

Faculté des bioingénieurs

Faisabilité d'un système de stockage intersaisonnier de chaleur (ATES) dans le contexte de Louvain-la-Neuve et des nouveaux bâtiments à la Croix du Sud

Auteur : Vanhove Noé

Promoteur : Vanclooster Marnik

Lecteurs : Javaux Mathieu & Saraswati Anita

Année académique 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité
spécialisée

Remerciements

La réalisation de ce mémoire de fin d'études représente l'aboutissement de mon parcours de bioingénieur, mais ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'accompagnement et le soutien de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le Professeur Marnik Vanclooster. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée en acceptant de superviser ce mémoire. Vos conseils, votre encadrement et vos relectures de mes drafts ont été d'une aide précieuse pour structurer et diriger ma réflexion afin de mener à bien cette étude.

J'adresse également mes remerciements à Madame Anita Saraswati pour son encadrement technique et pratique. Merci pour votre disponibilité, pour votre temps et pour votre expertise lors de la réalisation des mesures géophysiques H/V sur le terrain. Ces données constituent la partie expérimentale des résultats de ce mémoire, et votre aide a été déterminante pour leur acquisition. Ainsi que pour le temps apporté à la lecture finale de ce mémoire.

Je souhaite aussi remercier le Professeur Mathieu Javaux pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail en acceptant d'en être le lecteur et d'en évaluer le contenu.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier ma famille au complet pour leur présence et d'avoir eu confiance en moi tout au long de mes études.

	Noé VAN-HOVE	Autres contributeur·ice	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X		
Méthodologie	X		
Investigation	X		X
Analyse formelle	X		X
Validation	X		
Rédaction – version originale	X		
Rédaction – révision et édition	X		X
Visualisation	X		
Supervision	X	Vanclooster Marnik	

contribution de l'Intelligence Artificielle :

- **Investigation** : L'IA (Gemini - Google) a quelques fois été employée comme "moteur de recherche" afin de trouver des sources pertinentes avec ce qui était recherché.
- **Analyse formelle** : L'IA (Gemini - Google) a permis de réaliser une première itération des calculs de dimensionnement. L'intégralité de ces résultats a ensuite été systématiquement recalculée et vérifiée manuellement à l'aide d'Excel.
- **Rédaction – révision et édition** : L'IA (Gemini - Google) a principalement été sollicitée pour la relecture syntaxique et la reformulation pour obtenir un vocabulaire plus académique et des phrases plus complètes. Elle a également fourni un support technique pour l'écriture du code et la mise en page du document au propre sous l'environnement L^AT_EX (Overleaf).

Table des matières

Remerciements	2
Table des figures	7
Liste des tableaux	8
Liste des acronymes et symboles	9
Introduction générale	11
1 Problématique, Objectifs et Hypothèses de recherche	12
1.1 Problématique et identification du besoin	12
1.2 Objectif général	12
1.3 Objectifs spécifiques	12
1.4 Hypothèses de recherche	13
2 État de l’art : Le stockage thermique par aquifère (ATES)	14
2.1 Introduction au stockage thermique intersaisonnier (STES)	14
2.2 Principes fondamentaux et fonctionnement du système ATES	14
2.2.1 Le cycle d’exploitation géothermique	14
2.2.2 Composants de surface et consommation parasitaire	15
2.3 Paramètres hydrogéologiques et transfert de chaleur	16
2.3.1 Propriétés du milieu poreux et limites mécaniques	16
2.3.2 Mécanismes de transfert et efficacité de récupération	16
2.3.3 L’estimation analytique de l’encombrement thermique	17
2.4 Application au contexte de Louvain-la-Neuve et contraintes	17
2.4.1 L’aquifère des Sables du Bruxellien	17
2.4.2 Interférences thermiques et géochimie	18
2.4.3 Le cadre réglementaire wallon	18
2.5 Le défi de la durabilité : Gérer le déséquilibre thermique	19
2.6 Évolutions technologiques et intégration systémique de l’ATES	19
2.6.1 Le rafraîchissement quasi-passif (Géocooling direct)	19
2.6.2 Le couplage hybride pour la régénération de la nappe	19
2.6.3 Synergie avec les réseaux thermiques de 5 ^e génération (5GDHC) . .	20
3 Matériel et méthodes	21
3.1 Collecte des données et paramétrisation du site	21
3.1.1 Profils de charge thermique des bâtiments	21
3.1.2 Paramètres hydrogéologiques de référence	21
3.1.3 Campagne géophysique et modélisation de l’aquifère (Méthode H/V)	22

3.1.4	Conversion des fréquences en épaisseurs	22
3.2	Modélisation de l'écoulement et du transfert de chaleur	23
3.2.1	Transport de chaleur et panache thermique	23
3.3	Dimensionnement du champ de puits (ATES)	24
3.4	Évaluation technico-économique et analyse de sensibilité	24
3.4.1	Bilan énergétique, OPEX et CAPEX	24
3.4.2	Analyse de sensibilité et d'incertitude	24
4	Analyse des charges et dimensionnement thermique	25
4.1	Caractérisation spatiale de l'aquifère et choix d'implantation	25
4.1.1	Campagne de mesures sismiques et profondeurs déduites	25
4.1.2	Modélisation de l'épaisseur saturée par algèbre matricielle	27
4.1.3	Connexion hydraulique et complexe multicouche	29
4.1.4	Profil hydrogéologique 2D et dynamique d'écoulement	29
4.2	Analyse des consommations énergétiques annuelles	32
4.3	Estimation de la puissance crête et des besoins en refroidissement	33
4.3.1	Besoins calorifiques (Hiver)	33
4.3.2	Besoins frigorifiques (Été)	33
4.4	Implications pour le système ATES	33
4.5	Indice de performance énergétique et ratios de surface	34
4.6	Dimensionnement hydro-thermodynamique et calcul des débits	34
4.6.1	Hypothèses thermodynamiques et de dimensionnement	35
4.6.2	Débits maximaux théoriques (m^3/h)	36
4.6.3	Justification du mode de refroidissement quasi-passif (Géocooling)	36
4.6.4	Conclusion sur le dimensionnement hydraulique	37
4.7	Faisabilité hydrogéologique et architecture du champ de puits	37
4.7.1	Les limites du puits unique et le choix du champ de puits	37
4.7.2	Données de terrain	37
4.7.3	Évaluation du rabattement hydrodynamique et analyse de sensibilité	38
4.8	Dimensionnement spatial et modélisation du panache thermique	39
4.8.1	Débit d'eau saisonnier sollicité (Q_{saison})	39
4.8.2	Estimation du Rayon Thermique (R_{th})	39
4.8.3	Implantation spatiale heuristique	40
4.9	Bilan thermique intersaisonnier et équilibre de la nappe	40
4.9.1	Le déséquilibre des charges thermiques	40
4.9.2	Défis et solutions technologiques pour une régénération thermique	41
4.10	Évaluation économique et synergie énergétique locale (OPEX)	42
4.10.1	Le contexte énergétique spécifique de l'UCLouvain	42
4.10.2	Hypothèses tarifaires retenues	42
4.10.3	Bilan financier annuel (Comparaison OPEX)	42
4.11	Analyse de sensibilité, incertitudes et limites de l'étude	43
4.11.1	Sensibilité du COP au régime de température et aux avancées technologiques :	43
4.11.2	Limites hydrauliques : pertes de charge et consommation parasite	44
4.11.3	Sensibilité économique (Scénarios tarifaires)	45
4.12	Estimation des coûts d'investissement (CAPEX)	45
4.12.1	Décomposition analytique du CAPEX par poste	45
4.12.2	Point de comparaison Belge	46

4.12.3	Calcul du temps de retour sur investissement (ROI simple)	47
4.12.4	Limites de l'estimation économique	47
5	Discussion et analyse critique	49
5.1	Confrontation des modèles : de l'hypothèse régionale à la réalité du terrain	49
5.1.1	La réévaluation de l'encombrement thermique (L'apport des mesures H/V)	49
5.1.2	Déformation advective et efficacité de récupération	50
5.1.3	La dépendance au bâti	50
5.2	Obstacles législatifs et Permis d'Environnement	50
5.2.1	La gestion du déséquilibre thermique	51
5.2.2	Faisabilité hydraulique et conformité au Code de l'Eau	51
5.3	Perspectives de viabilité grâce à l'optimisation de la charge	52
5.3.1	La maturation thermique naturelle de l'aquifère	52
5.4	Impact environnemental et empreinte carbone	53
	Conclusion générale	54
	Bibliographie	56
A	Extraits du Cahier Spécial des Charges (Bâtiment Mendel)	59
A.1	Localisation des forages historiques du SGB	60
B	Cartographies hydrogéologiques complémentaires	62
B.1	Modélisation de la surface piézométrique	62
B.2	Topographie du toit du socle Landénien	65
C	Données piézométriques et niveau du sol de référence	67
D	Données brutes de la campagne géophysique H/V	69
D.1	Données brutes de la campagne géophysique H/V	69
D.2	Calcul du rabattement	70

Table des figures

2.1	Schéma de principe d'un système géothermique sur nappe aquifère en boucle ouverte avec échangeur de barrage (Source : (van Hoegaerden, 2014)). . . .	15
2.2	Coupe schématique de l'équipement d'un forage géothermique sur nappe (tubage, crépine et système de pompage). Source : ADEME et al. (2008). .	17
4.1	Répartition spatiale des points de mesure géophysique passive (méthode H/V) sur le campus de Louvain-la-Neuve.	26
4.2	Rapport spectral H/V obtenu au point de calibration 117W0341. L'axe des abscisses (X) représente la fréquence de vibration (en Hz) et l'axe des ordonnées (Y) correspond au ratio spectral H/V (facteur d'amplification adimensionnel). Le pic principal permet d'identifier la fréquence de résonance fondamentale (f_0) du sol (ligne verticale grise).	27
4.3	Carte continue de l'épaisseur saturée (b) de l'aquifère des Sables du Bruxel- lien sous la Place Croix du Sud obtenue.	28
4.4	Localisation du transect d'extraction du profil hydrogéologique (axe Sud- Est vers Nord-Ouest). La flèche bleue indique la direction régionale de l'écoulement souterrain.	30
4.5	Profil hydrogéologique modélisé (0 m au Nord-Ouest, 500 m au Sud-Est). L'aire bleutée représente l'épaisseur utile saturée du complexe aquifère sa- bleux.	31
4.6	Localisation des bâtiments de la Croix du Sud (SC14 b, SC15 c et SC15 d) sur le campus de Louvain-la-Neuve.	32
4.7	Évolution du Coefficient de Performance (COP) effectif en fonction de la température de distribution pour une nappe à 11°C. (Source : Réalisé par l'auteur sur base du cycle de Carnot pondéré par un rendement global de 45 %).	44
A.1	Extrait du métré justifiant la puissance calorifique de pointe installée (Ra- diateurs et convecteurs).	59
A.2	Extrait du métré justifiant la puissance frigorifique de pointe installée (somme = 164 300W).	60
A.3	Carte de localisation des points historique de forage (Source : GISEL . . .	61
B.1	Modèle numérique interpolé de la cote de la nappe phréatique (Réseau piézométrique UCLouvain).	63
B.2	Caractéristique du krigeage de la hauteur d'eau	64
B.3	Modèle numérique de la topographie absolue du toit du socle (Bedrock) après correction altimétrique par MNT.	65
B.4	Caractéristique du krigeage du toit du socle	66

Liste des tableaux

4.1	Décomposition analytique du CAPEX estimé (6 forages, 1,33 MW cumulés). Données adaptées de Herrmann et al. (2025) et Fleuchaus et al. (2019).	46
4.2	Caractéristiques technico-économiques de deux systèmes ATEs de référence en Belgique (données extraites et actualisées de Herrmann et al., 2025).	46
4.3	Temps de retour sur investissement (ROI) selon les scénarios (incluant les coûts de régénération thermique).	47
C.1	Coordonnées, altitudes du sol naturel et niveaux piézométriques des puits de référence.	68
D.1	Coordonnées, fréquences de résonance et cotes altimétriques déduites pour les 13 points de mesure H/V.	69
D.2	Paramètres et résultats de l'analyse de sensibilité du rabattement hydrodynamique (Équation de Thiem) pour la zone entre la place Croix du Sud et le Cyclotron.	70

Liste des acronymes et symboles

Acronymes

- **5GDHC** : 5th Generation District Heating and Cooling (Réseau thermique urbain de 5^{ème} génération)
- **ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
- **ATES** : Aquifer Thermal Energy Storage (Stockage thermique intersaisonnier par aquifère)
- **BTES** : Borehole Thermal Energy Storage (Stockage géothermique sur sondes)
- **CAPEX** : Capital Expenditure (Dépenses d'investissement)
- **COP** : Coefficient of Performance (Coefficient de performance)
- **CSC** : Cahier Spécial des Charges
- **EER** : Energy Efficiency Ratio (Efficacité Énergétique Frigorifique)
- **HFO** : Hydrofluorooléfines (Gaz réfrigérants)
- **IoT** : Internet of Things (Internet des objets)
- **IPE** : Indice de Performance Énergétique
- **LCOE** : Levelized Cost of Energy (Coût actualisé de l'énergie)
- **OPEX** : Operational Expenditure (Coûts d'exploitation)
- **PAC** : pompe à chaleur
- **PVT** : Photovoltaïque-Thermique (Capteurs hybrides)
- **RCU** : Réseau de Chaleur Urbain
- **ROI / TRI** : Return on Investment / Temps de Retour sur Investissement
- **SPW** : Service Public de Wallonie
- **SPW-ARNE** : SPW Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement
- **STES** : Seasonal Thermal Energy Storage (Stockage thermique intersaisonnier)
- **UCLouvain** : Université catholique de Louvain
- **VAN** : Valeur Actuelle Nette
- **VSD** : Variable Speed Drive (Variateur de vitesse pour pompes)
- HVAC** Heating, Ventilation and Air-Conditioning (Chauffage, Ventilation et Climatisation)
- HVSR** Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (Rapport spectral horizontal/vertical)
- LCC** Life Cycle Cost (Coût global sur le cycle de vie)
- MNT** Modèle Numérique de Terrain
- SGB** Service Géologique de Belgique
- SIG** Système d'Information Géographique

Symboles et grandeurs physiques

- a : Coefficient multiplicateur régional de la loi de puissance (-)
- b : Exposant de compaction sédimentaire de la loi de puissance (-) ou Épaisseur saturée utile de l'aquifère (m)
- $C_{\text{aquifère}}$: Capacité thermique volumique de l'aquifère saturé ($\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$)
- C_{eau} : Capacité thermique volumique de l'eau ($\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ou $\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$)
- $c_{p,\text{eau}}$: Capacité thermique massique de l'eau à pression constante ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) – influence de la pression négligeable ($< 0,1\%$)
- d : Distance radiale séparant deux puits (m)
- E_{hiver} : Énergie thermique extraite lors de la saison de chauffe (MWh ou kWh)
- f_0 : Fréquence de résonance fondamentale mesurée (Hz)
- H : Épaisseur utile saturée de l'aquifère / Épaisseur crépinée (m)
- h : Profondeur d'enfouissement du socle déduite par géophysique (m)
- K : Conductivité hydraulique (m/s)
- L : Distance de sécurité entre les puits chaud et froid (m)
- P : Puissance thermique de pointe (kW)
- Q : Débit volumique de pompage ou d'injection (m^3/h ou m^3/s)
- R : Rayon d'action (ou d'influence) du cône de dépression (m)
- R_{th} : Rayon thermique théorique du panache géothermique (m)
- r_w : Rayon du forage (m)
- s_{total} : Rabattement dynamique total cumulé dans le puits (m)
- T : Transmissivité de l'aquifère (m^2/s ou m^2/h)
- V_s : Vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement (m/s)
- $V_{\text{tot}}/V_{\text{puits}}$: Volume d'eau souterraine sollicité par saison (m^3)
- Z_{nappe} : Altitude (ou cote) piézométrique de la nappe souterraine (m)
- Z_{socle} : Altitude absolue calculée du toit du socle paléozoïque (m)
- Z_{sol} : Altitude absolue du sol naturel issue du Modèle Numérique de Terrain (m)
- ΔP : Pertes de charge régulières et singulières du réseau hydraulique
- ΔT : Différentiel de température ou saut thermique ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
- η_{th} : Efficacité de récupération thermique (%)
- ρ_{eau} : Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

Introduction générale

La transition énergétique est sans conteste un des défis majeurs de notre siècle. Face à l'urgence climatique et à la volatilité des marchés des énergies fossiles, la quête de l'efficacité énergétique est devenue le mot d'ordre de l'ingénierie contemporaine. Dans cet imaginaire collectif d'une société décarbonée, la géothermie occupe une place de choix : elle incarne souvent le mythe d'une énergie à la fois gratuite, infinie et disponible sous nos pieds.

Pourtant, l'ingénieur sait que cette ressource, bien que colossale, se heurte à des défis de taille. La géothermie n'est ni magique, ni inépuisable si elle est mal gérée. Pour l'exploiter de manière durable, il faut passer du simple paradigme de "l'extraction" à celui de la "gestion intelligente" et du stockage. C'est précisément pour répondre à cette exigence qu'a émergé la technologie ATES (*Aquifer Thermal Energy Storage* - Stockage thermique intersaisonnier par aquifère). Cette technologie prometteuse permet de résoudre l'un des plus grands paradoxes d'un secteur économique d'importance, celui du secteur de la construction : le déphasage temporel entre la surchauffe estivale et la demande de chauffage hivernale, en utilisant la nappe phréatique comme une immense batterie thermique naturelle.

Ce vif intérêt pour l'efficacité énergétique pouvait trouver aujourd'hui un terrain d'application concret et immédiat au cœur du campus de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain). Actuellement, les bâtiments académiques vont ou ont fait l'objet d'un vaste chantier de rénovation énergétique. Cette phase de travaux représentait une opportunité historique. Plutôt que de simplement remplacer d'anciennes chaudières au gaz par de nouvelles, cette rénovation offrait la fenêtre de tir idéale pour repenser l'approvisionnement thermique de ces infrastructures tertiaires en y simulant l'intégration d'un système ATES de pointe.

C'est dans ce contexte de renouvellement urbain et universitaire que s'inscrit le présent mémoire. La question n'est plus seulement de savoir si l'aquifère des Sables du Bruxellien, situé sous le campus, contient de l'énergie, mais s'il est techniquement, économiquement et légalement capable de soutenir la demande énergétique massive de ces bâtiments.

Au fil de cette étude, la théorie thermodynamique sera confrontée à la réalité du terrain. Après avoir dressé un état de l'art des systèmes ATES et de leurs contraintes (Chapitre 2), la méthodologie employée pour quantifier les besoins du site sera détaillée (Chapitre 3). Le Chapitre 4 sera consacré au cœur de l'ingénierie : le dimensionnement thermodynamique, hydraulique et spatial du champ de puits, ainsi que son évaluation économique. Enfin, le Chapitre 5 proposera une analyse critique globale.

Chapitre 1

Problématique, Objectifs et Hypothèses de recherche

1.1 Problématique et identification du besoin

La technologie ATES est une solution performante pour le stockage thermique intersaisonnier des bâtiments, et les études récentes et proches géographiquement (Van Bambeke, 2024) ont confirmé le potentiel global de l'aquifère des Sables du Bruxellien pour stocker la chaleur des bâtiments académiques de Louvain-la-Neuve. Cependant, l'application de cette technologie à un contexte micro-local dense reste à démontrer. La rénovation des bâtiments intégrée dans le plan de transition de l'UCLouvain soulève des questions spécifiques : la capacité locale de l'aquifère est-elle suffisante pour absorber les charges thermiques et les débits nécessaires aux infrastructures. C'est ce manque de données appliquées au campus de Louvain-la-Neuve qui motive cette recherche.

1.2 Objectif général

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la faisabilité technique et environnementale, ainsi que de pré-dimensionner un système de stockage thermique intersaisonnier par aquifère (ATES) destiné à couvrir les besoins énergétiques (chauffage et rafraîchissement) de quelques bâtiments situés à la Place Croix du Sud à Louvain-la-Neuve.

1.3 Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif général, la recherche s'articule autour de trois objectifs spécifiques, dictant la méthodologie du projet :

- **Objectif 1** : Analyser les conditions micro-locales du sous-sol de la Place Croix du Sud afin de déterminer si les propriétés physico-géologiques et hydrogéologiques (lithologie, transmissivité, épaisseur utile, profondeur et gradient de la nappe) semblent compatibles avec l'implantation d'un champ de puits.
- **Objectif 2** : Dimensionner le système ATES par une approche analytique et macroscopique (débits de pompage/injection, modèle cylindrique de Balke, distance heuristique) pour répondre aux profils de charge thermique des nouveaux bâtiments, tout en estimant l'évolution spatiale du panache thermique.

- **Objectif 3 :** Évaluer la viabilité globale du système en quantifiant le bilan thermique intersaisonnier, en menant une analyse de sensibilité économique, et en confrontant le projet aux contraintes réglementaires wallonnes (Permis Unique).

1.4 Hypothèses de recherche

En accord avec la littérature scientifique et le cadre normatif existant, cette étude s'attachera à vérifier les trois hypothèses suivantes :

- **Hypothèse 1 : Faisabilité hydrogéologique et spatiale.** L'aquifère des Sables du Bruxellien situé sous la Place de la Croix du Sud présente des caractéristiques hydrodynamiques permettant de soutenir les débits de pointe requis. De plus, l'emprise spatiale du campus est jugée suffisante pour implanter un champ de puits respectant les distances analytiques de sécurité face aux risques de court-circuit thermique.
- **Hypothèse 2 : Performance énergétique et viabilité économique.** Le couplage des bâtiments rénovés à un système ATES, via une pompe à chaleur eau-eau fonctionnant sur des régimes de distribution à basse température, garantira un Coefficient de Performance (COP) élevé. Cette efficacité, combinée au micro-réseau électrique de l'université, assurera une réduction drastique des coûts d'exploitation (OPEX) face aux solutions fossiles de référence.
- **Hypothèse 3 : Pérennité environnementale et conformité réglementaire.** L'asymétrie des besoins thermiques des bâtiments (dominance du chauffage) génèrera un déficit thermique intersaisonnier majeur. L'intégration de sources de régénération active (chaleur fatale, géocooling, solaire) sera une condition absolue pour empêcher l'épuisement thermique de l'aquifère à long terme et satisfaire aux exigences environnementales strictes du Permis Unique wallon.

Chapitre 2

État de l'art : Le stockage thermique par aquifère (ATES)

2.1 Introduction au stockage thermique intersaisonnier (STES)

Dans le contexte de la transition énergétique, la réduction de la consommation d'énergie primaire est un enjeu majeur. Le secteur du bâtiment représente à lui seul près d'un tiers de la consommation mondiale d'énergie finale, principalement pour répondre aux besoins de chauffage et de refroidissement (Van Bambeke, 2024). Le déphasage temporel entre la disponibilité des ressources énergétiques (souvent estivales, comme le solaire ou la chaleur fatale) et la demande (hivernale) impose le recours à des solutions de stockage. Le stockage thermique intersaisonnier (Seasonal Thermal Energy Storage - STES) répond à cette problématique en lissant la courbe de demande énergétique sur une année complète.

2.2 Principes fondamentaux et fonctionnement du système ATES

Parmi les technologies STES, le stockage thermique par aquifère (*Aquifer Thermal Energy Storage* - ATES) se distingue comme une solution adaptée aux environnements urbains présentant des nappes phréatiques capacitives. Contrairement aux systèmes géothermiques en boucle fermée (BTES - *Borehole Thermal Energy Storage*), l'ATES est un système en boucle ouverte qui pompe et réinjecte directement l'eau souterraine.

2.2.1 Le cycle d'exploitation géothermique

Le système repose typiquement sur un ou plusieurs doublets de puits (un puits « chaud » et un puits « froid ») séparés par une distance calculée pour éviter les courts-circuits thermiques (thermal breakthrough), comme l'illustre le schéma de principe à la Figure 2.1.

- **Mode Été (Phase de charge) :** L'eau souterraine est pompée depuis le puits froid (à la température naturelle de la nappe, généralement autour de 10 à 12 °C en Belgique). Elle est utilisée pour rafraîchir les bâtiments (géocooling) via un échangeur de chaleur intermédiaire. Ce processus réchauffe l'eau, qui est ensuite réinjectée dans le puits chaud, créant ainsi une "bulle" d'eau chaude dans l'aquifère.

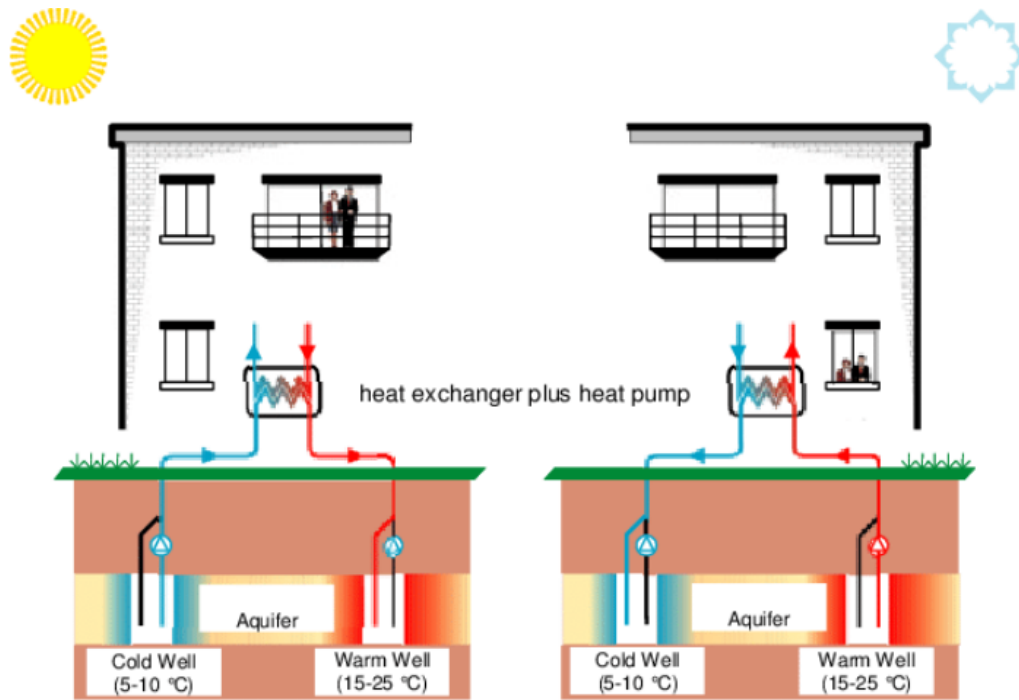


FIGURE 2.1 – Schéma de principe d'un système géothermique sur nappe aquifère en boucle ouverte avec échangeur de barrage (Source : (van Hoegaerden, 2014)).

- **Mode Hiver (Phase de décharge) :** Le flux hydraulique est inversé. L'eau est pompée depuis le puits chaud. Sa chaleur est extraite par l'évaporateur d'une pompe à chaleur (PAC) pour chauffer les bâtiments. L'eau refroidie est finalement réinjectée dans le puits froid, régénérant ainsi le potentiel de refroidissement pour l'été suivant.

2.2.2 Composants de surface et consommation parasitaire

La boucle primaire de l'ATES est séparée de la boucle secondaire du bâtiment par un échangeur à plaques, souvent en titane, pour protéger les installations de surface de la corrosion et du colmatage. L'utilisation d'une PAC couplée à un ATES (système eau-eau) offre une source de température stable, permettant d'atteindre un coefficient de performance (COP) annuel nettement supérieur aux systèmes aérothermiques classiques (air-eau) (Bottequin et al., 2021).

L'évaluation de l'efficacité énergétique d'un système ATES ne doit par ailleurs pas se limiter au seul rendement du compresseur de la pompe à chaleur. Le déplacement de volumes d'eau massifs entre l'aquifère et les locaux techniques requiert l'activation continue de pompes immergées et de pompes de circulation réseau. L'énergie électrique consommée par ces équipements, appelée "consommation parasitaire", constitue une charge qui impacte directement le coefficient de performance global du système et les coûts d'exploitation. Sa minimisation par une conception hydraulique adéquate est donc primordiale, sachant que la littérature démontre que l'impact relatif de ces pompes diminue drastiquement sur les installations de grande envergure grâce à un effet d'échelle favorable (Gehlin et al., 2018).

2.3 Paramètres hydrogéologiques et transfert de chaleur

La faisabilité d'un ATES dépend intrinsèquement des propriétés physiques du sous-sol. Van Bambeke (2024) souligne l'importance de caractériser l'aquifère ciblé avant tout dimensionnement.

2.3.1 Propriétés du milieu poreux et limites mécaniques

La capacité de stockage et de restitution du réservoir souterrain dépend de trois caractéristiques clés :

- **La porosité et la perméabilité** : L'aquifère doit offrir un volume de pores suffisant pour emmagasiner l'eau, et une conductivité hydraulique élevée pour permettre des débits de pompage/injection importants sans rabattement excessif de la nappe.
- **L'épaisseur saturée** : Le volume utile de stockage est délimité par l'épaisseur de l'aquifère, idéalement confiné entre un "toit" et un "mur" imperméables (aquitards) qui limitent les pertes thermiques par conduction verticale.
- **Le gradient hydraulique naturel** : Un écoulement naturel trop rapide de la nappe phréatique peut entraîner une advection de la bulle thermique, déplaçant la chaleur hors de portée du puits de pompage hivernal.

Outre la transmissivité globale de la nappe, le dimensionnement d'un forage doit respecter des limites purement mécaniques. Une vitesse de filtration de l'eau excessive à travers les crépines du puits risque d'entraîner les particules fines du sable (sand pumping). Ce phénomène provoque une érosion prématurée des pompes immergées et un colmatage mécanique irréversible. Pour les aquifères sableux, l'ouvrage de référence en ingénierie hydrogéologique recommande de maintenir la vitesse d'entrée aux crépines sous un seuil critique de sécurité, typiquement estimé à 3 cm/s (Driscoll, 1986).

Afin d'illustrer l'agencement de ces éléments critiques (tubage, crépine, massif filtrant et pompe immergée) au sein de la structure de l'ouvrage, la Figure 2.2 présente une coupe schématique typique d'un forage d'exploitation géothermique.

2.3.2 Mécanismes de transfert et efficacité de récupération

L'évaluation thermodynamique du stockage repose sur l'efficacité de récupération (η_{th}), définie par le ratio entre l'énergie récupérée et l'énergie préalablement injectée. Cette performance est directement dictée par la superposition de trois phénomènes physiques fondamentaux (Ingebritsen et al., 2006) : la **conduction** (transfert thermique statique entre les grains et le fluide), l'**advection** (mécanisme dominant lié au flux macroscopique, étirant le panache thermique dans le sens de l'écoulement naturel (Van Bambeke, 2024)), et la **dispersion hydrodynamique** (étalement du front thermique lié aux hétérogénéités microscopiques des pores (Bear, 1972)).

Ces mécanismes engendrent inévitablement des pertes thermiques en périphérie du panache. De l'équilibre entre ces phénomènes dépend la viabilité du stockage sur le long terme : une advection régionale trop marquée risque d'emporter la "bulle thermique" hors de portée des puits d'extraction avant la saison de décharge hivernale.

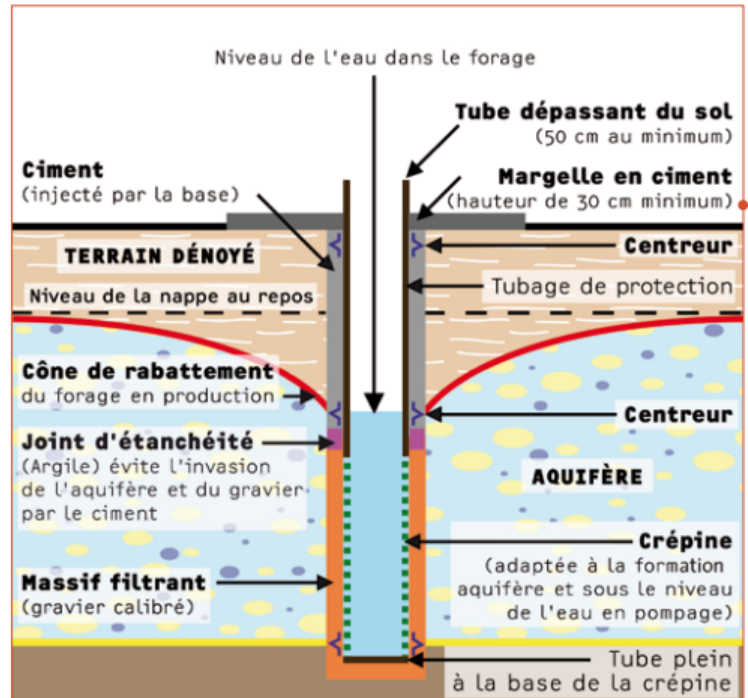


FIGURE 2.2 – Coupe schématique de l'équipement d'un forage géothermique sur nappe (tubage, crépine et système de pompage). Source : ADEME et al. (2008).

2.3.3 L'estimation analytique de l'encombrement thermique

Dans les phases de pré-faisabilité d'un projet ATES, avant d'engager des modélisations numériques tridimensionnelles coûteuses, l'extension spatiale du panache thermique est couramment estimée par des modèles analytiques simplifiés. L'équation du cylindre (souvent associée au modèle de Balke) est la méthode d'approximation macroscopique la plus répandue (Bloemendal et al., 2015).

Ce modèle pose l'hypothèse que la chaleur se propage radialement et uniformément autour du puits d'injection dans un milieu poreux homogène, en négligeant temporairement l'écoulement naturel de la nappe. Il permet de définir un Rayon Thermique (R_{th}) théorique en fonction du volume d'eau saisonnier injecté et du ratio des capacités thermiques entre le fluide et la matrice solide. L'obtention de ce rayon est une étape géométrique indispensable : elle permet de définir l'espacement de sécurité minimal entre le puits chaud et le puits froid (une heuristique courante fixant cette distance à $3 \times R_{th}$) afin de prévenir tout risque de court-circuit thermique en fin de saison.

2.4 Application au contexte de Louvain-la-Neuve et contraintes

L'implantation d'un système à la Place Croix du Sud nécessite une adaptation rigoureuse aux spécificités lithostratigraphiques et administratives locales.

2.4.1 L'aquifère des Sables du Bruxellien

L'horizon de stockage privilégié à Louvain-la-Neuve est la formation des Sables du Bruxellien (Éocène moyen). Selon les modélisations réalisées par Van Bambeke (2024), cet

aquifère sablonneux présente une bonne conductivité hydraulique, bien que son épaisseur varie à l'échelle du plateau.

Dans sa récente cartographie du potentiel géothermique, un consortium mené par le SPW a mis en place une méthodologie d'évaluation stricte pour les systèmes ouverts (SPW Énergie et al., 2023). Le "potentiel" d'un site est calculé sous forme de score normalisé, pondéré à 90% par le débit de production théorique de l'aquifère, et à 10% par la profondeur de la nappe (impactant les coûts de pompage). Dans ce référentiel, les formations sableuses wallonnes se voient attribuer un débit de production médian de référence estimé à environ 12 m³/h pour un rabattement admissible de 2,5 m. Toutefois, la Place de la Croix du Sud est classée en zone de « potentiel très favorable (++) » sur le portail WalOnMap, ce qui suggère des caractéristiques hydrodynamiques locales nettement supérieures à la moyenne régionale, capables de soutenir les débits requis par des infrastructures tertiaires massives.

2.4.2 Interférences thermiques et géochimie

Le dimensionnement d'un système ATES pour les bâtiments de la Place Croix du Sud doit intégrer plusieurs contraintes limitantes, au premier rang desquelles figurent les interactions fluides-roches :

- **Enjeux géochimiques et contrôle du ΔT** : La modification cyclique de la température de l'eau souterraine perturbe l'équilibre thermodynamique naturel de la nappe, affectant directement la solubilité des minéraux dissous. L'amplitude de l'écart de température (ΔT) imposé lors de la réinjection constitue donc un paramètre critique d'exploitation. D'une part, un ΔT trop important au droit du puits chaud diminue la solubilité des carbonates, provoquant leur précipitation et entraînant un entartrage rapide des échangeurs thermiques et des crépines. D'autre part, un refroidissement excessif au puits froid, couplé à une éventuelle oxygénation accidentelle du circuit, perturbe l'équilibre d'oxydoréduction et favorise la précipitation du fer et du manganèse. Le plafonnement strict du ΔT est par conséquent indispensable pour garantir la stabilité géochimique de l'eau et prévenir tout risque de colmatage irréversible des ouvrages.

2.4.3 Le cadre réglementaire wallon

En Région wallonne, la géothermie dite "peu profonde" (ou de très basse énergie) est officiellement définie comme l'exploitation des ressources du sous-sol situées à une profondeur inférieure à 500 mètres (SPW Énergie et al., 2023). Pour évaluer et standardiser le potentiel de ces systèmes ouverts à l'échelle régionale, le Service Public de Wallonie (SPW) s'appuie sur des hypothèses thermodynamiques de référence, limitant par exemple le temps de fonctionnement moyen à 2 000 heures/an et le différentiel de température (ΔT) à 6 K (SPW Énergie et al., 2023).

Sur le plan législatif, il existe actuellement un vide normatif concernant la température exacte de réinjection. Comme le souligne le SPW Énergie et al. (2023), « il n'y a pas de norme fixe en Région wallonne [pour la réinjection], l'estimation de l'impact est donc réalisée au cas par cas par les agents de l'Administration compétente (SPW-ARNE) ». Cette incertitude impose aux concepteurs d'adopter des régimes de température très conservateurs pour faciliter l'obtention des autorisations environnementales.

2.5 Le défi de la durabilité : Gérer le déséquilibre thermique

L'un des défis majeurs de la technologie ATES ne réside pas uniquement dans son fonctionnement intra-annuel, mais dans sa durabilité à très long terme. En effet, les profils de charge des bâtiments tertiaires sous climats tempérés sont rarement parfaitement symétriques, la demande de chaleur hivernale excédant souvent largement la demande de refroidissement estivale.

Si l'aquifère subit une extraction nette de calories année après année sans régénération adéquate, une altération progressive et cumulative de la température de la masse d'eau s'installe. Ce phénomène, appelé "dérive thermique" (thermal drift ou thermal depletion), dégrade saison après saison le COP des machines thermiques jusqu'à pouvoir rendre l'installation totalement inopérante.

Comme le soulignent Fleuchaus et al. (2018) dans leur revue mondiale des systèmes ATES, la pérennité environnementale et technique d'un projet impose de garantir un équilibre thermique rigoureux sur le long terme. C'est pourquoi la conception moderne, fermement soutenue par les autorités de tutelle, exige des modélisations prédictives démontrant la stabilité de la ressource géothermique sur des horizons temporels allant de 25 ans à plus d'un siècle (Bloemendal and Olsthoorn, 2018). L'atteinte de cet équilibre implique obligatoirement le couplage de l'ATES avec des sources thermiques d'appoint visant à recharger artificiellement le réservoir souterrain durant l'été.

2.6 Évolutions technologiques et intégration systémique de l'ATES

Pour maximiser les performances environnementales et économiques d'un système ATES, la littérature scientifique récente met en évidence l'importance de dépasser le simple fonctionnement en mode pompe à chaleur (PAC) réversible pour s'orienter vers des couplages intelligents.

2.6.1 Le rafraîchissement quasi-passif (Géocooling direct)

Bien que la pompe à chaleur soit indispensable en hiver pour élever le niveau de température de l'eau dans les bâtiments, son activation en été pour le refroidissement est souvent énergivore. La technologie contemporaine privilégie le géocooling direct (ou free-cooling). Dans cette configuration, le compresseur de la machine thermique est entièrement contourné, seul un échangeur à plaques transfère les calories de l'aquifère (naturellement entre 10 °C et 12 °C) vers les boucles d'eau glacée du bâtiment (Fleuchaus et al., 2018).

L'adoption du géocooling direct permet de faire bondir l'Efficacité Énergétique Frigorifique (EER) de valeurs standards (3 à 5 avec compresseur) à des valeurs spectaculaires dépassant souvent 30, puisque seule l'électricité des pompes de circulation reste appelée.

2.6.2 Le couplage hybride pour la régénération de la nappe

Pour remédier au problème de dérive thermique propre aux climats européens (Rad et al., 2013), la littérature préconise la transition vers des systèmes ATES "actifs" ou hybrides. Rad et al. (2013) démontrent que le couplage d'un ATES avec des capteurs

solaires thermiques en toiture est l'une des solutions les plus efficaces : la chaleur solaire excédentaire captée en été est directement réinjectée dans l'aquifère, régénérant le gisement thermique pour l'hiver suivant. Cette recharge artificielle favorise un bilan annuel neutre, condition sine qua non à l'obtention des permis d'exploitation environnementaux. D'autres sources thermiques alternatives, telles que la valorisation de la chaleur fatale industrielle ou des laboratoires, ou l'utilisation d'aéroréfrigérants (dry coolers) complètent efficacement ce catalogue de solutions.

2.6.3 Synergie avec les réseaux thermiques de 5^e génération (5GDHC)

Historiquement conçus pour des bâtiments isolés, les systèmes ATES sont de plus en plus intégrés dans des réseaux de chaleur urbains de nouvelle génération. La littérature définit aujourd'hui les réseaux thermiques de 5^e génération (5GDHC - *5th Generation District Heating and Cooling*) comme des boucles décentralisées fonctionnant à très basse température ambiante, proche de celle du sol (Buffa et al., 2019).

Dans ces écosystèmes, l'ATES agit comme le "poumon thermique" du réseau. Il permet notamment de stocker les excédents d'énergie provenant d'autres sources renouvelables intermittentes et locales (comme une centrale de cogénération biomasse produisant de l'électricité et de la chaleur fatale en été) pour les restituer lors des pics de demande hivernaux. Ce couplage sectoriel (chaleur, froid, électricité locale) pouvait représenter une approche de pointe pour la décarbonation profonde des campus universitaires (Buffa et al., 2019).

Cette approche théorique trouve d'ailleurs un écho direct et concret à Louvain-la-Neuve. En effet, le projet de développement du futur éco-quartier Athéna-Lauzelle prévoit de s'appuyer précisément sur cette synergie technologique. Conçu par l'opérateur local Resolia, ce futur réseau thermique de 5^e génération distribuera de l'eau à très basse température pour alimenter les infrastructures en chauffage et en refroidissement, en valorisant massivement les ressources géothermiques locales (Resolia, 2024). L'intégration d'un système géothermique à la Place de la Croix du Sud s'inscrit donc en parfaite cohérence avec la vision urbanistique et énergétique globale de la ville.

Chapitre 3

Matériel et méthodes

Afin de vérifier les hypothèses formulées précédemment et de pré-dimensionner le système de stockage thermique intersaisonnier (ATES) pour les nouveaux bâtiments de la Place Croix du Sud, une méthodologie quantitative basée sur la prospection géophysique in situ, la modélisation spatiale et l'évaluation thermodynamique a été développée. Ce chapitre détaille les outils, les données d'entrée et les démarches de calcul qui structurent cette étude.

3.1 Collecte des données et paramétrisation du site

L'évaluation de la faisabilité nécessite le croisement de données énergétiques, d'archives hydrogéologiques et de mesures géophysiques de terrain.

3.1.1 Profils de charge thermique des bâtiments

La première étape consiste à quantifier les besoins énergétiques. Les profils de demande en chauffage (hiver) et en refroidissement (été) des bâtiments de la Place Croix du Sud seront établis sur la base des Cahiers Spéciaux des Charges (CSC) des rénovations en cours et des relevés de compteurs récents. Ces données de charge thermique (exprimées en MWh/an) et de puissance de pointe (en kW) permettront de définir la quantité d'énergie à stocker et à extraire de l'aquifère.

3.1.2 Paramètres hydrogéologiques de référence

Les propriétés du sous-sol local seront extraites de la littérature scientifique et des bases de données régionales. Cette étude s'appuiera notamment sur les modélisations de Van Bambeke (2024), le portail WalOnMap et les données du SPW Énergie et al. (2023) pour extraire les caractéristiques géologiques (succession des couches, conductivité hydraulique K , etc.). Les relevés altimétriques et les cotes piézométriques historiques issus de ces travaux de référence, indispensables au calage hydrodynamique du modèle, sont détaillés dans l'Annexe C.

3.1.3 Campagne géophysique et modélisation de l'aquifère (Méthode H/V)

L'épaisseur saturée de l'aquifère, paramètre limitant pour l'encombrement thermique, n'étant pas uniforme, une cartographie de l'interface Bruxellien/Landénien a été réalisée. Pour pallier le manque de données de forages récents sous la Place Croix du Sud, des mesures géophysiques passives ont été réalisées (mesures sismiques), en appliquant la méthode d'analyse du rapport spectral H/V (ou méthode de Nakamura). Cette approche, éprouvée par Molron (2015) pour l'estimation de la couverture sédimentaire des couches géologiques, s'articule en trois phases :

1. **Acquisition in situ** : Des mesures du bruit sismique ambiant ont été effectuées sur le campus à l'aide de sismomètres à trois composantes. Ces enregistrements permettent de capter la résonance générée par le contraste d'impédance acoustique entre les formations sableuses meubles et le substratum plus rigide (Landénien argileux ou socle de Brabant).
2. **Traitement et calibration** : Les signaux ont été traités pour extraire la fréquence fondamentale de résonance (f_0) de chaque point. Afin de convertir ces fréquences en profondeur ($h = V_s/4f_0$), une calibration de la vitesse des ondes de cisaillement (V_s) a été réalisée au droit des piézomètres existants, dont la profondeur du socle est connue avec certitude. La localisation de ces points de référence (SGB 117W0341 et 117W0348) est détaillée en **Annexe A.1**, page 60.
3. **Modélisation spatiale (SIG)** : Les profondeurs interpolées par la géophysique, couplées aux altitudes des eaux souterraines (Z_{nappe}) issues des piézomètres, ont été intégrées dans un modèle SIG (ArcGIS). Une interpolation par krigeage ordinaire a permis de générer la carte continue de l'épaisseur saturée exploitable.

3.1.4 Conversion des fréquences en épaisseurs

La méthode H/V repose fondamentalement sur la relation théorique du quart d'onde, qui lie l'épaisseur d'une couche sédimentaire (h) à sa fréquence de résonance fondamentale (f_0) :

$$h = \frac{V_s}{4 \cdot f_0} \quad (3.1)$$

où V_s représente la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement (m/s) au sein de la couche.

Cependant, cette équation stricte suppose que la vitesse V_s est constante sur toute la colonne sédimentaire. Dans la réalité géologique, la compaction des sédiments meubles (comme les sables tertiaires) augmente avec la profondeur, ce qui entraîne une augmentation progressive de la vitesse V_s . Pour modéliser ce gradient vertical de vitesse, la littérature géophysique démontre qu'il est nécessaire de remplacer la relation linéaire du quart d'onde par une relation empirique non linéaire, prenant la forme d'une loi de puissance (*Power-law*) :

$$h = a \cdot f_0^b \quad (3.2)$$

Dans cette formulation, l'exposant b traduit la dynamique d'augmentation de la vitesse avec la profondeur, tandis que le coefficient multiplicateur a est un paramètre régional qui dépend de la lithologie locale.

Calibration locale sur les forages de référence 117W0341 et 117W0347 (GISEL)

Afin de pouvoir utiliser cette loi de puissance sur le site de la Place Croix du Sud, une étape de calibration a été réalisée sur deux points de contrôle. Les travaux régionaux de Molron (2015) sur ce type de matrice sableuse suggèrent un exposant $b = -1,58$. Pour déterminer précisément le coefficient local a , des mesures H/V de contrôle ont été réalisées au droit des forages historiques 117W0341 et 117W0347 (répertoriés dans la base de données GISEL), où la profondeur d'enfouissement du socle est documentée.

Les spectres géophysiques obtenus en ces 2 points ont permis de calibrer la formule, aboutissant à une valeur de $a = 125$.

La relation de conversion finale et calibrée, liant les données H/V à l'épaisseur de l'aquifère pour l'entièreté de la campagne de prospection, s'écrit donc :

$$h = 125 \cdot f_0^{-1,58} \quad (3.3)$$

C'est cette relation spécifique qui justifie et supprime l'approximation théorique du quart d'onde pour la modélisation géométrique du sous-sol.

3.2 Modélisation de l'écoulement et du transfert de chaleur

Pour estimer le comportement de la nappe phréatique sous l'effet des pompages et des injections, une approche modélisatrice analytique sera privilégiée.

3.2.1 Transport de chaleur et panache thermique

L'évolution spatio-temporelle du panache thermique a été approchée via un modèle analytique cylindrique reposant sur l'équation de Balke. Cette démarche géométrique permet de convertir les volumes d'eau saisonniers échangés en un Rayon Thermique théorique (R_{th}), calculé selon la relation suivante :

$$R_{th} = \sqrt{\frac{C_{p,eau}}{C_{aquifere}} \cdot \frac{V}{\pi \cdot H}} \quad (3.4)$$

où :

- $C_{p,eau}$ est la capacité thermique volumique de l'eau (en kWh/(m³ · K)).
- $C_{aquifere}$ est la capacité thermique volumique moyenne de l'aquifère saturé (en kWh/(m³ · K)).
- V représente le volume d'eau total injecté ou pompé sur une saison (en m³).
- H est l'épaisseur utile saturée de l'aquifère, telle que déterminée par la méthode géophysique H/V (en m).

L'obtention de ce rayon thermique a permis de quantifier l'encombrement de base de la "bulle" thermique dans le milieu poreux. Cette étape était indispensable pour évaluer l'emprise souterraine du système avant de définir les distances de sécurité heuristiques pour l'implantation du champ de puits.

3.3 Dimensionnement du champ de puits (ATES)

Sur la base de ces calculs thermodynamiques et spatiaux, le système ATES sera dimensionné selon les critères suivants :

- **Débits de pompage/injection (Q)** : Calculés via l'équation de la calorimétrie pour satisfaire la puissance de pointe appelée par la pompe à chaleur au condenseur.
- **Espacement des puits (L)** : La distance séparant les puits chauds des puits froids sera estimée de manière heuristique ($L \geq 3 \times R_{th}$) pour minimiser les risques de court-circuit thermique.

3.4 Évaluation technico-économique et analyse de sensibilité

Enfin, les résultats du dimensionnement permettront de calculer les indicateurs de performance.

3.4.1 Bilan énergétique, OPEX et CAPEX

Le COP saisonnier cible du système permettra de comparer la facture énergétique annuelle (OPEX) à la solution de référence au gaz. Parallèlement, une estimation des coûts d'investissement initiaux (CAPEX) sera modélisée. Le croisement de ces indicateurs permettra de calculer le Temps de Retour sur Investissement (ROI).

3.4.2 Analyse de sensibilité et d'incertitude

Dans la mesure où ce dimensionnement repose sur des hypothèses théoriques, une analyse de sensibilité sera menée. Les paramètres clés (tels que la dégradation du COP, ou la volatilité des tarifs) seront soumis à un stress-test pour confirmer la robustesse technico-économique du projet.

Chapitre 4

Analyse des charges et dimensionnement thermique

4.1 Caractérisation spatiale de l’aquifère et choix d’implantation

L’évaluation de la faisabilité physique du système ATES requiert une connaissance précise de la géométrie tridimensionnelle du réservoir sédimentaire. Cette section présente les résultats de la campagne de prospection géophysique passive menée sur le site de la Place Croix du Sud et détaille la transition des mesures de terrain vers un modèle d’épaisseur saturée exploitable.

4.1.1 Campagne de mesures sismiques et profondeurs déduites

La campagne de terrain a couvert l’ensemble de la zone d’étude à travers un maillage de 10 points d’acquisition autour de la Place Croix du Sud par la méthode du rapport spectral H/V (Figure 4.1). Cette répartition spatiale a été pensée pour cerner au mieux les variations locales de l’épaisseur de l’aquifère aux alentours des bâtiments.

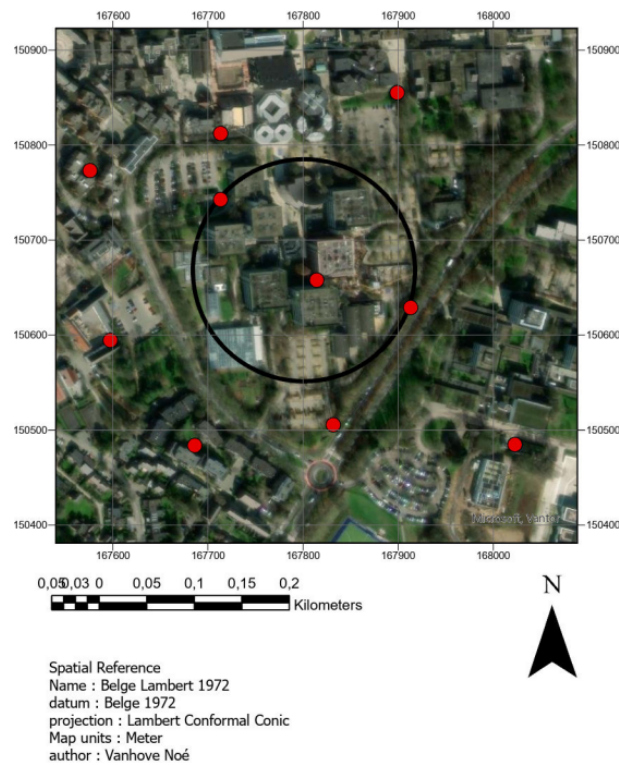


FIGURE 4.1 – Répartition spatiale des points de mesure géophysique passive (méthode H/V) sur le campus de Louvain-la-Neuve.

La Figure 4.2 illustre, à titre d'exemple, un spectre H/V typique obtenu lors de la prospection. Pour chaque point de mesure, la valeur de la fréquence fondamentale de résonance (f_0) extraite du graphique et utilisée pour les calculs correspond à la fréquence moyenne, lue au centre du pic d'amplitude maximale.

En appliquant la loi de puissance spécifiquement calibrée pour le site (détaillée dans la section Matériel et Méthodes) à ces fréquences moyennes, les profondeurs d'enfouissement du socle paléozoïque (h) ont pu être déduites pour chaque point du maillage où aucune donnée de forage n'était disponible.

L'intégralité des fréquences fondamentales mesurées et des épaisseurs relatives calculées est compilée de manière exhaustive dans l'Annexe D.1. Ces valeurs ponctuelles d'épaisseur ont ensuite servi de base de données d'entrée exclusive pour générer le modèle d'interpolation spatiale par krigeage sous ArcGIS (voir Figure B.3, Annexe B.2).

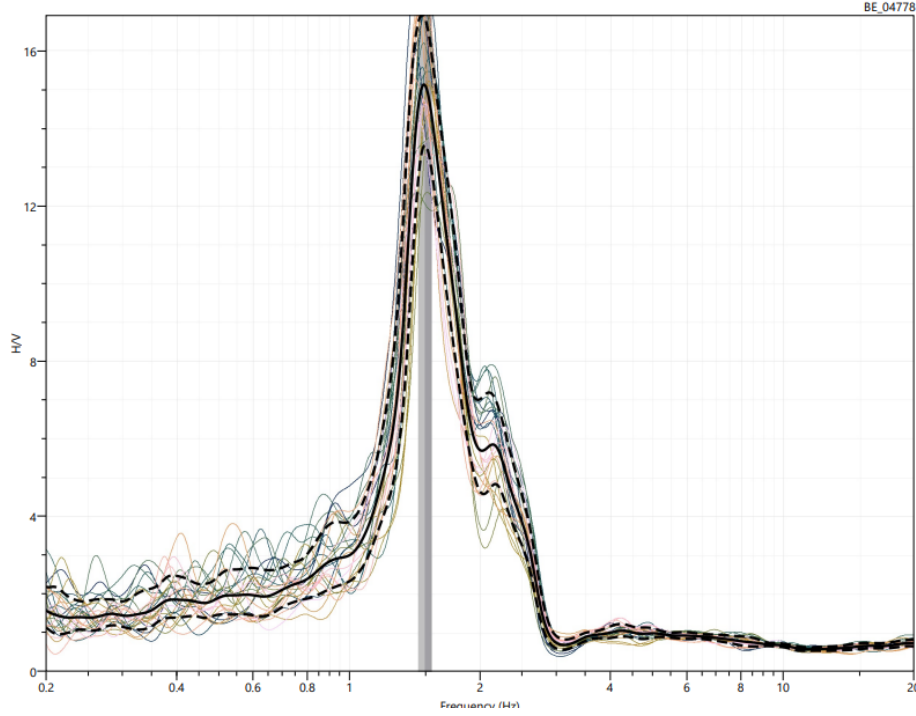


FIGURE 4.2 – Rapport spectral H/V obtenu au point de calibration 117W0341. L’axe des abscisses (X) représente la fréquence de vibration (en Hz) et l’axe des ordonnées (Y) correspond au ratio spectral H/V (facteur d’amplification adimensionnel). Le pic principal permet d’identifier la fréquence de résonance fondamentale (f_0) du sol (ligne verticale grise).

4.1.2 Modélisation de l’épaisseur saturée par algèbre matricielle

La profondeur brute d’enfouissement (h) issue du traitement géophysique ne traduit pas directement la morphologie du socle sous-jacent, la topographie de surface de Louvain-la-Neuve n’étant pas horizontale. Pour isoler la géométrie réelle du réservoir, une démarche d’algèbre cartographique sous SIG (ArcGIS) a été implémentée en combinant le Modèle Numérique de Terrain de l’altitude naturelle du sol de la zone autour de la Place Croix du Sud et les mesures piézométriques (retrouvable en Annexe C).

Deux interpolations par krigeage ordinaire ont d’abord été générées de manière indépendante (voir Annexes B.1 et B.2) :

1. Le modèle numérique de l’altitude absolue du toit du socle (Z_{socle}), calculé point par point par la relation $Z_{socle} = Z_{sol} - h$.
2. Le modèle numérique de la surface piézométrique de la nappe des Sables du Bruxelien (Z_{nappe}).

La carte finale de l’épaisseur saturée utile de l’aquifère (b), présentée en Figure 4.3, a été isolée par soustraction matricielle de ces deux surfaces ($b = Z_{nappe} - Z_{socle}$) via l’outil Raster Calculator.

Cette carte met en évidence une hétérogénéité spatiale majeure. On observe une augmentation très nette et continue de l’épaisseur saturée de la nappe au fur et à mesure que l’on se déplace vers le **Sud-Est** de la zone d’étude. Alors que l’épaisseur n’est que de **6 m** au nord-ouest, elle atteint une valeur maximale comprise entre **27 et 28 m** dans la zone

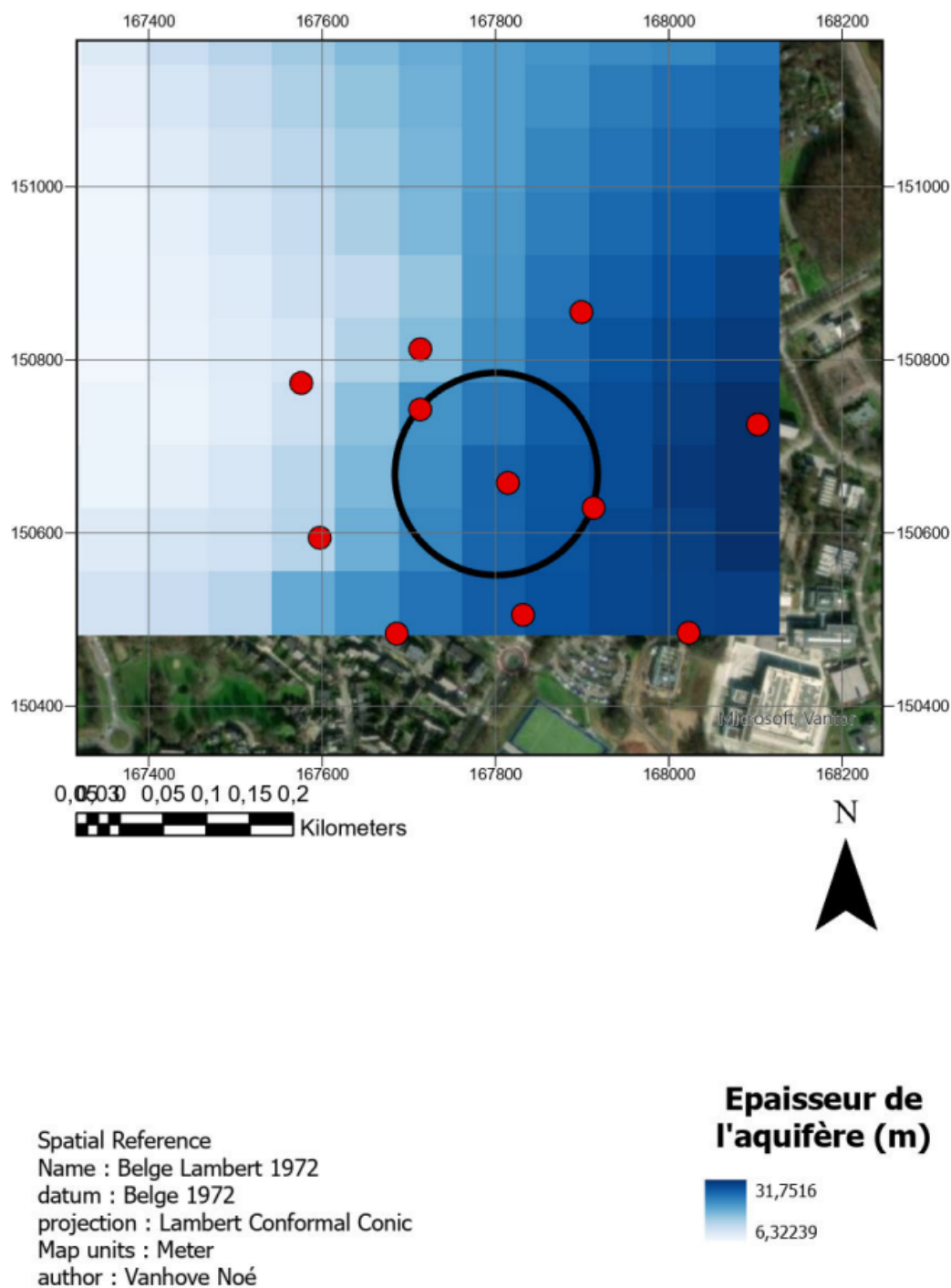


FIGURE 4.3 – Carte continue de l'épaisseur saturée (*b*) de l'aquifère des Sables du Bruxel-
 lien sous la Place Croix du Sud obtenue.

sud-est à proximité immédiate des bâtiments (matérialisée par le cercle), pour culminer à près de **32 m** plus à l'est, du côté du Cyclotron.

D'un point de vue hydrogéologique, ce résultat valide le choix d'implanter un futur champ éventuel de puits de l'ATES préférentiellement dans ce quadrant Sud-Est. Bien que l'aquifère soit encore plus épais en s'éloignant vers le Cyclotron, déporter les forages à une telle distance engendrerait des déperditions thermiques et des pertes de charge hydrau-

liques importantes dans le réseau de distribution de surface, pénalisant irrémédiablement le rendement global de l'installation. L'implantation serait donc restreinte à la périphérie directe des bâtiments.

4.1.3 Connexion hydraulique et complexe multicouche

Il est important de souligner que l'épaisseur saturée modélisée sous le site de la Croix du Sud (28 à 32 m) englobe à la fois les sables de la Formation du Bruxellien et ceux de la Formation de Hannut (Landénien).

Si, dans d'autres régions (comme à Bruxelles), ces deux entités sont séparées par une épaisse couche imperméable (les argiles de la Formation de Kortrijk, d'âge Yprésien), le contexte stratigraphique de Louvain-la-Neuve est fondamentalement différent. L'analyse des notices de la Carte géologique de Wallonie (Blockmans and Dumoulin, 2012) confirme que l'intense érosion marine ayant précédé le dépôt du Bruxellien a totalement raviné et fait disparaître la couche argileuse yprésienne dans ce secteur du Brabant wallon.

Cette absence locale d'horizon yprésien étanche est d'ailleurs confirmée par les données des forages historiques archivés et consultables sur le portail environnemental GISEL de la Région wallonne. Par conséquent, les sables du Bruxellien reposent ici en discordance directe sur les Sables du Landénien, sans aucun écran imperméable continu pour les séparer. Sur le plan hydrogéologique, ces deux formations constituent donc un complexe aquifère multicouche en parfaite connexion hydraulique. Cette continuité verticale justifie donc l'utilisation de l'épaisseur totale des sédiments meubles jusqu'au socle paléozoïque comme "épaisseur saturée utile" (H) pour la modélisation.

4.1.4 Profil hydrogéologique 2D et dynamique d'écoulement

Afin de synthétiser visuellement les résultats de l'interpolation spatiale et d'appréhender la géométrie réelle du réservoir souterrain, une coupe hydrogéologique bidimensionnelle a été extraite du modèle SIG. Comme l'illustre la Figure 4.4, ce profil de 500 m de long suit un transect traversant les bâtiments des Serres de la Place Croix du Sud selon un axe Sud-Est vers Nord-Ouest.

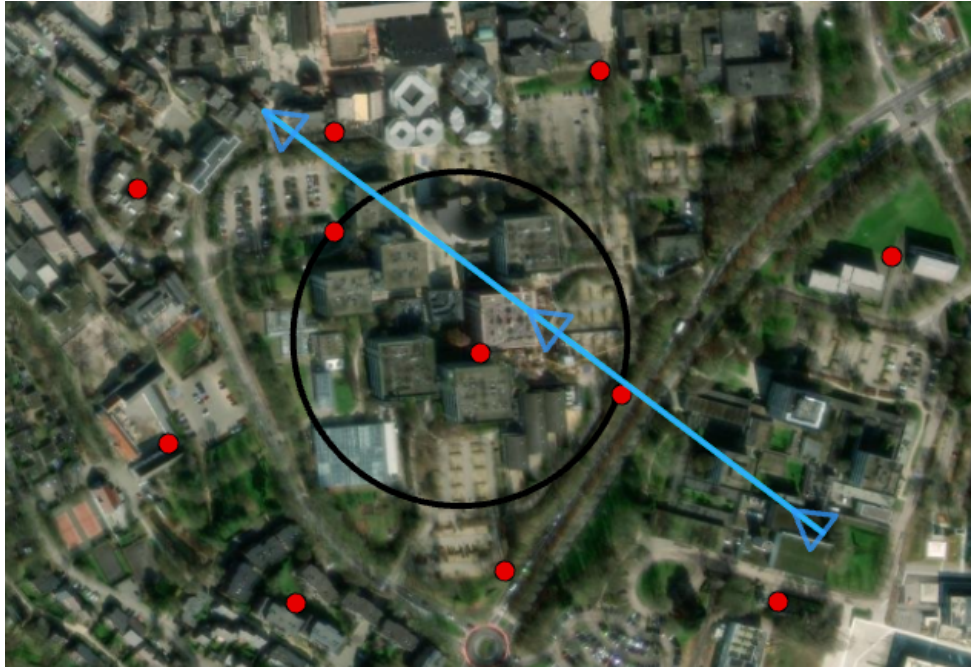


FIGURE 4.4 – Localisation du transect d'extraction du profil hydrogéologique (axe Sud-Est vers Nord-Ouest). La flèche bleue indique la direction régionale de l'écoulement souterrain.

Le profil résultant de cette coupe (Figure 4.5) croise les trois surfaces modélisées précédemment : la topographie du terrain naturel (Z_{sol}), la surface piézométrique de la nappe (Z_{nappe}) et le toit du socle paléozoïque (Z_{socle}).

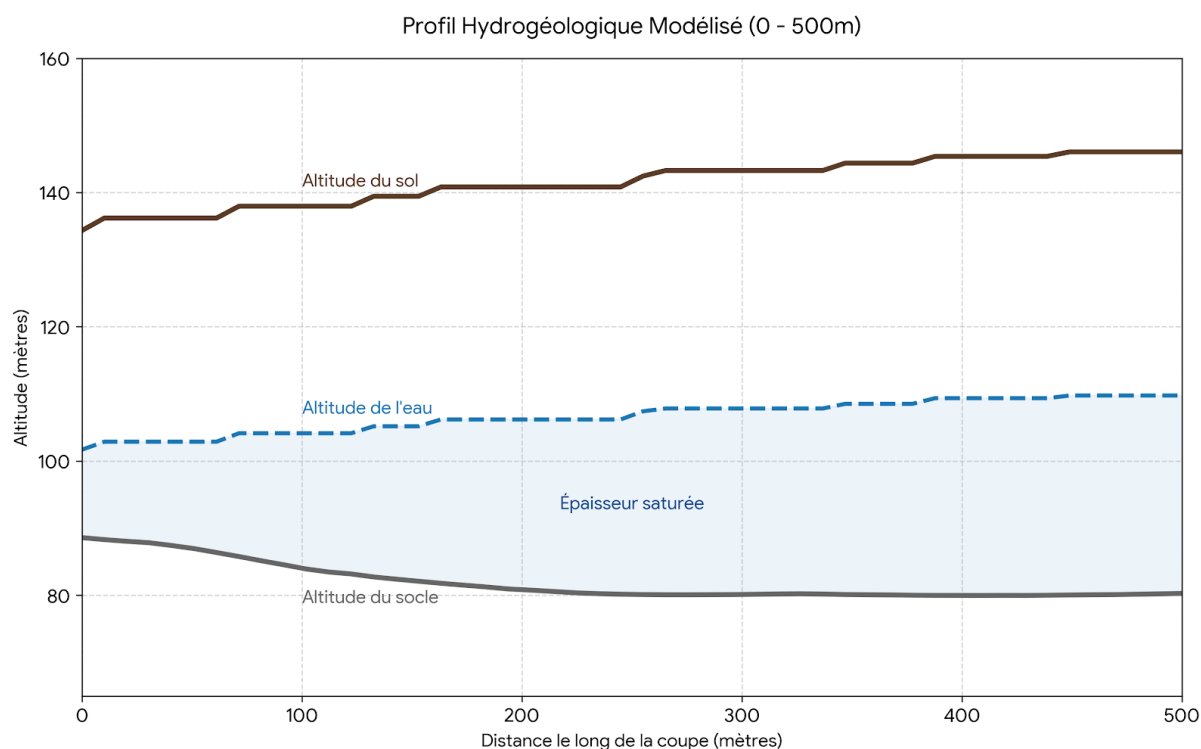


FIGURE 4.5 – Profil hydrogéologique modélisé (0 m au Nord-Ouest, 500 m au Sud-Est). L'aire bleutée représente l'épaisseur utile saturée du complexe aquifère sableux.

Trois éléments majeurs en découlent pour le système ATES :

- **La validation du gradient hydraulique :** La ligne en pointillés bleus (altitude de l'eau) montre une pente claire depuis l'extrémité Sud-Est (environ 110 m) vers le Nord-Ouest (environ 102 m).
- **L'épaississement de la zone saturée :** L'écart entre le niveau de l'eau et le socle illustre parfaitement l'hétérogénéité de la zone. Alors que l'épaisseur saturée se réduit à une quinzaine de mètres au Nord-Ouest (gauche du graphique), elle s'élargit pour atteindre une épaisseur d'environ 30 m au Sud-Est (droite du graphique).
- **Confirmation de l'implantation :** Ce profil 2D démontre que le quadrant Sud-Est de la Place Croix du Sud constitue la zone la plus épaisse de l'aquifère. Implanter les forages dans cette zone garantit une immersion maximale des crépines, pour soutenir les débits intensifs de l'ATES avec un rabattement minimal.

Cependant il convient de préciser que les Sables du Bruxellien et les Sables du Landénien ici ne sont pas départageables. La méthode géophysique H/V permet de détecter les fréquences acoustiques majeures et ne permet donc pas ici de différencier ces deux horizons sableux, ni de définir à quelle hauteur exacte se situe l'interface entre l'un et l'autre, cette approximation n'impacte en rien le dimensionnement. En effet en raison de l'absence locale de l'horizon argileux imperméable de l'Yprésien, le Landénien a perdu son étanchéité et se trouve en parfaite connexion hydraulique avec le Bruxellien. L'ensemble se comporte donc comme un unique grand réservoir libre et continu, justifiant l'utilisation de l'épaisseur saturée globale mesurée jusqu'au socle pour l'ingénierie du système.

Le cadre physique et géographique du réservoir souterrain étant ainsi délimité, le dimensionnement de l'installation doit à présent se confronter à la demande énergétique des infrastructures de surface. En effet, l'encombrement thermique et le nombre de forages dépendront directement des volumes d'eau à déplacer pour satisfaire les besoins énergétiques des bâtiments.

La prochaine étape du dimensionnement du système ATES repose donc sur la quantification précise des besoins thermiques (puissance de pointe et énergie annuelle) des trois bâtiments soumis aux rénovations majeures autour de la Place Croix du Sud : le bâtiment des Serres (SC14 b), Mendel (SC15 c) et Kellner (SC15 d). Ces trois infrastructures présentant des gabarits similaires, une analyse croisée des données de consommation et des spécifications techniques a été réalisée.

La Figure 4.6 présente une carte de localisation de la zone d'étude.

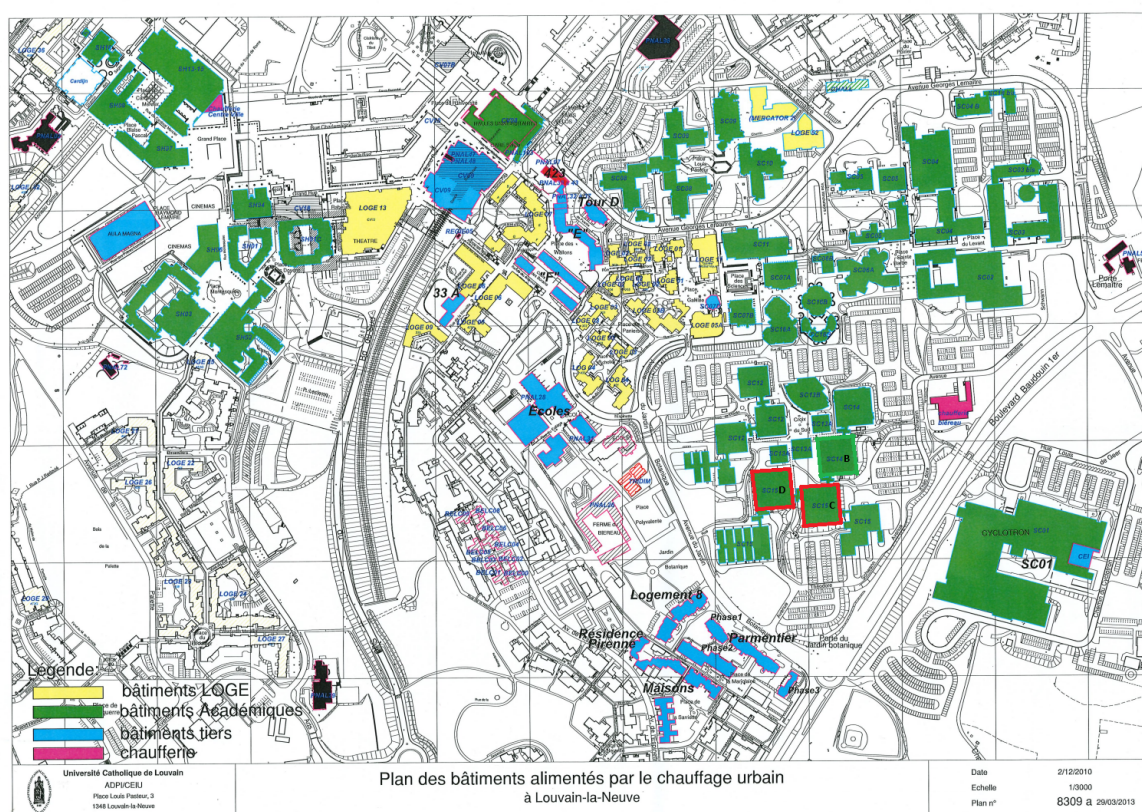


FIGURE 4.6 – Localisation des bâtiments de la Croix du Sud (SC14 b, SC15 c et SC15 d) sur le campus de Louvain-la-Neuve.

Cette mise en contexte géographique est essentielle pour la suite de l'analyse, notamment pour le positionnement des doublets ATES et la prise en compte des contraintes hydrogéologiques locales.

4.2 Analyse des consommations énergétiques annuelles

Les relevés de consommation de l'année 2024 (données compteurs de l'UCLouvain) mettent en évidence des disparités liées à l'état d'avancement des rénovations énergétiques

des bâtiments :

- **Bâtiment des Serres (SC14 b encadré vert) - Rénové** : Ce bâtiment, dont la rénovation est achevée, affiche une consommation thermique annuelle de **549 MWh**. Le mois de janvier représente la charge maximale avec 99,4 MWh. Ce profil de consommation constitue la ligne de base (baseline) pour les deux autres bâtiments en cours de rénovation.
- **Bâtiment Kellner (SC15 d encadré rouge) - Non rénové** : Avec une consommation de **1 148 MWh/an** (dont 222,5 MWh en janvier), ce bâtiment illustre les déperditions thermiques massives avant travaux.
- **Bâtiment Mendel (SC15 c encadré rouge) - En travaux** : La consommation mesurée de **133 MWh/an** reflète un état transitoire d'inoccupation partielle due au chantier.

Par extrapolation, une fois les rénovations de Mendel et Kellner achevées sur le standard des Serres, la demande thermique annuelle globale de ce pôle pour le chauffage devrait s'établir autour de **1 650 MWh/an** (soit 3×550 MWh).

4.3 Estimation de la puissance crête et des besoins en refroidissement

L'évaluation de la puissance crête (en kW) est fondamentale pour dimensionner le débit des pompes de puits de l'ATES. Cette valeur a été extraite du Cahier Spécial des Charges (CSC) des nouvelles installations HVAC du bâtiment Mendel.

4.3.1 Besoins calorifiques (Hiver)

Les spécifications techniques détaillées dans le Cahier Spécial des Charges (CSC) du bâtiment Mendel (Sweco Belgium, 2024) prévoient une émission calorifique totale utile d'environ **281 kW** (répartie sur plus de 150 pièces). Cette puissance crête est thermiquement cohérente avec les relevés du bâtiment des Serres : une consommation réelle de 99,4 MWh mesurée en janvier correspond à une puissance moyenne continue d'environ 134 kW. Le dimensionnement des émetteurs à environ 280 kW est donc parfaitement justifié pour absorber les pics de relance matinaux et les périodes de grand froid.

4.3.2 Besoins frigorifiques (Été)

L'inventaire des unités de refroidissement (fancoils et boucles froides) prévu dans le cadre de la rénovation (Sweco Belgium, 2024) permet de quantifier la puissance frigorifique totale installée d'un bâtiment à **164,3 kW**. Par extrapolation aux trois bâtiments de la Place Croix du Sud et en tenant compte d'un ratio d'environ 500 heures équivalentes à pleine charge pour le rafraîchissement tertiaire en Belgique, la demande d'énergie frigorifique annuelle globale est estimée à environ **246 MWh/an**.

4.4 Implications pour le système ATES

À l'échelle des trois bâtiments de la Place Croix du Sud, le système géothermique devra donc être capable de fournir de manière simultanée :

- Une puissance de pointe cumulée en mode chauffage estimée à **840 kW** (soit 3×280 kW).
- Une puissance de pointe cumulée en mode refroidissement estimée à **490 kW** (soit 3×164 kW).

Ces puissances dicteront les débits de pompage (Q) à extraire de l'aquifère des Sables du Bruxellien, limités par la transmissivité de la nappe.

4.5 Indice de performance énergétique et ratios de surface

Afin de valider la cohérence des relevés de compteurs et de standardiser les profils de charge pour les futures simulations géothermiques, l'énergie thermique totale a été rapportée à la surface de plancher des bâtiments.

Les infrastructures étudiées (Mendel, Kellner, Serres) partagent une typologie architecturale similaire, constituée d'environ 5 niveaux. En se basant sur les données patrimoniales officielles de l'université attestant d'une surface brute de plancher de $6\,500\text{ m}^2$ pour le bâtiment des Serres (UCLouvain, 2024a), les Indices de Performance Énergétique (IPE) relatifs au chauffage se déclinent comme suit :

- **Profil "Rénové" (Standard Bâtiment des Serres)** : La consommation de 549 MWh/an correspond à un indice d'environ $85\text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$. Cette valeur est excellente et caractéristique d'un bâtiment tertiaire ayant bénéficié d'une rénovation énergétique lourde (standard "basse énergie"), limitant drastiquement les déperditions thermiques.
- **Profil "Avant travaux" (Standard Kellner)** : La consommation de $1\,148\text{ MWh/an}$ se traduit par un indice proche de $177\text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$. Ce ratio illustre les performances typiques du parc immobilier universitaire des années 1970 avant intervention, marqué par une perméabilité thermique plus importante.

La demande énergétique est dès lors estimée à $1\,650\text{ MWh/an}$ pour les trois bâtiments à rénover se fondant sur un ratio de $85\text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$. Ce choix s'appuie sur une base concrète : il correspond aux performances réelles du premier bâtiment déjà réhabilité sur le site. Utiliser cette référence locale permet de dimensionner l'ATES de manière prudente et pourrait servir de bases pour de prochaines extensions.

4.6 Dimensionnement hydro-thermodynamique et calcul des débits

Une fois les puissances de pointe appelées par les bâtiments identifiées, il est nécessaire de déterminer le débit d'eau souterraine requis pour satisfaire cette demande. Le transfert d'énergie entre l'aquifère et la boucle primaire du bâtiment est régi par l'équation fondamentale de la calorimétrie (Équation 4.1) :

$$P = Q \cdot \rho_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

où :

- P est la puissance thermique crête à échanger (en kW).
- Q est le débit volumique de pompage requis (en m^3/s).
- ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau souterraine (approximée à $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$).

- $c_{p,eau}$ est la capacité thermique massique de l'eau (environ $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$).
- ΔT est le différentiel de température entre l'eau pompée et l'eau réinjectée (en K ou $^{\circ}C$).

Pour extraire le débit Q , l'équation est réécrite et adaptée pour obtenir un résultat en mètres cubes par heure (m^3/h), telle qu'exprimée par l'Équation 4.2 :

$$Q = \frac{P \cdot 3600}{\rho_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T} \quad (4.2)$$

4.6.1 Hypothèses thermodynamiques et de dimensionnement

Avant de procéder au calcul des débits d'eau souterraine (Q), plusieurs hypothèses physiques et thermodynamiques doivent être posées.

1. Propriétés et contraintes de l'eau souterraine

Les paramètres constants liés à la source géothermique sont fixés comme suit :

- **Masse volumique** (ρ_{eau}) : $1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$.
- **Capacité thermique massique à pression constante** ($c_{p,eau}$) : $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- **Différentiel de température** (ΔT) : Limité à $5^{\circ}C$ (ou 5 K). La température naturelle de la nappe étant d'environ $11^{\circ}C$, l'eau sera réinjectée à $6^{\circ}C$ en hiver et à $16^{\circ}C$ en été. Ce choix conservateur est dicté par trois impératifs de sécurité :
 - **Mécanique** (Risque de gel) : Un ΔT plus important abaisserait l'eau à $3^{\circ}C$, rapprochant le système du point de congélation dans l'échangeur à plaques.
 - **Géochimique** (Colmatage) : Un choc thermique excessif modifie la solubilité des minéraux (fer, manganèse, carbonates), risquant de colmater irréversiblement les crépines.
 - **Légal et environnemental** : La réglementation wallonne, via le Département de l'Environnement et de l'Eau du SPW, impose de limiter l'altération thermique de l'aquifère afin de préserver son écosystème naturel et de ne pas compromettre d'éventuels captages voisins (Service Public de Wallonie (SPW), 2024).

2. Régimes de fonctionnement des équipements de surface

Le dimensionnement thermodynamique diffère radicalement selon la saison :

- **En mode chauffage (Hiver)** : L'énergie est valorisée par une pompe à chaleur (PAC) eau-eau. L'eau de la nappe à $11^{\circ}C$ cède la chaleur à basse température à l'évaporateur. L'hypothèse de calcul retenue pour le Coefficient de Performance (COP) saisonnier de la machine est de 4.0.

Justification du COP cible et séparation des circuits : L'atteinte d'un COP de 4.0 est ici rendue possible par deux facteurs décisifs. Premièrement, la nature tertiaire des bâtiments dispense le système géothermique de la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS), évitant ainsi les cycles de chauffe à très haute température ($60^{\circ}C$ à $65^{\circ}C$) exigés pour la prévention de la légionellose. Deuxièmement, l'amélioration de l'enveloppe thermique des bâtiments permet d'adopter des émetteurs fonctionnant à plus basse température (typiquement $45^{\circ}C/35^{\circ}C$). Ainsi, l'aquifère ne fournit pas l'entièreté de la chaleur : une part de l'énergie finale est générée par le travail mécanique du compresseur.

Il est par ailleurs crucial de rappeler que le système repose sur une séparation hydraulique stricte (via un échangeur à plaques). L'eau de la nappe, pompée à $11^{\circ}C$, est refroidie à $6^{\circ}C$ à l'évaporateur et directement réinjectée, tandis que l'eau du circuit fermé du bâtiment est réchauffée de $35^{\circ}C$ à $45^{\circ}C$ au condenseur,

protégeant ainsi l'aquifère de toute contamination et les infrastructures de toute corrosion.

- **En mode refroidissement (Été) :** Le système privilégie le **géocooling** direct. L'eau de la nappe à 11°C est suffisamment froide pour rafraîchir directement les boucles d'eau glacée du bâtiment via l'échangeur intermédiaire, sans activation du compresseur de la PAC

4.6.2 Débits maximaux théoriques (m^3/h)

En appliquant le principe de conservation de l'énergie aux puissances crêtes cumulées des trois bâtiments, le débit maximal sollicitant la nappe est estimé pour chaque saison.

1. Phase de décharge (Chauffage hivernal)

La puissance de pointe appelée par les bâtiments au condenseur de la PAC est de $P_{\text{batiment}} = 840 \text{ kW}$. En déduisant l'apport du compresseur électrique, la puissance thermodynamique à extraire de la nappe (P_{aquifere}) s'écrit :

$$P_{\text{aquifere}} = P_{\text{batiment}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\text{COP}}\right)$$

$$P_{\text{aquifere}} = 840 \cdot \left(1 - \frac{1}{4,0}\right) = 840 \cdot 0,75 = \mathbf{630 \text{ kW}}$$

Le débit horaire maximal requis au niveau du puits d'extraction chaud est donc :

$$Q_{\text{hiver}} = \frac{P_{\text{aquifere}} \cdot 3600}{\rho_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T} = \frac{630 \cdot 3600}{1000 \cdot 4,18 \cdot 5} \approx \mathbf{108,5 \text{ m}^3/\text{h}}$$

2. Phase de charge (Refroidissement estival)

En mode géocooling direct, la puissance frigorifique de pointe à dissiper ($P_{\text{batiment}} = 490 \text{ kW}$) est supposée intégralement transférée à l'eau souterraine.

Le débit horaire maximal à extraire du puits froid pour le rejet de chaleur est :

$$Q_{\text{ete}} = \frac{490 \cdot 3600}{1000 \cdot 4,18 \cdot 5} \approx \mathbf{84,4 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Nuance technique sur le pincement de l'échangeur :

L'hypothèse d'une réinjection à 16°C face à une boucle d'eau glacée de bâtiment tournant à $14^{\circ}\text{C}/18^{\circ}\text{C}$ implique un pincement thermique (pinch point) très serré (de 2°C à 3°C) au niveau de l'échangeur à plaques de barrage. Si cela est thermodynamiquement possible, cette contrainte exigerait néanmoins un échangeur en titane fortement surdimensionné, et donc économiquement pénalisant. Dans la pratique d'ingénierie, il est souvent nécessaire de réduire le ΔT côté nappe (par exemple, viser une réinjection à 14°C) pour garantir un pincement plus réaliste, ce qui augmenterait mécaniquement le débit de pompage estival calculé ci-dessus.

4.6.3 Justification du mode de refroidissement quasi-passif (Géocooling)

Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse d'un refroidissement estival par géocooling direct a été privilégiée :

1. **Adéquation des températures** : Les systèmes de distribution de froid récents fonctionnent sous des régimes d'eau dits "doux" ($14^{\circ}\text{C}/18^{\circ}\text{C}$). L'eau de la nappe à 11°C est théoriquement suffisante pour assurer ce rafraîchissement.
2. **Efficacité (EER) exponentielle** : Le compresseur étant éteint, la seule électricité consommée est celle des pompes de circulation. L'EER global peut dépasser 30, soit pour chaque kW électrique de pompe consommé, 30 kW d'énergie thermique peuvent être déplacés.
3. **Limite thermique d'injection** : Le géocooling évite d'ajouter la chaleur du travail du compresseur électrique dans la boucle d'eau réinjectée.

4.6.4 Conclusion sur le dimensionnement hydraulique

Le débit de pointe hivernal corrigé s'établissant à $108,5\text{ m}^3/\text{h}$, l'architecture du système géothermique nécessitera la répartition de la charge sur plusieurs forages afin d'assurer un débit de pompage soutenable par l'aquifère.

4.7 Faisabilité hydrogéologique et architecture du champ de puits

La demande maximale calculée à $108,5\text{ m}^3/\text{h}$ représente une contrainte hydraulique majeure pour la conception.

4.7.1 Les limites du puits unique et le choix du champ de puits

Concentrer la totalité du débit de pointe sur un seul puits de pompage provoquerait un rabattement du niveau piézométrique critique. Pour pallier ces limites, le système ATES devra être conçu sous la forme d'un **champ de puits**. En visant un débit unitaire optimisé et plus réaliste de $36,1\text{ m}^3/\text{h}$ par forage capacitif, la configuration optimale nécessitera la réalisation de **3 doublets** (soit 6 forages au total). Cette architecture a pour but de répartir la charge hydraulique.

4.7.2 Données de terrain

Imposer un tel débit unitaire de $36,1\text{ m}^3/\text{h}$ par forage pourrait encore paraître audacieux au regard de la médiane régionale wallonne pour le Bruxellien, estimée à $12\text{ m}^3/\text{h}$. Toutefois, cette valeur régionale, mise en évidence par le SPW (2023), découle d'une hypothèse méthodologique stricte limitant arbitrairement le rabattement maximal à 2,5 m afin de pouvoir standardiser la cartographie géothermique à l'échelle de tout le territoire wallon.

Or, ce seuil de 2,5 m constitue une balise statistique de référence et non un plafond technique ou légal infranchissable. La faisabilité d'un pompage intensif dépend intimement de l'épaisseur saturée locale et de la transmissivité réelle de l'aquifère. Autour de la place de la Croix du Sud, la prospection géophysique (méthode H/V) a confirmé une épaisseur saturée importante, dépassant les **30 mètres**. Surtout, l'exploitation de rapports historiques d'essais de pompage réalisés par l'UCLouvain

sur les captages universitaires proche de la zone propice (notamment la zone incluant les puits PC1/PC2 et les piézomètres S21 S22 S28 S30) permet de substituer les approximations régionales par des données plus précises (Unité de Génie Civil et Environnemental (GCE), 2005).

4.7.3 Évaluation du rabattement hydrodynamique et analyse de sensibilité

Afin de valider définitivement la faisabilité hydraulique du système au droit de la zone d'étude, une modélisation du rabattement de la nappe a été réalisée pour le débit de pointe maximal d'un forage (36,1 m³/h, soit 0,01003 m³/s). L'évaluation repose sur l'équation de Thiem, qui régit l'écoulement radial convergent en régime permanent au sein d'un aquifère :

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{R}{r_w} \right)$$

Où :

- s_w représente le rabattement maximal au droit du forage (m) ;
- Q est le débit de pompage maximal (0,01003 m³/s) ;
- T est la transmissivité locale de l'aquifère (m²/s) ;
- R est le rayon d'influence hydrodynamique, fixé de manière conservatrice à 150m sur base de la formule empirique de Sichardt ;
- r_w est le rayon nominal du puits de forage, fixé à 0,125 m.

Compte tenu de l'hétérogénéité documentée des sables du Bruxellien proche de la zone propice, où la perméabilité (K) varie fortement localement de 10⁻⁴ à 10⁻³ m/s (Unité de Génie Civil et Environnemental (GCE), 2005), une analyse de sensibilité a été menée en confrontant le modèle aux bornes de transmissivité associées à l'épaisseur saturée de 30 mètres :

1. **Scénario pessimiste** ($T_{min} = 3 \cdot 10^{-3}$ m²/s) : Dans l'hypothèse d'une zone où le sable présente une conductivité plus faible, le rabattement maximal calculé est de **3,76 mètres** (D.2). Face à l'épaisseur saturée disponible de 30 mètres, cet abaissement reste confiné à environ 12,5 % de la colonne d'eau, excluant tout risque de dénoyage des pompes.
2. **Scénario optimiste** ($T_{max} = 3 \cdot 10^{-2}$ m²/s) : Si l'ouvrage intercepte des horizons de sable très propre hautement transmissifs (profil observé ponctuellement sur le site), le rabattement chute de manière drastique pour s'établir à **0,37 mètre** (D.2).

Il convient de souligner une limite sécuritaire inhérente à cette démonstration. L'équation de Thiem postule un régime permanent (pompage continu 24h/24). Or, l'exploitation d'un doublet ATEs répond à une sollicitation transitoire : le débit de 36,1 m³/h représente un pic horaire hivernal.

Le détail des étapes de calcul et l'analyse comparative des scénarios de sensibilité sont consignés dans le tableau récapitulatif présenté en **Annexe D.2**.

4.8 Dimensionnement spatial et modélisation du panache thermique

L'implantation physique de ces 6 forages sur le campus de la Place Croix du Sud dépend directement de l'extension spatiale du panache thermique généré dans l'aquifère.

4.8.1 Débit d'eau saisonnier sollicité (Q_{saison})

En se basant sur la demande d'extraction hivernale nette estimée ($E_{hiver} = 1\,237,5\,MWh$), le volume d'eau total (Q_{tot}) transitant par le système géothermique s'obtient par :

$$Q_{tot} = \frac{E_{hiver}}{C_{p,eau} \cdot \Delta T}$$

Où :

- E_{hiver} est l'énergie thermique en kWh ($1\,237\,500\,kWh$).
- $C_{p,eau}$ est la capacité thermique volumique de l'eau (environ $1,16\,kWh/(m^3 \cdot K)$).
- ΔT est le différentiel de température fixé à $5\,K$.

$$Q_{tot} = \frac{1\,237\,500}{1,16 \cdot 5} \approx 213\,362\,m^3/an$$

L'architecture envisagée comportant 3 doublets en parallèle, le volume injecté par puits d'injection par saison (Q_{puits}) est donc :

$$Q_{puits} = \frac{213\,362}{3} \approx 71\,120\,m^3/saison \text{ par puits d'injection}$$

4.8.2 Estimation du Rayon Thermique (R_{th})

L'estimation de l'encombrement thermique souterrain s'effectue via le modèle analytique du cylindre. Le Rayon Thermique (R_{th}) est défini par l'équation de Balke (Équation 4.3) :

$$R_{th} = \sqrt{\frac{C_{eau}}{C_{aquifere}} \cdot \frac{V_{puits}}{\pi \cdot H}} \quad (4.3)$$

Où :

- C_{eau} est la capacité thermique de l'eau ($4,18\,MJ/(m^3 \cdot K)$).
- $C_{aquifere}$ est la capacité thermique volumique moyenne de l'aquifère saturé. Pour les Sables du Bruxellien, cette valeur standard est d'environ $2,5\,MJ/(m^3 \cdot K)$ (Bruxelles Environnement, 2020).
- H est l'épaisseur utile saturée de l'aquifère. Sur base des résultats des relevés géophysique (méthode H/V) qui a révélé une épaisseur totale de 28 à 32 mètres aux abords de la Place Croix du Sud, cette valeur utile est fixée de manière prudente à 25 m. Cette déduction de quelques mètres agit comme une marge de sécurité pour absorber le rabattement dynamique de la nappe en cours de pompage.

$$R_{th} = \sqrt{\frac{4,18}{2,5} \cdot \frac{71\,120}{\pi \cdot 25}} = \sqrt{1,672 \cdot 905,5} \approx 38,9\,m$$

Le panache thermique généré par un puits en fin de saison s'étendra théoriquement sur un rayon de 38,9 mètres autour de l'axe de forage.

4.8.3 Implantation spatiale heuristique

Une heuristique courante en conception géothermique suggère une distance minimale (L) entre le puits chaud et le puits froid d'un même doublet équivalente à au moins trois fois le rayon thermique théorique, soit $L \geq 3 \cdot R_{th}$ (Bloemendal et al., 2015).

$$L_{min} = 3 \cdot 38,9 = 116,7 \text{ m} \quad (4.4)$$

Conclusion géométrique et règles d'implantation :

L'espacement de sécurité requis s'élève à environ 117 mètres. Cette distance sépare le groupe de puits chauds du groupe de puits froids et doit impérativement s'orienter **perpendiculairement** au courant naturel de la nappe pour éviter tout risque de court-circuit thermique en aval. Au sein d'un même groupe (par exemple, la ligne des 3 puits chauds), les forages sont quant à eux alignés parallèlement au sens de l'écoulement naturel. Cette configuration spécifique vise à créer une **interférence thermique constructive**, favorisant la fusion des panaches thermiques en une "méga-bulle" qui réduit proportionnellement les pertes de chaleur périphériques (Sommer et al., 2014). Cependant, ces puits de même nature doivent eux aussi être physiquement espacés les uns des autres. Cet espacement intra-groupe est une condition pour empêcher l'interférence hydraulique, c'est-à-dire l'addition destructive de leurs cônes de rabattement respectifs qui risquerait de faire chuter le niveau d'eau sous le seuil critique d'amorçage des pompes immergées.

4.9 Bilan thermique intersaisonnier et équilibre de la nappe

La viabilité environnementale du stockage géothermique repose également sur la gestion de l'équilibre thermique de l'aquifère à long terme.

4.9.1 Le déséquilibre des charges thermiques

L'analyse des profils d'exploitation théoriques met en évidence l'asymétrie suivante :

- **Demande d'extraction (Chauffage hivernal) :** Énergie thermique estimée réellement extraite de la nappe (à l'évaporateur) s'élève à 1 237,5 MWh/an .
- **Demande d'injection (Refroidissement estival) :** L'entièreté de l'énergie frigorifique dissipée dans la nappe est estimée à 246 MWh/an .

Ce profil se traduit par un **déficit thermique annuel net d'environ 991,5 MWh** . Comme le démontrent Bloemendal and Olsthoorn (2018) dans leurs travaux sur la planification des systèmes ATES, si l'installation fonctionnait de manière purement autonome sans recharge artificielle, l'aquifère subirait un refroidissement progressif, un phénomène de "thermal depletion" qui dégraderait irrémédiablement le COP de l'installation au fil des années.

4.9.2 Défis et solutions technologiques pour une régénération thermique

L'obtention du permis d'environnement exigeant de démontrer l'absence de dérive thermique sur plusieurs décennies (Bruxelles Environnement, 2020), une approche de régénération active est indispensable. Plusieurs solutions hybrides se démarquent dans la littérature scientifique pour combler ce déficit de 991,5 *MWh* à très basse température :

1. La valorisation de la chaleur fatale des laboratoires

Les congélateurs à -80°C des laboratoires et les salles de serveurs informatiques de la faculté rejettent de la chaleur en continu. La récupération de cette chaleur fatale via une boucle d'eau tempérée constitue une synergie idéale pour réchauffer les puits chauds, une stratégie de couplage sectoriel particulièrement recommandée pour les réseaux thermiques des campus universitaires (Welsch et al., 2018).

2. Le solaire hybride PVT (Photovoltaïque-Thermique)

L'hybridation des systèmes géothermiques avec l'énergie solaire thermique est l'une des méthodes les plus efficaces pour contrer le déséquilibre hivernal (Rad et al., 2013). Contrairement aux capteurs thermiques classiques produisant une eau trop chaude, les panneaux hybrides PVT produisent une eau tiède (entre 25°C et 35°C), idéale pour la réinjection estivale sans risque d'entartrage géochimique.

3. Les aéroréfrigérants (Dry Coolers) en toiture

En faisant circuler l'eau de la bulle froide dans de simples radiateurs ventilés placés en toiture en été, l'eau capte passivement la chaleur de l'air ambiant estival avant réinjection. C'est une solution robuste et peu coûteuse en CAPEX pour compenser de grands volumes thermiques.

4. L'optimisation du Free-cooling nocturne des bâtiments

Durant les nuits d'été, forcer la circulation de l'eau de l'ATES dans les dalles actives des bâtiments permet de "laver" la masse structurelle du bâtiment de sa chaleur tout en rechargeant gratuitement l'aquifère, optimisant ainsi le déphasage thermique de l'enveloppe.

5. Régulation prédictive et monitoring intelligent (IoT)

Comme le soulignent Vanhoudt et al. (2011) dans leur analyse d'un système ATES sous contrôle prédictif, la viabilité d'un système géothermique complexe interconnectant plusieurs sources de régénération (solaire, chaleur fatale, aéroréfrigérants) repose aujourd'hui sur l'intégration numérique. L'ATES de la Place Croix du Sud devra s'inscrire dans une démarche de "Smart Building". Le déploiement de capteurs communicants (IoT) sur les boucles hydrauliques, couplé à une régulation prédictive pilotée par un algorithme d'optimisation (tenant compte des prévisions météorologiques et de l'occupation des salles par ex.), permettra d'anticiper les besoins de charge et de décharge (Énergie+, 2024). Cette supervision dynamique garantira le maintien du bilan thermique intersaisonnier tout en optimisant la consommation électrique des pompes de circulation.

4.10 Évaluation économique et synergie énergétique locale (OPEX)

Le dimensionnement physique suggère la faisabilité de l'ATES. Il convient à présent de discuter des coûts opérationnels (OPEX) face à la solution de référence.

4.10.1 Le contexte énergétique spécifique de l'UCLouvain

L'évaluation des coûts d'exploitation (OPEX) s'inscrit dans un contexte particulier :

- **Le réseau électrique privé (Microgrid) :** L'UCLouvain est propriétaire de son réseau, s'affranchissant des tarifs de transport et distribution classiques en Wallonie.
- **La transition vers la cogénération biomasse :** La construction d'une centrale biomasse fournira au campus une électricité locale et décarbonée (UCLouvain, 2024b).

4.10.2 Hypothèses tarifaires retenues

- **Tarif de référence (Chaleur gaz via RCU) :** Estimé à **80 euros/MWh** (prix moyen incluant taxes et distribution) (CREG, 2024b).
- **Tarif électrique (Interne UCLouvain) :** Estimé à **100 euros/MWh** (tarif de gros net lié au LCOE de la centrale biomasse) (CREG, 2024a; UCLouvain, 2024b).

4.10.3 Bilan financier annuel (Comparaison OPEX)

1. Le système actuel (Référence Gaz / RCU)

La facture énergétique annuelle (hors refroidissement) s'élèverait à :

$$\text{Coût}_{Gaz} = 1\,650\,MWh \times 80\,\text{euros}/MWh = \mathbf{132\,000\,\text{euros/an}}$$

2. Le nouveau système (ATES + pompe à chaleur + Géocooling)

- Coût du chauffage hivernal : Grâce au COP de 4,0, la consommation électrique requise est de 412,5 MWh.

$$\text{Coût}_{PAC_Hiver} = 412,5\,MWh \times 100\,\text{euros}/MWh = 41\,250\,\text{euros/an}$$

- Coût du refroidissement estival (Bâtiment) : Le géocooling nécessite très peu d'électricité pour dissiper les 246 MWh liés au confort des occupants. En s'appuyant sur les retours d'expérience documentés par Gehlin et al. (2018) et Fleuchaus et al. (2018), l'EER d'un système ouvert passif (où seules les pompes de circulation réseau et de forage sont actives) est estimé de manière prudente à 30.

$$\text{Conso}_{Ete} = \frac{246\,MWh}{30} = 8,2\,MWh_{elec}$$

$$\text{Coût}_{Geocooling_Ete} = 8,2\,MWh \times 100\,\text{euros}/MWh = 820\,\text{euros/an}$$

3. Le coût de la régénération active (Le "Prix de l'équilibre")

Afin de combler le déficit thermique de la nappe estimé à 991,5 MWh (calculé à la section 4.9), l'activation d'aéroréfrigérants (Dry coolers) en toiture est retenue ici à titre d'exemple d'application pour le calcul financier, sans pour autant exclure les autres solutions technologiques de régénération évoquées précédemment. Le fonctionnement des ventilateurs et des pompes de cette boucle de régénération présente un EER moyen évalué à 15. Cette hypothèse est conforme aux standards de classification énergétique de la certification européenne Eurovent (2021) pour des aéroréfrigérants de grande capacité équipés de moteurs à commutation électronique (EC) à vitesse variable.

$$\text{Conso}_{\text{Regeneration}} = \frac{991,5 \text{ MWh}}{15} \approx 66,1 \text{ MWh}_{\text{élec}}$$

$$\text{Coût}_{\text{Regeneration}} = 66,1 \text{ MWh} \times 100 \text{ EUR/MWh} = 6\,610 \text{ EUR/an}$$

Conclusion sur les OPEX :

Le coût d'exploitation total annuel du système géothermique (incluant le maintien de l'équilibre environnemental de la nappe) est estimé à **48 680 euros/an** (41 250 + 820 + 6 610).

Sous ces hypothèses, l'intégration de la technologie ATES permettrait de réduire les OPEX thermiques des bâtiments d'environ **83 320 euros par an**. Cette marge démontre que même en provisionnant le coût électrique de la régénération estivale active qui est indispensable pour l'obtention du Permis Unique, le modèle économique reste rentable face au gaz naturel.

4.11 Analyse de sensibilité, incertitudes et limites de l'étude

Bien que le dimensionnement macroscopique démontre la pertinence théorique du système ATES pour approvisionner de l'énergie de chauffage et refroidissement de quelques bâtiments de la Place Croix du Sud, une démarche scientifique rigoureuse impose d'évaluer l'impact des incertitudes sur la viabilité du projet.

4.11.1 Sensibilité du COP au régime de température et aux avancées technologiques :

Le dimensionnement de référence s'appuie désormais sur une modélisation thermodynamique, définie par le COP théorique de Carnot pondéré par un rendement global d'environ 45 %. Cette valeur est intrinsèquement liée aux écarts de température dictés par l'enveloppe thermique des bâtiments, mais elle dépend également de la génération technologique de la machine thermique. Historiquement, la littérature évaluait les PAC géothermiques autour de COP saisonniers de 3,5 à 4,0 pour des régimes standards (Gleeson and Lowe, 2013). Toutefois, l'intégration des récentes évolutions technologiques (notamment l'amélioration de l'efficacité isentropique des compresseurs) permet aujourd'hui de justifier l'atteinte de ces 45 % de l'efficacité idéale de Carnot (Pospisil et al., 2021).

Il convient toutefois de préciser que cette valeur caractérise exclusivement le COP de la machine (restreint aux performances strictes du circuit frigorifique). Le rendement réel de l'installation en conditions d'exploitation nécessite d'évaluer le COP système, qui intègre la consommation des équipements auxiliaires. L'activation de la pompe dégrade significativement le bilan énergétique global, la littérature démontre que son fonctionnement continu peut amputer le COP effectif de l'installation d'environ 13 % par rapport aux performances de la machine seule (Gleeson and Lowe, 2013).

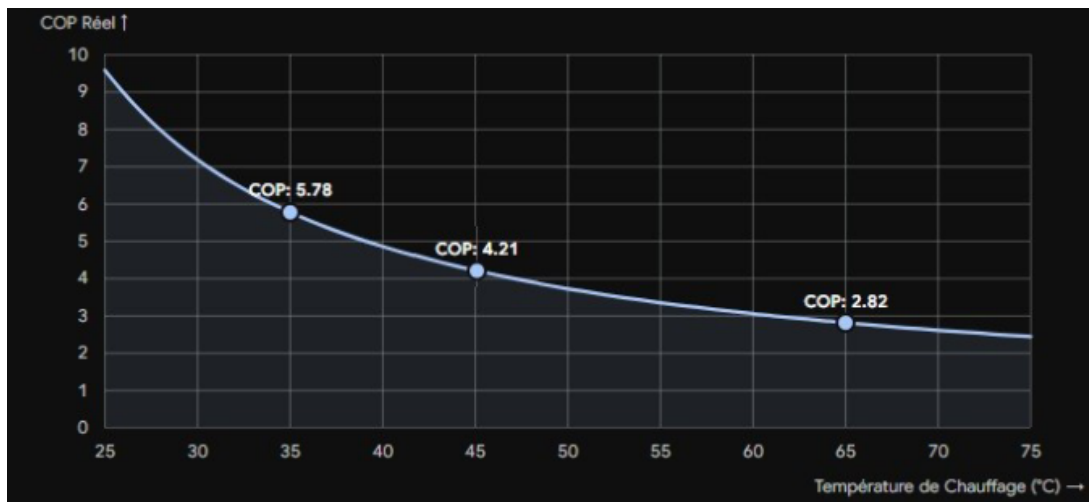


FIGURE 4.7 – Évolution du Coefficient de Performance (COP) effectif en fonction de la température de distribution pour une nappe à 11°C. (Source : Réalisé par l'auteur sur base du cycle de Carnot pondéré par un rendement global de 45 %).

Pour évaluer la sensibilité du système face au régime de température imposé par les émetteurs thermiques, trois scénarios de rénovation peuvent être comparés, dont les performances projetées sont illustrées à la Figure 4.7 :

- **Scénario "Très Basse Température" (35 °C)** : Couplé à un chauffage sol, saut thermique réduit à 24 °C (gaz R-1234ze) → **COP effectif de 5,78**. Rentabilité maximale.
- **Scénario "Basse Température" (45 °C)** : Radiateurs basse température, saut thermique de 34 °C (gaz R-290) → **COP réel de 4,21**. Ce résultat valide parfaitement l'hypothèse de dimensionnement prudente (COP 4,0).
- **Scénario "Haute Température" (65 °C)** : Maintien des anciens radiateurs en fonte, saut thermique massif > 50 °C → **COP chutant à 2,82** (Pospisil et al., 2021).

4.11.2 Limites hydrauliques : pertes de charge et consommation parasitaire

L'évaluation économique (OPEX) repose principalement sur le compresseur de la pompe à chaleur, mais doit également intégrer la "consommation parasitaire" du système hydraulique.

Le transport du débit de pointe ($108,5 \text{ m}^3/\text{h}$) requiert des pompes immergées et de circulation capables de vaincre le rabattement dynamique de la nappe et les pertes de charge (ΔP) du réseau. Grâce à l'effet d'échelle propre aux installations

tertiaires d'envergure, l'adoption de pompes industrielles à haut rendement couplées à des variateurs de vitesse (VSD) permet de restreindre cette consommation parasite entre 5 % et 8 % de la puissance électrique totale, contre près de 20 % pour de petites installations résidentielles (Gehlin et al., 2018; ADEME et al., 2008).

Enfin, d'un point de vue thermodynamique, l'énergie mécanique de ces pompes se dissipe sous forme de chaleur dans le fluide. Ce phénomène naturel constitue un léger apport thermique bénéfique en mode chauffage (hiver), mais agit inversement comme une charge parasite pénalisant l'efficacité frigorifique (EER) lors du rafraîchissement estival.

4.11.3 Sensibilité économique (Scénarios tarifaires)

Un "stress-test" défavorable a été simulé : un prix du gaz particulièrement bas (60 €/MWh) confronté à une électricité biomasse plus chère (150 €/MWh). Sous ces conditions extrêmes, le coût annuel de référence (gaz) s'établirait à 99 000 €/an, contre 63 105 €/an pour l'ATES. Le système conserve ainsi une économie d'OPEX significative d'environ 35 895 €/an.

4.12 Estimation des coûts d'investissement (CAPEX)

Pour confirmer la viabilité globale du projet, ces économies d'exploitation doivent être croisées avec les investissements initiaux (CAPEX) afin d'en déduire le temps de retour sur investissement.

En l'absence de devis locaux, l'estimation s'appuie sur la récente revue systématique de Herrmann et al. (2025). L'analyse de 132 systèmes ATES (dont 8 en Belgique) confirme la compétitivité exceptionnelle de ce type d'installation. Pour des systèmes de taille intermédiaire (1 à 2 MW), le coût d'installation se situe généralement entre **400 et 900 €/kW**. Plus spécifiquement, les retours d'expérience belges révèlent une répartition du CAPEX de **45 %** pour la composante souterraine (forages, tuyauteries) et **55 %** pour la surface (PAC, échangeurs). Ces ratios sectoriels constituent la référence de la décomposition analytique présentée ci-après.

4.12.1 Décomposition analytique du CAPEX par poste

Sur la base de ces ratios sectoriels, le CAPEX de l'installation de la Place Croix du Sud (3 doublets, PAC 840 kW, Géocooling 490 kW) est estimé dans le Tableau 4.1. Les hypothèses unitaires sont cohérentes avec les données de l'ADEME et les récentes publications européennes (ADEME et al., 2008; Herrmann et al., 2025).

TABLE 4.1 – Décomposition analytique du CAPEX estimé (6 forages, 1,33 MW cumulés). Données adaptées de Herrmann et al. (2025) et Fleuchaus et al. (2019).

Poste	Hypothèse unitaire	Bas (k€)	Haut (k€)
Forages industriels équipés (6 puits $\times$ 50m)	800 – 1 200 €/ml	240	360
pompe à chaleur eau-eau (840kW)	250 – 350 €/kW	210	295
Échangeur titane et station primaire	Forfait	30	60
Réseau de collecte inter-puits	Forfait	80	150
Automatisation, VSD et supervision	Forfait	50	90
Génie civil et raccordements	Forfait	80	150
Études, essais de pompage et permis	Forfait	50	100
TOTAL CAPEX estimé		740	1 205

La fourchette d’investissement total (740 à 1 205 k€) correspond à un ratio de **556 à 902 €/kW** de puissance totale installée, ce qui est conforme aux courbes de coût de Herrmann et al. (2025).

4.12.2 Point de comparaison Belge

Afin de mettre en perspective les coûts d’investissement (CAPEX) et les caractéristiques techniques du pré-dimensionnement de la Croix du Sud, il est pertinent de se référer aux données d’installations géothermiques belges existantes. Dans leur revue systématique mondiale, Herrmann et al. (2025) répertorient l’analyse de huit systèmes ATES en Belgique, dont les puissances installées varient de 0,3 MW à 8 MW.

Bien que la majorité de ces installations ne soient pas exhaustivement détaillées dans le corps de leur étude, les caractéristiques de deux projets historiques y sont précisément documentées. Le Tableau 4.2 synthétise ces données opérationnelles et financières.

TABLE 4.2 – Caractéristiques technico-économiques de deux systèmes ATES de référence en Belgique (données extraites et actualisées de Herrmann et al., 2025).

Site / Projet	Année d’installation	Puissance (kW)	Débit (m^3/h)	Coût de l’installation (actualisé en 2022)
Hôpital AZ Klina (Brasschaat)	2000	1 200	N/A	1 150 000 €
Malle	2002	820	90	540 000 €

Le site de Malle ici, par exemple, soutient un débit de $90 m^3/h$ pour une puissance de 820 kW, des valeurs extrêmement proches des exigences de pointe calculées pour la Croix du Sud (puissance chauffage de 840 kW). Ce cas de référence

valide par ailleurs le dimensionnement des bâtiments de la place de la croix du sud. L'installation de Malle opère avec un ΔT de 6°C, lui permettant d'extraire 20 % d'énergie supplémentaire par litre d'eau pompé. À puissance équivalente, si ce site était contraint au différentiel de sécurité de 5°C calculé ici, son débit grimperait pour atteindre l'équivalent des 108 m³/h. Ce coût de 540 k€ pour le site de Malle, inférieur de 200 k€ à l'estimation minimale, est particulièrement encourageant pour le projet de Louvain-la-Neuve. Cet écart peut toutefois s'expliquer de deux manières. D'une part, l'exploitation d'un aquifère plus perméable facilite les pompages et ne nécessite potentiellement qu'un seul doublet. D'autre part, le périmètre d'investissement considéré par Herrmann et al. (2025) ne précise pas la répartition des composants pour chaque site ; il est donc probable que des équipements de surface onéreux, tels que la pompe à chaleur (PAC), n'aient pas été comptabilisés dans ce budget strictement géothermique.

4.12.3 Calcul du temps de retour sur investissement (ROI simple)

Le croisement du CAPEX avec les économies d'OPEX permet de déterminer le Temps de Retour sur Investissement (ROI) simple (Équation 4.5).

$$\text{ROI} = \frac{\text{CAPEX}}{\Delta \text{ OPEX annuel}} \quad (4.5)$$

Les résultats pour les deux scénarios tarifaires sont synthétisés dans le Tableau 4.3.

TABLE 4.3 – Temps de retour sur investissement (ROI) selon les scénarios (incluant les coûts de régénération thermique).

Scénario tarifaire	Δ OPEX annuel	ROI (Bas)	ROI (Haut)
Scénario de base	83 320 €/an	8,9 ans	14,5 ans
Stress-test	25 980 €/an	28,5 ans	46,4 ans

Dans le scénario de base, le ROI s'établit entre **9 et 15 ans**. Bien qu'en légère augmentation suite à l'intégration indispensable de la régénération active, cette valeur reste tout à fait favorable pour une infrastructure énergétique de cette envergure dont la durée de vie géologique et mécanique dépasse allègrement les 25 à 30 ans.

4.12.4 Limites de l'estimation économique

Ce pré-dimensionnement financier constitue une estimation d'avant-projet dont l'objectivité impose de formuler trois réserves méthodologiques :

- **Incertitude des ratios (CAPEX)** : Fondée sur des moyennes européennes (Herrmann et al., 2025), cette estimation ne tient pas compte des devis locaux, des études géotechniques détaillées ni des fluctuations tarifaires propres au marché Belge.
- **Périmètre d'investissement partiel** : Le CAPEX strict de l'ATES exclut le coût d'adaptation de la boucle secondaire des bâtiments (terminaux basse

température essentiels pour garantir un COP de 4,0 (Pospisil et al., 2021)) ainsi que l'achat des équipements de régénération active en toiture (Rad et al., 2013), bien que ces derniers soient techniquement et légalement incontournables (Permis Unique).

- **Limites du ROI simple :** Cet indicateur omet l'actualisation des flux financiers sur la durée de vie de l'installation (30 à 50 ans). Une analyse approfondie en Valeur Actuelle Nette (VAN) ou en Coût Global (LCC) serait nécessaire pour intégrer l'inflation, la maintenance et la hausse structurelle attendue du prix du gaz (Gehlin et al., 2018).

Malgré ces limites de périmètre, la rentabilité "grossière" du projet demeure structurellement juste. Elle est directement portée par les performances hydrothermiques des Sables du Bruxellien (Van Bambeke, 2024) et par l'indépendance tarifaire offerte par la synergie avec le Microgrid décarboné de l'UCLouvain.

Chapitre 5

Discussion et analyse critique

Le pré-dimensionnement d'un système ATES pour les bâtiments de la Place Croix du Sud reposait initialement sur un ensemble d'hypothèses théoriques issues de la littérature. L'intégration de données acquises in situ modifie considérablement ces prévisions. Ce chapitre propose une prise de recul critique sur les résultats obtenus et sur les défis posés par l'implantation réelle du système.

5.1 Confrontation des modèles : de l'hypothèse régionale à la réalité du terrain

5.1.1 La réévaluation de l'encombrement thermique (L'apport des mesures H/V)

Dans un premier temps, l'approche bibliographique classique suggérait d'utiliser une épaisseur saturée moyenne de 20 m pour les aquifères sableux wallons, ou de se référer aux extrapolations régionales de Van Bambeke (2024). Si cette hypothèse de 20 m offrait une marge de sécurité prudente, elle risquait de pénaliser artificiellement le projet en imposant un encombrement thermique souterrain excessif.

C'est ici que la prospection géophysique (méthode H/V) déployée lors de cette étude prend tout son sens en tant qu'outil d'ingénierie préliminaire. Le krigeage des données sismiques a démontré que la couverture sédimentaire sous la Place Croix du Sud est significativement plus épaisse localement, offrant une épaisseur de nappe exploitable d'environ 28 à 32 m. En retenant une valeur de dimensionnement prudente de $H = 25$ m (pour absorber le rabattement), le Rayon Thermique théorique (R_{th}) calculé via l'équation de Balke a pu être abaissé de 43,5 m à 38,9 m.

Cette réduction de l'encombrement de la "bulle thermique" est un avantage majeur. Elle a permis de réduire l'espacement minimal requis entre les forages d'un même doublet (de plus de 130 m à environ 117 m). Par ailleurs, cette importante épaisseur d'eau augmente la surface cylindrique d'aspiration autour du puits et augmente la transmissivité. Par conséquent, pour un même débit de pompage imposé, la vitesse de filtration de l'eau dans le milieu poreux est considérablement ralentie, ce qui limite les pertes de charge et garantit un rabattement (cône de dépression) plus faible en cours d'exploitation.

5.1.2 Déformation advective et efficacité de récupération

Si la méthode analytique de Balke a permis d'estimer un rayon de base (38, 9m), elle pose néanmoins l'hypothèse d'un panache parfaitement cylindrique se développant dans un milieu hydrostatique (sans écoulement naturel).

Dans la réalité hydrogéologique, le gradient naturel de la nappe génère un phénomène d'advection. La "bulle" thermique ne conserve pas sa symétrie, mais s'étire progressivement en forme de "larme" dans la direction du courant naturel.

Cette dérive advective engendre des pertes thermiques périphériques qui amoindrent l'efficacité de récupération (η_{th}) du système. Selon les modélisations de Van Bambeke (2024), un système ATES isolé à Louvain-la-Neuve ne récupère qu'environ 30 % de son énergie thermique lors du premier cycle annuel. Il faut attendre 3 à 5 ans pour que les roches environnantes se saturent en énergie (phase de "mise en charge" géologique) et que le système atteigne un régime de croisière performant avoisinant les 80 %.

Cependant, il convient de souligner que, quelle que soit la forme géométrique réelle et allongée adoptée par le panache thermique, l'approche analytique initiale reste une approximation macroscopique prudente et volontairement pessimiste. En réalité, grâce au positionnement stratégique des doublets perpendiculairement au flux hydraulique régional (axe Sud-Ouest / Nord-Est), la matrice sédimentaire va inévitablement monter en température et accumuler les calories au fil des ans, que cette mise en charge s'opère de manière théoriquement optimale ou non. Cet alignement géométrique garantit que les fronts thermiques chauds et froids dériveront de manière strictement parallèle sans jamais se croiser, éliminant tout risque de court-circuit en aval et validant la viabilité de l'infrastructure sur le long terme.

5.1.3 La dépendance au bâti

L'efficacité de l'ATES est entièrement conditionnée par la boucle secondaire du bâtiment. Ce système est uniquement viable dans le cas d'une rénovation énergétique assez poussée permettant d'abaisser le régime d'eau à l'intérieur des bâtiments. Sans cela, le saut thermique serait trop important, effondrant le COP (Pospisil et al., 2021) et annulant tout gain économique (OPEX) face au gaz ou autre système.

Cependant, l'aquifère introduit une dynamique de charge thermique positive. Lors des premiers cycles, l'énergie injectée sature progressivement la matrice sédimentaire périphérique. Cette accumulation thermique au sein de chaque puits réduit d'année en année le saut thermique réel (ΔT) entre la nappe et le bâtiment. Il en résulte une diminution de l'effort demandé au compresseur et une amélioration continue du COP réel au cours des premières saisons, maximisant la rentabilité à long terme.

5.2 Obstacles législatifs et Permis d'Environnement

La viabilité du projet géothermique se heurtera inévitablement au cadre réglementaire wallon pour l'obtention du Permis Unique (fusionnant permis d'urbanisme et d'environnement).

5.2.1 La gestion du déséquilibre thermique

Cette étude a identifié un déficit thermique net annuel de l'ordre de 991,5 MWh, résultant d'une demande de chauffage massive écrasant les modestes besoins de refroidissement estival. Or, l'administration (SPW-ARNE) est particulièrement vigilante quant au risque de refroidissement global de la masse d'eau souterraine (thermal depletion).

Bien que des pistes de régénération active aient été proposées dans ce travail (chiffrées par l'exemple des aéroréfrigérants), ces solutions n'ont été que brièvement abordées et constituent une simple ébauche technique. Pourtant, l'intégration d'un tel système de compensation n'est pas une option d'optimisation subsidiaire ; c'est une condition légale absolue.

Pour **optimiser ce déficit**, un projet ATES gagnerait à ne pas être conçu de manière isolée, mais en synergie avec le développement d'autres infrastructures du campus. Par exemple, le couplage de la boucle géothermique avec l'installation de nouveaux data centers universitaires ou avec ceux déjà existants permettrait de valoriser leur chaleur fatale : le refroidissement des serveurs rechargerait naturellement la nappe en calories durant l'été voire même en hiver. En effet, les retours d'expérience démontrent que c'est précisément au sein de ces architectures intégrées, où le rééquilibrage de la nappe est assuré passivement par une source de chaleur tierce, que le rendement global d'une installation ATES atteint son maximum. À titre d'exemple, cette symbiose énergétique est aujourd'hui opérationnelle sur le campus du *Amsterdam Science Park* (Pays-Bas). La boucle géothermique de l'université y est directement couplée au centre de calcul national (SURFsara). Le refroidissement passif du supercalculateur assure la recharge thermique de l'aquifère, garantissant ainsi le chauffage hivernal des facultés adjacentes sans recours à des dispositifs de régénération externes (Boonstra and van der Lee, 2016).

5.2.2 Faisabilité hydraulique et conformité au Code de l'Eau

L'accès aux données de forages historiques et aux essais de multitraçage de l'UCLouvain au droit de la zone d'étude (notamment les puits de captage PC1/PC2 et les piézomètres associés S21, S22, S28 et S30) lève les incertitudes liées à la représentativité locale de l'aquifère (Unité de Génie Civil et Environnemental (GCE), 2005). La confrontation du modèle aux perméabilités mesurées entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s valide la capacité des sables du Bruxellien à soutenir de forts débits, tout en mettant en évidence une hétérogénéité spatiale justifiant l'architecture répartie en trois doublets.

Sur le volet hydraulique, cette configuration imposera localement des débits unitaires de pointe de l'ordre de 36,1 m³/h. Ces valeurs s'écartent de la médiane standardisée régionale de 12 m³/h calculée par le SPW pour un rabattement forfaitaire de 2,5 m (SPW Énergie et al., 2023). L'analyse de sensibilité montre d'ailleurs que dans le scénario géologique le plus défavorable (T_{min}), le rabattement maximal théorique au puits atteindrait **3,76 mètres** (voir Annexe D.2), dépassant la norme de 1,27 mètre.

D'un point de vue réglementaire, il n'existe cependant pas de plafond légal infranchissable dans le Code de l'Eau wallon concernant l'amplitude d'un cône de dépression. La limite juridique est fixée au cas par cas par l'administration. Dans le contexte de la Place Croix du Sud, ce dépassement théorique est techniquement

acceptable pour deux raisons : d'une part, l'importante épaisseur saturée locale (> 30 m) sécurise totalement la colonne d'eau face à un tel abaissement ; d'autre part, ce calcul contraignant repose sur un régime permanent continu, alors que l'exploitation réelle du système ATES répondra à une sollicitation transitoire (pics de chauffe hivernaux ponctuels).

5.3 Perspectives de viabilité grâce à l'optimisation de la charge

Le pré-dimensionnement développé au sein de cette étude repose sur une approche très sécuritaire. Les calculs hydrogéologiques ont en effet été calibrés pour satisfaire l'intégralité de la demande thermique lors des pics de froid extrême absolu (840 kW), tout en appliquant un différentiel thermique très strict ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$) pour prévenir tout risque géochimique. Bien que cette méthodologie aboutisse à un besoin hydraulique massif (108,5 m³/h) justifiant l'implantation de trois doublets, elle avait pour but d'éprouver la résistance théorique de l'aquifère dans les "pires" conditions.

Toutefois, sans même procéder à un redimensionnement mathématique, il est évident que les conditions réelles d'exploitation offriront des marges de manœuvre considérables, permettant de réduire drastiquement l'échelle et le coût de l'infrastructure finale. Cette perspective d'optimisation repose sur une dynamique inhérente aux systèmes ATES : la maturation thermique du réservoir souterrain.

5.3.1 La maturation thermique naturelle de l'aquifère

Le principe même du stockage intersaisonnier induit une dynamique thermodynamique très favorable. Le débit de pointe calculé lors de cette étude correspond uniquement au premier hiver, lorsque la nappe est encore à sa température naturelle de 11°C . Or, la réinjection des calories estivales (issues du rafraîchissement des bâtiments ou de la régénération active en toiture) va progressivement "mettre en charge" le sous-sol.

Au fil des cycles annuels, la température de la bulle chaude va s'élever (par exemple vers 13°C ou 14°C). Cette maturation géothermique augmentera naturellement le saut thermique disponible à l'évaporateur de la pompe à chaleur. Par conséquent, pour couvrir une charge thermique identique, le débit de pointe requis chutera mécaniquement de 35-40 % par doublet lors des hivers suivants. À puissance égale, le système nécessitera donc de pomper beaucoup moins d'eau au fil des années, réduisant proportionnellement l'amplitude des futurs cônes de dépression et soulageant la pression hydrodynamique sur le réservoir des Sables du Bruxellien.

En conclusion, si cette étude s'est efforcée de valider la faisabilité du système ATES face aux contraintes les plus dures, l'intégration de ces perspectives d'optimisation prouve que l'exploitation réelle du projet sera nettement plus simple, moins invasive pour le sous-sol et économiquement plus rentable à mettre en œuvre.

5.4 Impact environnemental et empreinte carbone

Bien que l'évaluation environnementale globale incluant l'analyse du cycle de vie (ACV) et le "coût carbone" initial lié à la fabrication des équipements et aux travaux de forage sorte du périmètre strict de cette étude, il faut souligner l'impact positif majeur du système en phase d'exploitation. C'est d'ailleurs à ce niveau qu'un tel projet prend tout son sens pour l'UCLouvain.

La substitution des actuelles chaudières au gaz par un système ATES implique le passage à une consommation énergétique 100 % électrique (compresseur de la pompe à chaleur et pompes de circulation). Or, cette électricité ne sera pas dépendante du mix national moyen. Comme évoqué précédemment, le système s'intégrera directement au futur micro-réseau privé de l'université, lequel sera alimenté par la nouvelle centrale de cogénération biomasse prévue pour 2027 (UCLouvain, 2024c).

Avec une électricité locale issue de la biomasse, dont le bilan d'émissions directes est comptabilisé comme neutre (proche de 0 gCO₂/kWh_{elec}) (UCLouvain, 2024c), le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments de la Croix du Sud deviendraient théoriquement décarbonés à l'usage. Combiné au rendement élevé, le système ATES confère donc un bilan d'exploitation très propre sur le plan environnemental et particulièrement avantageux sur le plan économique, s'inscrivant ainsi pleinement dans la stratégie globale de transition de l'UCLouvain.

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études a permis de démontrer la faisabilité technique et la viabilité environnementale du déploiement d'une infrastructure ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) en tant que système de chauffage pour les quelques bâtiments de la Place Croix du Sud à l'UCLouvain.

Les campagnes de prospection géophysique (méthode H/V) menées dans le cadre de cette étude ont révélé une épaisseur saturée exploitable importante, comprise entre 28 et 32 mètres aux abords des bâtiments. Cette géométrie locale, supérieure aux estimations régionales initiales, accroît significativement la capacité de transmission de l'aquifère. Elle valide ainsi la soutenabilité des débits de pointe requis (36,1 m³/h par forage), tout en maintenant l'amplitude du rabattement dynamique dans une fourchette maîtrisée, estimée entre 0,38 m et 3,76 m. Par ailleurs, l'architecture en champ de puits retenue (3 doublets) permet d'optimiser l'occupation du sous-sol : l'implantation des forages perpendiculairement à l'écoulement souterrain naturel (axe Sud-Ouest / Nord-Est) garantit une dérive advective parallèle des panaches, écartant de fait tout risque de court-circuit thermique.

Toutefois, les analyses de sensibilité thermodynamique mettent en lumière le couplage indissociable entre le sous-sol et la boucle secondaire en surface. Le succès du projet est uniquement envisageable moyennant une rénovation énergétique profonde des bâtiments comme il est actuellement prévu. L'abaissement du régime d'émission à ≤ 45 °C constitue une contrainte technique stricte : elle est indispensable non seulement pour préserver la rentabilité financière du projet en limitant les coûts d'exploitation (OPEX), mais également pour maximiser son intérêt écologique par une réduction drastique des émissions de CO₂ associées à la consommation électrique du compresseur. De plus, cette rénovation, combinée au phénomène d'accumulation thermique progressive dans la matrice sableuse au fil des cycles, permettra de réduire continuellement le saut thermique et d'améliorer le rendement de la pompe à chaleur au cours des saisons. Cette dynamique lève d'ailleurs le risque technique principal du projet, à savoir la nécessité de pomper un débit d'eau initialement très élevé. Les 36 m³/h d'exploitation ayant été sécuritairement dimensionnés sur la base d'un COP pessimiste de 4, l'amélioration progressive de ce rendement et l'élargissement du différentiel de température au niveau des échangeurs diminueront mécaniquement le volume d'eau requis au fil des années, soulageant ainsi l'aquifère et réduisant la consommation électrique des pompes.

Un autre défi important identifié réside dans le déséquilibre thermique annuel, marqué par un déficit net de 991,5 MWh en raison de la dominance des besoins de chauffage. L'administration wallonne (SPW-ARNE) étant très stricte quant au risque d'épuisement thermique (thermal depletion), la mise en œuvre d'une stratégie de régénération active intersaisonnière est une condition légale absolue.

Bien que les pistes technologiques (aéroréfrigérants, solaire, chaleur fatale) n'aient été que brièvement esquissées dans ce travail de faisabilité, leur intégration est indispensable pour l'obtention d'un Permis Unique.

Bibliographie

- ADEME, BRGM, EDF, and AREL (2008). Pompe à chaleur géothermique sur aquifère : Conception et mise en œuvre (guide technique). Technical report, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company, New York.
- Blockmans, S. and Dumoulin, V. (2012). Notice explicative de la carte géologique de wallonie à 1/25 000 : Wavre – chaumont-gistoux (carte 40/1-2). Rapport technique et carte géologique, Service Public de Wallonie (SPW), Département de l'Environnement et de l'Eau, Namur, Belgique.
- Bloemendal, M. and Olsthoorn, T. (2018). Combining storage and recovery of heat and cold in energy foundations. *Resource Efficient Cities*.
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., and Boons, F. (2015). Analysis of practical performance of aquifer thermal energy storage in the netherlands. *Geothermics*, 53 :87–99.
- Boonstra, W. and van der Lee, A. (2016). Synergy in ares : Integration of data center cooling and campus heating at amsterdam science park. In *Proceedings of the European Geothermal Congress*, Strasbourg, France. Étude de cas de référence sur la symbiose thermique entre centre de données et réseau universitaire.
- Bottequin, M., Detremmerie, D., de Fabribeckers, C., and Hachez, J. (2021). Pump it green : Étude de faisabilité de création d'une entreprise de dimensionnement de chauffage écologique et économique. Master's thesis, Université catholique de Louvain - Master interdisciplinaire en création d'entreprise (CPME), Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Bruxelles Environnement (2020). Modélisation hydrogéologique en éléments finis du système phréatique bruxellois - version 1.0. Rapport technique, Région de Bruxelles-Capitale.
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M., and Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems : A review of existing cases in europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104 :504–522.
- CREG (2024a). Analyse des composantes du prix de l'électricité en belgique : parts de la molécule, du transport et de la distribution. Rapport technique, Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz, Bruxelles, Belgique.

- CREG (2024b). Étude relative à l'évolution des prix du gaz naturel en belgique pour les clients non-résidentiels. Rapport annuel, Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz, Bruxelles, Belgique.
- Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and Wells*. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, 2nd edition.
- Eurovent (2021). Rating standard for dry coolers (rs 9/c/004). Technical report, Eurovent Certita Certification, Paris, France. Standard technique de certification énergétique.
- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., and Blum, P. (2018). Worldwide application of aquifer thermal energy storage – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94 :861–876.
- Fleuchaus, P., Schüppler, S., Schneider, L., and Blum, P. (2019). Techno-economic and environmental analysis of an aquifer thermal energy storage (ATES) in Germany. *Geothermal Energy*, 7(1) :11.
- Gehlin, S. E., Mazzotti Pallard, W., and Bales, C. (2018). Measured performance of a large-scale ates system for district heating and cooling. *Geothermics*, 74 :250–264.
- Gleeson, C. P. and Lowe, R. (2013). Meta-analysis of european heat pump field trial efficiencies. *Energy and Buildings*, 66 :637–647.
- Herrmann, M., Fleuchaus, P., Godschalk, B., Verbiest, M., Sørensen, S. N., and Blum, P. (2025). Capital costs of aquifer thermal energy storage (ATES) : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226 :116202.
- Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E., and Neuzil, C. E. (2006). *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edition.
- Molron, J. (2015). Estimation de l'épaisseur des sédiments sus-jacents au massif du brabant par la méthode géophysique h/v, au centre de la belgique. Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles (ULB). Promoteurs : Thomas Lecocq, Koen Van Noten (Observatoire Royal de Belgique).
- Pospisil, J., Spalkova, V., et al. (2021). Sustainable greenhouse gas mitigation through the implementation of natural refrigerants in heat pumps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140 :110756.
- Rad, F. M., Fung, A. S., and Rosen, M. A. (2013). An integrated model for designing a solar community heating system with borehole thermal storage. *Energy for Sustainable Development*, 17(6) :598–607.
- Resolia (2024). Quelle énergie pour le futur quartier athéna-lauzelle à louvain-la-neuve? Consulté en juin 2026.
- Service Public de Wallonie (SPW) (2024). La géothermie en wallonie - cadre réglementaire et environnemental. Portail de la Wallonie - Environnement. <http://environnement.wallonie.be/>.

Sommer, W., Valstar, J., Leusbrock, I., Grotenhuis, T., and Rijnaarts, H. (2014). Thermal interference of aquifer thermal energy storage systems in the netherlands. *Water Resources Research*, 50(11) :8668–8681.

SPW Énergie, VITO, Service Géologique de Belgique, and ULiège (2023). Détermination du potentiel de la géothermie peu profonde (moins de 500m) pour la production de chaleur et de froid en wallonie. Technical report, Service Public de Wallonie, Namur, Belgique.

Sweco Belgium (2024). Rénovation du bâtiment mendel - cahier spécial des charges : Installations hvac (réf. 4208-1). Cahier spécial des charges, Université catholique de Louvain (UCLouvain), Louvain-la-Neuve, Belgique.

UCLouvain (2024a). Patrimoine : Bâtiment des serres. Consulté en 2024.

UCLouvain (2024b). Une centrale biomasse d’envergure pour alimenter l’uclouvain en chaleur et électricité vertes. <https://www.uclouvain.be/fr/presse/news/une-centrale-biomasse-d-envergure-pour-alimenter-l-uclouvain-en-chaleur-et-el> Consulté en mars 2026.

UCLouvain (2024c). Une centrale biomasse d’envergure pour alimenter l’uclouvain en chaleur et électricité vertes. Rapport et communiqué officiel de transition énergétique, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Unité de Génie Civil et Environnemental (GCE) (2005). Essais de multitracage et modélisation mathématique dans le cadre de l’établissement de zones de prévention. Rapport hydr-gce, Université Catholique de Louvain (UCLouvain), Faculté des Sciences Appliquées, Louvain-la-Neuve, Belgique. 31/08/2005.

Van Bambeke, Q. (2024). Assessing thermal energy storage potential in the ground-water body of louvain-la-neuve. Master’s thesis, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.

van Hoegaerden (2014). Accelerating the deployment of shallow geothermal heat and cold resources in europe. Figure en ligne, publiée sur ResearchGate. Consulté le 27 mai 2026.

Vanhoudt, D., Desmedt, J., Van Bael, J., and Robeyn, N. (2011). An aquifer thermal energy storage system with predictive control : Performance after three years of operation. *Energy and Buildings*, 43(9) :2277–2285.

Welsch, B., Götzl, G., Božis, D., et al. (2018). Smart energy networks : Integration of ates systems into low-temperature district heating and cooling. *Geothermics*, 71 :50–65.

Énergie+ (2024). Chauffage par pompe à chaleur : La géothermie. https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-par-pompe-a-chaleur2/geothermie/#Schemas_de_principe. Consulté en 2024.

Annexe A

Extraits du Cahier Spécial des Charges (Bâtiment Mendel)

Cette annexe présente les extraits du Métré Récapitulatif (Cahier IV) des installations HVAC rédigé par le bureau d'études Sweco (Sweco Belgium, 2024). L'inventaire des équipements terminaux présenté ci-dessous justifie les puissances crêtes de chauffage (281 kW) et de refroidissement (164,3 kW) utilisées lors du dimensionnement thermique au Chapitre 4.

	Description	Nature	Unité	Quantité	Prix Unitaire	
	Robinet de régulation automatique à trois voies, à placer sur une tuyauterie de diamètre ..., y compris servo-moteur, accessoires, fixations, ...					
4.2.20	DN 25	QF	p	1		
4.2.21	DN 100	QF	p	1		
4.2.22	DN 150	QF	p	1		
	Robinet de régulation automatique à deux voies, à placer sur une tuyauterie de diamètre ..., y compris servo-moteur, accessoires, fixations, ...					
4.2.23	DN 32	QF	p	1		
4.2.24	DN 50	QF	p	1		
4.2.25	DN 65	QF	p	1		
4.2.26	DN 150	QF	p	1		
	Sous Total art. 4					
5	EQUIPEMENTS TERMINAUX					
5.1	Radiateurs y compris tous les accessoires (robinet thermostatique, raccord d'isolement et de réglage) et fixations conformes aux prescriptions du descriptif des travaux pour :					
5.1.1	Emission calorifique totale utile : ± 210 kW (101 pièces)	FF	FF	1		
5.2	Convecteur tubulaire en alliage non carrossé (ailettes apparentes) y compris tous les accessoires (robinet thermostatique, raccord d'isolement et de réglage) et fixations conformes aux prescriptions du descriptif des travaux pour :					
5.2.1	Emission calorifique totale utile : ± 71,05 kW (49 pièces)	FF	FF	1		
5.3	Collecteur de chauffage (aller + retour) en laiton, y compris une vanne d'isolement en amont, guide support métallique pour circuit, purgeur avec clapet, robinet de vidange, fixations murales et moyen de pose pour alimentation des convecteurs :					
5.3.1	- 4 circuits	QF	p	5		

4208-1 R01 C4-2 HVAC métré .xslm

© SWECO

FIGURE A.1 – Extrait du métré justifiant la puissance calorifique de pointe installée (Radiateurs et convecteurs).

	Description	Nature	Unité	Quantité	Prix Unitaire	
5.3.2	- 5 circuits	QF	p	4		
	Cassettes plafonnieres, y compris tous les accessoires (thermostat, régulateur, bac condensats, pompe de relevage condensats, ...) et fixations conformes aux prescriptions du cahier spécial des charges, pour :					
5.3.3	Emission frigorifique totale utile : 500 W	QF	p	2		
5.3.4	Emission frigorifique totale utile : 740 W	QF	p	1		
5.3.5	Emission frigorifique totale utile : 850 W	QF	p	3		
5.3.6	Emission frigorifique totale utile : 1200 W	QF	p	2		
5.3.7	Emission frigorifique totale utile : 1250 W	QF	p	1		
5.3.8	Emission frigorifique totale utile : 1350 W	QF	p	2		
5.3.9	Emission frigorifique totale utile : 1400 W	QF	p	1		
5.3.10	Emission frigorifique totale utile : 1500 W	QF	p	1		
5.3.11	Emission frigorifique totale utile : 1600 W	QF	p	1		
5.3.12	Emission frigorifique totale utile : 1900 W	QF	p	4		
5.3.13	Emission frigorifique totale utile : 2250 W	QF	p	2		
5.3.14	Emission frigorifique totale utile : 2450 W	QF	p	1		
5.3.15	Emission frigorifique totale utile : 2500 W	QF	p	2		
5.3.16	Emission frigorifique totale utile : 2600 W	QF	p	3		
5.3.17	Emission frigorifique totale utile : 3000 W	QF	p	12		
5.3.18	Emission frigorifique totale utile : 3500 W	QF	p	3		
5.3.19	Emission frigorifique totale utile : 3600 W	QF	p	2		
5.3.20	Emission frigorifique totale utile : 3700 W	QF	p	2		
5.3.21	Emission frigorifique totale utile : 3770 W	QF	p	3		
5.3.22	Emission frigorifique totale utile : 3800 W	QF	p	13		
5.4	Panoplie hydraulique froid (1 vanne d'isolement, 1 vanne de réglage, 1 vanne de vidange, 1 vanne de régulation modulante à 2 voies avec réglage du débit intégrée, 1 purgeur d'air automatique avec sa vanne d'isolement) pour dito					
5.4.1	DN 15	QF	p	11		
5.4.2	DN 20	QF	p	27		
5.4.3	DN 25	QF	p	24		
5.4.4	DN 32	QF	p	4		

208-1 R01 C4-2 HVAC métré .xslm

© SWECO

FIGURE A.2 – Extrait du métré justifiant la puissance frigorifique de pointe installée (somme = 164 300W).

A.1 Localisation des forages historiques du SGB

La carte ci-dessous (Figure A.3) présente la répartition spatiale des forages du Service Géologique de Belgique utilisés pour la calibration des mesures HVSR sur le campus de Louvain-la-Neuve. Les codes d'identification (ex : 117W0341) permettent de se référer aux coupes lithologiques officielles.



FIGURE A.3 – Carte de localisation des points historique de forage (Source : GISEL)

Annexe B

Cartographies hydrogéologiques complémentaires

B.1 Modélisation de la surface piézométrique

La Figure B.1 présente l'interpolation par krigeage de la nappe phréatique (Z_{nappe}) exprimée en altitude absolue (mètres DNG). Ce document cartographique permet de visualiser la direction générale d'écoulement naturel de la nappe sous le plateau de la Croix du Sud.

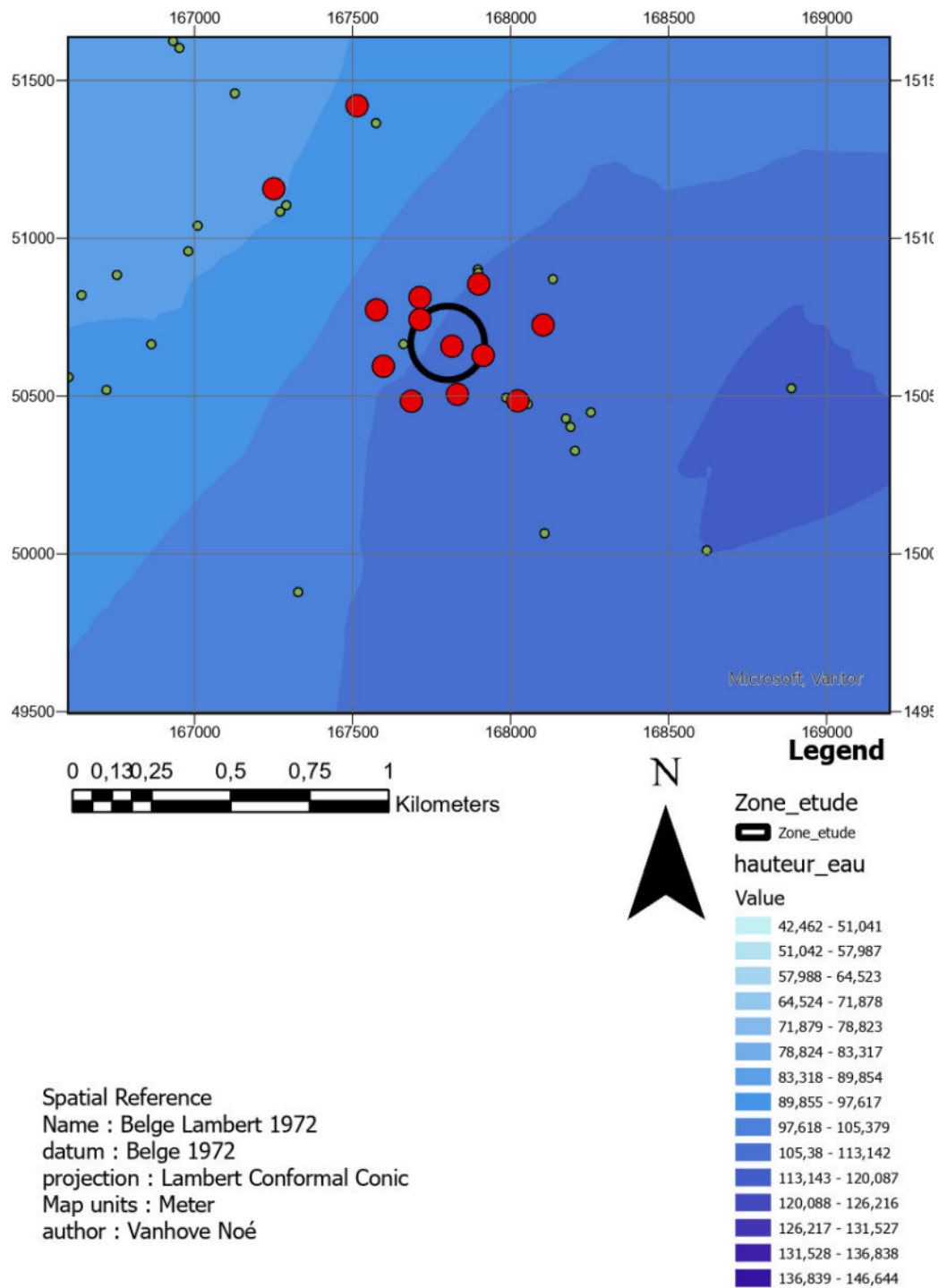


FIGURE B.1 – Modèle numérique interpolé de la cote de la nappe phréatique (Réseau piézométrique UCLouvain).

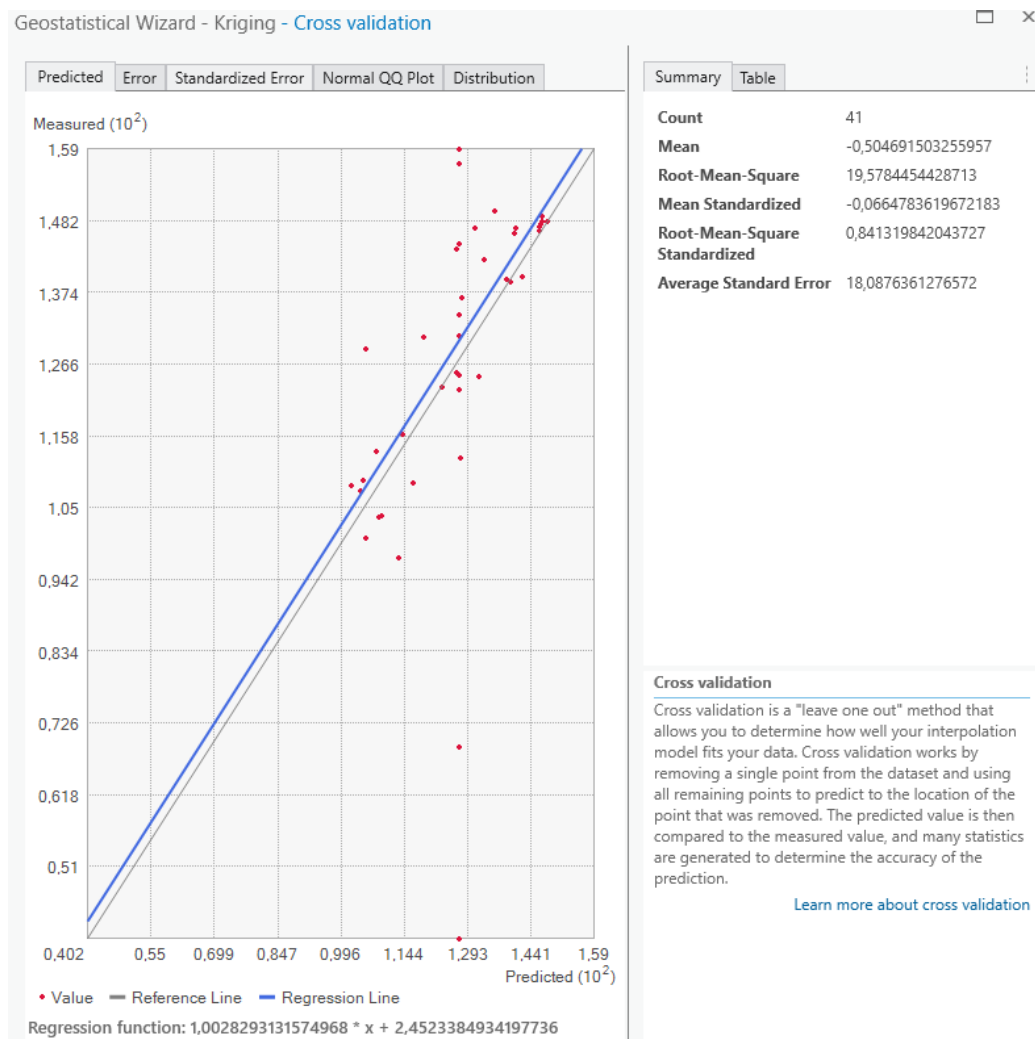


FIGURE B.2 – Caractéristique du krigeage de la hauteur d'eau

B.2 Topographie du toit du socle Landénien

La Figure B.3 représente l'altitude absolue recalculée du toit de la formation imperméable sous-jacente (Z_{socle}), établie à partir des profondeurs géophysiques calées et corrigées de l'effet altimétrique du relief de surface.

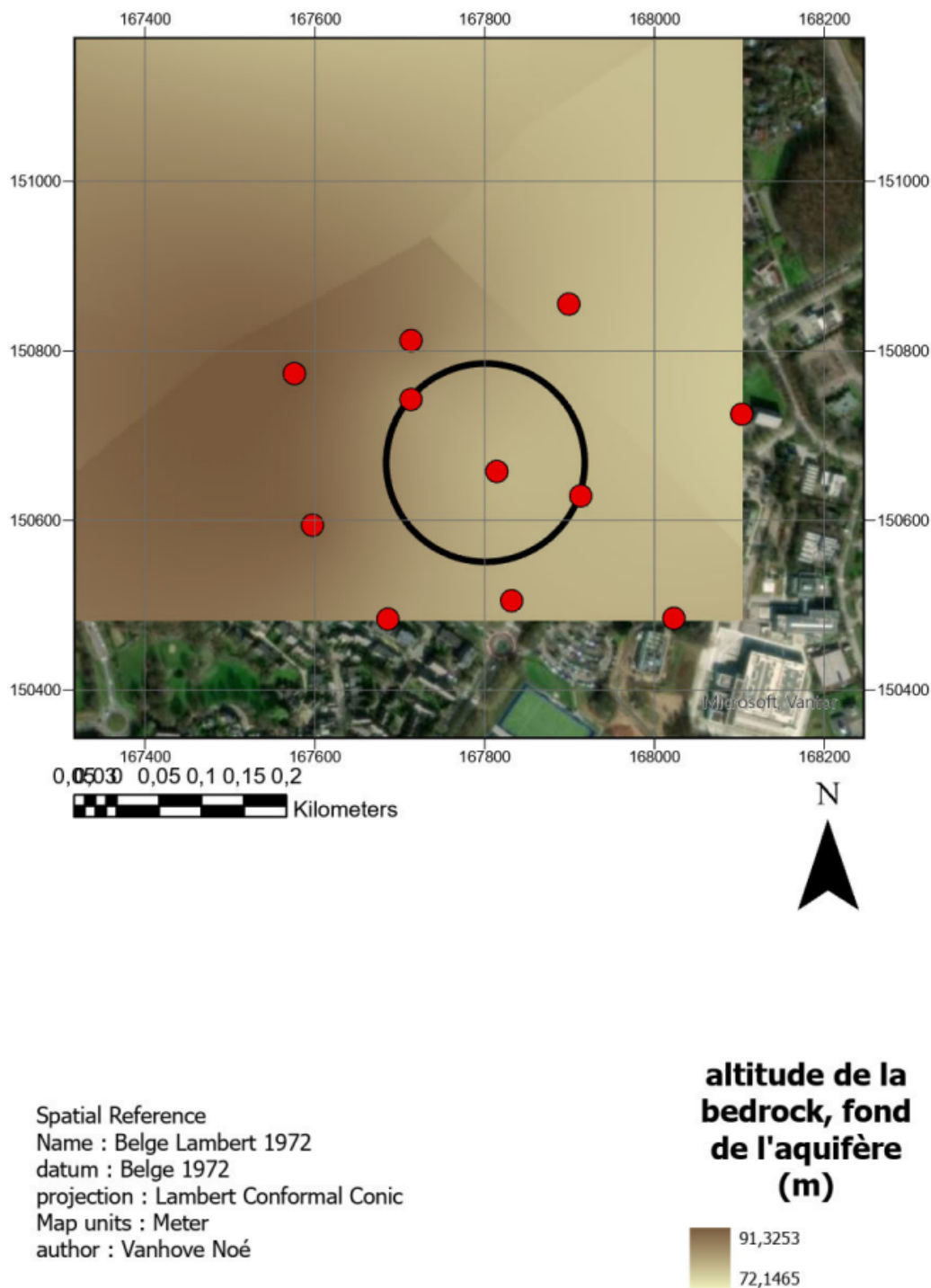


FIGURE B.3 – Modèle numérique de la topographie absolue du toit du socle (Bedrock) après correction altimétrique par MNT.

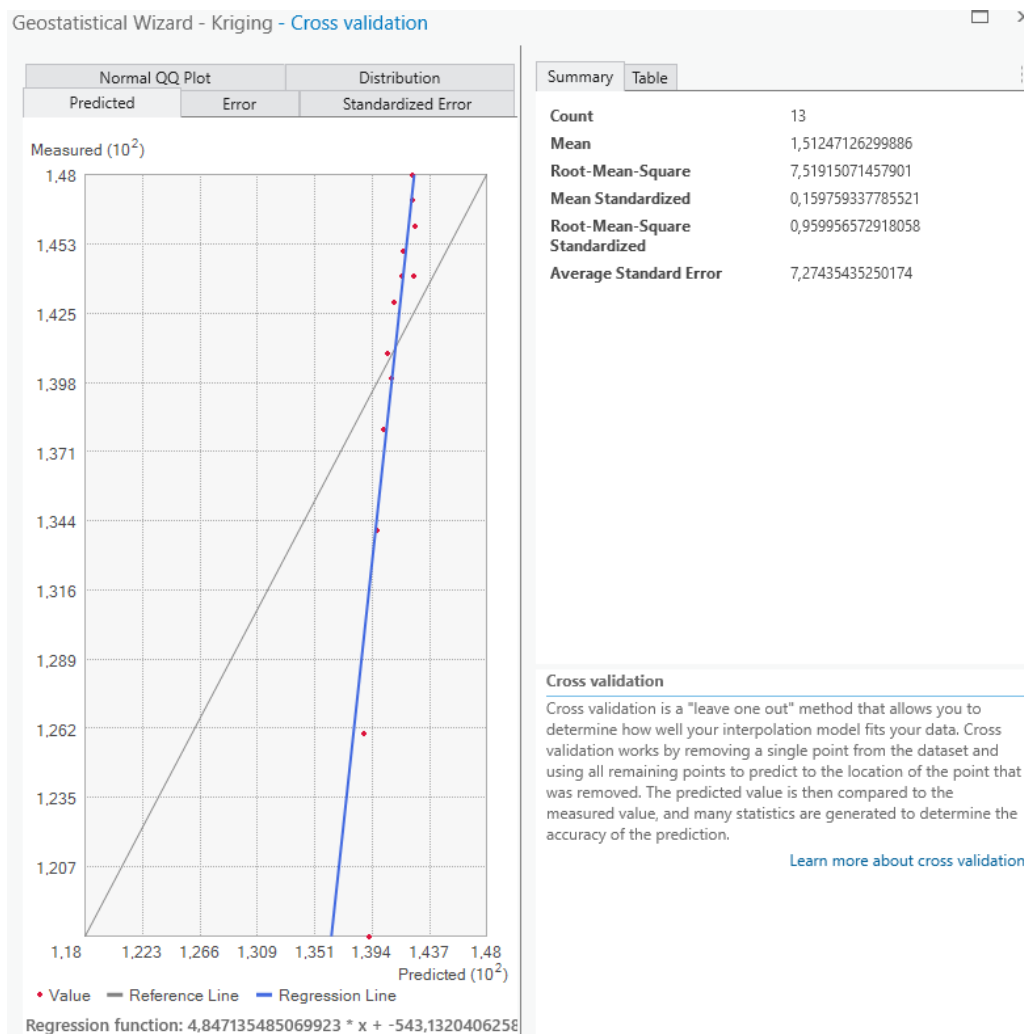


FIGURE B.4 – Caractéristique du krigage du toit du socle

Annexe C

Données piézométriques et niveau du sol de référence

Le tableau ci-dessous synthétise les relevés altimétriques et piézométriques historiques issus des travaux de Van Bambeke (2024). Ces données de référence ont permis d'obtenir le niveau de la nappe (Z_{nappe}) et la topographie de surface (Z_{sol}) pour la modélisation du site de la zone de la Croix du Sud.

Nom du forage	X (Lambert 72)	Y (Lambert 72)	Z_{sol} (m)	Z_{nappe} (m)
S20	169031,43	149454,28	147,120	109,590
S21	167985,85	150494,47	147,274	109,340
S22	168054,51	150474,45	147,651	110,520
S24	166476,41	150590,31	97,423	88,400
S25	166328,56	150785,16	129,009	86,490
S26	166057,02	151156,00	124,694	83,140
S28	167896,25	150901,35	139,446	106,850
S30	167897,91	150891,12	139,075	107,250
S36	168971,50	151891,39	112,506	95,980
S39	168888,56	150524,55	149,693	115,400
S42	166601,47	150559,67	100,451	98,640
S45	166980,28	150958,81	103,740	88,840
S47	166754,64	150883,67	109,170	88,500
S48	166642,59	150819,56	103,662	88,160
S50	166931,99	151624,45	124,883	84,550
S51	166952,35	151602,80	125,367	85,620
S58	168620,63	150011,17	147,137	114,440
S59	168107,50	150065,02	139,721	112,640
S60	167328,01	149878,83	143,971	104,310
S61	166863,43	150664,08	107,531	90,540
S62	166721,50	150519,40	108,383	90,500
S63	168133,81	150870,56	146,338	109,800
S64	167574,25	151364,76	123,261	89,480
S65	167420,98	151905,20	136,673	87,480
S66	168203,62	150326,55	146,706	112,050
S67	168253,95	150448,47	148,169	111,940
S68	167661,16	150664,84	142,259	106,200
S69	168175,00	150429,00	148,830	111,120
S70	167127,51	151458,89	130,597	88,520
S71	167271,00	151084,00	108,790	87,510
S72	167290,41	151104,45	116,149	88,100
S73	168189,64	150402,56	148,158	110,630
S74	167009,84	151039,71	113,518	88,210
S241	169031,43	149454,28	147,120	117,020
PZ83	174572,00	146165,00	158,960	148,655
PZ84	155330,00	151170,00	130,890	97,025
PZ1099	161849,00	139515,00	156,860	133,825
PZ2835	160280,00	150020,00	134,070	92,310
PZ3454	172411,00	157358,00	69,080	46,850
PZ6565	154870,00	146950,00	144,660	127,605
PZ6677	156327,00	154031,00	122,740	73,135
PZ6728	169489,00	157813,00	40,170	40,185

TABLE C.1 – Coordonnées, altitudes du sol naturel et niveaux piézométriques des puits de référence.

Annexe D

Données brutes de la campagne géophysique H/V

D.1 Données brutes de la campagne géophysique H/V

Le tableau ci-dessous consigne l'intégralité des données brutes récoltées (f_0) lors de la campagne de prospection sismique passive (méthode H/V) ayant permis d'alimenter le modèle d'interpolation spatiale (krigeage) sous ArcGIS. (profondeur socle est trouvée par $h = 125 \cdot f_0^{-1,58}$)

ID du point	X (Lambert 72)	Y (Lambert 72)	Z_{sol} (m)	f_0 (Hz)	Z_{nappe} (m)	Z_{socle} (m)	Épaisseur (m)
1. 117w0341	168022,9	150484,7	148,0	1,4865	110,0	81,2	28,8
2. 117w0299	167514,3	151419,8	126,0	1,5856	89,0	65,7	23,3
3. 117w0132	167597,3	150594,5	140,0	1,9692	104,6	97,2	7,4
4. Bât. des serres	167814,4	150657,9	145,0	1,4911	108,4	78,5	29,9
5. 117w0347	167899,1	150855,2	143,0	1,5282	112,2	79,0	33,2
6. Devant parking Hall Sciences	167713,3	150812,3	138,0	1,9875	104,7	95,8	8,9
7. Derrière Carnoy	167713,2	150742,7	141,0	1,4797	106,0	73,7	32,3
9. Gauche du parking Sud	167686,1	150483,8	144,0	1,5353	107,0	80,5	26,5
11. Place des paniers	167575,9	150773,2	134,0	2,1102	102,0	95,6	6,4
1. Butte parking Sud	167831,8	150505,5	147,0	1,4865	108,4	80,2	28,2
2. Musée RG	167250,9	151156,8	118,0	2,3571	95,7	85,7	10,0
3. Derrière Serveur	167913,3	150629,0	146,0	1,5353	109,0	82,5	26,5
4. Côté Cyclotron	168102,9	150725,4	144,0	1,4797	110,5	76,7	33,8

TABLE D.1 – Coordonnées, fréquences de résonance et cotes altimétriques déduites pour les 13 points de mesure H/V.

D.2 Calcul du rabattement

TABLE D.2 – Paramètres et résultats de l’analyse de sensibilité du rabattement hydrodynamique (Équation de Thiem) pour la zone entre la place Croix du Sud et le Cyclotron.

Paramètre	Symbole	Scénario Pessimiste (T_{min})	Scénario Optimiste (T_{max})
1. Données d'exploitation et limites (Fixes)			
Débit de pompage de pointe	Q	0,01 m ³ /s (<i>soit approx. 36 m³/h</i>)	
Rayon d'influence (Sichardt)	R	150 m	
Rayon du forage	r_w	0,125 m	
Épaisseur saturée de l'aquifère	H	30 m	
Sens de l'écoulement régional	-	Nord / Nord-Ouest (N-NO)	
2. Propriétés hydrodynamiques locales (Variables)			
Perméabilité	K	0,0001 m/s	0,001 m/s
Transmissivité ($T = K \cdot H$)	T	0,003 m ² /s	0,03 m ² /s
3. Résultats - Loi de Thiem			
Rabattement maximal	s	3,76 m	0,38 m

Faisabilité d'un système de stockage intersaisonnier de chaleur (ATES) dans le contexte de Louvain-la-Neuve et des nouveaux bâtiments à la Croix du Sud

Noé VANHOVE

Exploiter la nappe phréatique de Louvain-la-Neuve pour chauffer les bâtiments rénovés de la Place de la Croix du Sud : ce concept séduisant de transition énergétique est-il réalisable ?

En s'appuyant sur des campagnes de prospection géophysique (méthode H/V) et sur l'analyse historique de l'aquifère, ce mémoire lève une à une les incertitudes locales et les limites.

Les résultats mettent en évidence une épaisseur saturée exceptionnelle de près de 30 mètres au sud-est du site. Les propriétés de l'aquifère se montrent localement capables de soutenir les débits de pointe requis par les trois bâtiments principaux, tout en maintenant les rabattements dans des limites techniquement admissibles dans l'optique de l'obtention d'un Permis Unique auprès du SPW. Par ailleurs, l'étude souligne qu'un fort déséquilibre annuel entre les besoins calorifiques et frigorifiques imposera le couplage de l'ATES avec des infrastructures de régénération thermique actives. Enfin, l'évaluation économique démontre la viabilité financière du projet face au système gaz actuel : portée par la tarification électrique avantageuse du futur micro-réseau de l'UCLouvain (centrale biomasse de 2027), l'installation garantit un temps de retour sur investissement (ROI) inférieur à 15 ans.