



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Estimation du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de Chartres Métropole

Rapport final

BRGM/RP-72908-FR

Version 2 du 13 février 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Maragna C., Armandine Les Landes A., Servièrre M., Durst P.

Vérificateur :

Nom : Mikaël PHILIPPE

Fonction : Responsable d'Unité GSE

Date : 20/12/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Alain SAADA

Fonction : Directeur Régional

Date : 22/12/2023

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés :

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

Maragna C., Armandine Les Landes A., Servièrre M., Durst P. 2024. Estimation du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de Chartres Métropole. Rapport final V2. BRGM/RP-72908-FR, 76 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans la Convention de recherche & développement partagés relative au développement de la géothermie sur le territoire de Chartres Métropole. Il constitue le livrable de la tâche 1.2 « Caractérisation et cartographie des ressources géothermiques de surface » et de la tâche 1.3 « Analyse cartographique et restitution du potentiel géothermique » du Lot n°1 « Estimation du potentiel de la géothermie de surface à la couverture des besoins en énergie thermique ». Le rapport couvre à la fois le Pôle Urbain de Chartres Métropole et les communes périphériques. Il est complété par un rapport rédigé par le CSTB portant sur la tâche 1.1 « Caractérisation et cartographie des besoins thermiques actuels ».

Une analyse de l'ensemble des contraintes réglementaires imposées par le Code Minier et la gestion des eaux souterraines montre que ces contraintes ne constituent pas un frein au déploiement de la géothermie de surface sur le territoire de Chartres Métropole. Les Périmètres de Protection Rapprochée (PPR) des captages d'Alimentation en Eau Potable constituent la principale limite, mais ne concernent que 4% du territoire, très majoritairement en-dehors du Pôle Urbain. Il existe néanmoins un enjeu pour la préservation de l'eau souterraine puisqu'un quart du territoire, majoritairement à l'ouest, est couvert par des dispositifs de protection.

La bibliographie portant sur la géologie et l'hydrogéologie montre que deux aquifères sont mobilisables par des opérations de géothermie : l'aquifère de la Craie sur l'ensemble de la Métropole, et l'aquifère Tertiaire à l'Ouest. D'après les données collectées, la ressource géothermale constituée par l'aquifère de la Craie est excellente dans l'ensemble de la Métropole, à l'exception des points bas (par ex. Vallée de l'Eure) où la réinjection peut être plus problématique. La partie exploitable de l'aquifère Tertiaire se trouve en-dehors du Pôle Urbain.

Sur l'ensemble des bâtiments de la Métropole, les besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) tels qu'estimés par le CSTB sont de 3612 GWh/a. Le potentiel énergétique de la géothermie sur chaque bâtiment a été estimé par le BRGM à l'aide d'un traitement cartographique combinant caractéristiques du sous-sol, besoin des bâtiments, contraintes foncières, et densité de bâtiments. Deux technologies d'exploitation ont été prises en compte : champ de sondes (systèmes en « boucle fermée ») et doublets sur aquifère (systèmes en « boucle ouverte »). Il ressort que la géothermie de surface (c'est-à-dire assistée par Pompe à Chaleur) pourrait contribuer à hauteur de 1306 GWh/a des besoins en chauffage et ECS, soit 36 %. La majorité du besoin serait couvert par des champ de sondes qui sont pertinents pour tout type de bâtiments, du logement individuel aux grands bâtiments.

Le potentiel des doublets n'a été estimé que pour les bâtiments nécessitant au moins 150 MWh/a de chauffage et d'ECS, soit 6,5% des bâtiments mais 44% du besoin (soit 1521 GWh/a). Sur ce segment, les pompes à chaleur sur aquifère pourraient fournir 270 GWh/a de chauffage et d'ECS. Ce n'est pas négligeable puisque, sur ce segment des grands bâtiments, les PAC sur champ de sondes pourraient contribuer à hauteur de 461 GWh/a.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. Contexte et objectifs de l'étude	9
1.2. La géothermie de surface ou géothermie assistée par pompe à chaleur	9
1.2.1. <i>La pompe à chaleur</i>	10
1.2.2. <i>Côté sol</i>	11
1.3. Etat des lieux de la géothermie sur le territoire	13
2. Contexte géologique et hydrogéologique.....	14
2.1. Contexte géologique et hydrogéologique : études précédentes	14
2.1.1. <i>Contexte géologique à l'échelle du département</i>	15
2.1.2. <i>Contexte hydrogéologique à l'échelle du département</i>	18
2.2. Données du sous-sol disponibles au niveau de chartres Metropole	19
2.2.1. <i>Modèle géologique</i>	19
2.2.2. <i>Aquifères identifiés</i>	26
2.2.3. <i>Caractéristiques hydrodynamiques</i>	34
2.2.4. <i>Données issues des tests de réponse thermiques</i>	41
2.3. Carte de favorabilité sur aquifères.....	41
3. Réglementations s'appliquant à la géothermie de surface	45
3.1. Les réglementations liées à la géothermie de surface	45
3.1.1. <i>Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance</i>	45
3.1.2. <i>Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échangeurs relevant de la GMI</i>	48
3.1.3. <i>Les zones réglementaires dans Chartres Métropole</i>	49
3.2. Réglementations liées à la gestion des eaux et aux usages du sous-sol.....	51
3.2.1. <i>SDAGE et SAGE</i>	51
3.2.2. <i>Nappes réservées pour l'alimentation en eau potable (NAEP)</i>	55
3.2.3. <i>Ressources stratégiques</i>	58
3.3. RÉGLEMENTATIONS LIÉES À LA PROTECTION DES CAPTAGES D'eau	59
3.4. Synthèse des contraintes réglementaires.....	60
4. Estimation de la géothermie de surface : croisement entre ressources et besoins	62
4.1. Estimation des besoins	62
4.2. Méthodologie.....	63
4.2.1. <i>Prétraitement : détermination du foncier disponible</i>	63
4.2.2. <i>Potentiel des champs sondes géothermiques verticales</i>	64
4.2.3. <i>Potentiel des doublets sur aquifères</i>	66
4.3. Résultats du croisement et Analyse	67
4.3.1. <i>Potentiel des sondes géothermiques verticales</i>	67
4.3.2. <i>Potentiel des doublets sur aquifère et comparaison avec le potentiel des champs de sondes</i>	69
4.3.3. <i>Agrégation sur les Zones d'Activités Economiques</i>	70
5. Conclusions.....	72
6. Bibliographie	73

Liste des figures

Figure 1 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM	11
Figure 2 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe	12
Figure 3 : Nombre de nouvelles installations annuelles pour chacune des deux technologies. Source des données : (Baudouin et al., 2022)	13
Figure 4 : Localisation des installations référencées dans l'observatoire de la géothermie de surface pour chacune des deux technologies. Source des données : (Baudouin et al., 2022) .	13
Figure 5 : Coupe schématique du Bassin parisien	14
Figure 6 – Zone de transition entre le domaine crayeux (en vert) et le domaine tertiaire/Beauce (en jaune) dans le département de l'Eure-et-Loir autour de Chartres Métropole, sur fond de carte géologique au 1 / 1 000 000 (©BRGM), extrait de (Arnaud et al., 2020).....	15
Figure 7 - Formations du Crétacé sous les formations superficielles et le Tertiaire (d'après Quesnel, 1997).	16
Figure 8 - Affleurements des formations superficielles	18
Figure 9 - Répartition des données de forages disponibles au niveau de la zone d'étude (limite rouge interne) et dans une zone de 10 km autour (limite rouge externe = "buffer"). Les points représentés par des ronds roses, violets, vert foncés et jaune/kaki correspondent aux forages utilisés pour d'anciens modèles géologiques.	21
Figure 10 - Limites d'extension utilisées pour la modélisation sur fond de carte géologique de la France à l'échelle 1/1 000 000. En orange : limite d'extension des Sables du Perche (les sables sont localisés à l'ouest de la limite) ; En bleu : limite des formations du Tertiaire (le Tertiaire est localisé à l'ouest de la limite); En rouge : limite des Alluvions (vallées principales)	22
Figure 11 - Zoom sur la zone d'intérêt (métropole de Chartres) avec les limites d'extension utilisées En orange : limite d'extension des Sables du Perche ; En bleu : limite des formations du Tertiaire (multicouche Beauce et Eocène) ; En rouge : limite des Alluvions (vallées principales).	23
Figure 12 – Profil est-ouest faisant apparaître la disposition des différentes couches, où « Base » correspond au mur de la formation et « Toit » au toit de la formation, ARGS : Argiles de l'Yprésien inf. + Formations détritiques éocènes + Argiles à silex ; TERT : Recouvrement + multicouche Beauce (Oligo-Miocène) + multicouche Eocène ; CRAS : Craie blanche à silex du Séno-turonien ; CRAC : Craie marneuse du Cénomanien moyen – supérieur à Turonien inférieur et CENI : Marnes, Gaizes, Sables du Maine, faciès crayeux du Cénomanien inférieur, Argiles du Gault et formations sous-jacentes (Sables verts, Jurassique)	24
Figure 13 - Profil nord-sud faisant apparaître la disposition des différentes couches, où « Base » correspond au mur de la formation et « Toit » au toit de la formation, ARGS : Argiles de l'Yprésien inf. + Formations détritiques éocènes + Argiles à silex ; TERT : Recouvrement + multicouche Beauce (Oligo-Miocène) + multicouche Eocène ; CRAS : Craie blanche à silex du Séno-turonien ; CRAC : Craie marneuse du Cénomanien moyen – supérieur à Turonien inférieur et CENI : Marnes, Gaizes, Sables du Maine, faciès crayeux du Cénomanien inférieur, Argiles du Gault et formations sous-jacentes (Sables verts, Jurassique)	25
Figure 14 - Epaisseur des alluvions (m)	27
Figure 15 – Epaisseur du Tertiaire (m)	28
Figure 16 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère Tertiaire sur le secteur de la Métropole de Chartres.....	28

Figure 17 – Epaisseur de la craie séno-turonienne (m)	29
Figure 18 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la craie séno-turonienne sur le secteur de la Métropole de Chartres.	29
Figure 19 – Epaisseur de la craie cénomaniennne (m).....	30
Figure 20 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la craie cénomaniennne sur le secteur de la Métropole de Chartres.	30
Figure 21 – Zone d'affleurement du Tertiaire (Toit).....	31
Figure 22 – Profondeur du toit de la craie séno-turonienne (m)	32
Figure 23 - Distribution statistique de la profondeur du toit de la craie séno-turonienne (m) sur le secteur de la Métropole de Chartres.....	32
Figure 24 – Profondeur du toit de la craie cénomaniennne (m)	33
Figure 25 - Distribution statistique de la profondeur du toit de la craie cénomaniennne (m) sur le secteur de la Métropole de Chartres.....	33
Figure 26 – Points d'eau (BSS eau) répertoriés au sein et à proximité immédiate des limites de la métropole de Chartres	34
Figure 27 – Forages répertoriés et ayant fait l'objet d'un essai de pompage (mesures de la transmissivité) au sein et à proximité immédiate de la métropole de Chartres.....	35
Figure 28 - Forages répertoriés et fournissant une information sur la productivité de la nappe (débit spécifique et/ou maximal exploitable) au sein et à proximité immédiate de la métropole de Chartres.	35
Figure 29 - Distribution statistique de la transmissivité de la nappe du Tertiaire (m^2/s) sur le secteur de la Métropole de Chartres.....	36
Figure 30 - Piézométrie de la nappe du Tertiaire (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique).....	37
Figure 31 - Distribution statistique du gradient hydraulique moyen estimé dans la nappe du tertiaire estimé à partir d'une piézométrie moyenne.	37
Figure 32 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique ($m^3/h/m$) et maximal exploitable (m^3/h) pour la nappe du tertiaire	38
Figure 33 - Distribution statistique de la transmissivité de la nappe de la craie (m^2/s) sur le secteur de la Métropole de Chartres	38
Figure 34 - Piézométrie de la nappe de la craie (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique).....	39
Figure 35 - Distribution statistique du gradient hydraulique moyen estimé dans la nappe de la craie estimé à partir d'une piézométrie moyenne.....	40
Figure 36 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique et maximal exploitable pour la nappe de la craie du séno-turonien (m^3/h).....	40
Figure 37 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique ($m^3/h/m$) et maximal (m^3/h) exploitable pour la nappe de la craie du cénomanien	41
Figure 38 : Note de favorabilité pour l'aquifère du Tertiaire (en haut) et de la Craie (en bas)....	44
<i>Figure 39 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de Chartres Métropole pour la géothermie sur échangeurs ouvert (gauche) et fermé</i>	

<i>(droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP-66590-FR).....</i>	51
Figure 40 : Emprise des bassins Loire-Bretagne et Seine-Normandie	52
Figure 41 : SAGE en application au niveau de Chartres Métropole.....	54
Figure 42 : NAEP des calcaires d'Etampes.....	57
Figure 43 : NAEP de la Craie séno-turonienne sous la Beauce	58
Figure 44 : Les différents périmètres de protection des ouvrages pour la consommation humaine et des sources d'eaux minérales naturelles conditionnées (source : BRGM, M. Villey)	60
Figure 45 : Agrégation des contraintes réglementaires	61
Figure 46 : Densité de besoin de chauffage (ratio entre besoin de chauffage et superficie de la commune). Source des données : CSTB, représentation : BRGM.	62
Figure 47 : Plusieurs cas de figure pour le découpage des parcelles cadastrales : a) Un bâtiment sur une parcelle. b) Un bâtiment sur plusieurs parcelles. c) Plusieurs bâtiments sur une parcelle. d) Plusieurs bâtiments sur plusieurs parcelles.	64
Figure 48 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement.	67
Figure 49 : Exemple de représentation des résultats à l'échelle du bâtiment	67
Figure 50 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par Pompe A Chaleur sur Sondes Géothermiques Verticales, agrégé à l'échelle de la Commune (à gauche) ou de l'IRIS	68
Figure 51 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par une Pompe à Chaleur sur Champ de Sondes Géothermiques Verticales en fonction de la densité de besoin de chauffage et ECS (ratio entre la somme ces deux besoins et la surface disponible). Données agrégées à la maille IRIS.....	69
Figure 52 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par Pompe A Chaleur sur aquifères, agrégé à l'échelle de la Commune (à gauche) ou de l'IRIS (à droite). Le taux est calculé sur les bâtiments nécessitant plus de 150 MWh/a de chauffage et ECS.....	70
Figure 53 : Taux de couverture des besoins de chaud et d'ECS des bâtiments existants contenus dans chaque Zone d'Activité Economique (ZAE), en prenant en compte pour chaque bâtiment la technologie (sondes ou doublet) délivrant la plus grande quantité d'énergie géothermale.	71

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Chartres Métropole est composée de 66 communes couvrant 844,9 km² au total et compte 134 332 habitants. Le Pôle Urbain regroupe 9 communes sur 8,2% du territoire (68,9 km²) et 66% de la population (89 136 habitants). La Métropole compte 92 IRIS (lots Regroupés pour l'Information Statistique) de l'INSEE.

Chartres Métropole, le CSTB et le BRGM se sont associés afin d'estimer le potentiel de la géothermie de surface pour couvrir les besoins de chaud, froid et eau chaude sanitaire des bâtiments présents sur le territoire de Chartres Métropole. Le CSTB a estimé les consommations énergétiques des bâtiments, tandis que le BRGM a mené une analyse cartographique ayant pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il une ressource géothermique exploitable à proximité immédiate des besoins identifiés par le CSTB et quelle est la technologie (sondes géothermiques verticales ou doublets) la plus adaptée à son exploitation ?
- Quel est le potentiel géothermique (adéquation entre la ressource et les besoins en surface) et le taux de couverture de la géothermie ?
- Quelle est la technologie la plus pertinente au regard des besoins et des contraintes (ressource géothermique, implantation, réglementation) ?

Le rapport est organisé comme suit : après avoir rappelé les fondamentaux de la géothermie de surface (§1.2) et dressé un rapide état des lieux de la technologie sur le territoire de Chartres Métropole (§1.3), le contexte géologique et hydrogéologique est présenté au chapitre 2 (§2.1–2.2), on en déduit une cartographie de la ressource aquifère (§2.3). Le chapitre 3 présente l'ensemble des réglementations s'appliquant à la géothermie de surface, en considérant aussi en particulier les réglementations sur l'eau souterraine (§3.2 et §3.3). Les résultats du croisement entre les ressources géothermales et les besoins des bâtiments sont présentés au chapitre 4.

1.2. LA GEOTHERMIE DE SURFACE OU GEOTHERMIE ASSISTEE PAR POMPE A CHALEUR

La géothermie désigne l'ensemble des technologies qui permettent d'exploiter la chaleur de la terre.

On considère conventionnellement comme ressource géothermale de surface la source d'énergie thermique utilisable et contenue dans le sol à une profondeur comprise entre 0 et 200 m et une température généralement inférieure à 30°C. La valorisation de cette ressource nécessite généralement la mise en place d'une pompe à chaleur qui élève ou abaisse la température extraite du sol pour la production de chaleur ou de froid. On distingue deux types de ressources : l'énergie présente directement dans le sol et l'énergie contenue dans l'eau des aquifères souterrains.

La production de chaud vise principalement à alimenter les infrastructures en eau chaude sanitaire (et chauffage des piscines), à assurer le chauffage des bâtiments et la production de chauffage pour les procédés industriels.

La production de froid vise principalement au rafraîchissement ou à la climatisation des bâtiments.

Le dispositif permettant de valoriser les ressources géothermales de surface est constitué de trois composants :

- Le sous-sol, dont on exploite l'énergie thermique,
- La pompe à chaleur : appareil thermodynamique qui permet de transférer l'énergie thermique d'une « source froide » (qui sera refroidie) vers une « source chaude » (qui sera réchauffée). En d'autres termes la pompe à chaleur permet d'amener un fluide à la température souhaitée via un dispositif utilisant de l'électricité ;
- Le côté bâtiment : équipement situé à l'intérieur des bâtiments qui transfère le chaud ou le froid vers la destination finale (bâtiment, process industriel, piscine, etc.).

Si l'objectif est de chauffer le bâtiment, le sous-sol joue le rôle de « source froide » et le bâtiment de « source chaude ». Inversement, si le bâtiment doit être climatisé, le sous-sol joue le rôle de « source chaude » et le bâtiment de « source froide ».

1.2.1. La pompe à chaleur

En mode chauffage (cf. Figure 1 haut), la pompe à chaleur consomme de l'électricité pour transférer la chaleur présente dans le sol (température d'entrée) au bâtiment. La plage typique de températures d'entrée se situe entre 0 et 5 °C pour les sondes géothermiques verticales (SGV) et entre 10 et 15 °C pour l'utilisation de l'eau souterraine. Les niveaux de température du côté bâtiment se situent dans la plage entre 25 et 35 °C pour le chauffage par le sol dans des bâtiments modernes et jusqu'à 45 à 60 °C pour l'eau chaude sanitaire. Le ratio entre la chaleur fournie au bâtiment et l'électricité consommée par la pompe à chaleur est appelé coefficient de performance (COP) ou, lorsqu'il est calculé sur la saison entière, coefficient de performance saisonnier (SPF). Ces coefficients sont très dépendants des niveaux de température de la source chaude et de la source froide : plus l'écart de température est faible entre le sol et l'émetteur côté bâtiment, plus la performance du système est élevée. Typiquement, le COP peut être compris entre 3 et 6. La pompe à chaleur (PAC) peut aussi produire du froid par climatisation (cf. Figure 1 bas).

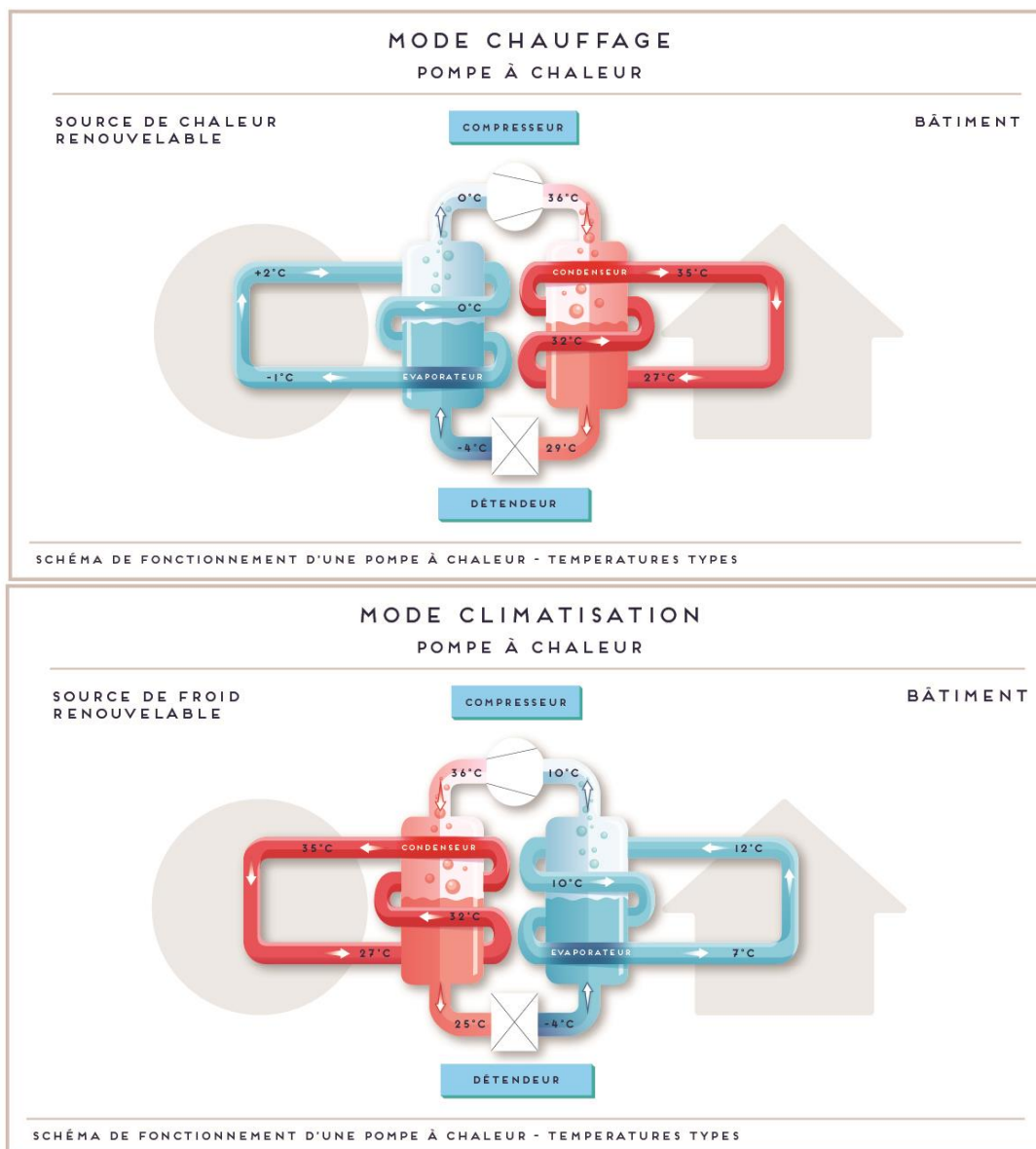


Figure 1 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM

1.2.2. Côté sol

Côté sol, plusieurs types d'échangeurs géothermiques permettent d'échanger de la chaleur entre le sous-sol et l'installation de surface.

Les **Sondes Géothermiques Verticales** (SGV) sont des forages parcourus par un ou deux tubes en U dans lesquels un fluide caloporteur (eau ou un mélange d'eau et de mono-propylène glycol) circule pour échanger du chaud ou du froid par diffusion (cf. Figure 2 gauche). Les sondes servent autant à de petites installations, comme des maisons individuelles (SGV unique ou multiples), que des installations plus importantes : hôtels, résidences, bureaux, complexes sportifs ou ZAC (champs de SGV). **Les systèmes SGV sont particulièrement efficaces s'ils servent à des fins de chauffage et de refroidissement combinés.** En effet la chaleur injectée dans le sol pendant l'été en périodes de refroidissement peut être réutilisée pour le chauffage en hiver. Par conséquent, les champs de SGV sont très efficaces dans les bâtiments dont la demande de refroidissement est relativement élevée, comme les bureaux ou les hôpitaux.

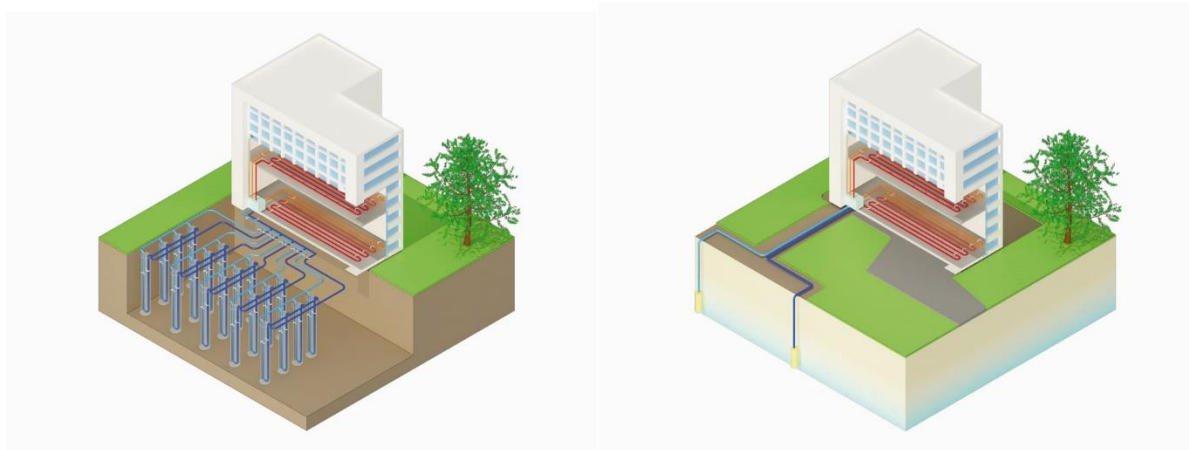


Figure 2 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe

Les **systèmes en boucle ouverte** (aussi nommés **doublets sur nappe**) échangent la chaleur directement avec l'eau souterraine, extraite par un ou plusieurs puits producteurs et généralement réinjectée dans le même aquifère par un ou plusieurs autres puits injecteurs (cf. Figure 2 droite). Le système est nommé « ouvert » car le fluide qui parcourt le dispositif est prélevé dans un aquifère sous-terrain et réinjecté également dans ce même aquifère (contrairement aux SGV où un fluide secondaire circule en boucle fermée). Les caractéristiques des masses d'eau souterraine, comme leur profondeur, leur température et la vitesse d'écoulement de la nappe, influencent la performance de l'installation de surface. Ainsi, l'installation d'un système en boucle ouverte nécessite des connaissances hydrogéologiques spécifiques à l'échelle locale. Si un aquifère productif est disponible à une profondeur raisonnable, l'utilisation de systèmes en boucle ouverte présente des avantages par rapport aux systèmes en boucle fermée.

En outre, la géothermie de surface peut permettre de valoriser directement (sans apport de la pompe à chaleur) la température du sous-sol pour le rafraîchissement naturel d'un bâtiment en été. Cette technique s'appelle le **géocooling**. Il s'agit d'un mode de refroidissement très efficace, et les seules consommations électriques sont dues aux pompes de puits et aux circulateurs du circuit de distribution. La pompe à chaleur n'étant pas sollicitée, cela rend cette solution particulièrement économique. Le géocooling peut être mis en place pour le refroidissement de machines et de procédés industriels, de centres de données, le confort thermique dans les bâtiments, etc. Néanmoins, si les besoins de frais dépassent les capacités du sous-sol, par exemple si la température du sous-sol est trop élevée pour l'usage souhaité, alors la mise en place d'une pompe à chaleur pour la production du froid devient nécessaire.

Enfin, il existe également un troisième type d'échangeur géothermique, les **échangeurs très superficiels**. Tout comme les sondes géothermiques verticales, ce sont des échangeurs en boucle fermée. Ils sont installés à une profondeur d'environ un à quatre mètres et fréquemment utilisés pour des maisons individuelles puisque leur installation nécessite une zone non construite d'une surface du même ordre de grandeur que la surface chauffée du bâtiment. Il s'agit par exemple des échangeurs horizontaux et corbeilles. Ce type d'échangeurs n'est pas spécifiquement étudié dans le cadre de la présente étude. Ils pourraient se substituer à des installations sur sondes géothermiques verticales dans le cas de parcelles de maisons individuelles suffisamment étendues.

1.3. ETAT DES LIEUX DE LA GEOTHERMIE SUR LE TERRITOIRE

Sept installations sur sondes géothermiques verticales et vingt-et-une installations sur doublets ont été identifiées via l'analyse des données de l'Observatoire de la Géothermie (Baudouin *et al.*, 2022). Six des sept installations sur sondes sont de petite taille (longueur forée inférieure à 500 m avec une médiane à 173 m), ce qui suggère qu'elles alimentent des maisons individuelles ou de petits locaux publics ou tertiaires. Des installations sur doublets existent depuis les années 1980, tandis que les installations sur sondes sont relativement plus récentes (cf. Figure 3). Il est néanmoins difficile d'estimer la quantité de chaud et de froid fournie par ces installations.

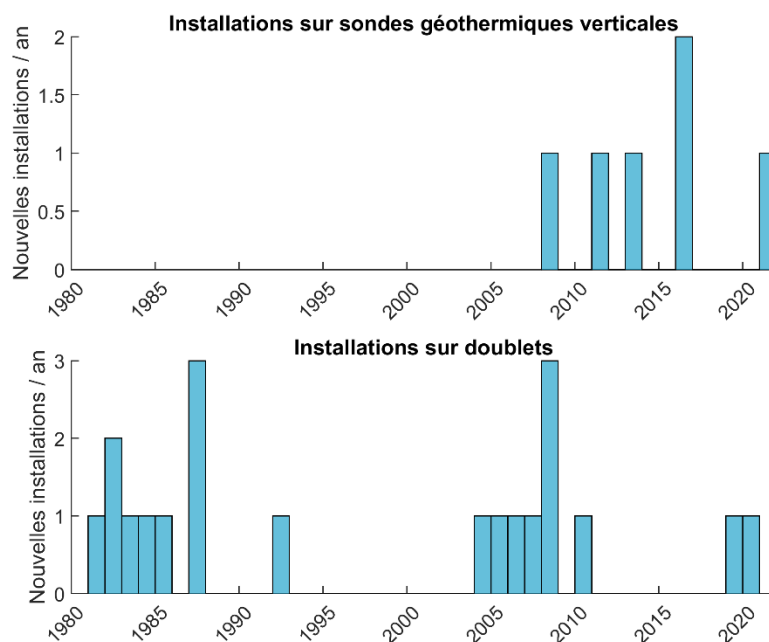


Figure 3 : Nombre de nouvelles installations annuelles pour chacune des deux technologies. Source des données : (Baudouin *et al.*, 2022)

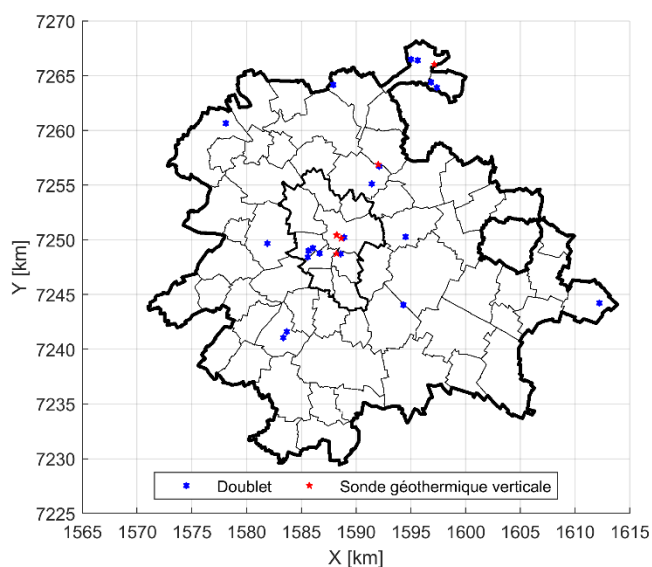


Figure 4 : Localisation des installations référencées dans l'observatoire de la géothermie de surface pour chacune des deux technologies. Source des données : (Baudouin *et al.*, 2022)

2. Contexte géologique et hydrogéologique

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE : ETUDES PRECEDENTES

Chartres et sa Métropole sont situées au sein du département de l'Eure-et-Loir. Ce département se situe sur la bordure ouest du bassin de Paris, ensemble géologique qui correspond à une large cuvette centrée sur l'île de France (Figure 5).

Dans ce département, L'Eure et le Loir séparent deux domaines géologiques (*Etude hydrogéologique de l'aquifère de la Craie dans le département d'Eure-et-Loir*, n.d.) :

- A l'Est, la série sédimentaire tertiaire constituée de calcaires lacustres (calcaires d'Etampes, de Beauce sensu stricto, de l'Orléanais et de Morancez), de marnes (marnes de Voise, de Blamont et de Villeau) et de sédiments détritiques fluviatiles (grès ladères) ou marins (Sables de Fontainebleau),
- A l'Ouest, se développent les couches crétacées disposées en auréoles et recouvertes d'argiles à silex. Ces couches sont essentiellement d'âge Crétacé supérieur et sont constituées de craies plus ou moins riches en silex, datées du Cénomaniens au Campanien (Ménillet *et al.*, 1994; Quesnel *et al.*, 1996). Elles sont de plus en plus récentes du sud-ouest vers le nord-est et les épaisseurs de la série crayeuse, qui varient entre 150 et 300 m, augmentent dans cette même direction vers le centre du bassin parisien.

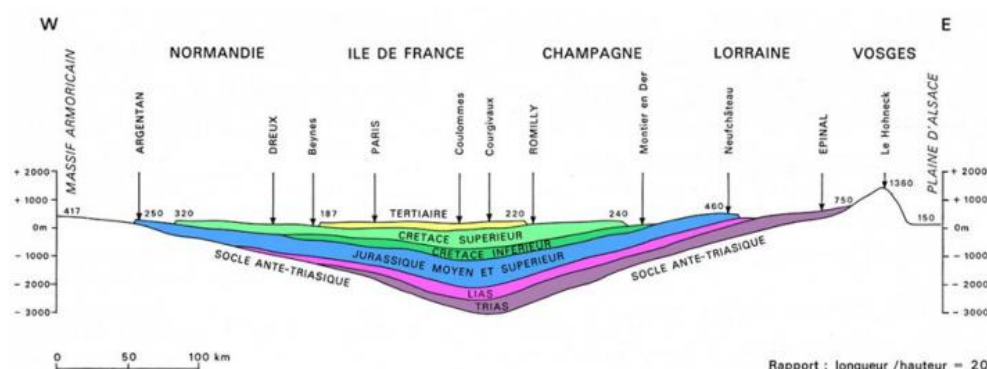


Figure 5 : Coupe schématique du Bassin parisien

Le département de l'Eure-et-Loir est localisé entre Perche et Beauce qui est une zone particulièrement complexe du fait qu'elle est le siège de divergences des écoulements au sein des aquifères et en surface (ligne de partage des eaux entre les bassins hydrographiques Seine-Normandie et Loire Bretagne). Au sein de ce département, la métropole de Chartres est localisée au niveau de la zone de transition entre le domaine crayeux et la Beauce (Figure 6).

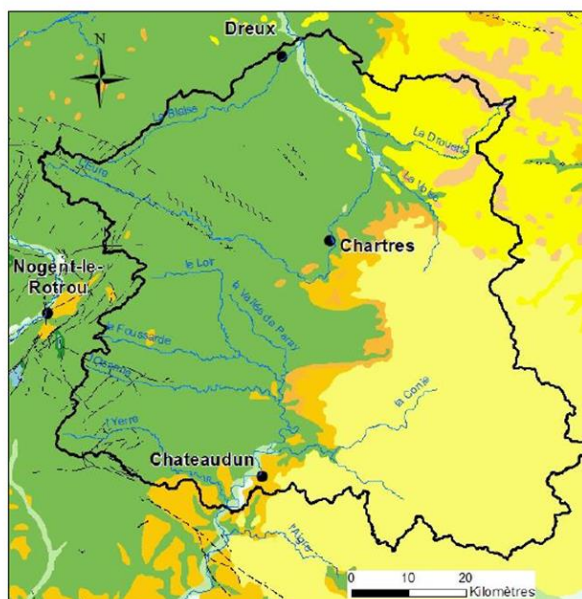


Figure 6 – Zone de transition entre le domaine crayeux (en vert) et le domaine tertiaire/Beauce (en jaune) dans le département de l'Eure-et-Loir autour de Chartres Métropole, sur fond de carte géologique au 1 / 1 000 000 (©BRGM), extrait de (Arnaud et al., 2020).

Peu d'études récentes se sont attachées à décrire la géologie et l'hydrogéologie de la région de Chartres, néanmoins les travaux réalisés qui ont pour finalité de produire un modèle hydrodynamique de la nappe de la craie sur le département ont servi de support à la réalisation de cette étude, notamment par l'apport de synthèse de données géologiques et hydrogéologiques et d'un modèle géologique sur le département (Arnaud et al., 2022, p. 2, 2020). Les informations concernant le contexte géologique et hydrogéologique sont donc extraites en majeure partie du rapport RP-70149-FR (Arnaud et al., 2022, p. 2).

2.1.1. Contexte géologique à l'échelle du département

Au sein du département de l'Eure-et-Loir, les différentes formations géologiques identifiées au sein du département sont :

a) Les formations sédimentaires du Crétacé :

Les différentes formations sur Crétacé (du Cénomanién inférieur au Campanien) se situent principalement sous couverture des formations superficielles et du Tertiaire. Les affleurements de ces formations sont rares, limités à certaines vallées encaissées au nord de Chartres et le long du Loir au sud de Bonneval. Les formations crayeuses sont quant à elles largement masquées par les argiles à Silex (un exemple de cette répartition est donné en Figure 7).

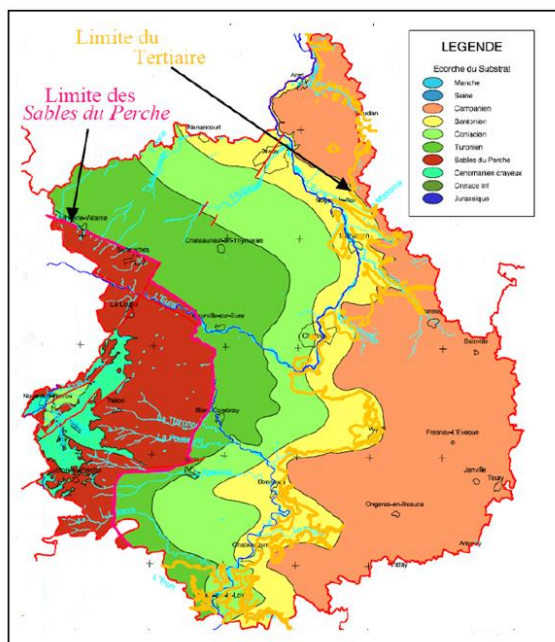


Figure 7 - Formations du Crétacé sous les formations superficielles et le Tertiaire (d'après Quesnel, 1997).

b) L'ensemble des craies :

La **craie cénomaniennne** début par une alternance de craie glauconieuse du Cénomanienn inférieur et de marnes sableuses en bancs peu épais (de 25 à 50 mètres sur Nogent-le-Rotrou et de 116 mètres sur Châteaudun). La craie peut être recouverte par la craie glauconieuse de Théligny (ou Rouen) du Cénomanienn moyen à supérieur dont l'épaisseur moyenne est comprise entre 25 et 30 mètres. La craie cénomaniennne constitue le mur de l'aquifère de la craie sus-jacente.

La **craie marneuse** attribuée au **Turonien**, craies argileuses ou marneuses, dont l'épaisseur varient de 30 à 60 mètres.

Le **Coniacien et le Santonien**, sont des craies blanches à jaunâtres, difficiles à différencier et dont l'épaisseur de l'ensemble varie de 80 à 130 mètres.

Enfin, le **Campanien** est caractérisé par une craie blanche, présent à l'Est du département (Figure 7).

c) Les sables du Perche (Cénomanienn Supérieur) :

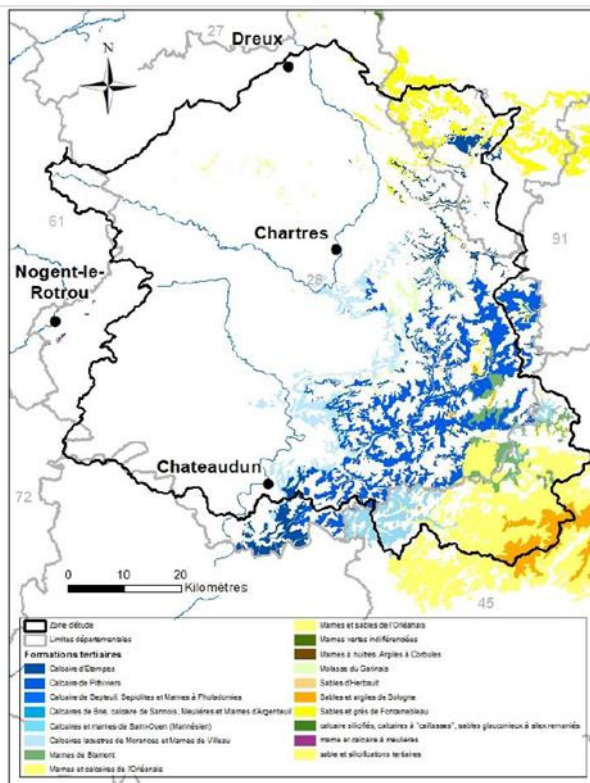
Le Cénomanienn supérieur présente un faciès sableux à l'ouest du département ; ce sont les sables du Perche. Dans le département, leur épaisseur peut atteindre 50 mètres.

d) Les formations du Tertiaire :

Reposant en discordance au-dessus de la craie, les formations géologiques constitutives du bassin de Beauce sont d'âge éocène à miocène inférieur (Aquitanienn). Les dépôts correspondent à une alternance de calcaires et de marnes intégrant des intercalaires sablo-argileux. Le schéma litho-stratigraphique des formations de Beauce, des plus anciennes aux plus récentes a été proposé de la manière suivante :

- Calcaires éocènes,
- Argiles vertes et marnes supra-gypseuse

- Calcaires de Brie
- Marnes à huîtres,
- Sables et grès de Fontainebleau
- Calcaires d'Etampes,
- Molasse du Gâtinais
- Calcaires de Pithiviers
- Marnes de Blamont
- Calcaires de l'Orléanais



e) *Les formations superficielles :*

Les formations superficielles sont très développées dans le département. Celles-ci peuvent être globalement distinguées par :

- Les formations résiduelles à silex et les biefs et limons à silex dont l'épaisseur varie de quelques mètres à quelques décamètres.
- Les limons des plateaux et loess, dont la puissance varie du bord des plateaux vers le centre, où elle peut atteindre plusieurs mètres.
- Les colluvions et les formations de pente.
- Le complexe alluvionnaire qui tapisse les fonds de vallées, avec les alluvions récentes, les graviers de fond et les alluvions anciennes.

Ces formations superficielles, très largement présentes à l’affleurement, peuvent localement héberger des nappes perchées.

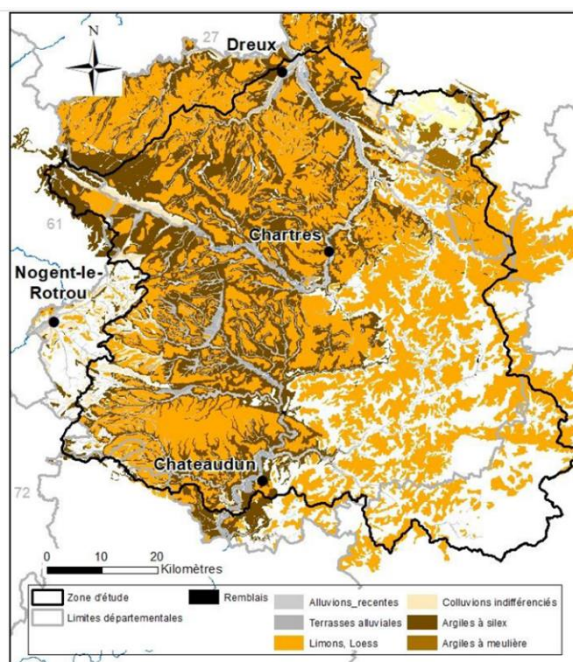


Figure 8 - Affleurements des formations superficielles

2.1.2. Contexte hydrogéologique à l'échelle du département

a) Système aquifère des calcaires de Beauce (107AA, 107AF)

Un atlas hydrogéologique de la Beauce a été réalisé en 1975 par le BRGM (Desprez *et al.*, 1975).

Les calcaires de Beauce occupent le quart sud-est de l'Eure-et-Loir. Ils surmontent la craie à l'est de l'Eure et du Loir et développent vers l'est jusqu'à atteindre une cinquantaine de mètres d'épaisseur en limite du Loiret. Ce calcaire est intensément fracturé, parfois karstique. Il constitue un aquifère continu très transmissif caractérisé par des écoulements rapides.

Les entités hydrogéologiques BDLISA constitutives des calcaires de Beauce sont :

- Calcaires de Pithiviers et de l'Orléanais de l'Aquitainien (Miocène inférieur) du Bassin parisien (107AA). La nappe des calcaires de Pithiviers est libre.
- Calcaires d'Etampes du Rupélien (Oligocène inférieur) du Bassin parisien (107AF). La nappe des Calcaires d'Etampes est captive sur une partie importante de la Beauce, au nord de la Loire, lorsque la Molasse du Gâtinais la sépare des calcaires de Pithiviers sous-jacents. Les calcaires d'Etampes, sous la Molasse du Gâtinais, constituent le réservoir principal pour l'alimentation en eau potable (AEP).

b) Système aquifère multicouche de l'Eocène (113)

Au sein du département, l'aquifère multicouche de l'Eocène est essentiellement représenté par les calcaires lacustres. Ils affleurent en bordure ouest du domaine tertiaire. Le caractère aquifère de ces formations est lié à la fracturation des calcaires, voire à leur karstification.

La nappe est libre à l'affleurement et devient captive en Beauce (sous couverture). A l'affleurement, la recharge se fait directement par les précipitations.

c) Les argiles et sables de l'Yprésien inférieur (117AC)

Dans le département, le domaine est représenté par les argiles, sables et lignites de l'Yprésien inférieur (117AC03) et les argiles plastiques de l'Yprésien inférieur (117AC05). Seule la première entité affleure localement entre l'Eure et la Voise.

Les argiles plastiques définissent le substratum imperméable des sables de l'Yprésien sus-jacents.

d) Craie du Séno-turonien (121AA, 121AP, 121AS) :

Le Crétacé supérieur, du Sénonien (Campanien, Santonien et Coniacien) au Turonien, est constitué de craie franche dans sa partie supérieure, de plus en plus marneuse à partir du Turonien, vers le bas. Bien que poreuse, la craie est généralement peu perméable. Elle contient de l'eau lorsqu'elle est fracturée, ou bien altérée. La craie est altérée dans sa partie supérieure, principalement sur les 30 premiers mètres. En Eure-et-Loir, l'aquifère de la craie affleure ou n'est recouverte que par les formations superficielles entre les Sables du Perche à l'ouest et les premiers affleurements du tertiaire sédimentaire en limite est.

e) Les sables du Perche ou du Cénomaniens du Bassin Parisien (123AC) :

Les sables affleurent localement à l'extrême ouest du département dans les vallées et s'enfoncent sous les formations crayeuses et marneuses du Turonien inférieur vers l'est. Leur épaisseur est de plus de 30 m aux affleurements. Elle se réduit rapidement en profondeur et les sables disparaissent approximativement au niveau d'une ligne passant par Courville-sur-Eure/Bonneval. Elle a pour substratum les marnes et la craie marneuse, sableuse et glauconieuse du Cénomaniens.

f) Les marnes et craies marneuses du Cénomaniens (123BA et 123BS) :

La craie marneuse du Cénomaniens est considérée comme semi-perméable et sert de substratum à la craie séno-turonienne supérieure. Cette formation de base renferme de petits niveaux aquifères dans les minces bancs de craie.

2.2. DONNEES DU SOUS-SOL DISPONIBLES AU NIVEAU DE CHARTRES METROPOLE

2.2.1. Modèle géologique

Les hydrosystèmes de la zone étant complexes, le modèle réalisé cherche donc à offrir une représentation simplifiée du contexte naturel. Ce modèle a pour finalité la réalisation d'un modèle hydrogéologique, ce qui sous-entend que la représentation est axée sur la succession des formations de perméabilité contrastée qui constituent l'hydrosystème.

Au regard des aquifères en jeu, le modèle est constitué des couches suivantes :

Les formations géologiques modélisées et les codes correspondants sont présentés en Tableau 1. Pour des raisons pratiques, les Limons, les Colluvions et les Argiles à Meulière n'ont pas été modélisés ; ces formations ont finalement été regroupées avec les couches modélisées affleurantes.

Tableau 1 - Tableau présentant les formations géologiques modélisées et les codes GDM-MLY correspondants (en bleu les systèmes aquifères, en gris les semi-perméables)

Code utilisé pour la modélisation	FORMATIONS GEOLOGIQUES
/	Limons
/	Colluvions
ALLU	Alluvions
/	Argiles à Meulières
TERT	Recouvrement + multicouche Beauce (Oligo-Miocène) + multicouche Eocène
ARGS	Argiles de l'Yprésien inf. + Formations détritiques éocènes + Argiles à silex
CRAS	Craie blanche à silex du Séno-turonien
CRAC	Craie marneuse du Cénomanien moyen – supérieur à Turonien inférieur
PERC	Sables du Perche
CENI	Marnes, Gaizes, Sables du Maine, faciès crayeux du Cénomanien inférieur, Argiles du Gault et formations sous-jacentes (Sables verts, Jurassique)

a) Forages

Les forages utilisés pour réaliser le modèle géologique sont issus d'une sélection des forages numériques de la Banque du Sous-Sol du BRGM (BSS).

Afin d'augmenter la précision du modèle sur les bordures externes de la zone d'étude, les forages situés dans une zone de 10 km au-delà des limites de la zone d'étude (limite externe rouge sur la Figure 9) ont été également pris en compte et utilisés pour interpoler les surfaces. Au total, 2235 forages disponibles dans cette zone étendue ont été codés selon la pile sédimentaire à modéliser (Arnaud *et al.*, 2022).

Au final, ce sont 1160 forages qui ont été retenus et utilisés pour réaliser le modèle géologique. 84 forages incohérents ou problématiques pour la modélisation (descriptions géologiques trop imprécises) n'ont pas été pris en compte. Pour plus de détails sur la réalisation du modèle, le lecteur pourra se reporter au rapport RP-72056-FR (Arnaud *et al.*, 2022).

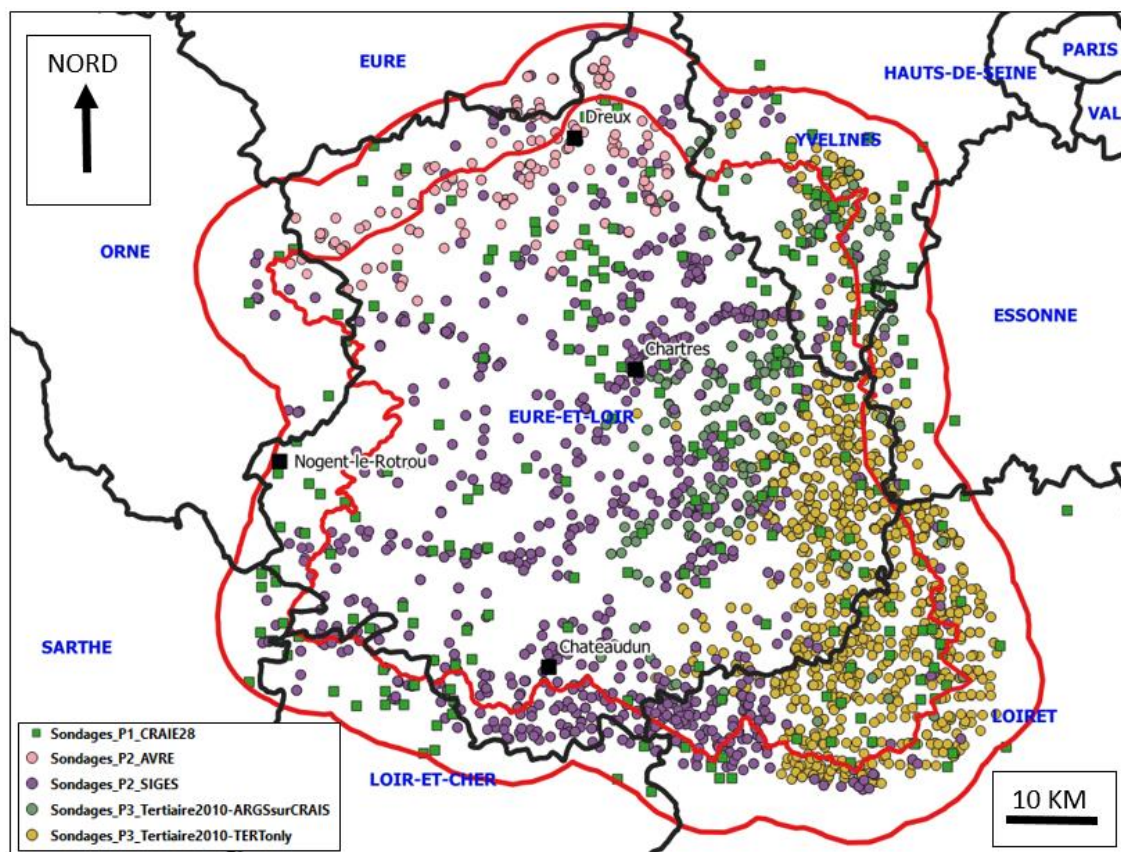


Figure 9 - Répartition des données de forages disponibles au niveau de la zone d'étude (limite rouge interne) et dans une zone de 10 km autour (limite rouge externe = "buffer"). Les points représentés par des ronds roses, violets, vert foncés et jaune/kaki correspondent aux forages utilisés pour d'anciens modèles géologiques.

b) Limites d'extension

Certaines formations géologiques n'étant pas présentes sur toute la zone d'étude, des limites d'extension ont été utilisées pour limiter les calculs. Trois formations ou ensembles de formations sont concernés :

- Les Alluvions : dans ce cas, seuls les polygones des cartes géologiques harmonisées au 1/50 000 des vallées de l'Eure, de la Blaise, de la Voise, du Loir, de l'Ozanne et de l'Yerre ont été conservés (limite rouge sur la Figure 10). Les cours d'eau secondaires n'ayant pas un intérêt particulier pour l'étude hydrogéologique n'ont pas été conservés.
- Les formations du Tertiaire (multicouche Beauce et Eocène) : la limite d'extension utilisée est également celle des cartes géologiques harmonisées au 1/50 000 (limite bleue sur la Figure 10). Les buttes témoins les plus importantes, en terme de taille, ont été conservées pour la modélisation et les plus petites n'ont pas été considérées.
- Les Sables du Perche : l'étude bibliographique réalisée lors de la 1^{ère} phase du projet (Arnaud *et al.*, 2020) a permis de montrer que les Sables du Perche sont seulement présents dans la partie ouest de la zone d'étude et n'étaient pas retrouvés en forage au-delà d'une certaine limite (en orange sur la Figure 10). Cette limite d'extension est issue

de la BDLISA¹ et a été adapté dans le secteur de la faille de Senonches suite aux travaux menés pour les besoins du modèle géologique du bassin de l'Avre (David, 2015).

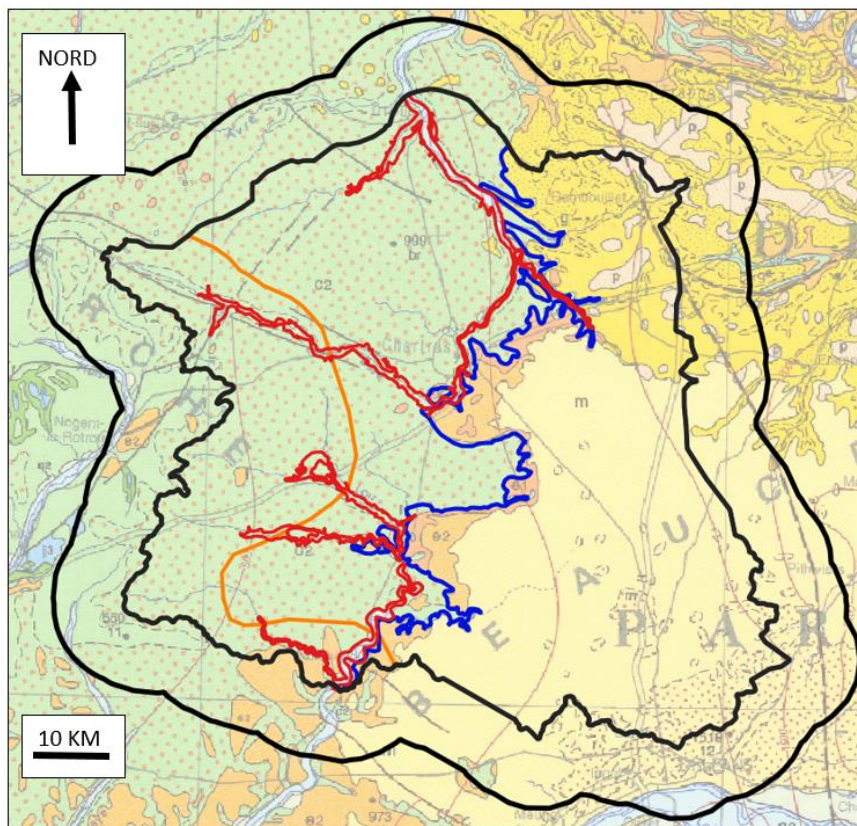


Figure 10 - Limites d'extension utilisées pour la modélisation sur fond de carte géologique de la France à l'échelle 1/1 000 000. En orange : limite d'extension des Sables du Perche (les sables sont localisés à l'ouest de la limite) ; En bleu : limite des formations du Tertiaire (le Tertiaire est localisé à l'ouest de la limite); En rouge : limite des Alluvions (vallées principales)

c) Zoom sur la zone d'intérêt de la métropole de Chartres :

Un zoom sur la zone d'intérêt de cette étude est présenté dans la Figure 11 suivante. Ce zoom permet de montrer que les sables du Perche sont quasi-inexistants sur la zone d'étude (métropole de Chartres), que les formations du Tertiaire (multicouche Beauce et Eocène) ne sont présentes qu'à la limite est/sud-est de la métropole et que les alluvions traversent la métropole selon une direction globale nord-est/sud-ouest.

¹ référentiel hydrogéologique français - <https://bdlisa.eaufrance.fr/>

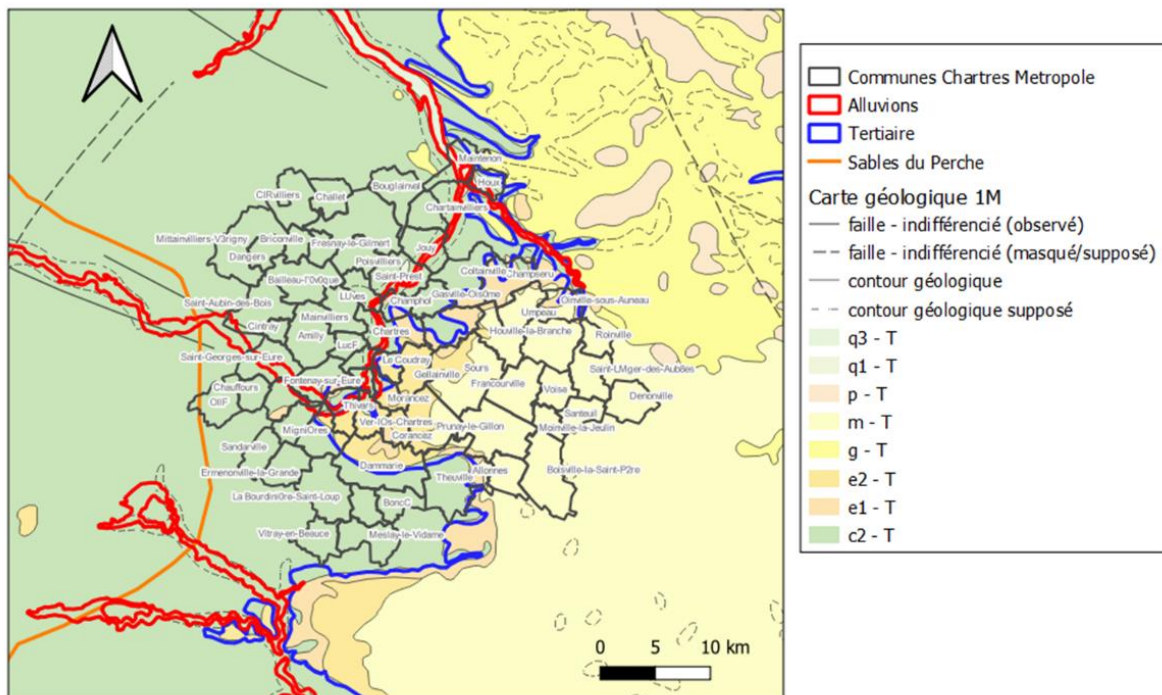


Figure 11 - Zoom sur la zone d'intérêt (métropole de Chartres) avec les limites d'extension utilisées En orange : limite d'extension des Sables du Perche ; En bleu : limite des formations du Tertiaire (multicouche Beauce et Eocène) ; En rouge : limite des Alluvions (vallées principales).

d) Coupes verticales selon deux profils:

Afin de pouvoir visualiser la distribution verticale des différentes unités et leur configuration, deux coupes verticales selon des profils est-ouest (Figure 12) et nord-sud sont proposés ci-dessous :

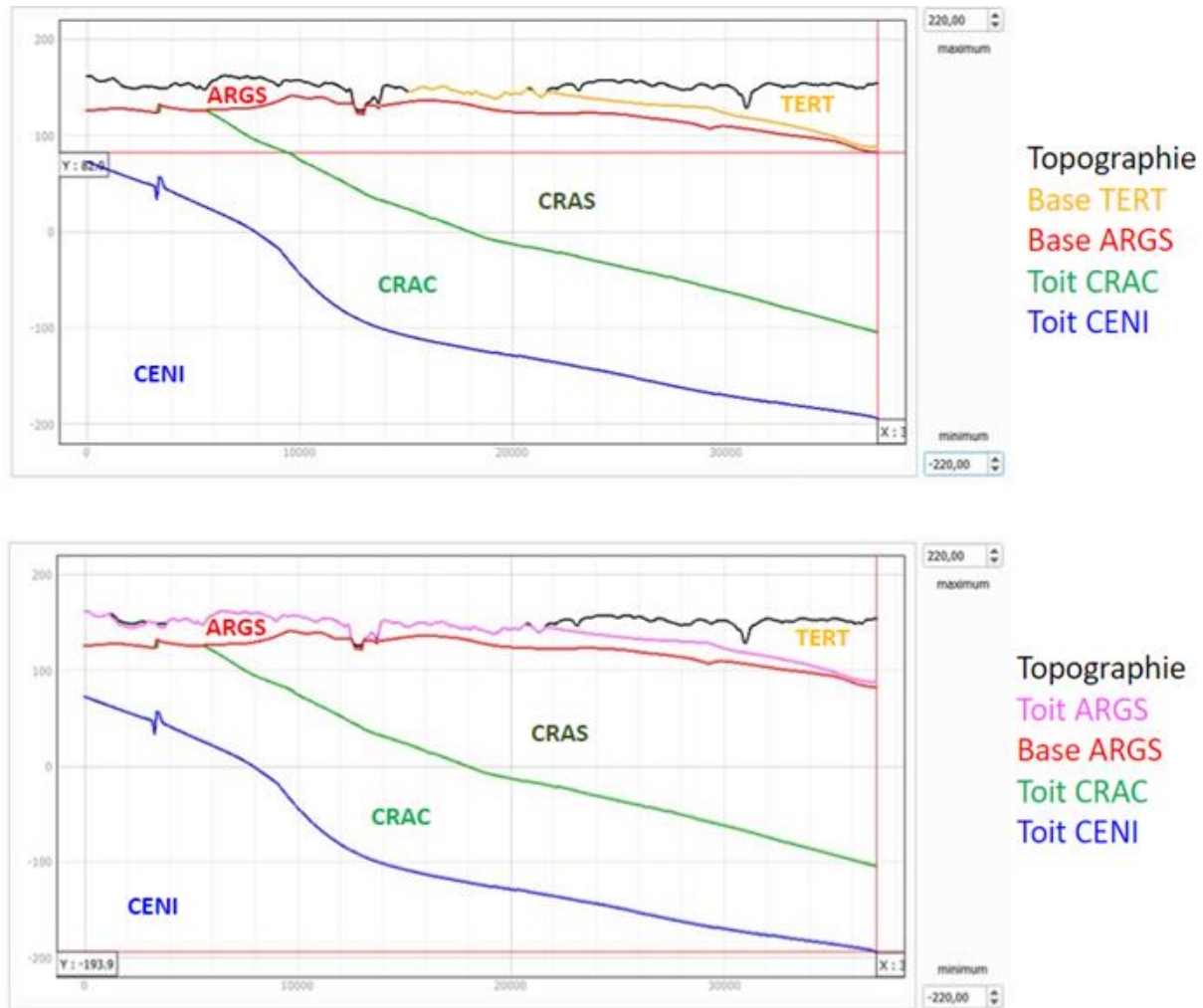


Figure 12 – Profil est-ouest faisant apparaître la disposition des différentes couches, où « Base » correspond au mur de la formation et « Toit » au toit de la formation, ARG : Argiles de l'Yprésien inf. + Formations détritiques éocènes + Argiles à silex ; TERT : Recouvrement + multicouche Beauce (Oligo-Miocène) + multicouche Eocène ; CRAS : Craie blanche à silex du Séno-turonien ; CRAC : Craie marneuse du Cénomanien moyen – supérieur à Turonien inférieur et CENI : Marnes, Gaizes, Sables du Maine, faciès crayeux du Cénomanien inférieur, Argiles du Gault et formations sous-jacentes (Sables verts, Jurassique)

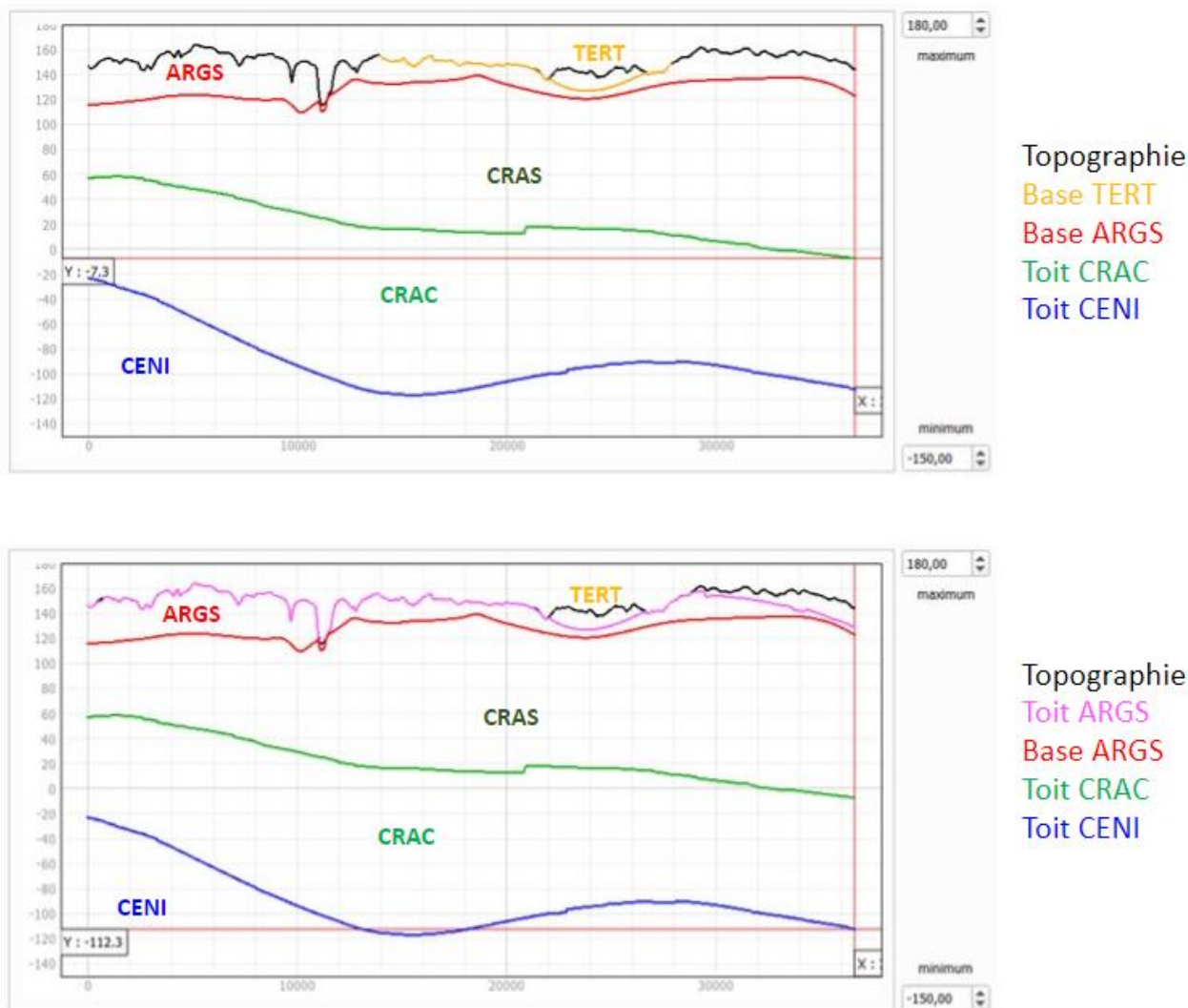


Figure 13 - Profil nord-sud faisant apparaître la disposition des différentes couches, où « Base » correspond au mur de la formation et « Toit » au toit de la formation, ARG : Argiles de l'Yprésien inf. + Formations détritiques éocènes + Argiles à silex ; TERT : Recouvrement + multicouche Beauce (Oligo-Miocène) + multicouche Eocène ; CRAS : Craie blanche à silex du Séno-turonien ; CRAC : Craie marneuse du Cénomanien moyen – supérieur à Turonien inférieur et CENI : Marnes, Gaizes, Sables du Maine, faciès crayeux du Cénomanien inférieur, Argiles du Gault et formations sous-jacentes (Sables verts, Jurassique)

Dans le secteur considéré de la métropole de Chartres, trois aquifères principaux sont répertoriés :

La nappe de la Craie séno-turonienne (121AA, 121AP, 121AS) :

Le Crétacé supérieur, du Sénonien (Campanien, Santonien et Coniacien) au Turonien, est constitué de craie franche dans sa partie supérieure, de plus en plus marneuse à partir du Turonien, vers le bas. Bien que poreuse, la craie est généralement peu perméable. Elle contient de l'eau lorsqu'elle est fracturée, ou bien altérée. La craie est altérée dans sa partie supérieure, principalement sur les 30 premiers mètres. En Eure-et-Loir, l'aquifère de la craie affleure ou n'est recouverte que par les formations superficielles entre les Sables du Perche à l'ouest et les premiers affleurements du tertiaire sédimentaire en limite est.

La nappe des craies marneuses du Cénomanien (123BA et 123BS) :

La craie marneuse du Cénomanien est considérée comme semi-perméable et sert de substratum à la craie séno-turonienne supérieure. Cette formation de base renferme de petits niveaux aquifères dans les minces bancs de craie.

La nappe des formations du Tertiaire (multicouche Beauce et Eocène):

Les calcaires de Beauce correspondent à un calcaire intensément fracturé, parfois karstique. Il constitue un aquifère continu très transmissif caractérisé par des écoulements rapides. Les entités hydrogéologiques BDLISA constitutives des calcaires de Beauce sont :

- Calcaires de Pithiviers et de l'Orléanais de l'Aquitainien (Miocène inférieur) du Bassin parisien (107AA).
- Calcaires d'Étampes du Rupélien (Oligocène inférieur) du Bassin parisien (107AF).

L'aquifère multicouche de l'Eocène est essentiellement représenté par les calcaires lacustres (calcaire de l'Eocène-Oligocène inférieur). Il s'agit de calcaires francs, vacuolaires ou compacts plus ou moins silicifiés, calcaires farineux, marnes avec des interlits d'argile. Le caractère aquifère de ces formations est lié à la fracturation des calcaires, voire à leur karstification.

Enfin, compte tenu du caractère extrêmement vulnérable des alluvions d'âge quaternaire (formations réduites, soumises aux aléas climatiques de productivité et de plus sensibles aux effets de pollutions dus aux activités anthropiques) et de leur niveau sub-affleurant peu adapté, il convient de ne pas considérer ces formations comme un objectif.

2.2.2. Aquifères identifiés

a) *Épaisseurs des formations sur la métropole*

- Alluvions (ALLU):

Sur la métropole les alluvions affleurent et ont une épaisseur de l'ordre de quelques mètres. Cette épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres (Figure 14).

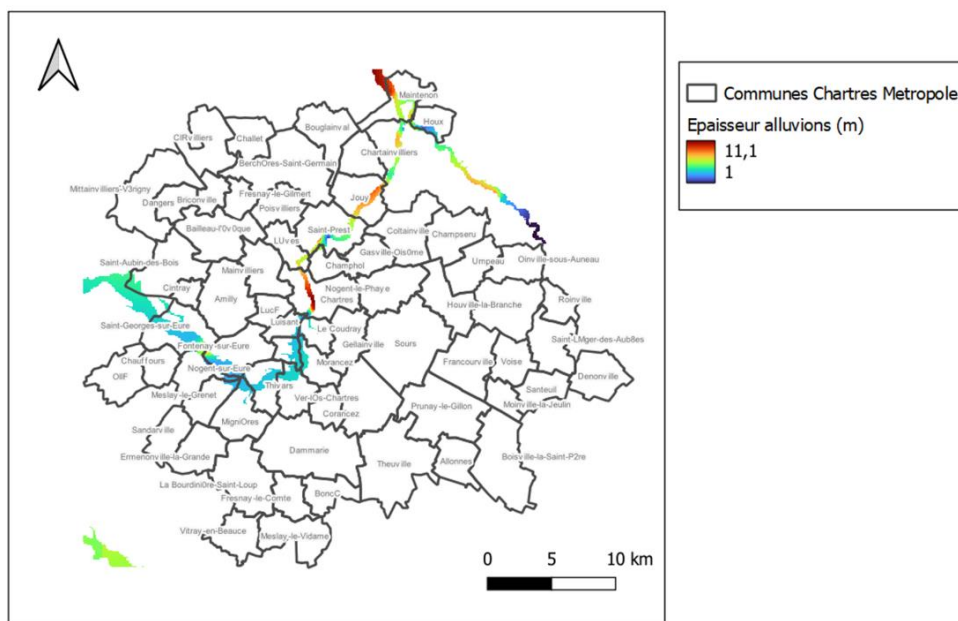


Figure 14 - Epaisseur des alluvions (m)

- Tertiaire (Calcaires, TERT):

Sur la métropole, le Tertiaire n'est présent qu'au Sud-Est de la métropole. Son épaisseur varie selon une direction globalement Ouest-Est (voir Figure 12). Son épaisseur peut atteindre plus de 67 mètres sur la commune de Denonville, située à l'extrémité est de la métropole. Sur les communes au sud-est son épaisseur est de l'ordre d'une trentaine de mètres (Figure 15). L'épaisseur moyenne du Tertiaire (estimée à partir des cartes du toit et du mur) est d'environ 19 m, avec une valeur médiane de 16.1 m, le premier quartile est de 1.5 m et le dernier quartile 31.3 m.

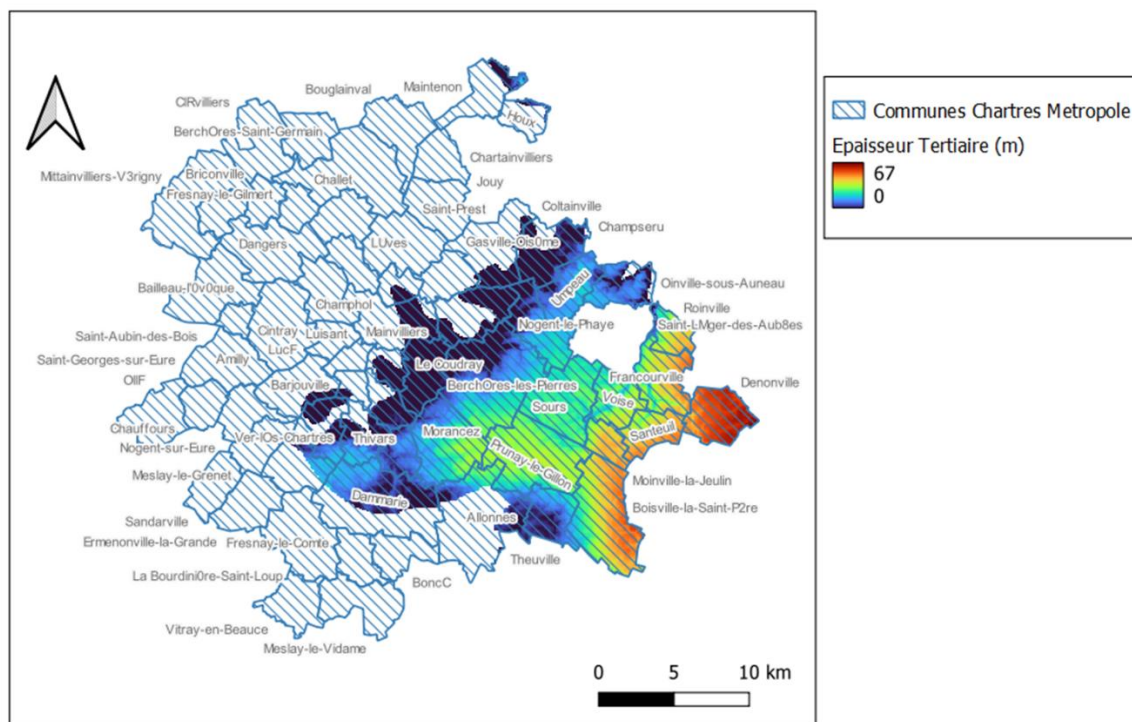


Figure 15 – Epaisseur du Tertiaire (m)

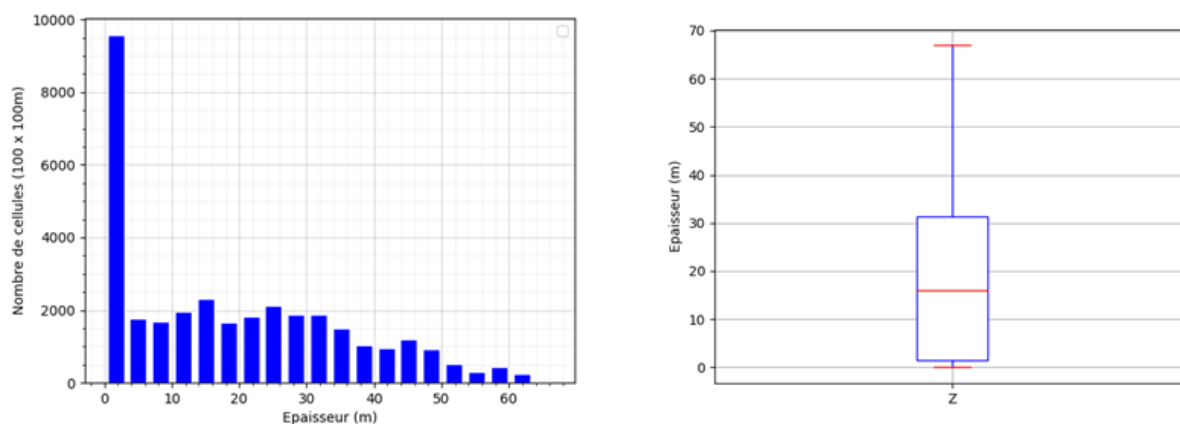


Figure 16 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère Tertiaire sur le secteur de la Métropole de Chartres.

- Craie du Séno-turonien (CRAS):

La craie séno-turonienne est relativement importante sur la métropole à l'exception des communes situées à l'ouest/nord-ouest où celle-ci disparaît au profit de la craie cénomaniennne (Figure 12). L'épaisseur de la craie séno-turonienne est de l'ordre d'une centaine de mètres au centre de la métropole et son épaisseur atteint presque 200 mètres d'épaisseur à l'est (Figure 17). L'épaisseur moyenne de la craie du séno-turonien (estimée à partir des cartes du toit et du mur) est d'environ 89 m, avec une valeur médiane de 93.7 m, le premier quartile est de 27.2 m et le dernier quartile 144.8 m (Figure 18).

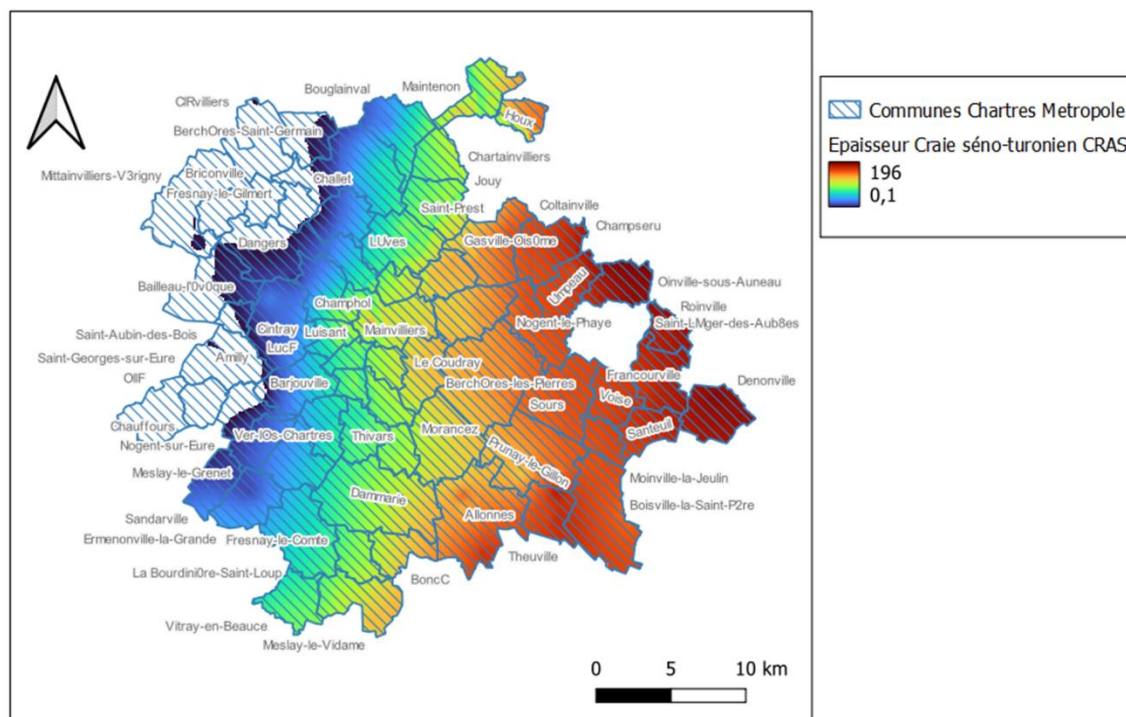


Figure 17 – Epaisseur de la craie sénno-turonienne (m)

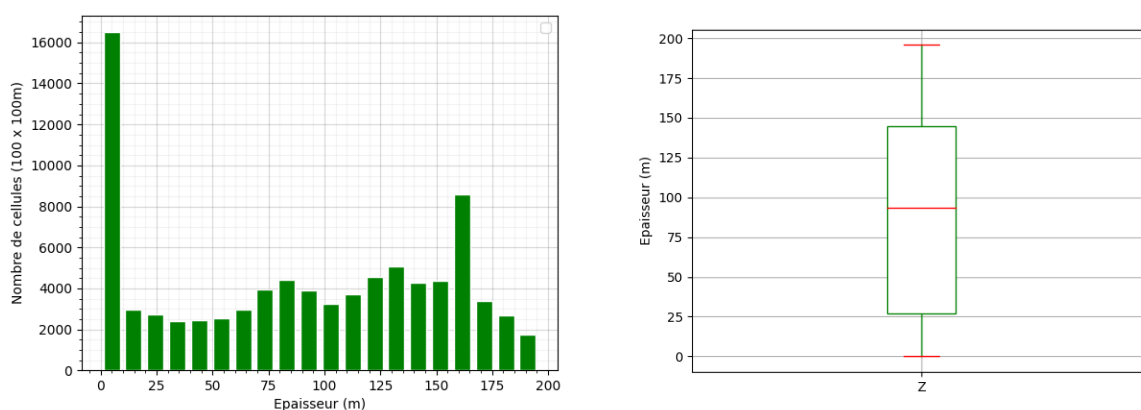


Figure 18 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la craie sénno-turonienne sur le secteur de la Métropole de Chartres.

- Craie Marneuse du Cénomanien (CRAC):

La craie cénonanienne est quant à elle présente sur l'ensemble de la métropole. Son épaisseur est maximale à proximité du centre de la métropole, avec une épaisseur maximale de 150 m. Sur l'ensemble de la métropole son épaisseur moyenne est de l'ordre d'une centaine de mètres (Figure 19). Son épaisseur peut néanmoins être plus limitée sur la bordure ouest/sud-ouest de la métropole, avec une épaisseur de l'ordre de 60 à 70 m.

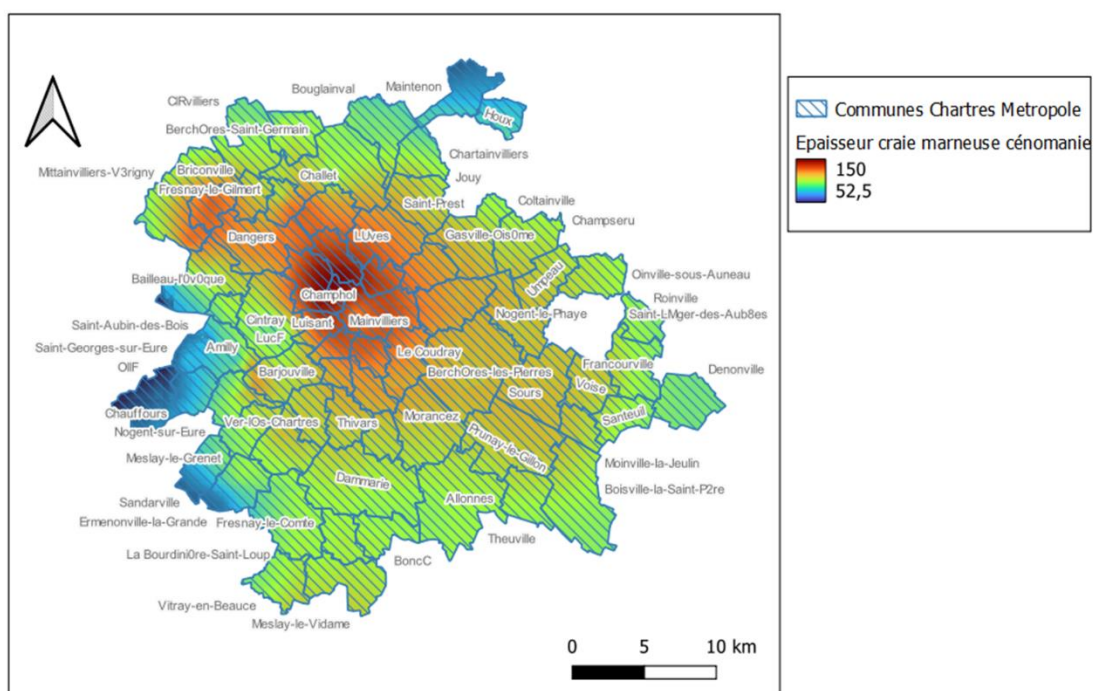


Figure 19 – Epaisseur de la craie cénomanienne (m)

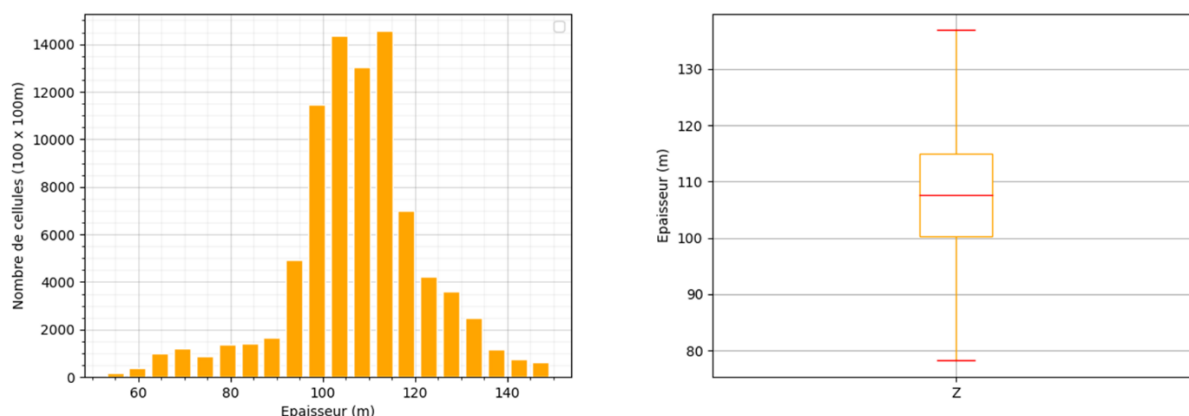


Figure 20 - Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la craie cénomanienne sur le secteur de la Métropole de Chartres.

b) Profondeurs des toits :

- Tertiaire (Calcaires, TERT):

Cette formation affleure (la profondeur du toit est donc nulle) dans la partie sud-est de la métropole selon l'emprise présentée dans la Figure 21.

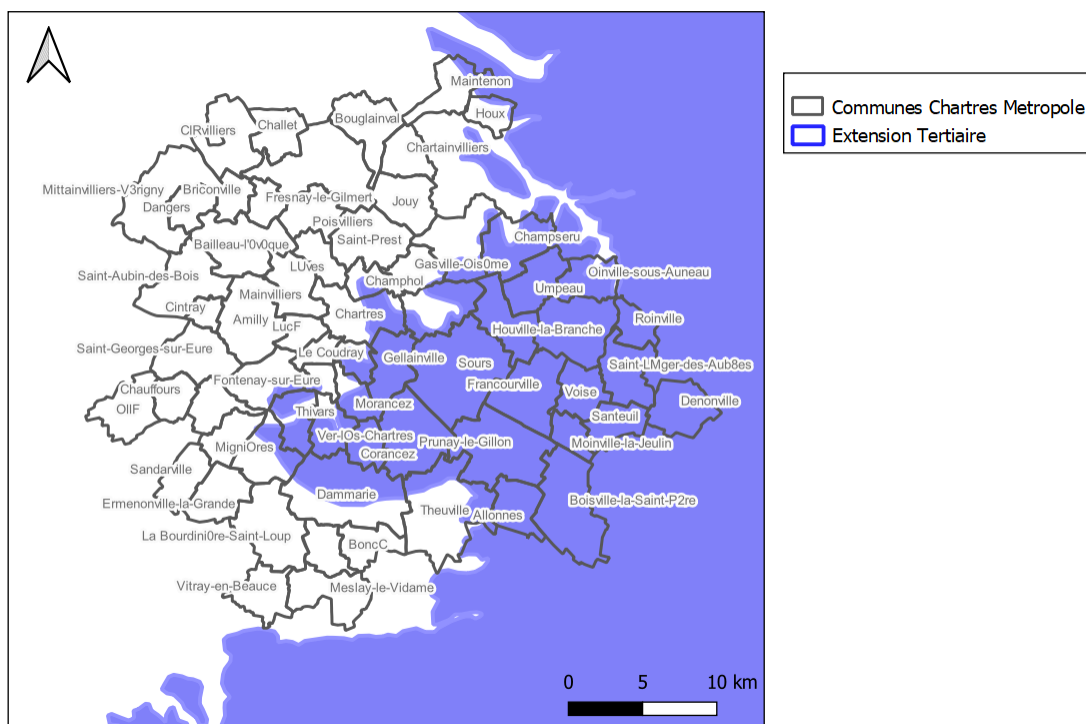


Figure 21 – Zone d’affleurement du Tertiaire (Toit)

- Craie du séno-turonien (CRAS) :

La carte de profondeur du toit de la craie montre que le toit est peu profond au centre de la métropole (puisque sous une faible épaisseur d’alluvions ou d’argiles). Le toit de la craie peut se trouver à plus grande profondeur sous les argiles au nord-ouest (là où les argiles sont plus épaisses) et sous le Tertiaire au sud-est de la métropole (cf. profils présentés précédemment Figure 12 et Figure 15).

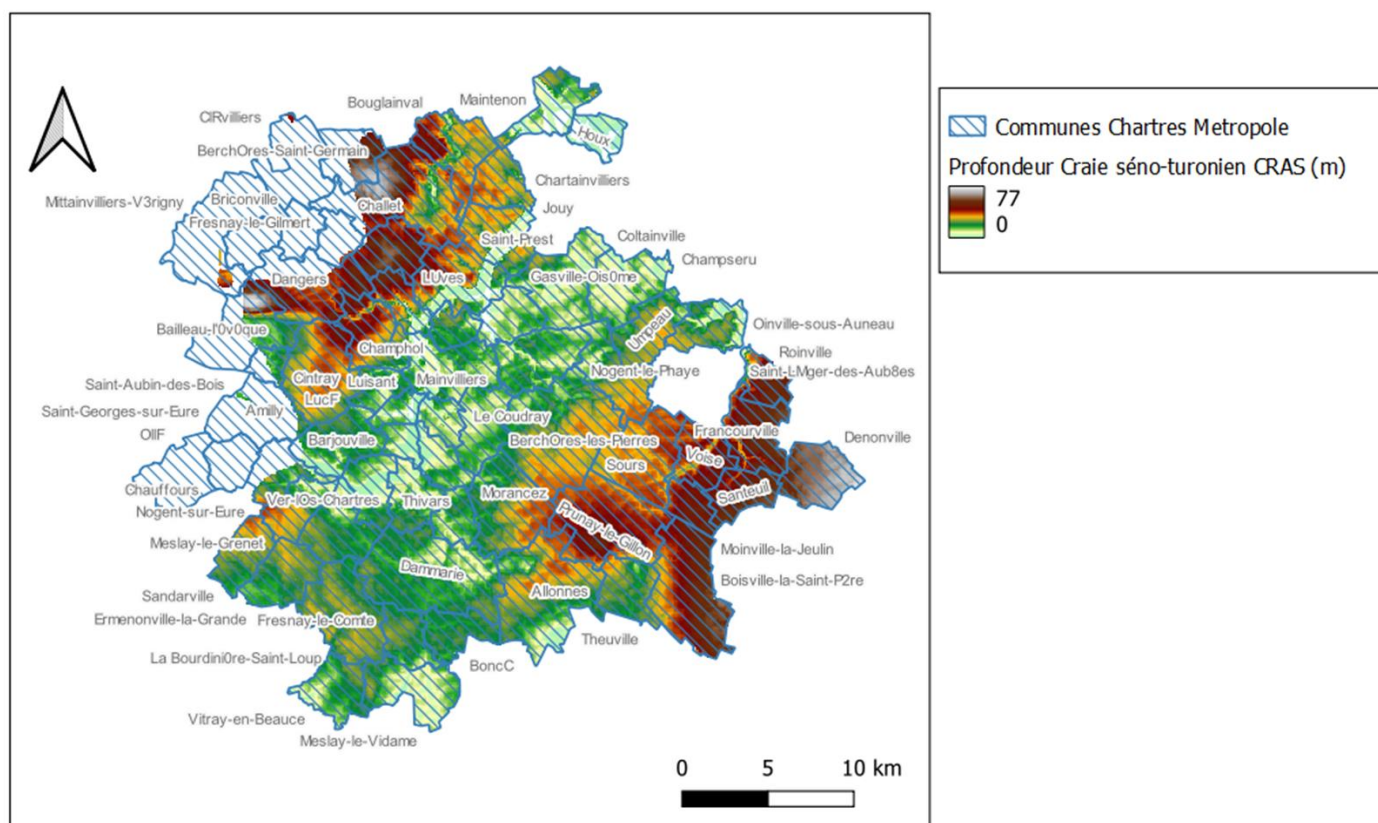


Figure 22 – Profondeur du toit de la craie séno-turonienne (m)

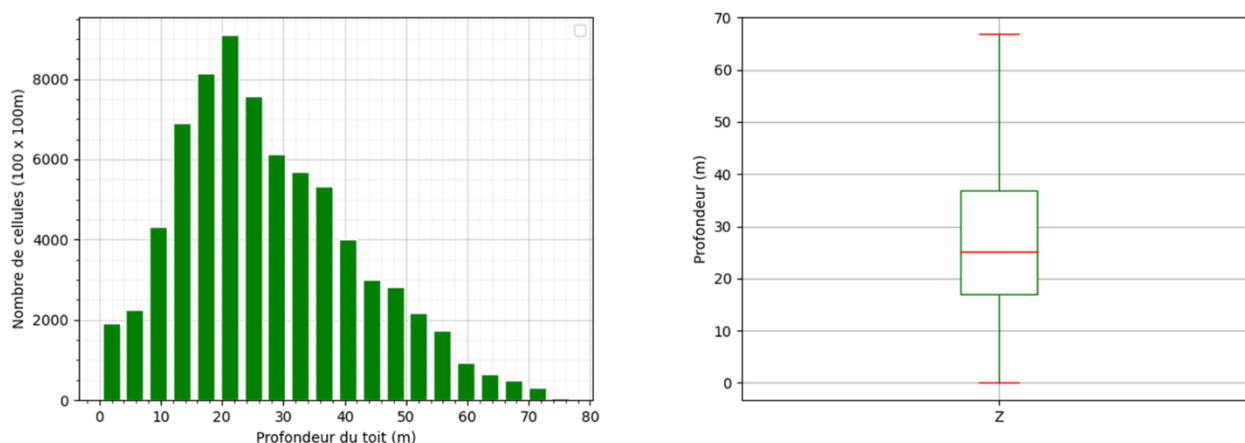


Figure 23 - Distribution statistique de la profondeur du toit de la craie séno-turonienne (m) sur le secteur de la Métropole de Chartres.

- Craie marneuse du Cénomanién (CRAC) :

La carte de profondeur du toit de la craie cénomaniénne montre que le toit est peu profond sur l'extrême ouest de la métropole (du fait conjoint d'une faible épaisseur d'argiles et de l'amincissement jusqu'à l'absence de la craie séno-turonienne). Le toit de la craie cénomaniénne

plongeant vers l'est celui-ci se retrouve à une profondeur de plus de 200 m à partir de la moitié est de la métropole et ne sera donc pas une cible dans le cadre de la GMI (Figure 24).

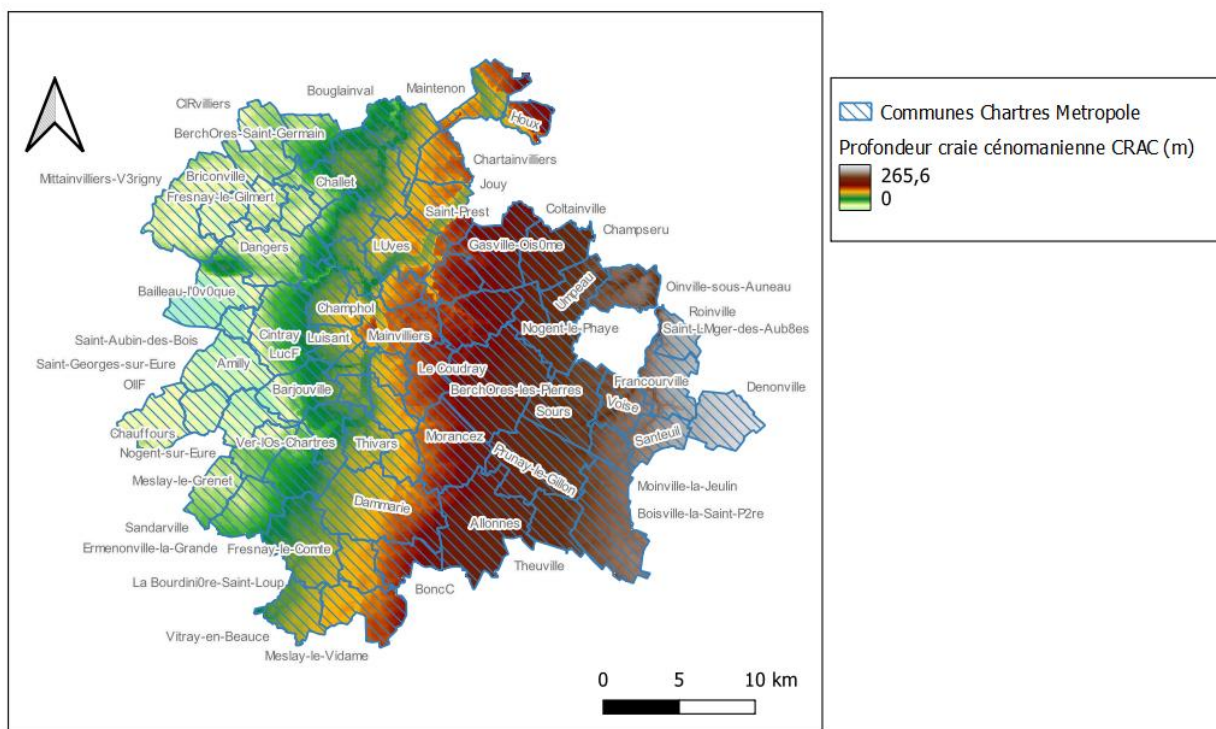


Figure 24 – Profondeur du toit de la craie cénomanienne (m)

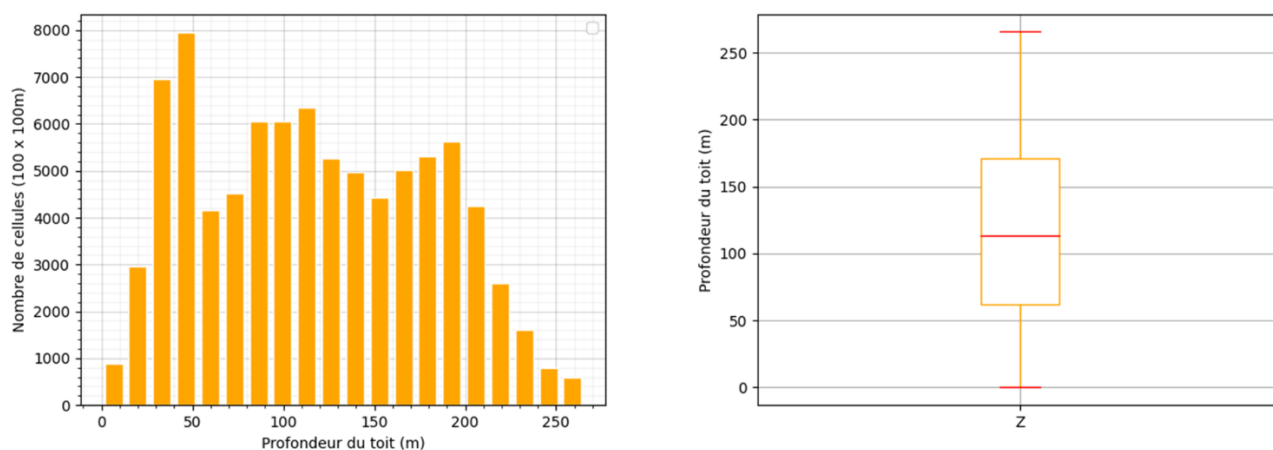


Figure 25 - Distribution statistique de la profondeur du toit de la craie cénomanienne (m) sur le secteur de la Métropole de Chartres.

2.2.3. Caractéristiques hydrodynamiques

La Banque des données du Sous-Sol (BSS, consultable sur <https://infoterre.brgm.fr/>) en Eure-et-Loir recense 7 337 ouvrages, dont 6 416 sont des ouvrages traitant de l'eau (eau potable, puits et forages privés, forages agricoles, forages d'eau industriels, etc.). L'interrogation de la base de données du sous-sol (BSS) montre l'existence de plus de 2 000 forages présents au sein et à proximité immédiate des limites de la métropole, dont environ 1 800 sont répertoriés comme étant des points d'eau (BSS eau, voir Figure 26).

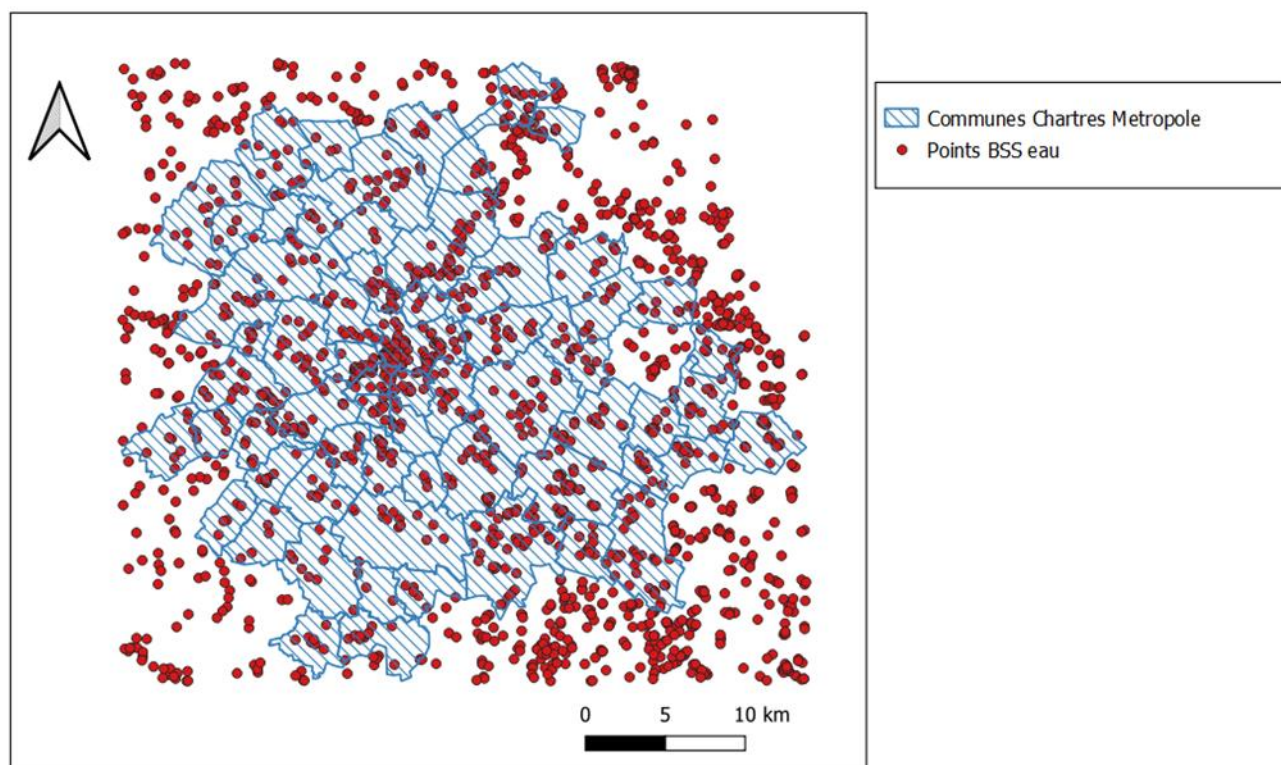


Figure 26 – Points d'eau (BSS eau) répertoriés au sein et à proximité immédiate des limites de la métropole de Chartres

L'interrogation de ces différents points permet d'extraire ceux qui ont fait l'objet d'essais de pompage permettant de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe visée. Au sein de ces 1800 points d'eau, plus de 70 forages ont fait l'objet d'essai de pompage permettant d'avoir une valeur de transmissivité (Figure 27) où plus d'une cinquantaine d'entre eux concernent les nappes des craies et plus d'une dizaine la nappe du tertiaire.

La transmissivité régit le débit d'eau qui s'écoule, par unité de largeur, d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. La transmissivité T (m^2/s) est le produit de la conductivité hydraulique K (m/s) par l'épaisseur e (m) de l'aquifère. Cette valeur est mesurée sur le terrain lors des pompages d'essai, elle est donc dépendante aussi de la qualité de réalisation du forage.

Par ailleurs, au sein de ces 1800 points d'eau, plus d'une centaine de forages fournissent des informations sur la productivité des nappes des craies et du tertiaire (Figure 28).

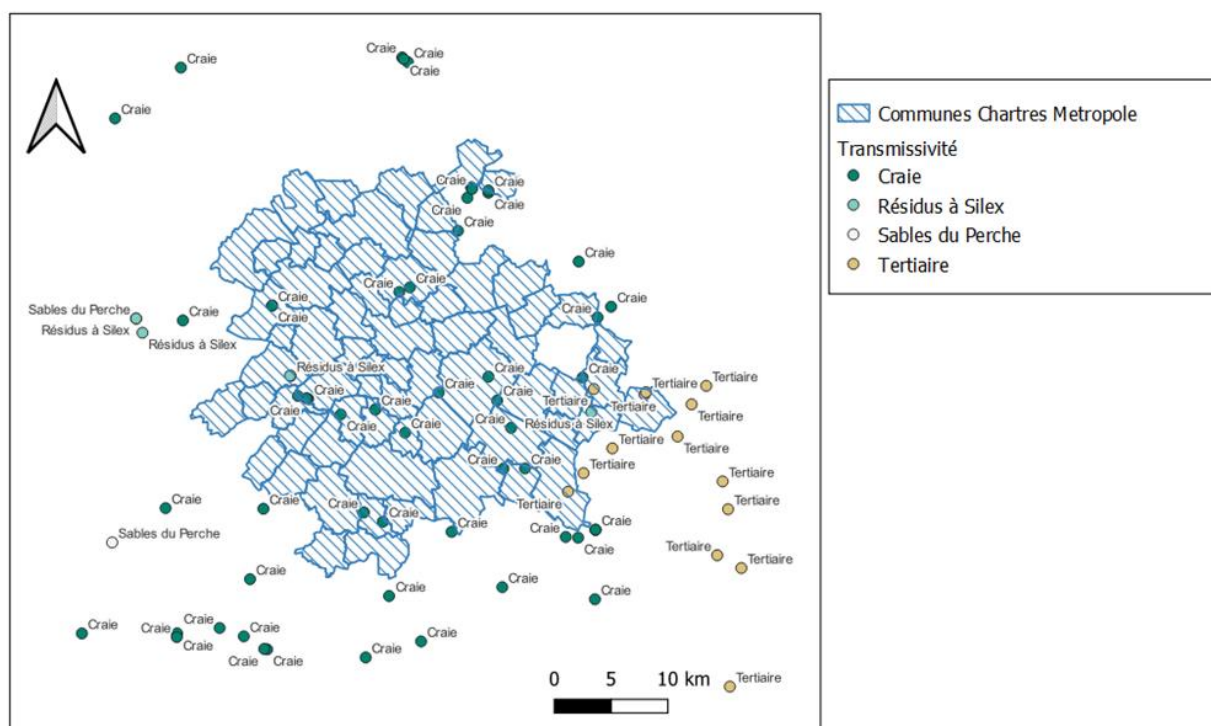


Figure 27 – Forages répertoriés et ayant fait l'objet d'un essai de pompage (mesures de la transmissivité) au sein et à proximité immédiate de la métropole de Chartres.

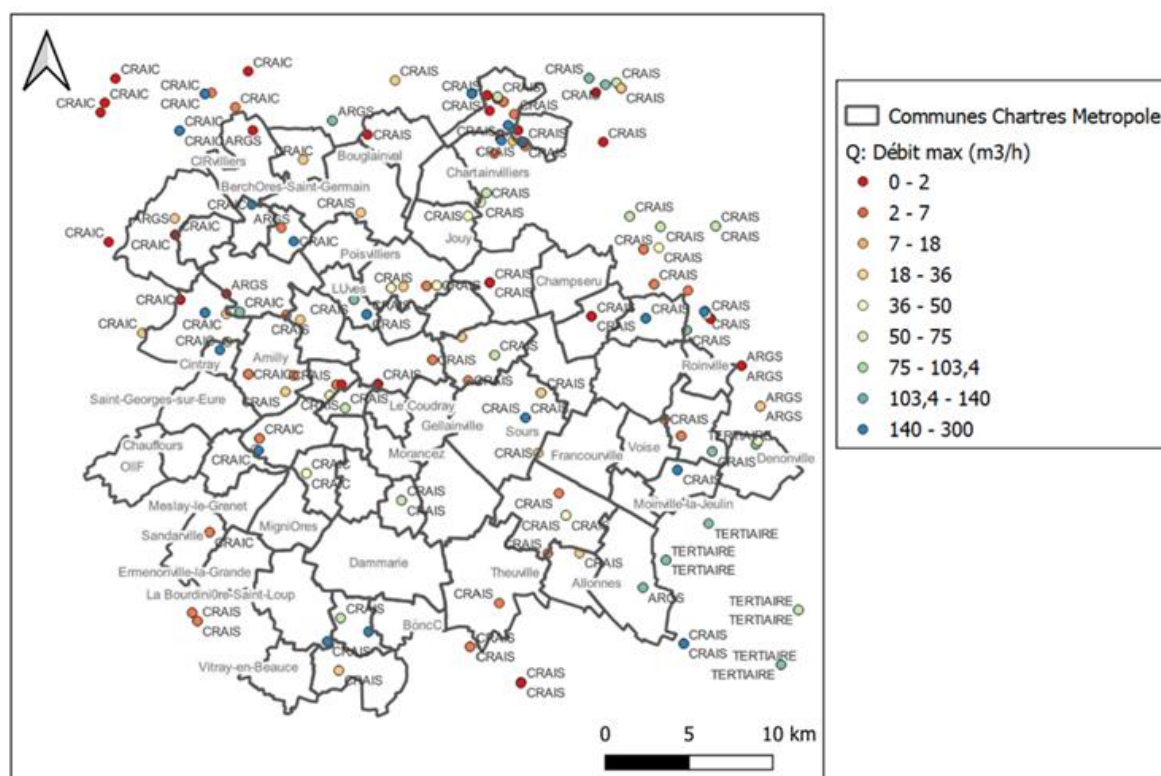


Figure 28 - Forages répertoriés et fournissant une information sur la productivité de la nappe (débit spécifique et/ou maximal exploitable) au sein et à proximité immédiate de la métropole de Chartres.

a) Tertiaire (Calcaires, TERT):

- Transmissivité

Sur la base des quelques forages recensés dans la zone d'intérêt, la transmissivité moyenne est de 3.67E-2 m²/s avec des valeurs comprises entre 1.7E-3 m²/s et 0.28E-1 m²/s (Figure 29).

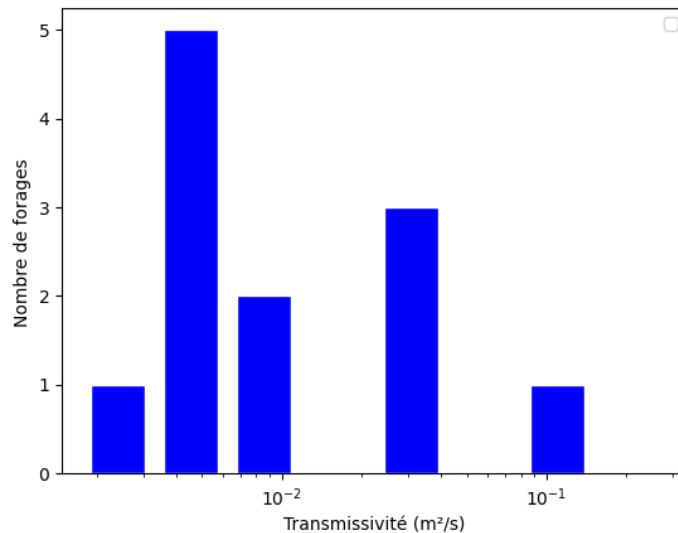


Figure 29 - Distribution statistique de la transmissivité de la nappe du Tertiaire (m²/s) sur le secteur de la Métropole de Chartres.

- Piézométrie, gradient hydraulique et vitesse d'écoulement

A partir de la piézométrie (Figure 30), la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère peut être estimée en passant par l'estimation du gradient hydraulique. La vitesse d'écoulement est définie selon la formulation des écoulements issue de la loi de Darcy, comme :

$$v = \frac{Q}{S} = K \frac{(H_1 - H_2)}{L} \quad (1)$$

où v est la vitesse d'écoulement en m/s, S la section à travers laquelle se fait l'écoulement en m², K la conductivité hydraulique en m/s de l'aquifère et H_i la hauteur d'eau en m à l'isopièze i et L la distance entre deux isopièzes en m.

Le rapport $i = \frac{\Delta H}{L}$ équivaut au gradient de charge hydraulique qui est calculé à partir de la carte piézométrique en mesurant la distance entre deux courbes isopiézométriques consécutives et la différence d'altitude entre les deux niveaux d'eau.

Pour la nappe du tertiaire, le gradient hydraulique moyen est calculé à partir de la carte moyenne piézométrique (Figure 30). La distribution statistique obtenue est présentée en Figure 31. La valeur médiane du gradient hydraulique (moyen) pour la nappe du tertiaire est de l'ordre de 0.16 %, le premier quartile de 0.11 % et le dernier quartile de 0.21 %.

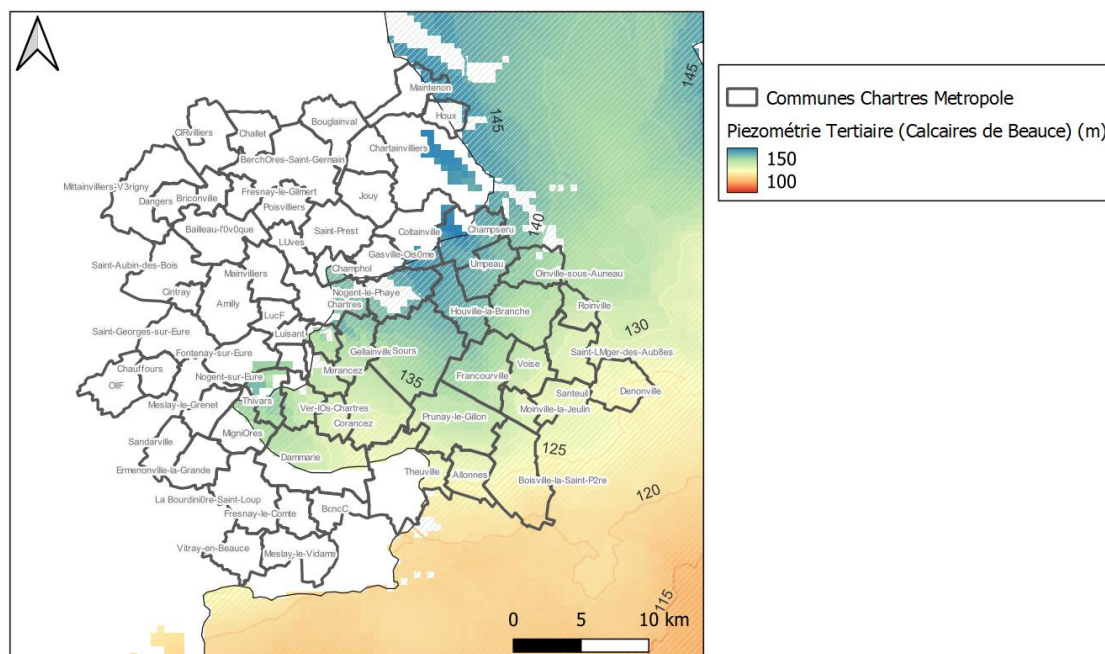


Figure 30 - Piézométrie de la nappe du Tertiaire (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique)

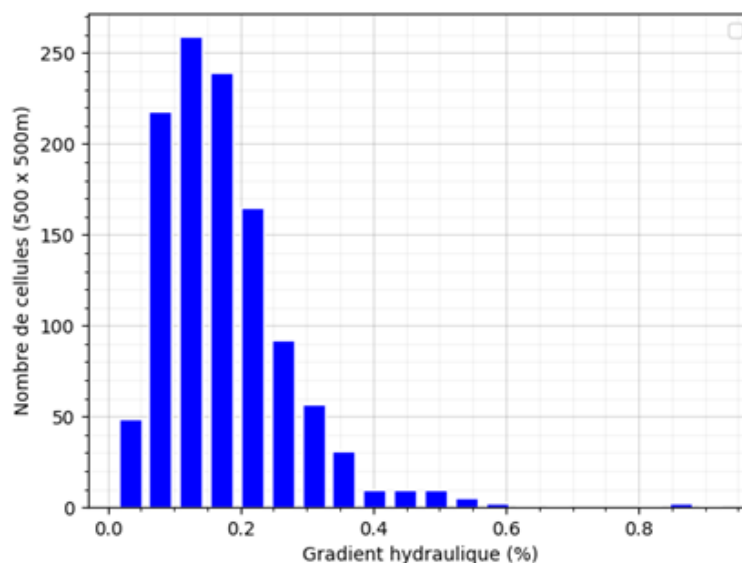


Figure 31 - Distribution statistique du gradient hydraulique moyen estimé dans la nappe du tertiaire estimé à partir d'une piézométrie moyenne.

- Débit spécifique et maximal exploitable

Concernant les débits spécifiques et maximum exploitable dans la nappe du tertiaire, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : $3.4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, $6.2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ et $3.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ pour le débit spécifique et les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : $51.25 \text{ m}^3/\text{h}$, $62.75 \text{ m}^3/\text{h}$ et $55.5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le débit maximal exploitable.

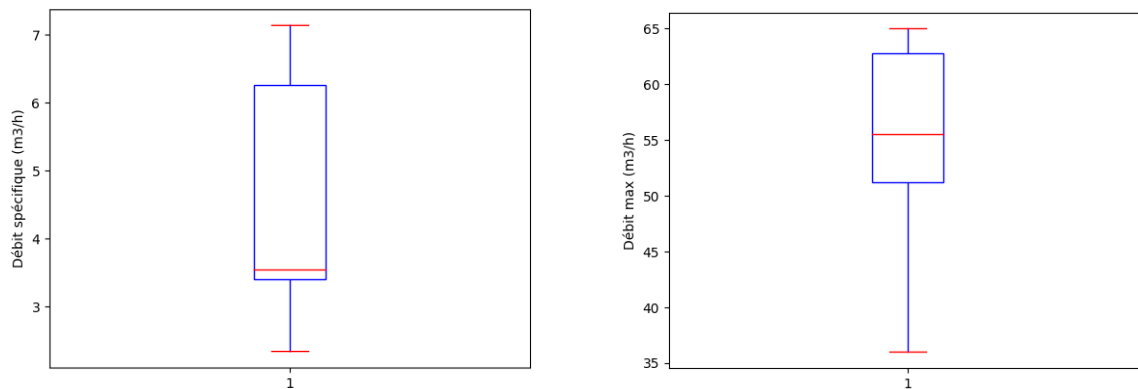


Figure 32 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) et maximal exploitable (m^3/h) pour la nappe du tertiaire

b) Craie du Séno-turonien (CRAS) et Craie marneuse du Cénomanién (CRAC)

- Transmissivité

Sur la base des quelques forages recensés dans la zone d'intérêt, la transmissivité (qui reflète majoritairement celle de la nappe de la craie du Séno-turonien) moyenne est de $9.67\text{E}-2 \text{ m}^2/\text{s}$, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : $2\text{E}-3 \text{ m}^2/\text{s}$, $2.08\text{E}-3 \text{ m}^2/\text{s}$ et $5.5\text{E}-3 \text{ m}^2/\text{s}$.

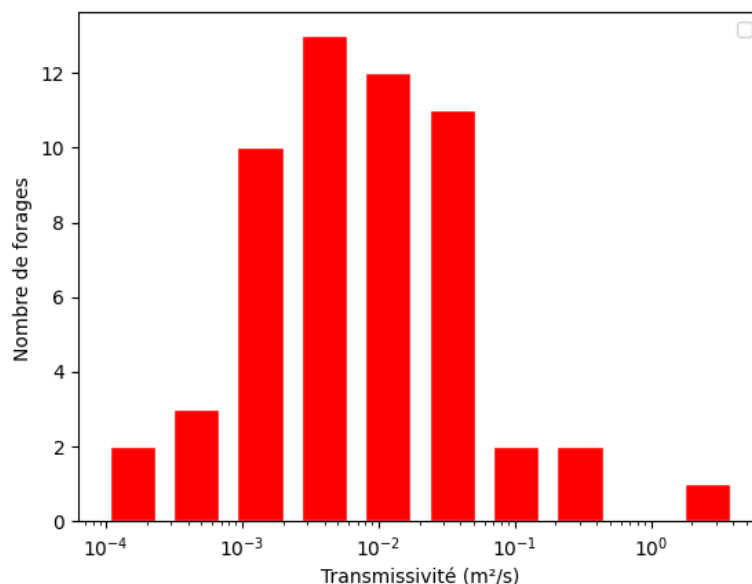


Figure 33 - Distribution statistique de la transmissivité de la nappe de la craie (m^2/s) sur le secteur de la Métropole de Chartres

- Piézométrie, gradient hydraulique et vitesse d'écoulement

A partir de la piézométrie (Figure 34), la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère peut être estimée en passant par l'estimation du gradient hydraulique.

Pour la nappe de la craie, le gradient hydraulique moyen est calculé à partir de la carte moyenne piézométrique (Figure 34). La distribution statistique obtenue est présentée en Figure 35. La valeur médiane du gradient hydraulique (moyen) pour la nappe de la craie est de l'ordre de 0.22 %, le premier quartile de 0.13 % et le dernier quartile de 0.38 %.

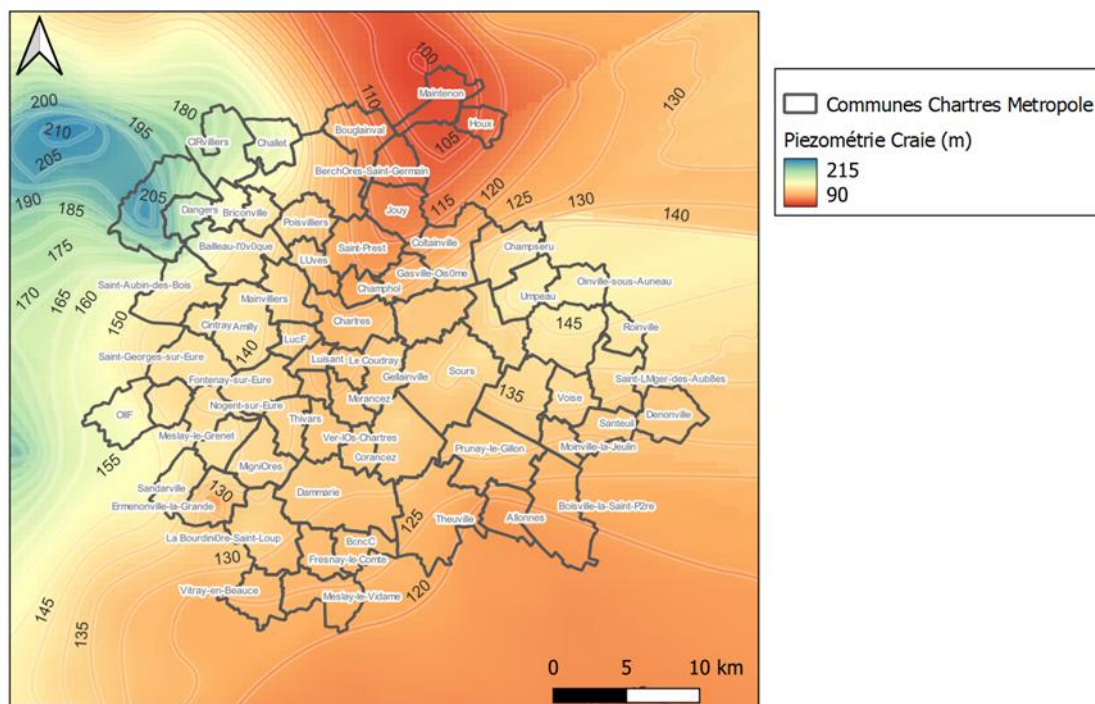


Figure 34 - Piézométrie de la nappe de la craie (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique)

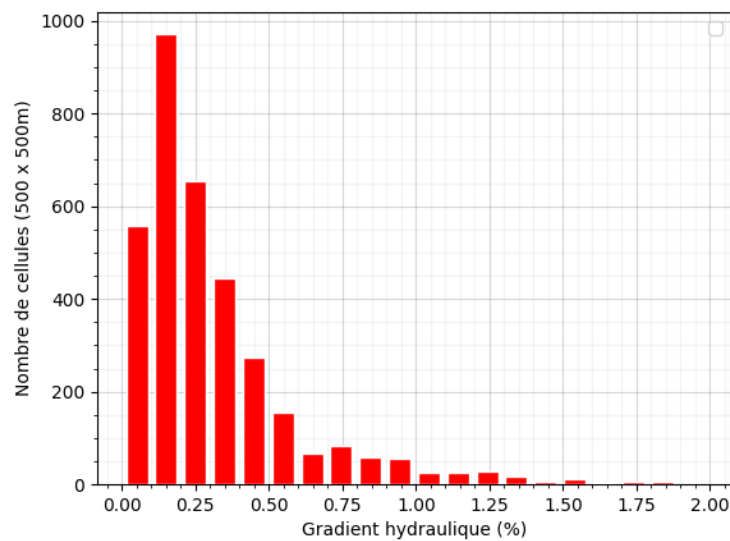


Figure 35 - Distribution statistique du gradient hydraulique moyen estimé dans la nappe de la craie estimé à partir d'une piézométrie moyenne

- Débit spécifique et maximal exploitable pour la nappe de la craie du séno-turonien

Concernant les débits spécifiques et maximum exploitable dans la nappe de la craie du séno-turonien, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 4.9 m³/h, 39.8 m³/h et 11.1 m³/h pour le débit spécifique et les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 20 m³/h, 90.5 m³/h et 55 m³/h pour le débit maximal exploitable.

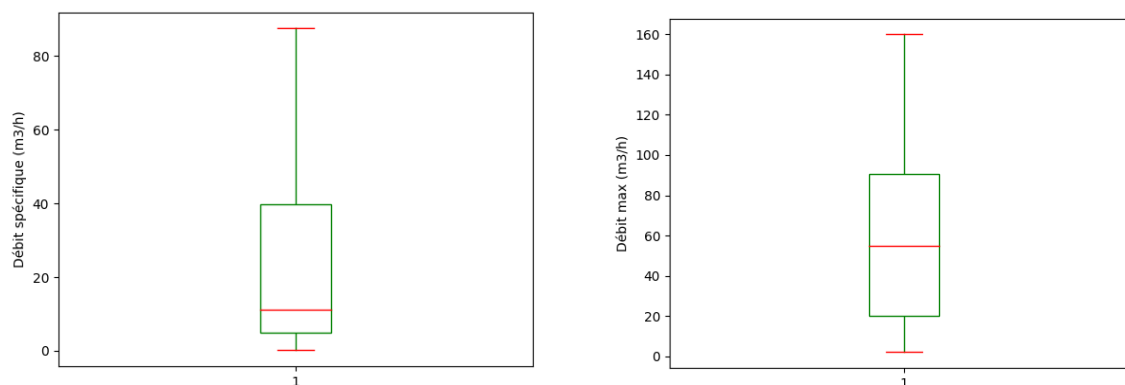


Figure 36 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique et maximal exploitable pour la nappe de la craie du séno-turonien (m³/h)

- Débit spécifique et maximal exploitable pour la craie marneuse du Cénomanien (CRAC)

Concernant les débits spécifiques et maximum exploitable dans la nappe de la craie du Cénomanien, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 8.1 m³/h/m, 33 m³/h/m et 20.3 m³/h/m pour le débit spécifique et les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 30 m³/h, 85 m³/h et 11.5 m³/h pour le débit maximal exploitable.

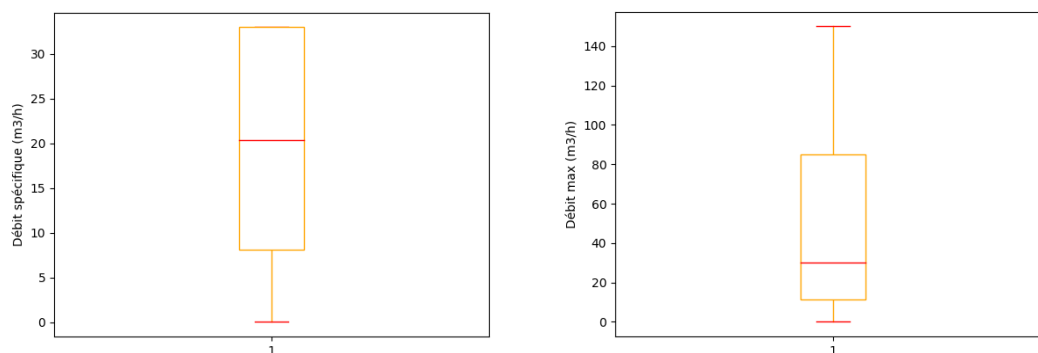


Figure 37 - Distribution statistique des valeurs de débit spécifique (m³/h/m) et maximal (m³/h) exploitable pour la nappe de la craie du Cénomanien

2.2.4. Données issues des tests de réponse thermique

Le Test de Réponse Thermique (TRT) est une procédure permettant d'estimer les propriétés thermiques d'un sous-sol en vue de la réalisation d'une sonde géothermique verticale, à savoir la température moyenne du sous-sol T_0 , sa conductivité thermique λ [W.K⁻¹.m⁻¹] et la résistance thermique du forage R_f lui-même [K.m.W⁻¹]. L'exploitation de la base de données nationale de TRT constituée par le BRGM avec le soutien de l'ADEME (www.geothermies.fr/viewer) a permis d'identifier deux TRT qui ont été réalisés en 2013 dans le centre de la Ville de Chartres sur la même parcelle. Le premier test indique $T_0 = 13,1$ °C et $\lambda = 1,52$ W.K⁻¹.m⁻¹ pour une sonde profonde de 14 m ; le second test $T_0 = 13,7$ °C et $\lambda = 1,96$ W.K⁻¹.m⁻¹ pour une sonde profonde de 30 m. Cela illustre la variabilité de la conductivité thermique à l'échelle d'une parcelle, qui plus est à l'échelle de la Métropole. Dans le croisement entre besoins et ressources une valeur homogène à l'échelle de la Métropole pour la conductivité thermique sera considérée $\lambda = 2,0$ W.K⁻¹.m⁻¹, une valeur typique des formations sédimentaires (Maragna et al., 2021a) sur l'épaisseur 0–200 m.

2.3. CARTE DE FAVORABILITE SUR AQUIFERES

La « favorabilité » des deux aquifères (Craie et Tertiaire) a été estimée en leur attribuant une note fonction (cf. Tableau 2) :

- D'une estimation du débit disponible maximal Q que l'on pourrait extraire de manière pérenne de chaque aquifère, estimée comme suit :

$$Q \approx T \times s$$

Avec T la transmissivité médiane de l'aquifère (3.67E-2 m²/s pour le Tertiaire et 9.67E-2 m²/s pour la Craie) et s la hauteur que l'on peut admettre de dénoyer. D'après une règle empirique communément admise, s est pris égal à 1/3 de la hauteur mouillée pour

l'aquifère libre (ici le Tertiaire) et 1/5 de l'épaisseur de l'aquifère dans le cas d'une nappe captive (ici la Craie).

- De la profondeur d'accès à la ressource h , c'est-à-dire :
 - pour le Tertiaire, la profondeur de la base de l'aquifère,
 - pour la Craie, le toit de cet aquifère.
- D'une estimation du risque de remontée de nappe au puits injecteur. On exclut les zones où l'eau est à moins de 5 m de profondeur (mesuré par rapport à la surface).

Le critère de température n'a pas été considéré car on observe peu de variations à l'échelle du territoire (cf. §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La favorabilité est calculée par :

$$favorabilité = (2 \times (note\ débit) + (note\ profondeur)) \times (note\ remontée) \quad (2)$$

Critère de notation	Classe	Note
Productivité de l'aquifère	$Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$	1
	$5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$	2
	$10 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$	3
	$50 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 100 \text{ m}^3/\text{h}$	4
	$Q > 100 \text{ m}^3/\text{h}$	5
Profondeur d'accès à la ressource	$0 < h < 5 \text{ m}$	1
	$5 < h < 15 \text{ m}$	4
	$15 < h < 30 \text{ m}$	3
	$30 < h < 100 \text{ m}$	2
	$100 < h < 250 \text{ m}$	1
	$h > 250 \text{ m}$	0
Risque de remontée de nappe	<i>Profondeur statique</i> $< 5 \text{ m}$	0
	<i>Profondeur statique</i> $> 5 \text{ m}$	1

Tableau 2 : Critères appliqués pour le calcul de la favorabilité des aquifères

La note maximale que peut atteindre un aquifère est de $(2 \times 5 + 4) \times 1 = 14$. Le potentiel de l'aquifère du Tertiaire est élevé sur la quasi-totalité de son extension, à l'exception de ses franges (cf. Figure 38), tandis que le potentiel de la Craie est élevé sur l'ensemble du territoire, à l'exception des vallées qui, constituant des points bas, peuvent compliquer la réinjection.

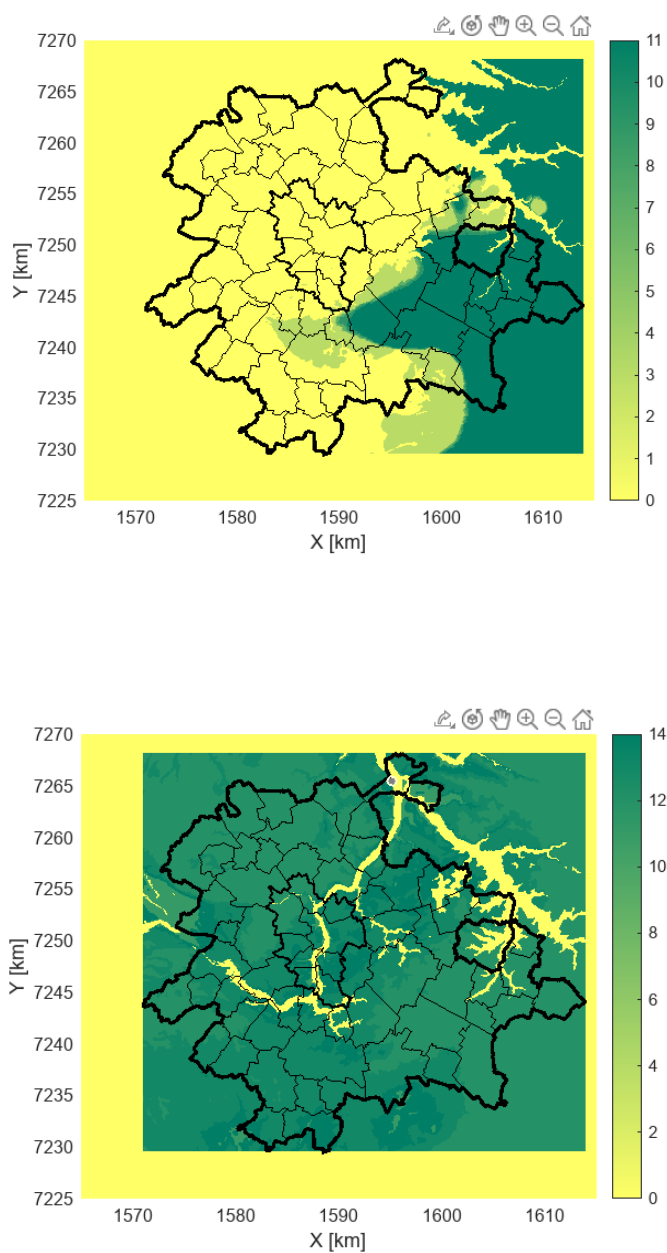


Figure 38 : Note de favorabilité pour l'aquifère du Tertiaire (en haut) et de la Craie (en bas)

3. Réglementations s'appliquant à la géothermie de surface

3.1. LES REGLEMENTATIONS LIEES A LA GEOTHERMIE DE SURFACE

Pour que le cadre réglementaire de la géothermie de minime importance (GMI) s'applique à une installation, des conditions d'implantations et des prescriptions doivent être respectées.

Le site d'implantation de l'installation ainsi que les techniques de forage et de terrassement de l'échangeur géothermique, en boucle ouverte et en boucle fermée, doivent :

- préserver la ressource en eau locale ;
- prendre en compte les enjeux sanitaires ;
- respecter les autres usages ou ouvrages locaux du sous-sol.

Ces conditions d'implantations et prescriptions sont précisées dans l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance. Les différentes considérations réglementaires et prescriptions à prendre en compte et leur application sur le territoire de Chartres Métropole sont présentées dans les paragraphes suivants.

Sont présentés ici les textes de loi relatifs à la géothermie de « minime importance » et les procédures de déclaration des installations et activités associées.

A noter aussi que le BRGM et la DREAL Pays de la Loire ont rédigé en 2021 un *vademecum*, s'adressant en priorité aux foreurs et maitres d'œuvre, et portant ce cadre réglementaire de la géothermie de « minime importance »².

3.1.1. Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance

c) *Décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 et Code Minier*

Le principal texte applicatif de la géothermie dite de « minime importance » (GMI) est le **décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015**³ qui précise notamment les conditions d'appartenance des exploitations à la géothermie de minime importance et les contraintes et zones réglementaires associées.

² <https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/vademecum-GMI-Basse%20Def.pdf>

³ https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=EC3A8E5ACDE68FAF8741D36411C70C0F.tpdjo03v_1?cidTexte=JORFTEXT000030073515&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT000030073299

Ce texte a été adopté en application **des articles L. 112-1⁴ et L. 112-3⁵ du Code Minier** et il modifie le **décret n° 78-498 du 28 mars 1978⁶** modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le **décret n° 2006-649 du 2 juin 2006⁷** modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, l'annexe de l'article R. 122-2 et l'article R. 414-27 du code de l'environnement.

Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 définit les activités ou installations de géothermie dite "de minime importance" qui n'ont pas d'incidence significative sur l'environnement et il en élargit le périmètre. Ainsi, sont exclus du régime du code minier les puits canadiens, les géo-structures thermiques, les échangeurs géothermiques fermés d'une profondeur inférieure à 10 mètres et les échangeurs géothermiques ouverts dont au moins un échangeur fonctionne en circuit ouvert répondant aux conditions mentionnées au II de l'article 3 du décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié, et dont aucun des ouvrages de prélèvement ou de réinjection ne dépasse la profondeur de 10 mètres.

L'article 3 du décret n°78-498⁸ relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie modifié par décret n°2016-835 du 24 juin 2016 définit les différents gîtes géothermiques relevant de la minime importance comme suit :

« II.-Pour l'application de l'article L. 112-3 du code minier, sont considérées comme des exploitations de gîtes géothermiques à basse température **relevant du régime de la minime importance les activités géothermiques ci-après** :

1° Pour les activités ne recourant qu'à des **échangeurs géothermiques fermés**, celles qui remplissent les conditions suivantes :

- a) La **profondeur du forage est inférieure à 200 mètres** ;
- b) La **puissance thermique maximale** échangée avec le du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est **inférieure à 500 kW** ;

2° Pour les activités recourant au moins à un **échangeur géothermique ouvert**, celles qui remplissent les conditions suivantes :

- a) La **température de l'eau prélevée** en sortie des ouvrages de prélèvement est **inférieure à 25 °C** ;
- b) La **profondeur du forage est inférieure à 200 mètres** ;
- c) La **puissance thermique maximale** échangée avec le du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est **inférieure à 500 kW** ;
- d) Les **eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle** ;

4

https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=3648590E7B12FDD3CB583E49202528E3.tplqfr35s_2?idArticle=LEGIARTI000025560263&cidTexte=LEGITEXT000023501962&categorieLien=id&dateTexte=

5

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000025557143&cidTexte=LEGITEXT000023501962&dateTexte=20181011>

6

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000864366&categorieLien=cid#LEGIARTI000032773812>

⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000609345>

8

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000864366&categorieLien=cid#LEGIARTI000032773812>

e) Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement (à savoir, 80 m³/h).

Toutefois, les activités mentionnées aux 1° et 2° ne relèvent pas de la minime importance lorsqu'elles sont situées dans des **zones rouges** [voir section d) ci-dessous], **où les activités géothermiques présentent des dangers ou inconvénients graves, définies à l'article 22-6 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers**, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

III.-Les modalités de calcul ou la définition des caractéristiques mentionnées au II sont précisées par un arrêté conjoint des ministres chargés des mines et de l'environnement. »

d) Les arrêtés du 25 juin 2015

En application du Code Minier, du décret n°78-498 du 28 mars 1978 et du décret 2006-649 du 2 juin 2006 modifié, quatre arrêtés du 25 juin 2015 encadrent les pratiques et la reconnaissance d'une compétence en matière de forage géothermique :

- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance** : l'arrêté précise, outre les conditions relatives à l'implantation d'une installation de géothermie de minime importance, les mesures à mettre en œuvre lors de la réalisation de l'ouvrage géothermique, son exploitation et sa cessation d'exploitation ainsi que les modalités de surveillance et d'entretien de l'installation. Ces dispositions visent à garantir la pérennité des installations et de prévenir les risques sur l'environnement notamment pour protéger le patrimoine bâti et les ressources en eau.
- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la qualification des entreprises de forage intervenant en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté vise à s'assurer que les ouvrages réalisés dans le cadre de la géothermie de minime importance soient mis en œuvre selon les prescriptions générales applicables et les règles de l'art par des entreprises de forage disposant des compétences professionnelles, techniques et financières afin de préserver les intérêts mentionnés à l'article L.161-1 du code minier. Ces dispositions sont d'application obligatoire pour les entreprises qui réalisent les travaux de forage lors de l'ouverture des travaux d'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance ou qui réalisent les mesures d'arrêt des travaux d'exploitation.
- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté fixe la carte des zones de géothermie de minime importance ainsi que la méthodologie d'élaboration de la carte et les modalités de sa révision.

On retrouve ainsi les zones suivantes :

- les **zones rouges** qui sont les zones où la réalisation d'ouvrages GTH est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peuvent bénéficier du régime de la minime importance (régime simplifié déclaratif) ;
- les **zones oranges** sont des zones ne présentant pas de dangers graves mais pour lesquelles il est exigé la production d'une attestation de compatibilité d'un projet de GMI rédigé par un expert agréé prévue à l'article 22-2 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- les **zones vertes** sont des zones réputées sans aucun dangers ou inconvénients soumise à un simple régime déclaratif.

- **Arrêté relatif à l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté expose le cadre et les modalités d'agrément des experts, les modalités dans lesquels ce dernier établit l'attestation de compatibilité d'un projet géothermique prévue dans la déclaration d'ouverture des travaux d'exploitation d'une activité de géothermie de minime importance. Le texte précise les compétences requises pour obtenir cet agrément.

e) *Normes AFNOR*

Pour mettre en œuvre un système géothermique de surface de qualité, il est requis de faire appel à des professionnels spécialisés en géothermie et qualifiés qui installeront, selon les règles de l'art, des équipements de qualité certifiés. Il est recommandé que les normes suivantes soient appliquées lors de la conception et de la réalisation de votre installation de géothermie de surface :

- NF X10-960-1 à NF X10-960-4 (Mars 2013) relative aux sondes géothermiques verticales
- NF X10-970 (Janvier 2011) relative aux sondes géothermiques verticales – Réalisation, mise en œuvre, entretien et abandon ;
- NF X10-999 (août 2014) relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

3.1.2. Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échangeurs relevant de la GMI

Suite à la mise en application du décret n°2015-15 du 8 janvier 2015, **toutes les installations géothermiques relevant de la minime importance (voir définition en section 3.1.1 paragraphe c)) doivent être déclarées via le service de téléservice (aussi appelé télé-déclaration) de la GMI⁹**, à l'exception des puits canadiens, des fondations thermiques (pieux) et des installations géothermiques installées à une profondeur inférieure à 10 mètres.

L'article 22-2 du décret 2006-649 du 2 juin 2006 modifié précise les pièces constituant la déclaration de l'ouverture des travaux d'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance. Le pétitionnaire déclare l'ouverture de travaux d'exploitation sur le téléservice. Il reçoit un récépissé de déclaration et la qualification de la zone d'implantation du projet vis-à-vis de la carte des zones réglementaires (cf. arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance).

D'après l'Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, dans un **contexte général, les échangeurs ne peuvent pas être implantés** :

- **dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau** destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées ;
- **à moins de 35 mètres** ;
 - o d'un **ouvrage souterrain de prélèvement d'eau** destinée à la consommation humaine ;
 - o des **stockages** d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines ;

⁹ <https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/?timeout=timeout>

- des **bâtiments d'élevage** et leurs annexes relevant des rubriques 2101 [élevage, transit, vente de bovins], 2102 [porcs], 2110 [lapin], 2111 [volailles], 2112 [couvoirs], 2113 [carnassier à fourrure], 2120 [chiens] de la nomenclature des installations classées ainsi que des zones de stockage des déchets de l'exploitation d'élevage ;
- des **ouvrages de traitement des eaux usées** collectifs ou non collectifs ;
- **à moins de 200 mètres d'une installation de stockage de déchets** relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées [i.e. autre que « Installation de stockage de déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales ainsi que de l'exploitation de carrières (site choisi pour y accumuler ou déposer des déchets solides, liquides, en solution ou en suspension), installations de stockage de déchets dangereux ou non dangereux non inertes »].

Toujours d'après l'arrêté, la réalisation **d'échangeurs géothermiques fermés requiert d'être un positionnement des forages à moins de 5 m :**

- **de la limite de propriété la plus proche**, à défaut d'un accord écrit préalable des propriétaires voisins autorisant la réalisation de l'échangeur géothermique de minime importance ;
- **de conduites, collectives ou non collectives, d'eaux usées** ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines¹⁰.

Les échangeurs géothermiques ouverts ne peuvent être positionnés :

- dans un **périmètre de protection géothermique** institué en application de l'article L. 124-5 du code minier ni dans un volume d'exploitation d'activités géothermiques défini en application de l'article L. 134-6 du code minier ;
- **à moins de 5 mètres de conduites d'assainissement individuelles ou collectives d'eaux usées** ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines, lorsque qu'une étanchéité entre les conduites d'assainissement et les horizons géologiques exploités existe ou est mise en place. En l'absence d'une telle étanchéité naturelle ou artificielle, cette distance minimale est portée à 35 m.

3.1.3. Les zones réglementaires dans Chartres Métropole

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur le Centre - Val de Loire, l'ADEME Centre - Val de Loire, la région Centre - Val de Loire et le BRGM ont souhaité engager une révision, conformément à l'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de Géothermie de Minime Importance (GMI), qui prévoit la possibilité de réviser la carte nationale à l'échelon régional afin d'apporter plus de précisions en fonction des phénomènes redoutés de la carte.

Cette révision régionale permet une **délimitation des zones réglementaires beaucoup plus précise** et d'apporter également plus de précisions en matière de connaissance et de localisation des phénomènes redoutés. Au total **6 nouvelles cartes réglementaires de la GMI ont été réalisées au niveau de la région Centre - Val de Loire couvrant les gammes de profondeur suivantes [10 m-50 m], [10 m-100 m] et [10 m-200 m] pour les systèmes ouverts et fermés à la maille de 500 mètres de côté** (Figure 39).

¹⁰ Consultation possible du site reseaux-et-canalizations.gouv.fr

Les travaux de révision de cette cartographie réglementaire de la GMI sur le territoire de la région Centre - Val de Loire ont été conduits par le BRGM en application du guide national ministériel en 2016. Cette cartographie a été publiée par arrêté préfectoral en 2018

Les zones réglementaires de la GMI s'appuient sur **8 phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux redoutés** (surrection ou affaissement lié aux évaporites, aux cavités minières et cavités naturelles, aux mouvements de terrains, pollutions des sols et nappes, aux phénomènes d'artésianisme, à la mise en communication d'aquifères, à la remontée de nappe). **Le phénomène redouté le plus prégnant pour Chartres Métropole est le risque lié au pollution des sols et nappes. Cela entraine environ 1,5% de zone orange sur le territoire de la commune jusqu'à 50 m de profondeur.** Jusqu'à 100 m, la zone orange s'étend à 1,9% pour les systèmes fermés du fait d'une petite zone d'artésianisme suspecté à Ollé. Pour les profondeurs de 100 à 200 m, cette zone orange monte à 4% avec la possibilité, à l'Ouest de la métropole, de recouper la nappe stratégique de l'Albien.



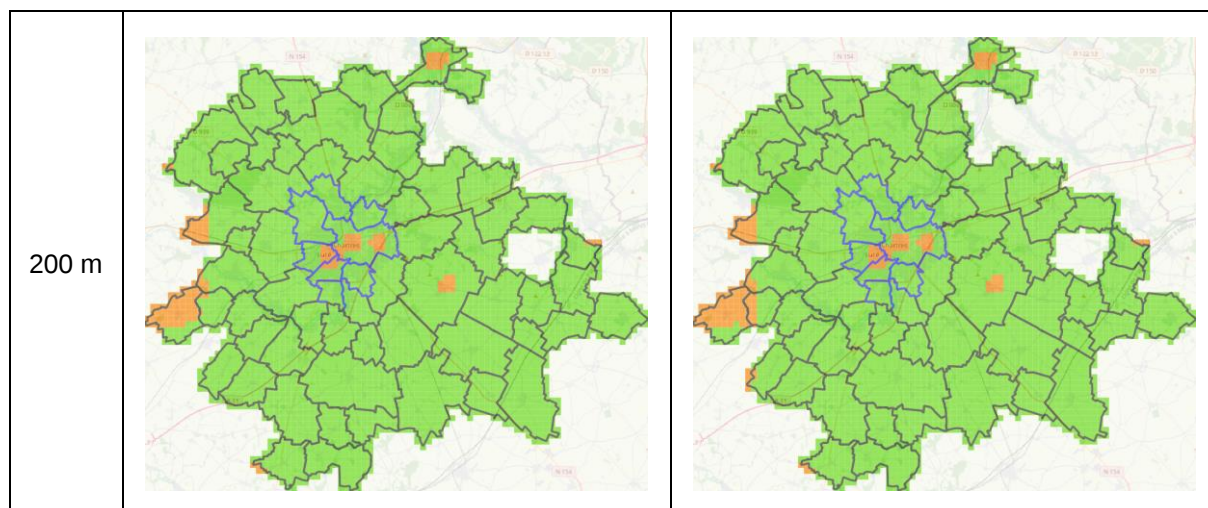


Figure 39 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de Chartres Métropole pour la géothermie sur échangeurs ouvert (gauche) et fermé (droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP-66590-FR)

3.2. REGLEMENTATIONS LIEES A LA GESTION DES EAUX ET AUX USAGES DU SOUS-SOL

Il convient de s'informer du contexte local relatif à la gestion des eaux souterraines et aux autres usages du sous-sol avant toute mise en œuvre d'une installation de géothermie de surface. Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE et SAGE) et les zones réservées à l'alimentation en eau potable donnent un certain nombre de recommandations et dispositions pouvant impacter les possibilités d'implantation de forages géothermiques.

3.2.1. SDAGE et SAGE

f) Définition des SDAGE et SAGE

Le **schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE)** est un document de planification de la politique de l'eau, institué par la loi sur l'eau de 1992, visant à atteindre **une gestion équilibrée et durable pour la préservation de la ressource en eau**. Le SDAGE est défini au niveau des bassins et sous-bassins hydrographiques tous les 6 ans via des concertations entre acteurs et utilisateurs de la ressource en eau.

Certaines nappes souterraines de par leurs caractéristiques quantitatives et qualitatives constituent des réserves stratégiques, à l'échelle locale ou du bassin, à préserver en vue de leur utilisation dans le futur pour les captages d'eau destinées à la consommation humaine. Certaines nappes sont inscrites dans les SDAGE comme étant à réserver dans le futur à l'alimentation en eau potable (NAEP).

A l'échelle locale, le **schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE)** est un outil de planification élaboré par la Commission Locale de l'Eau (CLE) rassemblant les partenaires utilisant la ressource d'un bassin hydrographique. Le SAGE a une portée juridique, il permet de

fixer, coordonner et hiérarchiser des objectifs généraux d'utilisation, de valorisation et de protection de la ressource en eau du bassin, des zones humides et des écosystèmes qui s'y trouvent. Il est opposable à l'administration (Etat, collectivité, établissement public, etc.) et aux tiers (i.e. les projets et installations devront être conformes au règlement du SAGE).

g) SDAGE s'appliquant sur le territoire de Chartres Métropole et contraintes opérationnelles

Le territoire de Chartres Métropole est concerné au Nord par le SDAGE Seine-Normandie 2022-2027 et au Sud par le SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027 depuis le mois de mars 2022¹¹.



Figure 40 : Emprise des bassins Loire-Bretagne et Seine-Normandie

Dans le cadre de l'état des lieux 2019, la caractérisation de l'état des masses d'eau souterraines et du risque de non atteinte des objectifs environnementaux de la Directive Cadre sur l'Eau a été évaluée sur la base du guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines de juillet 2019¹².

Le SDAGE Seine-Normandie 2010-2015 prévoit notamment un équilibre entre prélèvement et captage des masses d'eau souterraines, l'élimination des polluants et de leur introduction dans les masses d'eau, de préserver l'isolation des nappes une à une.

Le **SDAGE Seine-Normandie** donne ainsi un certain nombre de recommandations, en ce qui concerne la géothermie :

¹¹ <https://www.gesteau.fr/consulter-les-sdage>

¹² <https://sdage-sage.eau-loire-bretagne.fr/home/le-sdage-2022-2027/les-documents-du-sdage-2022---2027/etat-des-lieux-2019.html>

« Disposition 130 : Maîtriser les impacts des sondages, des forages et des ouvrages géothermiques sur les milieux

Tout ouvrage dans le sous-sol, y compris les ouvrages de géothermie, quels que soient sa profondeur et son usage, doit être réalisé, exploité et abandonné dans les règles de l'art et répondre aux contraintes réglementaires existantes, afin de préserver la ressource en eau. L'objectif est de garantir l'absence d'introduction de polluants et de préserver l'isolation des nappes traversées entre elles et vis-à-vis des inondations et des ruissellements de surface.

Pour respecter ces objectifs, en particulier pour la géothermie, il est fortement recommandé :

- que le maître d'ouvrage évalue les impacts du ou des forages d'ordre physique, thermique, qualitatif ou quantitatif sur le sous-sol et les milieux aquatiques et terrestres concernés ; que l'autorité administrative recense les ouvrages et tienne compte de leurs impacts, notamment cumulés, dans le cadre de l'instruction administrative des dossiers ;*
- que les eaux soient restituées à leur réservoir d'origine ou valorisées par un autre usage, pour les projets d'ouvrages à prélèvement en nappe. »*

Ces recommandations sont compatibles avec celles du Code Minier et, concernant la GMI, non applicables pour la première (pas d'instruction) et obligatoire dans le cadre de la GMI pour la deuxième.

Le programme de mesures du **SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027** autorise la réinjection dans le même aquifère d'eau utilisée à des fins géothermiques, ce qui est cohérent avec la GMI.

Selon la disposition 6E-4 du SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027, l'usage de la géothermie privilégie les solutions techniques, adaptées au projet considéré, pour lesquelles les forages n'atteignent ou ne traversent pas les NAEP (représentés en Figure 42 p 58 et Figure 43 p 58). En particulier, en présence d'une nappe sus-jacente à une NAEP, disponible pour un usage de géothermie :

- les forages de géothermie ne devront pas atteindre la NAEP,
- pour les échangeurs sur sondes (échangeurs géothermiques fermés), la profondeur de l'échangeur est limitée à la dernière formation géologique qui précède la NAEP et à la couche géologique imperméable qui la protège lorsqu'elle existe.

En l'absence d'autres nappes ou alternatives, si l'activité de géothermie ne peut être réalisée que sur une NAEP ou en lien avec cette nappe, elle est soumise aux conditions suivantes :

- le choix du type de géothermie devra permettre de limiter au maximum le nombre de forages,
- pour les échangeurs sur sonde, la profondeur de l'échangeur est limitée à la première formation géologique NAEP.

Dans tous les cas les forages sont réalisés strictement selon les prescriptions techniques réglementaires notamment en matière de cimentation permettant l'isolement des aquifères traversés et pour les échangeurs sur nappe (échangeurs géothermiques ouverts), les quantités d'eau prélevées sont intégralement réinjectées sans altération de la qualité dans le même horizon géologique.

Les schémas de gestion des NAEP peuvent prévoir des prescriptions particulières pour limiter ou encadrer les activités de géothermie sur les NAEP, en fonction de la dynamique et de l'impact cumulé du développement prévus ou constatés.

h) SAGE

Lorsqu'il est situé à l'intérieur du périmètre d'un SAGE, un prélèvement d'eau à usage géothermique doit être compatible avec les objectifs généraux et le règlement de celui-ci (art. L212-5-2 du Code de l'Environnement). Le règlement d'un SAGE peut limiter localement (voire interdire) l'usage géothermique des eaux souterraines.

Deux SAGE, qui dépendent du SDAGE Loire-Bretagne, sont en application au niveau de Chartres Métropole ¹³ (cf. Figure 41) :

- **SAGE Loir**, à dominante eaux de surface
- **SAGE Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés** à dominante eaux souterraines

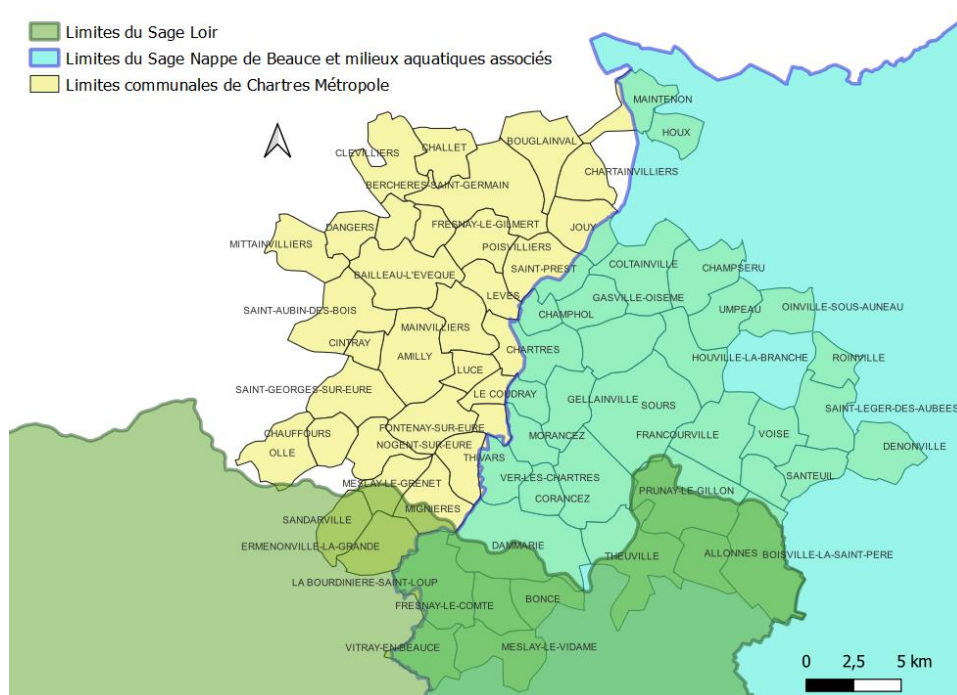


Figure 41 : SAGE en application au niveau de Chartres Métropole

Le **SAGE concernant la nappe de Beauce et milieux aquatiques** associés mentionne la géothermie.

Le SAGE de la nappe de Beauce et de ses milieux aquatiques associés a été approuvé par arrêté inter-préfectoral le 11 juin 2013 ¹⁴. Le complexe aquifère des calcaires de Beauce, également appelé nappe de Beauce constitue une unité hydrographique qui s'étend sur environ 9 500 km² entre la Seine et la Loire. Il se répartit sur deux grands bassins, Seine Normandie et Loire Bretagne et sur deux régions, Centre-Val de Loire et Ile de France.

¹³ <https://www.gesteau.fr/sage#8/47.957/2.159/sage> ; <https://www.gesteau.fr/telecharger/sage>

¹⁴ <https://www.sage-beauce.fr/le-sage-nappe-de-beauce/le-sage-approuve/>

Selon l'article 5 du règlement du SAGE de la nappe de Beauce sur les prélèvements en nappe à usage géothermique, *“les prélèvements en nappe à usage géothermique sont susceptibles d'avoir des impacts cumulés significatifs sur la quantité d'eau. En conséquence, tous les nouveaux projets faisant appel à la géothermie (collectivités, industriels, particuliers...), basés sur des prélèvements en nappe, doivent comprendre un doublet de forages avec réinjection de l'eau dans le même horizon aquifère que celui dans lequel est effectué le prélèvement. Cette règle s'applique sur tout le territoire du SAGE, sauf précisions apportées par un autre SAGE.”*

Ainsi, pour tout prélèvement en nappe à usage géothermique il est nécessaire de :

- Rappeler les objectifs du SAGE en matière de gestion quantitative de la ressource et les articles et/ou dispositions concernés par le projet
- Démontrer que le projet comprend un doublet de forage avec réinjection de toute l'eau prélevée dans le même horizon aquifère que celui dans lequel est effectué le prélèvement.

Également, d'après l'article n°8 portant sur l'objectif spécifique d'assurer la durabilité de la qualité de la ressource et visant à limiter l'impact des nouveaux forages sur la qualité de l'eau *“la réalisation des forages est toujours à risques pour la qualité de l'eau : mise en relation de nappes de qualité différente, impact direct sur la qualité (augmentation de la température de l'eau ou perte de fluides caloporteurs...). En conséquence, les forages peuvent avoir des impacts cumulés significatifs sur la qualité de l'eau. Tous les nouveaux forages, y compris s'ils sont destinés à un usage domestique ou géothermique, doivent respecter la norme (“Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages,” 2014) d'avril 2007 relative à la réalisation, au suivi et à l'abandon des ouvrages de captages ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forage.”* Cette règle s'applique sur tout le territoire du SAGE, sauf précisions apportées par un autre SAGE.

Des actions sont également menées pour « sensibiliser les particuliers et les collectivités sur la nécessité de sécuriser les forages de géothermie » et au « respect des objectifs de bon état de la DCE ». Les opportunités pour les acteurs sont ainsi les suivantes :

- Pour les particuliers utilisant la géothermie : s'inscrire dans une démarche de qualité et de développement durable ;
- Pour les consommateurs : sécuriser leur approvisionnement en eau potable ;
- pour la collectivité : sécuriser la ressource en eau ;
- pour le maître d'ouvrage : répondre immédiatement aux objectifs réglementaires de la DCE sur la ressource en eau. L'ensemble des éléments documents relatifs au SAGE de Beauce sont consultables sur le site <http://www.sage-beauce.fr/>.

Pour résumer sur le SAGE nappe de Beauce, la géothermie est autorisée en boucle ouverte avec réinjection des eaux produites dans le même horizon aquifère et en boucle fermée. Les opérations doivent être conformes à la réglementation et aux normes relatives à la réalisation et à l'exploitation de la ressource ainsi qu'aux objectifs du SAGE.

3.2.2. Nappes réservées pour l'alimentation en eau potable (NAEP)

La configuration géologique de la région Centre-Val de Loire confère à plusieurs grands aquifères une protection naturelle efficace qui se traduit par la quasi-absence de pollution anthropique. Comme cela est mentionné dans les SDAGE Loire-Bretagne, (Comité Du Bassin Loire-Bretagne 2015), orientation 6E et Seine-Normandie, (Comité Du Bassin Seine-Normandie 2016), orientation 25, il convient de conserver ce patrimoine en maîtrisant la réalisation de nouveaux ouvrages de prélèvement et en dédiant préférentiellement son exploitation à l'AEP par adduction

publique. Les nappes d'eau souterraine visées dans ces dispositions font parties des « zones de sauvegarde pour l'alimentation en eau potable dans le futur » conformément à la directive cadre sur l'eau et sont inscrites au registre des zones protégées.

Deux nappes à réserver pour l'alimentation en eau potable sont présentes dans le secteur de Chartres Métropole :

- **La nappe de la Craie séno-turonienne sous la Beauce,**
- **La nappe des Calcaires d'Etampes dans leur état captif.**

Dans le **SAGE de la nappe de Beauce**, est mentionné à l'article 4 le schéma de gestion pour les nappes NAEP (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014c). Dans ces zones, sont autorisés : (i) « les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable dans la limite du volume annuel maximal prélevable fixé pour cet usage à l'article 3 du présent règlement » et (ii) « les prélèvements à usage économique justifiant de la nécessité d'utiliser une eau d'une telle qualité, non disponible par ailleurs, à des coûts raisonnables, en l'état des autres ressources et des technologies existantes de traitement de ces eaux ».

La disposition 6E du **SDAGE Loire Bretagne 2016-2021** précise les éléments suivants : « Des schémas de gestion peuvent être élaborés pour les masses d'eau des nappes à réserver pour l'alimentation en eau potable afin de préciser les prélèvements, autres que ceux pour l'alimentation en eau potable par adduction publique, qui peuvent être permis à l'avenir. Les prélèvements pour les usages autres doivent nécessiter un haut degré d'exigence en termes de qualité d'eau (eau de procédé agroalimentaire ou d'industries spécialisées) ou répondre aux besoins d'abreuvement des animaux en l'absence de solutions alternatives, ou encore doivent être motivés par des raisons de sécurité civile. Les schémas analyseront également l'évolution prévisible des prélèvements et leur impact à moyen terme sur l'équilibre quantitatif de la nappe.

En l'absence de schéma de gestion de ces nappes :

- Les prélèvements supplémentaires sur des ouvrages existants ou nouveaux ne pourront être acceptés que pour l'alimentation en eau potable par adduction publique ;
- Des prélèvements nouveaux pour un autre usage seront possibles uniquement en remplacement de prélèvements existants dans le même réservoir et le même secteur, et en l'absence de déficit quantitatif de la nappe concernée.

Les schémas de gestion sont élaborés suivant les cas :

- Par la commission locale de l'eau si les masses d'eau concernées sont situées sur le périmètre d'un Sage ;
- Par une commission inter-Sage si les masses d'eau concernées sont situées sur plusieurs Sage ;
- Par les services des préfets si les masses d'eau concernées sont hors d'un périmètre de Sage ou en partie seulement sur un périmètre de Sage et dans ce dernier cas avec la commission locale de l'eau.

Les zones NAEP sont compatibles avec les exploitations géothermales par sonde et sur nappe puisque l'exploitation par doublet sur nappe permet de restituer l'ensemble des volumes d'eau prélevés à la nappe d'origine et que les sondes géothermiques sont isolées des aquifères grâce à la cimentation des ouvrages. Les deux types d'ouvrage sont ainsi en accord avec les objectifs et dispositions définis sur ces zones NAEP. Dans ces zones et comme sur l'ensemble de la métropole, les bonnes pratiques sont d'usages lors de la conception et mise en place des ouvrages géothermiques, qu'ils soient sur sonde ou sur nappe.

Les services de l'ARS recommandent également de privilégier les doublets géothermiques sur les zones NAEP afin de limiter le nombre d'ouvrages ciblant les nappes et donc les risques de pollution des nappes lors de la réalisation des forages. En effet, pour une puissance donnée un doublet peut être équivalent à plusieurs sondes verticales.

Pour résumer sur les zones NAEP, la géothermie est autorisée en boucle ouverte (doublet sur nappe) et en boucle fermée. L'ARS recommande de limiter le nombre de forage réalisé dans ces zones et ainsi de privilégier les doublets géothermiques pour limiter les risques de pollutions des nappes NAEP.

Ce classement affecte les communes de Allonnes, Boisville-la-Saint-Père, Champseru, Chartres, Denonville, Francourville, Gellainville, Houville-la-Branche, Nogent-le-Phaye, Oinville-sous-Auneau, Prunay-le-Gillon, Roinville, Saint-Léger-les-Aubées, Sours, Umpeau et Voise (Figure 42 et Figure 43).

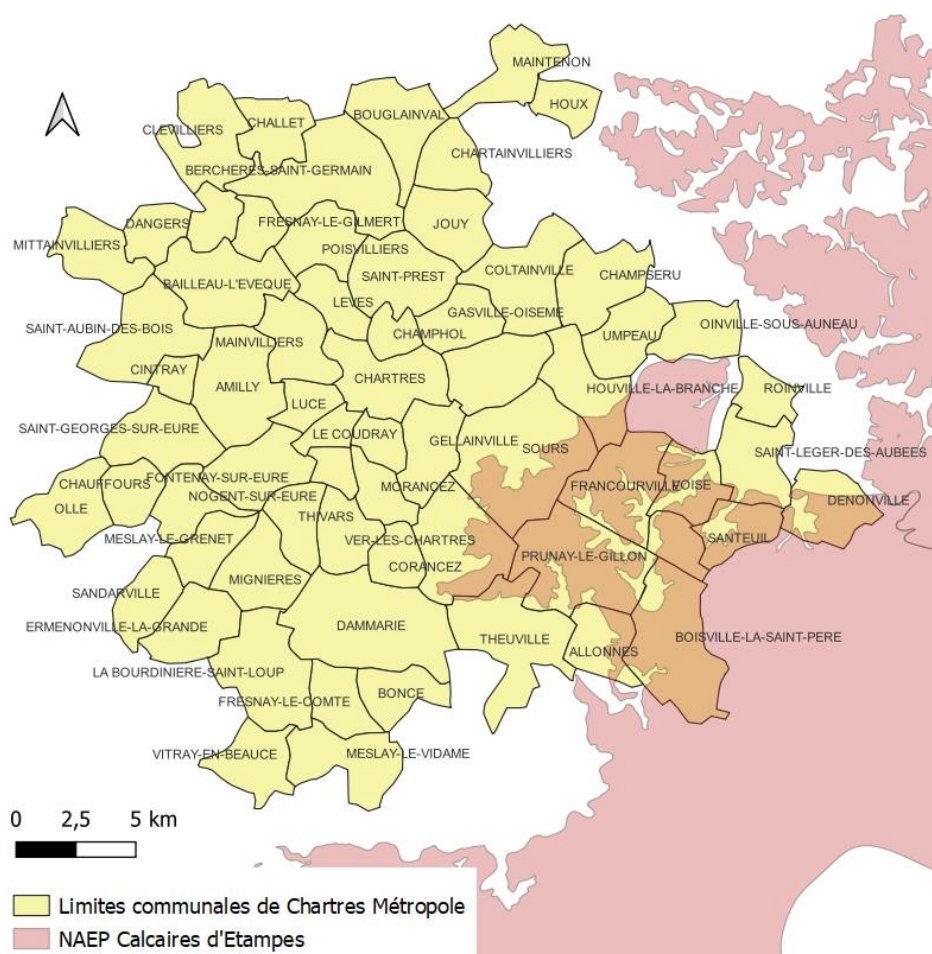


Figure 42 : NAEP des calcaires d'Etampes

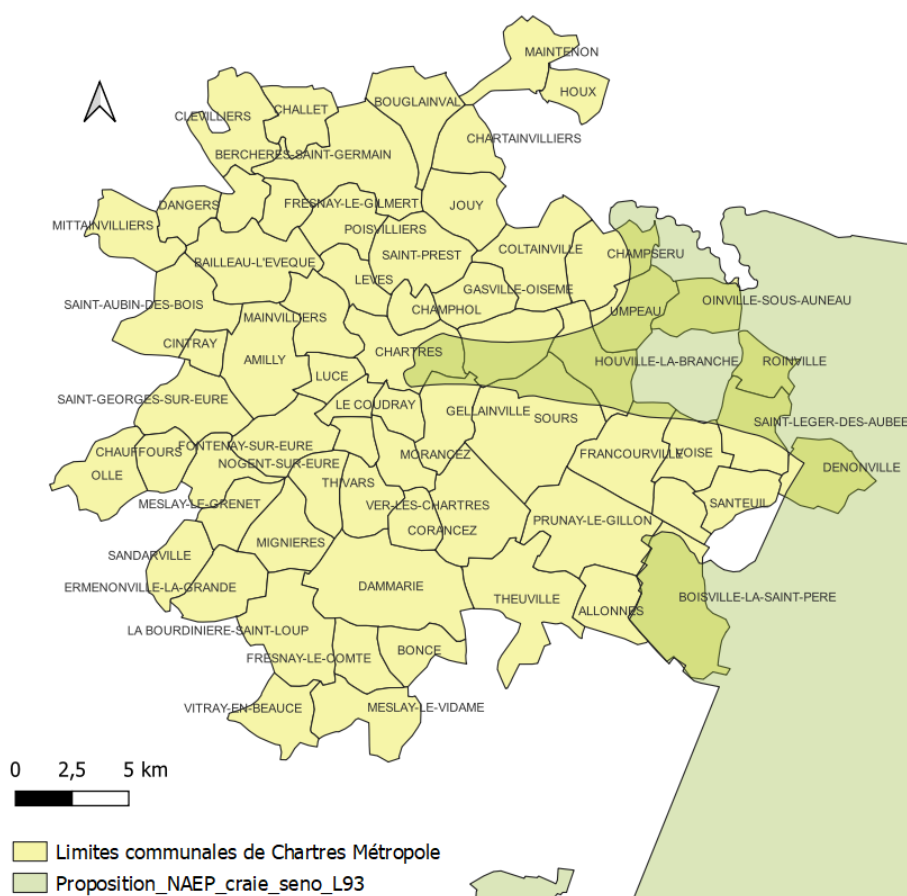


Figure 43 : NAEP de la Craie séno-turonienne sous la Beauce

Ceci implique que **tout forage d'eau, y compris pour la géothermie en système ouvert, doit respecter la norme AFNOR NFX 10-999 d'avril 2007** relative à la réalisation, au suivi et à l'abandon des ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forage. Certains éléments de cette norme ont été repris dans l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, **cependant la norme est plus précise sur plusieurs sujets et doit donc être consultée.**

Le SAGE indique aussi que *"tous les nouveaux projets faisant appel à la géothermie (collectivités, industriels, particuliers...), basés sur des prélèvements en nappe, doivent comprendre un doublet de forages avec réinjection de l'eau dans le même horizon aquifère que celui dans lequel est effectué le prélèvement"*. Cette partie est déjà obligatoire dans le cadre de la GMI.

3.2.3. Ressources stratégiques

Le SDAGE Seine-Normandie de 1996, a affirmé l'importance stratégique de **l'Albien et du Néocomien comme ressource en eau potable de secours ultime**. Ces nappes se trouvant à plus de 300 m de profondeur sous Chartres Métropole, le cadre réglementaire de la GMI ne s'applique pas. Le développement d'installations géothermiques plus profondes sera soumis à demande d'autorisation auprès de la DRIEAT. La DRIEAT pourra demander des mesures particulières, comme la réalisation de forages pouvant être convertis en captages d'eau potable le cas échéant.

3.3. RÉGLEMENTATIONS LIÉES À LA PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU

Des servitudes peuvent être instituées au titre du L.515-12 du code de l'environnement concernant l'utilisation du sol et du sous-sol. Ces servitudes peuvent être instituées sur des terrains pollués par l'exploitation d'une installation, sur l'emprise des sites de stockage de déchets ou dans une bande de 200 mètres autour de la zone d'exploitation, ou sur l'emprise des sites d'anciennes carrières ou autour de ces sites sur des surfaces dont l'intégrité conditionne le respect de la sécurité et de la salubrité publique ou dans le voisinage d'un site de stockage géologique de dioxyde de carbone. Ces servitudes portent sur la limitation ou l'interdiction des modifications de l'état du sol ou du sous-sol, la limitation des usages faits du sol et du sous-sol. Des prescriptions particulières pouvant aller jusqu'à l'interdiction de réaliser un forage sur un terrain donné peuvent être posées. La liste des servitudes en cours et des restrictions qui en découle est disponible au niveau communal et il convient d'en prendre connaissance avant tout travaux de forage.

Cas particulier : Les **périmètres de protection des captages d'eau** sont rendus obligatoires par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et l'article L. 1321-2 du code de la santé publique (Figure 7). En vue d'assurer la protection de la qualité des eaux de pollutions ponctuelles ou diffuses, la déclaration d'utilité publique (DUP) détermine autour du puits de prélèvement :

- Un **Périmètre de Protection Immédiate** (PPI) acquis en pleine propriété ou de façon dérogatoire par l'établissement d'une convention de gestion entre la ou les collectivités publiques propriétaires et l'établissement public de coopération intercommunale ou la collectivité publique responsable du captage. Le site doit être clôturé (sauf dérogation) et toutes activités y sont interdites hormis l'exploitation et l'entretien de l'ouvrage de prélèvement et au périmètre lui-même. L'objectif est ainsi de limiter la détérioration des ouvrages et le déversement de polluant à proximité immédiate du puits ;
- Un **Périmètre de Protection Rapprochée** (PPR) à l'intérieur duquel toutes sortes d'installations peuvent être interdites ou réglementées et plus particulièrement les activités susceptibles de provoquer des pollutions (e.g. construction, dépôts, rejets, etc.). Cette zone est plus vaste et son objectif est de prévenir la migration des polluants vers le puits. D'après l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, **les échangeurs géothermiques destinés à l'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance ne peuvent pas être implantés dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées**; en d'autres termes, le régime simplifié de la GMI ne s'applique pas dans le PPR.
- Un **Périmètre de Protection Eloignée** (PPE) où les installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols peuvent être réglementés. Il est créé s'il existe un risque potentiel de pollution que la nature des terrains traversés ne permet pas de réduire en toute sécurité malgré l'éloignement du puits de captage. Il recouvre en général l'ensemble du Bassin d'Alimentation du Captage (BAC) ou Aire d'Alimentation du Captage (AAC).

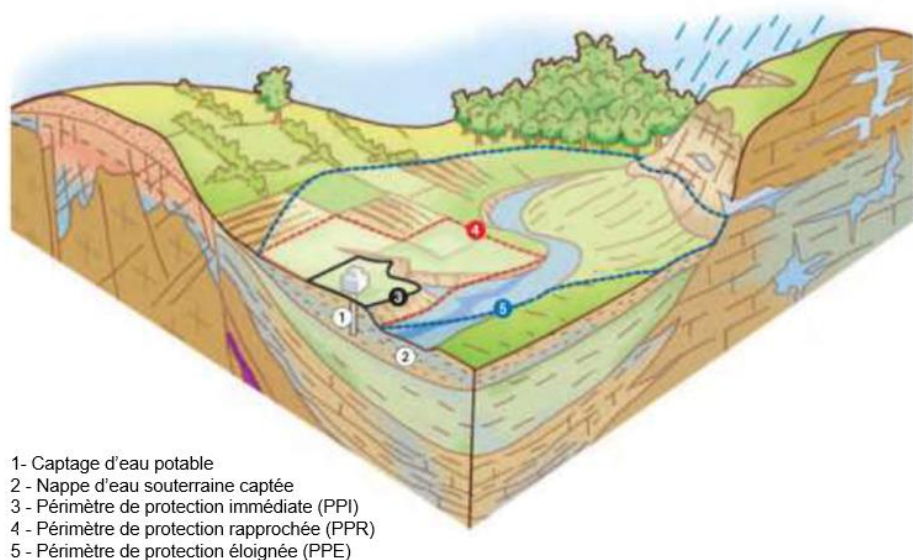


Figure 44 : Les différents périmètres de protection des ouvrages pour la consommation humaine et des sources d'eaux minérales naturelles conditionnées (source : BRGM, M. Villey)

Le périmètre de protection d'un captage est défini après délibération de la collectivité, suite à une étude géologique et avis d'un hydrogéologue agréé. Il est également requis de procéder à une enquête publique et administrative, et de recueillir l'avis du Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques (Coderst). Il appartient à la collectivité, maître d'ouvrage, d'engager cette procédure qui doit conduire à un arrêté de déclaration d'utilité publique (DUP). Les services de l'Agence Régionale de la Santé (ARS) accompagnent l'instruction de ces périmètres et de leurs servitudes.

Les contraintes d'usage et de mise en place d'échangeur géothermique dans les périmètres de protection rapprochés et éloignés sont spécifiées par les dossiers de déclaration d'utilité publique de chaque captage d'eau potable.

Pour résumer sur les zones de servitudes, le régime déclaratif de la géothermie de minime importance (GMI) ne s'applique pas dans les périmètres de protection rapprochée (PPR) des captages d'eau. La GMI peut s'appliquer dans les périmètres de protection éloignée (PPE), sauf disposition spécifique éditée dans les dossiers de déclaration d'utilité publique des captages. Dans les périmètres de protection rapprochés, il conviendra donc pour les nouveaux projets de déposer un dossier de recherche et d'exploitation de la ressource géothermale.

3.4. SYNTHESE DES CONTRAINTES REGLEMENTAIRES

Les deux SAGE et les deux SDAGE (hors NAEP) sont peu contraignants puisqu'ils imposent simplement de suivre les réglementations et bonnes pratiques et les normes relatives à la réalisation et à l'exploitation de la ressource. Pour la suite de l'analyse, on agrège d'une part NAEP et PPE où il existe un enjeu spécifique sur la qualité de l'eau mais où la Géothermie de Minime Importance s'applique, et d'autre part les PPI et PPR où la GMI ne s'applique pas (cf. Figure 45 et Tableau 3). Les zones les plus contraignantes (PPI et PPR) se trouvent quasi exclusivement à l'extérieur du pôle urbain et couvrent à peine 3,6 % de la superficie de la

Métropole, tandis que les NAEP et PPE en couvrent 23,8 %, principalement dans l’est, et là-aussi à l’extérieur du pôle urbain principalement.

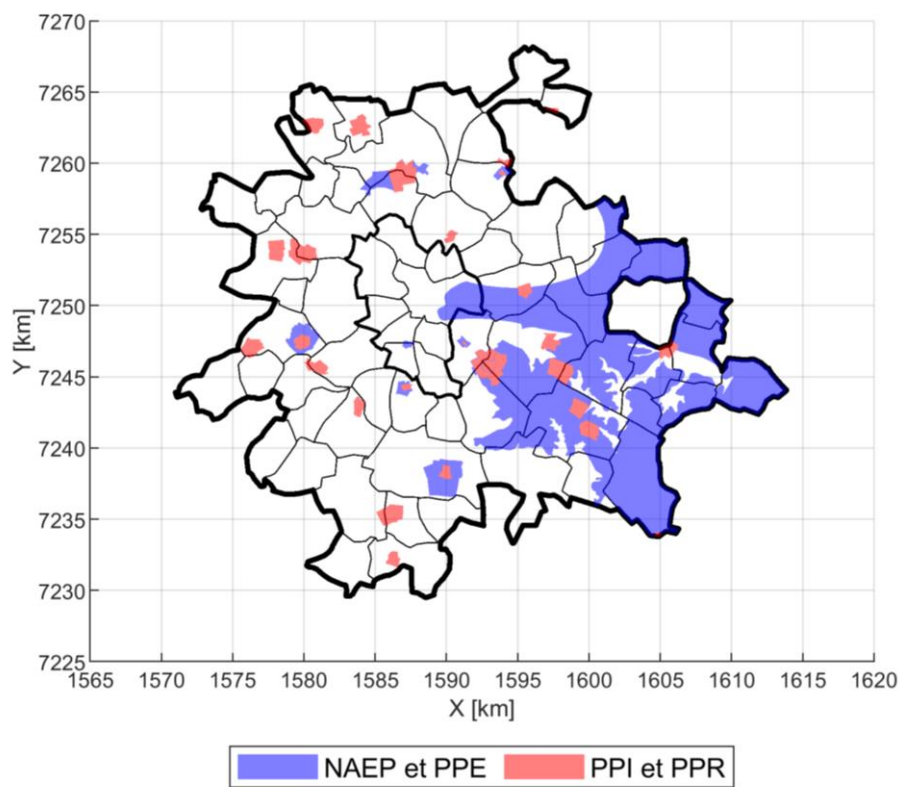


Figure 45 : Agrégation des contraintes réglementaires

	PPI et PPR			NAEP et PPE		
	Métropole	Pôle	Hors Pôle	Métropole	Pôle	Hors Pôle
Superficie [km²]	30,4	0,0	30,4	201,3	6,0	195,3
Superficie de la catégorie [%]	3,6	0,0	3,9	23,8	8,8	25,2

Tableau 3 : Statistique sur l’agrégation des contraintes réglementaires. Les pourcentages de superficie dans une catégorie (Pôle ou hors Pôle) sont relatifs à la superficie de cette catégorie.

4. Estimation de la géothermie de surface : croisement entre ressources et besoins

4.1. ESTIMATION DES BESOINS

Le CSTB a estimé les besoins en énergie thermique (chauffage, Eau Chaude Sanitaire et climatisation) sur le territoire de Chartres Métropole à l'échelle du bâtiment (cf. Tableau 4). La densité de besoin dans le pôle urbain est bien plus élevée que dans les communes rurales (cf. Figure 46).

	Pôle Urbain		Communes rurales	Total
		Dont commune de Chartres		
Nombre de bâtiments	31325	10196	26672	57997
Chauffage [GWh/a]	1882	913	1567	3449
Eau Chaude Sanitaire [GWh/a]	123	92	41	164
Climatisation [GWh/a]	177	113	73	249

Tableau 4 : Besoins en énergie thermique (source des données : CSTB, statistiques : BRGM)

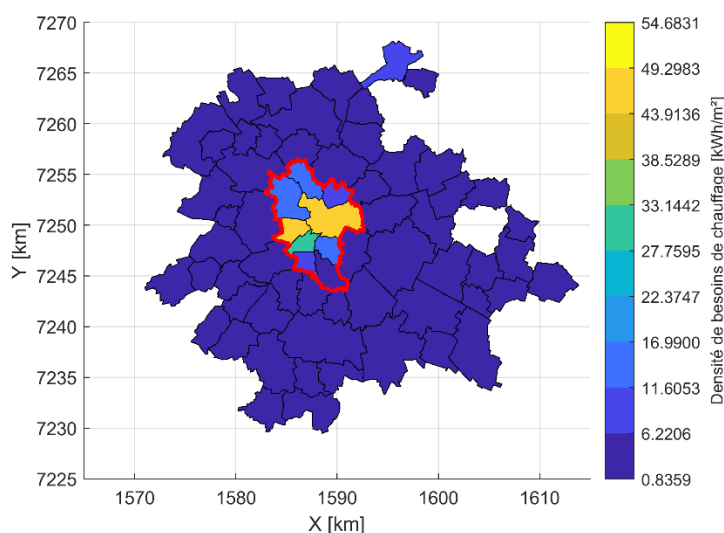


Figure 46 : Densité de besoin de chauffage (ratio entre besoin de chauffage et superficie de la commune). Source des données : CSTB, représentation : BRGM.

Le croisement entre besoins et ressources géothermales est mené à l'échelle de la parcelle.

4.2. METHODOLOGIE

4.2.1. Prétraitement : détermination du foncier disponible

On commence par estimer le foncier disponible pour l'implantation des forages. On construit un buffer (tampon) de 5 m autour de chacun des usages suivants du sol définis par la BD-TOPO:

- Terrains de sport,
- Surface hydrographiques,
- Réservoir,
- Pylône,
- Postes de transformation,
- Plan d'eau,
- Equipements de transport,
- Cimetière,
- Aérodrome.

Ces polygones et leurs buffers sont exclus du foncier disponible. Un buffer d'exclusion d'une extension de 5 m est aussi construit autour de l'emprise des bâtiments existants identifiés par le CSTB. Le cadastre comprend 117018 parcelles. Le croisement avec le cadastre est plus délicat. En effet, chaque bâtiment est sur une ou plusieurs parcelles, mais chaque parcelle peut elle-même accueillir un ou plusieurs bâtiments.

La règle suivante a été appliquée :

1. On identifie chaque bâtiment qui ne partage aucune de ses parcelles avec un autre bâtiment. Ces bâtiments peuvent avoir une ou plusieurs parcelles (cas a ou b sur la Figure 47). On peut légitimement imaginer que le propriétaire de ce bâtiment peut implanter les forages sur l'ensemble de ses parcelles. Les parcelles sont regroupées en une unique parcelle équivalente, puis on construit un buffer d'exclusion de 5 m à l'intérieur de la parcelle (tel que le dispose l'arrêté du 25 juin 2015) ; le terrain restant sera disponible pour l'implantation des forages.
2. Ensuite, on traite les parcelles qui n'ont pas été identifiées dans la première phase, c'est-à-dire celles qui hébergent plusieurs bâtiments. Ces parcelles sont identifiées et découpées afin d'en attribuer une partie à chaque bâtiment présent. Les lignes de découpage correspondent aux lignes d'équidistance entre les bâtiments (cf. cas c et d sur la Figure 47).

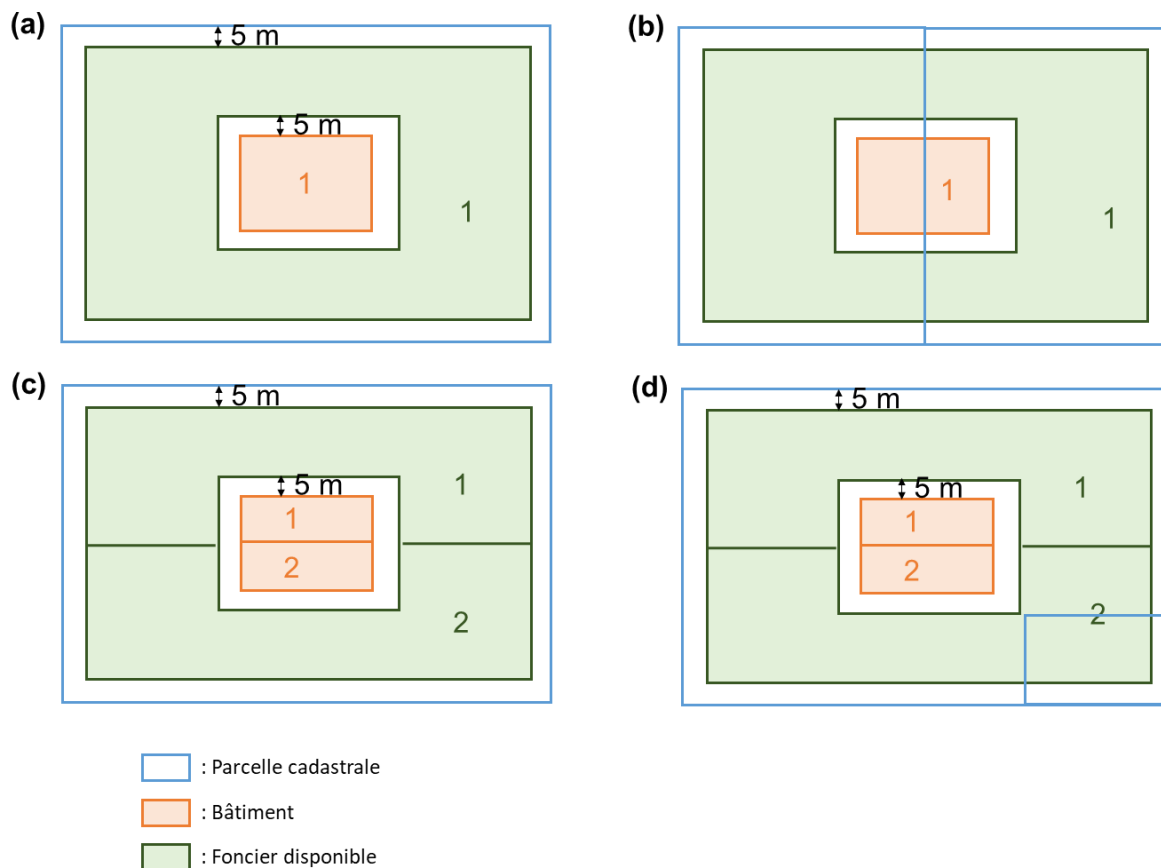


Figure 47 : Plusieurs cas de figure pour le découpage des parcelles cadastrales : a) Un bâtiment sur une parcelle. b) Un bâtiment sur plusieurs parcelles. c) Plusieurs bâtiments sur une parcelle. d) Plusieurs bâtiments sur plusieurs parcelles.

4.2.2. Potentiel des champs sondes géothermiques verticales

La méthode utilisée a été développée pour l'estimation du potentiel de la Communauté de Commune de Loire Layon Aubance (Baudouin *et al.*, 2020), de Orléans Métropole (Maragna *et al.*, 2021b) et de la Métropole du Grand Paris (Maragna *et al.*, 2022). On en rappelle ici les principaux éléments. Cette méthode permet d'estimer sur chaque parcelle, la quantité d'énergie thermique qui peut être fournie de *manière pérenne* par une pompe à chaleur sur champ de sondes. « *Pérennité* » signifie ici que le champ de sondes doit être dimensionné pour qu'au plus fort de l'hiver, lorsque la Pompe A Chaleur extrait un maximum de chaud du terrain pour produire du chauffage, la température en sortie du champ de sondes (et donc en entrée d'évaporateur de la PAC) ne descende pas en-dessous d'une température fixée à -3°C , cette valeur étant un critère réglementaire imposée par le régime simplifié du Code Minier (Géothermie de Minime Importance).

On détermine, parcelle par parcelle, le taux de couverture de chaleur par géothermie τ_E , c'est-à-dire le ratio entre quantité de chaleur pouvant être fournie par la pompe à chaleur géothermique et les besoins du bâtiment ($0 < \tau_E < 1$). Le modèle de τ_E prend en compte les variables :

- Décrivant la sollicitation :
 - Besoin de chaud (somme du chauffage et de l'Eau Chaude Sanitaire) [MWh/an]
 - Besoin de froid [MWh/an]

- Décrivant la géométrie : La parcelle est assimilée à un parallélépipède, avec un « trou » parallélépipédique, où peut se loger un bâtiment :
 - Surface de cette parcelle simplifiée
 - Elongation du parallélépipède
 - Surface du « trou »

Un certain nombre de paramètres sont fixés (cf. Tableau 5). Le choix des valeurs de propriétés thermiques du terrain est décrit en section 2.2.4. Les températures extrêmes acceptables sont fixées par la réglementation, i.e. par la géothermie de minime importance (cf. section 3.1.1). Le rayon et la résistance de forage sont des valeurs caractéristiques observées en France (Maragna *et al.*, 2021a).

Catégorie	Paramètre	Valeur
Propriétés thermiques du terrain	Capacité calorifique du terrain ρC_p [MJ.K ⁻¹ .m ⁻³]	2,20
	Conductivité thermique du terrain λ [W.K ⁻¹ .m ⁻³]	1,8
	Température initiale du terrain traversé T_0 [°C]	15,0
Conditions de fonctionnement de la PAC	Ecart de température E/S ΔT [°C]	3
	Température de sortie de la PAC minimale acceptable T_{min} [°C]	-3
	Température de sortie de la PAC maximale acceptable T_{max} [°C]	40
	COP chaud [-]	4
	EER froid [-]	7
Sonde géothermique verticale	Rayon du forage [mm]	80
	Résistance de la sonde géothermique [K.m.W ⁻¹]	0,080
	Profondeur du forage [m]	200

Tableau 5 : Paramètres fixés pour l'analyse du potentiel des sondes géothermiques verticales

Par rapport aux trois études précédentes mentionnées au début du paragraphe, la méthode a été perfectionnée afin de prendre en compte les interactions entre les forages de parcelles voisines. En effet, chaque champ de sondes crée une perturbation thermique de l'ordre de un à quelques degrés Celsius à quelques dizaines de mètres du champ de sondes. Ces perturbations sont majoritairement des diminutions de températures puisque le besoin de chaud est bien plus important que celui de froid. Dans un contexte urbain dense, ces interférences doivent être prises en compte afin d'éviter de surexploiter une ressource limitée, et estimer de manière plus réaliste le potentiel de la géothermie sur sondes. Ceci est fait de manière itérative : Un premier calcul de potentiel est mené en considérant que toutes les parcelles sont indépendantes les unes des autres, puis les interactions thermiques entre parcelles voisines sont estimées. La quantité d'énergie extraite des parcelles subissant les plus fortes interactions (c'est-à-dire le plus grand refroidissement par leurs voisines) est peu à peu diminuée afin que la température minimale d'entrée de champ de sondes converge vers le critère de -3 °C.

4.2.3. Potentiel des doublets sur aquifères

La méthode utilisée a été développée pour l'estimation du potentiel de la Métropole du Grand Paris (Maragna *et al.*, 2022). Cette méthode permet d'estimer sur chaque parcelle la quantité de chaud, froid et ECS pouvant être produite de manière pérenne. Elle dépend des paramètres suivants :

- Décrivant la sollicitation :
 - Besoin de chaud (somme du chauffage et de l'Eau Chaude Sanitaire) [MWh/an]
 - Besoin de froid [MWh/an]
- Décrivant le doublet :
 - Angle entre la droite reliant le puits injecteur au puits producteur et l'écoulement θ
 - Distance entre les puits d
- Relatifs à l'aquifère :
 - Epaisseur de l'aquifère e_{aq}
 - Perméabilité de l'aquifère k_{aq} [m.s⁻¹]
 - Vitesse de Darcy régionale v_D [m.s⁻¹]
 - Epaisseur de l'éponte e_{ep} (couche située au-dessus et en-dessous de l'aquifère)
 - Perméabilité de l'éponte k_{ep} [m.s⁻¹]

Un seuil minimal est fixé pour considérer le doublet sur nappe. Ce seuil porte sur la somme de la consommation de chaud et de froid et est fixé à 150 MWh/an : en-dessous de ce seuil, seule la solution sur sondes est considérée, car la mise en place d'un doublet se justifie difficilement d'un point de vue économique. Par ailleurs, on considère que les puits des doublets ne peuvent pas être placés sous les bâtiments, mais uniquement dans les espaces libres dans la parcelle.

Pour chaque parcelle :

- Différentes orientations sont testées automatiquement, entre 0° (puits orientés dans la direction de l'écoulement, avec producteur en amont) et 90 ° (puits orientés perpendiculairement à l'écoulement, cf. Figure 48).
- Une partie de l'eau refroidie injectée au puits injecteur est « recyclée » par le puits producteur (le puits de pompage). Ce « taux de recyclage » entre ces deux puits est estimé au moyen d'un modèle semi-analytique (Maragna *et al.*, 2019). On a considéré que ce taux de recyclage ne devait pas excéder 30% après 6 mois de fonctionnement.
- La disposition des puits qui minimise les interférences est retenue. Si la condition mentionnée ci-dessous est dépassée, alors le taux de couverture de la consommation est diminué de 10%, jusqu'à ce que la contrainte sur le taux de couverture soit couverte.

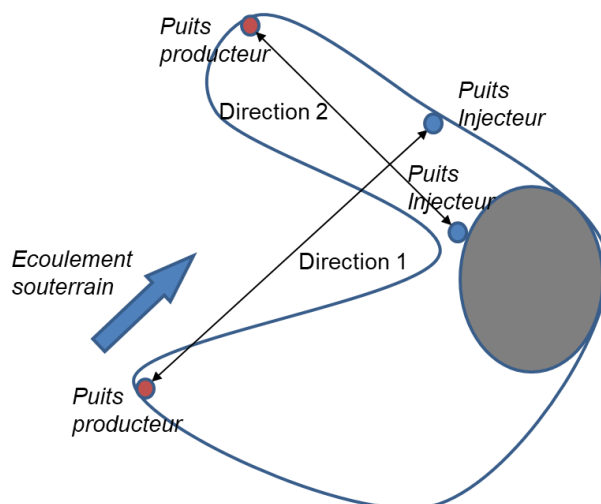


Figure 48 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement.

4.3. RESULTATS DU CROISEMENT ET ANALYSE

Les fichiers géomatiques (format shapefile) représentant les consommations énergétiques et le potentiel géothermique à différentes granulométries (bâtiments, carroyage, IRIS, commune) ont été remis à Chartres Métropole pour intégration dans leur Système d'Information Géographique (SIG).

4.3.1. Potentiel des sondes géothermiques verticales

La Figure 49 donne un exemple de représentation des résultats à l'échelle du bâtiment.



Figure 49 : Exemple de représentation des résultats à l'échelle du bâtiment

Le potentiel agrégé à l'échelle des communes ou des IRIS est variable (cf. Figure 50) et a tendance à être plus faible dans les zones où la densité de besoin thermique est plus élevée (cf. Figure 51). Le taux de couverture des besoins de chauffage et eau chaude sanitaire par géothermie sur sondes est de 33 % (=1179/3612) sur l'ensemble de la Métropole, 28 % (=557/2005) sur le Pôle Urbain et 39 % (=623/1607) dans les communes rurales. Dans les communes rurales, le taux de couverture varie entre 20% et 70%. Cette plage de valeur peut sembler relativement faible, mais peut s'expliquer par le fait que de nombreuses communes

s'organisent autour d'un centre-bourg relativement compact, qui offre peu de foncier disponible à l'implantation des forages.

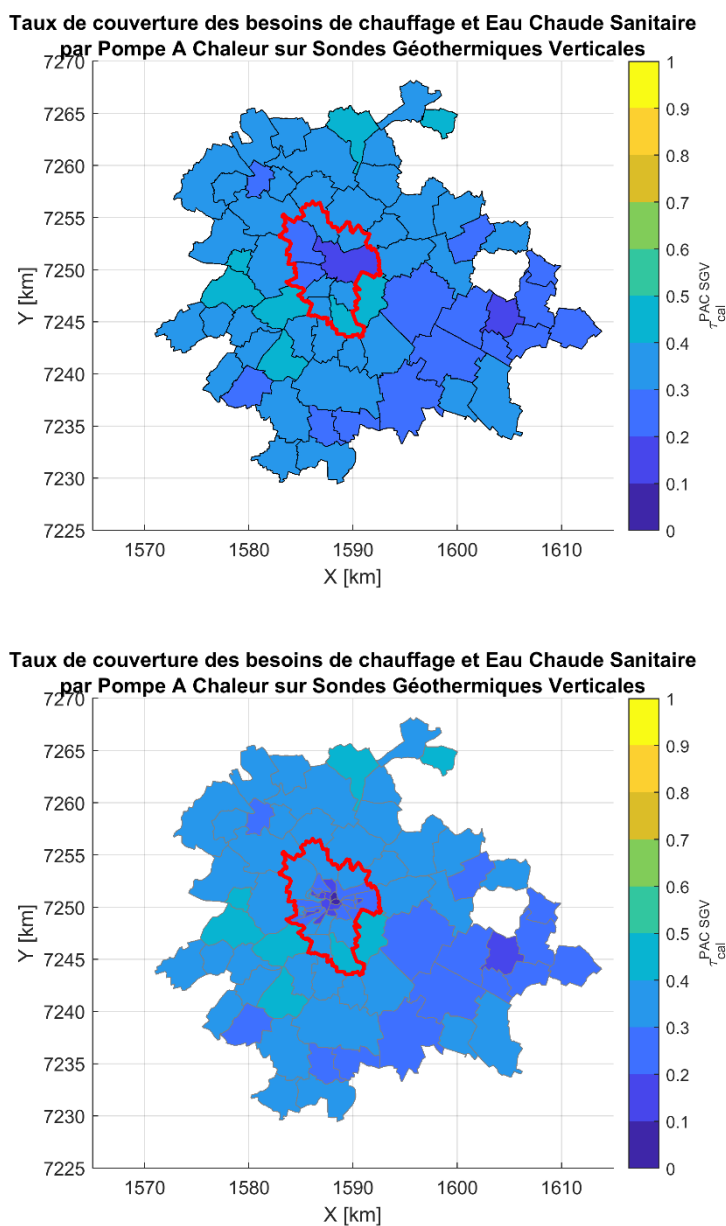


Figure 50 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par Pompe A Chaleur sur Sondes Géothermiques Verticales, agrégé à l'échelle de la Commune (à gauche) ou de l'IRIS

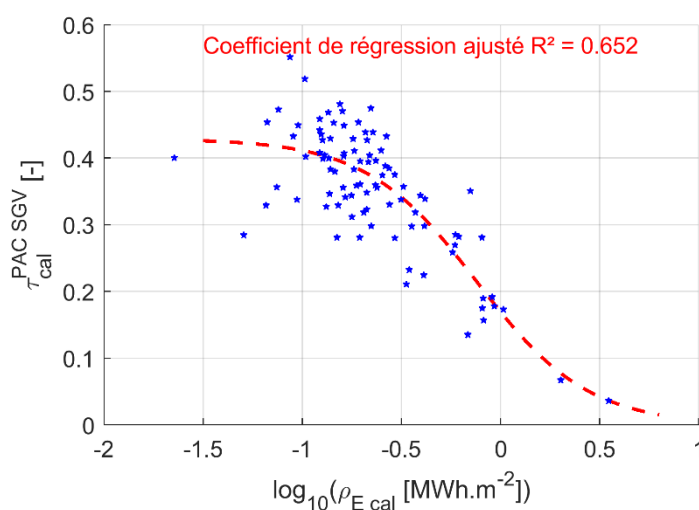


Figure 51 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par une Pompe à Chaleur sur Champ de Sondes Géothermiques Verticales en fonction de la densité de besoin de chauffage et ECS (ratio entre la somme ces deux besoins et la surface disponible). Données agrégées à la maille IRIS.

4.3.2. Potentiel des doublets sur aquifère et comparaison avec le potentiel des champs de sondes

Seuls les bâtiments représentant un besoin de chaud et d'ECS supérieur à 150 MWh/a sont pris en compte, dans la mesure où la réalisation d'un doublet ne se justifie d'un point de vue économique que pour des bâtiments avec des besoins énergétiques relativement conséquents. Cela représente 3814 bâtiments sur 57997 (6,5%), mais 1521 GWh/a sur 3612 GWh/a, soit 44% du besoin.

En prenant en compte les critères donnés au §4.2.3 d'espacement minimum au sein de la parcelle, de présence de l'aquifère de la Craie ou du Tertiaire, et d'éventuelles interactions entre installations voisines, il ressort que l'aquifère de la Craie pourrait alimenter 591 bâtiments (sur 3814), les pompes à chaleur fournissant ainsi 270 GWh/a de chauffage et d'ECS (cf. Figure 52). Ce n'est pas négligeable puisque, sur ce segment des grands bâtiments, les PAC sur champ de sondes pourraient contribuer à hauteur de 461 GWh/a. Au total, sur cette consommation de 1521 GWh/a, 587 GWh/a pourrait être couvert par les PAC sur aquifère ou champ de sondes. Cette valeur découle d'une analyse à la parcelle et évite d'ajouter, pour une même parcelle, les potentiels des deux technologies.

L'aquifère du Tertiaire contribue de manière marginale car il ne se trouve pas au droit des bâtiments-cibles et/ou le foncier est insuffisant.

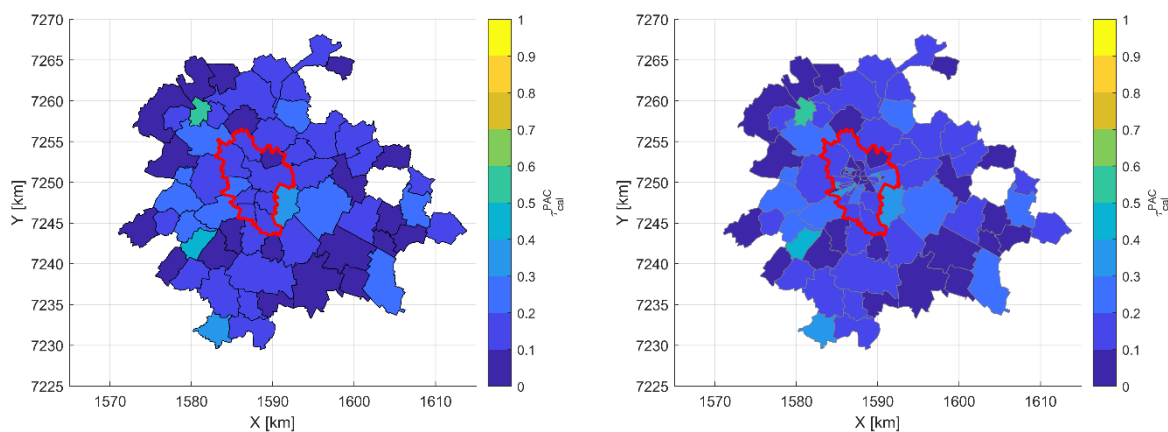


Figure 52 : Taux de couverture des besoins de chauffage et Eau Chaude Sanitaire par Pompe A Chaleur sur aquifères, agrégé à l'échelle de la Commune (à gauche) ou de l'IRIS (à droite). Le taux est calculé sur les bâtiments nécessitant plus de 150 MWh/a de chauffage et ECS

4.3.3. Agrégation sur les Zones d'Activités Economiques

Chartres Métropole a communiqué la liste des Zones d'Activités Economiques. Le potentiel estimé sur chaque bâtiment a ainsi été agrégé à cette échelle (cf. Figure 53).

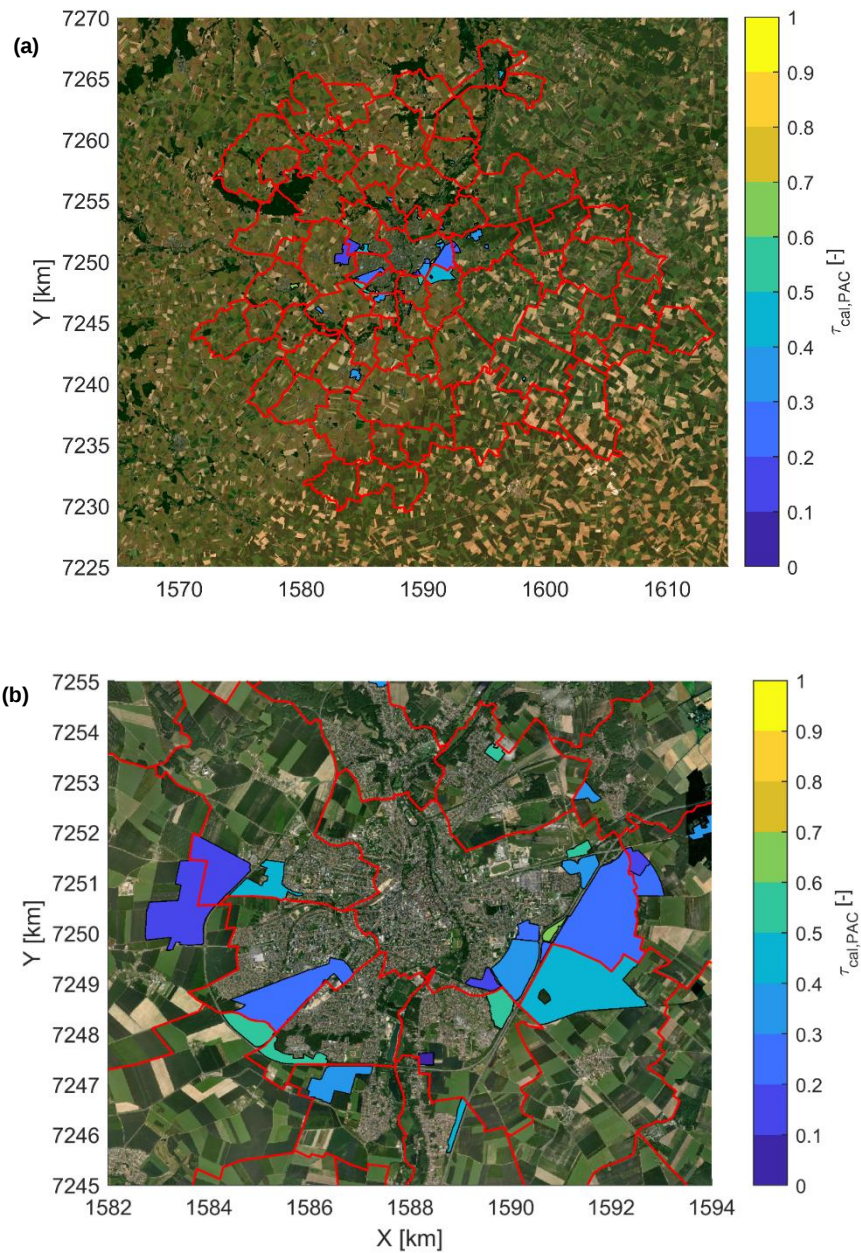


Figure 53 : Taux de couverture des besoins de chaud et d'ECS des bâtiments existants contenus dans chaque Zone d'Activité Economique (ZAE), en prenant en compte pour chaque bâtiment la technologie (sondes ou doublet) délivrant la plus grande quantité d'énergie géothermale. (a) sur l'ensemble de la Métropole, (b) zoom sur le pôle urbain.

5. Conclusions

L'analyse de l'ensemble des contraintes réglementaires imposées par le Code Minier et la gestion des eaux souterraines montre que ces contraintes ne constituent pas un frein au déploiement de la géothermie de surface sur le territoire de Chartres Métropole. Les Périmètres de Protection Rapprochée (PPR) et de Protection Immédiate des captages d'Alimentation en Eau Potable constituent la principale contrainte limitante, mais ne concernent que 4% du territoire, très majoritairement en-dehors du Pôle Urbain. Il existe néanmoins un enjeu pour la préservation de l'eau souterraine puisqu'un quart du territoire, majoritairement à l'est, est couvert par des dispositifs de protection.

Deux aquifères sont disponibles : l'aquifère de la Craie sur l'ensemble de la Métropole, et l'aquifère Tertiaire à l'Est. D'après les données collectées, la ressource géothermale constituée par l'aquifère de la Craie est excellente dans l'ensemble de la Métropole, à l'exception des points bas (par ex. Vallée de l'Eure) où la réinjection peut être plus problématique. La partie exploitable de l'aquifère Tertiaire se trouve en-dehors du Pôle Urbain.

Sur l'ensemble des bâtiments de la Métropole, les besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) tels qu'estimés par le CSTB sont de 3612 GWh/a. Le potentiel énergétique de la géothermie sur chaque bâtiment a été estimé par le BRGM à l'aide d'un traitement cartographique combinant caractéristiques du sous-sol, besoins des bâtiments, contraintes foncières, et densité de bâtiments.

Deux technologies d'exploitation ont été prises en compte : champ de sondes (systèmes en « boucle fermée ») et doublets sur aquifère (systèmes en « boucle ouverte »). Il ressort que la géothermie de surface (c'est-à-dire assistée par Pompe à Chaleur) pourrait contribuer à hauteur de 1306 GWh/a des besoins en chauffage et ECS, soit 36 %. La majorité du besoin serait couvert par des champ de sondes qui sont pertinents pour tout type de bâtiments, du logement individuel aux grands bâtiments.

Le potentiel des doublets n'a été estimé que pour les bâtiments nécessitant au moins 150 MWh/a de chauffage et d'ECS, soit 6,5% des bâtiments mais 44% du besoin (soit 1521 GWh/a), dans la mesure où cette technologie entraîne un surinvestissement par rapport aux champs de sondes géothermiques en-dessous de ce seuil. Sur ce segment, les pompes à chaleur sur aquifère pourraient fournir 270 GWh/a de chauffage et d'ECS. Ce n'est pas négligeable puisque, sur ce segment des grands bâtiments, les PAC sur champ de sondes pourraient contribuer à hauteur de 461 GWh/a. Afin d'éviter un double comptage, les doublets sur aquifère pourraient contribuer à hauteur de 126 GWh/a des besoins en chauffage et ECS, et au total les champs de sondes pourraient contribuer à hauteur de 1180 GWh/a des besoins en chauffage et ECS.

6. Bibliographie

Arnaud, L., Badinier, G., Dewandel, B., Devau, N., Lefevre, Y., Boutirame, I., Vacher, A., 2022. Etude la nappe de la craie entre Perche et Beauce – Phase 2 (Rapport BRGM/RP-72056-FR).

Arnaud, L., Vergnes, J.-P., 2020. Etude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce Phase 1 : Étude de faisabilité d'un projet de modélisation hydrodynamique - Rapport final (Etude BRGM/RP-70149-FR). BRGM, Orléans, France.

Baudouin, V., Hameau, S., Durendeu, B., Tran, V.H., Bonnefon, C., Maurel, C., 2022. Observatoire dynamique de la géothermie de surface. Rapport final (Etude BRGM/RP-71729-FR). BRGM, Orléans, France.

Baudouin, V., Maragna, C., 2020. Cartographie du potentiel géothermique sur le territoire de la Communauté de Communes Loire Layon Aubance. BRGM/RP-69744-FR. BRGM.

David, P.-Y., 2015. Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre - Phase 1 : Etat de la connaissance ; Phase 2 : Analyse des données ; Rapport final (BRGM/RP-60458-FR).

Desprez, N., Megnien, C., Caudron, M., Martins, C., Rampon, G., Van den Beusch, M., 1975. Beauce - Atlas hydrogéologique – Notice, synthèse, index., Editions BRGM.

Etude hydrogéologique de l'aquifère de la Craie dans le département d'Eure-et-Loir, n.d. . Compagnie Générale de Géophysique.

Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages, 2014.

Maragna, C., Armandine Les Landes, A., Durst, P., Dupaigne, T., 2022. Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris. Rapport BRGM/RP-71139-FR. BRGM.

Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Cazal, J., 2021a. Projet ADEME-CARTODIM 2020-2021 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques. BRGM.

Maragna, C., Compère, F., Barrière, J., Maurel, C., Monnot, P., 2019. Estimation of shallow geothermal energy potential at urban scale : numerical VS semi-analytical models. European Geothermal Congress 2019, June 2019, La Haye, Netherlands. 11–14.

Maragna, C., Maurel, C., Salquèbre, D., Klinka, T., 2021b. Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire d'Orléans Métropole - Rapport final. BRGM/RP-70449-FR. BRGM.

Ménillet, F., Monciardini, C., Maget, F., Isambert, M., 1994. Carte géologique de la France à 1/50 000 (n° 216), Dreux. Notice explicative.

Quesnel, F., Laignel, B., Lefebvre, D., Meyer, R., Lautridou, J.-P., Lebret, P., 1996. Les formations résiduelles à silex de Haute-Normandie. Evolution continentale cénozoïque du NW du Bassin de

Paris et utilisation potentielle comme granulats. Presented at the Colloque Géomorphologique et Formations Superficielles, Ed. BRGM (1996), Rouen, pp. 65–99.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction régionale Centre-Val de Loire

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34



Géosciences pour une Terre durable

brgm

www.brgm.fr