

GÉOTHERMIE PROFONDE EN CŒUR DE HAINAUT (BELGIQUE) – CONTEXTE, RÉALISATIONS ET PERSPECTIVES

Deep geothermal energy in the Cœur de Hainaut area (Belgium) - Background, achievements, and perspectives

Olivier Kaufmann - **Auteur correspondant**

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
olivier.kaufmann@umons.ac.be

Nicolas Dupont

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
nicolas.dupont@umons.ac.be

Quentin Campeol

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
quentin.campeol@umons.ac.be

Thierry Martin

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
thierry.martin@umons.ac.be

Elisa Thiebaut

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
elisa.thiebaut@umons.ac.be

Pascal Goderniaux

Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, 9 rue de Houdain, 7000 Mons Belgique
pascal.goderniaux@umons.ac.be

Résumé

Dans le Cœur de Hainaut (Belgique), le sondage d'exploration mené à Saint-Ghislain au milieu des années 1970 révèle l'important potentiel géothermique du réservoir géothermique des calcaires mississippiens du Parautochtone brabançon. À la suite du chantier d'exploration, des travaux sont entrepris pour valoriser les eaux chaudes rencontrées vers 2 500 m de profondeur. C'est ainsi qu'un réseau de chauffage urbain alimenté par la géothermie est inauguré à Saint-Ghislain en 1985. Au cours des périodes qui ont suivi, l'intérêt pour cette ressource énergétique locale a fluctué au gré des évolutions des coûts de l'énergie. Une succession de phases de stagnation, d'exploration et de développement en a résulté. Lors des quinze dernières années, la volatilité accrue des coûts de l'énergie combinée à la volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre entraîne un regain d'intérêt pour cette source d'énergie. Les investissements importants à consentir dès les premières phases de la réalisation d'un projet de géothermie, conduisent à reprendre l'exploration géophysique et à développer des modèles géologique et hydrogéologique du réservoir ciblé. Ces travaux ont pour objectif de réduire les risques géologiques associés à de nouveaux projets. Ils permettent d'approfondir les connaissances sur le réservoir, de simuler les conditions d'exploitation et les impacts de nouveaux projets mais aussi d'évaluer leur pertinence dans diverses hypothèses d'évolution socio-économique. Les simulations indiquent notamment que le réservoir pourrait accueillir au moins une dizaine de doublets sous le Bassin de Mons sans problèmes d'interférences. Plusieurs projets de mise en œuvre de nouveaux puits géothermiques sont initiés dans le sillage de ces travaux. À Ghlin, une centrale géothermique a été construite pour alimenter un réseau de chaleur installé dans un nouveau parc d'activités économiques. Les études de conception et d'incidences sur l'environnement d'un doublet géothermique profond destiné à alimenter un réseau de chauffage urbain à Mons sont menées à terme et aboutissent à l'octroi d'un permis. Bien que celui-ci n'a pas encore été mis en œuvre à ce jour, gageons que les objectifs de développement durable, la volonté d'accroître l'autonomie énergétique régionale et l'évolution récente de la législation wallonne favorisera le creusement de nouveaux doublets dans un avenir proche.

Abstract

In the Cœur de Hainaut area (SW-Belgium), an exploration borehole drilled at Saint-Ghislain in the mid-1970s revealed the significant geothermal potential of the Mississippian limestones of the Brabant Parautochton. Following the exploration phase, the production phase was initiated to extract hot water located at a depth of approximately 2,500 meters. This work led to the inauguration of a geothermal-fed district heating network in Saint-Ghislain in 1985. Over the following years, interest in this local energy resource fluctuated in line with changes in energy costs, resulting in successive phases of stagnation, prospecting, and development. In the past fifteen years, increasing energy cost volatility, combined with the desire to limit greenhouse gas emissions, has sparked renewed interest in this energy source.

The significant investment required during the initial stages of geothermal energy projects has driven renewed geophysical exploration of the reservoir, alongside the development of geological and hydrogeological models aimed at reducing geological risks. This work allows for a better understanding of the reservoir, enables simulations of operating conditions and impacts of new projects, and helps assess their relevance within various socio-economic scenarios. Simulations, in particular, demonstrate that the reservoir could accommodate at least ten doublets under the Mons Basin without interference issues. Several projects to develop new geothermal wells have been launched following these findings. In Ghlin, a geothermal power station has been constructed to supply a heating network in a new business park. Additionally, the design and environmental impact studies for a deep geothermal doublet intended to supply a district heating network in Mons have been completed, resulting in the granting of a permit. Although the execution phase has not started yet, sustainable development objectives, the drive to increase regional energy autonomy, and recent changes in Walloon legislation are expected to encourage the drilling of new doublets in the near future.

INTRODUCTION

Le *Cœur de Hainaut* regroupe les régions du Centre et de Mons-Borinage en Hainaut belge. La présence d'anomalies thermiques positives dans son sous-sol est connue depuis plusieurs siècles. La Fontaine Bouillante située à Stambruges fournit par exemple une eau à 18 °C soit environ 6 °C au-dessus de la température des eaux de subsurface de la région. Au début du 20^e siècle, des tunnels inclinés sont creusés à Baudour afin d'atteindre les terrains houillers. Ils atteignent une venue d'eau à plus de 50 °C à 300 m de profondeur. Cependant, l'évènement qui marque véritablement le début de l'intérêt pour la géothermie profonde dans la région de Mons-Borinage est la découverte fortuite d'un réservoir géothermique vers 2 500 m de profondeur alors qu'un forage d'exploration à Saint-Ghislain traverse les calcaires mississippiens. Malgré d'autres travaux de reconnaissance de la ressource entrepris dans la foulée avec la campagne sismique Hainaut1979 et le forage des puits de Douvrain (1979) et de Ghlin (1980-81), l'exploitation de la géothermie profonde peine à se développer. En 1985, la mise en place d'un réseau de chaleur alimenté par la géothermie profonde Saint-Ghislain est pourtant un réel succès. Il faut attendre 2012 pour que de nouvelles prospections aient lieu dans la région avec la campagne sismique Mons2012. Encouragé par le développement des énergies renouvelables, le projet MoreGeo, financé par des fonds structurels européens FEDER 2014-2020, vise à acquérir de nouvelles données sur le réservoir géothermique et à simuler des scénarios d'exploitation de la ressource considérant l'implantation de futurs doublets géothermiques dans la région. Les résultats obtenus lors de ce projet posent de nouveaux jalons tant sur la connaissance du réservoir que pour préparer son exploitation future.

DÉCOUVERTE ET MISE EN EXPLOITATION DE LA RESSOURCE À SAINT-GHISLAIN

Sous la supervision du Service Géologique de Belgique, un chantier de forage profond s'installe en 1972 à proximité de la ville de Saint-Ghislain, située à l'ouest de Mons. Les opérations de forage débuteront effectivement en 1973 et dureront jusqu'en 1978. Alors que les géologues s'attendaient

à découvrir des évaporites dans le Dévonien moyen, le forage rencontre lors de la traversée des terrains mississippiens plusieurs niveaux épais d'anhydrites massives ainsi qu'un niveau de calcaires bréchiques d'une centaine de mètres d'épaisseur (Licour, 2014). Au sein de ces calcaires bréchiques, jaillit vers 2 500 m de profondeur un débit artésien d'eau à 73 °C. Cette venue d'eau est colmatée pour permettre la poursuite du forage qui atteindra la profondeur de 5 403 m avec un carottage des terrains sur plus de 80 % de sa longueur totale. Ce n'est qu'après la fin du forage que le tubage sera perforé à hauteur des principales venues d'eau en vue de valoriser les eaux chaudes.

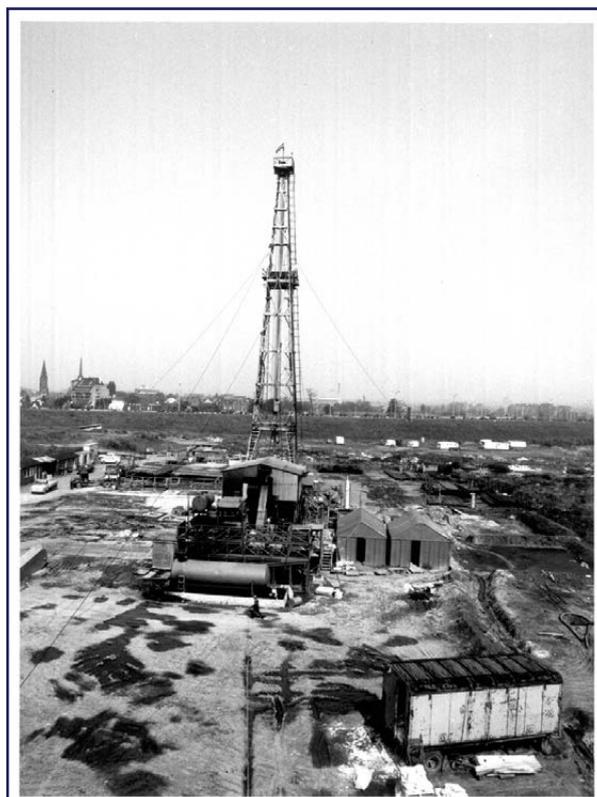


Figure 1. Chantier du puits de Saint-Ghislain (mai 1978). Source : Ministère des Travaux Publics de Belgique (archives IRScNB-SGB).

Figure 1. Saint-Ghislain well construction site (May 1978). Source: Belgian Ministry of Public Works (IRScNB-SGB archives).

À la suite de cette découverte, deux autres puits sont forés afin de reconnaître l'extension de la ressource. Le premier de

ces puits est foré à Douvrain en 1979. Il rencontre des venues d'eau à 66 °C vers 1 375 m de profondeur. Un second puits est foré à Ghlin en 1980-1981 qui traversera une structure d'effondrement complexe affectant les terrains houillers et crétacés. Des eaux à 68 °C y seront rencontrées à environ 1 575 m. Ces trois puits sont artésiens.

est-ouest nommée Bassin de Mons. Cette structure s'étend entre Binche à l'est et Valenciennes à l'ouest et une largeur de l'ordre de 15 km. Elle a conservé dans sa partie centrale des terrains méso-cénozoïques en discordance sur les terrains paléozoïques sur des épaisseurs dépassant localement les 400 m (cf. Figures 2 et 3). L'enregistrement sédimentaire y révèle une migration des dépocentres au cours du Méso-Cénozoïque (Dupuis & Vandycke, 1989).

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La région de Mons-Borinage est située au droit d'une structure subsidente synforme d'orientation générale

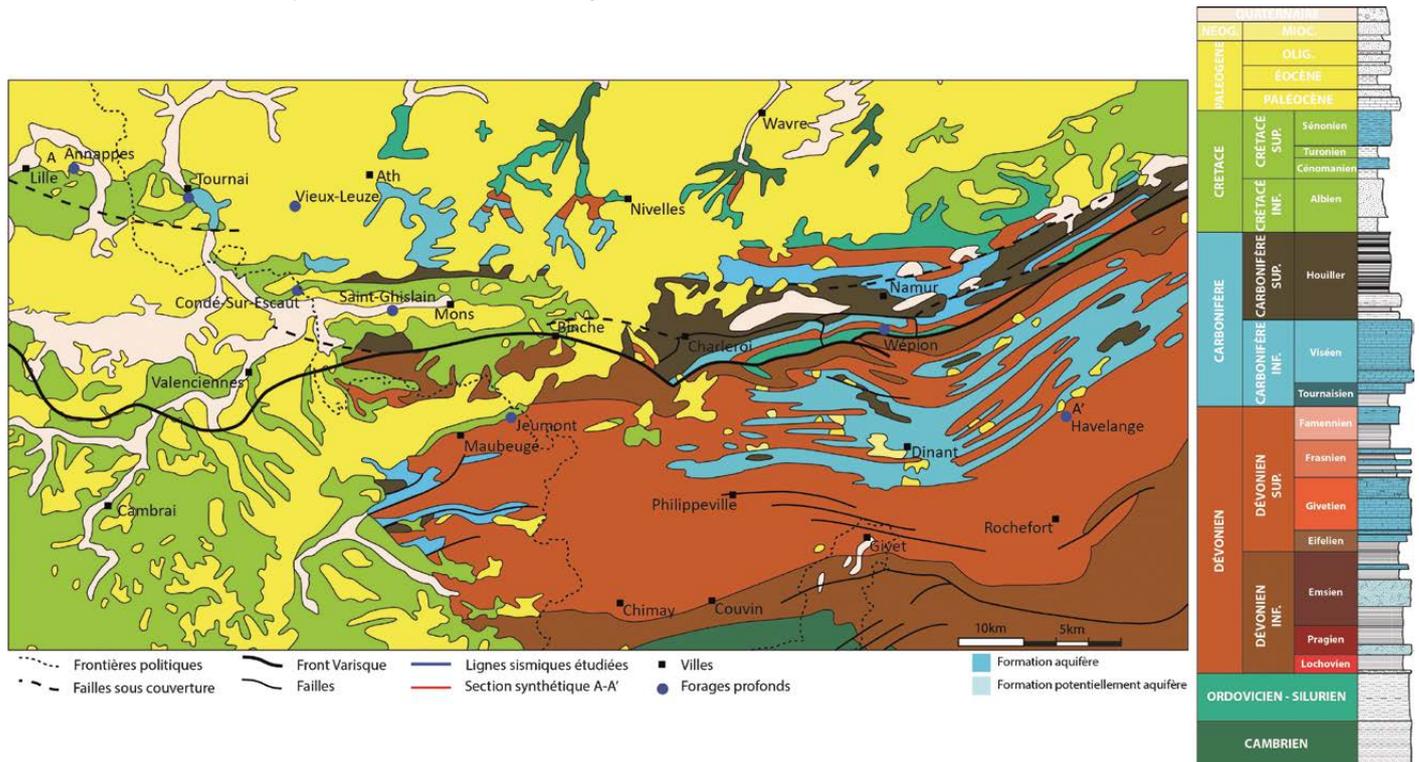


Figure 2. Carte géologique et colonne lithostratigraphique simplifiées du Hainaut et de ses alentours (Campeol, 2021), d'après (Chantraine *et al.*, 1996); (Doremus & Hennebert, 1995); (Hennebert & Delaby, 2017); (Barchy & Marion, 2008) et (Barchy & Marion, 2014).
 Figure 2. Simplified geological map and lithostratigraphic column of Hainaut and surrounding area (Campeol, 2021), after (Chantraine *et al.*, 1996); (Doremus & Hennebert, 1995); (Hennebert & Delaby, 2017); (Barchy & Marion, 2008) and (Barchy & Marion, 2014).

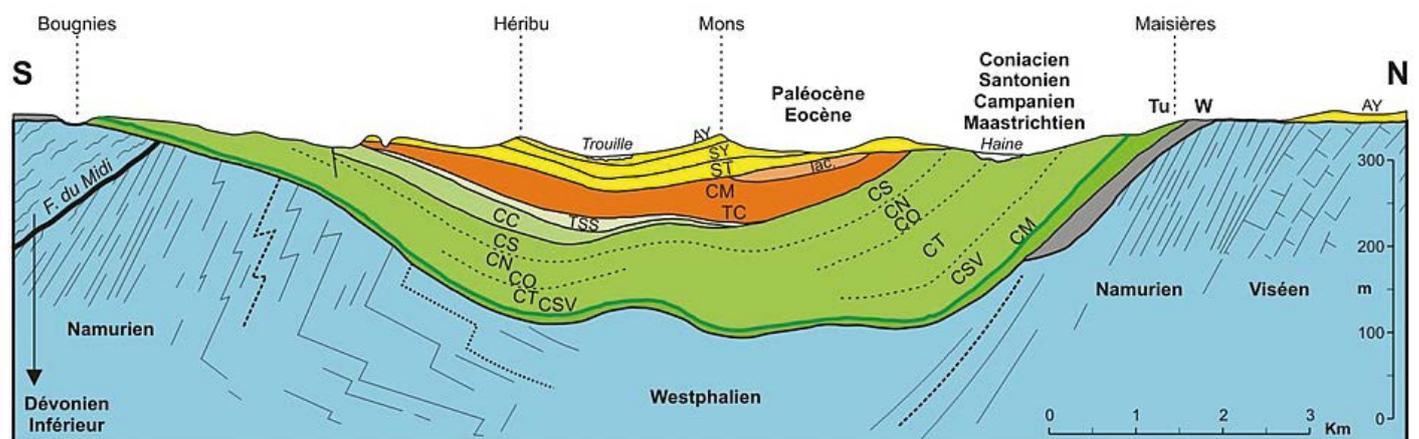


Figure 3. Coupe méridienne à travers le Bassin de Mons, tiré de (Licour, 2012) d'après (Marlière, 1969).
 Figure 3. Meridian section through the Mons Basin, from (Licour, 2012) after (Marlière, 1969).

Le socle paléozoïque sous le Bassin de Mons est constitué de plusieurs unités tectoniques (cf. figure 7, en haut) : le Socle brabançon (Massif du Brabant), le Parautochtone brabançon, l'Allochtone ardennais et les Ecailles Haine-Sambre-et-Meuse (Belanger *et al.*, 2012).

Le réservoir géothermique rencontré par les forages de Saint-Ghislain, Douvrain, et Ghlin se développe sous les terrains houillers du Carbonifère supérieur, au sein des calcaires du Carbonifère inférieur (Mississippien) du Parautochtone brabançon. Le sondage de Saint-Ghislain a révélé plusieurs éléments notables, notamment la présence de niveaux épais d'anhydrite au sein de la série carbonatée du Viséen supérieur. Il a également mis en évidence un épaissement exceptionnel de l'enregistrement sédimentaire du Carbonifère inférieur sur le site de Saint-Ghislain (~2500 m), en comparaison avec celui observé au sondage de Jeumont-Marpent (650 m). Cette différence pourrait s'expliquer par jeu des structures extensives de types failles normales ou (hemi)-graben (Licour *et al.*, 2012) qui s'inséreraient dans le schéma structural à l'échelle régionale affectant le Parautochtone brabançon avant l'orogénèse varisque (Lacquement, 2001).

Sur la Figure 4, la structure simplifiée du Parautochtone brabançon est présentée telle qu'elle peut être proposée sur la base des observations issues des sondages de Saint-Ghislain et de Jeumont-Marpent.

PROSPECTION ET CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE

Contexte

La découverte du fort potentiel géothermique du réservoir des calcaires carbonifères lors du sondage de Saint-Ghislain a rapidement entraîné d'autres travaux de prospection : la campagne sismique 2D Hainaut1979 et le fonçage des puits

de Douvrain et de Ghlin. Bien que visant la reconnaissance du réservoir géothermique profond, les résultats de la campagne Hainaut1979 s'avèrent assez limités (Dejonghe *et al.*, 1992), principalement en raison de la faible couverture d'acquisition et de profils assez courts. Les puits de Douvrain et Ghlin confirment la présence de la ressource géothermique plus à l'Est. Ce n'est que plus de trente ans plus tard que de nouvelles explorations sont entreprises. Deux campagnes de prospection en sismique réflexion ont eu lieu en 2012 et 2019 pour reconnaître la structure du réservoir des calcaires carbonifères et ses propriétés (campagnes Mons2012 et Hainaut2019). La campagne Mons2012 consiste en la réalisation de deux profils sismique réflexion 2D d'environ 20 km de longueur chacun, de direction globale perpendiculaire aux structures connues du socle paléozoïque (Figure 5). Cette campagne comprend également le retraitement des données issues des campagnes Hainaut1979 et Belcorp1986 (*partim.*).

Sur base des résultats satisfaisants obtenus, une nouvelle sismique campagne dénommée Hainaut2019 a été organisée à la faveur du projet FEDER MoreGeo. Cette campagne a été conçue de manière à compléter la couverture spatiale des acquisitions sismiques dans la zone, de sorte à aboutir à une répartition relativement homogène de profils 2D transversaux depuis la frontière française à l'ouest jusqu'à la région du Centre (La Louvière et Binche) (Figure 5). Elle comprend 5 lignes d'environ 15 à 20 km de longueur chacune. En complément, une campagne gravimétrique de haute densité a été réalisée. Elle emprunte notamment les profils sismiques et a notamment pour objectifs à identifier des zones de dissolution, considérées comme plus perméables, au sein du réservoir géothermique.

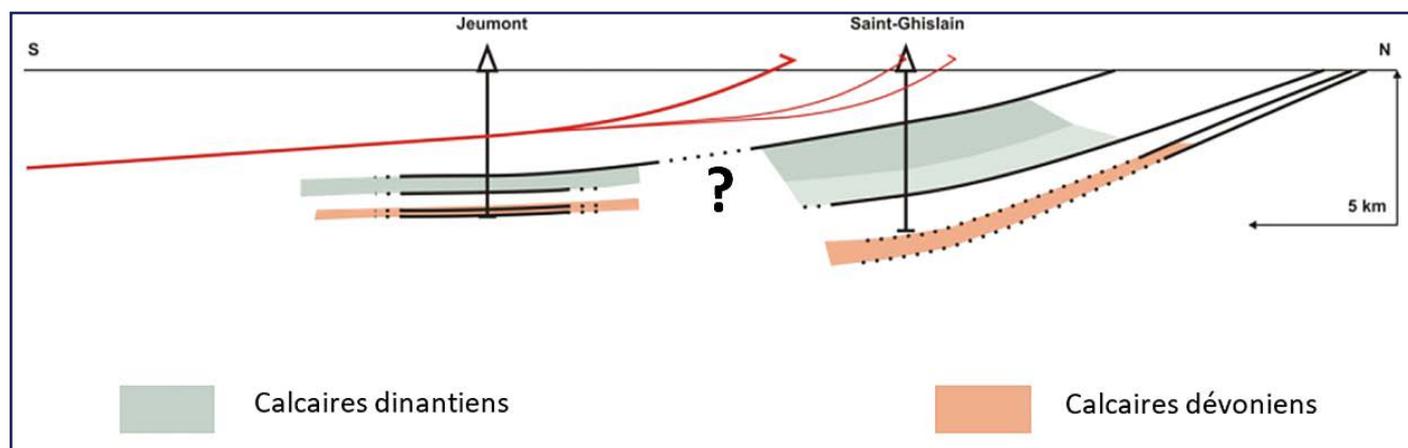


Figure 4. Structure simplifiée du Parautochtone brabançon entre Jeumont et Saint-Ghislain (Licour, 2012).

Figure 4. Simplified structure of the Brabant Parautochton between Jeumont and Saint-Ghislain (Licour, 2012).

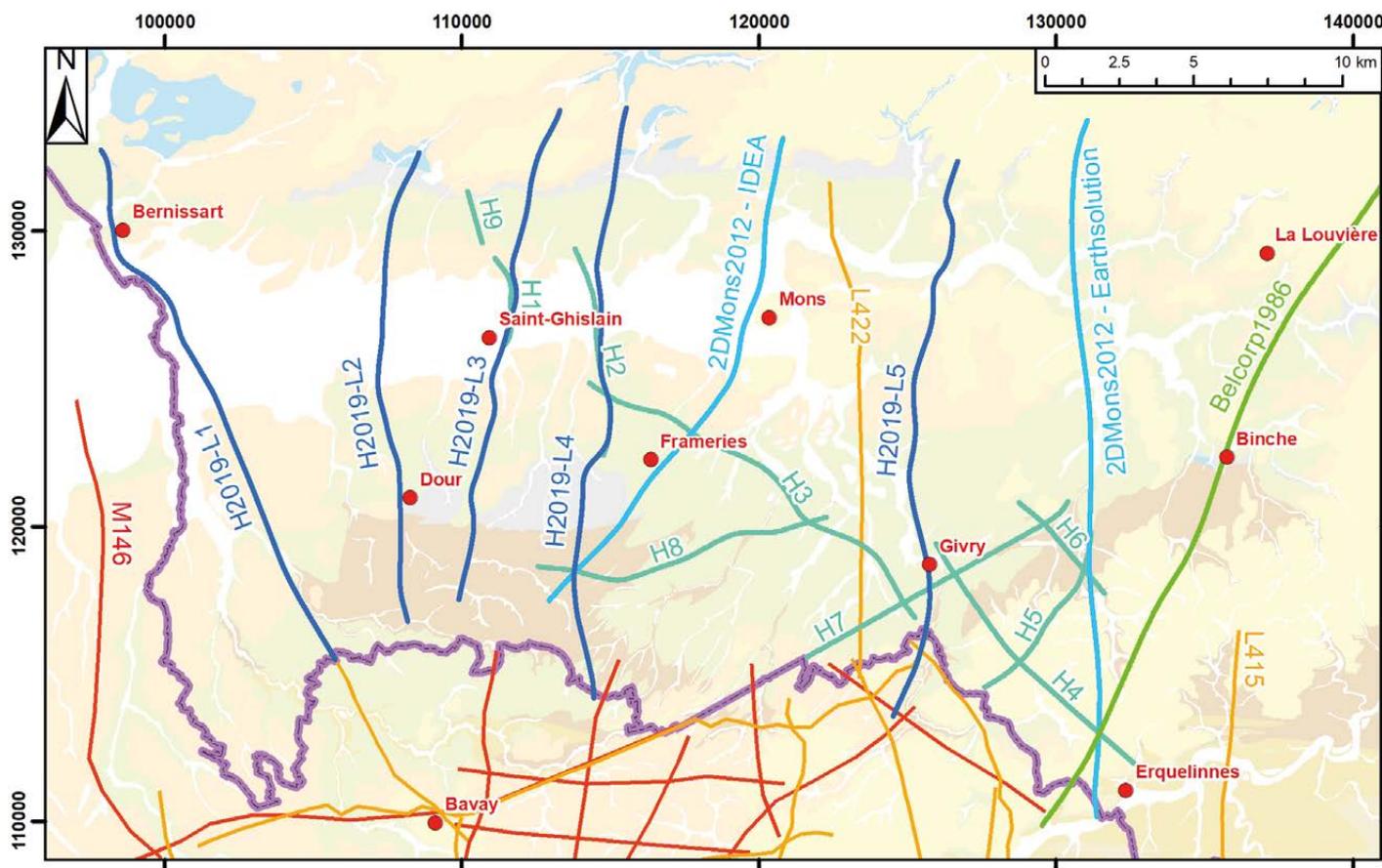


Figure 5. Tracés des profils en sismique réflexion dans et autour de la région du Centre et de Mons-Borinage, tiré de (Dupont, 2021). Détail des campagnes concernées : CoPeSEP (1961-63), en orange; Hainaut1979, en turquoise; Boulogne-Maubeuge (1980-82), en rouge; Belcorp1986, en vert; Mons2012, en bleu clair; Hainaut2019, en bleu foncé.

Figure 5. Reflection seismic lines in and around the Centre, Mons-Borinage regions. Details of the related surveys, from (Dupont, 2021): CoPeSEP (1961-63), in orange; Hainaut1979, in turquoise; Boulogne-Maubeuge (1980-82), in red; Belcorp1986, in green; Mons2012, in light blue; Hainaut2019, in dark blue.

Principaux résultats

L'interprétation globale des sections sismiques a abouti à l'identification de deux grands compartiments dans le réservoir des calcaires carbonifères. Côté nord, le réservoir est épais (~2,5 km d'épaisseur) et modérément penté vers le sud (15-20°). Cette situation est celle déjà reconnue à Saint-Ghislain. Vers le sud, le second compartiment est beaucoup plus mince (500-800 m) et subhorizontal, tel que traversé par le sondage de Jeumont-Marpent. Ces deux compartiments sont séparés par une faille à vergence nord, globalement est-ouest, considérée comme synsédimentaire en raison des différences d'épaisseurs sédimentaires de part et d'autre de cette discontinuité. Celle-ci est située au droit de l'émergence du front varisque, entre Dour et Binche. Elle limiterait vers le sud l'extension du réservoir géothermique des calcaires carbonifères tel que reconnue sur les forages profonds de la région de Mons-Borinage. Sa géométrie est en accord avec une structure en héli-graben telle que celle suggérée précédemment par Licour *et al.*, (2012).

De manière plus globale, les interprétations des données sismiques ont permis de préciser la structure du front varisque dans la région et à redéfinir les unités présentes. Le Parautochtone brabançon *sensu* (Belanger *et al.*, 2012) ne semble pas avoir subi de déformations liées à l'orogénèse varisque, et peut à ce titre être considérée comme une unité autochtone et appelée *Autochtone brabançon*. Celle-ci est formée du Massif du Brabant et de sa couverture dévono-carbonifère non déformée par l'orogénèse varisque. Elle correspond d'ailleurs à l'Unité 1 de Belanger *et al.* (2012). La définition des Ecailles de Haine-Sambre-Meuse peut être étendue à des structures nouvellement identifiées au sein du front varisque entre l'Allochtone ardennais et l'unité autochtone. Il s'agit notamment d'une structure en duplex, qui reprend notamment la structure autrefois reconnue dans le bassin houiller hainuyer sous le nom de « Massifs imbriqués » et actuellement considérée comme faisant partie du Parautochtone brabançon. Cependant, la flèche du chevauchement de ce duplex sur l'unité autochtone est trop importante pour la considérer comme une unité parautochtone. Ensuite, signa-

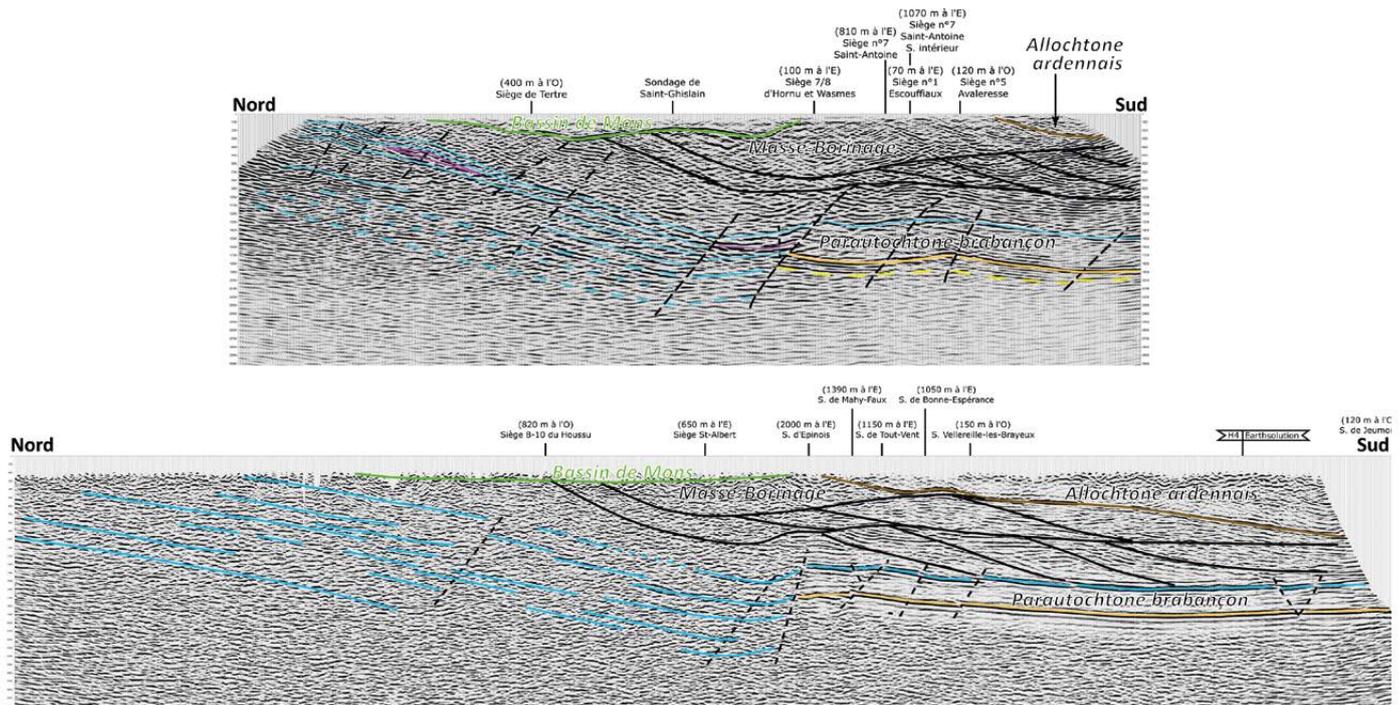


Figure 6. Sections sismiques migrées interprétées, tirées de (Dupont, 2021). En vert épais : base de la couverture méso-cénozoïque; en brun : Faille du Midi; en tiretés noirs : failles fortement pentées; en noir continu : failles de chevauchement; en bleu clair : réflecteurs situés dans la série des calcaires carbonifères; en orange : calcaires givêto-frasnien; en tiretés jaunes : sommet du socle brabançon (?); en rose : réflecteurs intenses localisés dans la partie supérieure des calcaires carbonifères. En haut : Ligne Hainaut2019-L3; En bas : Ligne Belcorp1986 (partim.) retraitée.

Figure 6. Migrated seismic sections interpreted, from (Dupont, 2021). In thick green: base of the Meso-Cenozoic cover; in brown: Midi Overthrust; in black dashed lines: steeply dipping faults; in solid black: thrust faults; in light blue: reflectors located in the Carboniferous limestone series; in orange: Giveto-Frasnian limestones; in yellow dashed lines: top of the Brabant basement (?); in pink: intense reflectors located in the upper part of the Carboniferous limestones. Top: Hainaut2019-L3 line; Bottom: reprocessed Belcorp1986 line (partial).

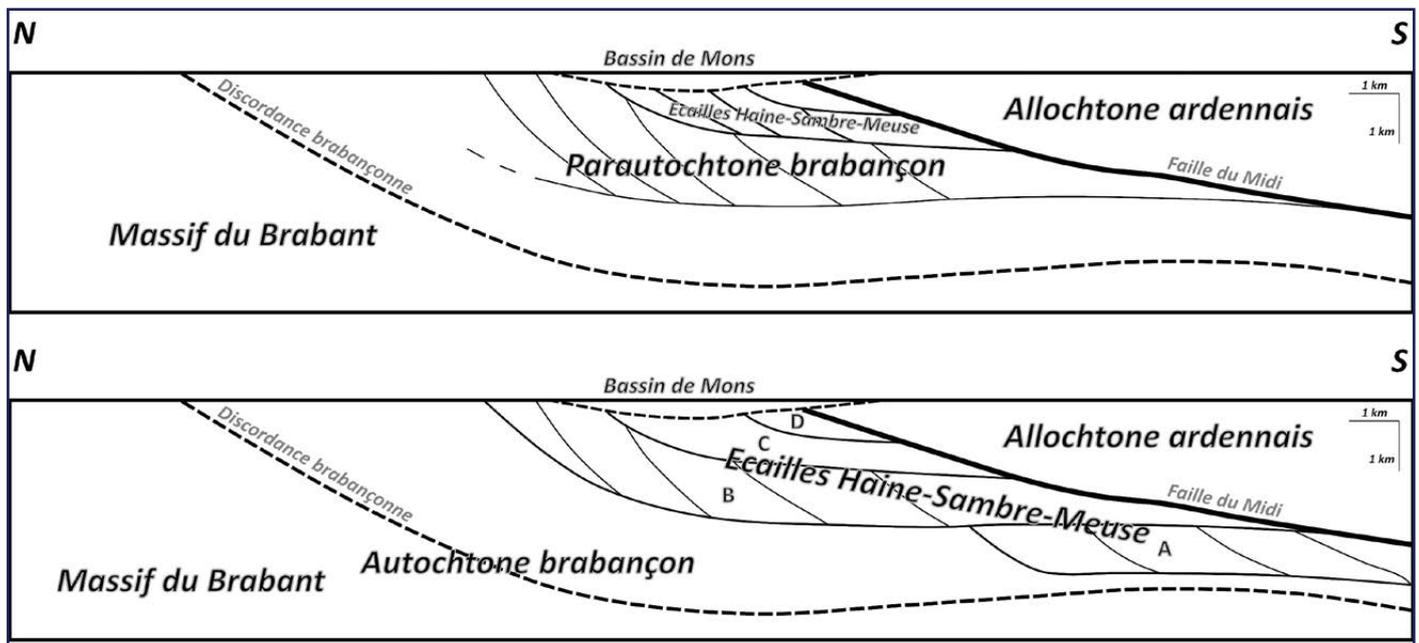


Figure 7. Coupes synthétiques au travers du front varisque tirées de (Dupont, 2021). En haut, modifié d'après (Belanger *et al.*, 2012); en bas, d'après les interprétations des campagnes sismiques Mons2012 et Hainaut2019. A : amorce de duplex; B : duplex; C : écailles partiellement à totalement renversées (par ex. : Unité de Masse-Borinage); D : écailles renversées (par ex. : Unité de Boussu).

Figure 7. Synthetic cross-sections through the Variscan front from (Dupont, 2021). Top modified from (Belanger *et al.*, 2012); bottom interpreted after the results of the Mons2012 and Hainaut2019 seismic surveys. A: early duplex; B: duplex; C: partially to totally reversed thrust sheets (e.g., Masse-Borinage Unit); D: reversed thrust sheets (e.g., Boussu Unit).

lons une amorce de duplex située vers le sud sous la structure chevauchante précédente. Celle-ci a été traversée par le forage de Jeumont-Marpent où un redoublement d'une partie de la série du Carbonifère supérieur avait été constaté. Les *Ecailles Haine-Sambre-Meuse*, ont une définition identique à celle des Ecailles et massifs renversés de Haine-Sambre-Meuse de (Belanger *et al.*, 2012), si ce n'est qu'elle n'est plus restreinte aux écailles partiellement à totalement renversées (telles que les Unités de Boussu, Masse-Borinage, etc.) mais est étendue aux écailles non-renversées nouvellement identifiées (duplex et amorce de duplex). Cette unité étendue reprend finalement les parties les plus déformées du Parautochtone brabançon telles que définies par (Belanger *et al.*, 2012).

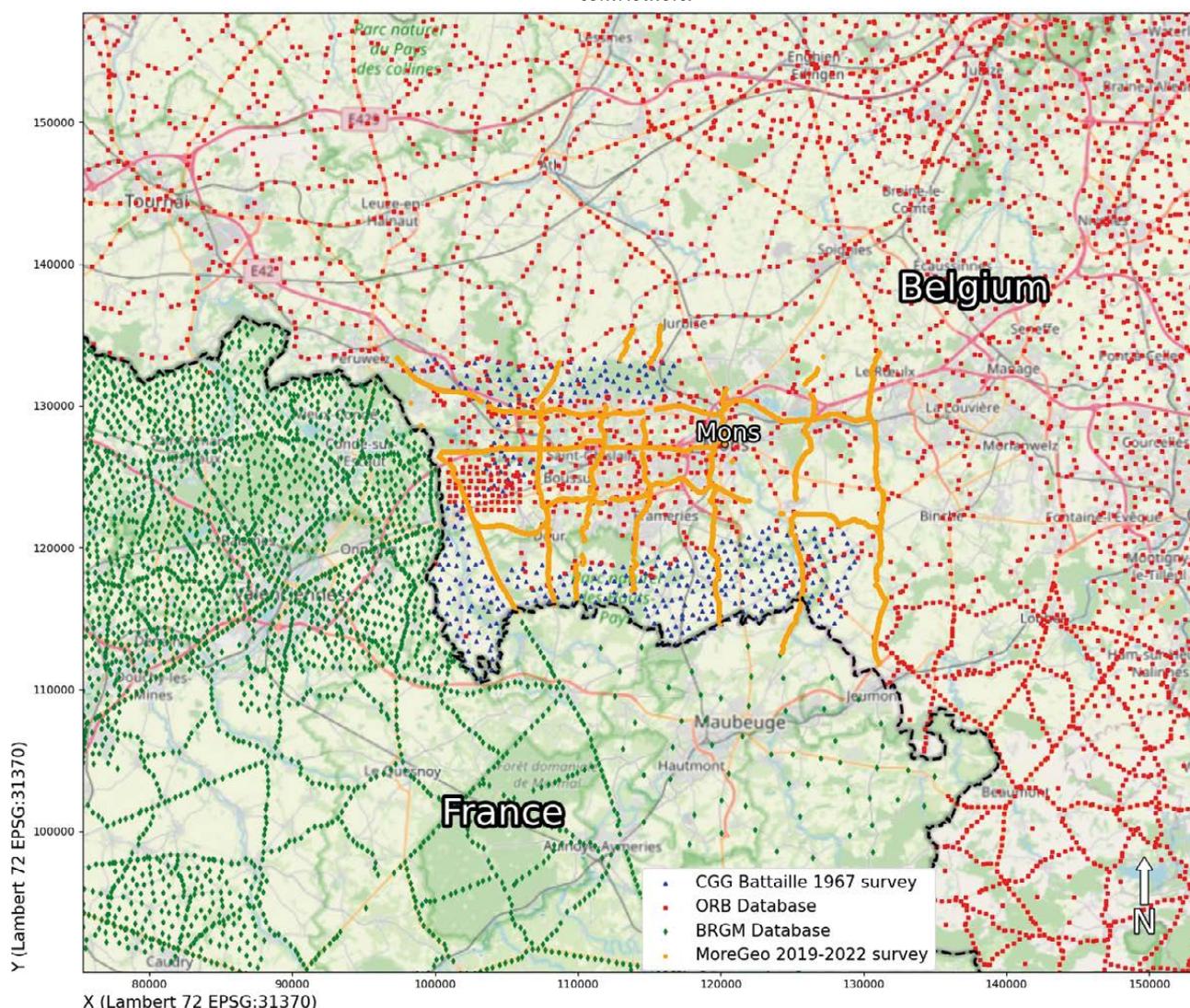
Gravimétrie

La gravimétrie offre une autre voie pour étudier la structure du sous-sol par des méthodes géophysiques. En effet, les différences de densité des roches formant le sous-sol et leur répartition en profondeur exercent une influence sur les caractéristiques locales du champ de l'accélération de pesanteur. Les essais de modélisation gravimétrique des structures du sous-sol

basés sur les synthèses gravimétriques antérieures (Everaerts & De Vos, 2012) ont conduit à initier de nouvelles acquisitions gravimétriques à plus haute densité le long des profils sismiques nord-sud des campagnes Mons2012 et Hainaut2019 ainsi que le long de trois profils est-ouest reliant les profils nord-sud. Ainsi, entre 2019 et 2022, 4 200 nouvelles stations gravimétriques ont été acquises de sorte à augmenter la couverture gravimétrique dans la zone d'intérêt. Le traitement complet de ces nouvelles mesures a été réalisé en intégrant, notamment, une correction de terrain modélisant la surface topographique par des prismes fins de 1 m de côté. L'intégration des données de l'ancienne acquisition Battaille1967 réalisée dans la région de Mons-Borinage ainsi que des mesures disponibles dans les catalogues de l'Observatoire Royal de Belgique (Verbeurgt *et al.*, 2019) et du BGRM (BRGM, 2023), fournit un jeu de données riche et étendu, présenté à la figure 8.

Figure 8. Carte de la position des stations retenues pour calculer l'anomalie de Bouguer, tirée de (Campeol *et al.*, 2024). Fond de carte © OpenStreetMap contributors.

Figure 8. Map of the position of the stations used to calculate the Bouguer anomaly, from (Campeol *et al.*, 2024). Base map © OpenStreetMap contributors.



Ce nouveau jeu de données a ainsi été employé pour le calcul d'une nouvelle carte de l'anomalie Bouguer affinée et centrée sur la zone d'intérêt. La méthode des sources équivalentes (Soler & Uieda, 2021) a été employée pour interpoler la carte de l'anomalie de Bouguer sur une grille régulière. La figure 9 présente l'anomalie de Bouguer obtenue, on y distingue, au droit du bassin de Mons, des anomalies locales de quelques kilomètres à une dizaine de kilomètres de longueur d'onde.

Ces anomalies et les extrema locaux associés sont facilement localisables sur la Figure 9. La comparaison avec la carte des isopaques des formations méso-cénozoïques permet de constater que l'allure particulière de l'anomalie au droit du Bassin de Mons est majoritairement liée au relief de la base du Bassin de Mons. Des anomalies de longueur d'onde kilométrique sont également visibles près de la bordure nord du Bassin de Mons. Elles semblent, elles aussi, corrélées à des variations locales de l'épaisseur des formations méso-cénozoïques conservées dans le Bassin de Mons qui pourraient résulter d'une subsidence locale accrue du fait de la dissolution d'évaporites.

Les signatures gravimétriques propres au réservoir géothermique sont ainsi en partie masquées par l'effet des terrains sus-jacents. Des traitements avancés en cours devraient permettre d'extraire la part des anomalies liées à la couverture méso-cénozoïque et affiner ainsi l'interprétation de l'anomalie de Bouguer liée au socle paléozoïque.

Modélisation du réservoir et simulations

La modélisation 3D des surfaces du sommet et de la base du réservoir des calcaires carbonifères (figure 11, en bas) a été réalisée à partir des données géologiques, sismiques et minières. En l'absence de sismique de puits dans la zone, une conversion temps profondeur basée sur les vitesses de sommation a été utilisée pour replacer les interprétations sismiques dans l'espace géographique (figure 11, en haut). La modélisation intègre ainsi la nouvelle conception structurale proposée sur base des résultats des interprétations des sections sismiques ainsi que l'analyse de la structure du gisement houiller développée dans (Dupont, 2021).

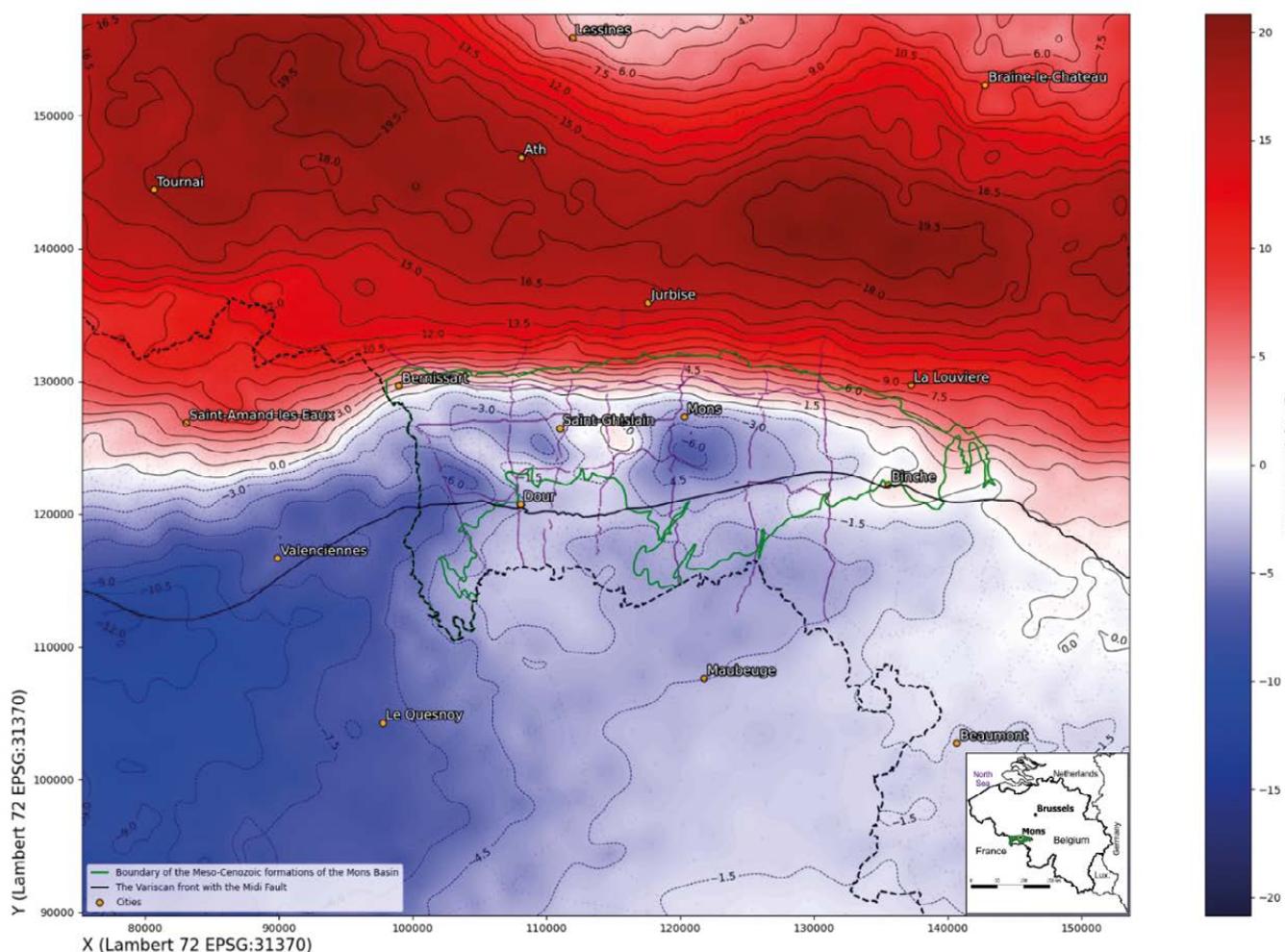


Figure 9. Carte de l'anomalie de Bouguer détaillée, tirée de (Campeol *et al.*, 2024).
 Figure 9. Detailed map of the Bouguer anomaly, from (Campeol *et al.*, 2024).

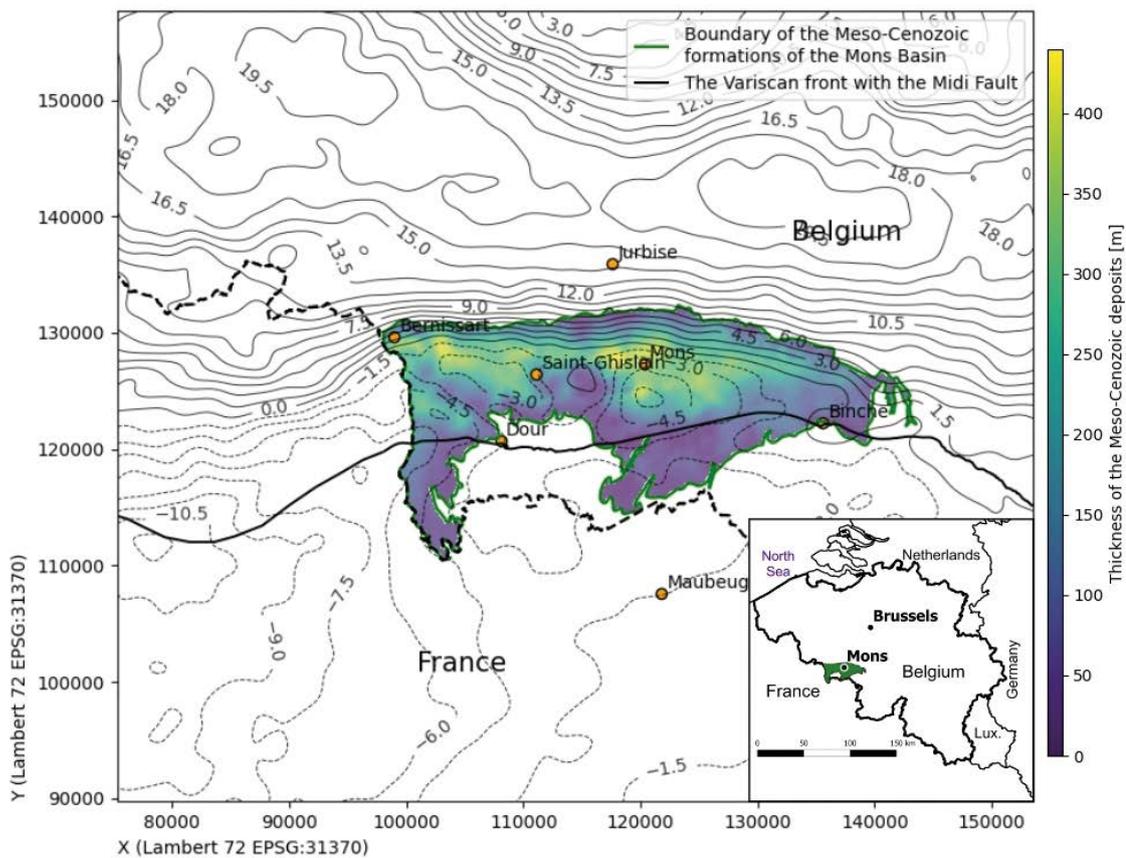


Figure 10. Carte des isoanomalies de l'anomalie de Bouguer superposées à la carte des épaisseurs des formations méso-cénozoïques du Bassin de Mons. *Figure 10. Isoanomal map of the Bouguer anomaly superimposed on the thickness map of the Meso-Cenozoic formations of the Mons Basin.*

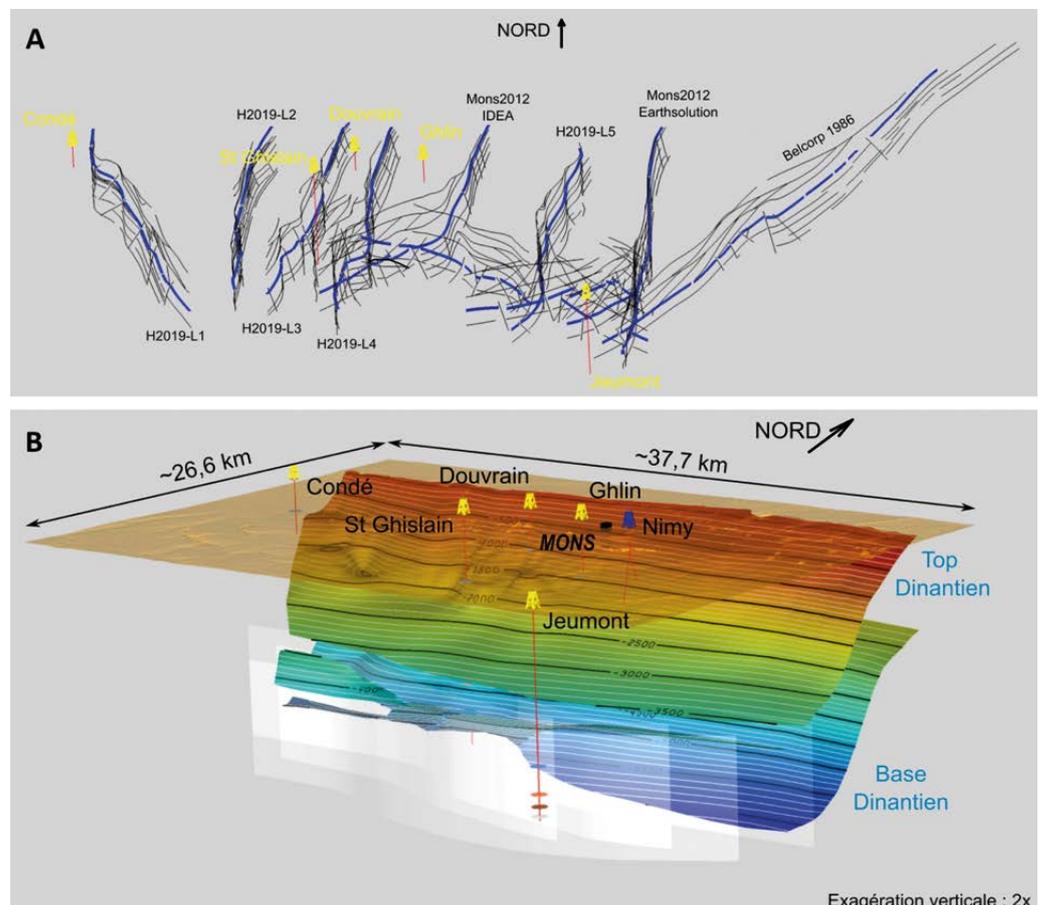


Figure 11. En haut : Replacment des interprétations des sections sismiques dans l'espace géographique; en bas : Modèle 3D des surfaces du sommet et de la base du Carbonifère inférieur. *Figure 11. Top: Interpretation of seismic sections in geographical space; bottom: 3D model of the surfaces of the top and base of the Lower Carboniferous.*

Sur le plan hydrogéologique, les formations houillères du Carbonifère supérieur peuvent être décrites comme un aquiclude à niveaux aquifères constitué de roches pélitiques, de siltites et de grès. Cet ensemble renferme localement des aquifères fracturés dans les horizons les plus grossiers. À la base des terrains houillers, les roches siliceuses de la Formation de Gottignies forment la délimitation d'avec les terrains essentiellement carbonatés du Carbonifère inférieur. Dans la région étudiée, le Carbonifère inférieur constitue un aquifère fissuré karstique développé dans les horizons calcaires. La porosité et la perméabilité qui s'y développe proviennent essentiellement des joints, élargis ou non par la karstification. Au sein du Viséen, des niveaux d'anhydrite sont présents dans les étages Molinacien et Livien. La dissolution de ces évaporites laisse des couches bréchiques sensiblement plus perméables que les calcaires. Notons que les niveaux productifs rencontrés lors du forage des précédents puits géothermiques sont situés à des niveaux différents, et consistent souvent en des zones karstifiées présentes dans la partie supérieure des calcaires carbonifères. La partie inférieure du Tournaisien est plus détritique et contient des niveaux plus argileux qui représentent des barrières hydrogéologiques locales. Une large zone d'affleurement le long du bord nord du réservoir permet une réalimentation naturelle de l'aquifère.

Au départ de la modélisation géologique du réservoir, un modèle hydrogéologique multicouche a été développé

afin de simuler à l'échelle du réservoir les impacts associés à l'implantation de nouveaux ouvrages. Ce modèle couvre une superficie de 55 km x 20 km. Les paramètres hydrauliques et thermiques des différents milieux ont été choisis sur base des informations disponibles (Licour, 2012), en particulier celles qui proviennent des puits géothermiques existants. Les porosités effectives attribuées aux formations du réservoir varient entre 5 et 10 %, tandis que les conductivités hydrauliques varient de 10^{-6} m/s pour les calcaires et dolomies jusqu'à 10^{-5} m/s pour les couches bréchiques. Le coefficient d'emmagasinement spécifique retenu est compris entre $1.5 \cdot 10^{-6}$ et $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ selon les lithologies concernées. La capacité thermique volumique des roches a été fixée à $2.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. La conductivité thermique au sein du réservoir 2.6 à $2.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Le modèle hydrogéologique régional permet de simuler, à l'aide de la méthode des éléments finis, l'évolution du champ température et de charge hydraulique au sein du réservoir géothermique suite à diverses sollicitations (pompage et/ou réinjection en divers endroits). Cet outil offre notamment la possibilité d'étudier l'impact régional d'un large déploiement de la production de chaleur par géothermie profonde sur le long terme. La figure 12 présente un exemple de résultats pour une simulation pour laquelle neuf nouveaux doublets sont implantés à l'est de la ville de Mons alors que les ouvrages en exploitation plus à l'ouest continuent leur activité habituelle.

Sur la figure 12 à droite, la modélisation illustre l'impact des neuf doublets supplémentaires après 200 ans d'explo-

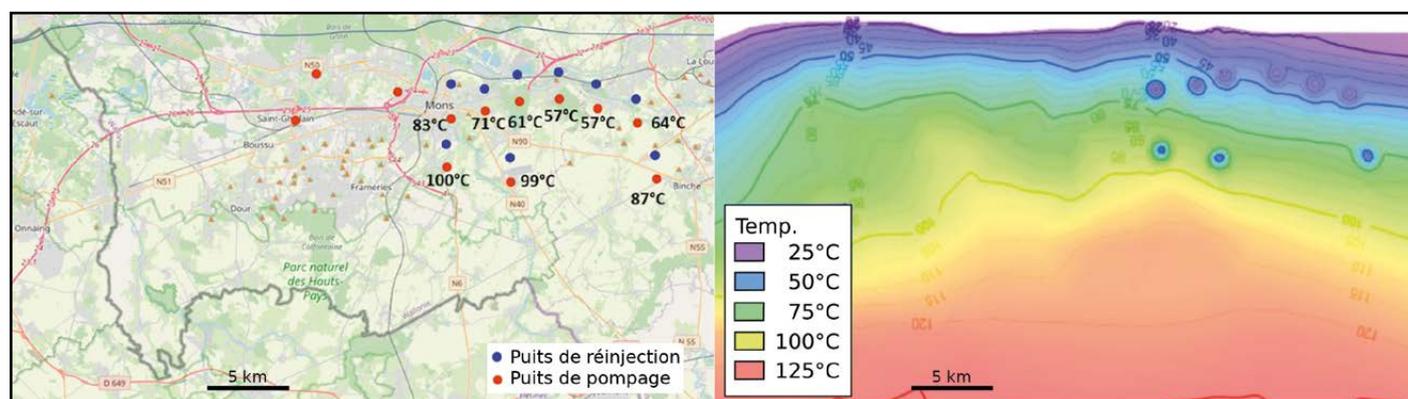


Figure 12. à gauche : Localisation des points de pompage et de réinjection dans la couche réservoir pris en compte dans la simulation (les trois puits de Saint-Ghislain, Douvrain et Ghlin ainsi que neuf nouveaux doublets). Fond de carte © OpenStreetMap contributors; à droite : champ de température simulé après une période d'exploitation des doublets de 200 ans au sein du réservoir.

Figure 12. Left: Location of pumping and reinjection points in the reservoir layer considered in the simulation (the three wells at Saint-Ghislain, Douvrain and Ghlin as well as nine new doublets). Base map © OpenStreetMap contributors; right: Simulated temperature field after operating the doublets for 200 years.

tation se marque par l'apparition de bulles froides dans la couche bréchique autour des puits de réinjection. On constate que dans les conditions de cette simulation la percée thermique n'est pas atteinte au terme de la période de 200 ans.

Étude de Scenarios de Valorisation de la Ressource

Les régions de Mons-Borinage et du Centre présentent des zones d'habitat denses au droit de l'ancien sillon industriel. La

majorité des besoins en chauffage du secteur résidentiel y est assurée au moyen de combustibles fossiles et l'habitat y est le plus souvent assez ancien avec des performances énergétiques médiocres. Si certaines améliorations du bâti du point de vue de la consommation d'énergie pour le chauffage ont été entreprises ou sont encore envisageables, il semble impossible de diminuer drastiquement et à coût raisonnable la demande de chaleur de telles constructions. Les zones à forte densité

d’habitat sont en très grande majorité situées à l’aplomb du réservoir géothermique. De plus, les températures des eaux géothermales sont compatibles avec les régimes de températures requis par les bâtiments existants. Le déploiement de réseaux de chaleur urbain alimentés par la géothermie profonde paraît ainsi présenter de nombreux avantages pour répondre aux défis de la transition énergétique dans la région et le moment semble favorable à la valorisation de la ressource. Cependant, comme l’a montré l’historique du développement de la géothermie dans la région au fil des quarante dernières années, il existe un certain nombre de barrières au déploiement de cette énergie que l’on ne peut ignorer.

Le développement d’un projet de réseau de chaleur pour le chauffage urbain alimenté par la géothermie profonde relève d’une décision de développement territorial qui ne peut s’envisager que dans le cadre d’une stratégie à long terme. En effet, un tel projet a une durée de vie estimée à minimum cinquante ans et implique des investissements conséquents dans les premières années de son développement. De plus, les décideurs doivent intégrer à leur stratégie les incertitudes inhérentes aux conditions de sous-sol d’une part et aux évolutions socio-économiques au cours de la durée de vie du projet d’autre part. Jusqu’à il y a peu, les incertitudes réglementaires liées à l’exploitation de la géothermie profonde constituait une difficulté supplémentaire. Le nouveau code de la gestion des ressources du sous-sol wallon, adopté en mars 2024, permet de clarifier le cadre d’exploration et d’exploitation de la géothermie profonde en Région Wallonne et *a fortiori*

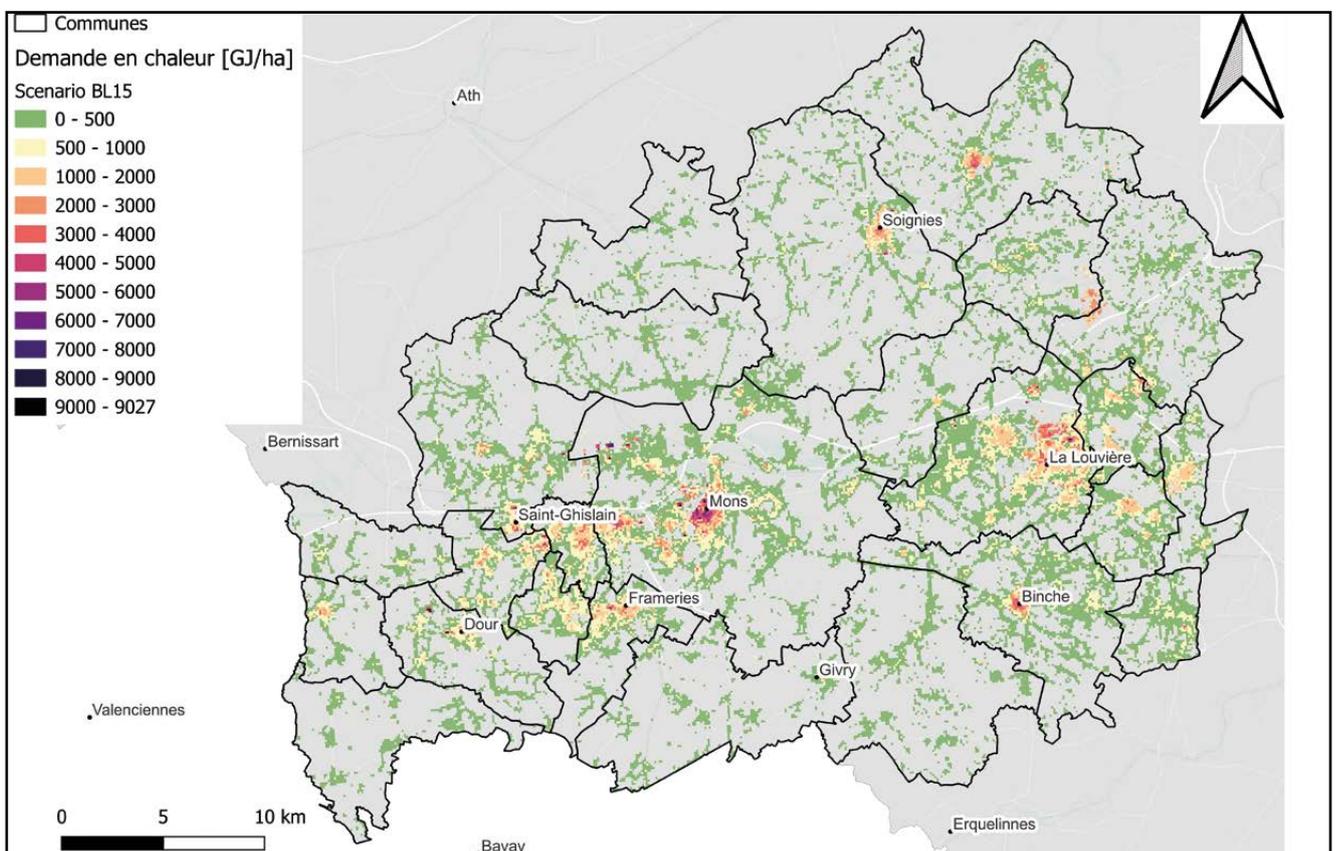
dans le Cœur de Hainaut, via l’octroi de permis exclusifs d’exploration ou d’exploitation.

Pour étudier *a priori* l’influence des conditions socio-économiques sur la vie d’un projet de réseau de chaleur pour le chauffage urbain alimenté par la géothermie profonde, les évolutions du prix des énergies fossiles et de la demande en chaleur sur le secteur étudié ont été considérées.

Le prix des énergies fossiles représente un facteur dont l’évolution est particulièrement délicate à prévoir. En effet, cette évolution dépend de nombreux facteurs tels que des choix et développements technologiques, d’orientations politiques et de considérations géostratégiques. Elle n’est indépendante de l’évolution de la demande. Trois scénarios proposés dans le “World Energy Outlook” de l’IEA (IEA, 2022 ; p. 106 & 107) ont été considérés. Parallèlement, la demande en chaleur dépend de la croissance démographique, de l’efficacité énergétique du bâti ou encore des politiques énergétiques et environnementales. Pour approcher cet aspect, des scénarios d’évolution de la demande en chaleur pour le secteur résidentiel et des services développés dans le cadre du projet sEEnergies (Reiter *et al.*, 2021) ont été retenus.

Figure 13. Demande en chaleur sur le territoire du Cœur de Hainaut pour le scénario BL15. Sources des données : sEEnergies Open Data - BL2015 HD100 total (Möller *et al.*, 2022); (Reiter *et al.*, 2021); (Fleiter *et al.*, 2017). Fond de carte : Service Public de Wallonie.

Figure 13. Heat demand in the Cœur de Hainaut region for the BL15 scenario. Data sources: sEEnergies Open Data - BL2015 HD100 total (Möller *et al.*, 2022); (Reiter *et al.*, 2021); (Fleiter *et al.*, 2017). Base map: Service Public de Wallonie.



Afin de disposer d'un outil prospectif capable d'explorer les impacts de décisions de développement d'un projet dans ces différents scénarios socio-économiques, un modèle économique simplifié a été implémenté sous forme d'un code permettant d'évaluer les flux financiers associés à un projet de doublet couplé à un réseau de chaleur pour le chauffage urbain. Les scénarios sont caractérisés par les évolutions de la demande en chaleur et des prix de l'énergie. Les dépenses d'investissement considérées concernent le creusement du doublet, la construction de la centrale et celle du réseau de chaleur. Le calcul tient également compte des caractéristiques du réservoir et de la localisation du projet. Un module relatif au creusement d'un doublet intègre les informations extraites du modèle de réservoir pour déterminer les caractéristiques géométriques du doublet selon sa localisation et estimer les dépenses d'investissement sur cette base. La réponse du réservoir à la sollicitation supplémentaire que représente le doublet est évaluée à l'aide du modèle hydrogéologique régional.

La géométrie exacte du réseau de chaleur n'étant pas définie à ce niveau, l'estimation des dépenses d'investissement pour le réseau de chaleur s'appuie sur une estimation de sa longueur. La zone desservie par le doublet sert de base à cette estimation. Elle est définie au départ du débit maximum du doublet et du différentiel de température attendu ainsi que de la demande pour le chauffage. La longueur du réseau correspond à celle des voiries dans la zone considérée.

À ce stade, seuls des mécanismes de financement simples ont été pris en compte, à savoir la subvention et l'emprunt. Le taux de subvention et les conditions de l'emprunt sont des paramètres à fixer pour le calcul.

Le calcul des dépenses d'exploitation intègre les frais de personnel, de fonctionnement du réseau de chaleur et des

pompes, ainsi que l'entretien des installations, la charge de l'emprunt y est également ajoutée. Le calcul des revenus du doublet considère un prix de vente initial de la chaleur. Dans l'hypothèse choisie, les contrats de fourniture sont conclus pour 5 ans avec un ajustement annuel en fonction de l'évolution du prix des énergies fossiles. Tous les 5 ans les contrats sont revus pour inclure une indexation qui compense l'inflation.

Une utilisation de l'outil prospectif est illustrée à l'aide du cas d'un nouveau doublet en périphérie de la ville de Mons dans un scénario socio-économique correspondant au maintien des politiques énergétiques actuelles et pour une demande en chaleur équivalente à celle calculée pour l'année 2015. Le taux de subvention est fixé à 70 % et le solde est emprunté à un taux fixe de 3 % sur une période de 20 ans.

Dans les hypothèses retenues pour cette simulation, la différence de température entre le pompage et la réinjection est fixée à 30 °C et le débit maximum du doublet est fixé à 300 m³/h. On considère que les consommateurs raccordés au réseau de chaleur représentent 30 % de la demande totale d'une zone d'environ 600 m de rayon autour du doublet (voir figure 14, à gauche). 75 % de la chaleur délivrée aux consommateurs raccordés provient de la géothermie, les 25 % restants correspondent à la demande de pointe qui est assurée par d'autres sources d'énergie. Une monotone de puissance type est adoptée pour caractériser la demande annuelle sur le réseau de chaleur.

L'équilibre entre dépenses d'exploitation cumulées et les revenus d'exploitation cumulés est atteint après 8 ans pour ce cas. Selon le scénario socio-économique choisi, l'outil prospectif permet d'explorer l'impact de différents choix en fonction de la localisation d'un projet de géothermie profonde

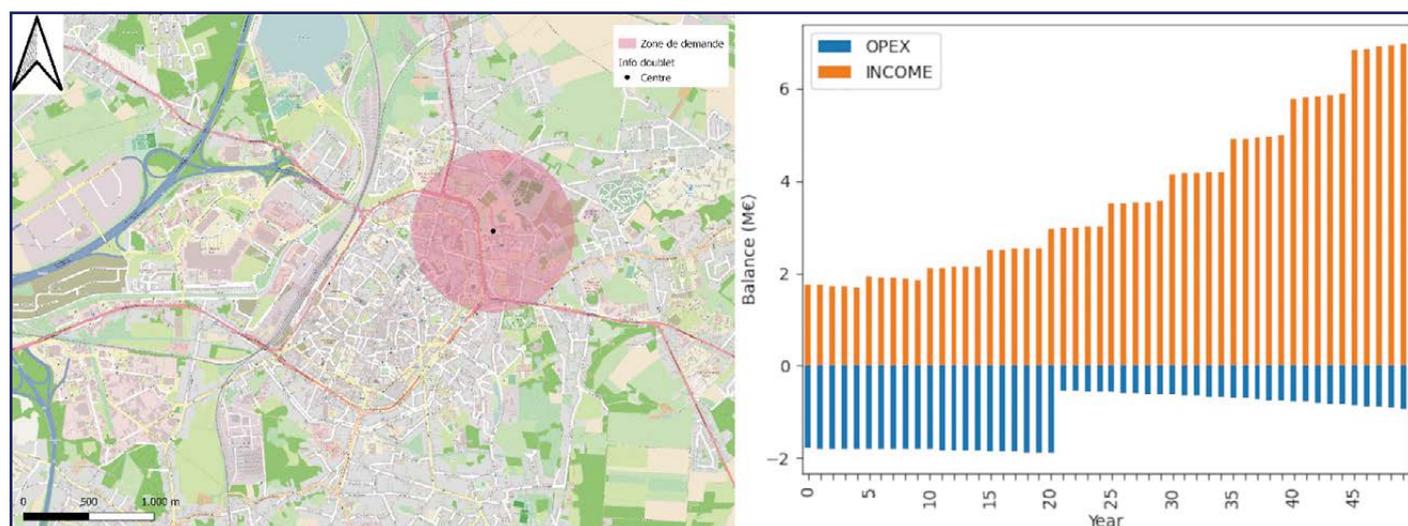


Figure 14. À gauche : carte de localisation de la zone desservie par le réseau de chaleur simulé. Fond de carte © OpenStreetMap contributors; à droite : flux financiers simulés au cours de la durée de vie du projet - OPEX : dépenses d'exploitation (y compris la charge d'intérêt), INCOME : revenus d'exploitation.

Figure 14. Left: map showing the location of the area served by the simulated district heating network. Base map © OpenStreetMap contributors; right: simulated financial flows over the life of the project - OPEX: operating expenses (including interest charges), INCOME: operating income.

en Cœur de Hainaut, ces choix étant relatifs aux modes de financement, à la politique de prix et, plus généralement, à une politique de développement territorial.

DÉVELOPPEMENTS ET PERSPECTIVES

Le modèle géologique du réservoir et de sa couverture synthétise un ensemble d'informations et d'hypothèses nécessaire au développement de la géothermie profonde en Cœur de Hainaut. Ce modèle est encore appelé à s'enrichir de nouvelles observations et analyses. Il devrait notamment bénéficier des résultats de traitements géophysiques avancés en cours. En effet, le traitement conjoint des données gravimétriques et sismiques laisse entrevoir de belles potentialités d'amélioration. De plus, à l'initiative du SPW-Energie et du Gouvernement Wallon, une nouvelle campagne de prospection sismique réflexion est en préparation (WalScan). Elle constitue une opportunité pour compléter la couverture sismique de la région avec un profil est-ouest reliant une partie des profils existants au forage de Saint-Ghislain et se poursuivant vers Namur en passant par l'agglomération de Charleroi. L'intégration de nouvelles observations et mesures faites à l'occasion de forages à venir serait évidemment de nature à compléter les modèles géologiques et hydrogéologiques. Les simulations actuelles sur le modèle régional indiquent que placer des doublets distants de quelques kilomètres n'induit pas d'interférence significative, même au-delà de la durée de vie d'un doublet. Elles montrent aussi qu'une dizaine de doublets répartis sur le territoire ne posent pas de problème de soutenabilité à un horizon de deux siècles et suggère que le réservoir pourrait probablement accueillir plus de doublets encore. Grâce à l'incorporation progressive des améliorations du modèle géologique au modèle hydrogéologique, les résultats des simulations pourront être affinés. De cette façon, l'étude des interférences entre ouvrages, l'évaluation de la soutenabilité de l'exploitation de la ressource à l'échelle du réservoir ou encore les études d'opportunité d'un projet pourront bénéficier des dernières connaissances sur le réservoir géothermique.

Remerciements : le projet MoreGeo a bénéficié de Fonds Européen pour le Développement Régional et a été financé par l'Union Européenne et la Région Wallonne. Les auteurs souhaitent remercier Madame Luciane Licour et Messieurs Michel Everaerts, Mathias Ganins, Kevin Gonze, Frank Martin, Ivan Nanfo Djoufack & Alain Rorive pour leur participation aux travaux de recherche menés sur le réservoir géothermique du Cœur de Hainaut. Ils souhaitent également souligner la collaboration fructueuse de longue date avec l'intercommunale IDEA, en charge de l'exploitation de la géothermie profonde en Cœur de Hainaut, en particulier dans le cadre du projet MoreGeo avec Messieurs David Charlet, Frédéric Habils et Vincent Renard. Les au-

teurs souhaitent aussi mentionner l'implication du Service Public de Wallonie, au travers des actions de Madame Sonya Chaoui (SPW-Énergie) pour le développement de la filière de la géothermie profonde en Région Wallonne ainsi que de Monsieur Daniel Pacyna (SPW-DRIGM) et ses collègues pour leur support en termes de données géologiques et minières dans la Région.

Bibliographie

- BARCHY L. & MARION J.-M. (2008). - Carte géologique de Wallonie au 1/25.000^e, planchette Maffé – Grandhan (54/3-4).
- BARCHY L. & MARION J.-M. (2014). - Carte géologique de Wallonie au 1/25.000^e, planchette Aye – Marche-en-Famenne (54/7-8).
- BELANGER I., DELABY S., DELCAMBRE B., GHYSEL P., HENNEBERT M., LALOUX M., MARION J., MOTTEQUIN B. & PINGOT J. (2012). - Redéfinition des unités structurales du front varisque utilisées dans le cadre de la nouvelle carte géologique de Wallonie (Belgique), *Geologica Belgica*, 15(3):169-175.
- CAMPEOL Q. (2021). - Étude prospective des signatures diagrapiques du réservoir géothermique des calcaires carbonifères du Hainaut et de sa couverture - Valorisation des diagrapies réalisées dans le sondage de Saint-Ghislain. Mémoire de Master Ingénieur civil des Mines et Géologue, Université de Mons, 64 p.
- CAMPEOL, Q., DUPONT, N., NANFO DJOUFACK, I. P., CHRISTIAENS, L., MARTIN, F., & KAUFMANN, O. (2024). - A new detailed Bouguer anomaly for the exploration of the deep geothermal reservoir in SW-Belgium, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-19287.
- BRGM (2023). - Banque Gravimétrique de France. Base de données. Récupéré de <https://infoterre.brgm.fr/page/geoservices-ogc> le 25/12/2023.
- CHANTRAINE J., AUTRAN A. & CAVELIER C. (1996). - Carte Géologique de la France au 1/1.000.000^e. Bureau de Recherche et de Géologie Minière, 1 pl.
- DEJONGHE L., DELMER A. & HANCE L. (1992). - Les enseignements d'une campagne sismique conduite en Belgique, dans le Hainaut, selon l'axe Erquelines–Saint-Ghislain. *Annales de la Société géologique du Nord*, 1(2):135–142.
- DOREMUS P. & HENNEBERT M. (1995). - Carte géologique de Wallonie au 1/25.000^e, planchette Lens – Soignies (38/7-8).
- DUPONT N. (2021). - Analyse de la structure du socle paléozoïque hainuyer. Implications sur les caractéristiques des réservoirs profonds. Thèse de doctorat, Université de Mons, Belgique, 374 p.
- DUPUIS C. & VANDYCKE S. (1989). - Tectonique et karstification profonde : un modèle de subsidence original pour le Bassin de Mons. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 112, 479–487.
- EVERAERTS M. & DE VOS W. (2012). - Gravity acquisition in Belgium and the resulting Bouguer anomaly map. *Memoirs of the Geological Survey of Belgium*, 58, 55 p.

- FLEITER T., ELSLAND R., HERBST A., MANZ P., POPOVSKI E., REHFELDT M., REITER U., CATENAZZI G., JAKOB M., HARMSSEN R., RUTTEN C., DITTMANN F., RIVIÈRE P. & STABAT P. (2017). - Baseline scenario of the heating and cooling demand in buildings and industry in the 14 MSs until 2050. Heat Roadmap Europe 4 (HRE4): Building the knowledge, skills, and capacity required to enable new policies and encourage new investments in the heating and cooling sector (WP3). Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. Research report. 78 p.
- HENNEBERT M. & DELABY S. (2017). - Carte géologique de Wallonie au 1/25.000°, planchette Binche –Morlanwelz (46/5-6).
- MARLIÈRE, R. (1969). - Introduction à quelques excursions géologiques dans le Bassin de Mons. Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie. Bruxelles. 10 p. + 1 pl. hors-texte.
- MÖLLER B., WIECHERS E., SÁNCHEZ-GARCÍA L. & PERSSON U. (2022). - Spatial models and spatial analytics results. sEEnergies: Quantification of synergies between energy efficiency first principle and renewable energy systems (D5.7). Research report, 71 p.
- LACQUEMENT F. (2001). - L'Ardenne varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire pré-structuré, de l'affleurement au modèle de chaîne. *Publications de la Société Géologique du Nord*, 29, 285 p.
- LICOUR L. (2012). - Relations entre la géologie profonde et le comportement hydrogéologique du réservoir géothermique du Hainaut (Belgique). Caractérisation de l'aquifère dans la région de Saint-Ghislain. *Thèse de doctorat, Université de Mons, Belgique*, 372 p. + annexes.
- LICOUR L., DUPONT N., BAELE J-M., KAUFMANN O. & RORIVE A. (2012). - Structural discontinuities in the deep reservoirs of the Namur Parautochton: The importance of future geophysical investigations for exploring the geothermal resource in Hainaut in DEVLEESCHOUWER X., HEYVAERT V., LOUWYE S., PIESENS K. & SMITH TH. (2012). - *4th International Geologica Belgica Meeting: 11-14 September 2012 – Brussels, Belgium. Geologica Belgica Conference Proceedings*, Volume 1, 280 p.
- LICOUR L. (2014). - The geothermal reservoir of Hainaut: the result of thermal convection in a carbonate and sulfate aquifer. *Geologica Belgica*, 17(1):75-81.
- SOLER, S. R. & UIEDA, L. (2021). - Gradient-boosted equivalent sources, *Geophysical Journal International*, 227(3):1768–1783.
- VERBEURGT J, VAN CAMP M, STAL C, CAMELBECK T, DE SLOOVER L, POPPE H, DECLERCQ P-Y., VOET P., CONSTALES D., TROCH P., DE MAEYER P. & DE WULF A. (2019). - The gravity database for Belgium. *Geoscience Data Journal*, 2019(6):116–125.
- REITER U., PALACIOS A. & LIENHARD L. (2021). - Data set on energy efficiency potentials, describing the cost curves for building envelope refurbishment measures on single building level. sEEnergies: Quantification of synergies between energy efficiency first principle and renewable energy systems (D1.1). Research report, 18 p.