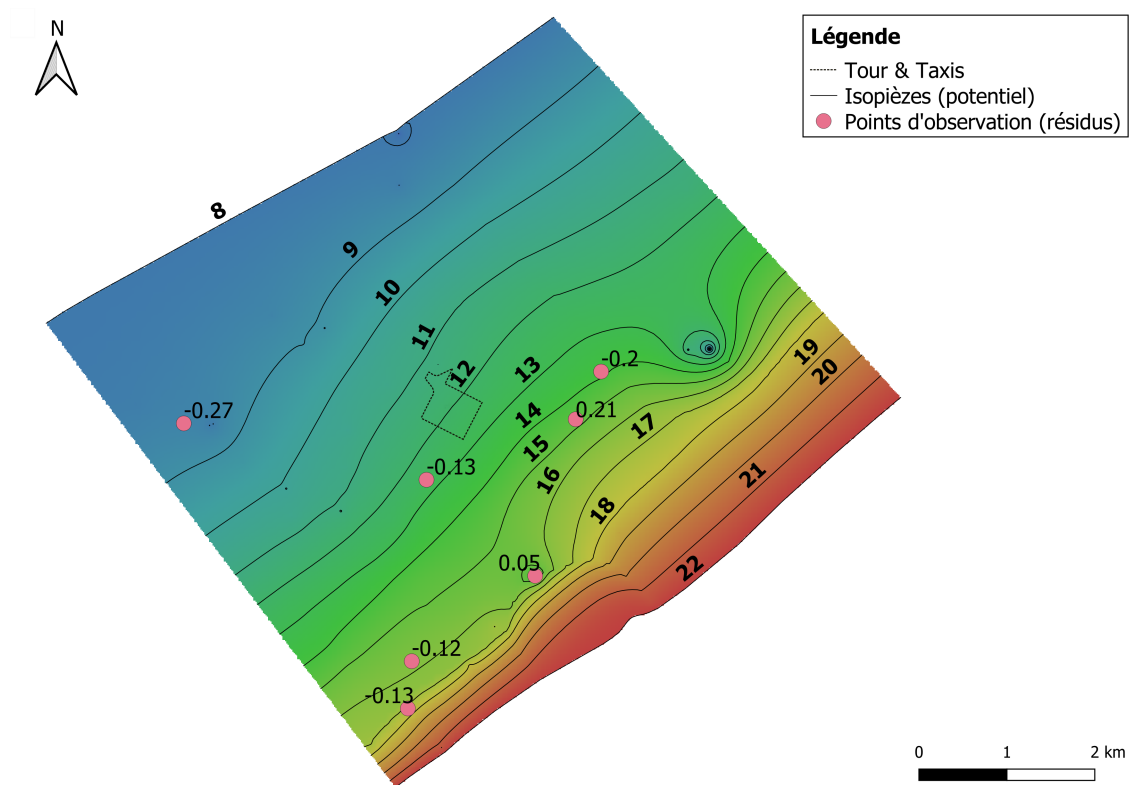


FIGURE 6.4 – Résultats d'écoulement en régime permanent et résidus le 1<sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère des sables du Landénien, après calibration manuelle.

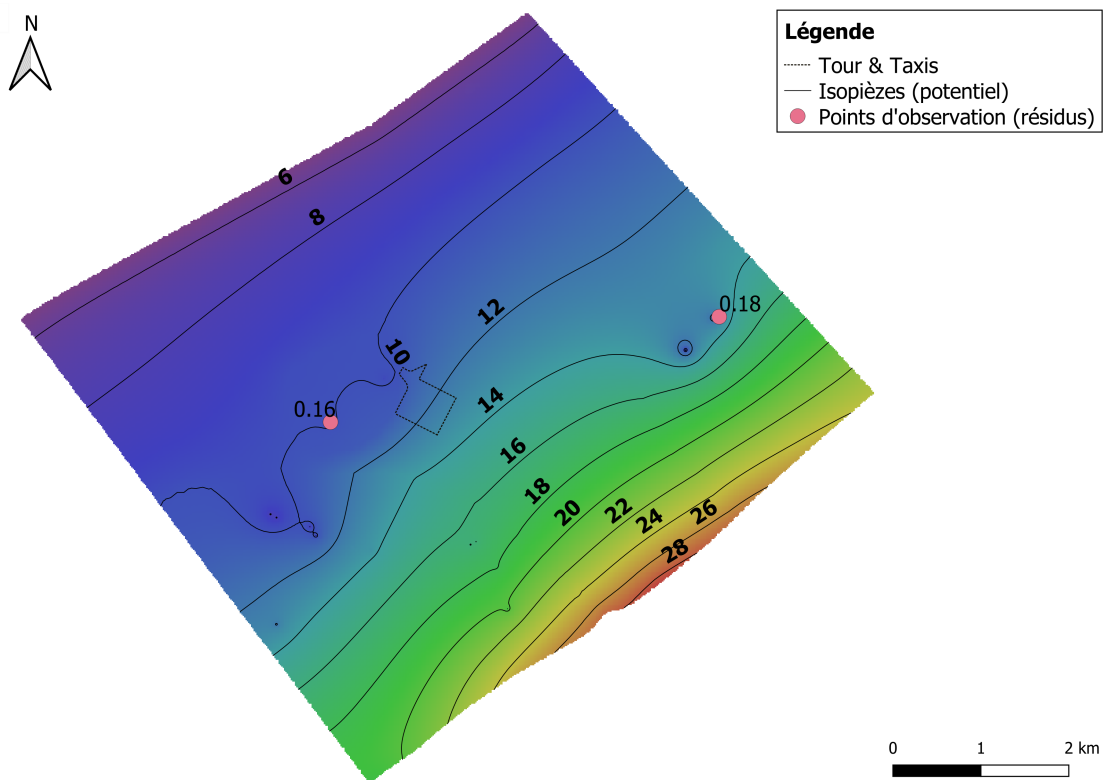


FIGURE 6.5 – Résultats d'écoulement en régime permanent et résidus le 1<sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère du socle paléozoïque, après calibration manuelle.

### 6.1.3 Calibration automatique

Ensuite, une calibration automatique a été effectuée à l'aide du logiciel PEST, qui utilise la méthode des moindres carrés. Ainsi, l'algorithme recherche un jeu de paramètres permettant de minimiser la somme pondérée des résidus au carré (DHI, 2015b).

Dans le cas présent, la méthode des points pilotes a été utilisée. Cette méthode permet d'obtenir une distribution spatiale continue du paramètre considéré. En effet, les points pilotes sont des points uniformément distribués dans le modèle auxquels la valeur du paramètre est adaptée selon l'algorithme de PEST. Ensuite, une interpolation est effectuée entre ces points afin d'attribuer une valeur du paramètre à l'ensemble du modèle (DHI, 2015b). 30 points pilotes sont considérés, dont la distribution uniforme dans le modèle est visible à la Figure 6.6.

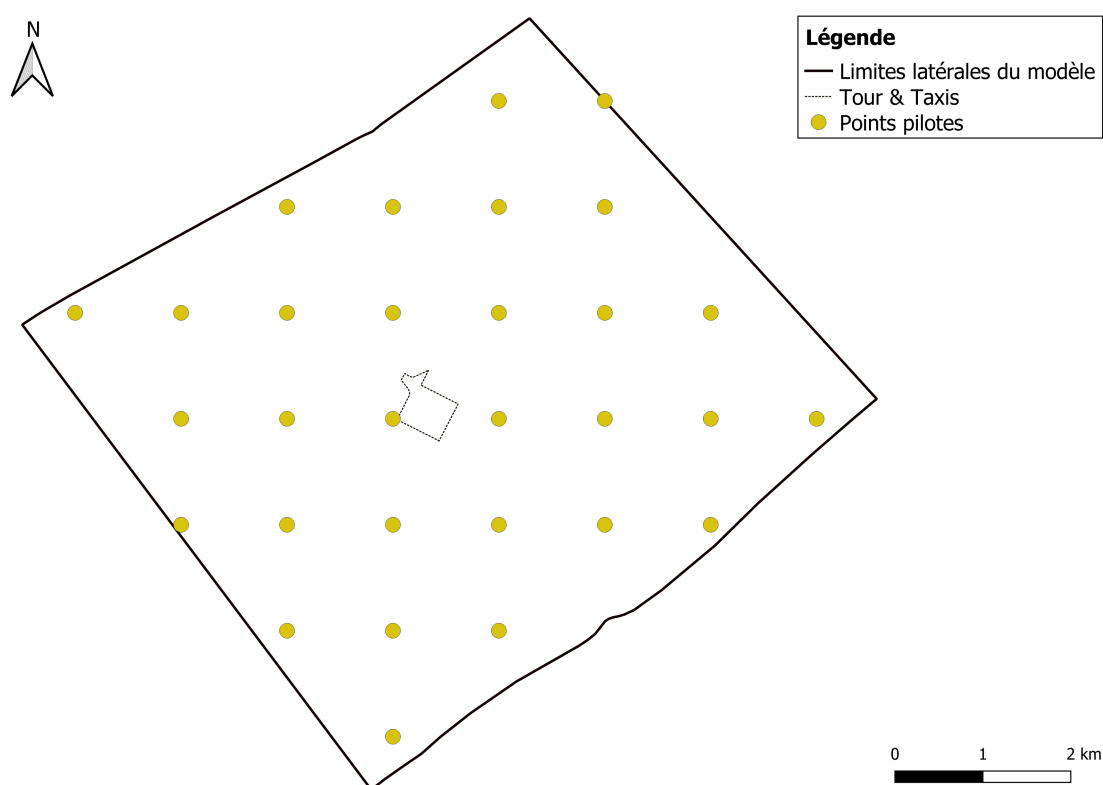


FIGURE 6.6 – Distribution uniforme des 30 points pilotes dans le modèle pour la calibration automatique avec PEST.

Les valeurs de conductivité hydraulique fournies au logiciel sont celles obtenues par calibration manuelle pour le Membre de Grandglise (Figure 6.2) et la partie supérieure, plus perméable, du socle paléozoïque (Figure 6.3). Concernant les autres unités modélisées, les valeurs initiales dans PEST sont celles de la Table 5.1, inchangées lors de la calibration (manuelle comme automatique).

Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues par la calibration automatique avec PEST sont présentées aux Figures 6.7 et 6.8 pour le Membre de Grandglise et la partie supérieure du socle respectivement. Pour les deux unités hydrogéologiques, elles sont comprises dans les intervalles définis lors de la calibration manuelle.

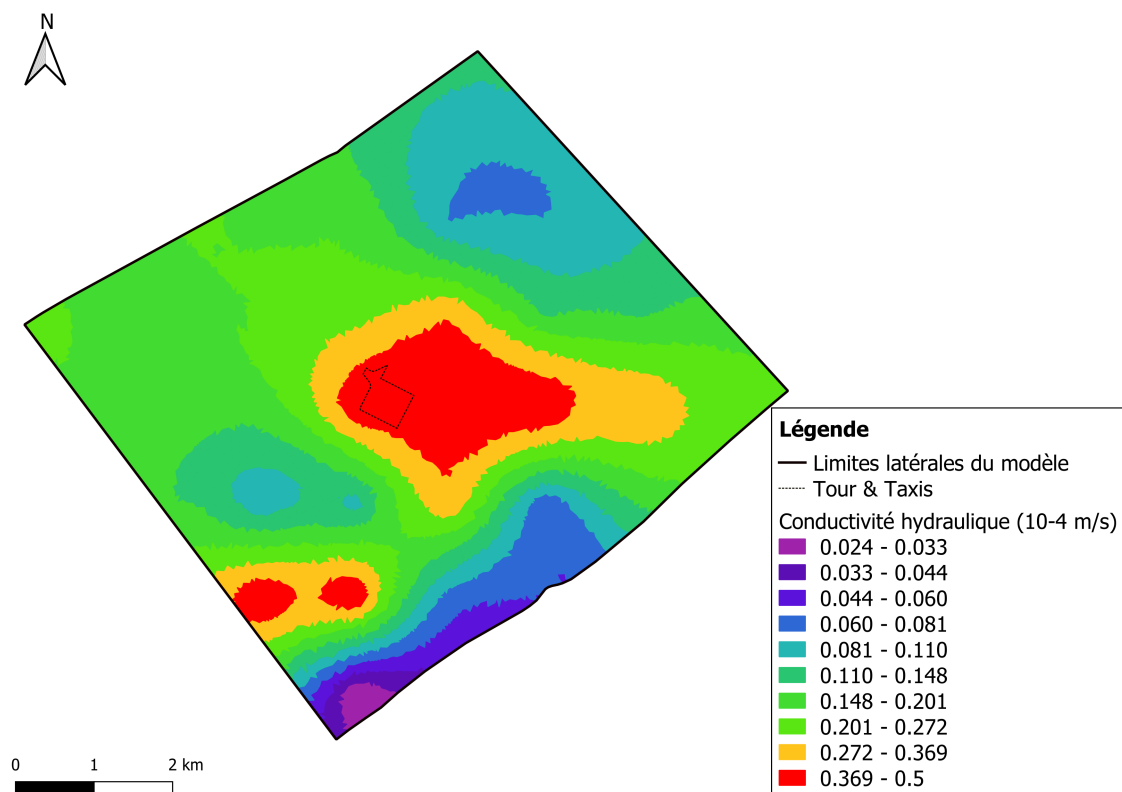


FIGURE 6.7 – Conductivité hydraulique obtenue par calibration automatique à l'aide du logiciel PEST dans le Membre de Grandglise.

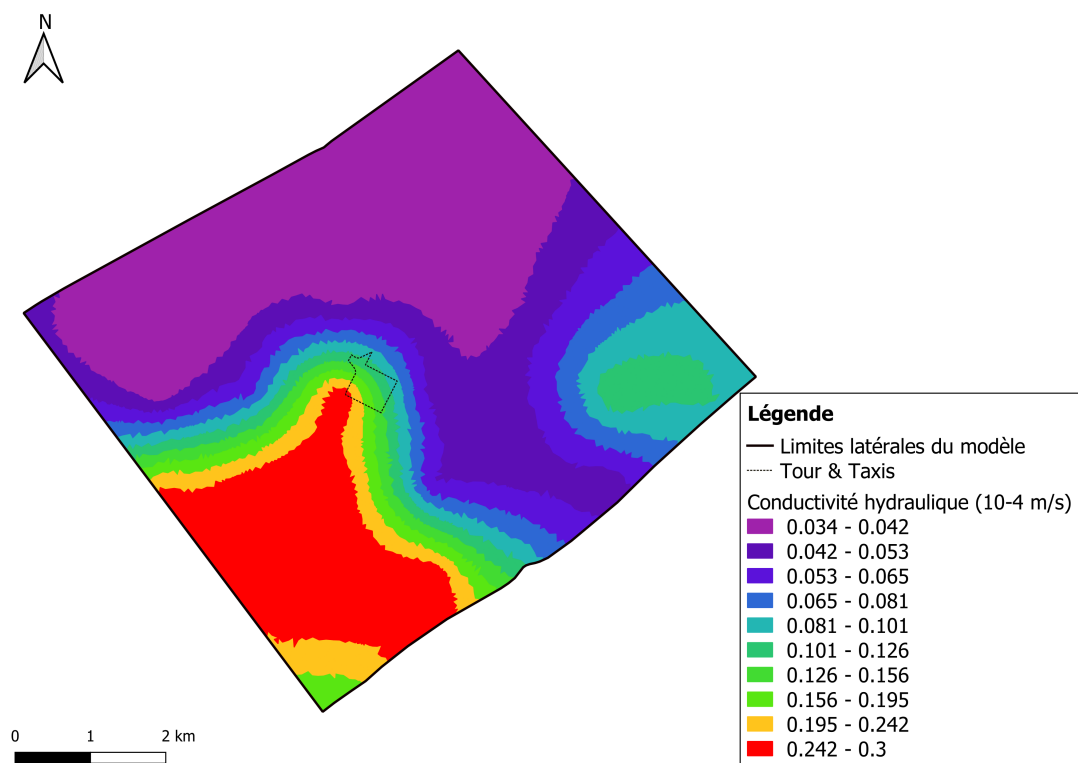


FIGURE 6.8 – Conductivité hydraulique obtenue par calibration automatique à l'aide du logiciel PEST dans la partie supérieure (plus perméable) de l'aquifère du socle paléozoïque.

De plus, les Figures 6.9 et 6.10 montrent les résultats d'écoulement en régime permanent le 1<sup>er</sup> mars 2013 avec les valeurs de conductivité hydraulique obtenues par calibration automatique, pour l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque respectivement. L'ensemble des résidus sont de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-7}$  m. Ils ne sont donc pas renseignés.

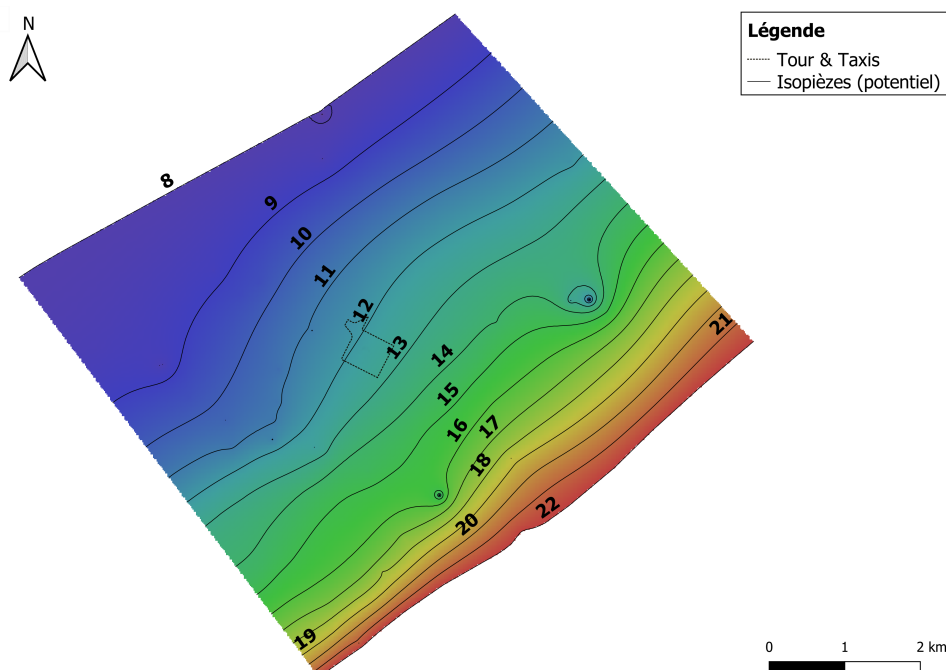


FIGURE 6.9 – Résultats d'écoulement en régime permanent le 1<sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère des sables du Landénien, après calibration automatique.

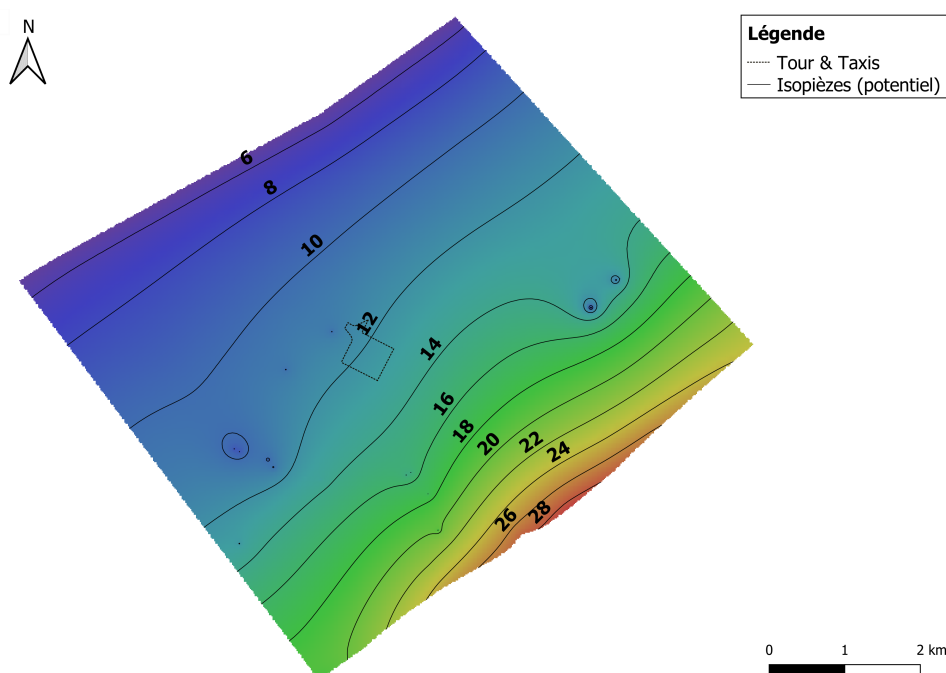


FIGURE 6.10 – Résultats d'écoulement en régime permanent le 1<sup>er</sup> mars 2013 dans l'aquifère du socle paléozoïque, après calibration automatique.

Les conductivités hydrauliques attribuées au Membre de Grandglise et à la partie supérieure, plus perméable, de l'aquifère du socle paléozoïque dans la suite du travail sont celles déterminées par le logiciel PEST lors de la calibration automatique.

## 6.2 Calibration du modèle d'écoulement en régime transitoire

En régime transitoire, les paramètres d'écoulement pouvant être adaptés lors de la calibration du modèle d'écoulement sont la conductivité hydraulique  $K$  et le coefficient d'emmagasinement spécifique  $S_s$ .

En guise de rappel, les valeurs de coefficient d'emmagasinement spécifique initialement attribuées au Membre de Grandglise sont présentées à la Figure 5.6. Concernant les autres unités hydrogéologiques modélisées, les coefficients d'emmagasinement spécifique initialement considérés sont repris à la Table 5.2. De plus, les conductivités hydrauliques sont celles déterminées par PEST pour le Membre de Grandglise et la partie supérieure du socle, et celles de la Table 5.1 pour les autres unités modélisées.

### 6.2.1 Approche considérée

Habituellement, la calibration pour l'écoulement en régime transitoire consiste à s'assurer que le modèle reproduise, autant que possible, l'évolution du niveau piézométrique observé aux points de mesure.

Cependant, dans ce travail, une autre approche a été envisagée. En effet, l'objectif est de modéliser l'effet cumulé des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis. En particulier, l'étude de possibles interactions entre la piézométrie dans les puits des installations des bâtiments 1 et 2 exploitant l'aquifère des sables du Landénien et de l'installation du bâtiment 3 exploitant l'aquifère du socle paléozoïque pourrait permettre de mieux caractériser l'aquitard séparant ceux-ci.

ARTESIA (2021) dispose de données continues de variations du niveau piézométrique au sein d'un puits froid (puits 1C4 sur la Figure 2.4) et d'un puits chaud (puits 1W4) du bâtiment 1, de mi-janvier à fin avril 2021.

D'après ces données, le système géothermique ouvert du bâtiment 1 n'est pas exploité entre mi-février et fin avril. En effet, de mi-janvier à mi-février, des variations rapides et importantes du niveau piézométrique (de 15 à 25 m environ) sont observées au sein des deux puits. Ensuite, à partir de mi-février, ces variations disparaissent. Le niveau piézométrique suit alors l'enveloppe inférieure des variations précédemment observées pour le puits froid, et son enveloppe supérieure pour le puits chaud. En effet, le puits froid constituait un puits de réinjection lors de la saison froide, et son niveau piézométrique augmentait donc considérablement. Au contraire, le puits chaud correspondait à un puits de pompage, diminuant son niveau piézométrique de manière importante.

Après l'arrêt du système, des variations journalières du niveau piézométrique sont observées dans le puits froid (de 5 à 15 cm environ) et dans le puits chaud (de 10 à 20

cm environ). Pour la calibration, le choix réalisé est de considérer le cas le plus défavorable, dans lequel seule l'installation du bâtiment 3 est responsable de ces variations. En effet, dans ce cas, les interférences de piézométrie entre les systèmes géothermiques ouverts exploitant les deux aquifères distincts et séparés par l'aquitard de Gulpen sont maximales.

Ainsi, la calibration pour l'écoulement en régime transitoire consiste à simuler le fonctionnement du système géothermique ouvert du bâtiment 3 et à analyser son impact sur la piézométrie simulée dans les puits du bâtiment 1. En effet, les variations du niveau piézométrique simulé dans ces puits doivent être, au maximum, égales aux variations journalières observées.

### 6.2.2 Scénario de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3

Aucune information concernant le fonctionnement réel du système géothermique du bâtiment 3 n'est disponible. Ainsi, un scénario plausible de pompage et de réinjection doit être défini.

Lors de l'étude de faisabilité du système géothermique pour le bâtiment 3, AGT (2018a) a considéré une demande de chauffage égale à la demande de refroidissement, s'élevant toutes deux à 1250 MWh/an. Il s'agit de l'énergie à extraire du sol, avant le recours à l'utilisation d'une pompe à chaleur.

Tout d'abord, l'hypothèse considérée est que la saison froide s'étend du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars et la saison chaude du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre. Ensuite, il est supposé que l'installation géothermique fonctionne 5 jours par semaine, et qu'elle est à l'arrêt les 2 jours restants (correspondant au week-end). Sous l'hypothèse d'un cycle de pompage et de réinjection de 10 heures par jour en période de fonctionnement, la demande énergétique équivaut à une puissance nécessaire de 961 kW pour la saison froide et 954 kW pour la saison chaude.

Le débit de pompage  $Q$  nécessaire afin d'extraire la puissance  $P$  du sol pour le chauffage et le refroidissement est calculé selon l'équation 6.1 suivante (Dassargues, 2018) :

$$Q = \frac{P}{\Delta T \rho_w c_w} \quad (6.1)$$

où  $\Delta T$  (°K) désigne la différence entre la température d'injection et la température d'extraction, et  $\rho_w c_w$  la capacité thermique volumique de l'eau (Dassargues, 2018). Le  $\Delta T$  est considéré égal à 6 °K, valeur typique pour les installations géothermiques ouvertes.

Enfin, sous les hypothèses émises, le débit total nécessaire pour répondre aux demandes de chauffage et de refroidissement s'élève à environ 140 m<sup>3</sup>/h. Le débit est réparti uniformément entre les puits de pompage, qui contribuent donc chacun à 1/5 du débit total, soit 28 m<sup>3</sup>/h.

La calibration en régime transitoire est réalisée en saison froide, qui correspond à une demande de chauffage du bâtiment. En effet, les variations du niveau piézométrique sont observées à partir du 16 février. De plus, quelques cycles de pompage et réinjection sont suffisants afin d'évaluer l'impact du système exploitant l'aquifère du socle sur la piézométrie de l'aquifère du Landénien observée dans le système du bâtiment 1. Il n'est donc pas nécessaire d'étendre la période des simulations à la saison chaude.

Finalement, le scénario de pompage et réinjection considéré pour le système géothermique du bâtiment 3 pour la calibration en régime transitoire est le suivant : l'installation fonctionne pendant 5 jours, avec un débit de pompage de  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  dans chaque puits chaud, et injection de  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  dans chaque puits froid de 8h à 18h. Ensuite, le système est à l'arrêt pendant 2 jours. Ce scénario vise à simuler une semaine de travail suivie du week-end.

### 6.2.3 Calibration

En régime transitoire, la calibration pour le modèle d'écoulement a été réalisée de manière manuelle uniquement. En effet, les temps de calculs du logiciel PEST sont élevés et ne permettent pas d'effectuer une calibration automatique en régime transitoire.

Lors de la calibration manuelle, il s'est avéré que l'impact du pompage et de la réinjection dans l'aquifère du socle paléozoïque correspondant au fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3 sur la piézométrie simulée au sein des puits du bâtiment 1 est virtuellement nul. En effet, l'évolution du niveau piézométrique simulé dans les puits 1C4 et 1W4 est présentée à la Figure 6.11. Tout au long du scénario de pompage et de réinjection, la piézométrie simulée au sein des puits reste virtuellement constante.

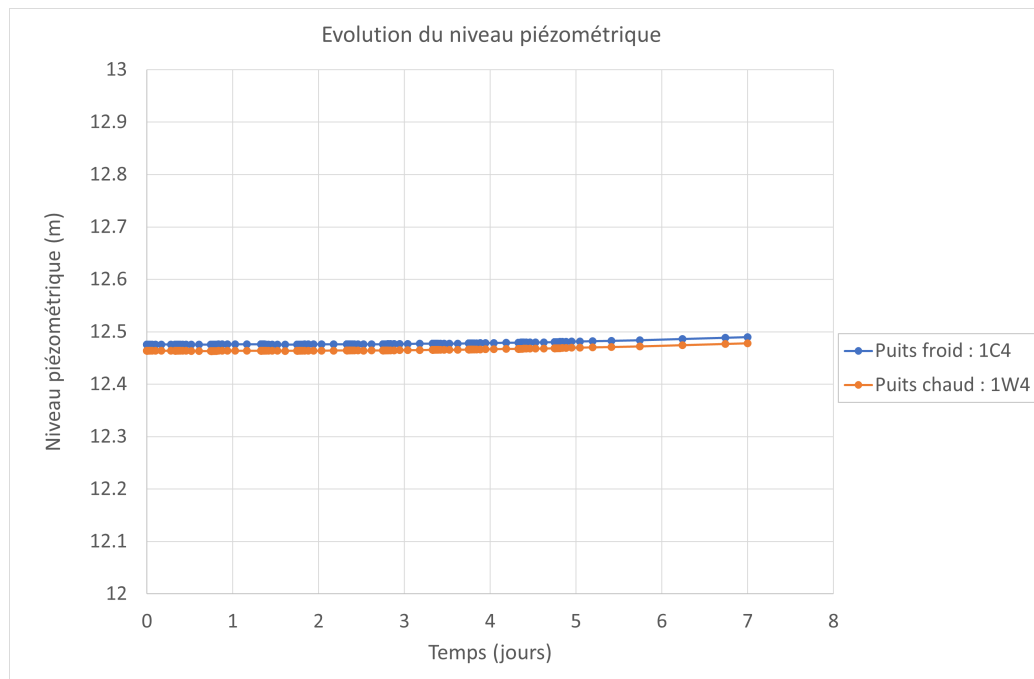


FIGURE 6.11 – Évolution du niveau piézométrique simulé au sein des puits 1C4 et 1W4 du bâtiment 1 sous le scénario de fonctionnement du système géothermique ouvert du bâtiment 3.

Diverses modifications ont été apportées au modèle afin d'évaluer leur effet sur l'impact du fonctionnement du système du bâtiment 3 sur le niveau piézométrique simulé dans les puits du bâtiment 1, tels que :

- l'augmentation du coefficient d'emmagasinement spécifique du Membre de Lincent ;
- l'augmentation du coefficient d'emmagasinement spécifique de l'aquitard de Gulpen ;
- la diminution du coefficient d'emmagasinement spécifique du Membre de Grandglise sur le site de Tour & Taxis ;
- l'augmentation de la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen.

Il s'est avéré qu'aucun de ces paramètres n'avait un impact sur l'amplitude des variations du niveau piézométrique au sein des puits 1C4 et 1W4.

Néanmoins, le cas considéré dans le cadre de la calibration constitue le cas le plus défavorable. En réalité, les variations de piézométrie observées dans les puits du bâtiment 1 peuvent être dues à d'autres sollicitations, telles que le fonctionnement du système géothermique du bâtiment 2 (adjacent au bâtiment 1 et exploitant également l'aquifère des sables du Landénien), ou à d'autres pompages dans l'aquifère dans la région.

Le modèle d'écoulement tel quel est donc considéré comme calibré en régime transitoire.

## 6.3 Conclusion

La calibration du modèle hydrogéologique est nécessaire afin de s'assurer que celui-ci reproduise correctement le comportement du système modélisé. A cette fin, les résultats produits par le modèle lors des simulations sont comparés à des observations réalisées dans le système réel. Si nécessaire, les différents paramètres du modèle sont adaptés afin d'obtenir des résultats aussi proches que possible des mesures effectuées dans le système.

Le modèle développé dans le cadre de ce travail simule deux processus : l'écoulement des eaux souterraines et le transport de chaleur. Cependant, très peu de données sont disponibles quant aux températures des puits des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis. Ainsi, uniquement l'écoulement a fait l'objet d'une calibration. De plus, seuls les paramètres du Membre de Grandglise et de la partie supérieure, plus perméable, du socle paléozoïque ont été adaptés.

Tout d'abord, la calibration du modèle d'écoulement a été réalisée en régime permanent. Une première étape a permis la calibration manuelle du modèle, en modifiant manuellement la valeur de la conductivité hydraulique des unités hydrogéologiques au fur et à mesure des simulations. Ensuite, le modèle d'écoulement a été calibré de manière automatique, à l'aide du logiciel PEST. La méthode des points pilotes a été utilisée, et les valeurs de conductivité hydraulique qui en résultent sont celles considérées dans la suite de l'étude.

Finalement, une approche légèrement différente a été considérée pour la calibration du modèle d'écoulement en régime transitoire. En effet, un relevé piézométrique continu

était disponible pour un puits froid ainsi qu'un puits chaud du bâtiment 1, au cours duquel une période d'arrêt de son système géothermique était visible. Lors de cette période, des variations journalières de faible amplitude (de 5 à 20 cm environ) du niveau piézométrique étaient observées. L'approche choisie était de considérer le cas le plus défavorable, dans lequel les interférences entre la piézométrie au sein des puits des 2 systèmes géothermiques exploitant l'aquifère des sables du Landénien et du système exploitant l'aquifère du socle paléozoïque sont maximales. Dans ce cas, les variations quotidiennes observées au sein des puits du bâtiment 1 seraient uniquement dues au fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3. La calibration en régime transitoire consistait donc à s'assurer que l'impact du pompage et de la réinjection dans les puits du bâtiment 3 sur la piézométrie dans les puits du bâtiment 1 n'était pas supérieur à l'amplitude des variations observées. Néanmoins, lors de la calibration, il s'est avéré que dans le modèle développé, l'impact de l'installation du bâtiment 3 sur la piézométrie du bâtiment 1 est virtuellement nul. Aucune modification des paramètres d'écoulement ne s'est donc révélée nécessaire, et les coefficients d'emmagasinement spécifique considérés dans la suite de l'étude sont ceux initialement prescrits au modèle.

# Chapitre 7

## Simulations de transport de chaleur

Finalement, le modèle étant calibré, il peut être exploité pour la simulation de différents scénarios. L'objectif étant d'étudier l'effet cumulé des 3 systèmes géothermiques ouverts à Tour & Taxis, les scénarios considérés simulent le transport de chaleur sous des configurations diverses.

Les systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2 ont fait l'objet de précédentes simulations par Bulté (2020). Ainsi, les différents scénarios envisagés dans ce travail consistent à considérer des paramètres différents pour le système géothermique du bâtiment 3, ou pour l'aquitard séparant les deux aquifères exploités pour la géothermie.

Tout d'abord, le premier scénario représente le scénario de référence. Ainsi, il consiste à considérer, autant que possible avec les données disponibles, les paramètres réels du fonctionnement des 3 systèmes géothermiques ouverts. Ensuite, le deuxième scénario envisage l'impact qu'aurait une augmentation de 50 % de la demande de refroidissement du bâtiment 3, pour une demande de chauffage constante. Dans le troisième scénario, ses températures de réinjection sont modifiées.

Ensuite, les quatrième et cinquième scénarios consistent à évaluer l'effet d'une modification des paramètres de l'aquitard séparant les deux aquifères. En effet, peu de données relatives à cette unité hydrogéologique sont disponibles pour Tour & Taxis. Or, les échanges éventuels de chaleur entre les deux aquifères s'opèrent à travers cet aquitard. Dans un premier temps, sa conductivité thermique subit une augmentation alors que dans un second temps, sa conductivité hydraulique est multipliée par 4.

### 7.1 Scénario 1 : scénario de référence

Tout d'abord, le premier scénario consiste à simuler le transport de chaleur dans la situation considérée comme cas de référence. Cette simulation reproduit donc la situation réelle, autant que possible avec les données disponibles relatives au fonctionnement des 3 systèmes géothermiques et aux paramètres hydrogéologiques à Tour & Taxis.

#### 7.1.1 Paramètres de la simulation

En l'absence d'informations supplémentaires, les paramètres des systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2 sont ceux considérés par Bulté (2020) dans le scénario

prédictif, simulant le transport de chaleur jusqu'au 31 décembre 2029. Ces paramètres sont dérivés de données relatives au fonctionnement réel des installations, jusqu'en 2019. Quant au bâtiment 3, aucune donnée concernant l'utilisation réelle de son système géothermique n'est disponible. Ainsi, pour le scénario de référence, les caractéristiques de l'installation sont dérivées de l'étude de faisabilité réalisée par AGT (2018a).

**Bâtiment 1** Le bâtiment 1 exploite l'aquifère des sables du Landénien pour son système géothermique ouvert. Selon Bulté (2020), l'utilisation de l'installation a débuté le 1<sup>er</sup> mars 2014. À partir de cette date et jusqu'au 1<sup>er</sup> avril 2020, les périodes de chauffage et de refroidissement du bâtiment sont variables, ainsi que la demande de puissance à couvrir par la géothermie. En effet, celles-ci sont basées sur les données du fonctionnement réel du système. Ensuite, à partir du 1<sup>er</sup> avril 2020, un scénario prédictif du fonctionnement probable du système géothermique a été établi par Bulté (2020). Dans ce scénario, l'installation doit couvrir une puissance de 86 kW pour le refroidissement du bâtiment du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre, et 44 kW pour le chauffage du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars. Ces demandes sont entièrement couvertes par la chaleur extraite du sol. Ainsi, aucune pompe à chaleur ou aucun échangeur de chaleur ne doivent être considérés dans les simulations.

La température d'injection est définie selon un  $\Delta T$  constant de 6 °C, et chaque doublet de puits contribue à 1/4 du débit nécessaire afin de répondre à la demande de chauffage ou de refroidissement du bâtiment (Bulté, 2020).

**Bâtiment 2** Le bâtiment 2 exploite également l'aquifère des sables du Landénien pour son système géothermique ouvert. D'après Bulté (2020), celui-ci a été mis en fonctionnement le 1<sup>er</sup> août 2017. Jusqu'au 16 avril 2020, les demandes de chauffage et de refroidissement couvertes par la géothermie ainsi que l'étendue des saisons sont dérivées de données disponibles relatives à l'utilisation de l'installation géothermique, et sont donc variables. Comme pour le bâtiment 1, un scénario prédictif a ensuite été construit par Bulté (2020) à partir de cette date. Dans ce scénario, la saison de refroidissement débute le 16 avril et s'achève le 31 octobre, associée à une puissance à fournir de 79 kW. La demande de chauffage s'élève quant à elle à 82 kW, du 1<sup>er</sup> novembre au 15 avril. Ces demandes sont également entièrement couvertes par la chaleur extraite du sol, sans pompe à chaleur ou échangeur de chaleur à considérer dans les simulations.

A nouveau, un  $\Delta T$  constant de 6 °C est considéré, et 1/4 du débit nécessaire est extrait et réinjecté dans chaque doublet de puits (Bulté, 2020).

**Bâtiment 3** Le bâtiment 3 exploite quant à lui l'aquifère du socle paléozoïque pour son système géothermique ouvert.

Tout d'abord, la date réelle de début d'opération de son système n'est pas connue. Néanmoins, son fonctionnement a probablement commencé au premier ou second trimestre 2020. L'hypothèse considérée dans ce travail est que la mise en opération de l'installation a eu lieu le 1<sup>er</sup> avril 2020.

Ensuite, AGT (2018a) a considéré une demande énergétique pour le chauffage du bâtiment 3 égale à la demande pour le refroidissement, s'élevant toutes deux à 1250

MWh/an. Ces demandes correspondent à l'énergie à extraire du sol, avant le recours à une pompe à chaleur ou à un échangeur de chaleur. Elles sont corroborées par une étude portant sur la consommation énergétique du bâtiment 3, menée par Boydens (2018). Selon cette étude, en considérant que le besoin en froid pour la ventilation du bâtiment n'est pas pourvu par l'installation géothermique, les besoins énergétiques suivants ont été déterminés pour le système géothermique ouvert du bâtiment : 1243 MWh/an pour le chauffage et 1259 MWh/an pour le refroidissement. Ainsi, considérer des demandes énergétiques égales à 1250 MWh/an pour les deux saisons semble réaliste.

La demande énergétique  $E$  doit ensuite être convertie en une demande de puissance  $P$ . La répartition réelle entre saison de chauffage et saison de refroidissement n'est pas connue pour le bâtiment 3. Néanmoins, une hypothèse réaliste est de considérer que les deux saisons coïncident avec celles du bâtiment 1. Ainsi, le choix réalisé est que la saison de refroidissement du bâtiment 3 débute le 1<sup>er</sup> avril et s'achève le 30 septembre, alors que la saison de chauffage s'étend du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars. La demande de puissance peut alors être évaluée pour la saison de chauffage et la saison de refroidissement selon l'équation 7.1 ci-dessous :

$$P [\text{kW}] = 1000 \times \frac{E [\text{MWh/an}]}{\text{Nombre de jours de la saison} \times 24} \quad (7.1)$$

Ainsi, sous les hypothèses considérées, les puissances suivantes doivent être extraites du sol afin de répondre aux besoins du bâtiment 3 :

- 285 kW du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre pour le refroidissement ;
- 286 kW du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars pour le chauffage.

En outre, les températures d'injection sont définies selon l'étude de faisabilité réalisée par AGT (2018a). Dans cette étude, elles sont considérées constantes et égales aux valeurs suivantes :

- 7 °C pour la période de chauffage ;
- 18 °C pour la période de refroidissement.

Enfin, chaque doublet de puits contribue à 1/5 du débit nécessaire afin de répondre à la demande de chauffage ou de refroidissement du bâtiment.

### 7.1.2 Résultats

La simulation a été exécutée du 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 31 mars 2040. En effet, d'une part, cela permet de tenir compte des mises en fonctionnement successives des installations géothermiques des 3 bâtiments. D'autre part, cela permet également de visualiser l'effet cumulé des différents systèmes à relativement long terme, soit 20 ans après le lancement du système du bâtiment 3.

L'analyse des résultats de la simulation est menée en deux étapes. Dans un premier temps, l'évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques est commentée. Cela permet notamment de visualiser l'efficacité des installations. Ensuite,

dans un second temps, l'évolution des panaches de chaleur dans les deux aquifères est également étudiée.

### 7.1.2.1 Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques

Tout d'abord, la Figure 7.1 présente l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. Lors du passage d'une saison froide à une saison chaude, la température dans les puits chauds augmente subitement avant de revenir à la valeur initiale. Dans les puits froids, le phénomène est inversé, et la température diminue de manière importante lors du passage de la saison chaude à la saison froide, avant de revenir à sa valeur initiale. Il s'agit d'erreurs numériques internes au logiciel, qui ne doivent pas être prises en compte. En effet, elles sont très rapidement rétablies par le logiciel, et n'ont pas d'impact sur l'évolution de la température dans les puits.

La Figure 7.1 montre que la température dans les puits du bâtiment 1 croît au cours du temps, aussi bien pour les puits froids que pour les puits chauds. En réalité, avec les paramètres considérés, son système géothermique ouvert est totalement contre-productif. En effet, la température dans ses puits froids est constamment supérieure à la température naturelle de l'aquifère (12.4 °C) dès avril 2019, soit après 5 ans de fonctionnement. Ainsi, aucune réserve de froid n'est engendrée par l'utilisation du système et l'eau extraite de ses puits froids est plus chaude que l'aquifère. Cela était déjà le cas dans le modèle développé par Bulté (2020).

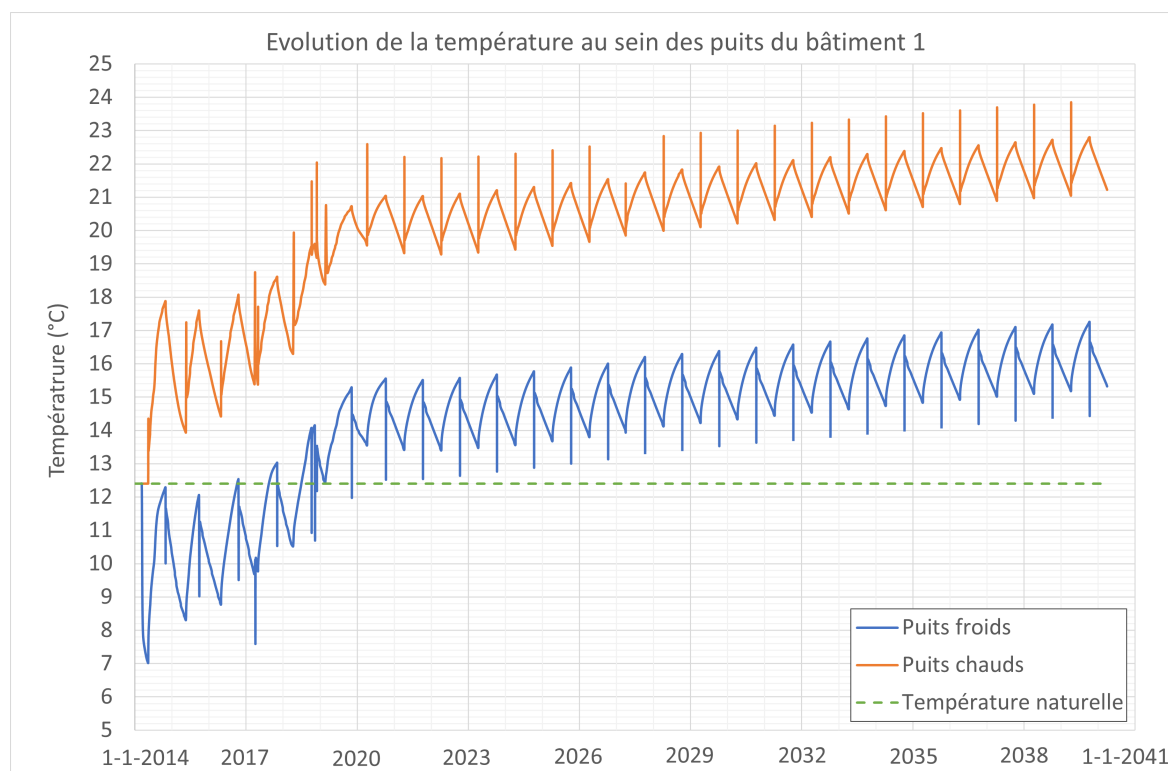


FIGURE 7.1 – Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1.

La Figure 7.2 montre quant à elle l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. Durant les 3 premières années de fonctionnement de son système géothermique, la température dans ses puits diminue. La tendance s'inverse ensuite à partir de 2020, avec les paramètres prédictifs.

Avec les paramètres considérés, le système géothermique du bâtiment 2 n'est pas profitable à long terme non plus. A nouveau, cette constatation était déjà réalisée dans le modèle développé par Bulté (2020).

La température dans ses puits froids croît avec le temps, jusqu'à devenir supérieure à la température naturelle de l'aquifère en fin de saison chaude après quelques années de fonctionnement. Ainsi, la réserve de froid créée autour des puits froids n'est pas suffisante afin de subsister durant l'entièreté de la saison chaude. Dès que cette réserve est épuisée, l'eau extraite des puits froids du système est plus chaude que l'aquifère.

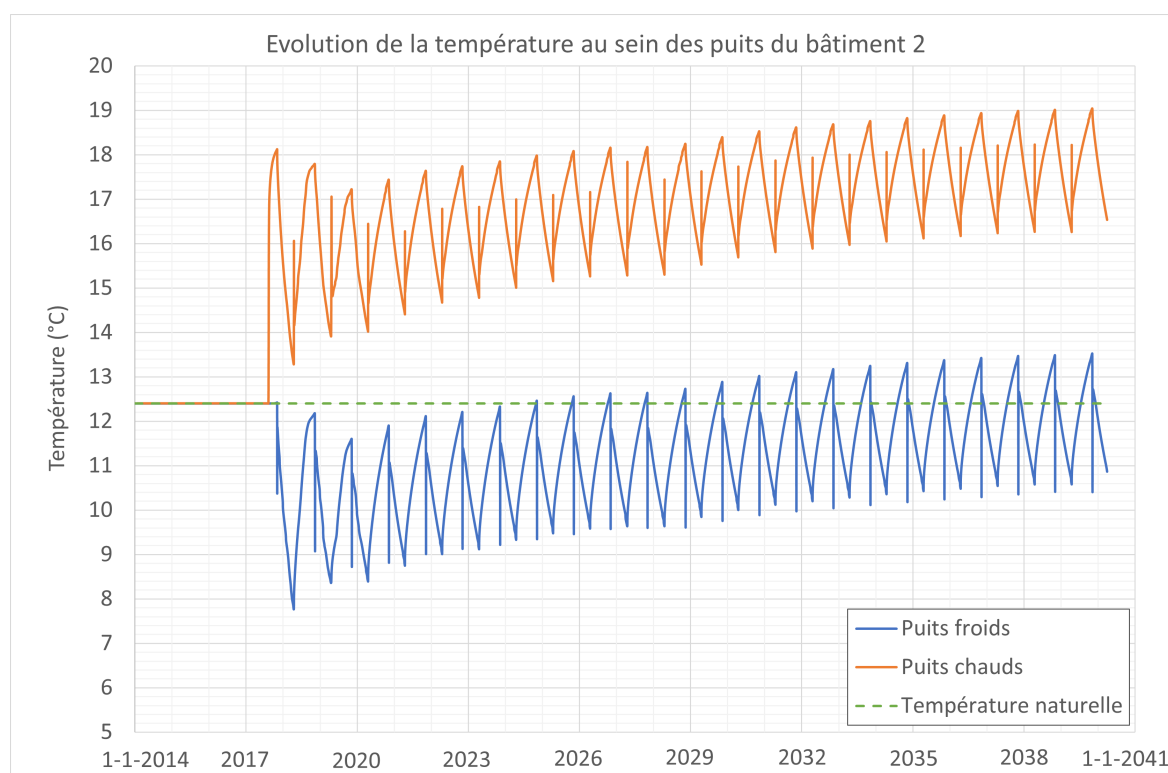


FIGURE 7.2 – Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2.

De plus, la Figure 7.3 présente l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. Les températures de réinjection étant constantes, la température minimale dans les puits froids et la température maximale dans les puits chauds restent virtuellement constantes au cours du temps. Cependant, l'amplitude des variations de température diminue.

Dans le scénario 1, le système géothermique ouvert du bâtiment 3 est efficace. En effet, il parvient à créer une réserve de froid autour de ses puits froids et une réserve de chaud autour de ses puits chauds. Au fur et à mesure des saisons, ces réserves s'étendent autour des puits respectifs. Les variations de température au sein de ceux-ci sont donc

de moins en moins importantes.

Il est intéressant de noter que les extrema de température ne sont pas égaux aux températures de réinjection définies pour le système géothermique (7 °C et 18 °C). En effet, l'eau étant injectée au fond des puits, la température moyenne de l'eau souterraine au sein de ceux-ci n'est pas exactement égale à la température de réinjection.

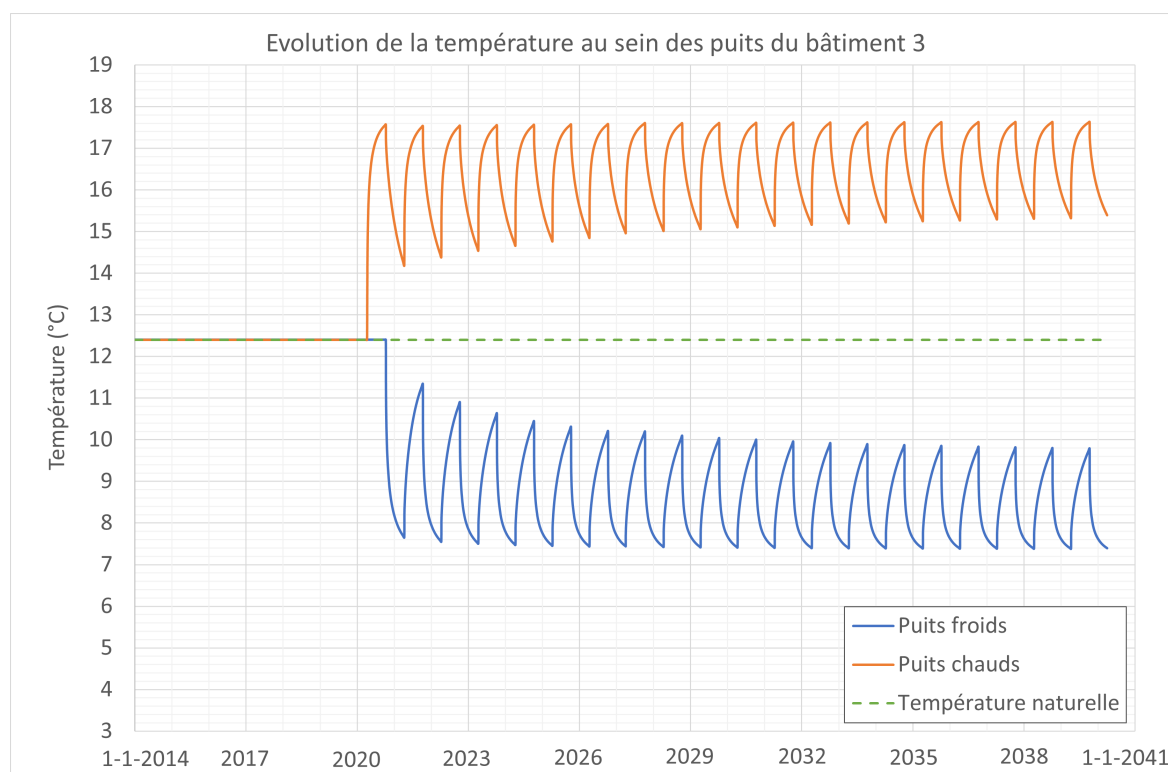


FIGURE 7.3 – Scénario 1 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3.

### 7.1.2.2 Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque

De faibles erreurs très localisées autour des puits du bâtiment 1 sont présentes dans les différentes Figures montrant les panaches de chaleur. En effet, les panaches présentés sont ceux retenus par le logiciel le premier jour de chaque saison (chaude ou froide). Cependant, comme expliqué précédemment, lors de chaque changement de saison, des erreurs numériques surviennent dans le logiciel. Ainsi, la température dans les puits chauds est surévaluée le premier jour de chaque saison chaude par rapport au dernier jour de la saison froide précédente. Au contraire, la température dans les puits froids est sous-évaluée. Néanmoins, ces erreurs numériques ne surviennent qu'aux nœuds correspondant aux puits géothermiques, et sont très rapidement rétablies par le logiciel. Leur influence sur les panaches de chaleur dans les deux aquifères n'est ainsi visible que très localement (dans un rayon d'environ 5 m) autour des puits. Elles ne sont donc pas significatives.

De plus, les températures présentées sont celles dans la couche 6 du modèle pour l'aquifère du Landénien, et la couche 16 pour l'aquifère du socle. En effet, elles sont situées

environ à la moitié de l'épaisseur crépînée des puits exploitant chacun des deux aquifères, et reproduisent bien les températures moyennes dans les différents puits.

Tout d'abord, la Figure 7.4 présente la distribution de la température dans l'aquifère des sables du Landénien et dans l'aquifère du socle paléozoïque le 1<sup>er</sup> avril 2020, soit juste avant le début du fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3. Le système géothermique du bâtiment 1 est quant à lui opérationnel depuis 6 ans, et celui du bâtiment 2 depuis plus de 2 ans.

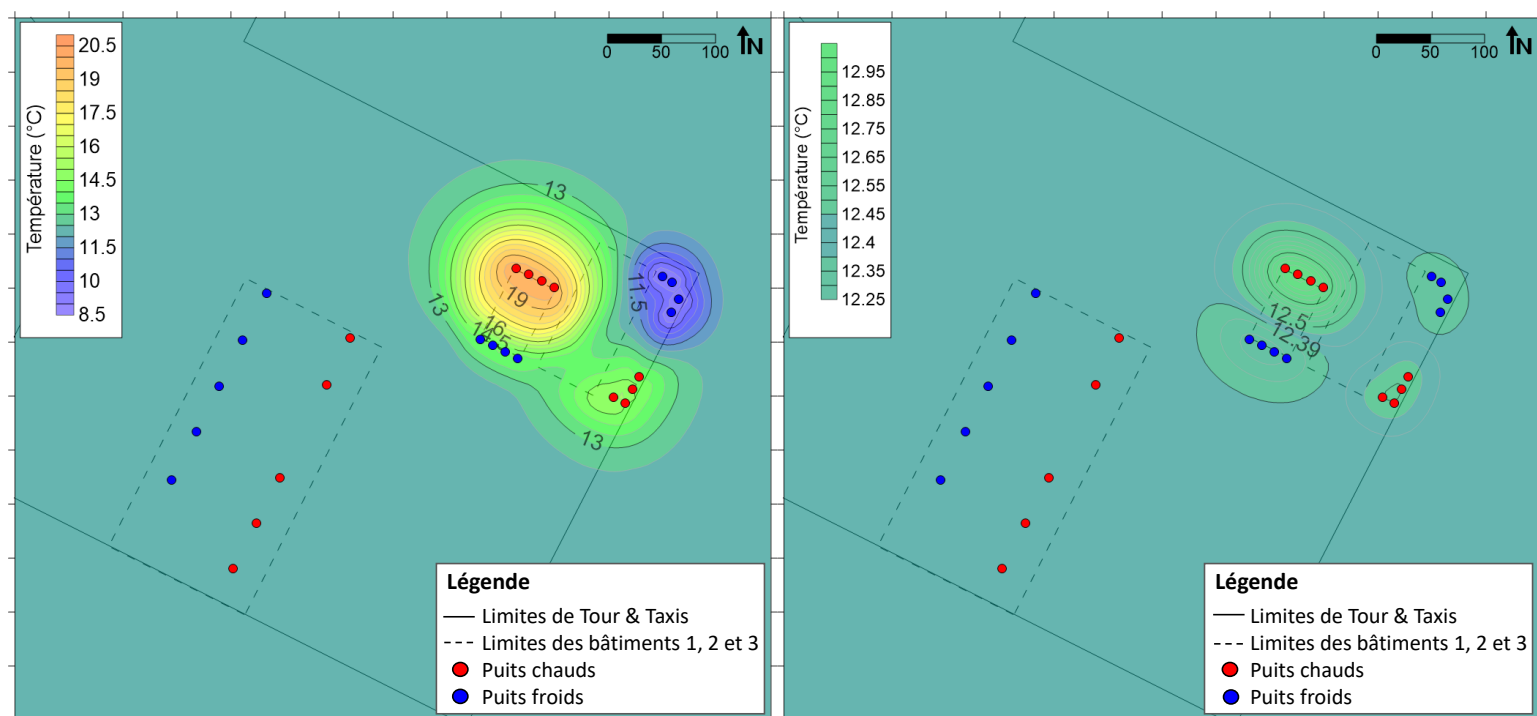


FIGURE 7.4 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2020.

Dans l'aquifère des sables du Landénien, les panaches de chaleur créés par les systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2, exploitant cet aquifère, sont clairement identifiables. En fin de saison froide, correspondant à une saison de chauffage et donc d'extraction dans les puits chauds et injection dans les puits froids, les températures dans les puits sont à leur minimum.

D'une part, un panache de froid est observé autour des puits froids du bâtiment 2 alors qu'un panache de chaleur est présent autour de ses puits chauds. A ce stade, le système est profitable et parvient à constituer une réserve de froid suffisante à la fin de la saison froide afin d'être exploitée durant toute la saison chaude. Néanmoins, le panache de chaleur est plus important que le panache de froid.

D'autre part, le système géothermique du bâtiment 1 est déjà totalement inefficace. Aucune réserve de froid n'a pu être créée durant la saison froide. Le panache de chaleur engendré autour des puits chauds du bâtiment 1 s'étend jusqu'à ses puits froids. En effet, le besoin de refroidissement du bâtiment est largement supérieur à son besoin

de chauffage. Ainsi, le volume d'eau extrait des puits froids et réinjecté dans les puits chauds est largement supérieur au volume pompé dans les puits chauds et réintroduit dans les puits froids. Cela engendre un panache de chaleur qui s'étend de plus en plus autour des puits chauds de l'installation, jusqu'à atteindre ses puits froids. De plus, ce phénomène continue à s'amplifier car l'augmentation de la température dans les puits chauds entraîne la réinjection dans les puits froids à une température qui ne cesse d'augmenter, puisque le  $\Delta T$  reste constant.

Le 1<sup>er</sup> avril 2020, les panaches de chaleur générés par les 2 installations géothermiques sont déjà entrés en contact et forment en réalité un seul grand panache de chaleur.

Dans l'aquifère du socle paléozoïque, des panaches de chaleur sont également observés sous les puits chauds des systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2, atteignant jusqu'à 13 °C. Un panache de froid est également présent sous les puits froids du bâtiment 1. Ainsi, des échanges de chaleur s'opèrent entre les deux aquifères, qui ne sont pas isolés thermiquement l'un de l'autre par l'aquitard de Gulpen. Les échanges de chaleur entre les deux aquifères se produisent probablement principalement par conduction thermique.

Ensuite, la Figure 7.5 présente quant à elle la distribution de la température dans le Landénien et dans le socle le 1<sup>er</sup> octobre 2020, soit à la fin de la première saison de refroidissement après la mise en fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3.

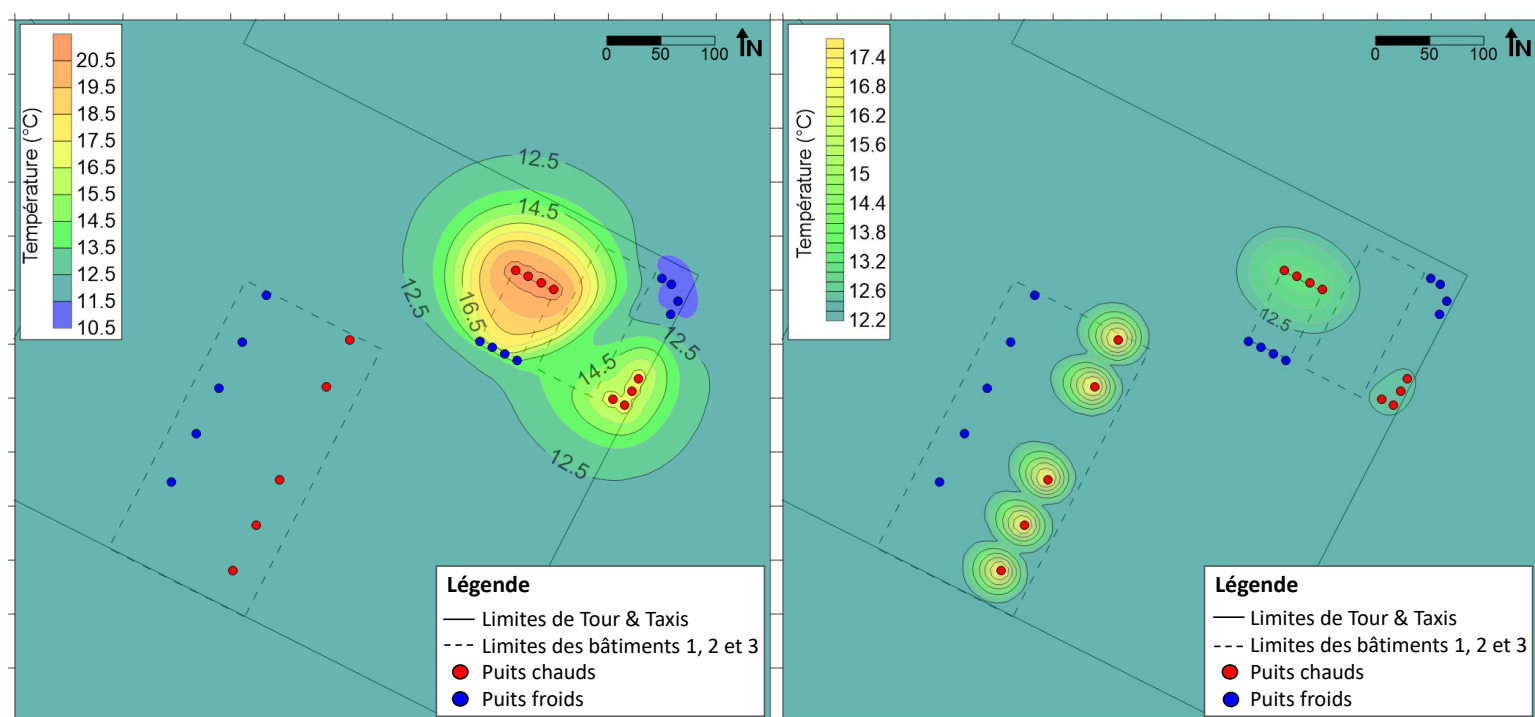


FIGURE 7.5 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2020.

Dans le Landénien, le panache de chaleur créé par les systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2 se rapproche des puits froids du bâtiment 2. Un petit panache de froid

subsiste néanmoins autour de ceux-ci : l'installation est toujours profitable. La mise en fonctionnement du système du bâtiment 3 n'a pas encore d'impact sur la température dans l'aquifère des sables du Landénien.

Dans le socle, l'eau a été extraite des puits froids, qui étaient en réalité à la température naturelle de l'aquifère. Elle a ensuite été réinjectée dans les puits chauds à une température de 18 °C. Il en résulte un panache de chaleur localisé autour de chaque puits chaud.

Il est intéressant de noter que ces panaches ne sont pas centrés autour des différents puits chauds. En effet, ils s'étendent davantage vers le nord-ouest que vers le sud-est. Cela peut probablement être expliqué par le transport de chaleur par advection, dû au pompage dans les puits froids et à l'injection dans les puits chauds, engendrant un gradient important dirigé vers le nord-ouest. De plus, ce gradient suit la direction de l'écoulement naturel au sein de l'aquifère.

En outre, la Figure 7.6 montre la température dans le Landénien et dans le socle le 1<sup>er</sup> avril 2021, soit un an après le début du fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3. Il s'agit donc de la fin de la première saison froide, et donc de chauffage, après sa mise en marche.

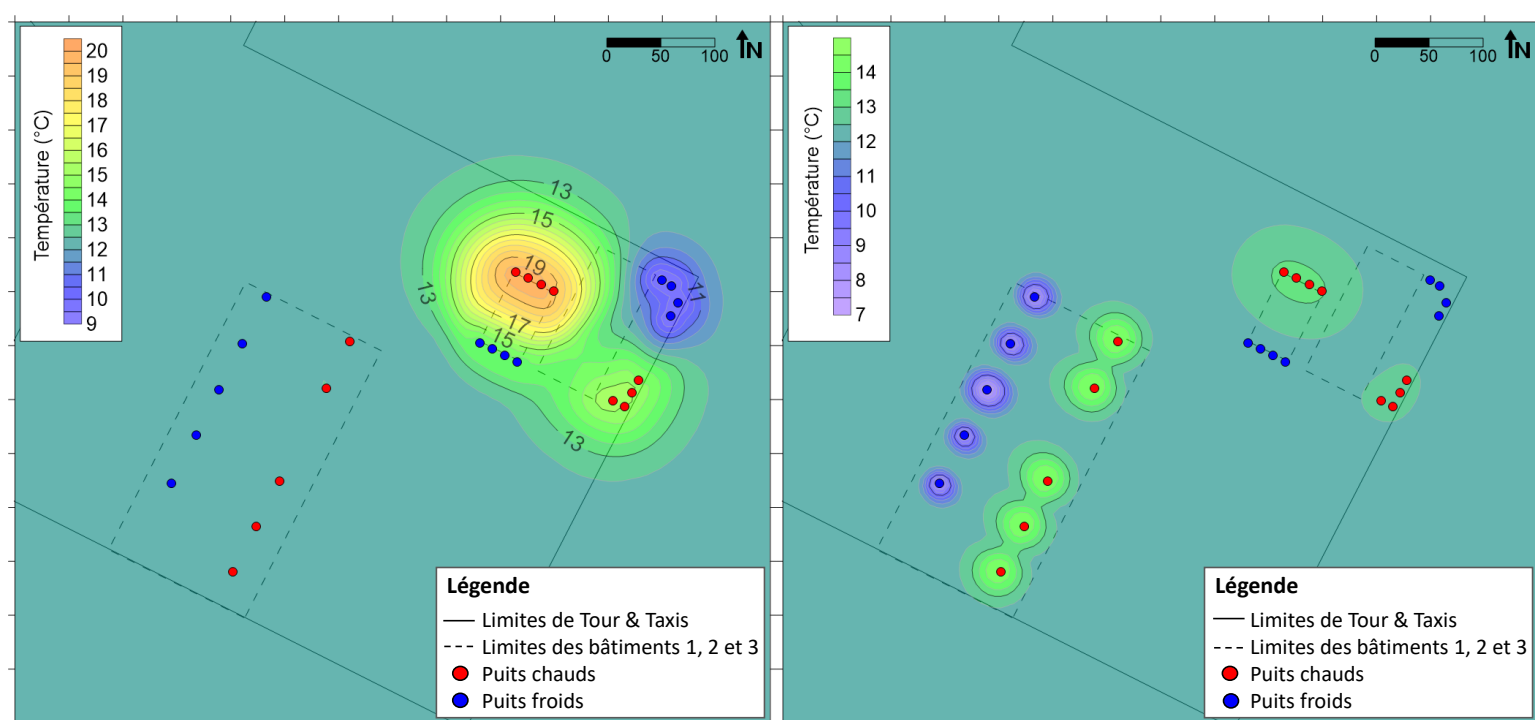


FIGURE 7.6 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2021.

Dans le Landénien, la réserve de froid a été reconstituée par le système du bâtiment 2 dans ses puits froids. L'impact de l'installation du bâtiment 3 sur la température de l'aquifère reste virtuellement nul.

Dans le socle, la température dans les puits chauds du bâtiment 3 est plus faible suite

à l'extraction d'eau dans la réserve de chaud créée lors de la saison précédente, mais les panaches de chaleur subsistent. L'eau pompée a ensuite été réinjectée dans les puits froids à une température de 7 °C. Le puits froid central, moins profond que les autres, présente un panache de froid plus important puisque l'injection d'eau froide a lieu sur une épaisseur moindre de l'aquifère.

Les panaches de froid restent très localisés autour de chaque puits, plus que les panaches de chaud à la fin de la première saison. Cela peut probablement être expliqué par des volumes d'extraction et de réinjection inégaux lors des deux saisons. En effet, les puissances à extraire du sol pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment 3 sont pratiquement égales (286 kW et 287 kW respectivement), mais les  $\Delta T$  sont différents.

Lors de la première saison, l'eau a été extraite des puits froids à la température naturelle de l'aquifère, soit 12.4 °C, et réinjectée dans les puits chauds à 18 °C. Le  $\Delta T$  résultant s'élevait donc à 5.6 °C durant toute la saison. Ainsi, selon l'équation 4.1, le débit d'extraction dans les puits froids et de réinjection dans les puits chauds a été maintenu constant lors de toute la première saison de refroidissement, puisque le  $\Delta T$  était constant et égal à 5.6 °C. Ensuite, au changement de saison, l'extraction a débuté dans les puits chauds. Au début de la saison froide, leur température moyenne s'élevait à environ 17.5 °C. Avec une réinjection à 7 °C dans les puits froids, le  $\Delta T$  initial s'élevait donc approximativement à 10.5 °C. Ensuite, au fur et à mesure de l'extraction dans les puits chauds, leur température moyenne a diminué jusqu'à environ 14.5 °C, engendrant un  $\Delta T$  décroissant jusqu'à une valeur minimale d'environ 7.5 °C.

En considérant les puissances pour le chauffage et le refroidissement égales, les débits pompés et réinjectés lors de la saison de chauffage étaient systématiquement inférieurs au débit constant de la saison précédente, puisque le  $\Delta T$  pour le chauffage est constamment resté supérieur au  $\Delta T$  pour le refroidissement. Les saisons de chauffage et de refroidissement ayant des durées égales (à un jour près), cela a engendré un volume de réinjection plus important dans les puits chauds que dans les puits froids. Les panaches de chaleur sont donc plus étendus que les panaches de froid à la fin de la première année de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3. A partir de la deuxième année de fonctionnement, les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment étant égaux pour des périodes identiques, cette différence ne sera pas résorbée. Le panache de chaleur autour des puits chauds restera plus étendu que le panache de froid.

Ensuite, les Figures 7.7 et 7.8 présentent la température dans le Landénien et dans le socle le 1<sup>er</sup> octobre 2024 et le 1<sup>er</sup> avril 2025 respectivement, soit à la fin de la 5<sup>e</sup> saison froide et de la 5<sup>e</sup> saison chaude après la mise en marche du système géothermique du bâtiment 3.

Dans le Landénien, à la fin de la saison de refroidissement, le panache de chaleur autour des puits chauds des bâtiments 1 et 2 atteint l'un des puits froids du bâtiment 2. Un petit panache de froid subsiste néanmoins autour des 3 autres puits froids. Il se reforme ensuite autour des 4 puits lors de la saison de chauffage. L'efficacité du système est déjà moindre. De plus, des panaches de chaleur sont observés au-dessus des puits chauds du bâtiment 3, ainsi qu'un faible panache de froid au-dessus de son puits froid le moins

profond. Le système géothermique du bâtiment 3, exploitant l'aquifère du socle, a donc un impact sur la température dans l'aquifère du Landénien.

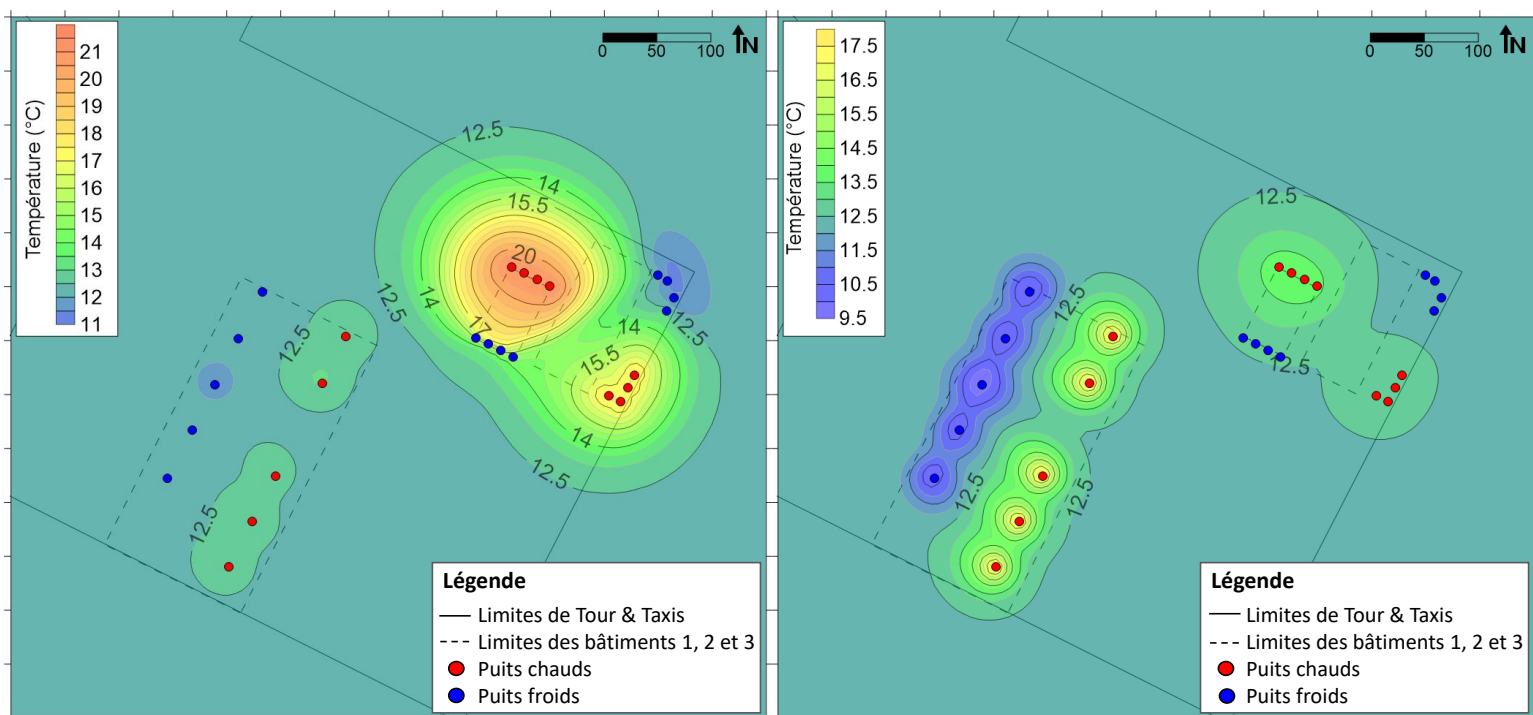


FIGURE 7.7 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2024.

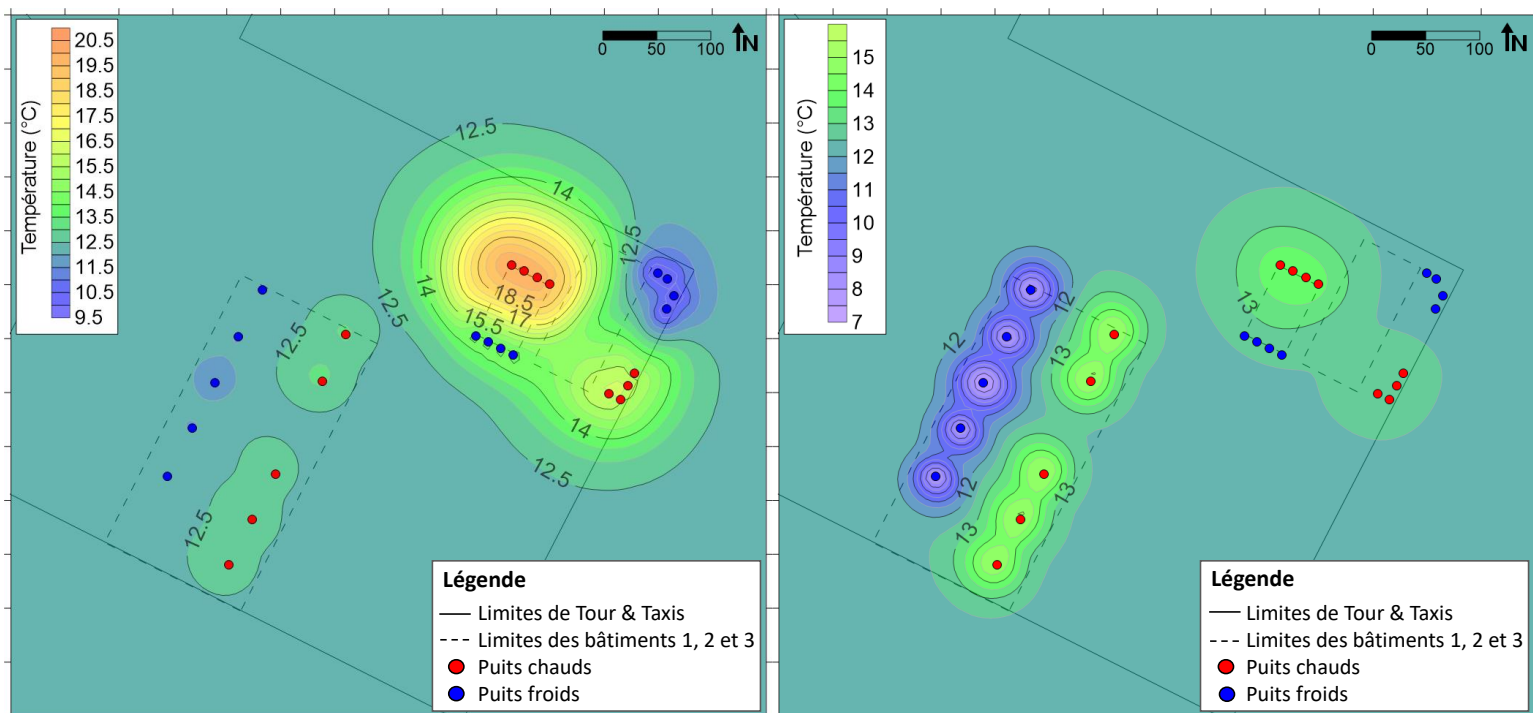


FIGURE 7.8 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2025.

Dans le socle, les panaches de chaleur et de froid autour des puits du bâtiment 3 s'étendent tous deux. Le panache de chaleur conserve une étendue plus importante que le panache de froid, mais le système géothermique parvient tout de même à maintenir une réserve de froid ainsi qu'une réserve de chaleur toute l'année. Il est en effet profitable. De plus, les panaches de chaleur provoqués par les installations des bâtiments 1 et 2 sont entrés en contact.

Finalement, les Figures 7.9, 7.10, 7.11 et 7.12 présentent la température dans le Landénien et dans le socle à la fin des 10<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> saisons chaudes et froides respectivement après la mise en fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3.

Dans le Landénien, les panaches créés par le système géothermique du bâtiment 3 ont continué à s'étendre. Le panache de chaleur s'est développé jusqu'à atteindre celui des bâtiments 1 et 2 qui croît également. Néanmoins, après 20 ans d'utilisation du système du bâtiment 3, le panache de chaleur engendré dans le Landénien n'est pas suffisant pour avoir un impact sur la température dans les puits des bâtiments 1 et 2. En 2039, le panache de froid autour des puits froids du bâtiment 2 a complètement disparu à la fin de la saison froide. Comme pour le bâtiment 1, son installation géothermique est devenue contre-productive.

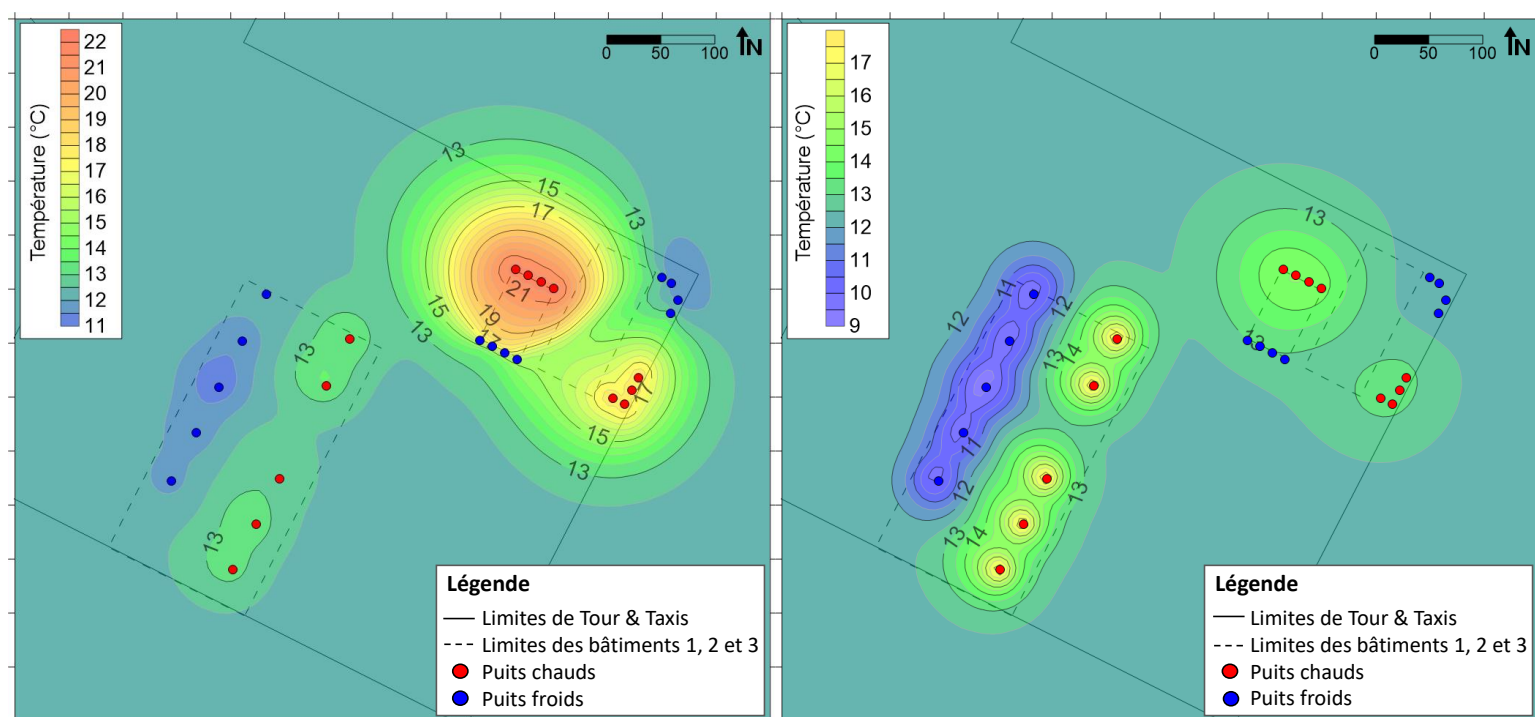


FIGURE 7.9 – Scénario 1 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2029.

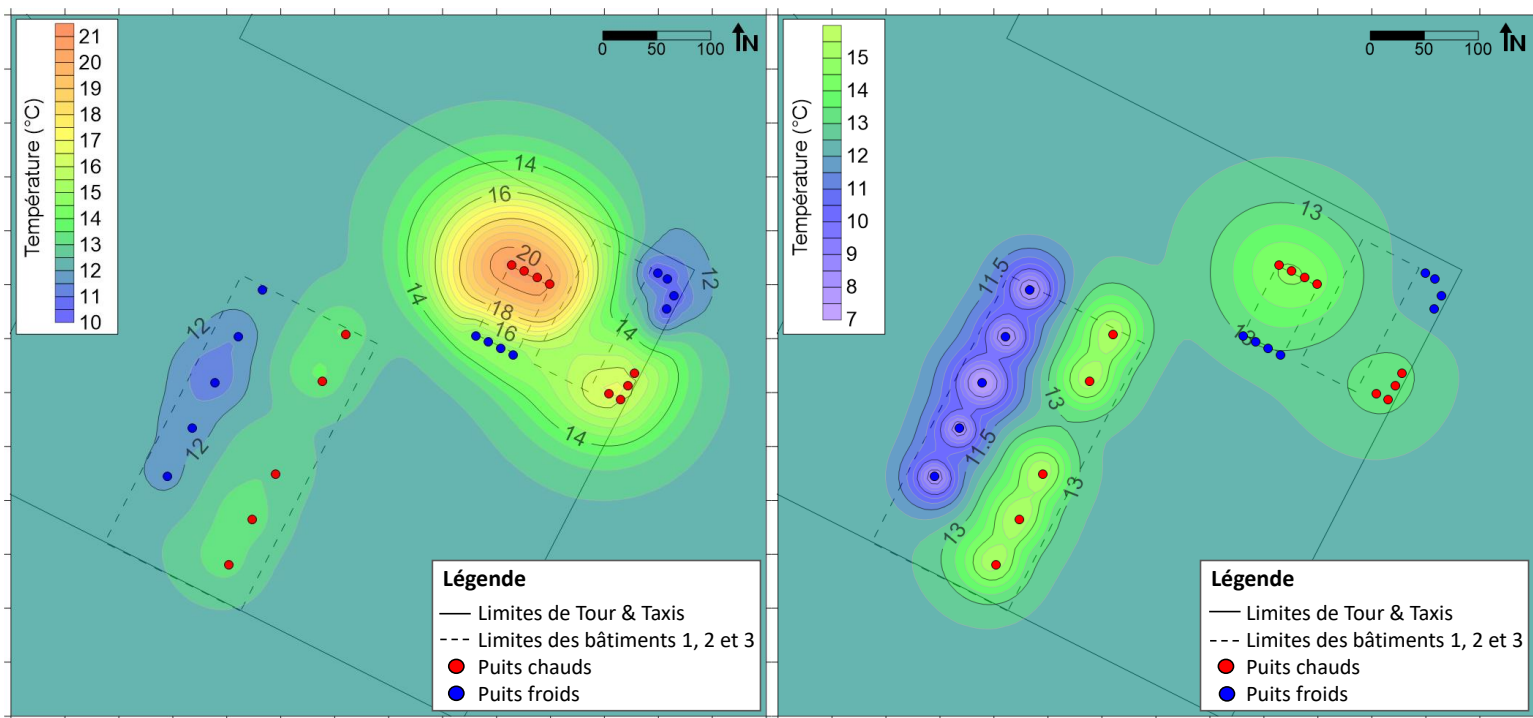


FIGURE 7.10 – Scénario 1 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2030.

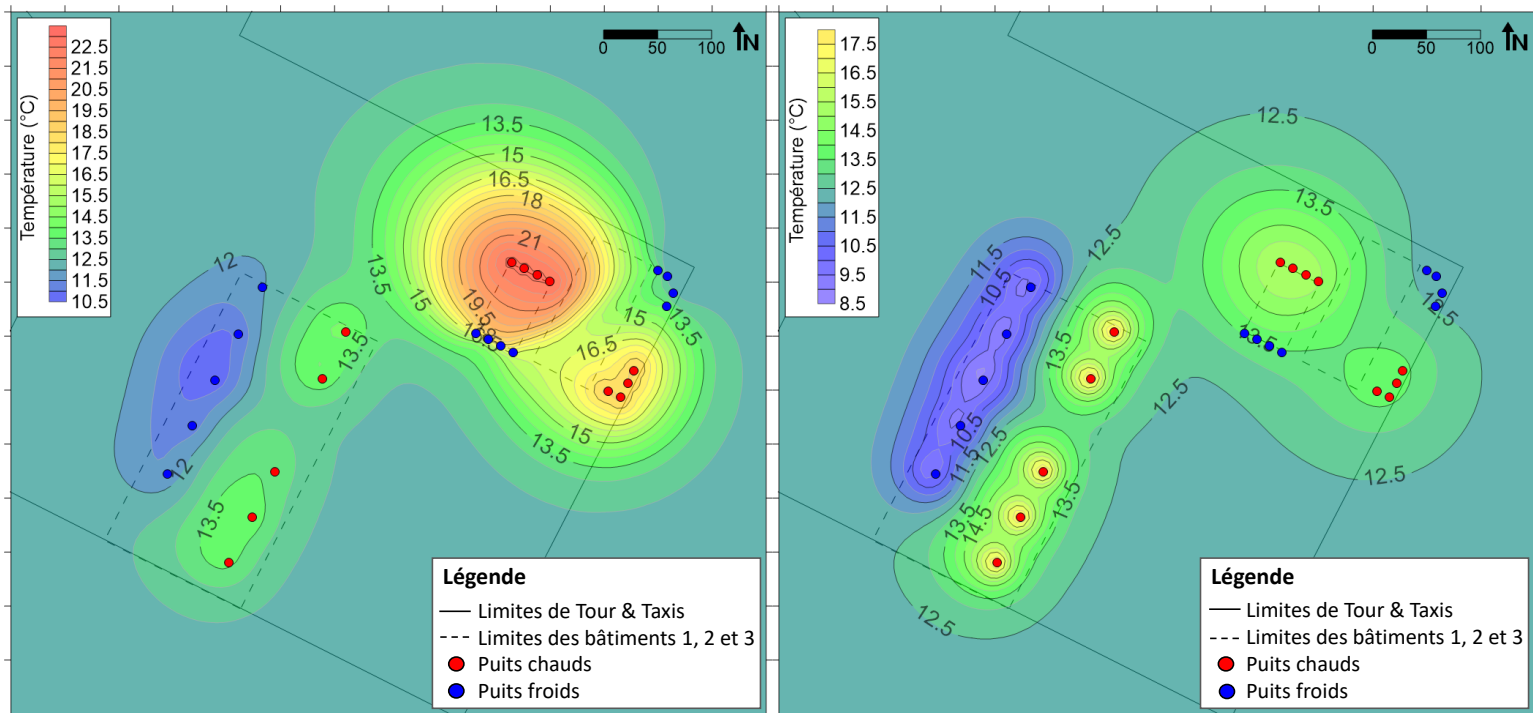


FIGURE 7.11 – Scénario 1 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2039.

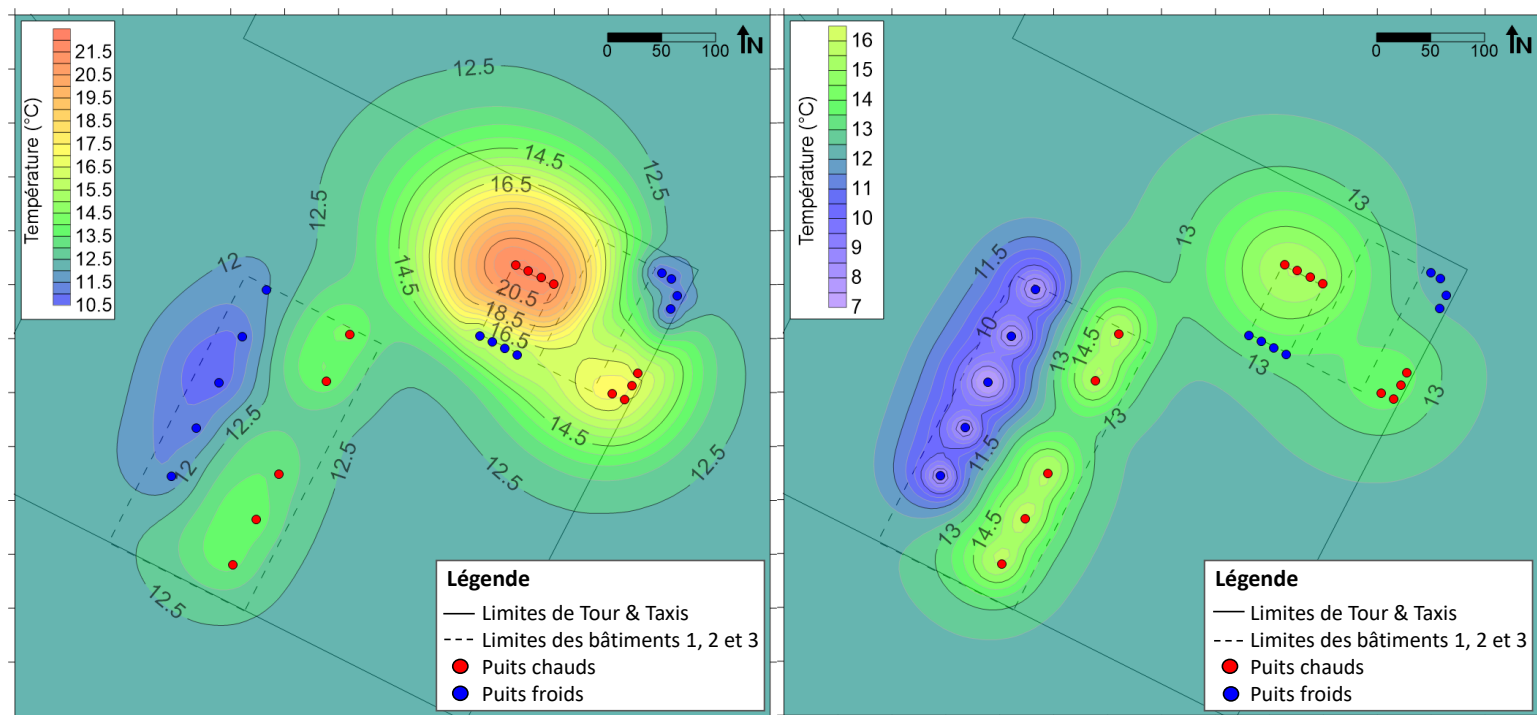


FIGURE 7.12 – Scénario 1 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2040.

Dans le socle, les panaches de chaleur engendrés par les systèmes géothermiques des 3 bâtiments continuent également de s’étendre, et finissent par se rejoindre. Cependant, après 20 ans, les installations géothermiques exploitant le Landénien n’ont pas d’effet sur la température des puits du bâtiment 3. Les deux panaches créés par le système du bâtiment 3 tendent à se décentrer vers le nord-ouest, dans le sens de l’écoulement naturel de l’aquifère, probablement par advection thermique. L’installation du bâtiment 3 demeure profitable, puisqu’elle parvient à créer et maintenir une réserve de froid ainsi qu’une réserve de chaud. Bien que le panache de chaleur s’étende plus que le panache de froid, cela ne semble pas influencer l’efficacité du système.

## 7.2 Scénario 2 : déséquilibre des besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment 3

Le deuxième scénario consiste à considérer des besoins inégaux pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment 3.

### 7.2.1 Paramètres de la simulation

Dans l’étude de faisabilité, AGT (2018a) a supposé des demandes énergétiques égales pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment 3. Cependant, ce bâtiment abrite des bureaux ainsi que des espaces de commerce et de restauration. De plus, il possède une surface vitrée relativement importante. Typiquement, pour ce type de bâtiments, les besoins de refroidissement sont supérieurs aux besoins de chauffage.

Ainsi, dans le scénario 2, l'ensemble des paramètres des 3 systèmes géothermiques sont identiques à ceux du scénario de référence, à l'exception de la demande énergétique à couvrir par l'installation du bâtiment 3 pour son refroidissement. Celle-ci est considérée 50 % supérieure à sa demande pour le chauffage, et s'élève donc à 1850 MWh/an. Ainsi, les puissances à fournir par son système géothermique sont les suivantes :

- 427 kW du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre pour le refroidissement ;
- 286 kW du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars pour le chauffage.

## 7.2.2 Résultats

Seuls les paramètres du système géothermique du bâtiment 3 ayant été modifiés par rapport au scénario de référence, la période simulée dans le scénario 2 débute le 1<sup>er</sup> avril 2020. En effet, avant cette date, uniquement les installations des bâtiments 1 et 2 fonctionnent, et les conditions de la simulation sont donc identiques à celles du scénario 1. Les conditions initiales imposées au modèle correspondent donc au niveau piézométrique ainsi qu'à la température dans l'ensemble des couches juste avant le début du fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3 dans le scénario 1. De plus, comme pour ce dernier, la période simulée s'étend jusqu'au 1<sup>er</sup> avril 2040.

### 7.2.2.1 Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques

Tout d'abord, les Figures 7.13 et 7.14 présentent l'évolution de la température moyenne au sein des puits des bâtiments 1 et 2 respectivement.

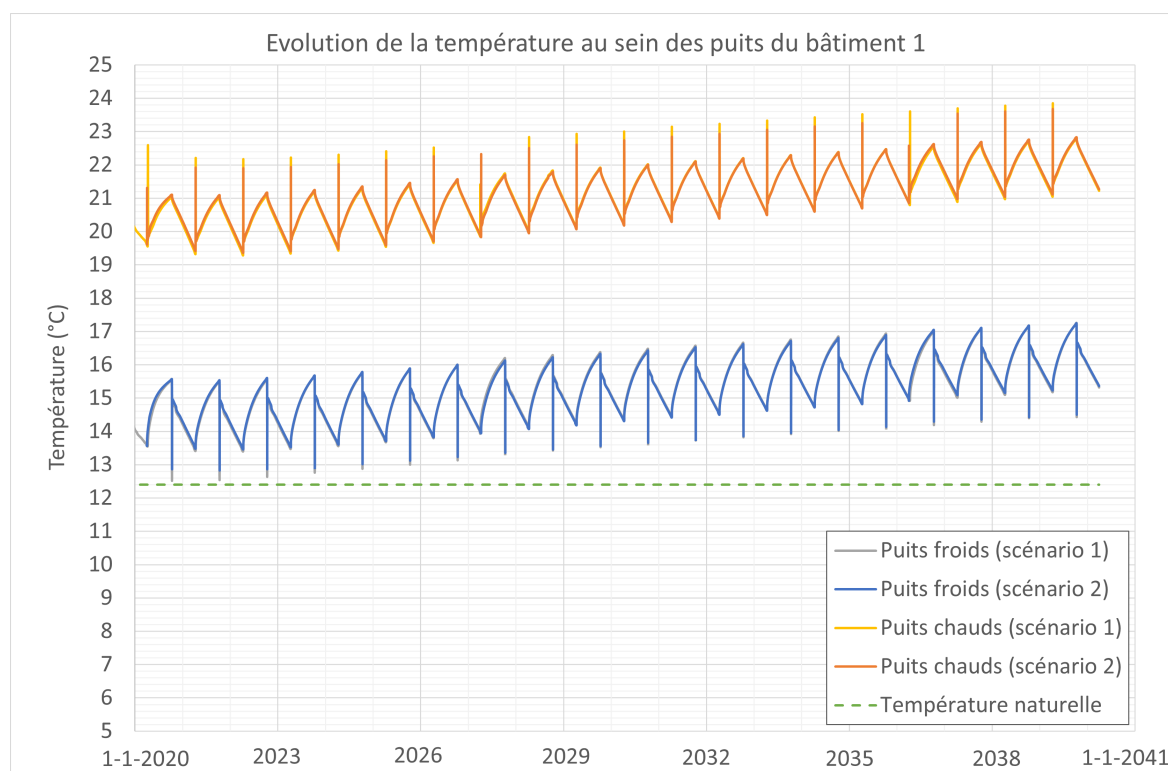


FIGURE 7.13 – Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1.

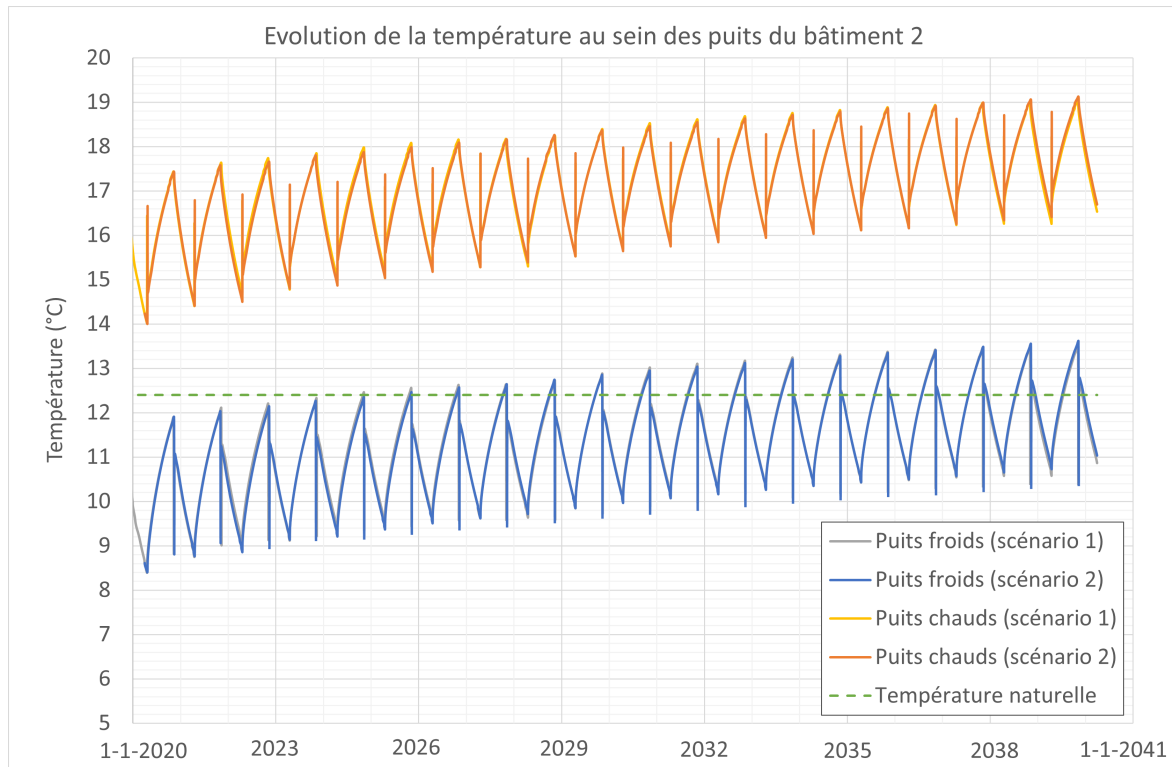


FIGURE 7.14 – Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2.

Ainsi, l'augmentation de 50 % du besoin en refroidissement du bâtiment 3 pour un besoin en chauffage inchangé n'a aucun impact sur la température des puits des bâtiments 1 et 2. L'efficacité des 2 systèmes géothermiques est donc inchangée par ce changement de paramètre.

Ensuite, la Figure 7.15 présente l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3. D'une part, l'amplitude des variations de la température dans ses puits chauds diminue avec le temps, alors que leur température maximale croît jusqu'à tendre vers la température de réinjection (18 °C). D'autre part, les puits froids voient leur température ainsi que l'amplitude des variations augmenter au cours du temps. Cela témoigne d'une réserve de froid qui diminue au fur et à mesure des saisons, alors que la réserve de chaleur est de plus en plus importante. A partir de 2033, la température dans les puits froids est supérieure à la température naturelle de l'aquifère en fin de saison de refroidissement.

Ainsi, dans le scénario 2, le système géothermique du bâtiment 3 n'est pas profitable à long terme. En effet, il ne parvient pas à maintenir une réserve de froid suffisante pour subsister tout au long de la saison chaude. Le besoin en refroidissement du bâtiment est largement supérieur à son besoin en chauffage. Les volumes d'injection ne sont donc pas équilibrés, avec plus d'eau réintroduite dans les puits chauds que dans les puits froids. Le panache de chaleur autour des puits chauds s'étend donc de plus en plus, jusqu'à atteindre ses puits froids. Sa progression est néanmoins ralentie par la température de réinjection constante à 7 °C dans les puits froids, par rapport à une situation dans laquelle elle serait définie selon un  $\Delta T$  constant.

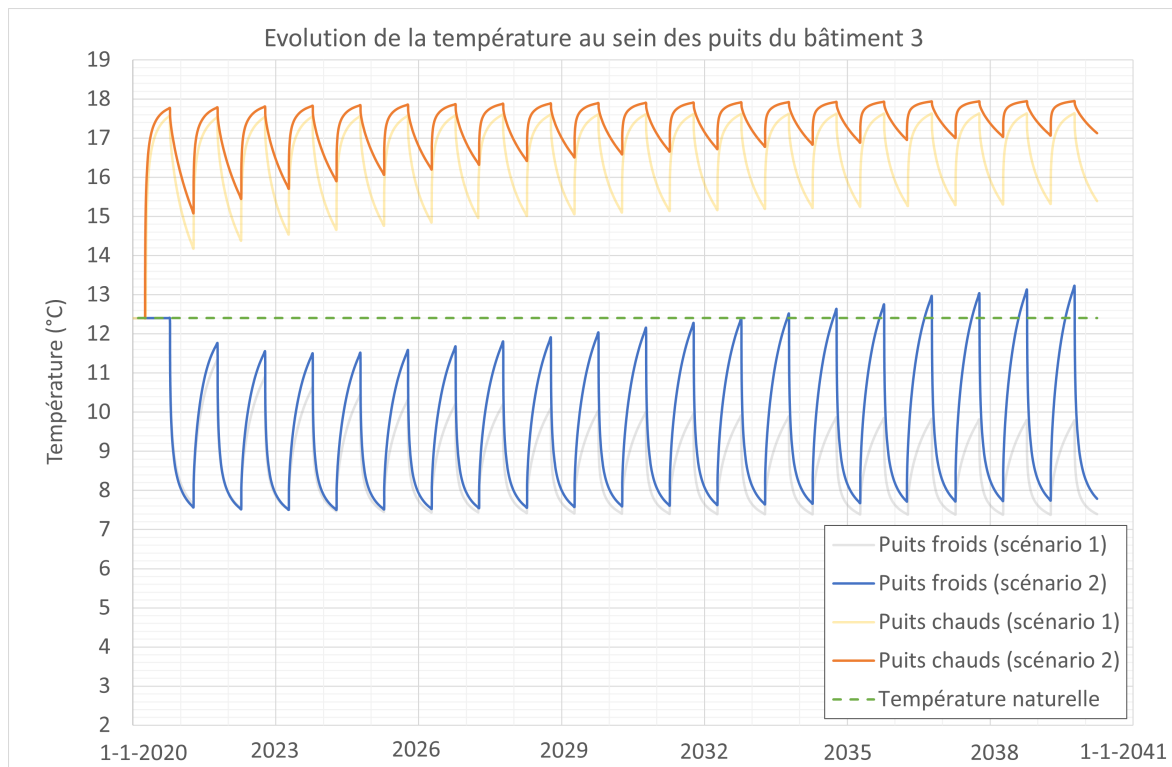


FIGURE 7.15 – Scénario 2 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3.

#### 7.2.2.2 Évolution des panaches de chaleur dans l’aquifère des sables du Landénien et l’aquifère du socle paléozoïque

La Figure 7.16 présente la température dans l’aquifère des sables du Landénien et dans l’aquifère du socle paléozoïque le 1<sup>er</sup> avril 2021, soit un an après la mise en fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3.

Dans le socle, les panaches de chaleur autour des puits chauds du bâtiment 3 sont plus larges qu’à la même date dans le scénario 1, et leur température moyenne est plus élevée. L’augmentation de 50 % de la demande énergétique de refroidissement du bâtiment 3 a entraîné des volumes injectés dans les puits chauds environ 1.5 fois plus élevés que dans le scénario 1 durant la première saison de refroidissement. En effet, l’eau était extraite des puits froids à la température initiale de l’aquifère, et réinjectée à 18 °C. Le  $\Delta T$  lors de la première saison chaude est donc identique dans les deux scénarios, alors que la puissance à extraire du sol est environ 1.5 fois plus importante dans le scénario 2. Le débit d’extraction et d’injection, et par conséquent le volume puisque les saisons sont identiques, est donc également multiplié par approximativement 1.5. Une réserve plus importante de chaleur a donc été créée dans le scénario 2 que dans le scénario 1. Concernant la réserve de froid, elle est identique dans les deux configurations.

Dans l’aquifère du Landénien, un faible panache de chaleur s’est formé au-dessus d’un des puits chauds du bâtiment 3. L’installation géothermique du bâtiment 3 a donc un impact plus rapide sur la température dans le Landénien dans le scénario 2 que dans le scénario 1.

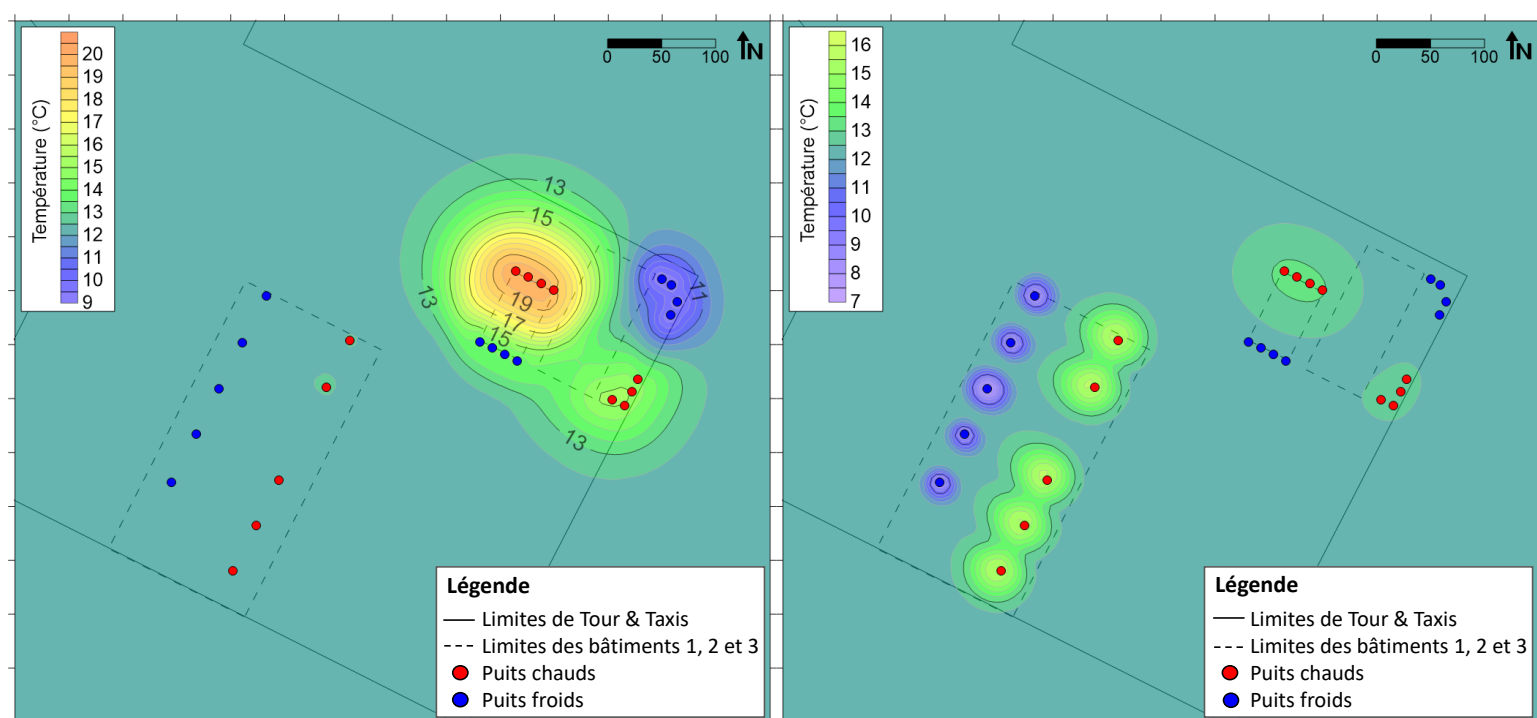


FIGURE 7.16 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2021.

Au fur et à mesure des années, le panache de chaleur autour des puits chauds du bâtiment 3 continue de s’étendre dans le socle et à s’approcher de ses puits froids. La réinjection à 7 °C dans ceux-ci assure néanmoins la reconstitution d’une faible réserve de froid à la fin de chaque saison de chauffage, mais cette réserve reste localisée autour des puits froids.

Les panaches de chaleur au-dessus des puits chauds du bâtiment 3 s’étendent également de plus en plus dans le Landénien, sans avoir d’effet sur la température dans les puits des bâtiments 1 et 2.

A titre d’exemple, les Figures 7.17 et 7.18 présentent la température dans l’aquifère du Landénien et dans l’aquifère du socle le 1<sup>er</sup> octobre 2024 et le 1<sup>er</sup> avril 2025 respectivement.

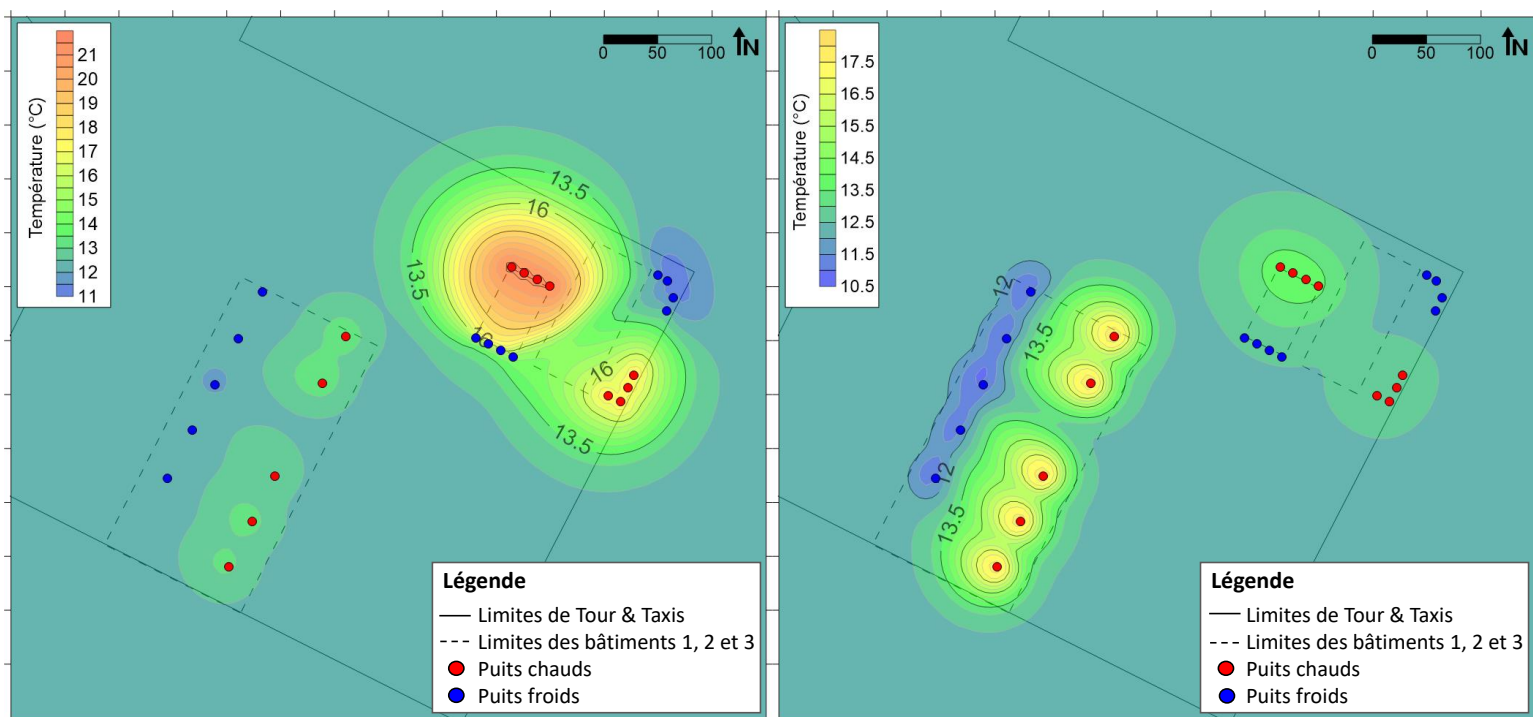


FIGURE 7.17 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2024.

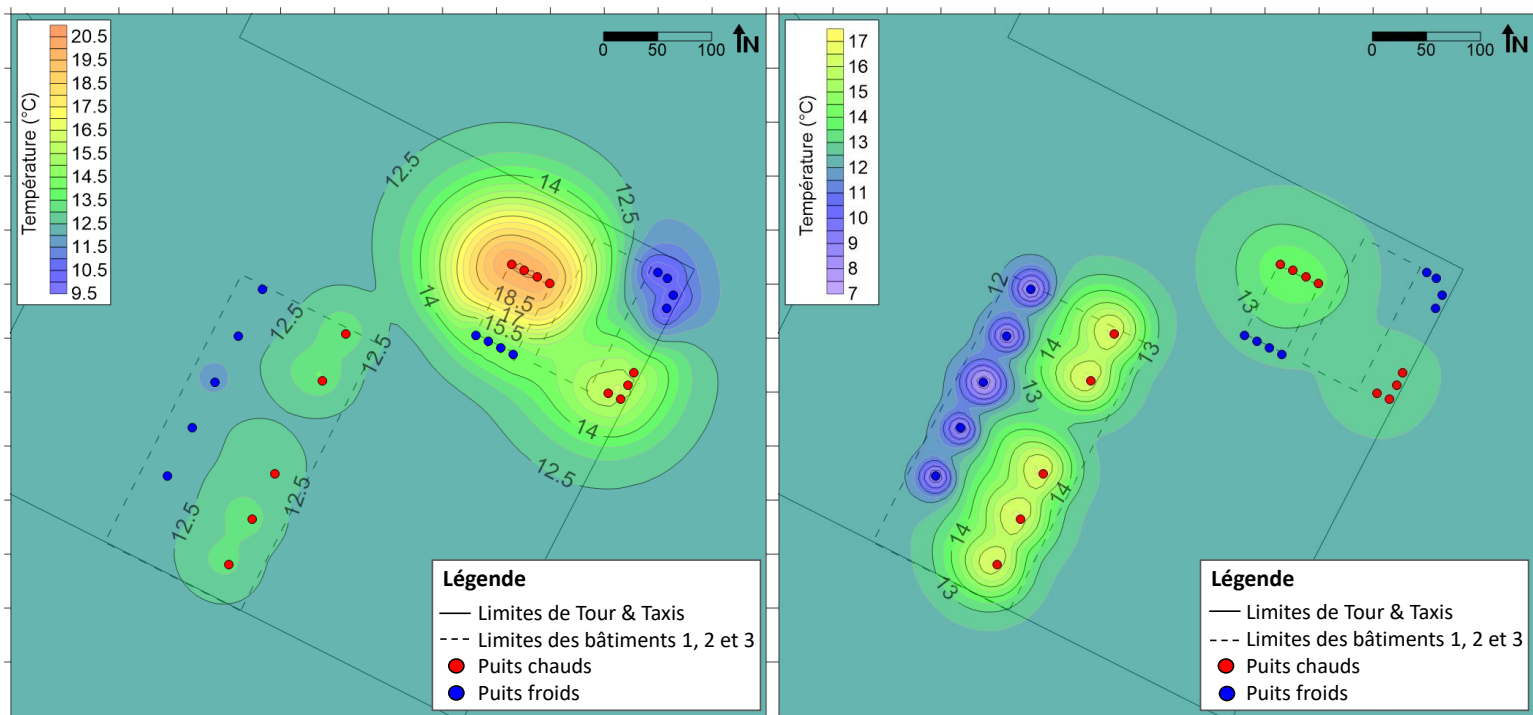


FIGURE 7.18 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2025.

Ensuite, la Figure 7.19 montre quant à elle la température dans l’aquifère du Landénien et dans l’aquifère du socle le 1<sup>er</sup> octobre 2034.

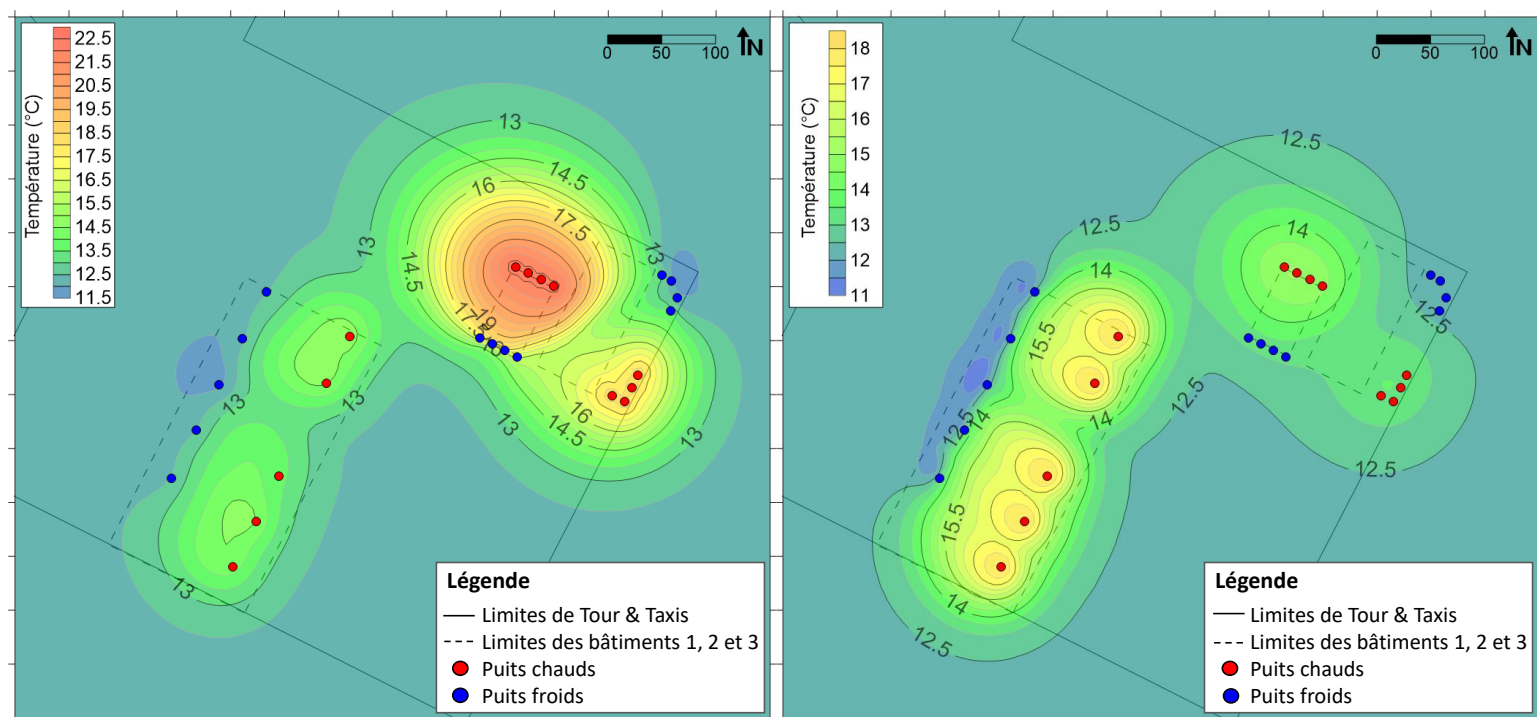


FIGURE 7.19 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2034.

A la fin de la 15<sup>e</sup> saison de refroidissement, le panache de chaleur autour des puits chauds du bâtiment 3 s’est étendu jusqu’à ses puits froids. Ainsi, le système est devenu contre-productif. A partir de ce moment, jusqu’à la fin de la période simulée, la température dans les puits froids du bâtiment 3 devient supérieure à celle de l’aquifère à la fin de chaque saison chaude. Si la simulation avait été réalisée sur une période plus longue, en considérant les mêmes paramètres, ce phénomène continuerait à être observé et ce, de plus en plus tôt dans la saison de refroidissement. Un faible panache de froid subsiste cependant, en aval des puits froids, dans la direction de l’écoulement naturel de l’aquifère.

Finalement, les Figures 7.20 et 7.21 présentent la température dans l’aquifère des sables du Landénien et dans l’aquifère du socle paléozoïque le 1<sup>er</sup> octobre 2039 et le 1<sup>er</sup> avril 2040 respectivement. Après 20 ans de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3, des panaches de chaleur importants dus à son utilisation sont présents aussi bien dans l’aquifère du socle que dans l’aquifère du Landénien. Ces panaches sont en contact avec ceux engendrés par les systèmes géothermiques des bâtiments 1 et 2. Néanmoins, le panache de chaleur provoqué par l’installation du bâtiment 3 ne s’est pas étendu de manière suffisante à impacter l’efficacité des systèmes des bâtiments 1 et 2. De plus, un très faible panache de froid est observé dans le Landénien à proximité de la position des puits froids du bâtiment 3 dans le socle. Ce panache de froid ne parvient pas à s’étendre dans le Landénien, car il n’y parvient pas réellement non plus dans le socle.

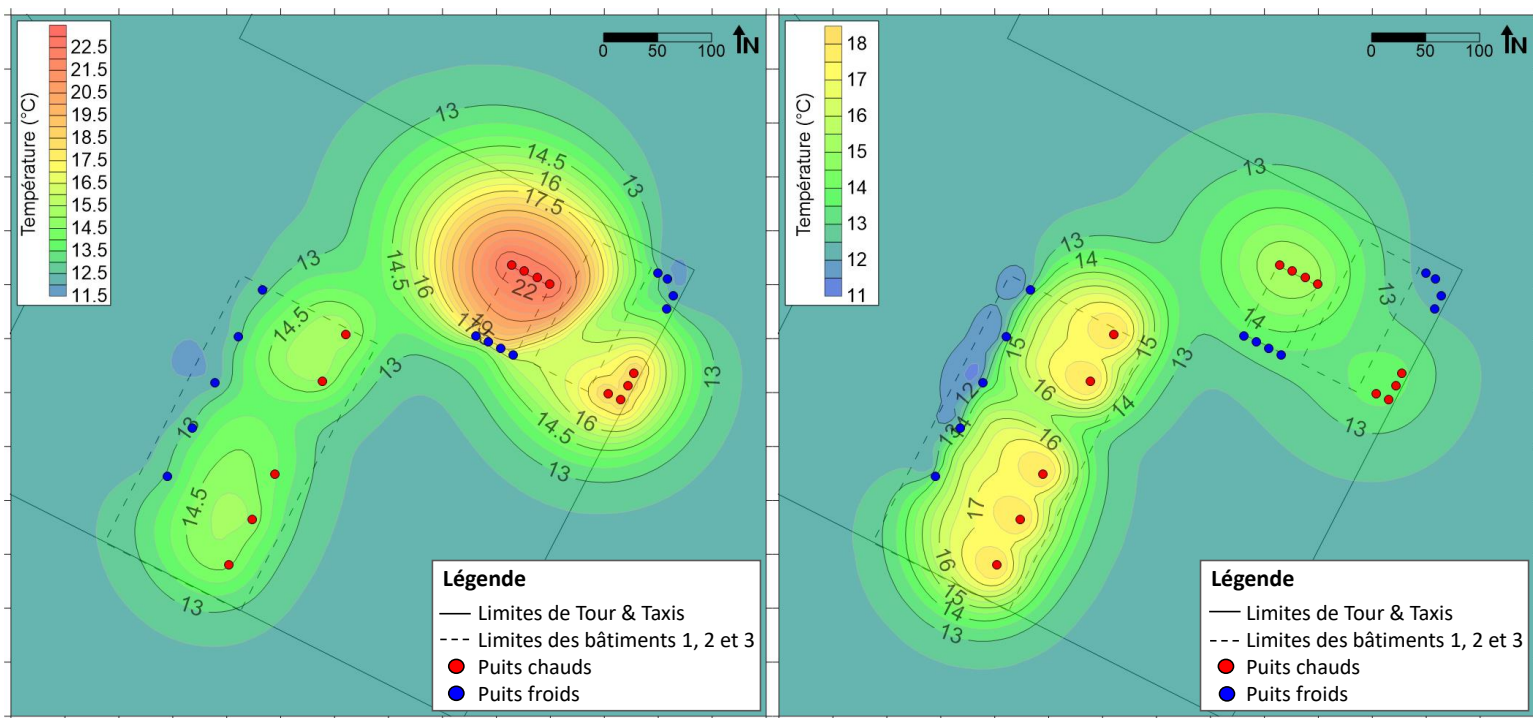


FIGURE 7.20 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2039.

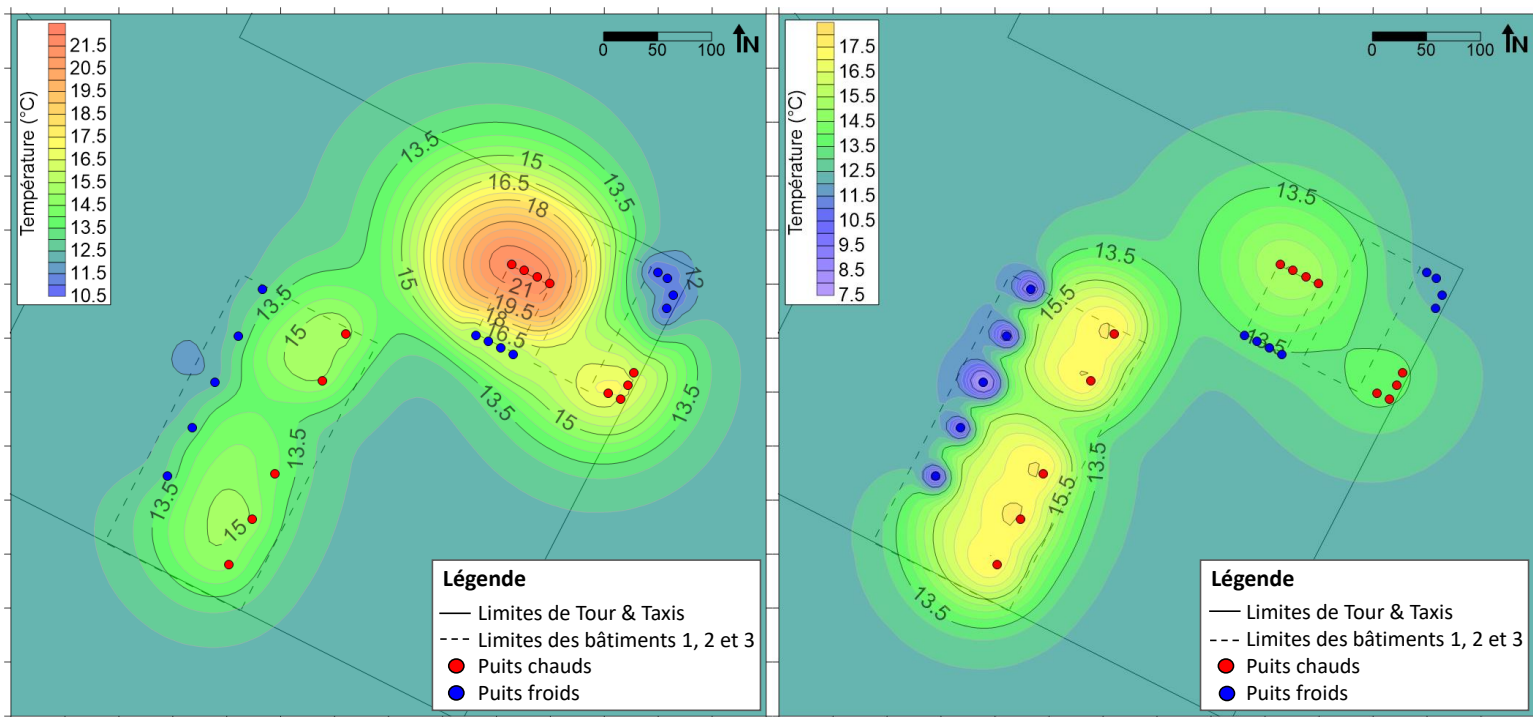


FIGURE 7.21 – Scénario 2 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2040.

## 7.3 Scénario 3 : $\Delta T$ constant pour le système géothermique du bâtiment 3

Le scénario 3 consiste à considérer un  $\Delta T$  constant pour le système géothermique du bâtiment 3, et non des températures d'injection constantes.

### 7.3.1 Paramètres de la simulation

Des températures d'injection constantes pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment 3 de 7 °C et 18 °C ont été considérées par AGT (2018a) dans l'étude de faisabilité. Néanmoins, imposer un  $\Delta T$  constant est un scénario plus classique, généralement plus représentatif de l'utilisation pratique d'un système géothermique ouvert. Habituellement, sa valeur est située aux alentours de 6 °C.

Ainsi, dans le scénario 3, les seuls paramètres qui diffèrent du scénario de référence sont les températures d'injection du système géothermique du bâtiment 3. Elles ne sont plus constantes, mais définies selon un  $\Delta T$  constant de 6 °C tout au long de la simulation.

### 7.3.2 Résultats

Comme pour le scénario 2, la simulation est exécutée à partir du 1<sup>er</sup> avril 2020 jusqu'au 1<sup>er</sup> avril 2040. Les conditions initiales imposées à chaque couche du modèle sont, à nouveau, leur hauteur piézométrique ainsi que leur température juste avant la mise en fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3 dans le scénario de référence.

#### 7.3.2.1 Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques

Tout d'abord, la Figure 7.22 présente l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1. Initialement, définir la température d'injection dans les puits du bâtiment 3 selon un  $\Delta T$  constant de 6 °C n'a pas d'impact sur la température dans les puits du bâtiment 1. Néanmoins, à moyen terme, après environ 17 ans de fonctionnement du système du bâtiment 3, cela entraîne une faible augmentation de la température dans les puits du bâtiment 1. L'installation, déjà contre-productive dans le scénario 1 car elle ne parvenait pas à créer une réserve de froid, devient encore moins profitable. En effet, ses puits froids voient leur température croître par rapport au scénario de référence.

Ensuite, la Figure 7.23 montre l'évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2. Elle est légèrement inférieure à celle du scénario de référence. Ainsi, définir la température de réinjection du bâtiment 3 selon un  $\Delta T$  de 6 °C est bénéfique pour l'installation du bâtiment 2. Néanmoins, cette influence est faible et le système demeure non profitable, car il ne parvient toujours pas à créer une ressource de froid suffisante pour toute la saison de refroidissement.

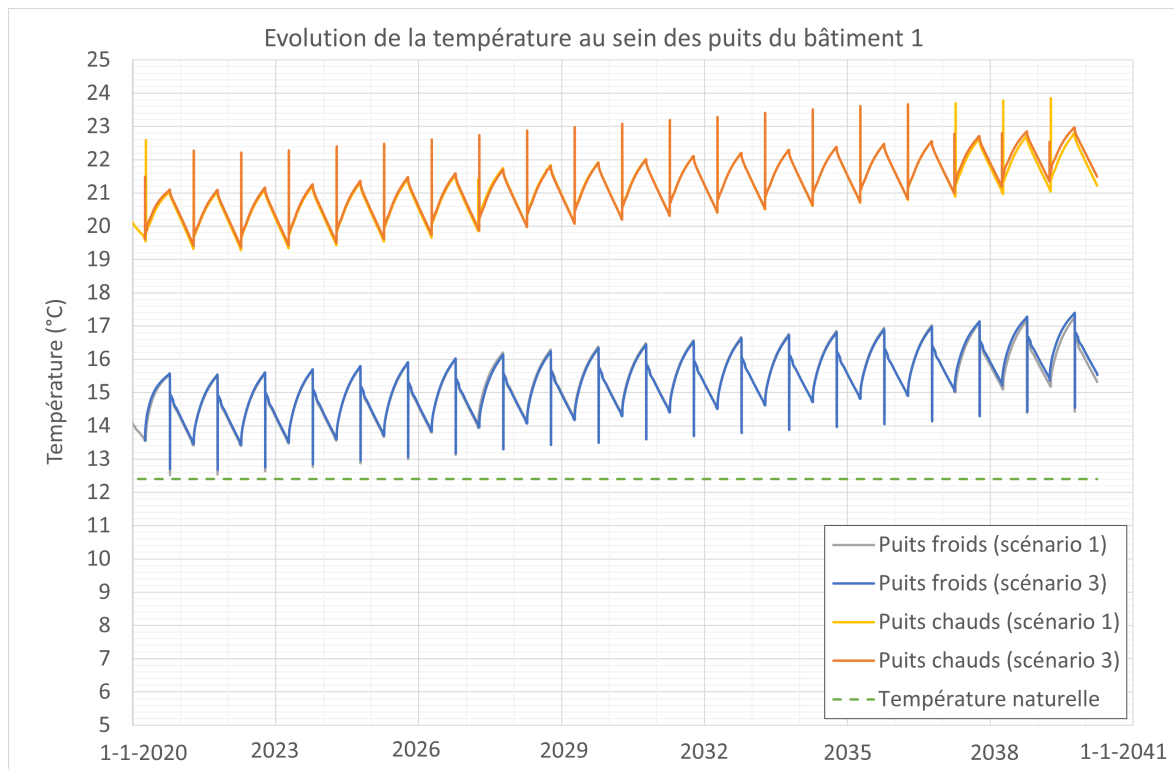


FIGURE 7.22 – Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1.

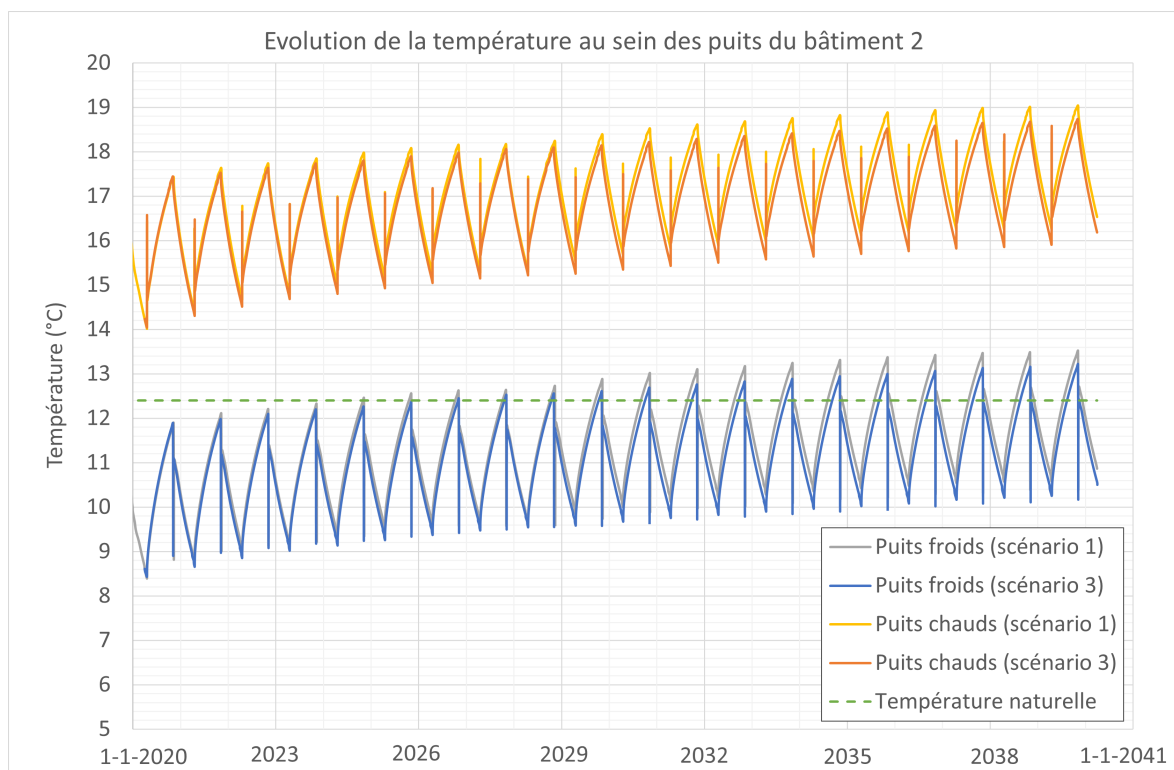


FIGURE 7.23 – Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2.

De plus, l'évolution de la température moyenne au sein des puits du système géo-

thermique du bâtiment 3 est présentée à la Figure 7.24. Dans ce scénario, le système géothermique du bâtiment 3 est profitable, puisqu'il parvient à engendrer une réserve de froid ainsi qu'une réserve de chaud, et à les maintenir au cours du temps.

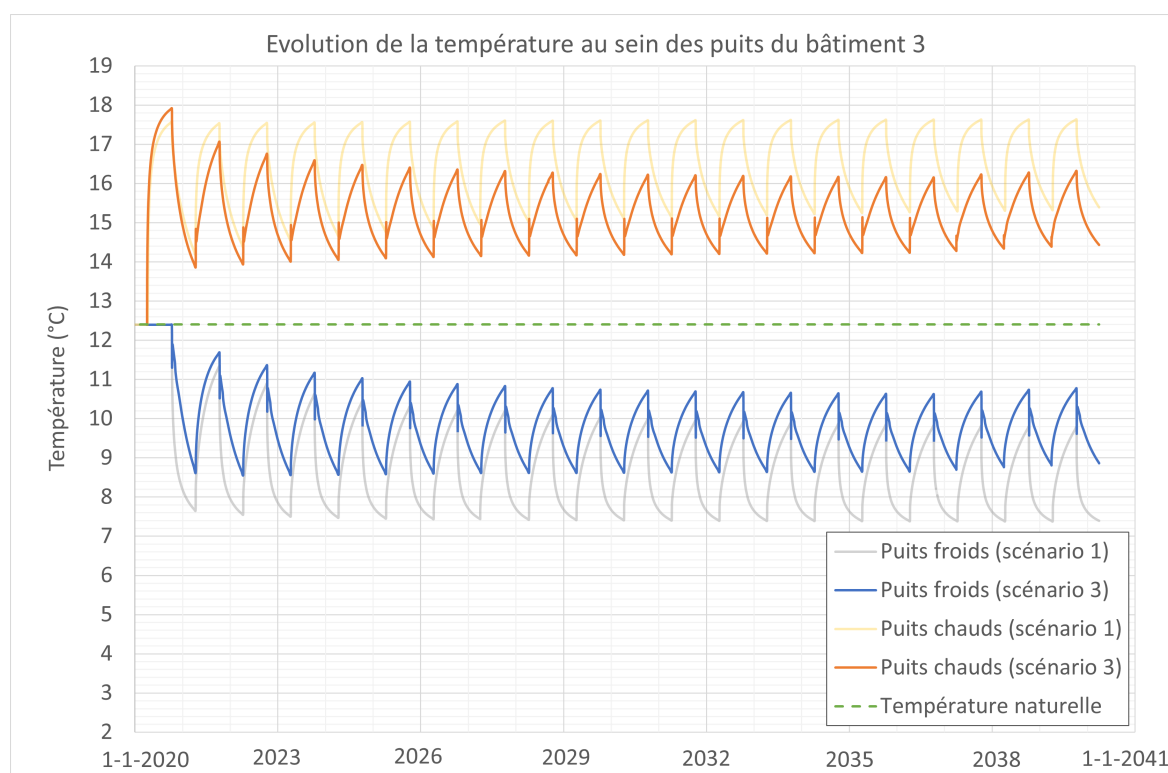


FIGURE 7.24 – Scénario 3 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3.

Lors de la première saison chaude, l'eau est extraite des puits froids, à la température naturelle de l'aquifère (12.4 °C). Elle est donc réinjectée dans les puits chauds avec un  $\Delta T$  de 6 °C, soit à 18.4 °C. Ensuite, au changement de saison, l'eau est pompée dans les puits chauds, dont la température moyenne avoisine 18 °C, et réintroduite dans les puits froids à une température approximative de 12 °C. Au fur et à mesure de la saison, la température moyenne des puits chauds diminue, et de l'eau de plus en plus froide est donc injectée dans les puits froids. Le cycle de pompage et de réinjection s'inverse à nouveau, et l'eau extraite des puits froids possède désormais une température inférieure à celle de l'aquifère. Elle est donc introduite dans les puits chauds à une température inférieure à 18.4 °C, et ainsi de suite. Les extrema de température dans les puits sont ainsi de moins en moins extrêmes, et l'amplitude des variations de température diminue au cours du temps. Après 20 ans de fonctionnement de son système géothermique, la température moyenne dans les puits du bâtiment 3 oscille autour d'environ 9.8 °C pour ses puits froids, et 15.4 °C pour ses puits chauds.

Le système est cependant moins efficace dans le scénario 3 que dans le scénario de référence. En effet, dans ce dernier, après 20 ans d'utilisation, la température moyenne dans les puits froids oscille autour de 8.5 °C environ, et autour d'approximativement 16.5 °C dans les puits chauds. Ainsi, le système géothermique tel que dimensionné dans le scénario de référence requiert moins d'énergie que celui du scénario 3 afin

d'amener l'eau extraite à une température suffisamment basse pour le refroidissement du bâtiment, et suffisamment élevée pour son chauffage.

### 7.3.2.2 Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque

Les panaches de chaleur et de froid générés par le système géothermique ouvert du bâtiment 3 dans le scénario 3 se développent de manière très similaire à celle du scénario 1. La température dans le Landénien et dans le socle est présentée aux Figures 7.25, 7.26, 7.27 et 7.28 pour le 1<sup>er</sup> octobre 2024, le 1<sup>er</sup> avril 2025, le 1<sup>er</sup> octobre 2039 et le 1<sup>er</sup> avril 2040 respectivement.

Après 5 ans d'utilisation du système géothermique du bâtiment 3, les panaches de chaleur et de froid dans le socle sont relativement équilibrés. Dans le Landénien, des panaches de chaleur se sont également formés au-dessus des puits chauds du bâtiment 3, ainsi qu'un petit panache de froid au-dessus de son puits froids le moins profond.

Après 20 ans, les panaches de chaleur engendrés par le système géothermique du bâtiment 3 ont fusionné avec celui formé par les installations des bâtiments 1 et 2, aussi bien dans l'aquifère du Landénien que dans l'aquifère du socle. De plus, le panache de froid dans le Landénien créé par les puits froids du bâtiment 3 s'est étendu.

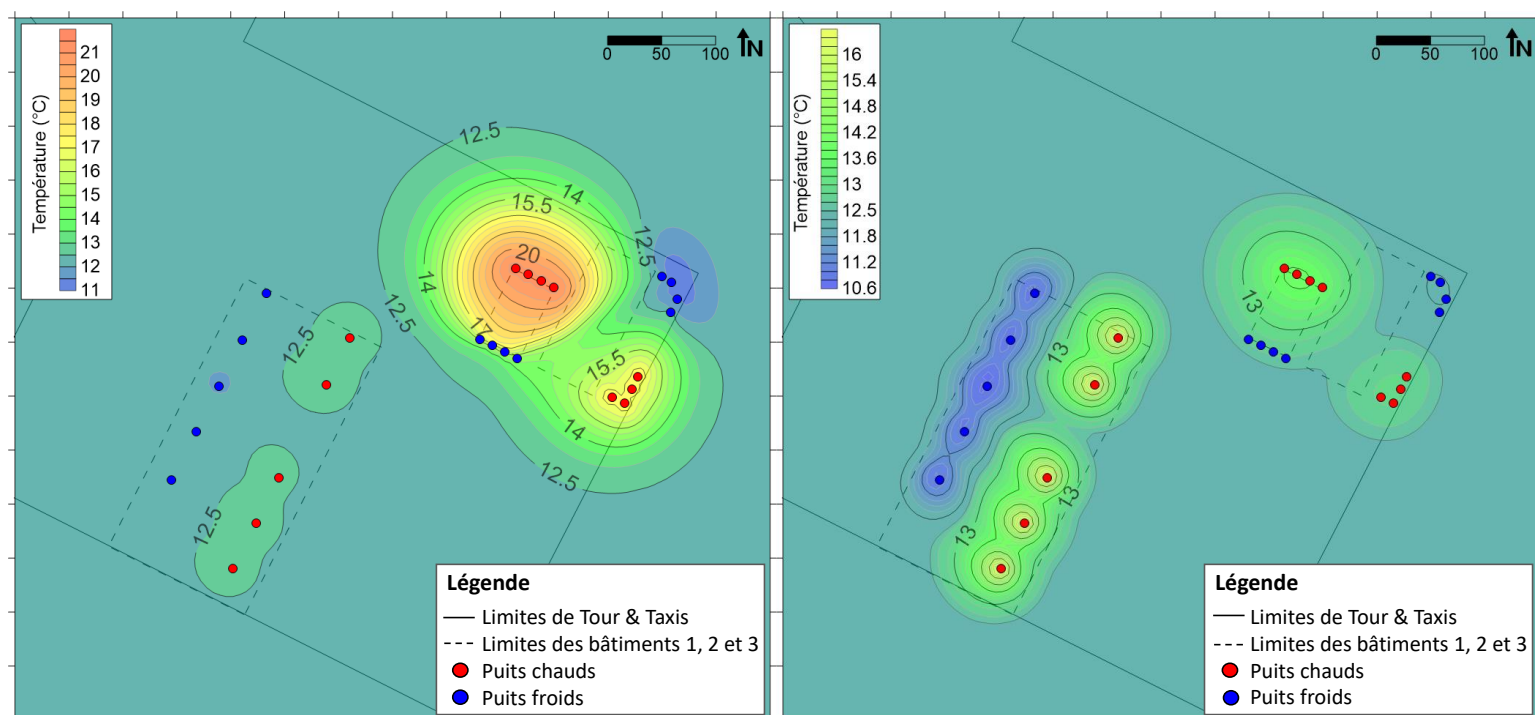


FIGURE 7.25 – Scénario 3 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2024.

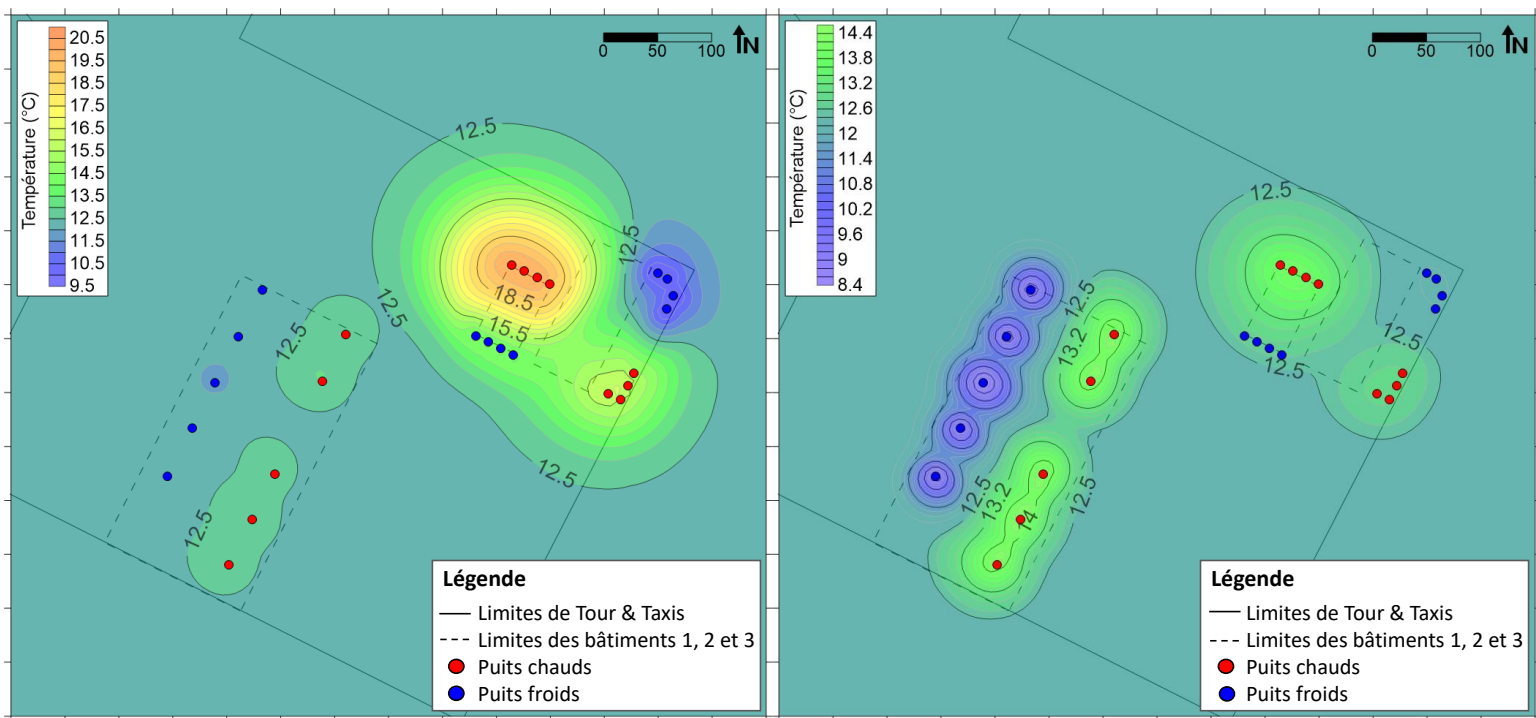


FIGURE 7.26 – Scénario 3 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2025.

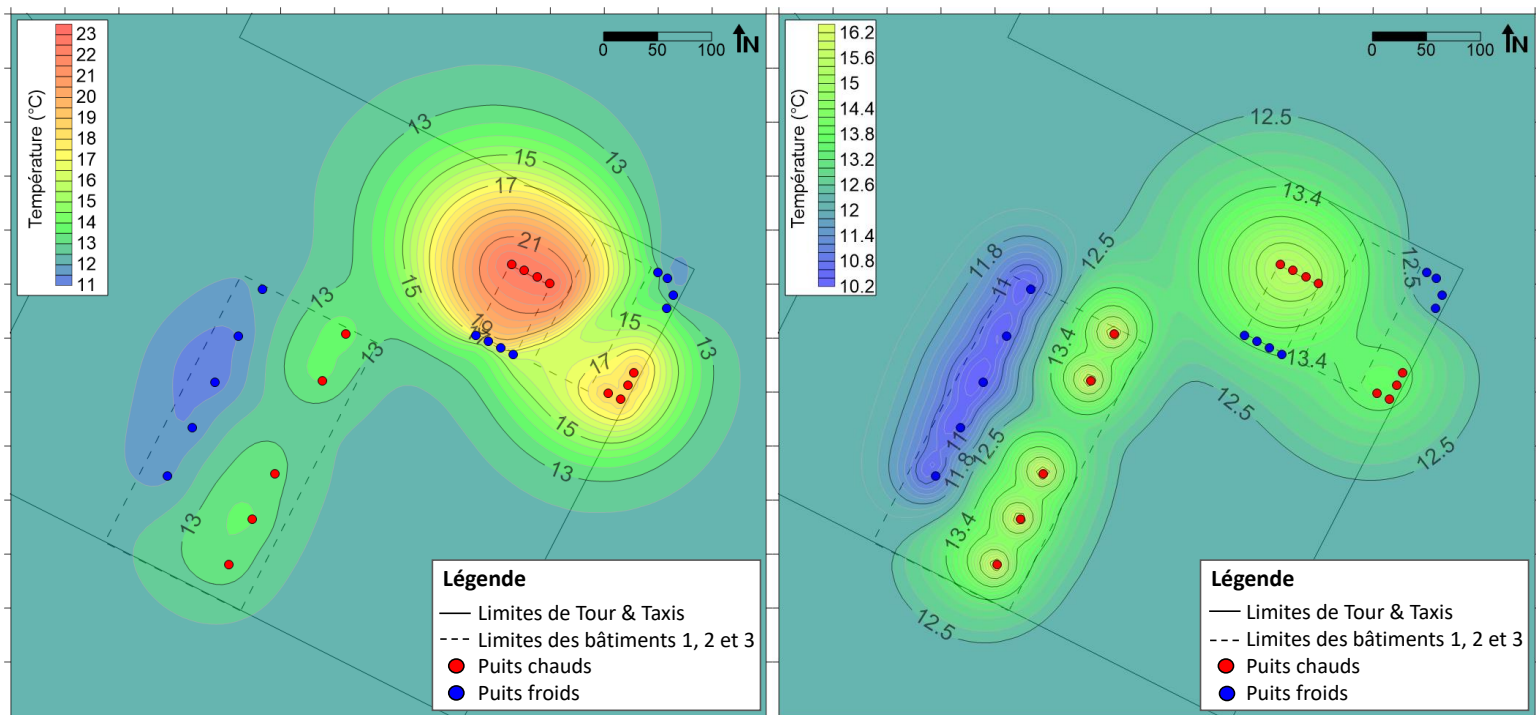


FIGURE 7.27 – Scénario 3 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2039.

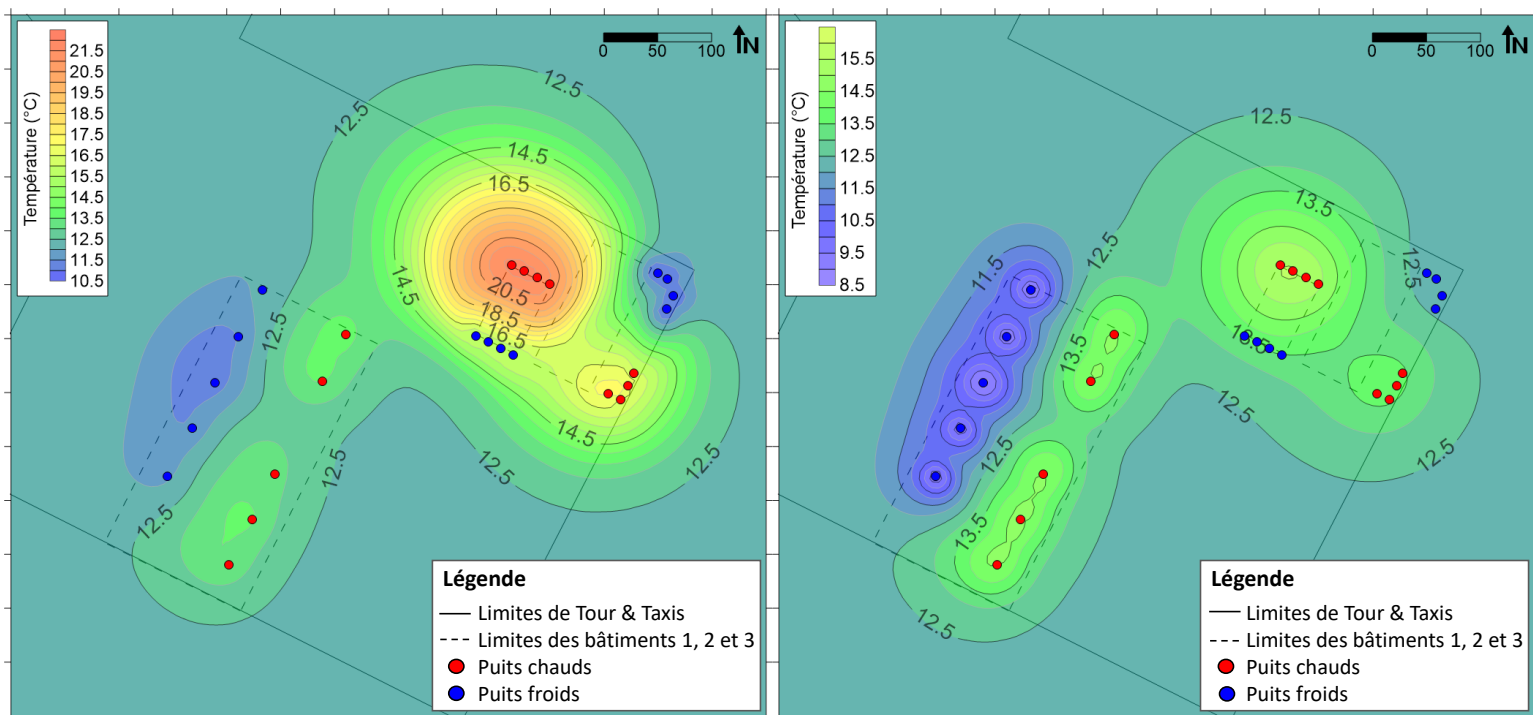


FIGURE 7.28 – Scénario 3 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2040.

## 7.4 Scénario 4 : augmentation de la conductivité thermique de l’aquitard de Gulpen

Le quatrième scénario consiste à augmenter la conductivité thermique de l’aquitard de Gulpen. En effet, les échanges de chaleur entre l’aquifère du Landénien et l’aquifère du socle s’opèrent probablement principalement par conduction thermique.

### 7.4.1 Paramètres de la simulation

Dans le scénario 4, la conductivité thermique de l’aquitard de Gulpen est augmentée de 2 à 3 W/m<sup>2</sup>K.

Concernant les 3 systèmes géothermiques ouverts, leurs paramètres restent donc identiques à ceux du scénario 1 de référence.

### 7.4.2 Résultats

La simulation a été exécutée du 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 1<sup>er</sup> avril 2030.

#### 7.4.2.1 Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques

Tout d’abord, les Figures 7.29, 7.30 et 7.31 présentent l’évolution de la température au sein des puits des bâtiments 1, 2 et 3 respectivement.

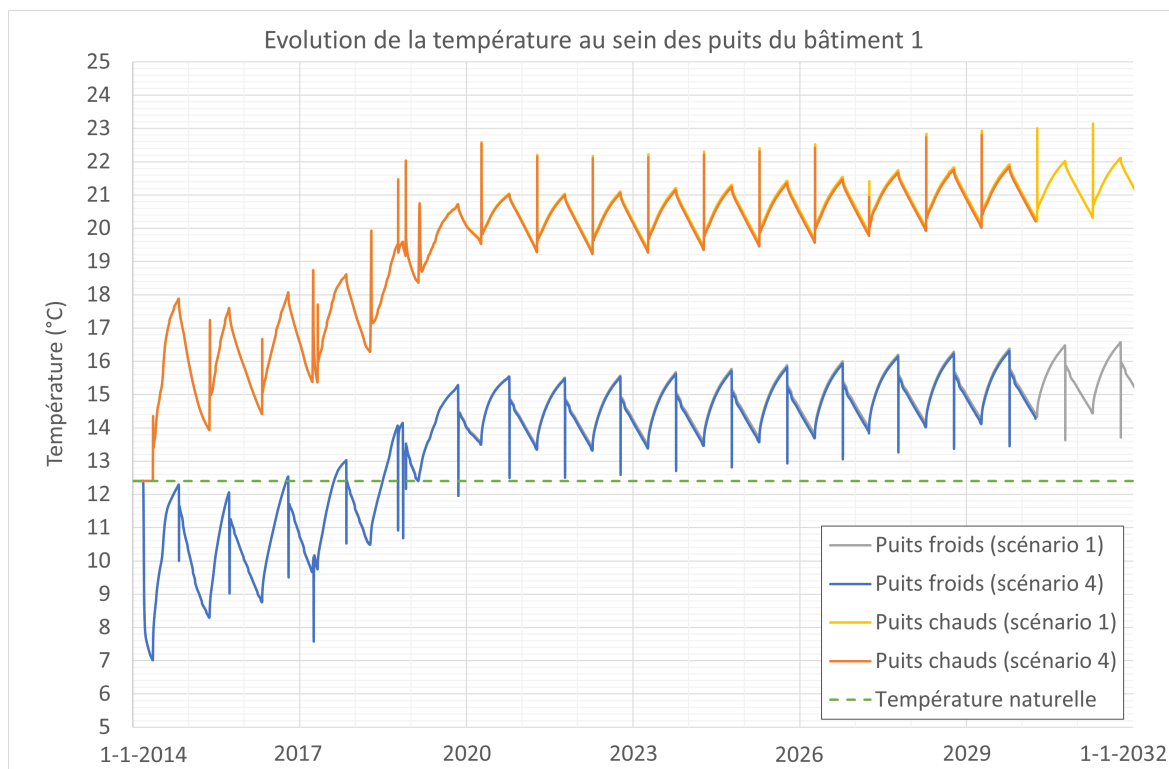


FIGURE 7.29 – Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1.

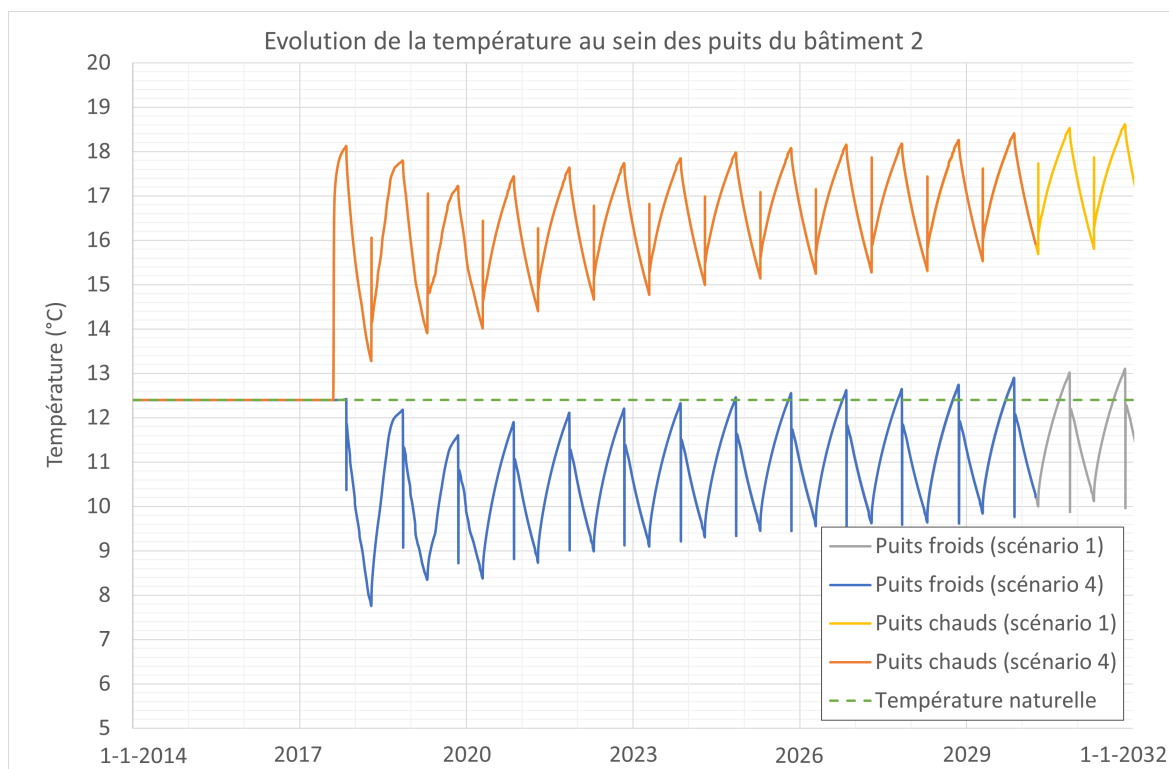


FIGURE 7.30 – Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2.

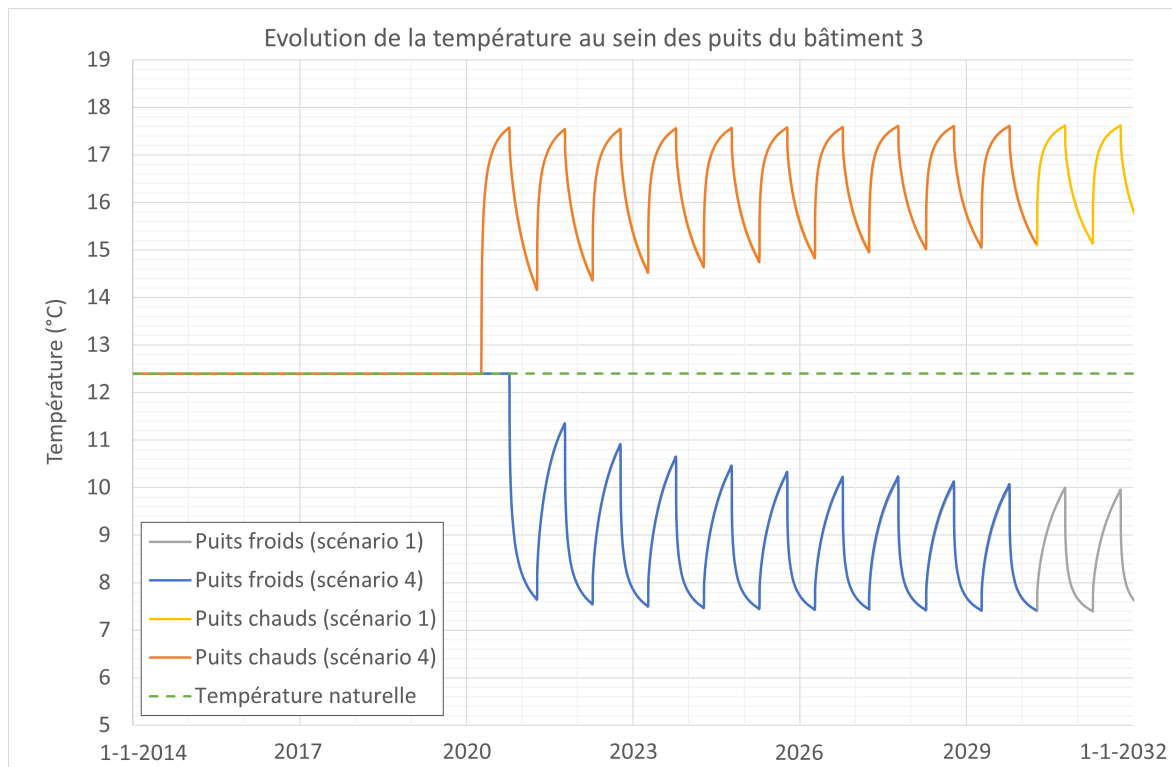


FIGURE 7.31 – Scénario 4 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3.

Sur 10 ans de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3, l'augmentation de la conductivité thermique de l'aquitard séparant les aquifères du Landénien et du socle de 2 à 3 W/m°K n'a aucun impact sur la température dans les puits des 3 bâtiments.

#### 7.4.2.2 Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque

Les panaches de chaleur évoluent de manière semblable à celle du scénario de référence.

D'une part, la Figure 7.32 présente la température dans l'aquifère des sables du Landénien et dans l'aquifère du socle paléozoïque le 1<sup>er</sup> avril 2020, soit juste avant le début du fonctionnement de l'installation du bâtiment 3.

Dans le Landénien, la distribution est identique à celle du scénario 1. En effet, seule la conductivité thermique de l'aquitard ayant été modifiée, la température dans le Landénien avant le lancement du système géothermique exploitant le socle n'est pas influencée par ce changement de paramètre.

Dans le socle, la distribution est très similaire à celle du scénario de référence à la même date. Cependant, la température sous les puits chauds du bâtiment 1 est légèrement plus élevée dans le scénario 4 que dans le scénario 1. En effet, le  $\lambda$  de l'aquitard étant supérieur dans le scénario 4, il est plus conducteur et la chaleur est transmise plus facilement d'un aquifère à l'autre. Cependant, la différence observée reste très faible, de l'ordre de 0.05 °C.

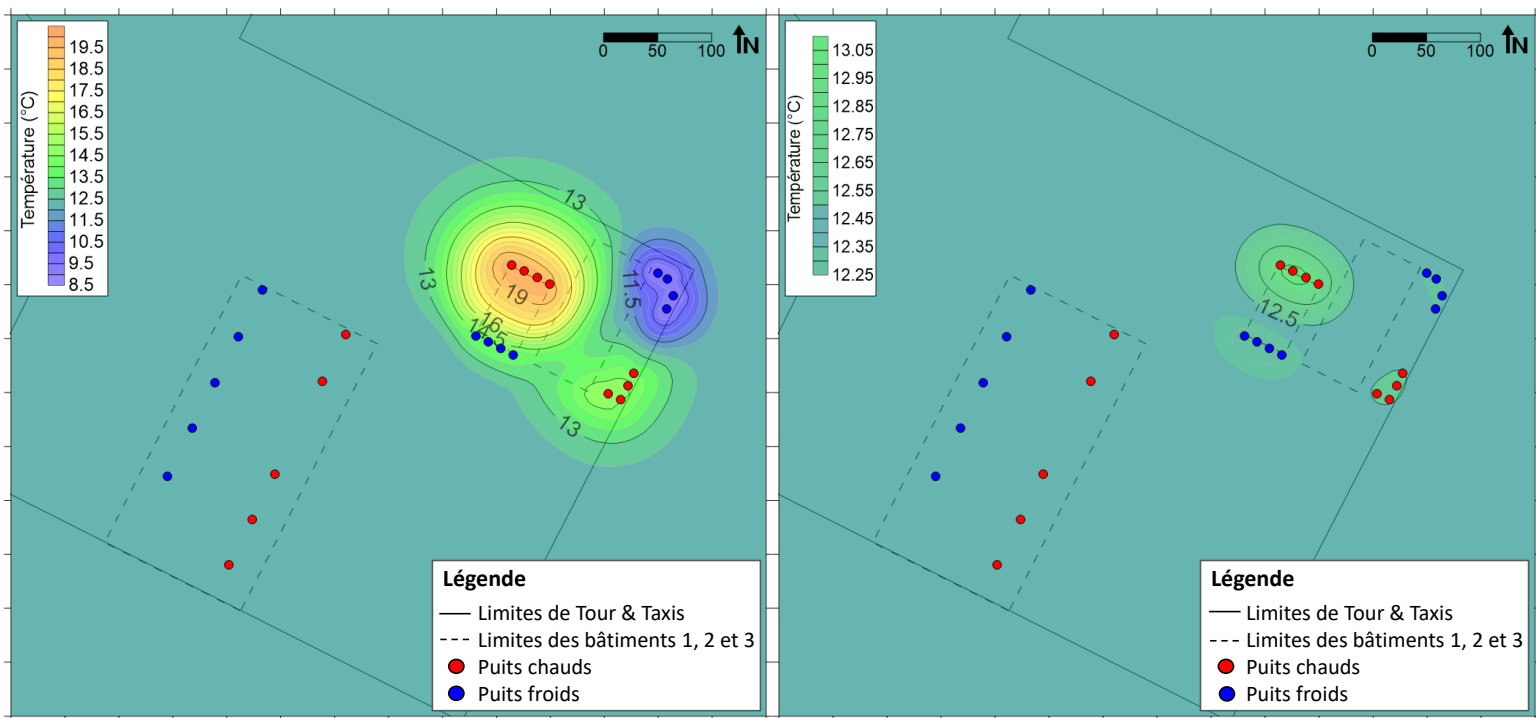


FIGURE 7.32 – Scénario 4 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2020.

Ensuite, au fur et à mesure des saisons, les panaches de chaud et de froid se développent comme dans le scénario de référence. Les Figures 7.33 et 7.34 présentent la température dans le Landénien et le socle le 1<sup>er</sup> octobre 2029 et le 1<sup>er</sup> avril 2030 respectivement, soit après 10 ans de fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3.

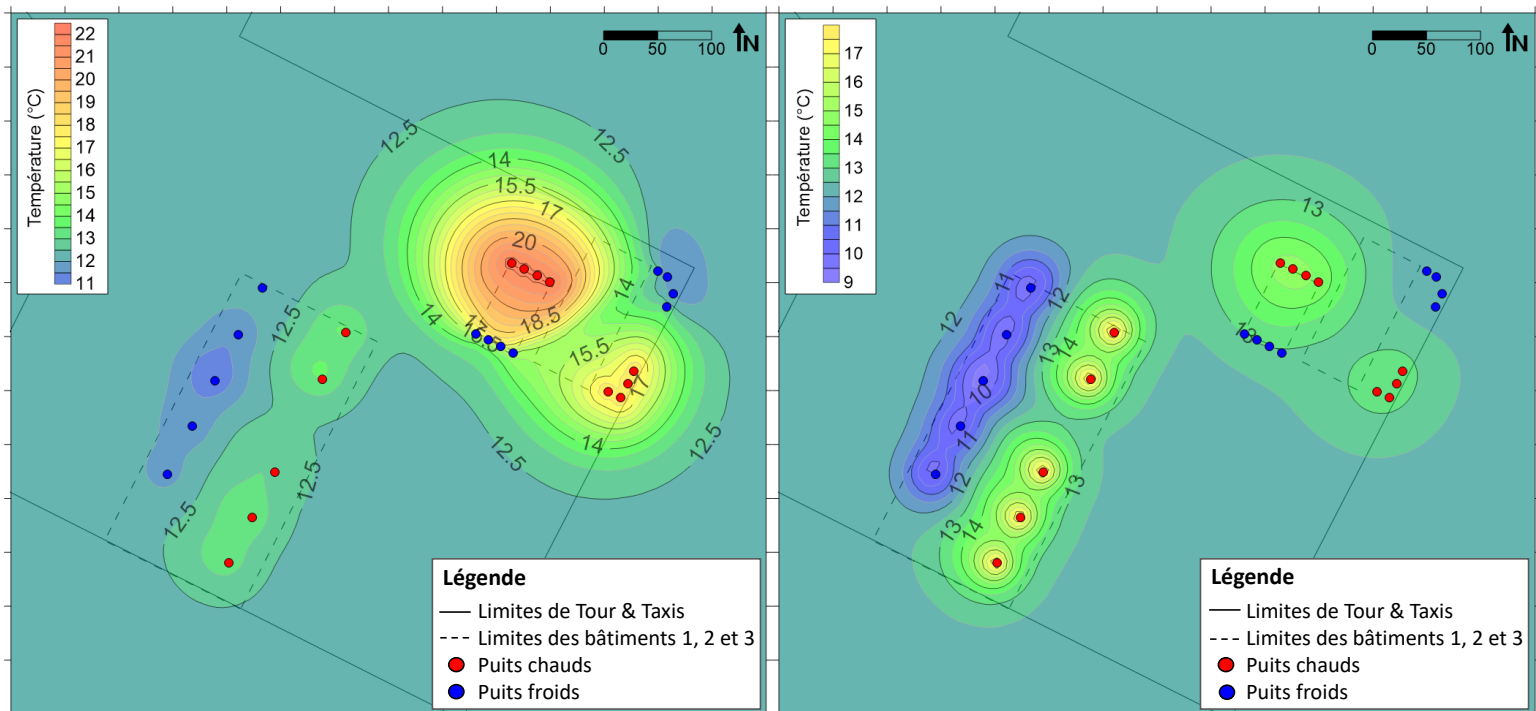


FIGURE 7.33 – Scénario 4 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2029.

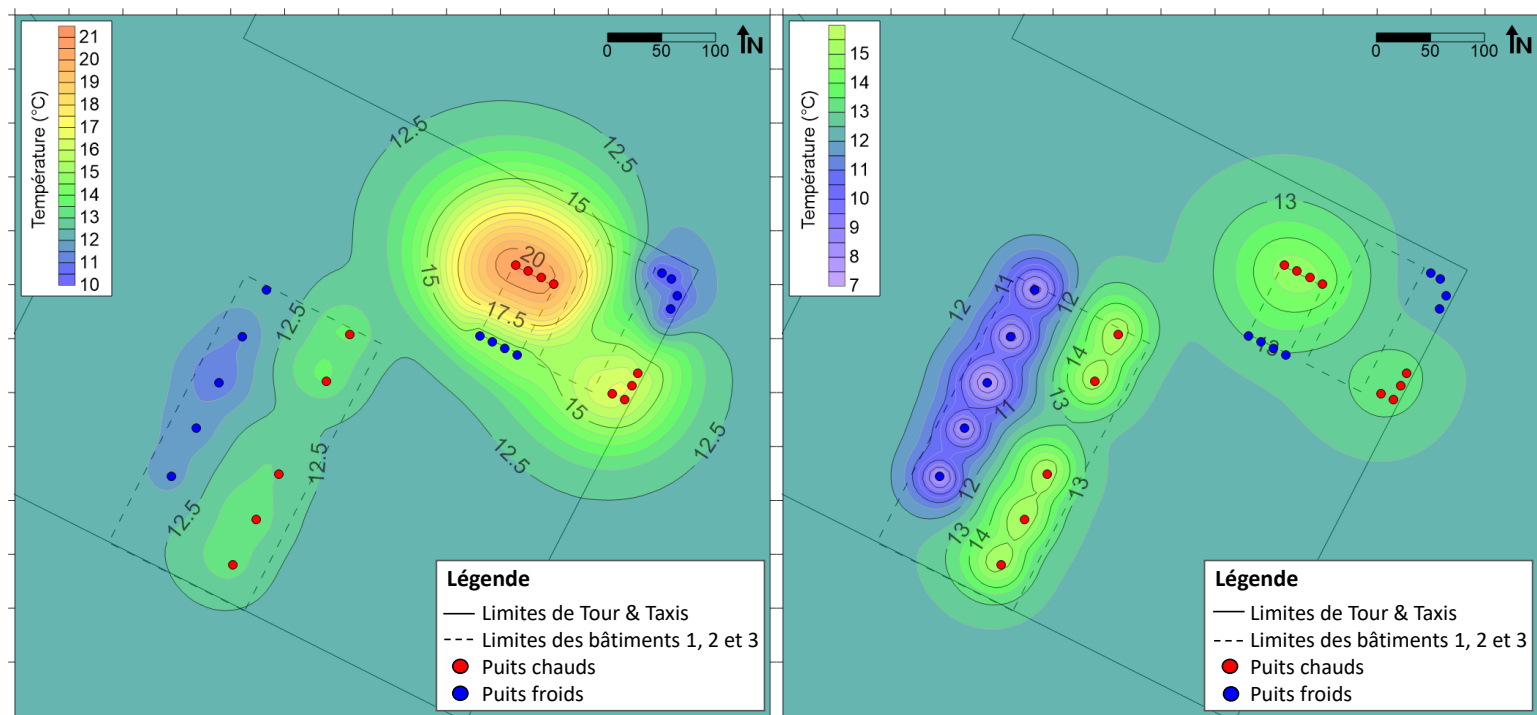


FIGURE 7.34 – Scénario 4 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2030.

Les distributions de température sont très similaires dans les deux aquifères à celles du scénario de référence. Les différences observées sont les températures dans le socle sous les puits chauds des bâtiments 1 et 2, légèrement supérieures dans le scénario 4 à celles dans le scénario 1. De même, les panaches engendrés par le bâtiment 3 dans le Landénien s’étendent légèrement plus que dans le scénario de référence. Néanmoins, ces différences sont très faibles.

## 7.5 Scénario 5 : augmentation de la conductivité hydraulique de l’aquitard de Gulpen

Le cinquième et dernier scénario consiste à augmenter la conductivité hydraulique de l’aquitard de Gulpen séparant les deux aquifères. En effet, il s’agit d’un paramètre pour lequel aucune donnée n’est disponible. Or, une perméabilité supérieure à celle supposée pourrait possiblement causer des interactions plus importantes entre les 3 systèmes géothermiques.

### 7.5.1 Paramètres de la simulation

Dans le scénario 5, la conductivité hydraulique de l’aquitard de Gulpen est multipliée par 4, et passe donc de  $1 \times 10^{-7}$  m/s à  $4 \times 10^{-7}$  m/s. Il s’agit de la valeur la plus élevée de conductivité hydraulique de l’aquitard permettant d’obtenir un modèle d’écoulement en régime permanent qui soit toujours calibré.

L’ensemble des paramètres des 3 systèmes géothermiques ouverts restent donc inchangés par rapport au scénario de référence.

## 7.5.2 Résultats

Comme le scénario 4, le scénario 5 a été simulé du 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 1<sup>er</sup> avril 2030.

### 7.5.2.1 Évolution de la température au sein des puits des 3 systèmes géothermiques

Tout d'abord, les Figures 7.35, 7.36 et 7.37 présentent l'évolution de la température au sein des puits des bâtiments 1, 2 et 3 respectivement.

La multiplication par 4 de la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen n'a pas d'effet sur la température des puits des bâtiments 2 et 3 par rapport au scénario de référence. Concernant le bâtiment 1, ses puits voient leur température diminuer légèrement par rapport au scénario 1 après environ 22 ans de fonctionnement. Cependant, l'impact de cette modification du paramètre reste très faible, et le système demeure non profitable.

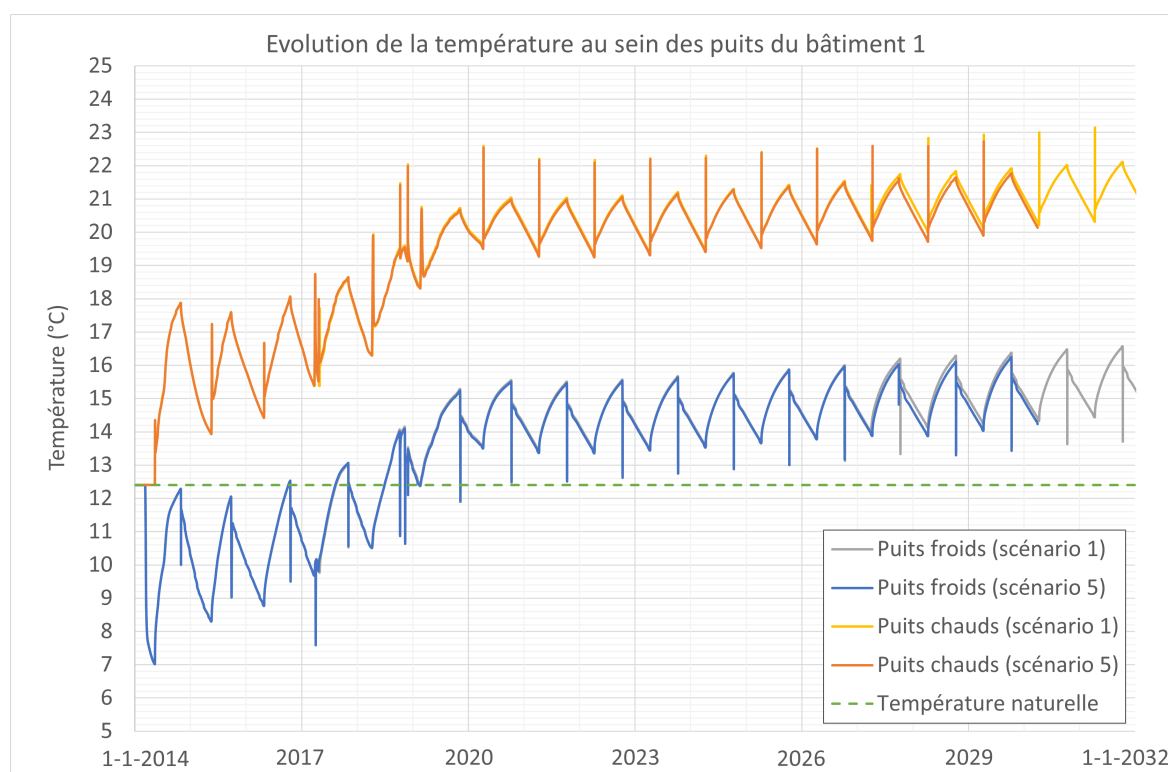


FIGURE 7.35 – Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 1.

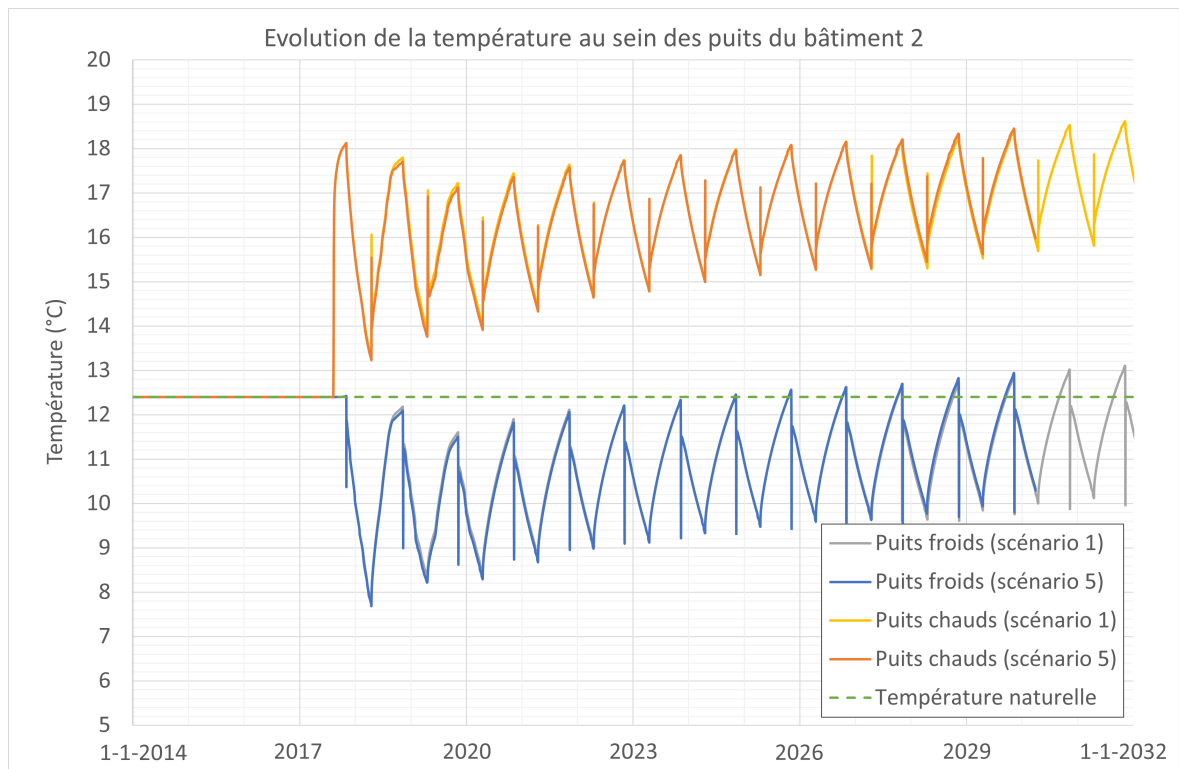


FIGURE 7.36 – Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 2.

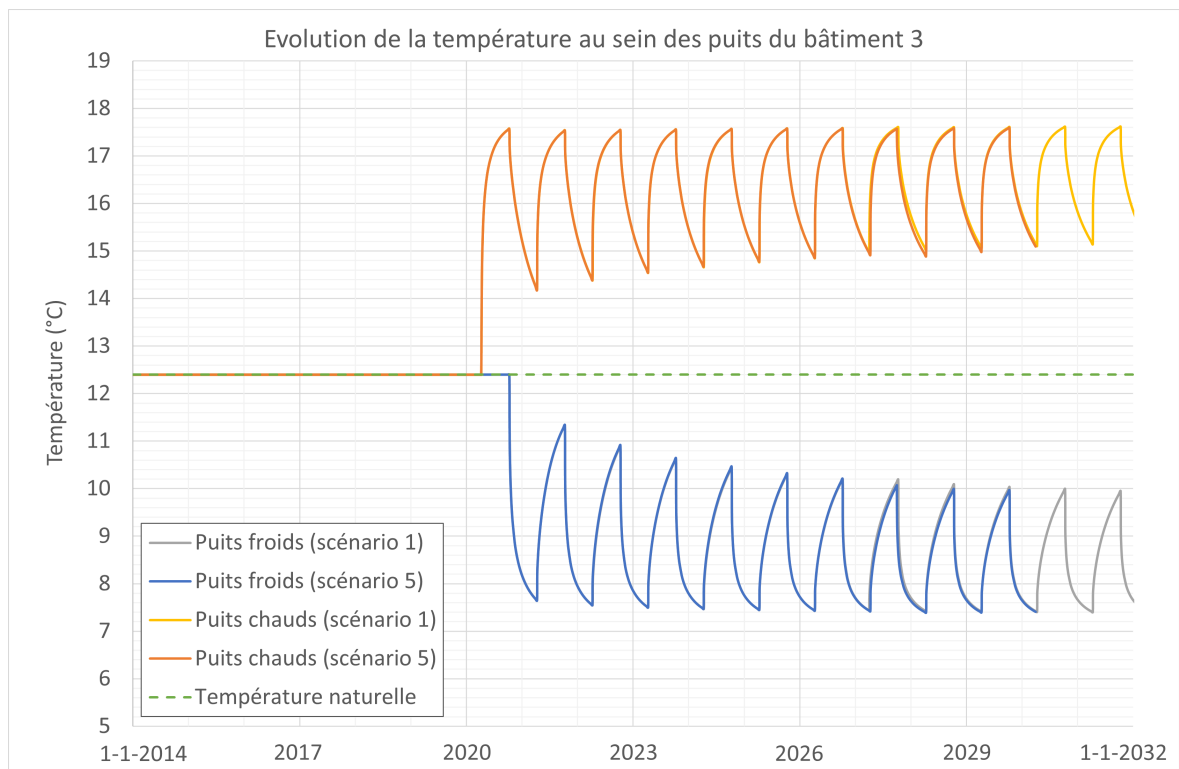


FIGURE 7.37 – Scénario 5 : Évolution de la température moyenne au sein des puits du bâtiment 3.

### 7.5.2.2 Évolution des panaches de chaleur dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque

La Figure 7.38 présente la distribution de la température dans l'aquifère des sables du Landénien et l'aquifère du socle paléozoïque le 1<sup>er</sup> avril 2020, soit juste avant le début du fonctionnement du système géothermique du bâtiment 3.

Comme dans le scénario 4, seule la conductivité hydraulique de l'aquitard ayant été modifiée, la température dans le Landénien n'est pas impactée par ce changement de paramètre. Dans le socle, la distribution est pratiquement identique à celle du scénario de référence à la même date. Ainsi, l'augmentation du  $K$  de l'aquitard ne semble pas engendrer des échanges de chaleur beaucoup plus importants entre les deux aquifères.

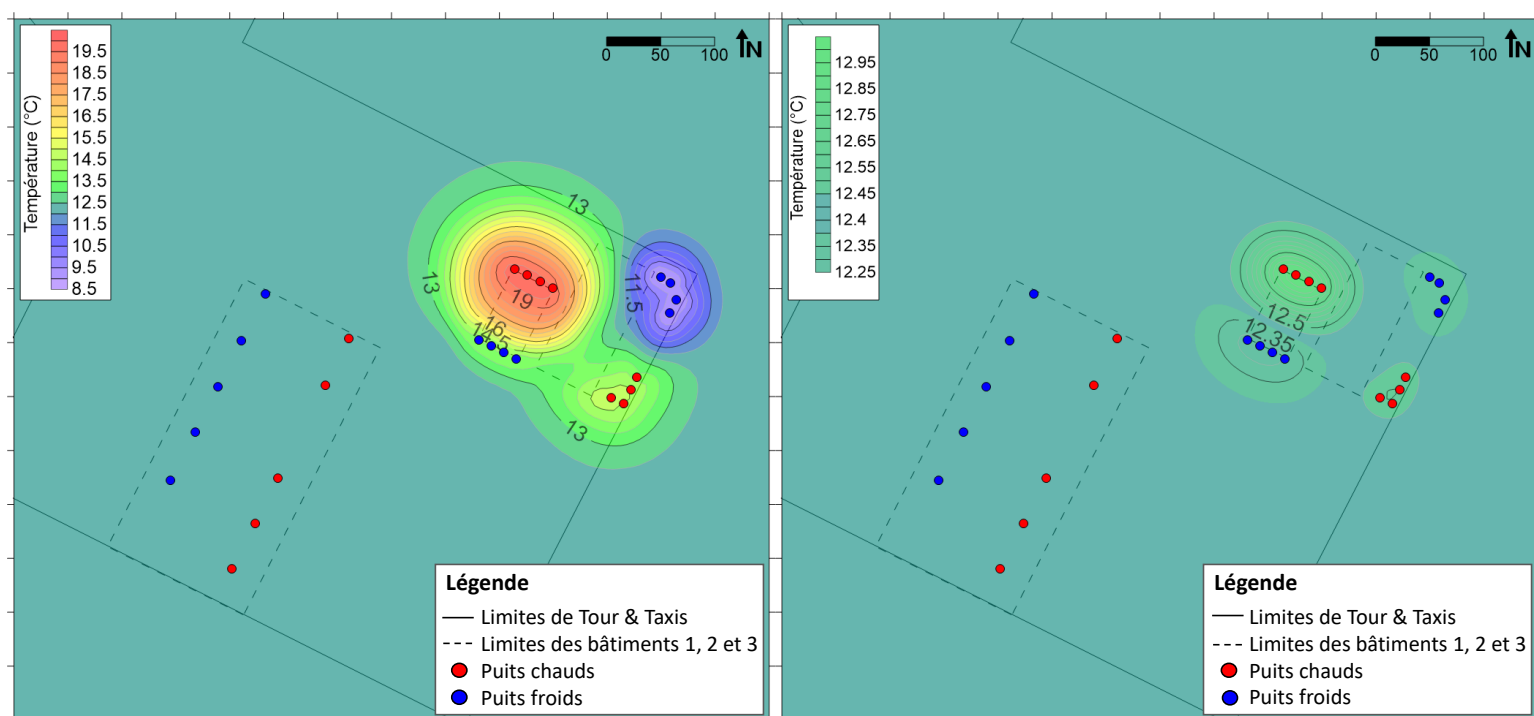


FIGURE 7.38 – Scénario 5 : Température dans l'aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l'aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2020.

A nouveau, l'évolution des panaches de chaleur dans les deux aquifères au cours du temps est très semblable à celle du scénario 1. La température dans le Landénien et dans le socle est tout de même présentée aux Figures 7.39 et 7.40 pour le 1<sup>er</sup> octobre 2029 et le 1<sup>er</sup> avril 2030 respectivement, soit à la fin des dernières saisons chaude et froide simulées.

Les distributions de température sont, à nouveau, pratiquement identiques à celle du scénario de référence. La conductivité hydraulique de l'aquitard ne semble donc pas influencer les échanges de chaleur entre les deux aquifères de manière importante.

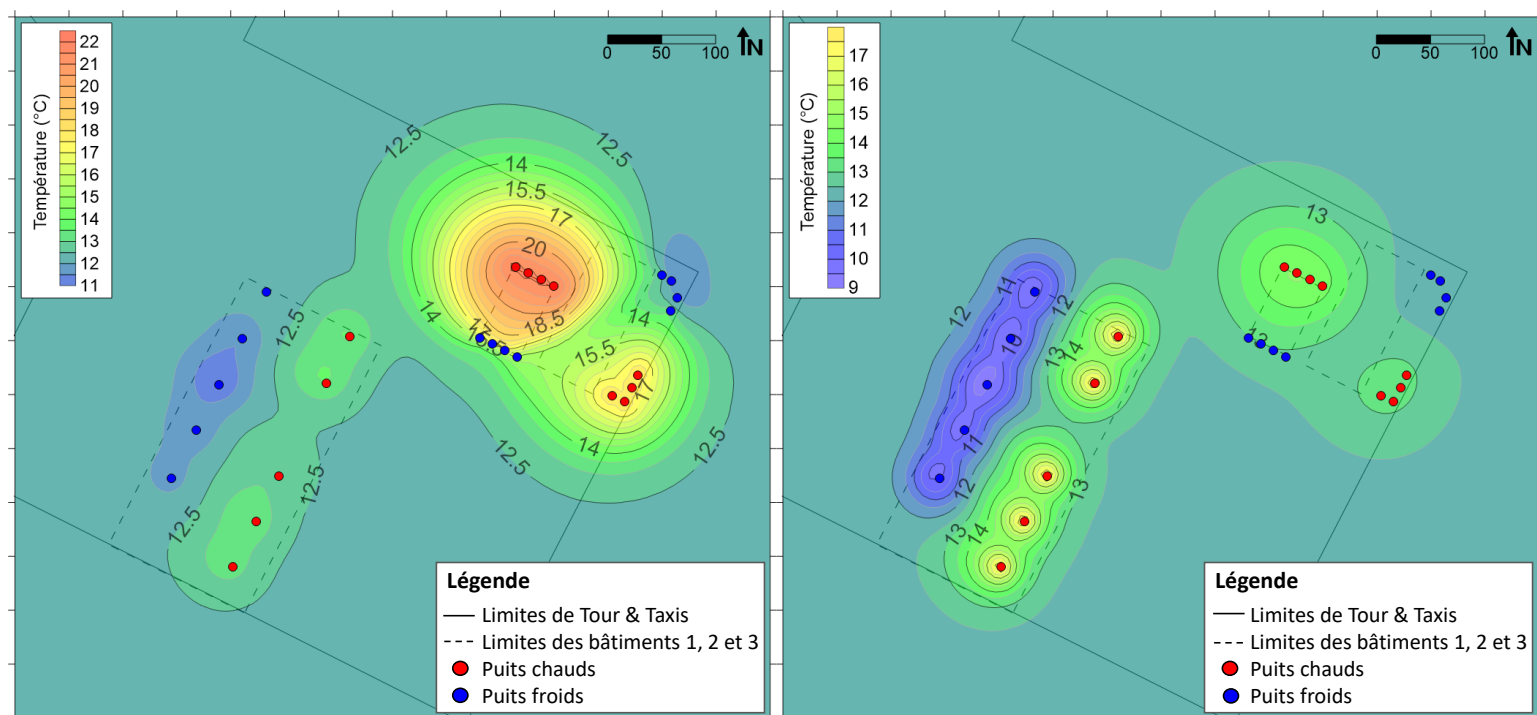


FIGURE 7.39 – Scénario 5 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> octobre 2029.

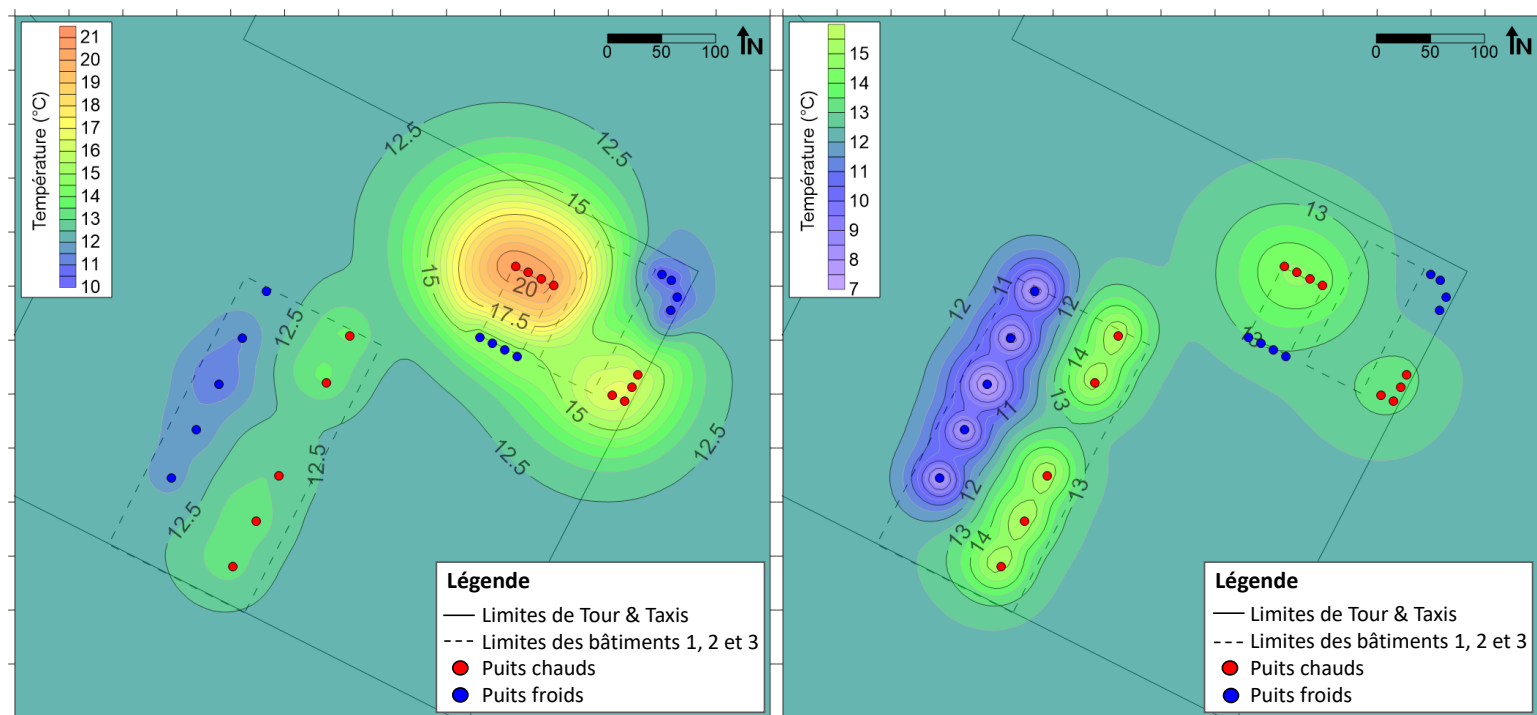


FIGURE 7.40 – Scénario 5 : Température dans l’aquifère des sables du Landénien (à gauche) et dans l’aquifère du socle paléozoïque (à droite) le 1<sup>er</sup> avril 2030.

## 7.6 Conclusion

Lorsque le modèle est calibré, il peut être utilisé pour la simulation de différents scénarios. Dans ce travail, le transport de chaleur a été simulé à Tour & Taxis sous 5 configurations différentes, pour les bâtiments 1 et 2 exploitant l'aquifère des sables du Landénien et pour le bâtiment 3 exploitant l'aquifère du socle paléozoïque.

Tout d'abord, le premier scénario exécuté reproduit l'évolution de la situation réelle, avec les données disponibles. Pour les installations géothermiques des bâtiments 1 et 2, les paramètres utilisés sont ceux considérés par Bulté (2020), qui dérivent de données relatives à l'utilisation réelle des deux systèmes. Concernant le bâtiment 3, aucune donnée n'est à disposition. Ainsi, les paramètres découlent de ceux envisagés dans l'étude de faisabilité menée par AGT (2018a).

Dans ce scénario de référence, exécuté jusqu'à 20 ans après le départ de l'installation géothermique du bâtiment 3, les systèmes des bâtiments 1 et 2 sont contre-productifs à long terme. En effet, ils ne parviennent pas à emmagasiner suffisamment de froid durant la saison froide afin de pouvoir exploiter cette réserve durant l'entièreté de la saison chaude. Ce résultat était déjà celui obtenu par Bulté (2020). Ainsi, les modifications de certains paramètres du modèle dans l'aquifère du Landénien, tels que sa conductivité hydraulique durant la calibration du modèle d'écoulement, ne semblent pas influencer l'efficacité des systèmes, qui restent non profitables. Le système du bâtiment 3, tel qu'envisagé lors de l'étude de faisabilité, est quant à lui efficace et parvient à créer des réserves de froid et de chaud pouvant être exploitées tout au long des saisons chaudes et froides respectivement.

De plus, des échanges de chaleur s'opèrent entre les deux aquifères, à travers l'aquitard de Gulpen. En effet, l'utilisation des systèmes géothermiques exploitant le Landénien engendre des panaches de chaleur dans le socle, et inversement. Néanmoins, dans le modèle développé, ces panaches ne sont pas suffisants pour avoir un impact sur l'efficacité des systèmes géothermiques respectifs sur 20 ans de fonctionnement du système du bâtiment 3. De plus, ils se développent relativement lentement et ne semblent pas indiquer que des interactions néfastes pour les différentes installations pourraient se produire à moyen, voire long terme. Néanmoins, afin de s'en assurer, il pourrait être judicieux de placer un piézomètre de contrôle entre les bâtiments 1 et 3, dans les deux aquifères. Le suivi de la température des aquifères entre les deux bâtiments pourrait permettre de vérifier que les panaches de chaleur se propagent comme attendu, au vu des résultats de la simulation, et non plus rapidement.

En effet, le modèle possède des limitations. D'une part, pour l'écoulement, il n'a pu être calibré que sur base de 9 mesures, dont uniquement 2 dans l'aquifère du socle paléozoïque. D'autre part, il n'a pas pu être calibré pour le transport de chaleur, en l'absence de données suffisantes. La récolte de données supplémentaires, notamment avec le placement de sondes de mesures dans les puits des 3 bâtiments, pourrait permettre une calibration plus fine du modèle dans la continuation de ce projet. De plus, la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen, ainsi que les paramètres pour le transport de chaleur dans l'ensemble des unités hydrogéologiques, ne résultent pas de données locales. Les valeurs correspondent à des valeurs typiquement observées pour

les lithologies rencontrées, mais pourraient ne pas être exactes et avoir une influence sur les résultats fournis par le modèle.

Ensuite, différents scénarios ont tout de même été envisagés. Il apparaît que, dans le modèle développé, l'augmentation de la demande de refroidissement du bâtiment 3 de 50 % par rapport à sa demande de chauffage n'a pas d'impact sur l'efficacité des systèmes des bâtiments 1 et 2. Cependant, son propre système est contre-productif à long terme, ne parvenant pas à créer une réserve de froid suffisante pour toute la saison chaude. De plus, en considérant un  $\Delta T$  constant de 6 °C pour l'installation du bâtiment 3, celle-ci reste profitable. Ce changement de paramètre a pour effet de diminuer très légèrement la température dans les puits du bâtiment 2 par rapport au scénario de référence, alors qu'elle augmente dans ceux du bâtiment 1. Ces différences restent néanmoins très faibles. Finalement, les deux derniers scénarios considérés consistent à augmenter la conductivité thermique et la conductivité hydraulique de l'aquitard de Gulpen. Dans les deux cas, les échanges de chaleur entre les deux aquifères ne semblent pas être grandement influencés par ces paramètres. En effet, les distributions de température dans les aquifères au cours du temps restent très similaires, voire identiques, à celles du scénario de référence.

# Chapitre 8

## Conclusion et perspectives

Durant le 20<sup>e</sup> siècle, Tour & Taxis était un pôle ferroviaire, portuaire et douanier de la Région de Bruxelles-Capitale, dans la partie nord de la Belgique. Depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle, des projets de revitalisation du site voient le jour, visant à le transformer en quartier urbain durable. L'utilisation de sources d'énergies renouvelables s'inscrit dans cette perspective de reconversion du quartier. Ainsi, 3 bâtiments adjacents s'établissant sur le site ont opté pour des systèmes de géothermie à faible profondeur en circuit ouvert pour leur chauffage et leur climatisation.

La géothermie peu profonde en système ouvert consiste à emmagasiner des réserves de froid et de chaleur dans un aquifère, via des doublets de puits de pompage et de réinjection. Durant la saison froide, l'eau est extraite des puits chauds afin d'exploiter sa chaleur pour chauffer l'infrastructure. Elle est alors réintroduite dans les puits froids, à une température inférieure à celle de l'aquifère. Au changement de saison, le cycle de pompage et d'injection est inversé, et les puits froids servent de ressource pour la climatisation du bâtiment, avant de réinjecter l'eau dans les puits chauds à une température plus élevée que celle de l'aquifère.

Parmi les 3 bâtiments utilisant ce type de géothermie à Tour & Taxis, deux exploitent l'aquifère des sables du Landénien, et le troisième l'aquifère du socle paléozoïque. Ces deux unités sont séparées par l'aquitard de Gulpen. Un premier modèle développé dans le logiciel **FEFLOW** par Bulté (2020) a permis de simuler les interférences entre les deux premiers systèmes, s'établissant dans l'aquifère du Landénien. Dans ce travail, l'aquifère du socle ainsi que l'aquitard intermédiaire ont été ajoutés à ce premier modèle, afin de modéliser l'effet cumulé des 3 installations géothermiques exploitant les deux aquifères.

A cette fin, le principe de la géothermie peu profonde en système ouvert a tout d'abord été exposé dans un premier chapitre. Ensuite, le contexte environnemental de Tour & Taxis a été développé. Ce chapitre a notamment permis d'étudier la géologie ainsi que l'hydrogéologie de la région. Ensuite, le développement du modèle conceptuel a également fait l'objet d'un chapitre. Le modèle conceptuel représente la simplification du système réel, qui sert de base à la construction du modèle dans le logiciel de modélisation. L'implémentation du modèle dans le logiciel **FEFLOW**, ainsi que la discussion sur les paramètres d'écoulement et de transport de chaleur attribués aux différentes unités hydrogéologiques modélisées, ont été développées dans le chapitre suivant. De plus, avant de pouvoir être exploité, le modèle doit être calibré afin de s'assurer qu'il

reproduise correctement le comportement du système réel. La calibration du modèle a été effectuée pour l'écoulement uniquement, et le processus est explicité dans un chapitre également. Enfin, des simulations de transport de chaleur ont pu être exécutées en envisageant divers scénarios possibles.

Les résultats des simulations montrent que dans la configuration envisagée lors de l'étude de faisabilité menée par AGT (2018a), l'installation géothermique du bâtiment 3 est efficace et parvient à créer des réserves de chaleur et de froid durant toute l'année. Au contraire, avec les paramètres considérés par Bulté (2020) découlant de données réelles d'utilisation des systèmes des bâtiments 1 et 2, ceux-ci ne sont pas profitables, ne parvenant pas à maintenir une réserve de froid suffisante pour assurer leur climatisation.

De plus, il apparaît que des échanges de chaleur s'opèrent entre les deux aquifères, à travers l'aquitard intermédiaire. Néanmoins, les panaches de chaleur provoqués dans le Landénien par l'exploitation du socle, et inversement, s'étendent relativement lentement. Il apparaît que des interactions significatives entre les différents systèmes ne semblent pas être à craindre à moyen ou long terme.

Cependant, le modèle n'a pu être calibré que pour l'écoulement, et non pour le transport de chaleur en l'absence de données suffisantes. De plus, cette calibration est basée sur un nombre limité de mesures. Ainsi, des piézomètres de contrôle dans le Landénien et dans le socle placés entre les bâtiments 1 et 3 par exemple, pourraient permettre de suivre l'évolution de la température dans les deux aquifères, et ainsi s'assurer que les panaches de chaleur ne s'étendent pas plus rapidement que prévu, ce qui pourrait engendrer des interférences indésirables entre les différentes installations.

Enfin, la récolte de nouvelles données est en cours pour les 3 systèmes géothermiques. En effet, des enregistreurs de données (*dataloggers*) ont été placés dans différents puits des bâtiments 1 et 3, permettant de suivre l'évolution continue du niveau piézométrique et de la température dans les puits. Des discussions sont en cours afin d'obtenir des accords pour placer ce type de sondes dans les puits du bâtiment 2 également. Ces nouvelles données pourront permettre, dans la continuation de ce travail, d'affiner la calibration du modèle. De plus, des données plus précises quant à l'utilisation réelle de l'installation géothermique du bâtiment 3 permettraient de simuler le transport de chaleur dans des conditions plus proches de la réalité.

# Chapitre 9

## Références

AGT, 2018a. *KWO installatie Gare Maritime - Hydraulische en Thermische dimensionering*. Rapport 2018 01 25-JVST\_LDEH-AGT1915-Rapport-v8, AGT nv - Adviesbureau inzake Grondwatertechnieken, 41 p.

AGT, 2018b. *Project : KWO Gare Maritime, Brussel. Nota testen KWO-bronnen : stand van zaken*. Rapport 2018 10 30-MPOS-AGT1915-Nota, AGT nv - Adviesbureau inzake Grondwatertechnieken, 15 p.

AGT, 2019. *KWO Gare Maritime : Testen van KWO-bronnen*. Rapport 2019 04 01-MPOS-AGT1915-Rapport-v1, AGT nv - Adviesbureau inzake Grondwatertechnieken, 32 p.

ARTESIA, 2021. Données de type "Enregistrements de *dataloggers*" sous format xlsx.

Ateliers Lion & MSA, 2008. *Zone Levier n°5 «Tour et Taxis» : Schéma Directeur*. En collaboration avec Modus Expert - CITEC - Bas Smets. Commanditaire : Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Administration de l'Aménagement du Territoire et du Logement. 109 p.

BELB, 2021. environnement.brussels : Bruxelles Environnement - Leefmilieu Brussel.

Bloemendal, M., Jaxa-Rozen, M. & Olsthoorn, T., 2018. Methods for planning of ATES systems. *Applied Energy*, 216, 534-557. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.068>

Bologna, A., 2017. *Cours d'eau et étangs bruxellois*. Bruxelles Environnement - IBGE, Collection fiches documentées, Thème Eau, 12 p.

Boydens, 2018. *Gare Maritime : Geïntegreerde haalbaarheids-studie - Addendum geothermie - Fase definitief ontwerp*. Studiebureau Boydens n.v., boydens engineering, Project n°2260 - Gare maritime Brussels, 33 p.

Bruxelles Environnement, 2021a. Tableau des Unités Hydrogéologiques de la Région de Bruxelles-Capitale (UH/RBC).

Bruxelles Environnement, 2021b. Bruxelles Environnement : Thèmes - Géologie et hydrogéologie - Eaux souterraines - Hydrogéologie - Unités hydrogéologiques de la Région de Bruxelles-Capitale. <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/eaux-souterraines/hydrogeologie/unites-hydrogeologiques-de-la#>, consulté en décembre 2021.

Bulté, M., 2020. *Groundwater interference modelling between different low temperature ATEs systems in urban context*. Thèse de master, Université de Liège, 147 p.

CIRB-CIBG, 2021. cirb.brussels : Centre d'Informatique pour la Région Bruxelloise.

Climat.be, 2019. Climat.be : Changements climatiques - Changements observés - Rapports du GIEC - 2021 : Les éléments scientifiques. <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2021-les-elements-scientifiques>, consulté en juin 2022.

Dassargues, A., 2018. *Hydrogeology : groundwater science and engineering*. Taylor & Francis CRC press, 472 p.

Dassargues, A., 2019. Le potentiel de la géothermie peu profonde dans la transition énergétique. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 88, Actes de colloques, 52-63.

Dassargues, A., 2020. *Hydrogéologie appliquée : science et ingénierie des eaux souterraines*. Dunod, Technique et ingénierie, 512 p.

Devleeschouwer, X., Goffin, C., Vandaele, J. & Meyvis, B., 2017. *Modélisation stratigraphique en 2D et 3D du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale*. Rapport final du projet BRUSTRATI3D Version 1.0. Rédigé par l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (D.O. Terre et Histoire de la Vie), Service Géologique de Belgique, 110 p.

DHI, 2015a. *FEFLOW 7.0 : User Guide*. Mike - Powered by DHI. Mike 2016, FEFLOW - ©DHI, 220 p.

DHI, 2015b. *FePEST in FEFLOW 7.0 : User Guide*. Mike - Powered by DHI. Mike 2016, FEFLOW - ©DHI, 130 p.

DHI, 2017. *FEFLOW 7.1 : Introductory tutorial*. Mike - Powered by DHI. FEFLOW 7.1, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Mike 2016, FEFLOW - ©DHI, 45 p.

FEFLOW, 2021a. Feflow 7.2 Documentation : Parameters, Parameter types, Boundary conditions (BC), Fluid flow. [http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09\\_Parameters/Boundary\\_Conditions/Flow/flow\\_boundary\\_conditions.html](http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09_Parameters/Boundary_Conditions/Flow/flow_boundary_conditions.html), consulté en décembre 2021.

FEFLOW, 2021b. Feflow 7.2 Documentation : Parameters, Parameter types, Boundary conditions (BC), Heat. [http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09\\_Parameters/](http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09_Parameters/)

Boundary\_Conditions/Heat/heat\_transport\_boundary\_conditions.html, consulté en décembre 2021.

FEFLOW, 2021c. Feflow 7.2 Documentation : Parameters, Parameter types, Material properties, Material properties heat. [http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09\\_Parameters/Material\\_Properties/heat\\_parameters.html](http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09_Parameters/Material_Properties/heat_parameters.html), consulté en décembre 2021.

FEFLOW, 2022. Open-Loop Design : plug-in help.

Follin, S. & Grundtenik, G., 1999. *Hydrogeological boundary settings in SR97 : Uncertainties in regional boundary settings and transfer of boundary conditions to site-scale models*. SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Rapport R-99-45, 34 p.

Geolys, 2021. *Modélisation hydrogéologique*. Geolys - Eclaire votre avenir, Eau, 3 p.

Gerard, P., Vincent, M., Gigot, V. & François, B., 2020. *Détermination de la conductivité thermique des formations géologiques du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale à des fins de pré-dimensionnement de sondes géothermiques : Projet FEDER-RBC Brugges*. Université Libre de Bruxelles (ULB), Service BATir, 29 p.

Herbosch, A. & Blockmans, S., 2012. Notice explicative de la carte géologique de Wavre - Chaumont-Gistoux (40/1-2). Édité par le Service public de Wallonie, Direction générale de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement, 71 p.

IFTech, 2010. *Tour & Taxis : BIM gebouw, Brussel. Koude-Warmte opslag. Evaluatie van de haalbaarheid op basis van een putproef*. Rapport P 933 R 01, IFTech n.v., 25 p.

perspective.brussels, 2020. *Tour & Taxis : Diagnostic territorial et focus sur les équipements d'intérêt public*. 41 p.

perspective.brussels, 2022. Tour & Taxis. Projets urbains - Territoire du Canal - Tour & Taxis. <https://perspective.brussels/fr/projets/territoire-du-canal/tour-taxis>, consulté en janvier 2022.

Roland, S., Rorive, A., Capette, L. & Hallet, V., 2016. Notice explicative de la carte hydrogéologique de Rebecq - Ittre (39/1-2). Édité par le Service public de Wallonie, Direction générale de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement, 74 p.

Ruthy, I. & Dassargues, A., 2015. Notice explicative de la carte hydrogéologique de Wavre - Chaumont-Gistoux (40/1-2). Édité par le Service public de Wallonie, Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement, 130 p.

Ruthy, I., Dassargues, A., Rekk, S. & Hallet, V., 2017. Notice explicative de la carte hydrogéologique de Chastre - Gembloux (40/5-6). Édité par le Service public de Wallonie, Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et

de l'Environnement, 96 p.

Schüppler, S., Fleuchaus, P. & Blum, P., 2019. Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. *Geothermal Energy*, 7, 1-24. DOI : <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0127-6>

van Hoegaerden, V. & Hagedoorn, S., 2007. *Accelerating the deployment of shallow geothermal heat and cold resources in Europe*. Proceedings European Geothermal Congress 2007, 6 p.

Vanderhulst, G., 2008. Tour & Taxis, hier et aujourd'hui. *Les Cahiers de l'Urbanisme*, 68, 60-66.

Wynants, M.A. & Petitclerc, E., 2019a. *PP1 (WW1) - Log de forage*. Interprétation stratigraphique, Service Géologique de Belgique.

Wynants, M.A. & Petitclerc, E., 2019b. *PP2 (CW1) - Log de forage*. Interprétation stratigraphique, Service Géologique de Belgique.