

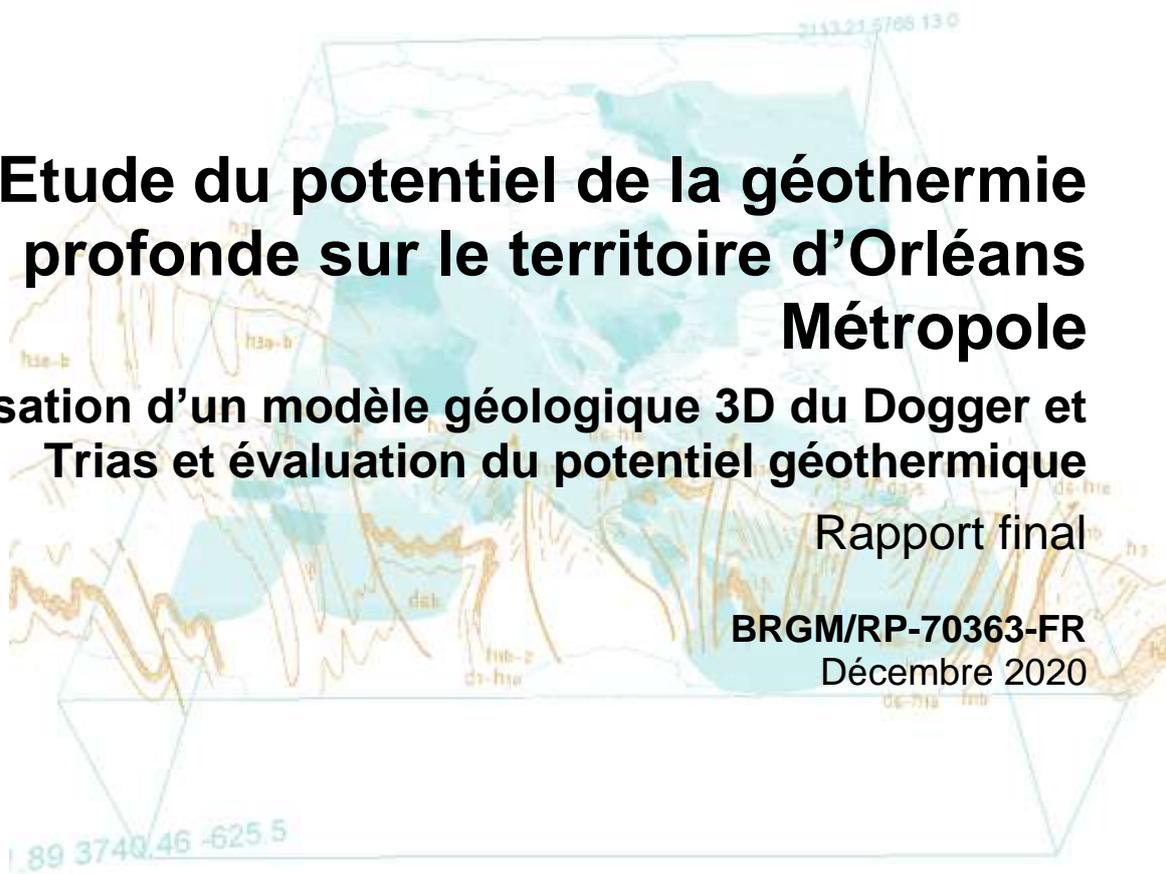


# Etude du potentiel de la géothermie profonde sur le territoire d'Orléans Métropole

Volet 2 : réalisation d'un modèle géologique 3D du Dogger et  
Trias et évaluation du potentiel géothermique

Rapport final

BRGM/RP-70363-FR  
Décembre 2020





# Etude du potentiel de la géothermie profonde sur le territoire d'Orléans Métropole

## Volet 2 : réalisation d'un modèle géologique 3D du Dogger et Trias et évaluation du potentiel géothermique Rapport final

**BRGM/RP-70363-FR**  
Décembre 2020

Étude réalisée dans le cadre du Marché de recherche et développement de la  
géothermie sur le Territoire d'Orléans Métropole  
Marché N° 183486

**Capar L., Hamm V., et Mas P. (stagiaire)**  
Avec la collaboration de  
**Calcagno P., Carigt S.**

**Vérificateur :**

Nom : Sanjuan Bernard  
Fonction : Expert en géothermie  
Direction des Géoressources  
Date : 16/12/2020  
Signature :



**Approbateur :**

Nom : Saada Alain  
Fonction : Directeur régional  
Date :  
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : modèle géologique 3D, Dogger, Trias, sismique réflexion, forages, faille de Sennely, potentiel géothermique, Orléans Métropole.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Capar L., Hamm V., et Mas P. (stagiaire) avec la collaboration de Calcagno P., Carigt S. (2020)** – Étude du potentiel de la géothermie profonde sur le territoire d'Orléans Métropole - Volet 2 : réalisation d'un modèle géologique 3D du Dogger et Trias et évaluation du potentiel géothermique. Rapport final. BRGM/RP-70363-FR, 48 p., 15 fig., 3 tabl., 2 ann.

## Synthèse

La géothermie de basse énergie (aquifères du Trias ou du Dogger) représente une ressource potentielle sur le territoire de la Métropole. Ainsi, le présent rapport constitue le second volet de l'étude du potentiel de la géothermie de basse énergie sur le territoire d'Orléans Métropole, dans le cadre du marché de recherche et développement, entre le BRGM et Orléans Métropole, qui a été notifié le 4 décembre 2018.

Ce volet a pour objectif de préciser, à l'échelle de la métropole, la géométrie et le potentiel géothermique des réservoirs des calcaires du Dogger et grès du Trias présents sur l'ensemble du Bassin de Paris.

Le travail a consisté, dans une première étape, à réinterpréter un certain nombre de données sismiques et de puits présents sur la métropole, afin d'affiner la structure de ces réservoirs entrecoupés, notamment par la faille de Sennely, au nord-est d'Orléans métropole. Un modèle géologique 3D, à l'échelle d'Orléans Métropole, a ensuite été réalisé, dans une seconde étape, avec le logiciel GéoModeller, à partir de l'intégration des données de la carte géologique au 1/ 50 000, du schéma structural, des données de forages, de l'interprétation des lignes sismiques et du modèle existant du SIGES, à l'échelle de la région, afin de mieux contraindre le modèle dans les zones où peu de données sont disponibles.

Il est à noter que ce travail de modélisation 3D a été réalisé dans le cadre du projet « Orléans Métropole », cofinancé par Orléans Métropole, en y intégrant également certains résultats et traitements de données issus du projet APR IR 2018 « GEOCO2 », cofinancé par la Région Centre-Val de Loire.

Le modèle géologique a permis de réaliser un modèle thermique du Dogger et du Trias, à l'échelle d'Orléans Métropole, en calibrant ce dernier sur les données de températures des forages présents dans la zone. L'évaluation du potentiel est, ensuite, réalisée sur la base du calcul de l'énergie potentielle extractible ou chaleur en place. Ces calculs ont contribué à mettre en valeur certaines zones plus propices au développement de la géothermie profonde, et notamment, au nord d'Orléans métropole, pour le Dogger, et au sud sud-est d'Orléans métropole, pour le Trias, et coïncidant avec des zones où les épaisseurs et températures des réservoirs sont plus favorables.

Cette étude constitue la première étape dans l'évaluation des ressources géothermales profondes. Afin d'augmenter les chances de succès d'un projet de géothermie profonde, dans des secteurs encore non ou peu exploités pour la géothermie, comme la région Centre Val-de-Loire et Orléans Métropole, une phase exploratoire en amont du forage d'exploitation devrait être envisagée. Cette phase exploratoire peut consister à réaliser localement de nouvelles acquisitions sismiques, afin d'accéder à une meilleure caractérisation du réservoir cible, et notamment, acquérir de l'information indirecte sur les propriétés des réservoirs, comme les épaisseurs utiles et leur connectivité, dans le cas de techniques plus poussées, comme la sismique 2D haute résolution ou 3D. Ces données croisées aux données de puits du secteur permettent de définir les meilleures zones d'implantation de forages. Ces forages peuvent être des forages exploratoires de plus petit diamètre, afin de réaliser des premiers tests hydrogéologiques pour confirmer la capacité du réservoir cible à produire ou à réinjecter, ou des forages d'exploitation de plus grand diamètre, mais avec des architectures adaptées.



## Sommaire

<b>1. Le contexte géologique et structural .....</b>	<b>9</b>
1.1. LE CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	11
1.2. LE CONTEXTE STRUCTURAL .....	12
<b>2. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Le modèle géologique 3D .....</b>	<b>15</b>
3.1. LES DONNEES .....	15
3.1.1. La carte géologique et le schéma structural .....	15
3.1.2. Les données de forage .....	15
3.1.3. Les données de sismique réflexion et l'interprétation sismique .....	16
3.1.4. Le modèle SIGES et les travaux antérieurs .....	19
3.2. LES OUTILS ET METHODES POUR LA REALISATION DU MODELE GEOLOGIQUE 3D .....	19
3.2.1. Les formations géologiques modélisées .....	19
3.2.2. La faille de Sennely.....	21
3.3. REALISATION DU MODELE GEOLOGIQUE 3D.....	23
3.4. CONCLUSIONS SUR L'INTERPRETATION SISMIQUE ET LE MODELE GEOLOGIQUE 3D .....	24
<b>4. Le potentiel géothermique du Dogger et du Trias sur le territoire d'Orléans     Métropole .....</b>	<b>27</b>
4.1. LES DONNEES .....	27
4.1.1. Les données de température .....	27
4.1.2. Les données hydrogéologique et thermiques.....	28
4.2. LES RESULTATS .....	29
<b>5. Conclusions.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>39</b>

### Liste des figures

Figure 1 – Coupe Sud-Ouest Nord-Est du Bassin de Paris représentant les principaux aquifères (source : BRGM) .....	12
---	----

Figure 2 – Carte des failles majeures du bassin de Paris (source : Guillocheau et al., 2000, modifiée). .....	13
Figure 3 – Carte de la zone d'étude et des données disponibles. La carte géologique est la carte départementale du Loiret au 1/50 000, BRGM .....	16
Figure 4 – Ligne sismique retraitée sans interprétation. ....	17
Figure 5 – Ligne sismique retraitée avec interprétation. ....	18
Figure 6 – Correspondance entre horizons sismiques et horizons géologiques dans un forage. ....	19
Figure 7 - Comparaison des piles géologiques du SIGES Centre-Val de Loire et du modèle géologique réalisé pour le projet Orléans Métropole. La pile géologique du modèle 3D a été simplifiée et certaines formations ont été regroupées en séries.....	20
Figure 8 - Carte présentant les mesures associées à la géométrie de la faille de Sennely (représentée en noir). ....	21
Figure 9 - Lignes sismiques présentant des flexures (dans les cercles noirs) à côté de la faille de Sennely (pointée en bleu foncé). ....	22
Figure 10 - Carte du pointé de l'horizon correspondant au toit du Trias avec la faille de Sennely (en noir) et l'emprise du géomodèle (en violet). ....	23
Figure 11 - Modèle géologique 3D obtenu, puits utilisés pour sa construction et carte d'Orléans Métropole en surface.....	24
Figure 12 - Cartes de températures au toit des Calcaires du Dogger (a) et des Grès du Trias (b) avec les isohypses (courbes noires) sur le territoire d'Orléans Métropole (contour rouge). ....	30
Figure 13 - Cartes de potentiel géothermique obtenues selon les différents cas de figure concernant la température de réinjection. ....	32
Figure 14 – Localisation des réseaux de chaleur existants, des secteurs d'intérêts de forte densité énergétique (La Chapelle St-Mesmin et Saint-Jean de Braye) et carte du potentiel géothermique maximal du Dogger (sur la base d'une température de réinjection de 25°C) .....	34
Figure 15 - Localisation des réseaux de chaleur existants, des secteurs d'intérêts de forte densité énergétique (La Chapelle St-Mesmin et Saint-Jean de Braye) et carte du potentiel géothermique maximal du Trias (sur la base d'une température de réinjection de 25°C) .....	35

## Liste des tableaux

Tableau 1. Données de températures BHT et DST des puits .....	28
Tableau 2. Paramètres thermiques et hydrogéologiques utilisés pour la simulation thermique .....	28
Tableau 3. Comparaison entre les températures simulées et les points de contrôle constitués des données DST disponibles et d'une température estimée à partir du gradient géothermique régional .....	29

## Liste des annexes

Annexe 1	Cartes des épaisseurs et température moyenne du Dogger issues du modèle géologique 3D et du modèle thermique.....	41
Annexe 2	Cartes des épaisseurs et température moyenne du Trias issues du modèle géologique 3D et du modèle thermique.....	45



# 1. Introduction

Afin de répondre au Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), à la planification Horizon 2030-2050 et au Schéma Directeur Réseau de Chaleur, qui prévoit 65 000 logements supplémentaires à raccorder aux réseaux de chaleur, Orléans Métropole souhaite faire émerger des projets de géothermie sur son territoire. En décembre 2018, Orléans Métropole et le BRGM ont conclu un marché de recherche et développement intitulé « Contribution du BRGM au développement de la géothermie sur le Territoire d'Orléans Métropole ». Cette mission concerne à la fois la géothermie de très basse énergie (aussi appelée géothermie de minime importance, GMI) et la géothermie de basse énergie (ou géothermie profonde).

Le projet « Contribution au développement de la géothermie sur le Territoire d'Orléans Métropole » s'articule autour de trois objectifs principaux :

- 1) Développer un Atlas du potentiel géothermique très basse énergie (ressource, besoins énergétiques, usages, contraintes techniques et réglementaires), à l'échelle du Territoire d'Orléans Métropole ;
- 2) Formaliser une synthèse des connaissances sur le potentiel de la ressource en géothermie basse température (forages profonds) en lien avec les réseaux de chaleur sur le territoire d'Orléans Métropole ;
- 3) Engager des actions d'information / formation pour faire monter en compétence le territoire sur la géothermie.

Des retours d'expérience sont aussi requis concernant des opérations de géothermie de très basse énergie et de basse énergie ayant eu lieu sur le territoire d'Orléans Métropole ou de ses alentours.

Ce rapport s'inscrit dans le deuxième objectif de la mission, qui concerne la géothermie de basse énergie, et plus particulièrement dans la sous-tâche définie comme « Etat des connaissances sur les ressources géothermiques au Dogger et au Trias sur le territoire d'Orléans Métropole avec réalisation d'un modèle géologique 3D ». Cette synthèse de connaissances prévoit :

- une évaluation des ressources profondes (Dogger et Trias) portant notamment sur les caractéristiques de la ressource ;
- la réalisation d'un modèle géologique 3D du Dogger et du Trias à l'échelle d'Orléans Métropole intégrant l'ensemble des connaissances disponibles ;
- l'identification des implantations potentielles de forages au regard du plan de développement du réseau de chaleur et des besoins.

Un premier rapport (volet 1 de l'étude) sur l'état des connaissances des ressources du Dogger et du Trias a été rédigé en fin 2019 (Bugarel et al., 2019). Il porte sur le modèle de développement de la géothermie de basse énergie dans le Bassin parisien exploitant majoritairement l'aquifère du Dogger, mais aussi sur des opérations plus anciennes (datant du début des années 1980) visant le Trias. Un retour d'expérience complet et précis a été effectué sur l'opération de Melleray, située à l'est d'Orléans, et qui a été prématurément arrêtée dans les années 1980, pour cause de problèmes de réinjection.

Il existe des régions où la géothermie est bien implantée et participe en grande partie à l'alimentation des réseaux de chaleur. C'est le cas de l'Île-de-France qui compte 45 des 70 installations de géothermie profonde dédiées au chauffage urbain (SER, 2018). Ces installations exploitent majoritairement les calcaires du Dogger qui sont présents dans tout le Bassin parisien. Les installations sont densément implantées dans le Val de Marne (94) et cela a pour

conséquence que l'aquifère des calcaires du Dogger arrive à sa limite d'exploitation. En effet, chaque puits de réinjection produisant une bulle froide, le risque de percée thermique devient très élevé, si les installations sont proches les unes des autres. Il faudrait donc se tourner vers d'autres aquifères, comme les sables de l'Albien et du Néocomien, qui sont exploités localement, ou les grès du Trias, actuellement encore peu exploités (une seule opération en fonctionnement à Châteauroux).

Dans le cas de la région Île-de-France, comme dans celui des régions où la géothermie est moins développée, le principal frein à la prospection de nouvelles ressources géothermiques est le risque géologique, c'est-à-dire le risque qu'une installation géothermique atteigne une ressource dont les caractéristiques en termes de débit et de température ne soient pas suffisantes pour qu'elle soit rentable. Les coûts d'investissement étant élevés, il s'agit de la principale appréhension de la part des investisseurs.

Afin de réduire les risques, un des pré-requis est une meilleure connaissance du sous-sol. Cela nécessite l'élaboration d'un modèle géologique 3D le plus précis possible, en fonction des données disponibles, ainsi que des simulations hydrodynamiques et thermiques les plus fiables possibles pour prédire l'évolution thermique des aquifères.

L'objet de ce travail, qui constitue le second volet sur la géothermie profonde, est la réalisation d'un modèle géologique 3D du Dogger et du Trias, à l'échelle d'Orléans Métropole, permettant de préciser l'état des connaissances sur la géométrie du Dogger et du Trias et de réaliser une première évaluation de leurs potentiels géothermiques. Les cartes de potentiel géothermique du Dogger et du Trias ont, ensuite, été croisées avec les projets de développement des réseaux de chaleur afin d'en déduire des zones d'implantation potentielles de forages en géothermie profonde pour alimenter des réseaux de chaleur par géothermie. Toutefois, comme évoqué dans le volet 1 sur les préconisations du développement de la géothermie profonde, un premier forage exploratoire ou des techniques d'exploration complémentaires seront nécessaires, afin de confirmer/préciser les propriétés du réservoir (épaisseur utile, porosité, perméabilité) et la connectivité du/des réservoir(s) et les débits réellement exploitables, ce que ne permet pas de prédire le modèle géologique actuel.

Ce rapport décrit, dans un premier temps (chapitre 2), le contexte géologique et structural du territoire d'Orléans Métropole par rapport au Dogger et au Trias. La réalisation du modèle géologique 3D, les données disponibles, les outils et méthodes sont expliqués dans le chapitre 3. Le dernier chapitre évalue le potentiel géothermique sur le territoire d'Orléans Métropole.

## 2. Le contexte géologique et structural

### 2.1. Le contexte géologique

Les réservoirs ciblés sont les calcaires du Dogger et les grès du Trias (Figure 1). Dans la région d'Orléans, le Trias a une épaisseur comprise entre 50 et 200 m. Il repose en discordance sur le socle et est constitué, à sa base, de dépôts de cônes alluviaux. Ces conglomérats passent ensuite progressivement à des grès. Il s'agit des grès du Keuper (Trias moyen à supérieur) et ils peuvent être décomposés en deux corps fluviatiles, individualisés par un intervalle plus argileux : le corps fluviatile inférieur est nommé grès de Donnemarie, tandis que le corps supérieur est appelé grès de Chaunoy. Les grès de Donnemarie sont des dépôts grésos-conglomératiques de type cône alluvial proximal à médian, alors que les grès de Chaunoy présentent une granulométrie moins grossière, caractéristique de dépôts de cônes alluviaux et de rivière en tresses. Les grès du Keuper sont le réservoir cible préférentiel au sein du Trias.

Le sommet du Trias est, quant à lui, généralement constitué de marnes et de dolomies, qui se poursuivent jusqu'au Lias, où l'on peut trouver une alternance d'argiles ou marnes, avec des calcaires argileux et souvent dolomitiques. Le Lias constitue donc l'éponte supérieure du Trias et le Toarcien (Lias supérieur) marque un maximum d'inondation, avec des marnes profondes.

Tandis que le Trias est constitué de grès, le Dogger (et plus largement le Jurassique) enregistre, quant à lui, des dépôts de système carbonaté. L'Aalénien est formé principalement de marnes grises comprenant des éléments bioclastiques, avec potentiellement quelques intercalations de calcaires marneux. La proportion s'inverse au Bajocien puisqu'on retrouve principalement des calcaires marneux, avec quelques passées plus marneuses pouvant contenir des *Ostrea acuminata*. Le Bathonien, principal niveau productif d'environ 150 m d'épaisseur, est constitué presque exclusivement de calcaires oolithiques graveleux et bioclastiques. Ils sont de couleur claire, ce qui leur vaut le nom d'«oolithe blanche». Les dépôts sus-jacents ont une texture plus fine ; il s'agit de marnes et de calcaires oolithiques et bioclastiques ou bien juste des marnes callovo-oxfordiennes. Dans ces dernières, il est possible de retrouver un niveau repère, caractérisé par des oolithes ferrugineuses, un peu partout dans le Bassin parisien.

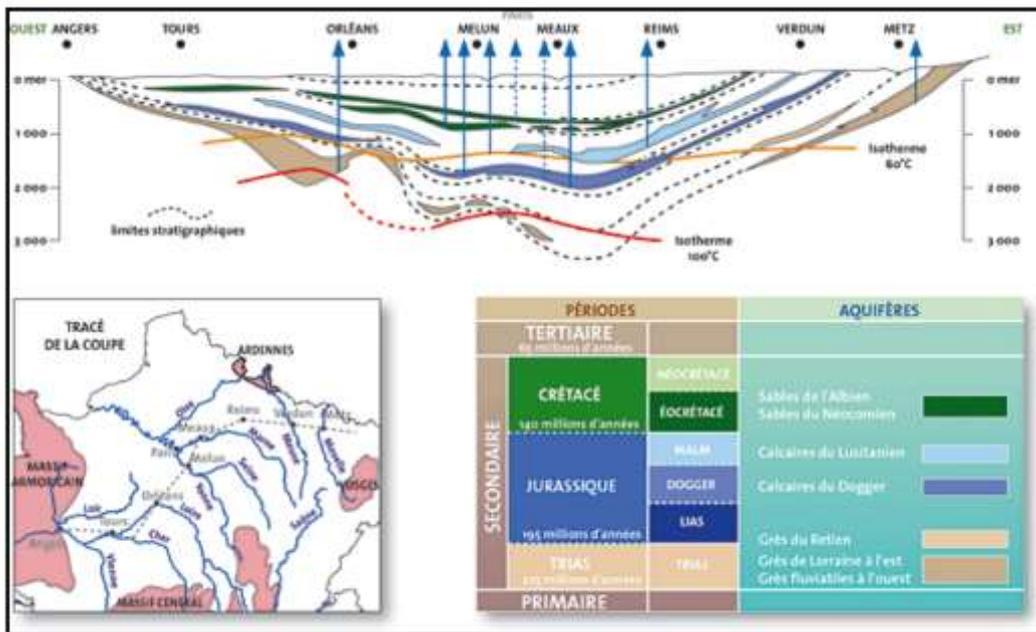


Figure 1 - Coupe Sud-Ouest Nord-Est du Bassin de Paris représentant les principaux aquifères (source : BRGM).

## 2.2. Le contexte structural

En ce qui concerne l'aspect structural, l'ouest du Bassin parisien est marqué par d'anciens accidents d'axe Nord-Sud, qui le séparent du bloc Armoricaïn. Ces failles, d'abord décrochantes, sont formées à la fin du Carbonifère, mais elles rejouent en failles normales, durant le Permien, lors de l'effondrement de la chaîne hercynienne : c'est notamment le cas des failles de la Seine, de Rambouillet, d'Etampes. Celles-ci sont agencées en relai et forment une sorte de « Y », avec la faille de Sennely à laquelle elles se raccordent au sud-est d'Orléans (Figure 2).

La faille de Sennely est d'un intérêt majeur pour la réalisation du modèle géologique 3D car elle traverse le territoire d'Orléans Métropole. D'après la littérature (Héritier et Villemin, 1971), il s'agirait plutôt d'un « réseau de failles en relai, de direction sensiblement méridienne, qui s'infléchissent vers le Nord-Ouest, à partir de Rambouillet », avec un pendage incliné vers l'ouest (voir sud-ouest pour l'extrémité nord de la faille). On peut aussi trouver dans la littérature que les rejets, quoiqu'ils puissent atteindre 500 m, sont beaucoup plus faibles dans la partie nord de la faille (inférieurs à 50 m) (Lenoir, 2012).

Enfin, bien que la faille de Sennely ait déjà été étudiée, sa partie nord, traversant la zone d'étude, reste encore peu documentée.

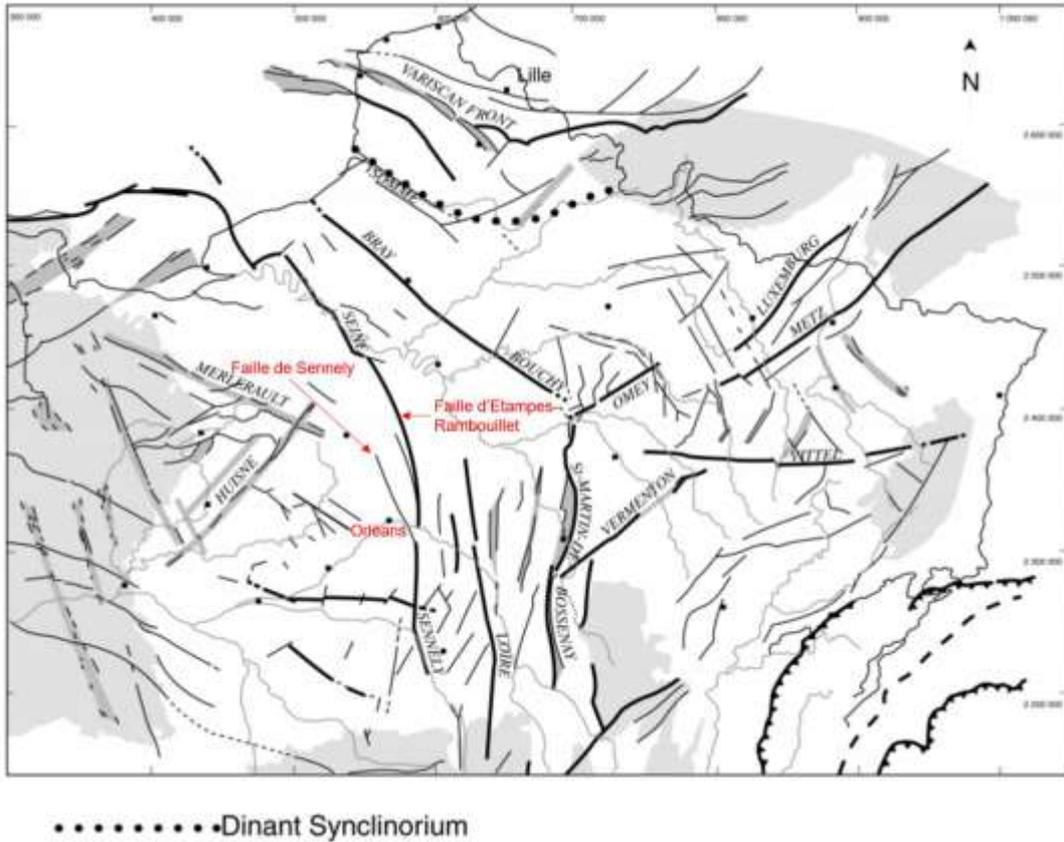


Figure 2 - Carte des failles majeures du Bassin de Paris (source : Guillocheau et al., 2000, modifiée).



## 3. Le modèle géologique 3D

L'emprise de modèle géologique 3D est centrée sur le territoire d'Orléans Métropole et prend en compte un ensemble de données disponibles sur la zone d'étude. Son extension Nord-Sud est de 35 km et celle Est-Ouest de 40 km (Figure 3). La faille d'Etampes-Rambouillet située à l'est du territoire d'Orléans Métropole et ayant un pendage vers l'est (Mégnyen, 1980) n'a pas été incluse dans l'emprise du modèle.

### 3.1. Les données

Sur le territoire d'Orléans Métropole, il existe 5 types de données disponibles qui ont servi pour la réalisation du modèle géologique 3D :

- la carte géologique au 1/50 000 ;
- le schéma structural ;
- des données de forage ;
- des données de sismique réflexion 2D ;
- le modèle SIGES et les travaux antérieurs.

#### 3.1.1. La carte géologique et le schéma structural

La carte géologique au 1/50 000 a été réalisée par le BRGM (Figure 3) et le schéma structural (Figure 2) est issu de la littérature (Guillocheau et al., 2000).

#### 3.1.2. Les données de forage

Les données de forage, donnent des informations directes, en un point donné, sur les couches géologiques, ainsi que sur leur épaisseur et leur profondeur. Sur la zone d'emprise du modèle, il existe 5 puits, dont 3 réalisés lors de l'exploration pétrolière et 2 puits géothermiques (Figure 3):

- **puits Rebréchien 1 (RBH1)** : puits d'exploration pétrolière réalisé en 1964 par la Compagnie d'Exploration Pétrolière, atteignant le socle granitique à 1518 m de profondeur ;
- **puits de Marcilly-en-Villette 1 (MV1)** : forage d'exploration pétrolière réalisé en 1959 par la FROPEX et qui atteint le Portlandien, à 585 m de profondeur ;
- **puits Saint-Sigismond 1 (SSG1)** : forage d'exploration pétrolière réalisé en 1963 par la SAFREP et qui atteint le socle antétriasique, à 1300 m ;
- **puits Melleray 1 (GMY1)** : forage géothermique réalisé par le BRGM en 1979 et puits de production du doublet géothermique de Melleray. Ce doublet avait pour but de capter les eaux chaudes du Trias afin de chauffer 17 ha de serres maraîchères et horticoles (Lopez et al., 2008). Mais ce projet a été abandonné, après un an de fonctionnement, à cause d'une productivité peu satisfaisante suivie de l'endommagement du puits injecteur ;
- **puits Melleray 2 (GMY2)** : forage géothermique réalisé par le BRGM en 1980, puits de réinjection du doublet géothermique de Melleray, dévié vers le nord-ouest, à partir de 890 m de profondeur.

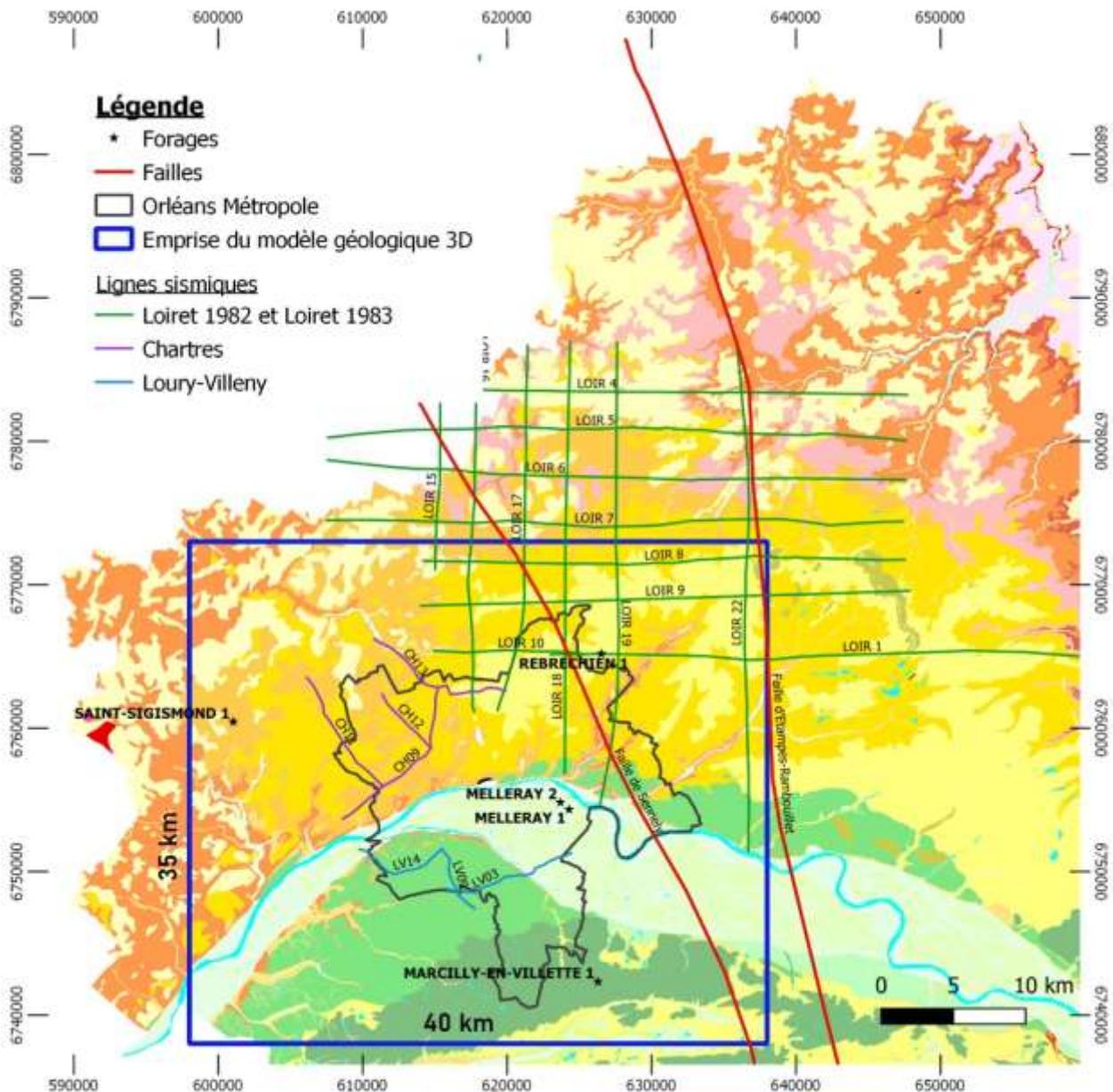


Figure 3 - Carte de la zone d'étude et des données disponibles. La carte géologique est la carte départementale du Loiret au 1/50 000, BRGM.

### 3.1.3. Les données de sismique réflexion et l'interprétation sismique

#### a) Les données de sismique réflexion

La sismique réflexion est une méthode d'investigation indirecte, qui permet d'obtenir une image du sous-sol afin de cartographier la géométrie et la disposition des structures géologiques sous la surface. Sur le territoire d'Orléans Métropole, quatre campagnes d'acquisitions de sismique réflexion ont été réalisées en 1963, 1964, 1982 et 1983. Cependant, les données de sismique réflexion nécessitent un traitement spécifique pour obtenir une image du sous-sol (Capar et Marc, 2020), nommée « ligne sismique retraitée ».

Les quatre campagnes d'acquisitions de sismique réflexion 2D disponibles sur le territoire d'Orléans Métropole sont (Figure 3) :

- LOIRET 1982 et LOIRET 1983 : ces deux campagnes d'acquisition sismique se situent au nord-est d'Orléans Métropole, et ont été acquises par ESSO, dans le cadre de recherches pétrolières. Treize lignes sismiques de ces 2 campagnes d'acquisition sismique ont été retraitées lors du projet CPER Artenay (Chapuis et al., 2008) (LOIR1, LOIR4, LOIR5, LOIR6, LOIR7, LOIR8, LOIR9, LOIR10, LOIR15, LOIR16, LOIR17, LOIR18 et LOIR19) et une ligne, LOIR22, a été retraitée lors du projet Non-Exclusive du Bassin de Paris (Beccaletto, 2007) ;
- CHARTRES 1963 : cette campagne d'acquisition sismique, effectuée par la Compagnie d'Exploration Pétrolière (CEP), est située pour partie dans le nord-ouest d'Orléans Métropole. Quatre lignes sismiques ont été sélectionnées (CH09, CH11, CH12 et CH13) et retraitée dans ce projet ;
- LOURY-VILLENY 1964 : cette campagne d'acquisition sismique, menée par EURAFREP se situe, pour partie, dans le sud d'Orléans Métropole. Trois portions de lignes sismiques (LV003 partie Est, LV009 partie Nord et LV014 partie Est) ont été retraitées dans ce projet.

### **b) L'interprétation sismique**

Les lignes sismiques retraitées fournissent une image du sous-sol (Figure 4). Les images du sous-sol ainsi obtenues doivent faire l'objet d'une interprétation sismique (Figure 5) afin d'être utilisée dans le logiciel de modélisation géologique.

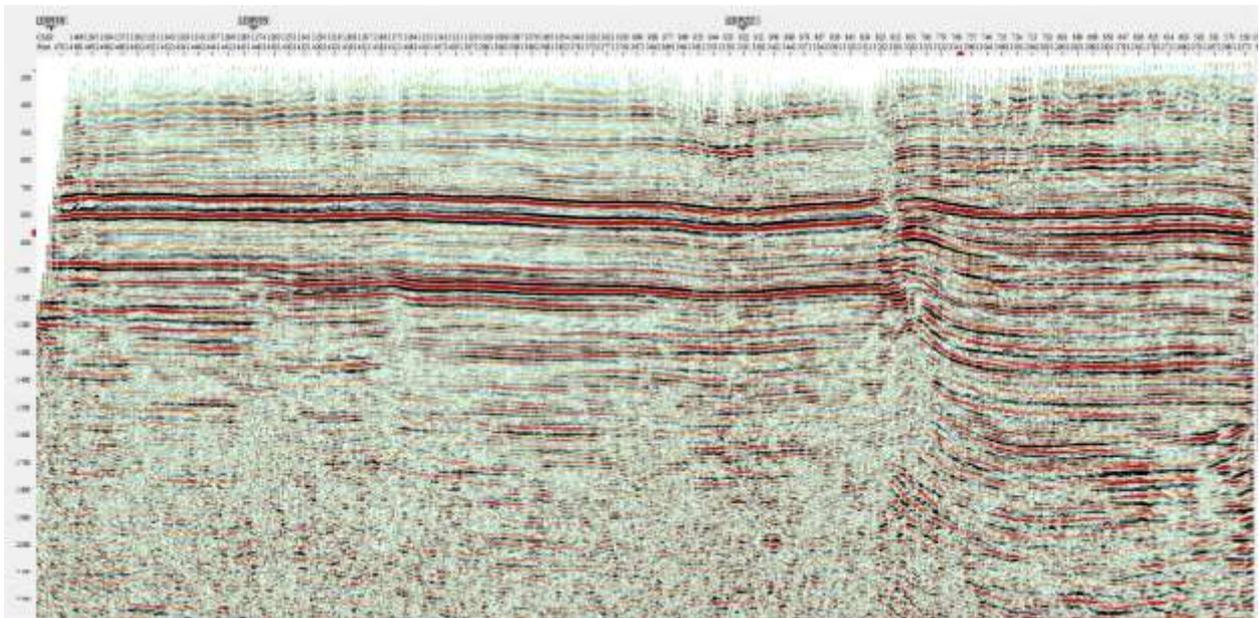


Figure 4 - Ligne sismique retraitée sans interprétation.

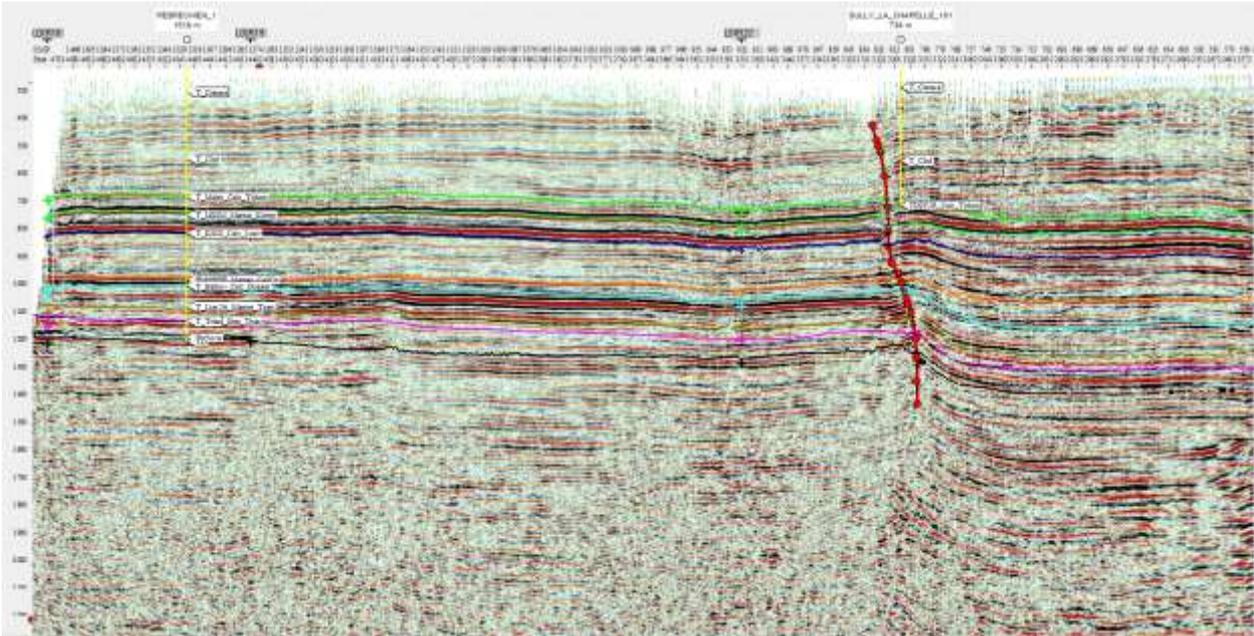


Figure 5 - Ligne sismique retraitée avec interprétation.

L'interprétation sismique consiste à mettre en évidence et suivre des réflexions sismiques (ou horizons sismiques), qui sont l'image sismique d'horizons géologiques (toit et base des réservoirs géothermiques, par exemple) ou de structures géologiques, comme les failles. Pour cela, les profondeurs des formations géologiques acquises lors des forages permettent, dans les logiciels d'interprétation sismique, de faire correspondre un horizon sismique à un horizon géologique (Figure 6). L'horizon sismique est identifié et il est pointé et suivi latéralement sur l'image sismique (Figure 5). L'ensemble des pointés des horizons géologiques est ensuite importé dans le logiciel de modélisation géologique 3D.

Le pointé des horizons sismiques comprend une part d'interprétation de la part de l'utilisateur, ce qui est une source d'incertitude. Le pointé des horizons permet de tirer des conclusions sur la présence de structures particulières et de leur géométrie.

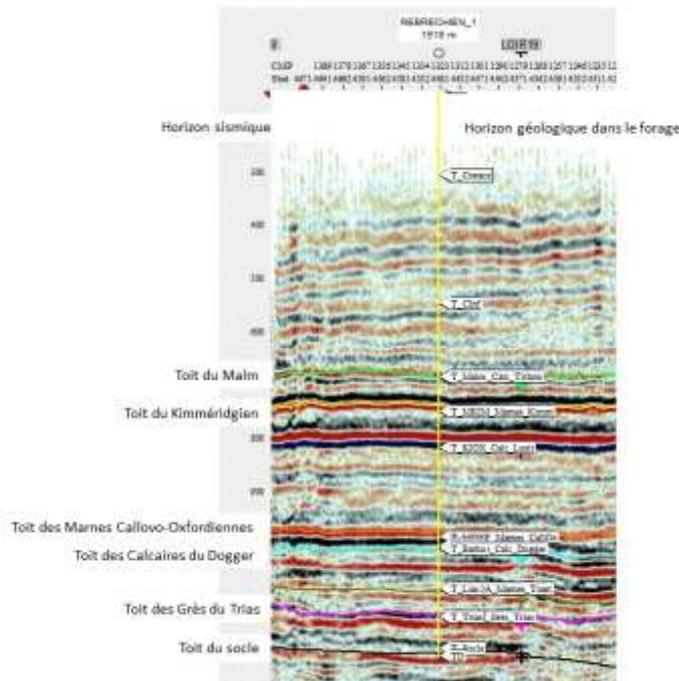


Figure 6 - Correspondance entre horizons sismiques et horizons géologiques dans un forage.

### 3.1.4. Le modèle SIGES et les travaux antérieurs

On dispose aussi d'autres éléments, issus de précédents projets ou travaux de recherche menés au BRGM : des cartes comprenant des tracés de la faille de Sennely (Beccaletto et al., 2008) et un géomodèle 3D provenant du SIGES Centre-Val de Loire (Salquèbre et al., 2019). Celui-ci a été construit en 2012 (et modifié en 2019), à l'échelle de la région, avec un maillage de 500 m, et il est constitué de surfaces visualisables en 3D correspondant aux toits des principaux aquifères. Il a été réalisé à partir d'une interpolation de données de 12 941 puits répartis sur toute la région Centre-Val de Loire.

## 3.2. Les outils et méthodes pour la réalisation du modèle géologique 3D

Le modèle géologique 3D, à l'échelle d'Orléans Métropole, a été réalisé avec le logiciel GeoModeller, créé par le BRGM et développé et commercialisé en association avec Intrepid Geophysics. Il a été conçu pour l'interprétation et la modélisation en trois dimensions basées sur une intégration de différents types de données, issues d'observations de terrain, de mesures géophysiques ou de précédents modèles.

Le modèle géologique 3D réalisé pour le projet Orléans Métropole résulte de l'intégration des données de la carte géologique au 1/ 50 000, du schéma structural, des données de forages, de l'interprétation sismique et du modèle SIGES.

### 3.2.1. Les formations géologiques modélisées

La réalisation du modèle s'appuie sur des règles géologiques. Elles sont contenues dans une pile géologique (Figure 7), qui permet de gérer automatiquement les relations entre les objets (formations géologiques, failles, etc. ; Calcagno et al., 2008). Des données peuvent être associées aux formations ou failles contenues dans cette pile pour contraindre leur géométrie.

La modélisation de ces objets géologiques résulte de l'interpolation de ces données d'entrée (Guillen et al., 2008).

Le modèle géologique 3D sur Orléans Métropole est construit pour une application en géothermie prenant en compte des considérations hydrodynamiques. Il a été choisi de se référer au découpage des formations du SIGES Centre Val de Loire, qui distingue les aquifères (grès, calcaires, sables, craie) et aquitards (marnes, recouvrement Plio-Quaternaire, alluvions) (Figure 7). Cependant, toutes les formations modélisées par le SIGES ne sont pas utiles, notamment celles d'âge Crétacé ou plus récentes, ou celles des formations des calcaires du Lusitanien (KIOX), des marnes du Kimméridgien (MKIM) et des calcaires du Tithonien. Elles ont été regroupées dans une seule formation « Couverture\_indifférenciée ». De même, les calcaires du Lias, assez marneux, ont été rassemblés avec les marnes du Lias-Trias et les marnes du Toarcien pour former la série « Lias », globalement marneuse, et jouant le rôle d'éponte supérieure du réservoir du Trias.

La pile géologique du modèle 3D sur le territoire d'Orléans Métropole comprend les formations suivantes (Figure 7) :

- la couverture indifférenciée ;
- les marnes Callovo-Oxfordiennes : jouant le rôle d'éponte supérieure du réservoir géothermique cible du Dogger ;
- les calcaires du Dogger : réservoir géothermique cible ;
- la série « Lias » : jouant le rôle d'éponte supérieure du réservoir géothermique cible du Trias ;
- les grès du Trias : réservoir géothermique cible ;
- le socle anté-triasique.

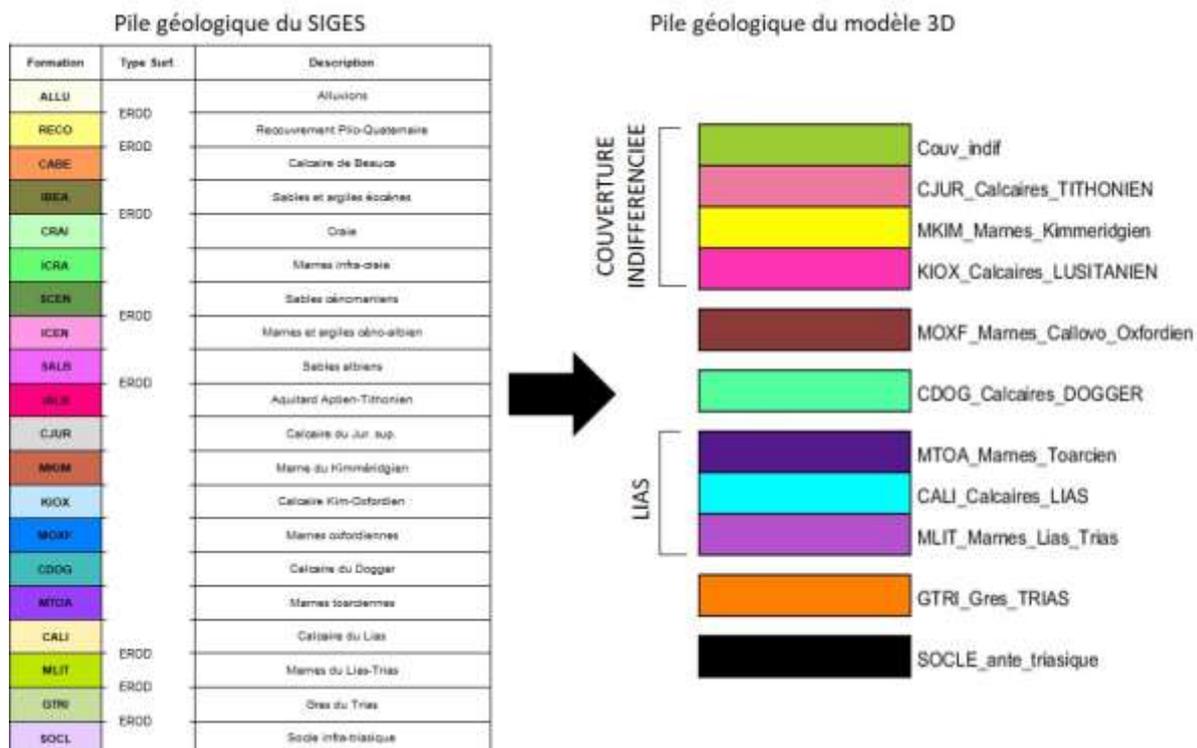


Figure 7 - Comparaison des piles géologiques du SIGES Centre-Val de Loire et du modèle géologique réalisé pour le projet Orléans Métropole. La pile géologique du modèle 3D a été simplifiée et certaines formations ont été regroupées en séries.

L'ensemble des toits de ces six formations géologiques a été modélisé.

### 3.2.2. La faille de Sennely

La région nord-est du territoire d'Orléans Métropole comprend la faille de Sennely. L'interprétation des lignes sismiques retraitées des campagnes d'acquisitions LOIRET 1982 et LOIRET 1983 permet d'étudier la géométrie et l'évolution de la faille de Sennely. Celle-ci n'est pas visible sur toutes les lignes et peut parfois s'exprimer sous la forme d'une flexure, plutôt que d'une faille (Figure 9). Il convient alors de noter, dans ce cas, que le fait de pointer la flexure ne relève plus de l'observation, mais d'une interprétation comprenant des incertitudes. La faille affecte plus ou moins les dépôts sédimentaires selon les lignes sismiques, avec des rejets et des pendages différents. Les rejets de la faille semblent augmenter en allant vers le sud-est et être plus importants en profondeur, qu'à la surface.

Les calculs de l'épaisseur des dépôts sédimentaires affectés, du rejet maximal et du pendage de la faille, pour chaque ligne sismique, sont illustrés sur la Figure 9. La faille, en noir sur la Figure 8, présente une géométrie particulière entre les lignes sismiques LOIR7 et LOIR16 avec, dans cette zone, des rejets et des épaisseurs des dépôts sédimentaires affectés par la faille très faibles. Sur ces deux lignes sismiques, des flexures sont visible, à côté du pointé de la faille : à l'est du pointé, sur la ligne LOIR7, et au sud du pointé, sur la ligne LOIR16 (Figure 9). Ces observations laissent supposer l'existence d'un relai à cet endroit. La flexure repérée sur la ligne sismique LOIR7 serait alors l'extrémité du segment de faille pointé sur la ligne sismique LOIR16 et inversement. Les dépôts sédimentaires affectés par les flexures sont des dépôts plus profonds, correspondant au Trias ou au socle. Cela signifie que les segments de la faille de Sennely seraient ellipsoïdaux et se prolongeraient plus en profondeur, que proches de la surface.

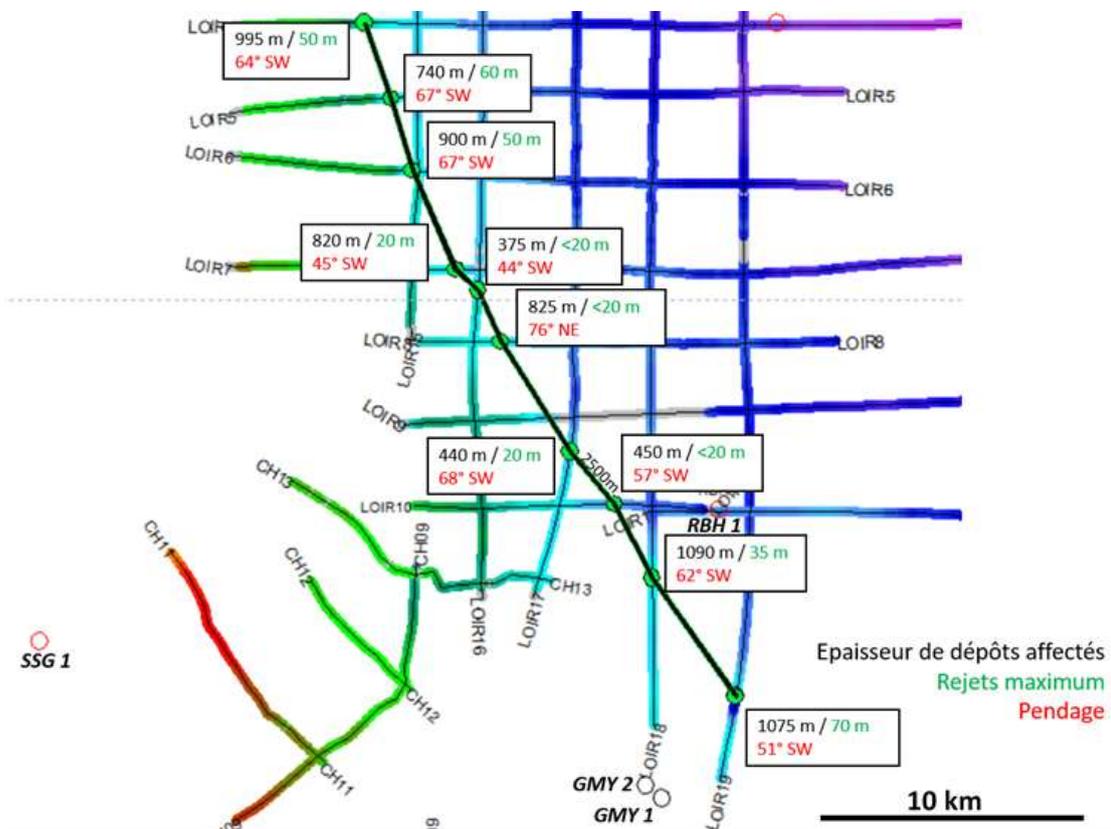


Figure 8 - Carte présentant les mesures associées à la géométrie de la faille de Sennely (représentée en noir).

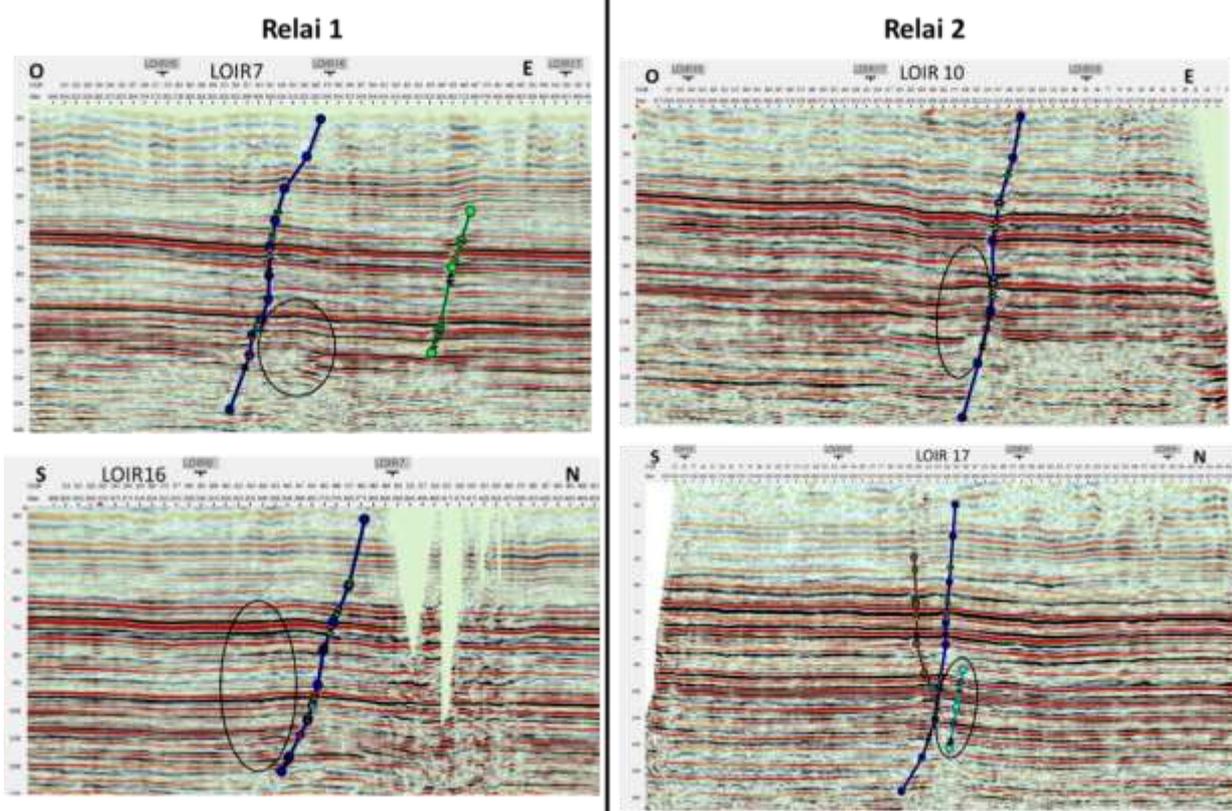


Figure 9 - Lignes sismiques présentant des flexures (dans les cercles noirs) à côté de la faille de Sennely (pointée en bleu foncé).

Sur les lignes sismique LOIR17 et LOIR10 sont observées des flexures, à l'ouest de la faille de Sennely, sur la ligne sismique LOIR10, et au nord de la faille de Sennely, sur la ligne sismique LOIR17 (Figure 9).

La segmentation de la faille de Sennely, prenant en considération ces deux relais, est illustrée sur la Figure 10.



Figure 10 - Carte du pointé de l'horizon correspondant au toit du Trias avec la faille de Sennely (en noir) et l'emprise du géomodèle (en violet).

Les trois segments de la faille ont la même direction, ce qui soutient cette hypothèse de segmentation car les relais d'une faille, issus de la même contrainte, sont généralement orientés vers la même direction.

En plus de la faille de Sennely, il existe d'autres failles synthétiques ou antithétiques, visibles notamment sur les lignes LOIR17 et LOIR10. Par exemple, une faille synthétique est observée sur la ligne sismique LOIR17 (pointée en noir), au sud de la faille de Sennely, (Figure 9). Cependant, il doit s'agir de failles ou de fractures très locales car elles n'apparaissent pas sur les autres lignes les plus proches.

Des informations de pendage provenant de mesures effectuées dans le logiciel d'interprétation sismique ont été intégrées dans le logiciel de modélisation. Enfin, pour mieux contraindre la géométrie du segment de la faille de Sennely au sud-est du modèle, des points de passage ont été ajoutés, d'après un tracé de la faille issu de la littérature (Beccaletto et al., 2008).

### 3.3. Réalisation du modèle géologique 3D

Les données utilisées pour la construction du modèle géologique 3D sont, pour la majorité, localisées au nord-est ou au centre de la zone d'étude, territoire d'Orléans Métropole. Les coins nord-ouest, sud-ouest et sud-est de l'emprise du modèle, disposent de peu de données pour contraindre la géométrie des formations, pouvant aboutir à une modélisation parfois aberrante. L'ajout de données pour mieux contraindre le modèle aux endroits où peu de données sont disponibles s'est appuyé sur le modèle du SIGES. Il a servi de base pour l'ajout de points de passage et données d'orientation. Il a été particulièrement utilisé pour la modélisation des toits des formations, au sud-est du modèle, car les rejets de la faille y sont plus importants (voir paragraphes 2.1, 2.2 et 3.2).

Le modèle est composé de six séries reposant en onlap les unes sur les autres et de deux failles finies représentant les deux segments de la faille de Sennely, qui traverse la zone d'étude, formant un relai (Figure 11).

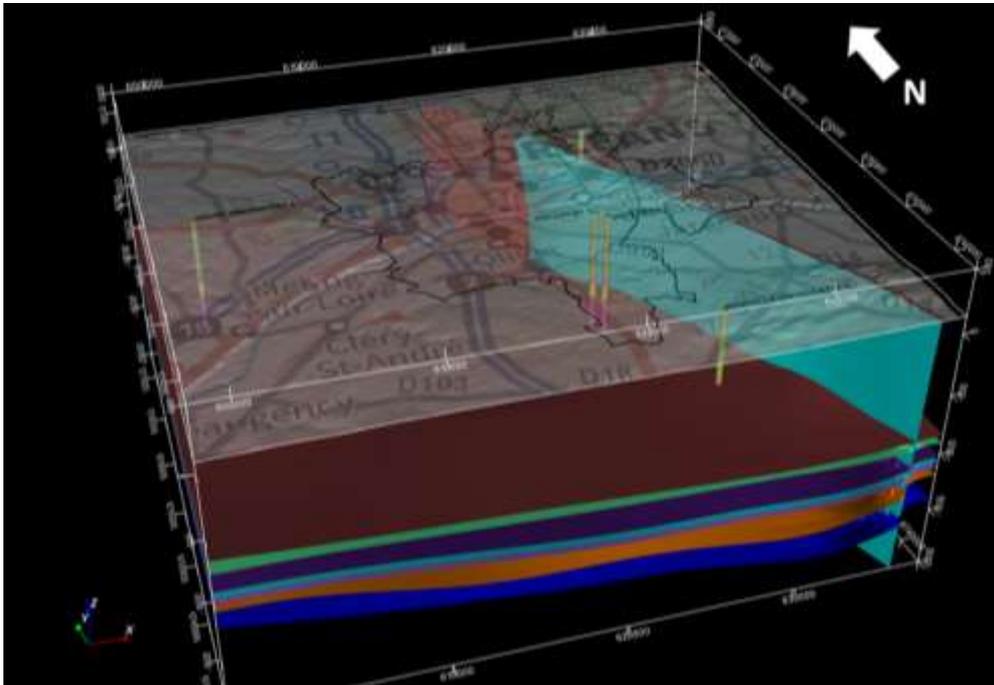


Figure 11 - Modèle géologique 3D obtenu, puits utilisés pour sa construction et carte d'Orléans Métropole en surface

### 3.4. Conclusions sur l'interprétation sismique et le modèle géologique 3D

L'intégration de données de sismique réflexion dans le projet et la réalisation du modèle géologique 3D, sur le territoire d'Orléans Métropole, ont permis :

- de préciser la faille de Sennely, qui traverse le territoire d'Orléans Métropole, à l'est. La faille de Sennely, sur la zone étudiée, est une faille qui présente deux relai, un pendage vers l'ouest, et un rejet, entre 20 mètres, dans le nord de la zone d'étude, et 70 mètres, dans le sud de la zone d'étude. La présence de faille, peut avoir un rôle important dans la circulation des fluides ;
- l'interprétation des images issues de la sismique réflexion n'a pas mis en évidence la présence d'autres failles majeures sur le territoire d'Orléans Métropole ;
- la géométrie et l'épaisseur du Dogger et du Trias ont pu être estimées sur l'ensemble du territoire d'Orléans Métropole, lors de la modélisation géologique 3D. Le Dogger et le Trias présentent des dépôts sédimentaires tabulaires. Le pendage maximal est de 3° vers le NE (dans le coin NE du modèle) pour le toit du Trias et du Dogger. Cette orientation de pendage est cohérente avec la structure en « assiettes creuses » du Bassin de Paris. D'après les résultats de la modélisation, l'épaisseur du Trias est d'environ 100 m, mais cette valeur peut varier latéralement : elle est moindre vers le nord-ouest du modèle (épaisseur du Trias au puits Saint-Sigismond : 50 m) et s'épaissit vers le SE, certainement dû aux rejets de la faille de Sennely plus importants (épaisseur du Trias aux puits de Melleray : 180 m).

Le Dogger calcaire est globalement plus épais que le Trias : son épaisseur est d'environ 150 m et elle est aussi plus homogène. L'augmentation de l'épaisseur induite par les rejets de la faille de Sennely est moins importante car les rejets sont moindres que pour le Trias. En ce sens, les résultats de la modélisation sont cohérents avec les données de puits où l'épaisseur des calcaires du Dogger est d'environ 150 m : en effet, au niveau des deux puits de Melleray, l'épaisseur est de 180 m, de 150 m à Rebréchien au NE et de 160 m à Saint-Sigismond à l'ouest. Cependant, sur l'emprise du modèle, l'épaisseur des calcaires du Dogger est d'environ 300 m au coin SE du modèle.



## 4. Le potentiel géothermique du Dogger et du Trias sur le territoire d'Orléans Métropole

L'évaluation des ressources géothermiques profondes visée par le projet Orléans Métropole concerne la géométrie des réservoirs, ainsi que les caractéristiques de la ressource, en termes de températures et du potentiel géothermique théorique (évaluation de la chaleur en place).

Des simulations ont été réalisées afin d'obtenir, d'une part, une première estimation du potentiel géothermique des réservoirs du Dogger et du Trias à l'échelle de la Métropole d'Orléans, et d'autre part, d'analyser l'adéquation du potentiel sous-sol au regard du plan de développement des réseaux de chaleur urbains et des besoins en surface.

L'estimation du potentiel géothermique des aquifères profonds du Dogger et Trias s'est basée sur les informations géologiques issues du modèle 3D. Le modèle géologique 3D permet, d'une part, d'obtenir la géométrie du Dogger et du Trias, ainsi que les principaux accidents tectoniques, et d'autre part, d'effectuer les simulations nécessaires à l'évaluation du potentiel géothermique, dans ces deux réservoirs cibles, sur le territoire d'Orléans Métropole.

Les données nécessaires pour évaluer les ressources géothermiques sont : la géométrie des formations (profondeur, épaisseurs), les données de température et les propriétés hydrogéologiques et thermiques.

### 4.1. Les données

#### 4.1.1. Les données de température

Les documents associés aux puits peuvent contenir des informations sur les températures des formations géologiques. On distingue deux types de données de températures :

- les données Bottom Hole Temperature (BHT), aussi appelées températures de fond de trou. Ces données sont mesurées par un thermomètre associé aux outils de diagraphie et qui enregistre la température maximale rencontrée. Il est considéré que cette température est enregistrée à la profondeur maximale, soit au fond du forage. Cependant, la mesure a lieu avant que la température de la boue de forage (généralement plus faible que celle du milieu) ne se rééquilibre avec la température de la formation. La température enregistrée est alors plus faible que la température réelle et on dit qu'il y a un « effet de boue » qui nécessite une correction ;
- les données Drill-Stem Test (DST, aussi appelées essais de couche ou essais de nappe), qui sont des mesures de températures sur le fluide extrait. Comme la température du fluide est à l'équilibre avec celle de la formation, il s'agit de la température « réelle », qui ne nécessite donc aucune correction.

On dispose de cinq données de températures, trois données DST issues des essais de nappes des puits géothermiques et deux données BHT des puits d'exploration pétrolière Rebréchien 1 et Saint-Sigismond 1 (Tableau 1). Il n'y a pas de données de température au Dogger et au Trias pour le puit de Marcilly en Villette, car celui-ci n'atteint pas ces deux formations géologiques.

Puits	id BEPH	Type de la mesure	Profondeur de la mesure (/sol)	Formation	Température (°C)
RBH1	14-3233-	BHT	-1518	Socle	49
SG1	14-2718-	BHT	-1299.5	Socle	48
GMV1	14-9082-	DST	-1085.2 à -1125.2	Dogger	53
GMV1	14-9082-	DST	-1420	Trias	73.9
GMV2D	14-9089-	DST	-1370	Trias	73

Tableau 1. Données de températures BHT et DST des puits

#### 4.1.2. Les données hydrogéologiques et thermiques

Les propriétés pétro-physiques et les paramètres nécessaires à la modélisation thermique proviennent des rapports de fin de sondage des forages ou de la littérature (Thiéry, 2015). Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Séries	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Conductivité thermique (W/m/K)	Capacité thermique volumique (x10e6 J/m3/K)
couche_top	12	0.1	2.7	2.3
Couverture_indifférenciée	12	0.1	2.7	2.3
Marnes Callovo-oxfordiennes	13	0.1	1.7	2.3
Calcaires du Dogger	10	60	2.1	2.3
Lias	6	0.1	1.7	2.3
Trias	16	160	1.7	2.3
Socle	2	0.1	3.6	2.1
couche_base	2	0.1	3.6	2.1

Température à la surface (°C)	10
Flux de chaleur à la base (J/m2/an)	2.49E+06
Charge hydraulique (mNGF)	104
Débit aux bordures (m3/h)	fixe
Unité de temps	année
Coefficient d'emmagasinement captif	négligeable

 : valeurs issues des rapports de fin de sondage

Tableau 2. Paramètres thermiques et hydrogéologiques utilisés pour la simulation thermique

Pour les calcaires du Dogger situés dans l'emprise d'Orléans Métropole, la valeur moyenne de perméabilité intrinsèque, issue des analyses pétro-physiques sur carottes, est de 35 milliDarcy (mD). Par ailleurs, la transmissivité intrinsèque déduite des essais menés sur le puits Melleray 1 est de 2,07 Darcy mètre (D.m). La transmissivité étant la perméabilité multipliée par l'épaisseur testée, soit 40 m, dans le cas de l'essai de Melleray 1, cela équivaut à une perméabilité intrinsèque de 52 mD. Ces valeurs sont très faibles par rapport au Dogger du Bassin parisien, où les perméabilités moyennes varient entre 800 mD et 2000 mD et les transmissivités varient entre 5 D.m et 110 D.m, avec une moyenne proche de 40 D.m. La valeur de perméabilité finalement affectée aux calcaires du Dogger est arrondie à 60 mD.

En ce qui concerne le Trias, les valeurs de transmissivité déduites des essais de puits sont de l'ordre de 15 D.m, soit une valeur de perméabilité de 430 mD, l'épaisseur testée étant de 35 m. Cependant, les tests ont été réalisés sur les zones avec les meilleures propriétés réservoirs, qui ne sont pas forcément représentatives de toute la formation, qui comporte aussi des intercalations

argileuses. En effet, la moyenne des valeurs de perméabilité obtenues par analyses pétro-physiques sur carottes ne s'élève qu'à 160 mD. C'est cette valeur qui a été affectée au Trias.

## 4.2. Les résultats

Le modèle thermique a été calibré par comparaison des valeurs de température obtenues avec les mesures DST disponibles (voir paragraphe 4.1.1) (Tableau 3). Un point de contrôle supplémentaire a été utilisé : il s'agit de la température à la base du modèle estimée pour le calcul du flux de chaleur.

	GMY1_Dogger	GMY1_Trias	GMY2_Trias	Base_modele
Températures simulées (°C)	52.747	74.018	73.243	84.732
Températures mesurées (°C)	53	73.9	73	
Température calculée (°C)				83.29

*Tableau 3. Comparaison entre les températures simulées et les points de contrôle constitués des données DST disponibles et d'une température estimée à partir du gradient géothermique régional*

Les températures simulées sont proches des températures obtenues dans les forages, ainsi qu'à la base du modèle. La faille de Sennely a une influence sur la répartition des températures au sud-est de la zone d'étude, aussi bien au Dogger qu'au Trias (Figure 12). La répartition des températures est fortement liée à la profondeur, ce qui est normal, à cette échelle, et en contexte sédimentaire relativement peu déformé. Il est à noter que le modèle ne considère pas d'écoulement par convection.

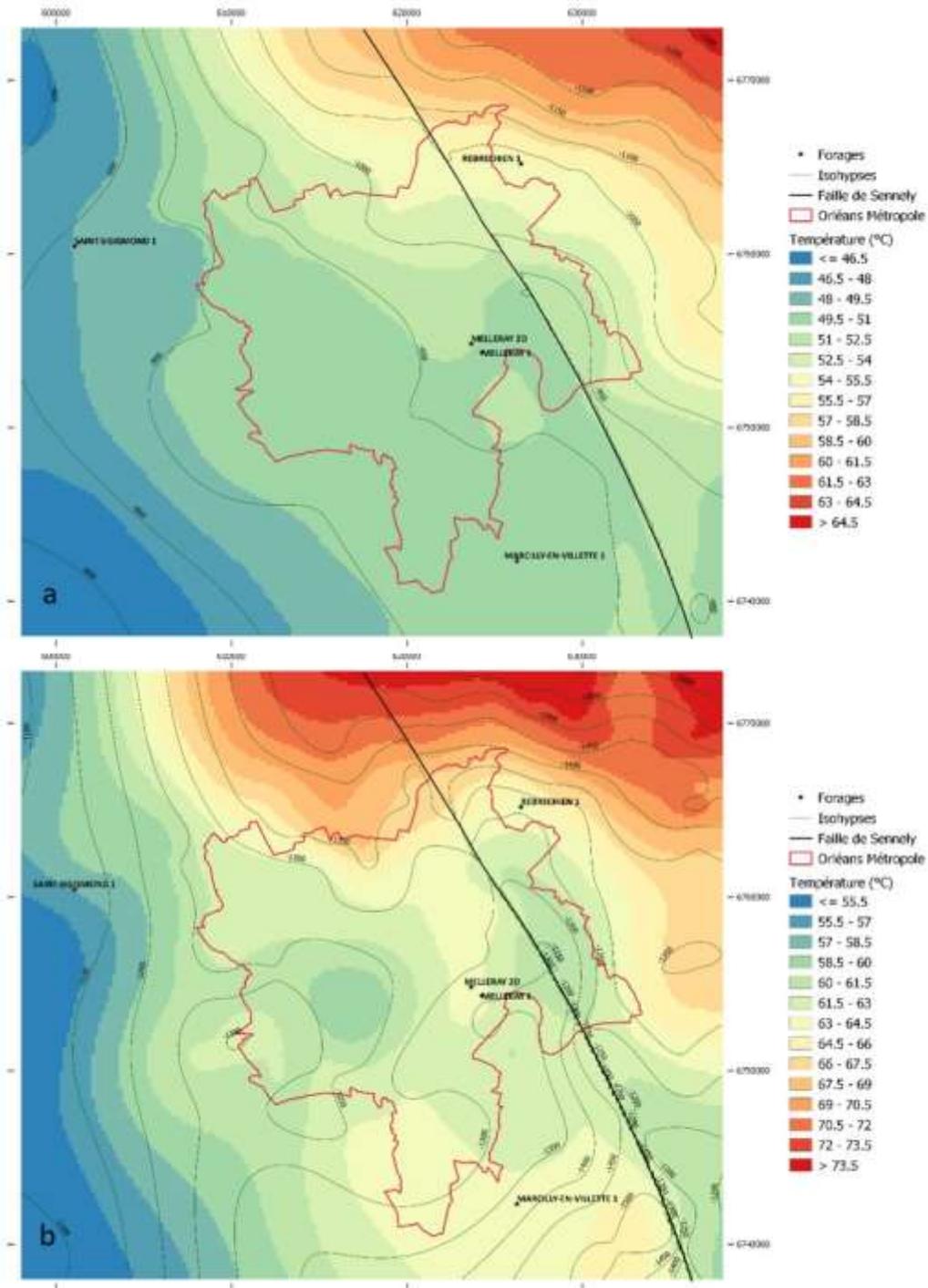


Figure 12 - Cartes de températures au toit des calcaires du Dogger (a) et des grès du Trias (b) avec les isohypses (courbes noires) sur le territoire d'Orléans Métropole (contour rouge).

Ayant les températures pour les deux réservoirs cibles, le Dogger et le Trias, ainsi que leur épaisseur, ceci permet de calculer le potentiel géothermique sur le territoire d'Orléans Métropole.

Le calcul du potentiel géothermique est obtenu en utilisant la méthode de Muffler et Cataldi (1978). Cette méthode estime la quantité de chaleur exploitable ou chaleur en place (exprimée en J) de la manière suivante :

$$Q_{exploitable} = R \times \rho C_p V \times (T_i - T_f)$$

Où :

- $\rho C_p$  est la capacité thermique volumique des roches du réservoir. D'après certains éléments de bibliographie (Thiéry, 2015), elle serait de l'ordre de  $2,3 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  pour les roches sédimentaires (Tableau 2).
- $V$  est le volume du réservoir. Le modèle 3D permet d'obtenir des grilles d'épaisseur des réservoirs qu'il suffit de multiplier par la surface de la zone d'étude.
- $T_i$  la température du réservoir géothermique. Dans le cas présent, il s'agit de la moyenne des grilles de températures simulées pour chaque sous-couche faisant partie des réservoirs du Dogger et du Trias, dans le modèle thermique.
- $T_f$  la température moyenne à la surface. Dans le Bassin parisien, la température moyenne est de  $10^\circ\text{C}$ .
- $R$  est la fraction réellement extractible et qui est définie par :

$$R = R_f \times \left[ \frac{T_i - T_r}{T_i - T_f} \right]$$

Avec :

- $R_f$  le facteur de forme, déterminé de manière empirique et considéré comme égal à 0,33 pour un aquifère (Hurter et Schnellschmidt, 2003).
- $T_r$  la température de réinjection. Dans le Bassin parisien, il est possible d'abaisser la température de réinjection dans les calcaires du Dogger jusqu'à  $25^\circ\text{C}$  pour récupérer plus de chaleur (Hamm et al., 2017).

Dans cette étude, deux cas de figure sont considérés (Figure 13) :

- a. un premier cas, avec une même température de réinjection de  $25^\circ\text{C}$ , dans les réservoirs du Dogger et du Trias ;
- b. un deuxième cas, avec une température de réinjection différente pour chacun des réservoirs, mais un même delta de température,  $\Delta T = T_i - T_r = 25^\circ\text{C}$ , pour les deux réservoirs cibles. La température de réinjection ( $T_r$ ) au Dogger a été définie à  $30^\circ\text{C}$  (la température moyenne ( $T_i$ ) du réservoir étant d'environ  $55^\circ\text{C}$ , d'après la modélisation thermique) et  $50^\circ\text{C}$  pour le Trias (la température moyenne du réservoir étant d'environ  $75^\circ\text{C}$ , d'après la modélisation thermique).

Par ailleurs, ce potentiel est évalué sur des mailles de  $200 \times 200 \text{ m}^2$  et a été exprimé en  $\text{GJ/m}^2$  (Figure 13).

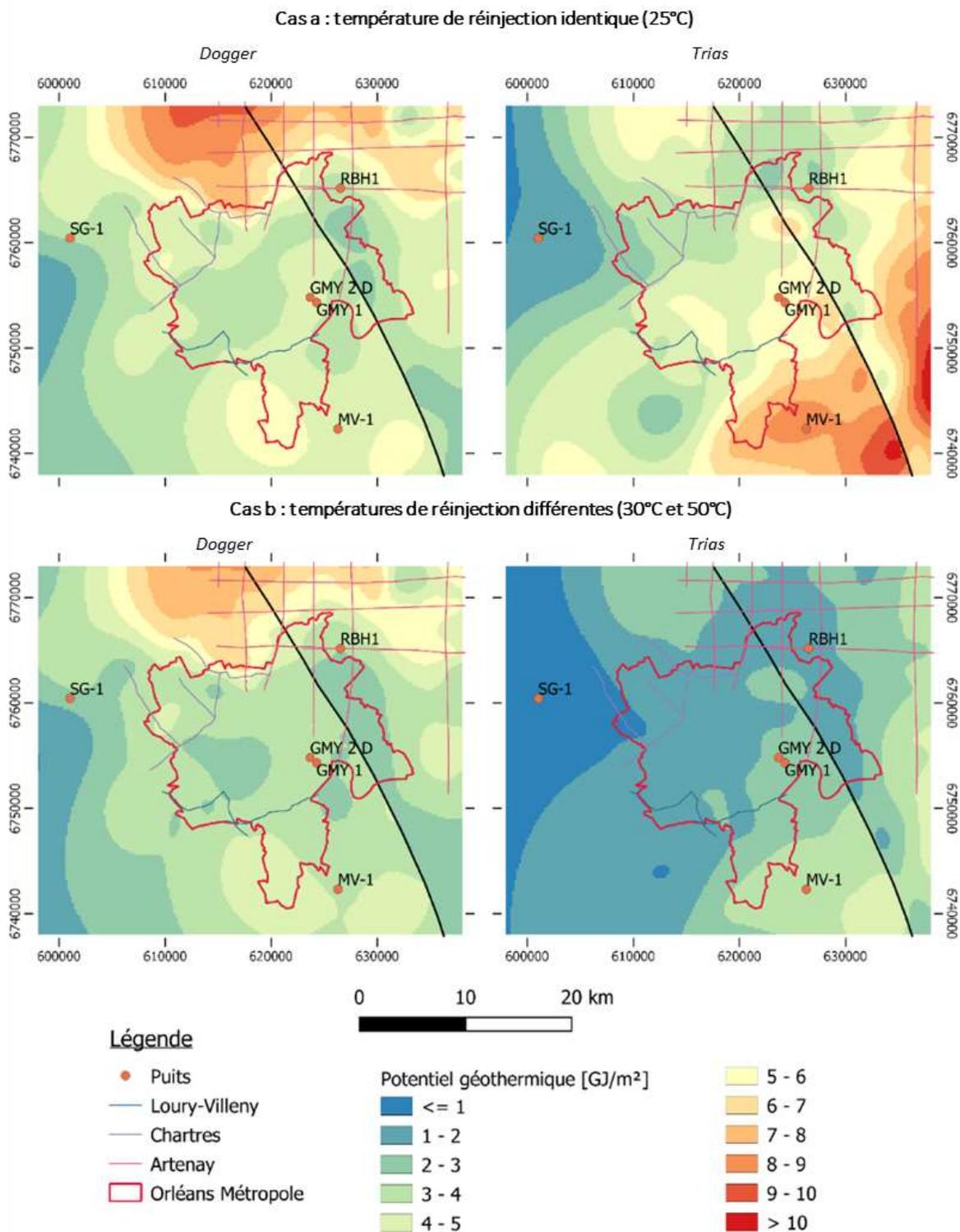


Figure 13 - Cartes de potentiel géothermique obtenues selon les différents cas de figure concernant la température de réinjection.

Les cartes du potentiel géothermique (Figure 13) montrent que la température de réinjection joue un rôle important sur la valeur absolue du potentiel, mais non sur la distribution du potentiel géothermique. La faille de Sennely semble jouer un rôle dans la distribution du potentiel géothermique, en particulier, au niveau du réservoir des grès du Trias, au sud-est d'Orléans Métropole, et les potentiels les plus élevés se situeraient à l'ouest de la faille.

Les cartes du potentiel du Dogger et Trias ont, par ailleurs, été superposées aux réseaux de chaleur actuels et aux communes présentant une densité énergétique importante, d'après les informations communiquées par Orléans Métropole (Figure 14 et Figure 15).

L'évaluation du potentiel géothermique des calcaires du Dogger (Figure 13 et Figure 14) indique un potentiel plus élevé à la limite nord nord-est d'Orléans Métropole, qui correspond à un approfondissement des calcaires, et donc, à une température plus chaude concomitante à un épaissement des calcaires, au nord d'Orléans (cf. cartes annexe 1). Le potentiel géothermique théorique du Dogger, sur Orléans Métropole, est évalué entre 1 et 5 GJ/m<sup>2</sup>, sur la base d'une réinjection à 25°C (Figure 14). Ce potentiel est basé sur les hypothèses décrites ci-dessus et n'intègre pas directement la notion de débit exploitable, qui est fonction de la capacité du réservoir à transmettre ce débit (transmissivité), mais la chaleur extractible sur la base de l'épaisseur des formations. Si on se réfère à une opération classique au Dogger, en région Ile-de-France, avec un fonctionnement annuel moyen de 200 m<sup>3</sup>/h (débit exploitable) pendant 5000 heures et un delta de température de 30°C, on aboutit à une énergie extractible annuelle de l'ordre de 126 TJ, soit ramenée à une surface équivalente de 0,4 km<sup>2</sup> (mailles de 200m x 200 m), à 3,2 GJ/m<sup>2</sup>.

Les communes d'Orléans Métropole, qui présenteraient le potentiel le plus favorable au Dogger, seraient Saran et Chateau, au nord, et potentiellement Saint-Cyr en Val, au sud. Concernant les communes de Saint Jean de Braye et de La Chapelle St Mesmin identifiées dans le cadre du schéma directeur des réseaux de chaleur, du fait de leur densité énergétique qui permettrait d'envisager la création d'un réseau de chaleur local, seule la commune de Saint-Jean de Braye semble présenter un intérêt, notamment en lien avec des épaisseurs intéressantes du Dogger qui, localement, peuvent être supérieures à 200 m.

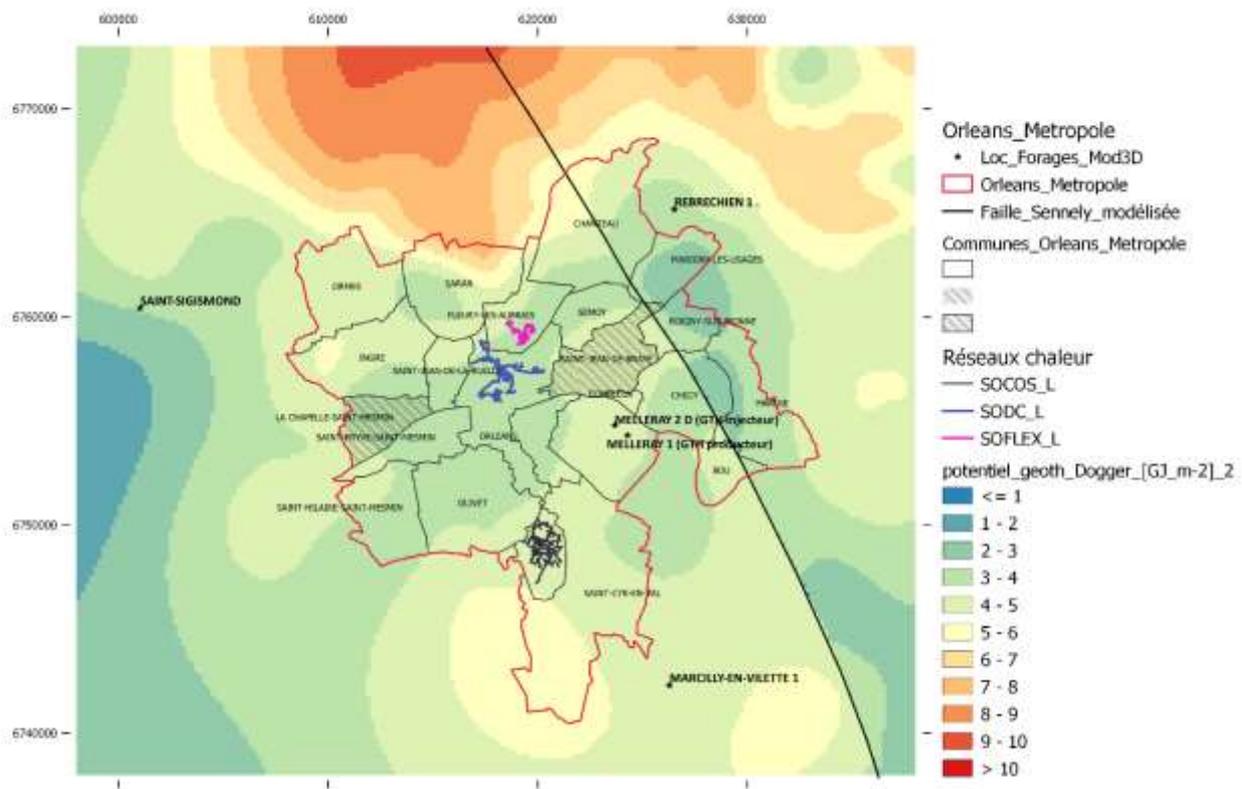


Figure 14 - Localisation des réseaux de chaleur existants, des secteurs d'intérêts de forte densité énergétique (La Chapelle St-Mesmin et Saint-Jean de Braye) et carte du potentiel géothermique maximal du Dogger (sur la base d'une température de réinjection de 25°C)

L'évaluation du potentiel géothermique des grès du Trias (Figure 13 et Figure 15) indique un potentiel plus élevé à la limite sud-est et est d'Orléans Métropole, qui correspond concomitamment à un approfondissement des grès du Trias et à un épaississement des grès (cf. cartes annexe 2). Il est à noter que le Trias s'approfondit également comme le Dogger au nord d'Orléans, mais avec des épaisseurs moins favorables. Le potentiel géothermique théorique du Trias sur Orléans Métropole est évalué entre 1 et 7 GJ/m<sup>2</sup>, sur la base d'une réinjection à 25°C (Figure 15), et entre 1 et 3 GJ/m<sup>2</sup> pour une température de réinjection de 50°C. Contrairement au Dogger où l'épaisseur est relativement homogène sur le territoire de la métropole (entre 150 et 200 m, cf. carte annexe 1), les épaisseurs du Trias diminuent vers le nord (entre 50 et 150 m) alors qu'elles sont entre 150 et 200 m, voire au-delà vers le sud (cf. carte annexe 2). Du fait des températures plus élevées du Trias, en moyenne de 65-70°C sur la métropole, contre 50-55°C pour le Dogger, le Trias reste une ressource, de ce fait, particulièrement intéressante pour exploiter un delta de température plus conséquent par rapport au Dogger à débit potentiel équivalent. Par ailleurs, les rares données d'essais de débit (puits géothermiques de Melleray) indiquaient une transmissivité de l'ordre de 15 Dm, au Trias, contre 2 Dm, au Dogger.

Les communes d'Orléans Métropole, qui présenteraient le potentiel le plus favorable au Trias, seraient Saint-Cyr en Val, Bou, Combleux et Chécy, du côté ouest de la faille de Sennely. Du fait de sa localisation, la commune de Saint-Jean de Braye identifiée comme ayant une densité énergétique importante pourrait également être une zone à explorer au Trias.

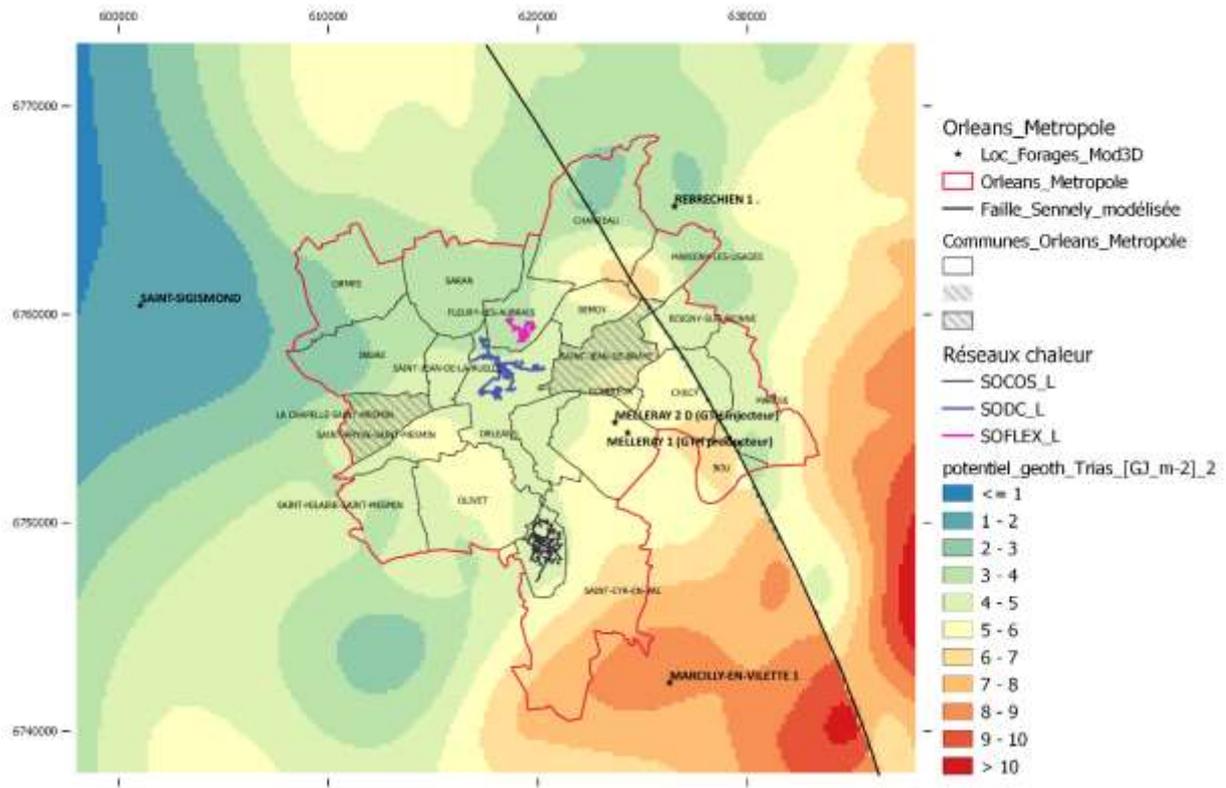


Figure 15 - Localisation des réseaux de chaleur existants, des secteurs d'intérêts de forte densité énergétique (La Chapelle St-Mesmin et Saint-Jean de Braye) et carte du potentiel géothermique maximal du Trias (sur la base d'une température de réinjection de 25°C)



## 5. Conclusions

A l'heure où la géothermie apparaît comme un enjeu majeur de la transition énergétique et où les collectivités comme Orléans Métropole cherchent à estimer le potentiel géothermique de leur territoire, une caractérisation de la ressource en amont est indispensable. Cette caractérisation permet, d'une part, de réduire le risque géologique et économique, et d'autre part, d'avoir des informations pertinentes pour sélectionner les différentes zones d'intérêt pour le développement de projets. Cette première étape permettra de poursuivre les investigations sur les zones ciblées, d'autant plus que lorsqu'il s'agit de la reconnaissance de nouvelles ressources géothermales profondes peu exploitées comme le Trias. La caractérisation de la ressource passe, notamment, par la réalisation d'un modèle géologique 3D et des simulations hydrothermales.

L'interprétation de lignes sismiques provenant de trois campagnes de sismique réflexion, proches d'Orléans Métropole, a permis, d'une part, d'obtenir des informations sur la géométrie, la profondeur et l'épaisseur des unités géologiques, dont les calcaires du Dogger et les grès du Trias et, d'autre part, d'étudier la faille de Sennely, qui traverse la zone d'étude. La faille de Sennely est en relief avec un pendage sud-ouest et constituée de deux segments sur la zone d'étude avec des rejets augmentant vers le sud-est.

Les données de températures disponibles sur le territoire d'Orléans Métropole étant insuffisantes, un modèle thermique a été réalisé en ne prenant en compte que les transferts thermiques par conduction. Les résultats obtenus sur la modélisation des températures montrent que la faille de Sennely joue un rôle dans la distribution des températures et du potentiel géothermique.

Des cartes de potentiel géothermique ont été calculées, à partir du modèle géologique 3D et des grilles de températures. Deux cas de figure ont été distingués en fonction de la température de réinjection afin de comparer les réservoirs du Dogger et du Trias. Les cartes indiquent un potentiel plus élevé pour le Dogger, au nord d'Orléans Métropole, et pour le Trias, au sud sud-est d'Orléans Métropole. Ces cartes du potentiel permettent une première identification des secteurs à favoriser pour le développement de la géothermie profonde.

Cette étude a ainsi permis de mieux caractériser les réservoirs du Dogger et du Trias, au droit d'Orléans Métropole, en termes de profondeur et d'épaisseur. En revanche, ce travail a été réalisé en considérant ces cibles comme homogènes en termes de propriétés et nécessitera des caractérisations complémentaires afin de sécuriser leur exploitation future. Cette caractérisation peut consister à réaliser localement de nouvelles acquisitions sismiques et, notamment, acquérir de l'information indirecte sur les propriétés des réservoirs, comme les épaisseurs utiles et leur connectivité, dans le cas de techniques plus poussées, comme la sismique 2D haute résolution ou 3D. Ces données croisées aux données de puits du secteur permettent de définir les meilleures zones d'implantation de forages. Ces forages peuvent être des forages exploratoires de plus petit diamètre, afin de réaliser des premiers tests hydrogéologiques pour confirmer la capacité du réservoir cible à produire ou à réinjecter, ou des forages d'exploitation de plus grand diamètre, mais avec des architectures adaptées.



## 6. Bibliographie

### Articles de périodique :

**Calcagno P., Courrioux G., Guillen A., Chilès J.P.**, 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I – Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171, pp. 147–157.

**Guillen A., Calcagno P., Courrioux G., Joly A., Ledru P.**, 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge, Part II, Modelling validation using gravity and magnetic data inversion, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171, pp. 158–169

**Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N., Dromart G., Friedenber R., Garcia J.P., Gaulier J.M., Gaumet F., Grosdoy B., Hanot F., Le Strat P., Mettraux M., Nalpas T., Prijac C., Rigollet C., Serrano O., Grandjean G.**, 2000. Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints, *Geodinamica Acta* 13, pp. 189–246

**Héritier F., Villemin J.**, 1971. Mise en évidence de la tectonique profonde du Bassin de Paris par l'exploration pétrolière, *Bulletin du BRGM (deuxième série), Section I, n°2*

**Muffler P., Cataldi R.**, 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources, *Geothermics*, 7, pp. 53-89

### Thèse :

**Lenoir F.**, 2012. Faciès, géométries et déformations du Jurassique du Sud- Ouest du bassin de Paris : un domaine faiblement subsident, transition avec le bassin d'Aquitaine. *Stratigraphie*. Université Rennes 1

### Rapports :

**Beccaletto L., Hanot F., Marc S., avec la participation de Perrin A., coordination Hanot F.**, 2007. Etude structurale des réservoirs du Bassin de Paris - Retraitement et interprétation de 14 lignes sismiques régionales - Non Exclusive Survey, Rapport BRGM/RC56407-FR, 41 p. (confidentiel)

**Beccaletto L., Hanot F., Robelin C., avec les participations de Denis L., Grateloup S., Rambourg D. et Tourlière B., coordination Hanot F.**, 2008. Fourniture de données géologiques pour le programme "Hydraulique Champ Lointain, Echelle bassin de Paris - Cartographie structurale de surfaces géologiques de référence, caractérisation des failles majeures, Rapport BRGM/RP56305-FR, 625 p. (confidentiel)

**Bugarel F., Salquèbre D., Hamm V.**, 2019. Etude du potentiel de la géothermie profonde sur le territoire d'Orléans Métropole – Volet 1 : Conditions d'accès à la ressource (modèle du Dogger en région Ile-deFrance) et retours d'expérience sur les opérations au Trias. Rapport final. BRGM/RP-69450-FR, 58 p., 13. fig., 2 tabl.

**Capar L. et Marc S.**, 2020. Rapport méthodologique du retraitement de 7 lignes sismiques 2D pour le projet ORLÉANS MÉTROPOLE. Rapport BRGM/RP-70365-FR, 21. p., 9 fig., 1 ann.

**Chapuis F., Bauer H., Grataloup S.**, 2008. Projet CPER Artenay – Interprétation sismique, Rapport final, BRGM/RP-56971-FR, 73p., 31 ill.

**Hamm V., Marty N., Peter-Borie M. avec la collaboration Audouin O.**, 2017. Impacts de la réinjection d'un fluide « froid » au Dogger sur le réservoir et sur son exploitation. Rapport final. BRGM/RP-67061-FR, 72p., 30 fig., 18 tabl., 2 ann.

**Mégnien C.**, 1980. Synthèse géologique du Bassin de Paris, volume 1. Mémoires BRGM n°101.

**Lopez S., Millot R., et collaborateurs**, 2008. Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris. Rapport BRGM/RP-56630-FR, 197 p., 65 ill.

**Salquère D., avec la collaboration de Husson F., Jozja N.** (Université d'Orléans), **Klinka T., Tourlière B.**, 2019 – Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines (SIGES) en région Centre-Val de Loire – Phase 3 (2017-2019). Rapport final. BRGM/RP- 69591-FR, 74 p., 40 ill., 5 ann.

**Thiéry D.**, 2015. Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64765-FR, 336 p., 159 fig.

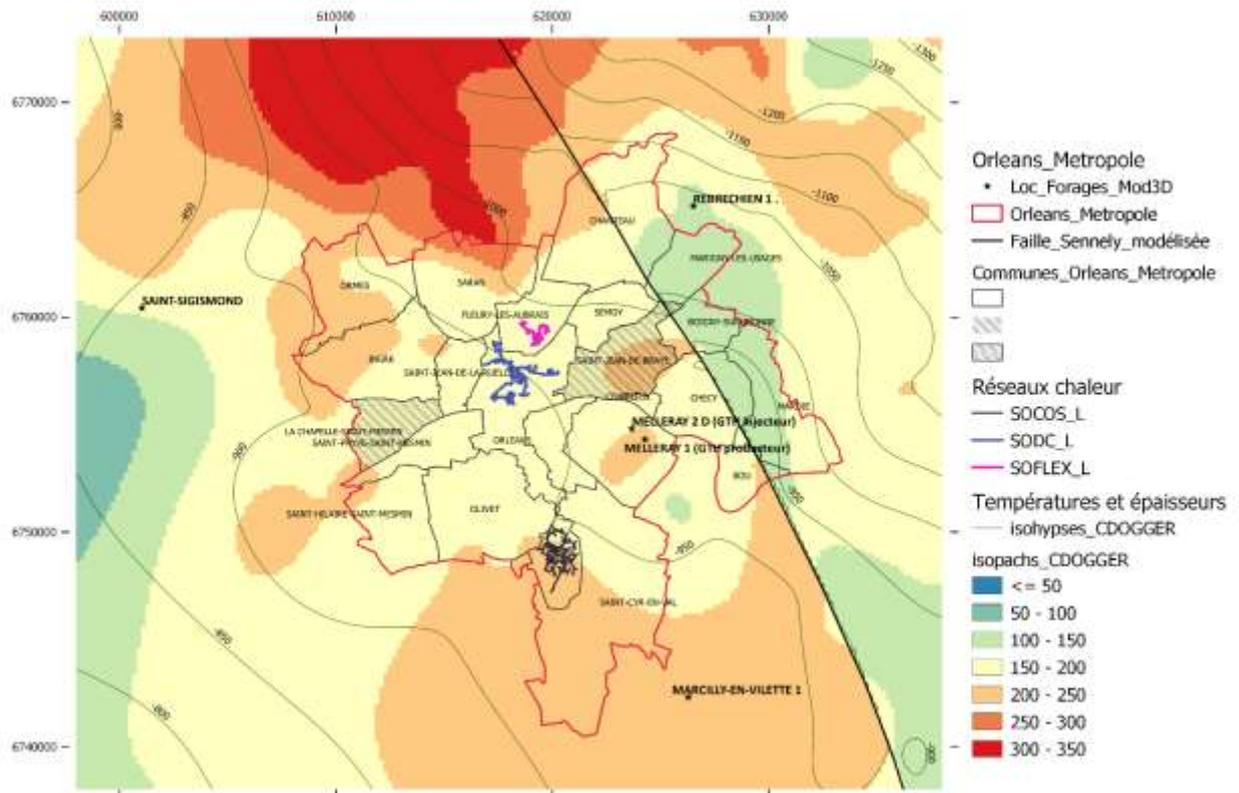
**Thiéry D.**, 2015. Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5. Exploration des fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-64997-FR. 381 p., 256 fig.

## **Annexe 1**

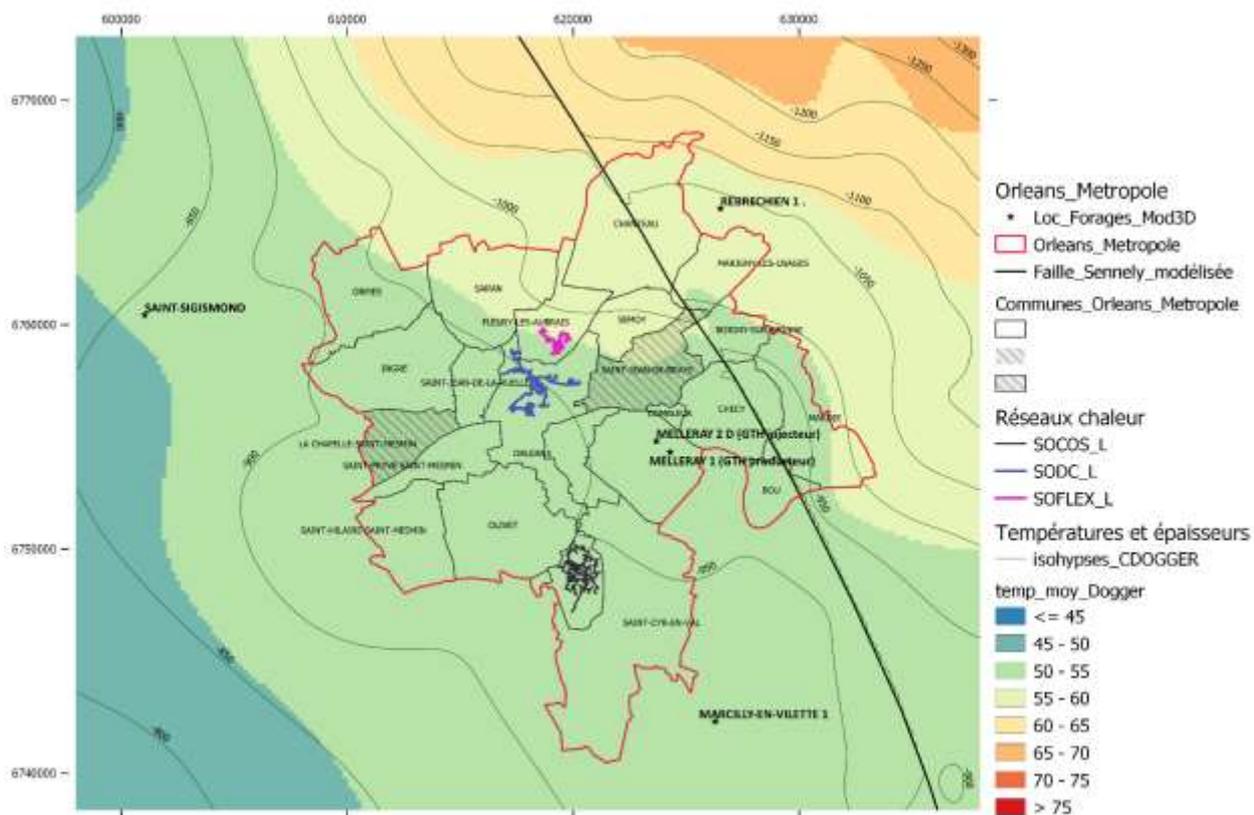
# **Cartes des épaisseurs et température moyenne du Dogger issues du modèle géologique 3D et du modèle thermique**



### Carte des épaisseurs du Dogger



Carte des températures moyennes du Dogger

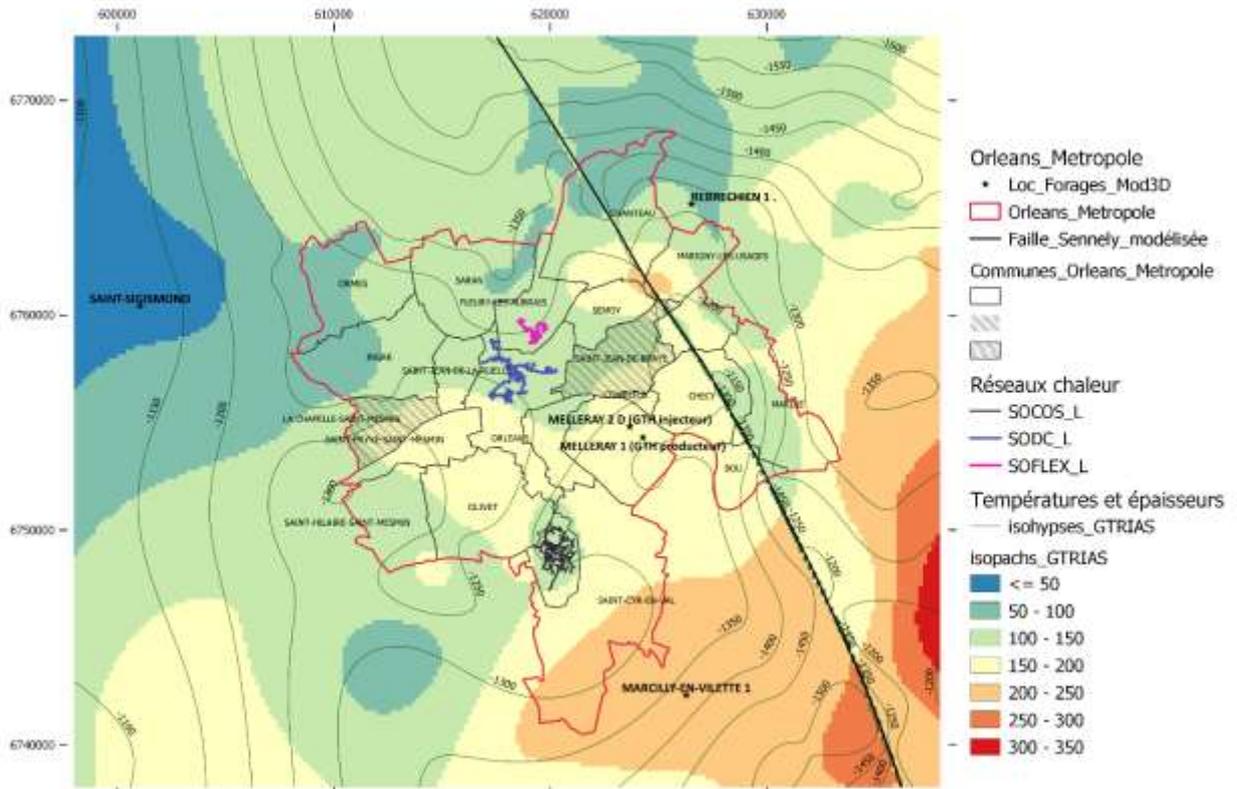


## **Annexe 2**

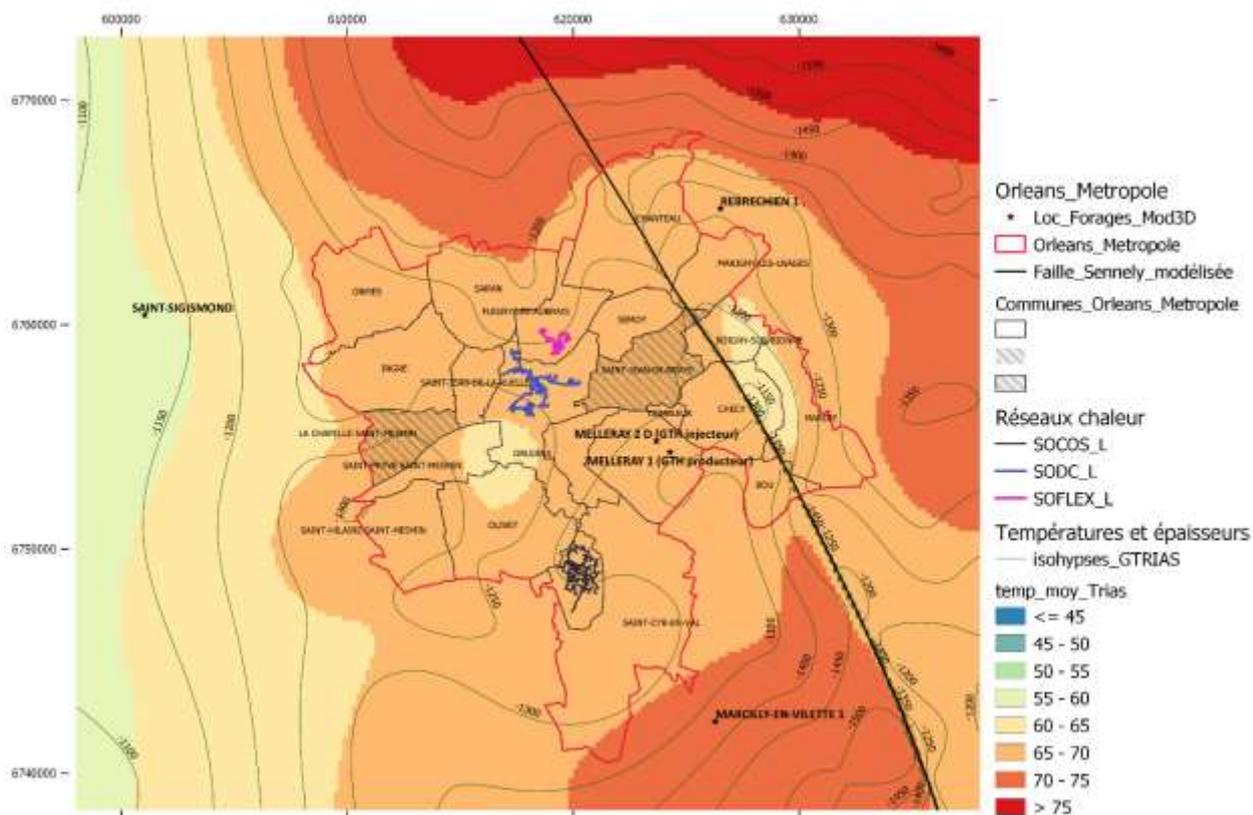
# **Cartes des épaisseurs et température moyenne du Trias issues du modèle géologique 3D et du modèle thermique**



Carte des épaisseurs du Trias



Carte de la température moyenne du Trias







**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Centre Val-de-Loire**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 31 92