

Étude de faisabilité dans le bassin de Liège en vue de lancer un projet pilote en géothermie minière

Note de synthèse



Wallonie



Résumé

Ce rapport présente une synthèse de l'étude réalisée dans le bassin de Liège en vue de lancer un projet pilote en géothermie minière. Les résultats finaux seront présentés lors d'un workshop qui aura lieu le 21 novembre 2024.

Le site de Glain/Saint-Nicolas, estimé comme étant le plus favorable à l'implantation d'un projet pilote dans le Bassin houiller de Liège a été sélectionné comme cible pour la réalisation de l'étude de faisabilité.

Le concept étudié combinant l'utilisation des anciens charbonnages pour extraire et stocker de la chaleur et du froid à un réseau de chaleur et de froid de 5ème génération est décrit. Ensuite, les données concernant la demande en surface et les données sous-sols collectés dans le périmètre du site étudié sont synthétisées. Le scénario de base pour la production et le stockage d'énergie thermique ainsi que les bâtiments sélectionnés comme connexions prioritaires sont détaillés. Enfin, les conclusions concernant la faisabilité technique et économique du projet sur le site de Glain/Saint Nicolas sont présentées et les risques identifiés sont résumés.

Table des matières

Résumé	2
Table des matières	3
Liste des figures.....	4
Introduction.....	6
1. Contexte de l'étude	6
2. Site étudié.....	7
Présentation du Concept Géomine et réseaux 5GDHC.....	8
1. Les sous-stations équipées de pompes à chaleur fournissent de la chaleur et du froid à la température requise.....	8
2. Le réseau thermique ferme la boucle énergétique	9
3. Les mines pour le stockage de chaleur et de froid	10
4. La demande de chaleur à basse température et de refroidissement à haute température est une condition essentielle.....	11
5. Équilibrage des demandes de chaleur et de froid	11
Étude de faisabilité	12
1. Concept GÉOMINE appliqué au site du bassin de Liège	12
2. Synthèse des données de surface	13
Sélection des bâtiments appropriés.....	13
Scénario de base analysé.....	14
3. Synthèse des données sous-sol	16
Définition de la zone d'étude	16
Cadres géomorphologiques, géologique et hydrogéologique	17
Contexte minier.....	17
Représentations et modèles numériques en 3D du sous-sol.....	17
4. Modélisations	19
Identification de scénarii de référence	19
Modélisations du réservoir minier.....	19
Modèle avec écoulement principalement dans les galeries	19
5. Conclusions concernant la faisabilité technique du projet : résultats des modélisations du réservoir minier	23
Références	24
Annexe 1 : Cadres géomorphologique, géologique et hydrogéologique	25
Annexe 2 : Contexte minier	31

Liste des figures

FIGURE 1 : Représentation circulaire d'un système 5GDHC incluant le stockage saisonnier utilisant les mines. modifié d'après Boesten et AL. (2019).	6
FIGURE 2 : Exemple de sous-station d'un réseau 5GDHC et de la pompe à chaleur	8
FIGURE 3 : Exemple de schéma de réseau thermique 5GDHC (tiré de Boesten et AL., 2019)	9
FIGURE 4 : Les mines de charbon abandonnées fournissent un énorme volume de stockage thermique.....	10
FIGURE 5 : Vue schématique du concept géomine. Notez que les températures chaudes et froides (côté consommateur) sont indicatives. Le concept nécessite l'utilisation d'une unique pompe à chaleur (reversible) par sous-station, cependant celle-ci est mentionnée deux fois sur le schéma afin de montrer la différence entre le mode chauffage et le mode refroidissement.	12
FIGURE 7 : Scénarios d'extension potentielle. A gauche scénario de base avec extension au nord et à droite scénario de base avec extension sud	15
FIGURE 8 : Débits et volumes prévus pour la production/stockage souterrain d'eau chaude et froide pendant un an à Liège et consommation cumulée d'eau chaud et froide en prenant en compte l'efficacité des pompes à chaleur pour le chauffage et le refroidissement ainsi que les échanges entre utilisateurs.	16
FIGURE 9 : Plan de situation de la zone d'étude (contour bleu) au sein de la concession minière concernée.....	16
FIGURE 10 : Vue latérale de l'ancienne mine sur le site pilote à Liège, utilisé pour la modélisation.	20
FIGURE 11 : Prédiction de la température de production au niveau des puits froid et chaud pendant 5 cycles de stockage pour une paire de puits considérée. a) en considérant les puits de mines ouverts, en considérant des matériaux de remblaiement variables équivalents à des perméabilités dans les puits de mine de b) 1000 D, c) 100 D et d) 10 D.....	22
FIGURE 12 : Prédiction du changement de pression au niveau des puits froid et chaud pendant 5 cycles de stockage pour une paire de puits considérée. a) en considérant les puits de mines ouverts, en considérant des matériaux de remblaiement variables équivalents à des perméabilités dans les puits de mine de b) 1000 D, c) 100 D et d) 10 D. Les changements de pression négative correspondent aux étapes de production tandis que les changements positifs aux étapes d'injection.....	23
FIGURE 13 : Topographie et réseau hydrographique de la région du projet pilote (IGN, 2023 ; SPW, 2019).	25
FIGURE 14 : Carte géologique de la région du projet pilote (Forir, 1902 ; Forir, 1897).	26

FIGURE 15 : Carte hydrogéologique de la région du projet pilote (Ruthy, 2006 ; Ruthy & Willems, 2015).	28
FIGURE 16 : Captages (base de données DixSous, débit maximal autorisé) et galeries et sorties d'exhaure (ISSEP) dans la région du projet pilote. Les chiffres correspondent aux débits de production annuelle des captages.	29
FIGURE 17 : Évolution du débit à l'exhaure de Gosson au cours du temps (données de l'ISSEP). ...	30
FIGURE 18 : Plan d'areines situées au nord de la ville de Liège (de Jaer & Yans, 1948).	32
TABLEAU 1 : Connexions potentielles et température de chauffage associée estimée ou rapportée.	13
FIGURE 6: Scénario de base : bâtiments connectés et réseau thermique indicatif ..	14
TABLEAU 2 : Couches de charbon exploitables sur la concession de l'Espérance et Bonne-Fortune avec leurs épaisseurs (source : S.A. des Charbonnages de l'Espérance et Bonne-Fortune, 1905).	32
TABLEAU 3 : Caractéristiques des puits présents dans la zone d'étude (extrait de la BD-Mines, SPW-DRIGM, com. pers.).	33
TABLEAU 4 : Caractéristiques des puits abandonnées sans ADP dans la zone d'étude et d'après les éléments collationnés dans les archives du SPW-DRIGM (dossier concession 188)	34
TABLEAU 5 : Caractéristiques des puits abandonnées avec ADP dans la zone d'étude et d'après les éléments collationnés dans les archives du SPW-DRIGM (dossier concession 188)	34
TABLEAU 6 : Caractéristiques de la section du puits Bure aux Femmes d'après les éléments collationnés dans les archives du SPW-DRIGM (dossier concession 188)	35
TABLEAU 7 : Caractéristiques de la section du puits Beaujonc d'après les éléments collationnés dans les archives du SPW-DRIGM (dossier concession 188)	35

1. Contexte de l'étude

L'une des solutions envisageables pour sécuriser l'approvisionnement en énergie et réduire l'impact environnemental et climatique du chauffage et du refroidissement est le développement de systèmes énergétiques utilisant la géothermie.

En 2019, l'Administration de l'Energie a lancé une étude relative à la détermination du potentiel géothermique des anciennes mines désaffectées en Wallonie (cf. energie.wallonie.be). Les résultats ont montré que le Bassin de Liège disposait d'un bon potentiel géothermique minier estimé à environ 444 GWh/an. La zone la plus favorable est globalement située autour de l'axe Jemeppe/Seraing – Glain, avec un potentiel maximum entre Saint-Nicolas, Berleur et Tilleur. Les anciens charbonnages de Gosson-Lagasse sont situés dans cette zone. A contrario, les charbonnages de Blégny (site UNESCO), Grande Bacnure, Abhooz, du Hasard (Cheratte), Herve, Wérister sont situés dans des zones où le potentiel « site » est qualifié de plus limité.

Le gisement houiller, en raison de la fracturation induite par l'exploitation minière, est susceptible d'être rendu exploitable pour du pompage à des fins géothermiques basse énergie. Il présente des potentialités de récupération énergétiques (chaleur et froid) non négligeables et sans aucun impact au niveau des aquifères d'eau potable. La localisation de nombreux centres urbanisés à l'aplomb des anciens bassins houillers permettra de fournir un certain nombre d'utilisateurs potentiels.

Ce rapport présente une synthèse de l'étude réalisée dans le bassin de Liège en vue de lancer un projet pilote en géothermie minière. L'évaluation a été réalisée sur base de la définition des réseaux de chaleur et climatisation de 5ème génération (5GDHC) auxquels s'intègrent parfaitement la géothermie de basse énergie et le stockage d'énergie dans les anciens charbonnages (Figure 1).

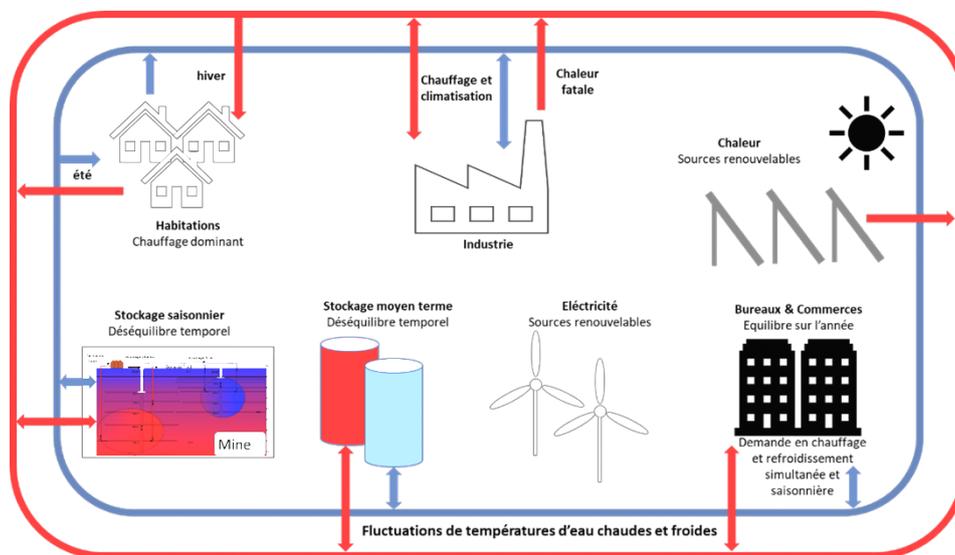


FIGURE 1 : REPRÉSENTATION CIRCULAIRE D'UN SYSTEME 5GDHC INCLUANT LE STOCKAGE SAISONNIER UTILISANT LES MINES. MODIFIÉ D'APRÈS BOESTEN ET AL. (2019).

2. Site étudié

Dans un premier temps, le site jugé le plus favorable pour accueillir un projet pilote dans le Bassin de Liège a été sélectionné et le périmètre de la zone d'étude pour l'analyse de faisabilité a été défini.

Le processus de sélection du site s'est appuyé sur les propositions de sites émises par les acteurs locaux et sur une collecte d'informations préliminaires. Les données collectées concernaient principalement les occupations de sol, les consommations des différents bâtiments présents sur ou à proximité des sites, la densité et la mixité fonctionnelle, etc. La sélection du site a aussi été motivée par les conditions de mise en œuvre du projet, les aspects techniques et pratiques, les usages actuels en surface et les contraintes associées ainsi que par le type d'utilisations visées.

Le site de Glain/Saint-Nicolas apparaît comme étant le plus favorable à l'implantation d'un projet pilote dans le Bassin houiller de Liège. Il a donc été sélectionné comme cible pour la réalisation de l'étude de faisabilité.

Les avantages principaux du site sont les suivants :

- Plusieurs types de bâtiments,
- Demande de chaud et de froid,
- Peu de consommateurs à solliciter dans un premier temps,
- Espace non-bâti présent,
- Futurs développements prévus sur la zone,
- Fort engagement des acteurs locaux,
- Le projet de la trans-urbaine (opportunité pour le réseau),
- Potentiel sous-sol le plus élevé.

Dans cette note de synthèse, le concept étudié combinant l'utilisation des anciens charbonnages pour extraire et stocker de la chaleur et du froid à un réseau de chaleur et de froid de 5^{ème} génération est décrit. Ensuite, les données concernant la demande en surface et les données sous-sol collectées dans le périmètre du site étudié sont synthétisées. Le scénario de base pour la production et le stockage d'énergie thermique ainsi que les bâtiments sélectionnés comme connexions prioritaires sont détaillés. Enfin, les conclusions concernant la faisabilité technique et économique du projet sur le site de Glain/Saint Nicolas sont présentées et les risques identifiés sont résumés.

Présentation du Concept Géomine et réseaux 5GDHC

Un réseau de chaleur et de froid urbain de 5^{ème} génération (5GDHC) est basé sur l'échange d'énergie thermique entre des bâtiments présentant des besoins complémentaires. Le réseau principal achemine un flux basse température vers des sous-stations actives et distribuées qui élèvent/réduisent la température au niveau requis pour le chauffage et le refroidissement. Le stockage thermique décentralisé amortit les fluctuations de l'offre et de la demande de chaleur et de froid. Cette architecture maximise la part des sources d'énergie renouvelables et résiduelles de faible qualité.

Le concept de Géomine connecte des réseaux de type 5GDHC à des mines de charbon abandonnées qui servent de source géothermique et de stockage thermique. Les sections suivantes décrivent l'interaction entre les anciennes mines de charbon et le réseau thermique via les sous-stations. Pour un projet donné, la connaissance des caractéristiques de ces trois paramètres principaux est suffisante pour définir les caractéristiques techniques de base du réseau 5GDHC associé. Cependant, des conditions techniques préalables supplémentaires sont essentielles pour faire fonctionner ces réseaux de façon efficace ; les systèmes de distribution de chaleur et de froid doivent être (rendus) compatibles avec le chauffage à basse température et le refroidissement à haute température.

1. Les sous-stations équipées de pompes à chaleur fournissent de la chaleur et du froid à la température requise

Dans les réseaux de chauffage traditionnels, la chaleur du réseau est livrée au client via une sous-station qui contient un ou plusieurs échangeurs de chaleur. Dans un réseau de 5^{ème} génération, ces sous-stations disposent également de pompes à chaleur. Les pompes à chaleur sont là pour générer la température requise, à l'endroit précis de la demande. L'eau chaude sanitaire peut être fournie par une chaudière supplémentaire avec une pompe à chaleur d'appoint, qui fait partie intégrante du système.

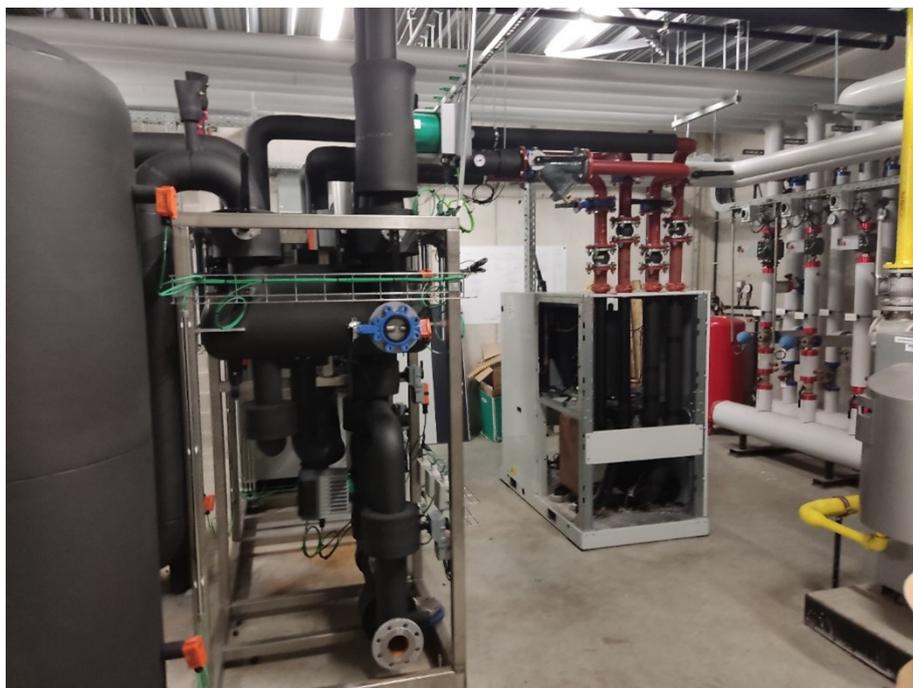


FIGURE 2: EXEMPLE DE SOUS-STATION D'UN RÉSEAU 5GDHC ET DE LA POMPE À CHALEUR

La conséquence importante est que le réseau transporte de l'énergie thermique, mais qu'il n'a pas besoin de fournir la température requise. Chaque bâtiment reçoit exactement ce dont il a besoin, rien de plus. Comme ces pompes à chaleur sont bidirectionnelles, les sous-stations peuvent fournir à la fois de la puissance de chauffage et de refroidissement. Le réseau et les pompes à chaleur peuvent fournir ce service à un coefficient de performance systémique (COP) très élevé, ce qui réduit la consommation d'électricité à un niveau où elle peut finalement être fournie à partir de sources durables.

2. Le réseau thermique ferme la boucle énergétique

Le réseau thermique à deux tuyaux n'est pas configuré comme pour un réseau de chauffage traditionnel, ayant une « ligne d'alimentation » pour fournir de la chaleur et une « ligne de retour » vers la source de chaleur où elle est à nouveau chauffée. Dans une grille de 5^{ème} génération, il y a un « tuyau chaud » et un « tuyau froid », également appelés boucles. La température exacte à l'intérieur de ces tuyaux n'est pas fixe, mais peut monter et descendre dans une certaine plage.

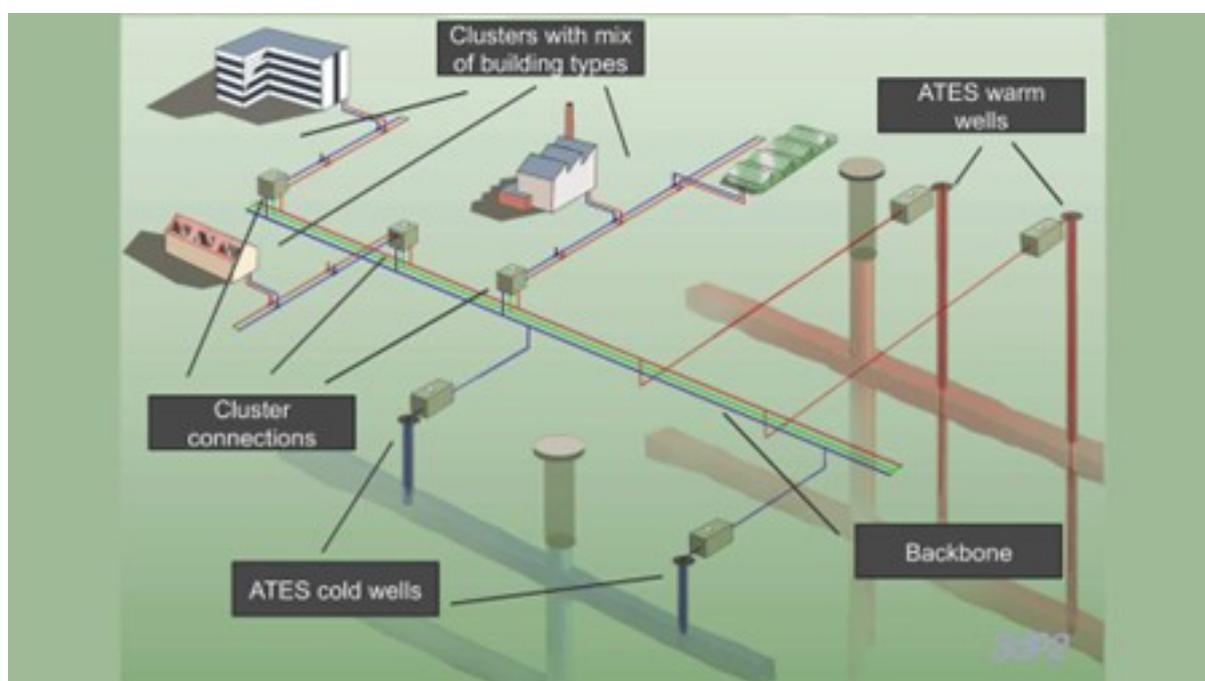


FIGURE 3: EXEMPLE DE SCHÉMA DE RÉSEAU THERMIQUE 5GDHC (TIRÉ DE BOESTEN ET AL., 2019)

Les sous-stations qui ont besoin de chaleur prélèvent l'eau du « tuyau chaud », extraient la chaleur et renvoient l'eau refroidie au « tuyau froid ». Le refroidissement est assuré par le processus inverse. Ainsi, les pompes des sous-stations le long du réseau déplacent l'eau du tuyau chaud vers le tuyau froid, ou vice-versa. Cela signifie que la valeur et la direction du débit d'eau dans les deux conduites ne sont pas fixes, mais qu'ils traduisent simplement la somme de tous les débits demandés par toutes les sous-stations.

Le réseau transporte de l'énergie et les besoins de chauffage et de refroidissement se contrebalancent automatiquement au sein du réseau local. Au niveau des bâtiments individuels, il est possible de réduire les besoins énergétiques par diverses mesures. A l'échelle d'un quartier, le réseau ajoute une nouvelle opportunité de réduction de la consommation d'énergie : en permettant les échanges d'énergie entre les clients qui ont besoin de se chauffer et ceux qui ont besoin de se rafraîchir. Un réseau piloté par la demande facilite un tel échange de chaleur à basse température et de refroidissement à haute température. La valeur ajoutée du réseau est que le flux d'énergie thermique vers les pompes à chaleur garantit un COP saisonnier systémique suffisamment élevé pour que l'investissement en vaille la peine.

3. Les mines pour le stockage de chaleur et de froid

Un tel réseau pourrait fonctionner sans stockage si les demandes de chaleur et de froid étaient toujours équivalentes. Cela arrive parfois mais jamais de façon permanente. Afin de parer au déséquilibre entre les demandes de chaud et de froid dans le temps, des réservoirs de stockage thermique sont mis en place. Ils doivent être suffisamment grands pour stocker le surplus de chaleur et de froid et le conserver pour une période ultérieure lorsque celui-ci pourra être utilisé. La connexion d'un stockage thermique au réseau permet d'équilibrer les flux de demande. Un échangeur de chaleur est utilisé pour convertir tout excédent du côté « froid » en « chaud », et vice-versa. Ainsi, le stockage permet de prélever le surplus d'énergie présent à un instant donné pour l'échanger dans le futur, quand cela sera nécessaire.



FIGURE 4: LES MINES DE CHARBON ABANDONNÉES FOURNISSENT UN ÉNORME VOLUME DE STOCKAGE THERMIQUE

Le stockage peut être important et centralisé, mais pas uniquement. Il peut s'agir d'un stockage plus petit et réparti au niveau d'emplacements à proximité des points de demande. Différentes installations de stockage peuvent ainsi desservir le réseau sur différentes échelles de temps. Les chaudières à eau chaude sanitaire sont un exemple de stockage à très court terme qui permet de garantir une capacité suffisante dans les moments de forte demande, comme lorsque de nombreuses personnes veulent prendre une douche. Le réseau lui-même et les bâtiments ont également une capacité importante à stocker la chaleur et à stabiliser la température. Le stockage d'énergie thermique dans un aquifère (ATES) peut stocker de la chaleur et du froid sur des échelles de temps moyennes, mais aussi de manière saisonnière. Dans les projets Géomine, les mines de charbon désaffectées fournissent un énorme volume de stockage thermique car elles sont remplies d'eau. Si le système est conçu en prenant en compte la capacité de régénération naturelle du réservoir minier (thermique et parfois hydrogéologique), sa pérennité sur le long terme est assurée. La recharge naturelle grâce à l'énergie géothermique est donc un avantage supplémentaire à l'utilisation de ce type de réservoir.

4. La demande de chaleur à basse température et de refroidissement à haute température est une condition essentielle

Comme un réseau 5GDHC doit fonctionner à «ultra-basse température», il est nécessaire que les bâtiments adaptent leur système de distribution à du chauffage basse température et du refroidissement haute température. Cette condition se traduit par une plus petite différence de température à produire par les pompes à chaleur, ce qui les rend plus efficaces en fonctionnement.

5. Équilibrage des demandes de chaleur et de froid

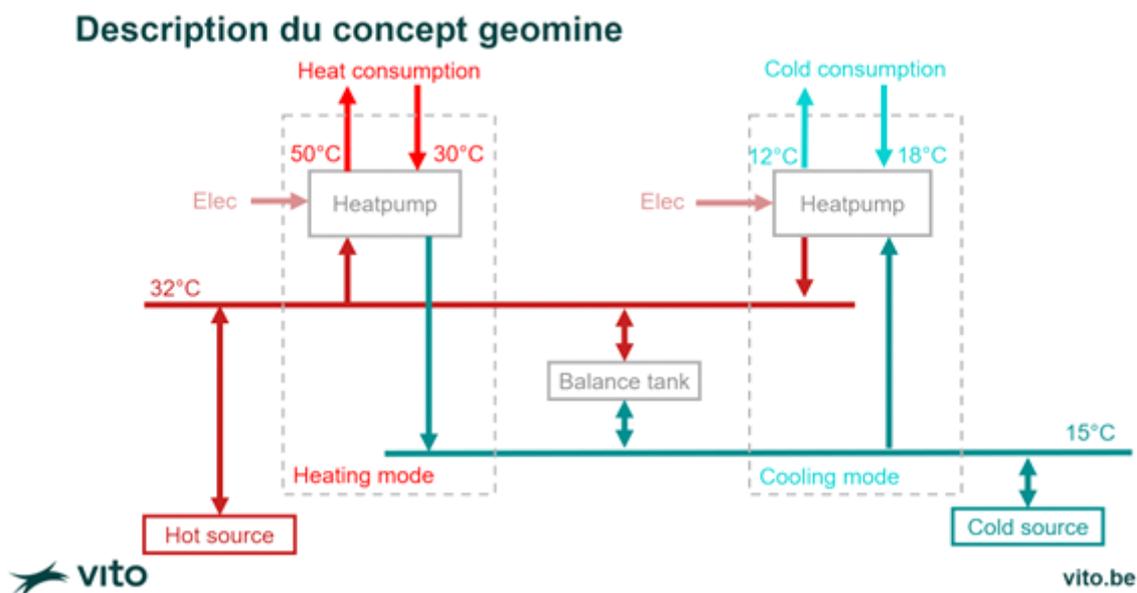
Les réseaux de chauffage traditionnels n'offrent que de la chaleur à leurs bâtiments connectés ; aucun refroidissement n'est impliqué. En revanche, un système 5GDHC nécessite à la fois l'intégration de chaleur et de refroidissement. La satisfaction des demandes de refroidissement fournit de la chaleur au système DHC et la satisfaction de la demande de chauffage fournit du froid au système DHC. Cela signifie que le portefeuille de bâtiments connectés doit idéalement 1/ inclure des besoins de chaleur et de refroidissement et 2/ en quantités comparables.

Etude de faisabilité

Ce chapitre comprend l'analyse des caractéristiques des composantes de surface et du sous-sol du site de Glain/Saint-Nicolas qui a été sélectionné comme site pilote potentiel dans le bassin de Liège. Les diverses possibilités de développement envisageables sont mentionnées.

1. Concept GÉOMINE appliqué au site du bassin de Liège

Durant l'étude de faisabilité, le concept GÉOMINE tel que décrit de façon schématique en Figure 5 a été appliqué au site de Glain/Saint-Nicolas.



L'une des étapes initiales de l'étude de faisabilité a consisté à sélectionner les bâtiments susceptibles d'être connectés à un futur système 5GDHC, sur la base de considérations qualitatives et quantitatives. De plus, la capacité de chauffage et de refroidissement disponible, provenant des mines et du système 5GDHC, a été quantifiée. Les données concernant le sous-sol et la demande en surface ont été collectées en se focalisant dans le périmètre du cœur du pilote. L'adéquation entre les besoins thermiques et la disponibilité de la ressource a conduit à la définition d'un scénario de base décrit en termes technico-économiques. Dans le scénario de base, le choix a été fait de ne pas utiliser l'entièreté de la capacité de chauffage et de refroidissement disponible à partir des mines. La capacité résiduelle pourra ainsi être utilisée pour connecter des bâtiments supplémentaires dans le futur par exemple. En considérant cette capacité résiduelle, deux extensions au scénario de base ont été définies au Nord et au Sud. Les deux extensions incluent des zones où des projets résidentiels seront développés au cours de la prochaine décennie. Notons que pour le moment, aucune information concernant la demande et les caractéristiques techniques spécifiques des futurs bâtiments sur ces développements n'est disponible.

Le scénario de base est décrit en détails dans les sections suivantes.

2. Synthèse des données de surface

La collecte et l'analyse des informations relatives à la demande et aux paramètres en surface avait pour objectif de permettre de définir et de sélectionner dans le périmètre du site : les prosommateurs à impliquer en priorité, les options de stockage les plus pertinentes, les stratégies de rénovation envisageables, les contributeurs en énergies renouvelables (EnR) basse énergie existants ou potentiels à proximité du site à impliquer dès la phase pilote, la typologie minimale du réseau, les localisations favorables pour les puits et installations de surface, etc.

Premièrement, les bâtiments présents sur la zone d'étude ont été répertoriés. Leurs données et profils de consommation et leurs températures d'alimentation ont ensuite été soit collectées auprès du gestionnaire des bâtiments concernés (lorsque cela était possible) ou estimées sur la base des informations disponibles.

Sélection des bâtiments appropriés

Dans le périmètre de la zone d'étude, 12 raccordements potentiels intéressants pour un futur 5GDHC ont été identifiés. Ils sont mentionnés dans le Tableau 1 ainsi que les températures d'alimentation qui leur sont associées.

Bâtiments	Température d'alimentation[°C]	Source d'information
CHC-MontLégia Hôpital	55	Le gestionnaire de l'immeuble
LégiaPark	60	Le gestionnaire de l'immeuble
CHC-MontLégia Bat.admin+crèche	60	Le gestionnaire de l'immeuble
ValMosan	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
Pierre&Nature	60	Le gestionnaire de l'immeuble
Récup'Tout	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
BureAuxFemmes	35	Le gestionnaire de l'immeuble
HubertGoffin	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
MauriceYans	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
BranchePlanchard-BonneFortune	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
VergersMontegnée	50	Estimation VITO ; nouvelle construction
Espérance-BonneFortune	50	Estimation VITO ; nouvelle construction

TABLEAU 1: CONNEXIONS POTENTIELLES ET TEMPÉRATURE DE CHAUFFAGE ASSOCIÉE ESTIMÉE OU RAPPORTÉE

Ces bâtiments ont été sélectionnés sur la base de critères prédéfinis. Les bâtiments doivent notamment présenter une température d'alimentation compatible avec une grille 5GDHC fournissant un chauffage basse température, de sorte que les bâtiments nécessitant des températures élevées ont été exclus. Les autres critères utilisés pour sélectionner les bâtiments concernent l'impact sur la mixité de la demande (chaud/froid) ainsi que la temporalité des projets (présence ou non à ce jour des bâtiments sur le site). La priorité a été mise sur les bâtiments nécessitant à la fois une demande en chaud et en froid. Sur les 12 connexions identifiées, seules 2 ont, a priori, une demande à la fois de chauffage et de climatisation : l'Hôpital CHC Mont-Légia et le LégiaPark. Ces 2 consommateurs ainsi que le bâtiment administratif et la maison de retraite présentent aussi l'avantage d'être déjà présents sur le site, tandis que les autres bâtiments identifiés seront construits dans le futur. L'application de ces différents critères a permis de définir la fourniture de la chaleur et du froid à l'hôpital et aux bâtiments environnants comme point central du projet pilote.

Scénario de base analysé

La carte en Figure 6 montre les différents éléments pris en compte dans le scénario de base considéré dans le cadre de l'étude de faisabilité : l'hôpital et les 6 bâtiments alentours connectés via le réseau thermique lui-même connecté aux forages géothermiques. La localisation finale des forages n'est pas encore finalisée mais diverses options sont envisageables et ont été proposées. Le tracé du réseau thermique reste donc indicatif et doit être validé ultérieurement.



FIGURE 6: SCÉNARIO DE BASE : BÂTIMENTS CONNECTÉS ET RÉSEAU THERMIQUE INDICATIF

Connexions

Dans le scénario de base, au total, 7 consommateurs sont considérés pour être raccordés au système 5GDHC, représentant une puissance thermique totale de 2,4 MW(th). En considérant un scénario d'utilisation avec un profil saisonnier, sur une base annuelle, 6 GWh de chaleur et 1,9 GWh de froid seront fournis par le réseau aux bâtiments.

Notons que deux scénarios d'extension futures potentielles ont été proposés (Figure 7) :

- Scénario de base + extension Nord ;
- Scénario de base + extension Sud.

Ils sont détaillés dans le rapport complet mais ne sont pas décrits dans cette note de synthèse qui se concentre sur le scénario de base. De plus, les données de demande pour ces scénarios reposent sur des estimations car les bâtiments concernent des développements futurs.

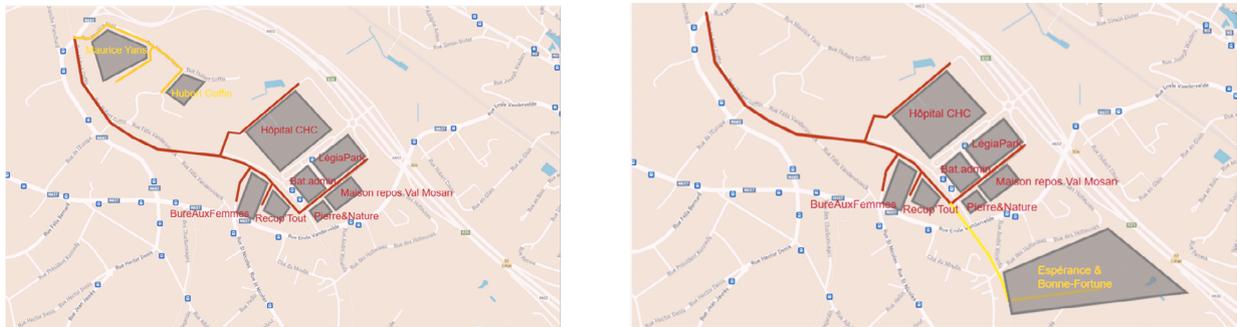


FIGURE 7: SCÉNARIOS D'EXTENSION POTENTIELLE. À GAUCHE SCÉNARIO DE BASE AVEC EXTENSION AU NORD ET À DROITE SCÉNARIO DE BASE AVEC EXTENSION SUD

Réseau thermique

La distance totale du réseau nécessaire est estimée à environ 2,8 km pour le scénario de base décrit en Figure 6. Le tracé proposé suit au maximum le RAVeL et les rues existantes.

Estimation du profil annuel de débit à fournir par le réservoir minier pour le stockage thermique

Les volumes à produire et à réinjecter depuis et vers la mine ont été estimés à partir de la demande d'énergie totale des prosommateurs (demande des 7 consommateurs cumulée) à laquelle on soustrait la demande couverte par les échanges entre les prosommateurs. Ils doivent permettre de satisfaire les exigences relatives au stockage thermique saisonnier de l'eau chaude et froide. Le profil de la demande en énergie thermique des différents prosommateurs n'est pas connu et a donc été estimé, le résultat est un profil virtuel utilisable pour simuler la demande annuelle. La reconstruction de tels profils repose sur des hypothèses concernant la dépendance climatique des demandes de chaleur et de froid (fonction de la température extérieure).

Les profils thermiques virtuels sont combinés aux puissances thermiques requises pour calculer les débits maximaux de chauffage et de refroidissement. Les débits d'eau chaude et froide à produire à partir de la mine sont calculés en appliquant un bilan énergétique sur le système. L'efficacité de chauffage et de refroidissement des pompes à chaleur est prise en compte (en incluant la consommation électrique et le rendement des pompes à chaleur). Les débits ainsi estimés sont présentés en Figure 8 à gauche, ils sont utilisés dans le cas du scénario de base présenté dans cette note de synthèse.

L'analyse a pris en compte le fait que le système est supposé fonctionner 243 jours par an en mode chauffage. Durant cette période l'eau chaude est produite à partir des zones exploitées profondes du réservoir minier et l'eau froide est réinjectée et stockée en retour dans le réservoir à faible profondeur. Le reste de l'année (122 jours), le système est supposé fonctionner en mode refroidissement, ce qui signifie que l'eau froide est extraite et l'eau chaude est stockée en retour dans la mine. Le débit lors de la production d'eau chaude atteint jusqu'à 58 m³/h environ tandis que lors de la production d'eau froide, le débit d'eau peut atteindre des pics jusqu'à 38 m³/h. Il est important de définir si ces débits journaliers maximaux peuvent être atteints et soutenables.

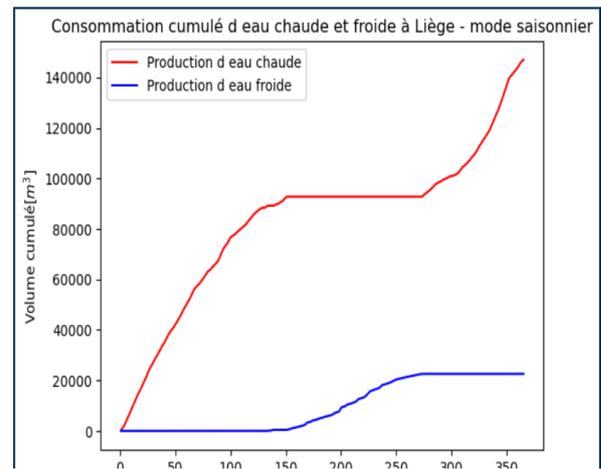
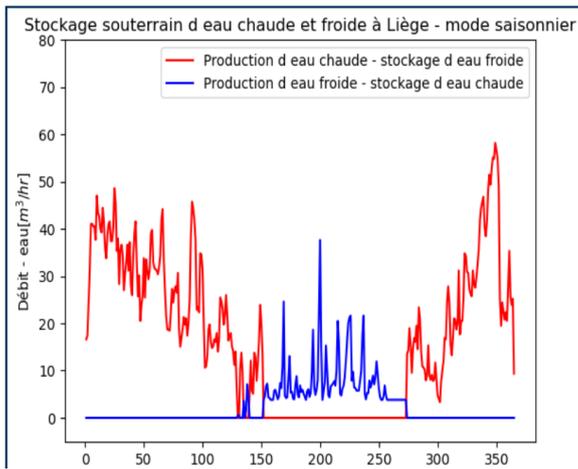


FIGURE 8 : DÉBITS ET VOLUMES PRÉVUS POUR LA PRODUCTION/STOCKAGE SOUTERRAIN D'EAU CHAUDE ET FROIDE PENDANT UN AN À LIÈGE ET CONSOMMATION CUMULÉE D'EAU CHAUD ET FROIDE EN PRENANT EN COMPTE L'EFFICACITÉ DES POMPES À CHALEUR POUR LE CHAUFFAGE ET LE REFROIDISSEMENT AINSI QUE LES ÉCHANGES ENTRE UTILISATEURS.

Notons que sur base annuelle, le système de stockage souterrain est déséquilibré, car la quantité d'eau chaude extraite (147 000 m³) est plus importante que la quantité d'eau froide (22 600 m³) soustraite au réservoir (Figure 8 à droite).

3. Synthèse des données sous-sol

Définition de la zone d'étude

Le sous-sol de la Ville de Liège et de sa périphérie est constitué des séries houillères datant du Carbonifère supérieur, dont les couches de charbon ont été exploitées de manière extensive par le passé. L'emprise du projet pilote envisagé est présentée en Figure 9, elle est située dans la partie sud de l'actuelle concession de mine de houille de Patience et Beaujonc (n°188 dans l'inventaire du SPW).

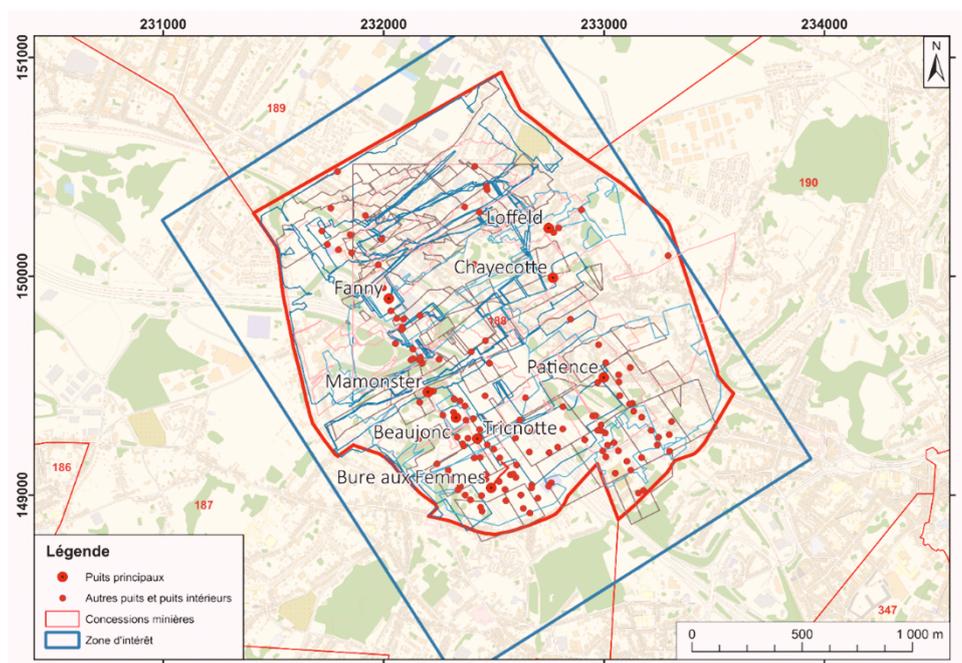


FIGURE 9 : PLAN DE SITUATION DE LA ZONE D'ÉTUDE (CONTOUR BLEU) AU SEIN DE LA CONCESSION MINIÈRE CONCERNÉE.

Cadres géomorphologiques, géologique et hydrogéologique

La collecte des données relatives au sous-sol était cruciale pour l'évaluation de la ressource thermique associée aux anciennes mines. Lors de l'étude de faisabilité, les données sous-sols collectés concernaient la géologie et l'hydrogéologie locale des formations superficielles et des formations du Houiller. Ainsi que des données minières de détail disponibles. Une synthèse du contexte géologique, hydrogéologique et minier local est présentée en Annexe 1.

Contexte minier

L'origine de la concession de Patience et Beaujonc (n° 188 dans l'inventaire du SPW) provient de la fusion en 1839 de plusieurs sociétés actives dans ce périmètre (de Jaer & Yans, 1948) :

- La société de la Conquête, dont un des puits était dénommé « Patience » ;
- La société de Beaujonc, dont l'origine remonterait à l'an 1538 (de Jaer, 1948) ;
- La société de Loffeld.

Sur base des éléments que le SPW-DRIGM a recueilli dans les archives et encodées dans la BD-Mines, les caractéristiques d'un certain nombre de puits ont pu être synthétisées et en Annexe 2.

De plus, afin d'obtenir des données complémentaires concernant l'état des puits, la nature du remblai comblant les puits, l'exhaure, etc., le dossier d'archives de la concession de Patience & Beaujonc conservé au SPW-DRIGM (bureau de Liège) a été consulté et analysé.

A noter que le concept de GÉOMINE se base sur le forage de nouveaux puits dédiés à la production/réinjection dans le réservoir minier, les puits existants ne sont donc pas les puits utilisés à cet effet. Ces puits ouverts lors de la période d'exploitation minière ont été remblayés. Ils impacteront principalement l'écoulement entre les différents niveaux de la mine.

Représentations et modèles numériques en 3D du sous-sol

A partir des données collectées, des cartes et des représentations numériques en 3D des ouvrages miniers et de leurs caractéristiques ont été établies dans la zone concernée par le pilote.

Description des données minières consultées

Les données minières consultées et ayant été utilisées lors de l'étude de faisabilité sont :

- Les plans minières, sur lesquelles les ouvrages miniers sont représentés (puits, galeries, panneaux exploités, etc.). Ils ont servi de base à la modélisation des anciennes mines.
- Les données d'archives, utiles à la compréhension des anciennes mines en tant que systèmes géothermiques. Les plus pertinentes pour le projet ont été synthétisées et intégrées dans l'étude.

Plans minières

En Belgique, l'obligation de dresser les plans d'exploitation découle des lois minières de 1791 et 1810. Depuis le milieu du 19e siècle, le format de ces plans est relativement uniformisé, en particulier au niveau de l'échelle choisie (1/1000ème), tandis que le choix des projections géographiques est longtemps resté libre. L'uniformisation complète du format n'est opérationnelle que depuis 1947.

Typiquement, les plans miniers produits par les anciens charbonnages sont de deux types :

- Les plans de surface, dont l'objet est de replacer les limites de la concession, les infrastructures de surface (bâtiments liés à l'industrie extractive) ou débouchant à la surface (puits, galeries), vis-à-vis des autres infrastructures existantes (bâtiments public et privés, voies), voire du parcellaire cadastral.
- Les plans de fond (ou plans d'exploitation), qui reprennent l'ensemble des ouvrages et travaux miniers réalisés sous le niveau du sol : puits, puits intérieurs (bouxthays), travers-bancs (bacnures), voies d'exploitation (costresses), panneaux exploités, sondages, etc.

Des documents complémentaires accompagnent fréquemment les plans miniers : coupes minières (en particulier au travers des puits principaux), projections horizontales des exploitations (en particulier pour les couches très déformées), coupes de sondages, coupes de travers-bancs, etc.

L'ensemble des plans miniers de la concession de mine de houille de Patience et Beaujonc (n°188) était autrefois déposés à l'Administration des Mines et est actuellement conservé au SPW-DRIGM.

L'ensemble des plans de fond a été scannés, ainsi que les coupes minières disponibles. Cette opération de numérisation a été réalisée au format TIFF à une résolution de 300 ppp à l'aide d'un scanner à plans Colortrac Smart LF SC 42. Au final, les plans scannés sont répartis de la manière suivante :

- Pour les plans d'exploitation :
 - 75 feuilles de la série des nouveaux plans ;
 - 185 feuilles de la série des vieux plans ;
 - 169 feuilles de la série des anciens plans ;
- Pour les coupes minières : 5 feuilles de coupes passant par le puits de Beaujonc.

Données d'archives

Les sources principales pour les données d'archives concernent celles conservées par le SPW-DRIGM. Parmi celles-ci, citons le dossier général de la concession concernée et d'autres dossiers annexes.

Pour la concession étudiée, le dossier général contient la majorité des éléments concernant l'histoire de la concession ainsi que le suivi des dossiers de sécurisation des ouvrages. Ce dossier n'a malheureusement pas pu être consulté en raison du déménagement du service concerné qui a rendu les documents inaccessibles jusqu'au début de l'année 2024. C'est dans ce dossier qu'étaient susceptibles de se trouver l'essentiel des informations les plus pertinentes pour la présente étude.

En dehors des archives du SPW, d'autres sources ont été recherchées au moyen des inventaires accessibles sur les sites internet de la KBR, des AGR et des Archives régionales de Wallonie.

4. Modélisations

Identification de scénarii de référence

Des scénarii de référence correspondant au scénario de base défini pour la demande de surface et à des alternatives à celui-ci en prenant en compte les incertitudes liées principalement au réservoir minier ont été définis. Les scénarii se basent sur les informations disponibles concernant la demande estimée et sur les informations sous-sol collectées.

Modélisations du réservoir minier

Les comportements et les besoins des prosommateurs ont été définis sur la base des données fournies par les acteurs locaux. La demande surface correspondant au scénario de base a été traduite en demande de débit à extraire du sous-sol à partir des puits connectant le réseau au réservoir minier. Rappelons que la totalité de la demande ne doit pas être satisfaite par le réservoir minier mais peut en partie être couverte par les échanges entre les prosommateurs. Seule la part non équilibrée de la demande doit être fournie par la géothermie minière. La réponse du réservoir minier face aux scénarios de sollicitation a ensuite été modélisée.

Approches de modélisations

Deux approches de modélisation ont été retenues afin de prévoir le comportement du réservoir minier face aux scénarii de production définis. La première approche se base sur l'hypothèse que l'écoulement principal se fait dans les galeries des anciennes mines. Dans ce cas, le modèle considère uniquement le réseau de galeries interconnectées. Les puits de stockage thermique forés doivent alors cibler des galeries du réseau et sont interconnectés entre eux uniquement via ce réseau. La deuxième approche considère quant à elle non seulement les galeries mais aussi les panneaux exploités dans le passé. Le système est alors exploité comme un système de type ATEs. Les puits pour le stockage thermique peuvent ainsi soit viser des galeries soit des panneaux exploités ou les deux.

Ces approches sont complémentaires dans ce sens qu'elles permettent de comprendre les diverses possibilités d'utilisation du réservoir. En effet ce dernier présente à priori au minimum deux types d'exploitation possibles selon les zones du réservoir visées.

Les mines abandonnées ont donc été analysées sous deux aspects différents :

- 1/ comme un réseau de conduits connectés et
- 2/ comme un milieu perméable hétérogène.

Ainsi, les deux principales alternatives d'utilisation du réservoir souterrain sont couvertes.

A ce jour, seuls les résultats de la première approche de modélisation sont disponibles. Ils représentent l'approche la plus conservatrice puisque les volumes accessibles se limitent principalement aux volumes correspondant aux anciennes galeries. Les résultats de la deuxième approche sont attendus dans les semaines à venir mais les résultats préliminaires concordent avec ceux de la première approche.

Modèle avec écoulement principalement dans les galeries

Introduction

Dans le cas d'une modélisation avec écoulement principalement dans les galeries, les données sur la géométrie de la mine, les techniques d'exploitation utilisées, les règles d'abandon appliquées, etc. et la géologie locale collectées ont servi à l'élaboration d'un modèle 3D du réservoir minier. Ce

dernier a servi de base aux simulations permettant la prédiction des chemins d'écoulement à travers la mine ainsi que des températures de production au cours du temps.

Les résultats du modèle informent sur la capacité d'extraction de chaleur et de froid et de stockage du réservoir dans le cas où celui-ci vise principalement le réseau de galeries minières.

Objectifs

La modélisation a poursuivi les objectifs suivants :

- Évaluer la faisabilité de stocker la chaleur et le froid avec les débits et températures d'injection prévus dans le cas du scénario de base,
- Définir la localisation optimale des puits,
- Évaluer la sensibilité du modèle à la demande et aux caractéristiques du réservoir minier.

Modèles 3D des galeries

La représentation numérique en 3D du réseau de galeries de l'ancienne mine générée grâce au travail de numérisation et de digitalisation réalisé dans cette étude constitue la base du travail de modélisation avec écoulement principal dans les galeries.

Ce modèle numérique 3D contient les principales composantes du réseau, à savoir : les puits de mine, les puits internes ainsi que les galeries principales et secondaires. Il est important de faire la distinction entre ces différents objets puisqu'ils ont chacun leurs caractéristiques géométriques (diamètre, longueur, profondeur) et hydrauliques propres. Celles-ci auront un impact sur la capacité de stockage de la mine. La Figure 10 montre l'ancienne mine et les différentes composantes mentionnées.

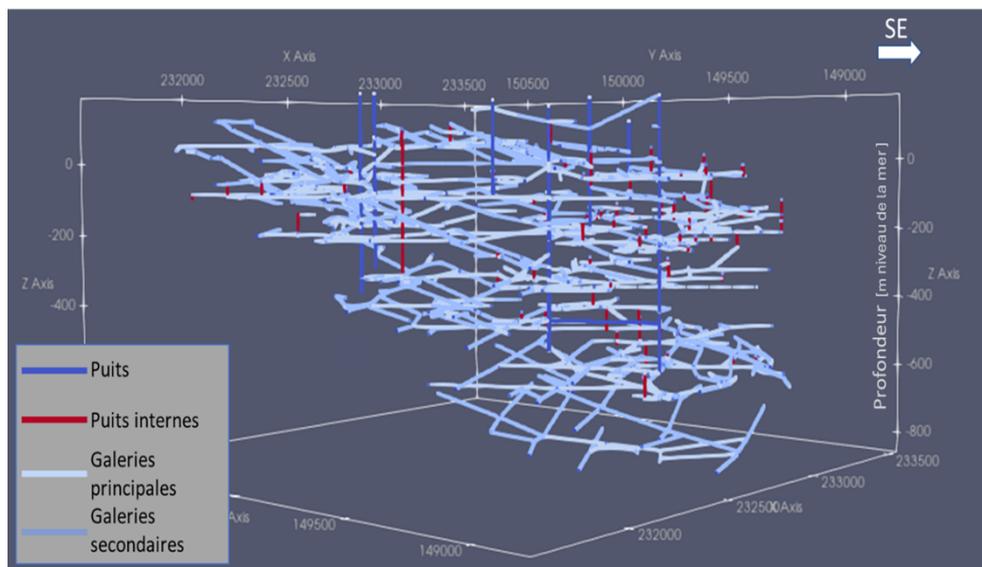


FIGURE 10: VUE LATÉRALE DE L'ANCIENNE MINE SUR LE SITE PILOTE À LIÈGE, UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION.

Le rapport complet de l'étude de faisabilité contient les informations utiles à la modélisation du comportement du réservoir minier :

- Caractéristiques géométriques des galeries, puits de mines et burquins,
- Conditions initiales de pression et température dans le sous-sol en fonction de la profondeur,
- Informations concernant les propriétés de l'eau des mines, de la roche encaissante et des galeries de la mine.

Ces informations ne sont pas détaillées dans cette note de synthèse. L'approche de modélisation utilisée pour déterminer la localisation optimale des puits du système est aussi décrite en détails dans le rapport complet. Dans la présente note, seules les conclusions concernant la faisabilité technique de l'utilisation du sous-sol sont résumées. Les prévisions de températures calculées pour les différents scénarios ont servi à l'évaluation économique du projet. Le nombre de cycles de stockage simulés était de 5 pour un total de 5 années de prévision de température et de pression. La température d'injection pour le stockage thermique de l'eau froide est supposée de 15°C et celle de l'eau chaude est définie à 32°C.

Réponse du réservoir dans le cas du scenario de base défini

La réponse du réservoir minier en termes de température de production et de pression au niveau des puits a été estimée grâce aux modélisations. Il a été pris en compte la demande des clients potentiels indiquée en termes de débit dans la Figure 8. Les simulations ont été effectuées pour 4 cas: les puits de mine considérés comme totalement ouverts ou les puits de mine présentant une perméabilité de 1000 darcys (10-2m/s), 100 darcys (10-3m/s) et 10 darcys (10-4m/s). La Figure montre la température de production pour ces différents scénarios de conditions hydrauliques des puits de mine. Il apparaît que la température de production en chaud reste comprise entre 32°C et 29°C au cours des 5 cycles simulés. La température de production de froid reste aussi relativement stable et se situe entre 15°C et 16°C. Les valeurs de température peuvent varier en fonction de la demande de chaleur et de froid.

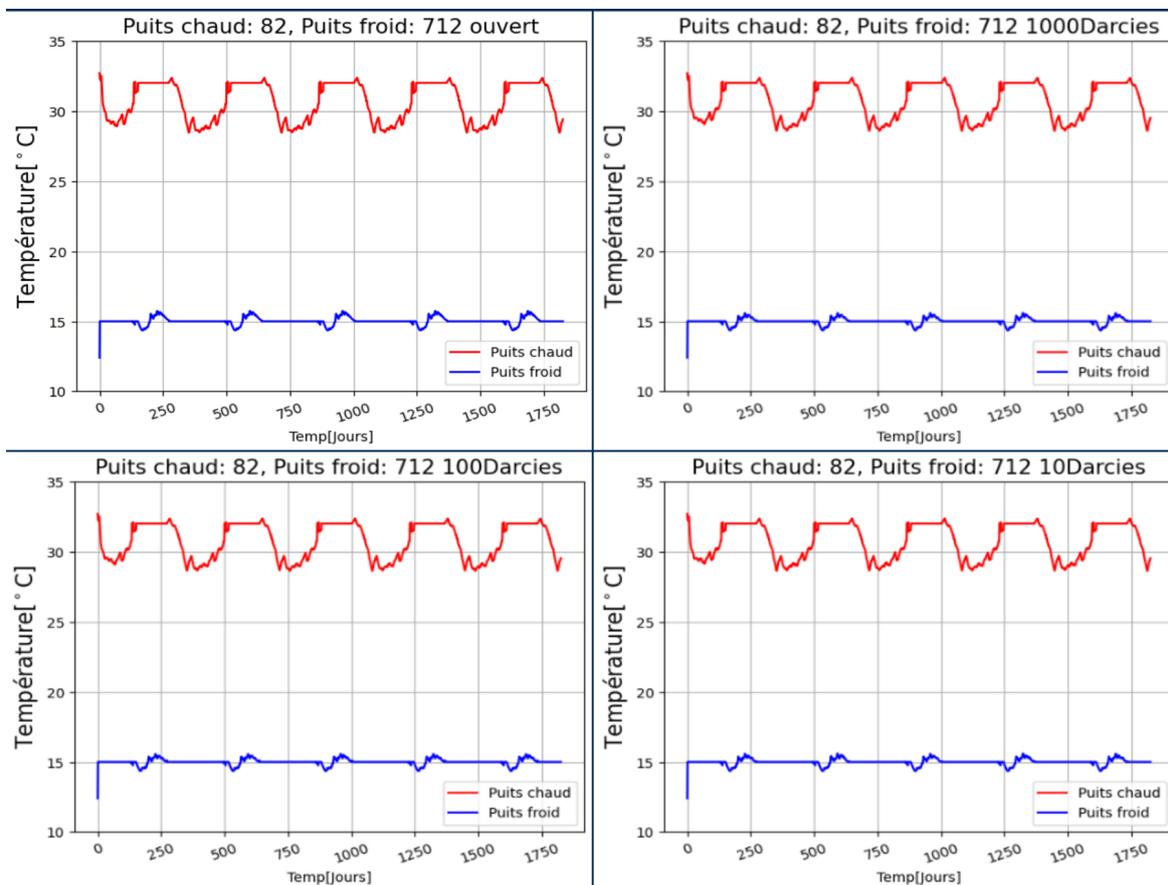


FIGURE 11: PRÉDICTION DE LA TEMPÉRATURE DE PRODUCTION AU NIVEAU DES PUIITS FROID ET CHAUD PENDANT 5 CYCLES DE STOCKAGE POUR UNE PAIRE DE PUIITS CONSIDÉRÉE. A) EN CONSIDÉRANT LES PUIITS DE MINES OUVERTS, EN CONSIDÉRANT DES MATÉRIEAUX DE REMBLAIEMENT VARIABLES ÉQUIVALENTS À DES PERMÉABILITÉS DANS LES PUIITS DE MINE DE B) 1000 D, c) 100 D ET d) 10 D.

Concernant la pression, la présence de matériaux de remblayage dans les puits de mine a un effet au niveau du puits chaud aussi bien en période de production que d'injection. La Figure montre que le changement de pression (dP) s'intensifie à mesure que la perméabilité diminue. Dans le cas d'une perméabilité équivalente à 10 Darcies, le dP peut atteindre jusqu'à 80 m pendant la période de production d'eau chaude. Cette valeur reste acceptable car la profondeur des puits chaud se situe entre 800 m – 1100 m. Les résultats des modèles sont donc positifs quant à la productivité/injectivité des puits géothermiques. Ils ne mettent pas en évidence de problème de communication hydraulique entre les puits envisagés.

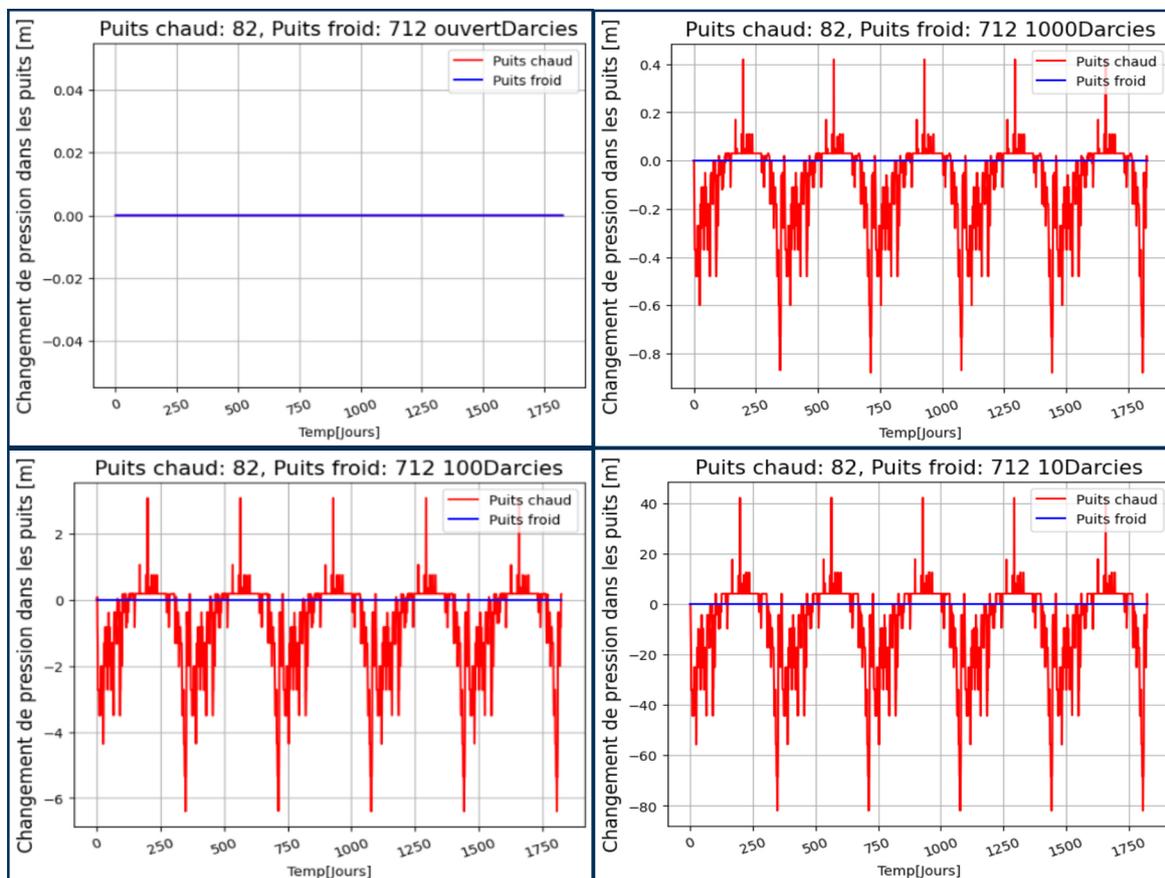


FIGURE 12: PRÉDICTION DU CHANGEMENT DE PRESSION AU NIVEAU DES PUIITS FROID ET CHAUD PENDANT 5 CYCLES DE STOCKAGE POUR UNE PAIRE DE PUIITS CONSIDÉRÉE. A) EN CONSIDÉRANT LES PUIITS DE MINES OUVERTS, EN CONSIDÉRANT DES MATÉRIEAUX DE REMBLAIEMENT VARIABLES ÉQUIVALENTS À DES PERMÉABILITÉS DANS LES PUIITS DE MINE DE B) 1000 D, c) 100 D ET d) 10 D. LES CHANGEMENTS DE PRESSION NÉGATIVE CORRESPONDENT AUX ÉTAPES DE PRODUCTION TANDIS QUE LES CHANGEMENTS POSITIFS AUX ÉTAPES D'INJECTION

5. Conclusions concernant la faisabilité technique du projet : résultats des modélisations du réservoir minier

Les résultats des simulations réalisées considérant uniquement les écoulements dans les ancien(ne)s puits et galeries sont très positifs quant à la mise en œuvre d'un projet-pilote sur le site sélectionné. L'intégration des anciens travaux d'extraction du charbon dans le modèle hydrogéologique (approche de modélisation #2) devrait renforcer les résultats positifs quant à la viabilité du système géothermique envisagé. En effet, les températures de production restent relativement stables pour les différents scénarii considérés et les variations de pression attendues sont acceptables.

Notons que la capacité thermique du réservoir minier présente des sources d'incertitudes quant aux températures des sources chaude et froide et de leur évolution dans le temps et aux débits maximums auxquels le système pourra opérer. Ils seront principalement limités par les changements de pression observés au niveau des puits de production/injection. Les incertitudes peuvent impacter le design et l'opération du système GÉOMINE.

Références

Caulier-Mathy N., 1971. La modernisation des charbonnages liégeois pendant la première moitié du XIXe siècle. Techniques d'exploitation. Bibliothèque de la Faculté de Philosophie et Lettres de l'Université de Liège, Fascicule CXCII, 308 pp.

Claes, S., Frederickx, E., Gullentops, F., Felder, W. & De Geyter, G., 2001a. Toelichtingen bij de geologische kaart van België : Vlaams Gewest. Kaartblad 34 : Tongeren, 1 : 50 000, 56 p.

Claes, S., Gullentops, F. & De Geyter, G., 2001b. Toelichtingen bij de geologische kaart van België : Vlaams Gewest. Kaartblad 33 : Sint-Truiden, 1 : 50 000, 68 p.

de Jaer & Yans, 1948. Histoire de nos charbonnages. La conquête à Ans et Glain. Chronique archéologique du Pays de Liège. 39e année, n°1, p. 5-23.

de Jaer, 1948. Histoire de nos charbonnages. La Société des Joncs dite Beaujonc à partir du XVIIIe siècle. Chronique archéologique du Pays de Liège. 39e année, n°3, p. 57-23.

Forir, H., 1897. Carte géologique de la Belgique. Planche 134 : Seraing – Chênée. Echelle 1 : 40 000, Institut cartographique militaire.

Forir, H., 1902. Carte géologique de la Belgique. Planche 121 : Allieur – Liège. Echelle 1 : 40 000, Institut cartographique militaire.

Hallet, V., 2004. Modélisation mathématique de l'évolution, à long terme, des teneurs en nitrates dans la nappe aquifère des craies du Crétacé de Hesbaye (Belgique). Revue des sciences de l'eau/ Journal of Water Science, 17(1), 3-22. DOI : <https://doi.org/10.7202/705520ar>

IGN, 2023. Institut géographique national : Modèle numérique de terrain avec résolution de 20 m (DTM20).

Ruthy, I., 2006. Carte hydrogéologique Allieur – Liège (42/1-2). Université de Liège et Service public de Wallonie.

Ruthy, I. & Willems, T., 2015. Carte hydrogéologique Seraing – Chênée (42/5-6). Université de Liège et Service public de Wallonie.

Ruthy, I. & Dassargues, A., 2006. Notice explicative de la carte hydrogéologique Allieur – Liège (42/1-2). Université de Liège et Service public de Wallonie, 58 p.

Ruthy, I. & Dassargues, A., 2009. Notice explicative de la carte hydrogéologique Tongeren – Herderen (34/5-6). Université de Liège et Service public de Wallonie, 102 p.

Ruthy, I., Willems, T. & Dassargues, A., 2016. Notice explicative de la carte hydrogéologique Seraing – Chênée (42/5-6). Université de Liège et Service public de Wallonie, 124 p.

S.A. des Charbonnages de l'Espérance et Bonne-Fortune à Montegnée lez-Liège (Belgique), 1905. Notice rédigée à l'occasion de l'Exposition Universelle et Internationale de Liège de 1905, 87 pp.

SPW, 2019. Service public de Wallonie – Agriculture, Ressources naturelles et Environnement – Département de l'Environnement et de l'Eau – Direction des Risques industriels, géologiques et miniers. Concessions minières – Série (couche WMS).

Annexe 1 : Cadres géomorphologique, géologique et hydrogéologique

Cadre géomorphologique

Le projet pilote se situe sur la colline de Ans à une altitude d'environ 170 m, à proximité de la vallée de la Meuse qui traverse la ville de Liège à une altitude comprise entre 60 et 65 m environ (Figure 13). Le projet pilote surplombe la concession minière actuellement en retrait de Patience et Beaujonc. La présence de terrils à proximité du site témoigne, de façon visible, du passé minier de la région.

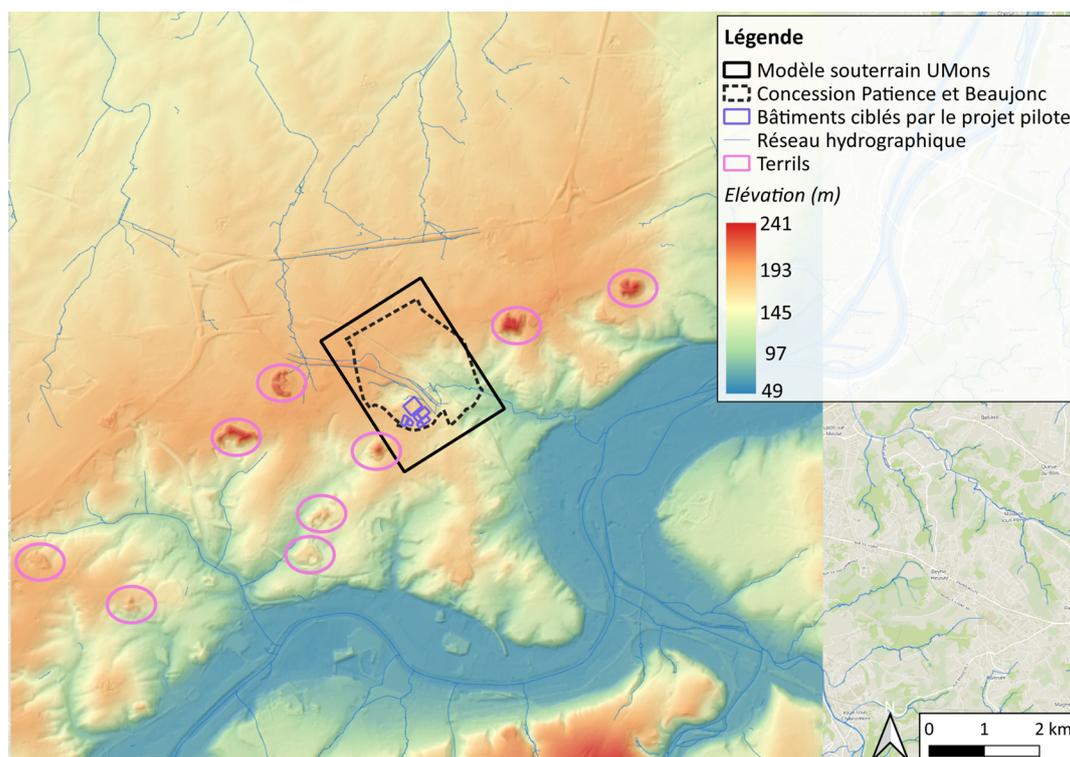


FIGURE 13 : TOPOGRAPHIE ET RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA RÉGION DU PROJET PILOTE (IGN, 2023 ; SPW, 2019).

Cadre géologique

Le projet pilote est localisé à la limite entre le sillon industriel liégeois au sud et à l'est, et la Hesbaye au nord et à l'ouest. Ces deux régions sont caractérisées par des cadres géologiques distincts. Les nouvelles cartes géologiques développées par le SPW ne sont pas encore disponibles pour la région du projet pilote. La description de la géologie se base donc sur les anciennes cartes réalisées par Forir (1897 et 1902).

Dans le sillon industriel, les formations du Paléozoïque affleurent, dégagées par l'érosion (Figure 14). Le socle a été grandement plissé et fracturé lors de l'orogénèse varisque, puis pénéplané. Cette pénéplaine présente un pendage général vers le nord-est. La Faille eifélienne traverse le sud de la région étudiée et marque la limite sud du bassin houiller liégeois. Le Houiller affleure au nord de cette faille, constitué d'une alternance de shales et de grès avec des intercalations de veines de charbon. Leur épaisseur peut atteindre maximum 2.5 m, mais varie le plus souvent de 0.5 à 1 m. Le Houiller posséderait une épaisseur d'environ 1500 m dans le sillon liégeois, et le bassin comporte approximativement 50 veines de charbon exploitables. Le Dévonien affleure au sud de la Faille eifélienne, principalement formé de grès, shales et calcaires (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy et al., 2016).

En Hesbaye, le socle paléozoïque a été érodé lors d'une phase de soulèvement. Au nord de la région étudiée, seul le Cambro-Silurien subsiste, principalement constitué de grès, shales et phyllades. Le Houiller est néanmoins toujours présent dans la zone du projet pilote, située en bordure sud de la Hesbaye. Ce socle paléozoïque est surmonté de Formations datant du Crétacé de pendage subhorizontal (environ 1 % vers le nord). A la base du Crétacé se trouve la Formation de Vaals, argile marneuse également appelée smectite de Herve. Son épaisseur augmente d'ouest en est, de quelques mètres à plus de 10 m. Elle est recouverte par la Formation de Gulpen, constituée de craies et comportant des bancs de silex dans sa partie supérieure. Elle est épaisse de plusieurs dizaines de mètres. Finalement, la Formation de Maastricht constitue le sommet du Crétacé dans la région, composée de craies et calcarénites également avec intercalations de bancs de silex. Son épaisseur est d'environ 50 m. Le Crétacé est localement recouvert de sables datant de l'Oligocène. Il s'agit principalement de dépôts continentaux constitués de sables graveleux, avec des zones plus argileuses (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy & Dassargues, 2009 ; Claes et al., 2001a ; Claes et al., 2001b).

Finalement, des dépôts quaternaires recouvrent l'ensemble de la région. Sur le plateau hesbignon, il s'agit de loess (limons éoliens) possédant une épaisseur variable, allant de 2 m à une vingtaine de mètres. Dans la vallée, les alluvions sont formées de limons fluviatiles d'une épaisseur comprise entre 3 et 8 m, recouvrant des sables et graviers de 2 à 10 m d'épaisseur. Enfin, le colluvium présent sur les versants est composé de limons sableux et argileux avec une fraction plus grossière de nature variable. Il possède généralement une épaisseur de quelques mètres, mais qui peut atteindre une trentaine de mètres en pied de versant (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy et al., 2016).

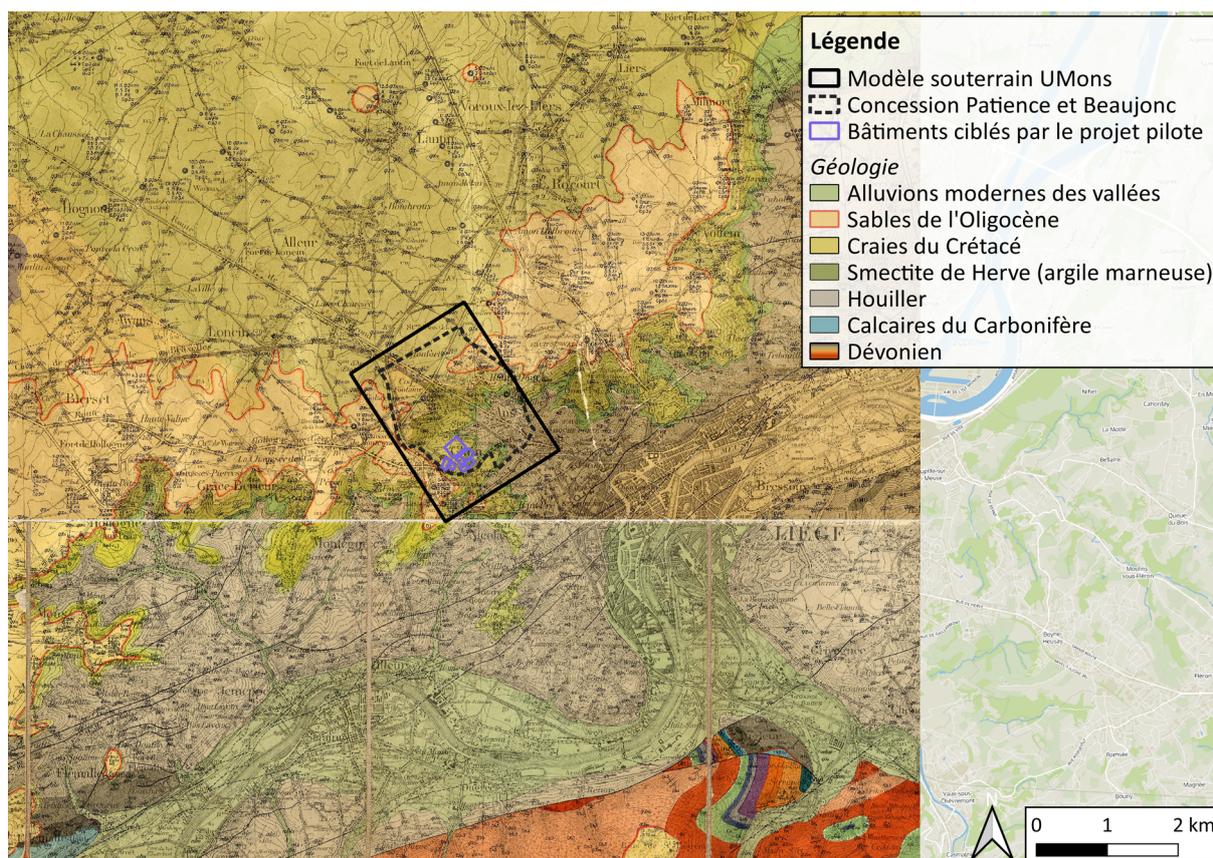


FIGURE 14 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU PROJET PILOTE (FORIR, 1902 ; FORIR, 1897).

Cadre hydrogéologique

En Hesbaye, l'aquifère principal est la nappe des craies du Crétacé (Figure 15). La craie est un matériau possédant une porosité totale élevée de l'ordre de 40 %, permettant le stockage de l'eau. Cette dernière peut ensuite circuler à travers les fissures et au sein des zones faillées, grâce à une porosité efficace de fissures qui peut varier entre 10 et 15 %. La conductivité hydraulique de l'aquifère varie généralement entre 10^{-5} et 10^{-4} m/s, mais peut atteindre jusqu'à 10^{-3} m/s dans les zones les plus perméables associées aux zones faillées et altérées par dissolution. La nappe est libre dans la région étudiée, et devient captive au nord dans le Limbourg (Région flamande). L'eau souterraine s'écoule du sud-est au nord-ouest avec un gradient de l'ordre d'1 % dans la zone cartographiée (amont des galeries de la La Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (CILE)). La Formation de Vaals sous-jacente, très peu perméable, forme un aquiclude qui joue le rôle de barrière entre l'aquifère des craies et le socle paléozoïque (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Claes et al., 2001b).

Cet aquifère représente une importante ressource en eau : plusieurs millions de m³ sont pompés chaque année pour la distribution d'eau dans la région, notamment via les galeries de la CILE. Des aquifères peuvent également être localement logés dans les sables de l'Oligocène, d'une épaisseur de quelques mètres. Enfin, l'eau est filtrée avant d'atteindre l'aquifère crayeux par la couverture limoneuse, qui induit un retard de l'ordre de 1 mois par mètre de limons (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Claes et al., 2001b ; Hallet, 2004).

Dans le sillon industriel, le Houiller constitue hydrogéologiquement un 'aquiclude à niveaux aquifères' (Figure 16). Initialement, le Houiller forme un aquiclude de perméabilité et de porosité effective d'écoulement très faibles. Des zones aquifères locales peuvent cependant être logées dans les bancs de grès et de quartzites si ceux-ci sont fracturés, l'eau pouvant alors circuler à travers les réseaux de fissures et fractures. La perméabilité de ces aquifères locaux est dépendante du taux de fissuration et peut très localement dépasser 10^{-5} m/s. De plus, le passé minier de la région (i.e., l'exploitation des veines de charbon suivie du 'foudroyage' des couches sus-jacentes) a contribué à l'augmentation du potentiel aquifère de la formation (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy et al., 2016).

- D'une part, les panneaux exploités, aujourd'hui remblayés ou plus généralement foudroyés, constituent des zones plus perméables avec une porosité efficace plus importante. Il en va de même pour les galeries et les puits miniers, qui jouent le rôle de drains et forment des axes d'écoulement préférentiel. Les zones foudroyées peuvent présenter une perméabilité supérieure à celle des zones fracturées naturellement.
- D'autre part, l'excavation a engendré des affaissements miniers ainsi qu'une fracturation de la roche autour des zones exploitées, induisant une perméabilité plus importante. De manière générale, la conductivité hydraulique du massif houiller entourant les concessions exploitées peut atteindre de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m/s.

L'eau souterraine circulant dans les couches du Houiller est généralement acide, avec une importante concentration en fer et sulfates, due à l'altération/oxydation des pyrites souvent largement présentes dans le Houiller. Il n'existe que peu de données hydrogéologiques disponibles relatives à cette unité, généralement considérée comme un aquiclude et donc peu intéressante pour des puits de production d'eau. Une recherche dans la base de données DixSous indique qu'il n'existe aucun piézomètre dans le Houiller dans un rayon de 2.5 km autour du projet pilote. Quelques cartes piézométriques locales sont néanmoins disponibles, montrant les tendances piézométriques les plus probables de cet aquifère de fissures du Houiller. Il n'en existe cependant pas pour la zone du projet pilote. Il est supposé que la Meuse constitue un exutoire de la nappe et que, dans la zone du projet, les eaux souterraines dans le Houiller s'écoulent vers celle-ci. Dans la vallée, l'écoulement a plutôt tendance à suivre celui de la nappe alluviale, avec un niveau piézométrique légèrement supérieur de 10 à 20 cm. La nappe est semi-captive (Ruthy & Dassargues, 2006).

Les alluvions constituent également l'aquifère alluvial de graviers, d'une largeur moyenne de 1.5 km dans la région du projet pilote. Cet aquifère peut être légèrement et localement captif sous la couverture limoneuse fluviale. L'aquifère est également rechargé par les eaux pluviales, les aquifères superficiels des versants et le Houiller sous-jacent (par surcharge). Dans la zone étudiée, la Meuse est globalement drainante et l'écoulement est dirigé vers celle-ci. La conductivité hydraulique de l'aquifère alluvial est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2} m/s (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy et al., 2016).

Finalement, au sud de la région du projet pilote, les calcaires du Carbonifère constituent un aquifère de fissures, et les différentes unités du Dévonien forment des aquifères, aquitards ou aquicludes, selon la lithologie et le taux de fracturation (Ruthy & Dassargues, 2006 ; Ruthy et al., 2016).

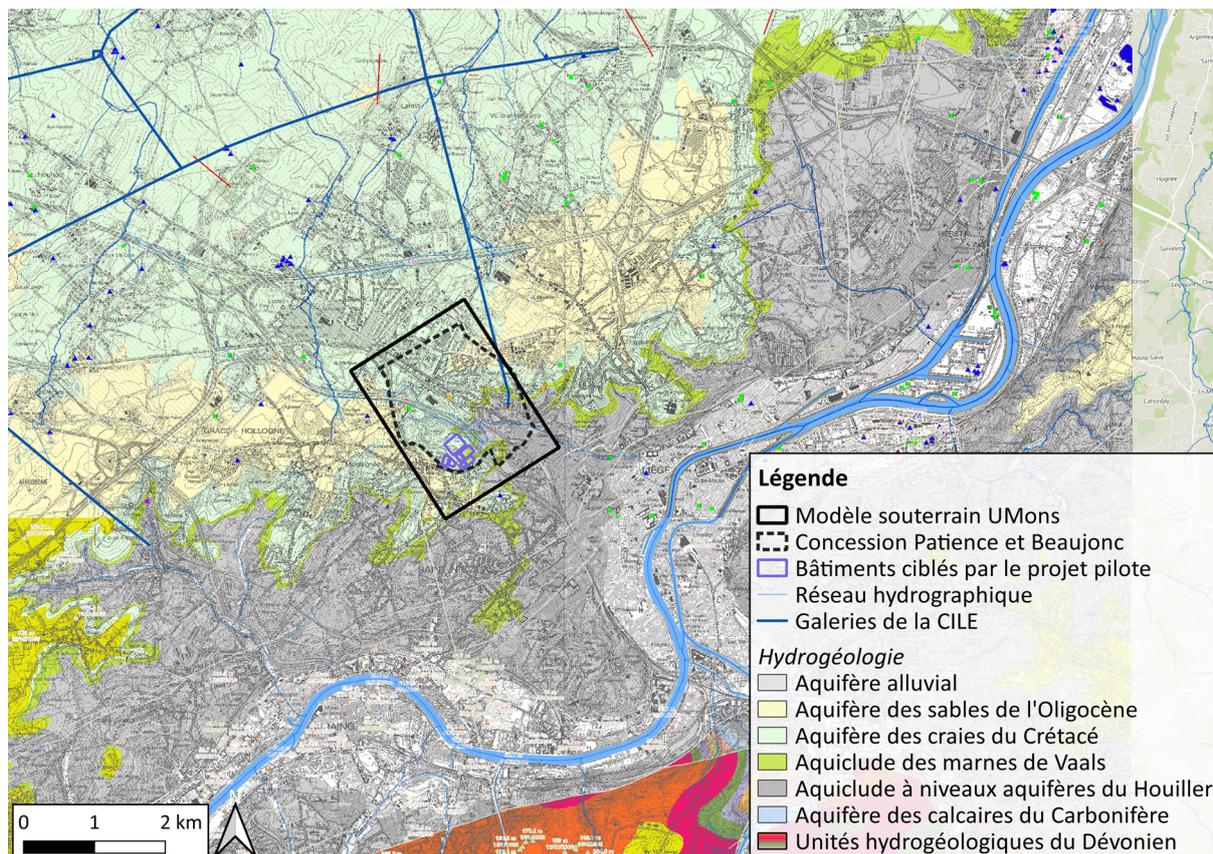


FIGURE 15 : CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU PROJET PILOTE (RUTHY, 2006 ; RUTHY & WILLEMS, 2015).

Exploitation des aquifères et galeries d'exhaure

Une recherche dans un rayon de 2.5 km autour du projet pilote a été effectuée dans la base de données DixSous afin de déterminer les captages en activité dans la zone étudiée (Figure 16).

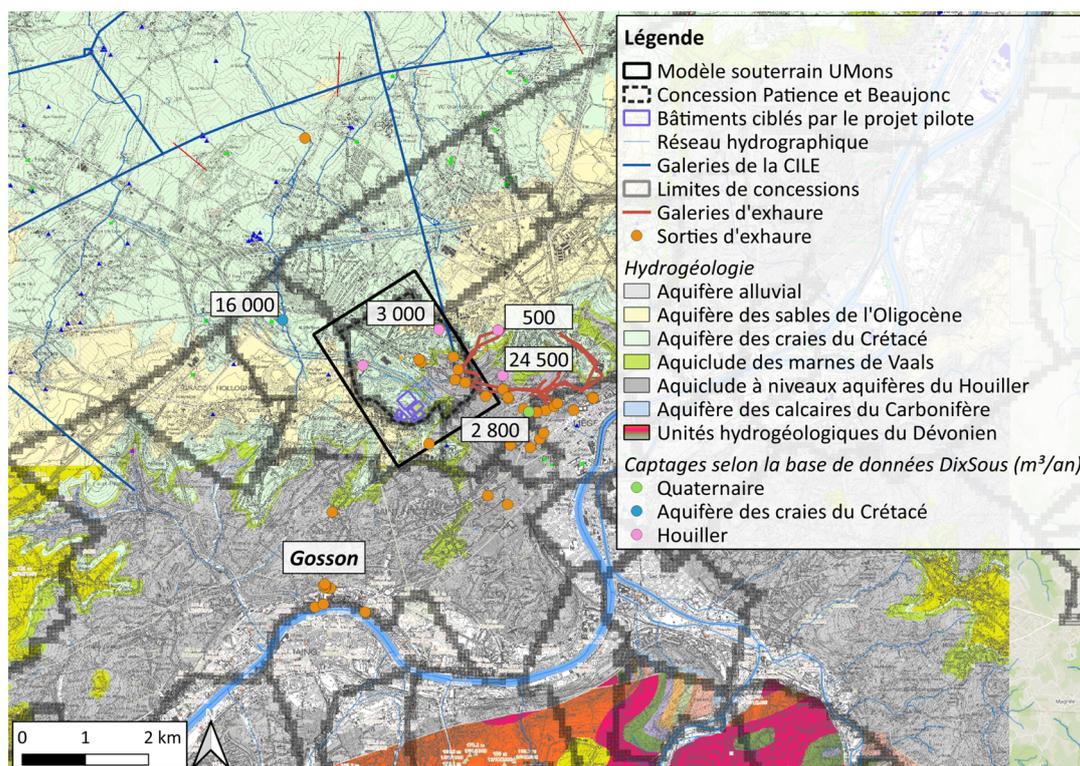


FIGURE 16 : CAPTAGES (BASE DE DONNEES DIXSOUS, DÉBIT MAXIMAL AUTORISÉ) ET GALERIES ET SORTIES D'EXHAURE (ISSEP) DANS LA RÉGION DU PROJET PILOTE. LES CHIFFRES CORRESPONDENT AUX DÉBITS DE PRODUCTION ANNUELLE DES CAPTAGES.

Quatre captages exploitent le Houiller dans la région, dont deux situés au sein de la zone pour laquelle le modèle souterrain est développé. Le plus important est un captage appartenant au Collège provincial de Liège, qui a l'autorisation de pomper 25 000 m³/an. Les craies de Hesbaye sont également sollicitées pour un processus de refroidissement d'une entreprise (16 000 m³/an), et par les galeries captantes de la CILE qui permettent d'extraire plus d'un million de m³/an de l'aquifère au nord de la zone modélisée. Enfin, un captage exploite également le Quaternaire (2 800 m³/an).

Quelques galeries minières d'exhaure sont connues de l'ISSeP dans la région du projet pilote (Figure 16). De manière générale, les sorties d'exhaure connues semblent être situées en bordure des concessions. Il est cependant difficile d'associer ces exhaures à une concession en particulier. Les débits sont connus uniquement à l'exhaure du Gosson situé hors de la concession étudiée dans le cadre de ce projet. Depuis le début des mesures en septembre 2011, le débit à l'exhaure augmente (Figure 17), passant d'environ 8 L/s ($\approx 30 \text{ m}^3/\text{h}$), à 45 L/s ($\approx 160 \text{ m}^3/\text{h}$) en 2022. Il ne suit pas la tendance des précipitations. L'augmentation pourrait peut-être s'expliquer par le rebond minier ou une éventuelle modification des écoulements liée par exemple à des phénomènes de colmatages/décolmatages. Cependant, s'agissant du seul point pour lequel des données sont disponibles, il n'est pas possible de tirer de réelles conclusions pour la région étudiée.

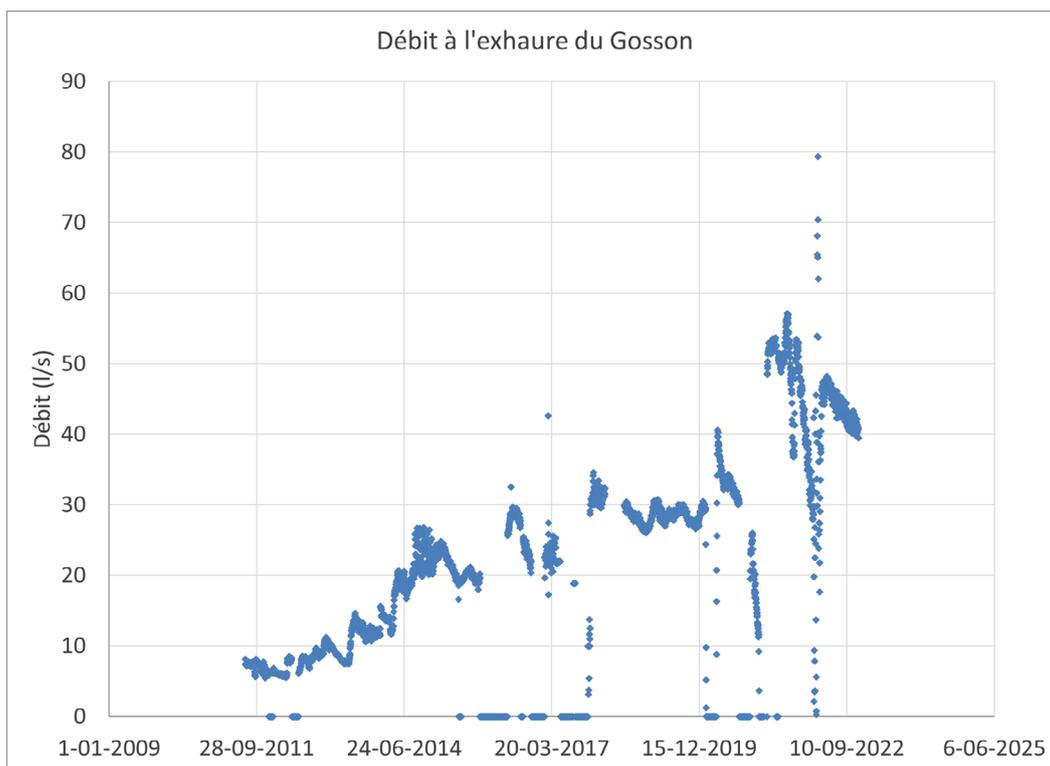


FIGURE 17 : ÉVOLUTION DU DÉBIT A L'EXHAURE DE GOSSON AU COURS DU TEMPS (DONNÉES DE L'ISSeP).

Annexe 2 : Contexte minier

L'emprise du projet pilote en géothermie minière envisagé est située dans l'actuelle concession de mine de houille de Patience et Beaujonc (n° 188 dans l'inventaire du SPW).

L'origine de cette concession provient de la fusion en 1839 de plusieurs sociétés actives dans ce périmètre (de Jaer & Yans, 1948) :

- La société de la Conquête, dont un des puits était dénommé « Patience » ;
- La société de *Beaujonc*, dont l'origine remonterait à l'an 1538 (de Jaer, 1948) ;
- La société de *Loffeld*.

La société résultante prend le nom de *Patience et Beaujonc*, de même que la concession constituée en 1841.

Durant le Moyen-Âge jusque dans le courant du 19^e siècle, la gestion des eaux dans les anciennes mines fait l'objet de mesures spécifiques dans le Bassin de Liège :

- Au niveau de l'exploitation, il est prescrit de commencer l'exploitation à partir du niveau le plus bas et de remonter progressivement, de sorte à atteindre en dernier lieu le voisinage des niveaux les plus dangereux que sont les anciennes exploitations superficielles ennoyées (les « bains ») (Caulier-Mathy, 1971). Le puits de Beaujonc est assez symbolique des dangers liés aux anciennes exploitations, puisqu'en 1812 une catastrophe durant laquelle des eaux d'anciens travaux ont envahi la mine est devenue célèbre par l'action héroïque d'Hubert Goffin.
- Au niveau de l'exhaure, comme dans les autres bassins wallons des galeries d'écoulement sont également creusées pour assécher la partie superficielle du gisement, mais ici les eaux étaient dirigées vers la vallée de la Meuse et utilisée comme source d'eau potable pour la ville de Liège (de Jaer & Yans, 1948). Ces galeries y sont appelées les *araines* (ou *areines*) et les *xhorres*. D'ailleurs, une areine dénommée « galerie des maître de la Conquête » part des puits Mamonster et Beaujonc et débouche dans le quartier de la Place Saint-Lambert (Figure 15).

Au début du 19^e siècle, différents puits (« *bures* ») sont actifs dans la concession : Mamonster (1796-1817), Patience, Loffeld, Beaujonc, Bure aux Femmes, ainsi que quelques puits de peu d'importance tels que Renard et Chayecotte.

Le nombre de sièges actifs se réduit dans le courant du 19^e siècle. Au début du 20^e siècle, seuls Beaujonc, Fanny (créé en 1894) et la Bure aux Femmes sont en activité dans la concession. Ils fermeront respectivement en 1922, en 1942 et le 12/12/1969 (sources : Annales des Mines de Belgique). Notons que la bure de Beaujonc est convertie après arrêt de l'extraction en puits d'aéragé pour le siège Bure aux Femmes.

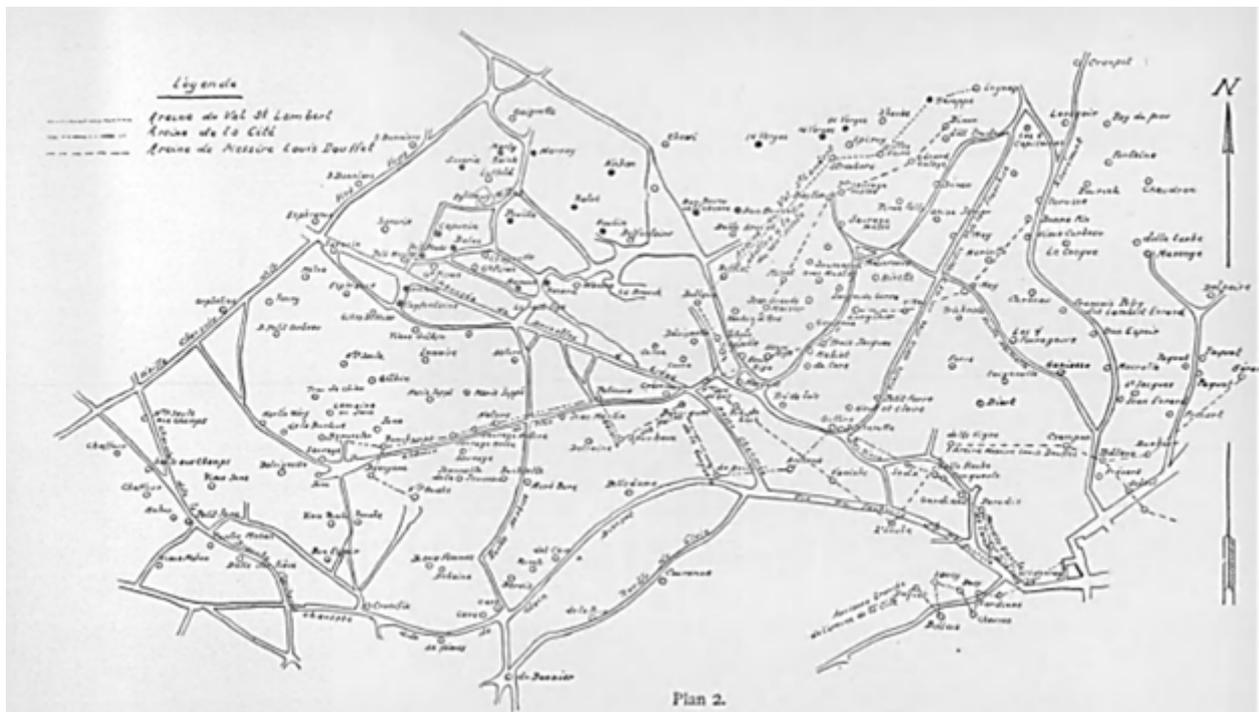


FIGURE 18 : PLAN D'AREINES SITUÉES AU NORD DE LA VILLE DE LIÈGE (DE JAER & YANS, 1948).

La concession comprend une trentaine de couches de charbon exploitables. Les caractéristiques des couches supérieures, également présentes dans la concession voisine de l'Espérance et Bonne-Fortune, sont présentées au Tableau 2 ci-dessous. Dans ce tableau, la puissance en charbon correspond à l'épaisseur cumulée en charbon, tandis que l'ouverture totale comprend les éventuels interlits pélitiques ou gréseux présents au sein de la couche de charbon.

NOMS DES COUCHES	PUISSANCE EN CHARBON	OUVERTURE TOTALE	QUALITÉ
1 Crusny	0,80 à 1,00	0,90 à 1,10	Charbons à coke
2 Pawon	0,55 à 0,65	0,65 à 0,80	
3 Rosier	0,59 à 0,65	0,75 à 0,85	
4 Grande-Veine	0,90	1,10	Charbons gras
5 Charnapré	0,50 à 0,72	0,55 à 1,20	
6 Maret	0,70	0,85	Charbons demi-gras
7 Quatre Pieds	0,75 à 0,97	1,65 à 1,80	
8 Cinq Pieds	0,54 à 0,65	0,70 à 0,75	
9 Cochet	0,50	1,50	
10 Besline-Grignette	0,50 à 0,55	0,60	
11 Trouvée	0,35 à 0,40	0,80 à 0,98	Charbons quart-gras flambrants
12 Dure-Veine	0,75	1,15	
13 Gosmin	0,36	0,42	
14 Béguine	0,37	0,74	
15 Veinette	0,50	0,87	
16 Petit-Chat	0,40	0,80	
17 Massy-Veine	0,46	0,95	
18 Quatre Pieds inférieur	0,66	1,20	
19 Cinq Pieds inférieur	0,45	0,80	
20 Six Poignées réunies	1,40	1,70	
21 Grande-Veine			

TABLEAU 2 : COUCHES DE CHARBON EXPLOITABLES SUR LA CONCESSION DE L'ESPÉRANCE ET BONNE-FORTUNE AVEC LEURS ÉPAISSEURS (SOURCE : S.A. DES CHARBONNAGES DE L'ESPÉRANCE ET BONNE-FORTUNE, 1905).

Sur base des éléments que le SPW-DRIGM a recueilli dans les archives et encodées dans la BD-Mines, les caractéristiques d'un certain nombre de puits ont pu être synthétisées et sont disponibles dans le Tableau 3 ci-dessous.

Nom	Profondeur	Section
	[m]	[m]
Bure aux Femmes	944	3.10 x 4.30
Bure Beaujonc	780	2.20 x 5.60
Puits Fanny	572	D = 4.25
Puits Lofeld I	52	D = 2.00
Puits Mariette I	474.9	D = 3.30
Puits Mariette II	28	D = 3.30
Puits sur Charnapré	28	D = 2.80
Bure Mamonster	240	?
Bure Tricnote	140	?

TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DES PUIITS PRÉSENTS DANS LA ZONE D'ÉTUDE (EXTRAIT DE LA BD-MINES, SPW-DRIGM, COM. PERS.).

Afin d'obtenir des données complémentaires concernant l'état des puits, la nature du remblai comblant les puits, l'exhaure, etc., le dossier d'archives de la concession de Patience & Beaujonc conservé au SPW-DRIGM (bureau de Liège) a été consulté et analysé.

Notons que dans l'acte de concession datant du 4 janvier 1841 sont évoqués quelques informations relatives à l'hydrogéologie des mines et des ouvrages associés. Ainsi, on apprend que la Ville de Liège s'oppose à la demande de concession, car elle estime que les travaux d'exploitation dans la partie sud du territoire de Patience & Beaujonc pourraient entraîner le tarissement des fontaines de cette ville. En outre, la présence de « bains » est reconnue dans d'anciens travaux, en particulier dans les couches Marais [Maret] et 4 pieds [supérieur], à la limite avec l'ancienne concession d'Espérance.

Les données concernant l'exhaure sont relativement rares mais permettent d'avoir un ordre de grandeur des volumes annuels concernés. En 1927, les installations d'exhaure mises en place étaient capables de pomper au maximum 250 m³/h et 150 m³/h, respectivement au puits Bure aux Femmes et au puits Beaujonc. Le volume total d'exhaure totale pour l'année 1926 était de 1.334.580 m³ (soit en moyenne 153 m³/h).

Après la fin de l'exploitation de la concession qui était programmée pour le 31/12/1969, l'exhaure a été exceptionnellement poursuivie jusque le 31/12/1974. Cette prolongation avait pour objectif pour protéger la mine contigüe d'Espérance et Bonne Fortune d'une augmentation de l'exhaure qui aurait été provoquée par l'ennoyage des mines de Patience & Beaujonc. Cela implique que, malgré les épontes existantes entre les deux concessions, les exploitants connaissaient l'importance des écoulements qui pouvaient y transiter. À l'époque, le Ministère des Affaires Economiques avait proposé que les dépenses d'exhaure à Patience & Beaujonc seront couvertes par des subventions d'Etat, comme pour Gosson-Lagasse. Ce subside 100% public a d'ailleurs été sanctionné par un arrêté royal le 10/7/1970.

Il était attendu de maintenir l'exhaure à la Bure aux Femmes et à Beaujonc sur les étages 405, 460 et 930 m. Ces étages sont alors respectivement équipés d'une ou plusieurs pompes pour des capacités maximales de 100 m³/h, 322 m³/h et 135 m³/h.

L'abandon des puits est notifié le 27/11/1974, et activée à partir du 31/12/1974. Des murs en maçonnerie d'environ 2 m de haut et de 1 m d'épaisseur étaient prévus à environ 6 m en retrait des envoyages suivants :

- À la Bure aux Femmes : 360 m ; 460 m (double) ; 760 m (double) ; 930 m
- À Beaujonc : 360 m ; 460 m ; 695 m ; 760 m.

Ces murs étaient destinés à retenir le pied de talus des schistes qui seront utilisés ultérieurement pour le remblayage des puits. Bien que des diagrammes montrant la planification de ces travaux ont été établis, aucun élément n'indique explicitement qu'ils ont été finalement réalisés.

Au niveau des **puits**, des données plus précises concernant leurs profondeurs et sections ont pu être retrouvées et synthétisées. Pour les puits abandonnés sans ADP (c'est-à-dire Arrêté d'abandon octroyé par la Députation Permanente) :

Puits	Profondeur [m]	Section [m]
Mariette 1	474.9	3.3
Mariette 2	28	3.3
Charnapré	28	2.8
Tricnotte	140	?

TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DES PUIITS ABANDONNÉS SANS ADP DANS LA ZONE D'ÉTUDE ET D'APRÈS LES ÉLÉMENTS COLLATIONNÉS DANS LES ARCHIVES DU SPW-DRIGM (DOSSIER CONCESSION 188)

Pour les puits abandonnés avec ADP :

Puits	Profondeur [m]	Section [m]	Date ADP
Loffeld (1)	52	2	19-05-34
Bure aux Femmes	944	Voir détails ci-dessous	16-01-75
Beaujonc	780	Voir détails ci-dessous	16-01-75
Fanny	572	4.25	15-12-69

TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DES PUIITS ABANDONNÉS AVEC ADP DANS LA ZONE D'ÉTUDE ET D'APRÈS LES ÉLÉMENTS COLLATIONNÉS DANS LES ARCHIVES DU SPW-DRIGM (DOSSIER CONCESSION 188)

Concernant les puits Bure aux Femmes et Beaujonc, les sections des puits sont très hétérogènes tant au niveau de leurs géométries, des types de cuvelage et de leurs dimensions. Les tableaux ci-dessous détaillent ces sections.

Pour le puits Bure aux Femmes :

De [m]	À [m]	Section [m]	Type de cuvelage
0	144	3.10 x 4.042	Cadre métallique avec béton
144	164	3.10 x 3.94	Cadre métallique avec béton
164	170	3.10 x 4.042	Cadre métallique avec béton
170	183	3.10 x 3.94	Cadre métallique avec béton
183	380	3.10 x 4.042	Cadre métallique avec béton
380	695	4.3	Béton
695	777	4.5	Claveaux en béton
777	944	4.5	Maçonnerie

TABLEAU 6 : CARACTÉRISTIQUES DE LA SECTION DU PUITTS BURE AUX FEMMES D'APRÈS LES ÉLÉMENTS COLLATIONNÉS DANS LES ARCHIVES DU SPW-DRIGM (DOSSIER CONCESSION 188)

Pour le puits Beaujonc :

De	À	Section [m]	Type de cuvelage
0	70	2.60 x 2.00 + 3.20 x 2.00	Maçonnerie
70	190	5.38 x 2.03	Maçonnerie
190	360	5.38 x 2.03	Maçonnerie
360	368	4.30 x 2.03	Béton
368	440	Ellipse avec demi-axes de 1.975 et 1.535	Béton
440	448	3.40 x 2.20	Béton
448	485	3.65	Béton
485	540	Ellipse avec demi-axes de 1.85 et 1.55	Claveaux
540	610	4.1	Claveaux
610	780	3.8	Claveaux

TABLEAU 7 : CARACTÉRISTIQUES DE LA SECTION DU PUITTS BEAUJONC D'APRÈS LES ÉLÉMENTS COLLATIONNÉS DANS LES ARCHIVES DU SPW-DRIGM (DOSSIER CONCESSION 188)

Les informations qui détaillent le type de matériaux utilisé pour le remblaiement des puits sont disponibles pour trois d'entre-eux :

- Puits Fanny : remblayé avec schistes calibrés 0/60 mm (depuis la profondeur de 565 m)
- Puits Bure aux Femmes : remblayé avec schistes de terril de calibre 0/200 mm
- Puits Beaujonc : idem.

Étude réalisée pour le SPW Energie (SPW TLPE)

Auteurs :

Harcouët-Menou Virginie, Hernandez Edgar, Moermans Gert, Neven Thomas, Schelings Clémentine, Teller Jacques, De Paoli Caroline, Dassargues Alain, Philippe Orban, Kaufmann Olivier, N'Depo Yanick, Dupont Nicolas



Hydrogéologie 
Géologie de l'Environnement

