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 la région Normandie

Note technique finale

RP-73583-FR

Version 2 du 11 mars 2024

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

Armandine Les Landes A. [BRGM], Maragna C. [BRGM], Rodriguez, P. [Inddigo], Fréchin, N. [ANTEA]

Vérificateur :		**Approbateur :**	
Nom :	Pierre Durst	Nom :	Manuel Parizot
Fonction :	Référent thématique	Fonction :	Directeur Régional
Date :	15/04/2024	Date :	16/04/2024
Signature :		Signature :	Manuel PARIZOT Directeur Régional BRGM Normandie

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

Ce rapport a été réalisé pour le compte de :

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE

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 règlementation 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/yMgFcU6Ctq** ou par ce code :

Mots clés :

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

Armandine Les Landes A. [BRGM], Maragna C. [BRGM], Rodriguez, P. [Inddigo], Fréchin, N. [ANTEA] 2024. Estimation du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la région Normandie. Note technique finale V2**.** RP-73583-FR, 80 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

La Direction régionale Normandie de l'ADEME accompagne le développement de la filière géothermie depuis plusieurs années et apporte des aides pour les installations utilisant la géothermie assistée par pompe à chaleur. Afin de définir au mieux la stratégie à déployer sur la région Normandie pour le développement de la géothermie très basse énergie, ainsi que les moyens à y consacrer, il est nécessaire de connaitre le potentiel de la géothermie de surface sur le territoire Normand, c'est dans ce cadre qu'a été effectuée cette étude, afin de disposer d'un outil d'aide à la décision pour contribuer au déploiement de cette énergie en Normandie.

La géothermie dite de surface permet de capter la température du sous-sol entre 0 et 200 mètres de profondeur afin de produire de l'énergie thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, rafraichissement, climatisation). Souvent couplés à une machine appelée pompe à chaleur, les dispositifs utilisés peuvent, selon les cas, s'adapter aux maisons individuelles, aux grands bâtiments tertiaires ou à des quartiers entiers.

Cette étude du potentiel géothermique de très basse énergie est basée sur l'évaluation de la quantité d'énergie qui pourrait être extraite du sous-sol via deux techniques éprouvées : les échangeurs verticaux (en boucles fermées) aussi appelés sondes verticales ou les doublets sur nappe (en boucles ouvertes). La première consiste à faire circuler un fluide dans des sondes enfouies dans le sous-sol afin que celles-ci absorbent la température ambiante. La seconde permet d'exploiter directement les calories des nappes d'eau souterraines. L'ensemble doit être couplé à une pompe à chaleur, qui permet d'élever ou d'abaisser la température extraite du sous-sol afin d'optimiser la production de chaud en hiver et de froid en été.

Cette étude du potentiel de développement de la géothermie de surface sur le territoire Normand est basée sur le croisement d'une :

- cartographie synthétique des connaissances du sous-sol actuellement disponibles, (géologiques : nature des roches et hydrogéologiques : statistiques des caractéristiques des nappes d'eau exploitables) permettant de qualifier et d'identifier les ressources géothermales disponibles ;
- estimation des besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire à la parcelle sur l'ensemble du territoire. La base de données utilisée inclus 1 566 705 parcelles. L'agrégation de ces besoins sur l'ensemble de la Région montre que la consommation actuelle en énergie thermique (chaud) est de 75,6 TWh/an.

Afin d'aboutir à une évaluation du potentiel géothermique, une méthodologie a été mise en application afin d'estimer, à la parcelle, l'adéquation entre ressources géothermales et besoin énergétique en surface. Cette méthode permet d'estimer sur chaque parcelle la quantité d'énergie thermique pouvant être produite de manière pérenne par une pompe à chaleur géothermique sur champs de sondes géothermiques verticales ou sur doublets sur aquifères. Ces estimations brutes à la parcelle ont ensuite été affinées par la prise en considération de contraintes (exemple règlementaire : zones rouges de la GMI) ne permettant pas ou présentant des caractéristiques particulières non adaptées et non prioritaires (mode de chauffage existant, réseau de chaleur existant à moins de 500 m, …).

Enfin, ces potentiels affinés à l'échelle de la parcelle ont été agrégés à différentes échelles, de l'EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale) à l'échelle de la région Normandie. Ces résultats ont donc été synthétisés, sous forme de carte de potentiel à l'échelle de chacun

des EPCI Normands, résultant de l'agrégation des potentiels affinés à l'échelle de la parcelle. Cette carte vise à fournir une vue d'ensemble du potentiel géothermique des EPCI. L'échelle de couleur utilisée représente les plus forts potentiels en vert foncé (potentiel supérieur à 1500GWh) et les plus faibles en blanc (potentiel inférieur à 150 GWh). Cette carte permet notamment de montrer que les plus forts potentiels (potentiel supérieur à 1500 GWh) correspondent à la Métropole de Rouen Normandie et la CU Caen la Mer. Ces plus forts potentiels sont suivis par les EPCI de la CA du Cotentin, la CU Le Havre Seine Métropole, la CA Mont-Saint-Michel-Normandie, la CA Saint-Lô Agglo, la CA Evreux Portes de Normandie, la CA Seine Normandie Agglomération, la CA Lisieux Normandie et la CC Inter-Caux-Vexin qui présentent des potentiels supérieurs à 500 GWh. À l'échelle des départements, on pourra noter que le plus fort potentiel est présent sur le département de la Seine-Maritime et que le plus faible correspond à celui du département de l'Orne. Enfin, selon l'étude menée, à l'échelle globale de la région, la géothermie de surface (hors particuliers) pourrait couvrir 22.5 TWh/a, soit environ 30% des besoins.

L'objectif d'une carte de potentiel géothermique à l'échelle d'un EPCI est de fournir une vision globale du potentiel géothermique présent sur chaque territoire. Cette carte vise donc à donner une représentation directe du potentiel de développement en GWh (gigawattheures) que pourrait représenter la filière géothermie très basse énergie à l'échelle de chaque EPCI. Ainsi, les décideurs locaux disposent d'une évaluation globale du potentiel de développement de la géothermie sur leur territoire afin de pouvoir prendre des décisions éclairées en matière d'aménagement du territoire et de transition énergétique.

Il est important de noter que les cartes de potentiel géothermique à l'échelle de chaque EPCI ne constituent pas une garantie absolue de la présence ou de la viabilité d'une ressource géothermique dans une zone donnée. Elles fournissent une évaluation préliminaire du potentiel géothermique sur la base des données disponibles (sous-sol et surface) et des hypothèses utilisées dans l'analyse. Cette carte doit donc être considérée comme un outil de diagnostic préliminaire et d'aide à la prise de décision afin d'orienter les efforts de planification et de développement de projets géothermiques. Il est essentiel de comprendre que des études de préfaisabilité géothermique plus détaillées sont nécessaires pour évaluer de manière exhaustive la faisabilité technique, économique et environnementale de tout projet géothermique spécifique. Ces études devraient inclure une analyse approfondie du contexte local, des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques, ainsi que des besoins énergétiques spécifiques de la zone ciblée. Il convient donc de consulter des experts en géothermie et de mener des études de terrain approfondies avant de prendre toute décision concernant le développement d'un projet géothermique. Ces études permettront d'identifier les contraintes potentielles, de définir les technologies appropriées et d'évaluer la viabilité du projet.

Sommaire

1. Introduction 9
1.1. Contexte et objectifs de l'étude 9
1.2. Technologies d'exploitation de la ressource géothermale de surface 9
1.2.1. Côté sol 10
1.2.2. La pompe à chaleur 11
1.3. Etat des lieux de la géothermie sur le territoire 12

2. Contexte géologique et hydrogéologique 15
2.1. Contexte géologique 15
2.2. Contexte hydrogéologique 16
2.2.1. Formations alluvionnaires 16
2.2.2. Aquifère du Trias : 17
2.2.3. Aquifère du Lias : 17
2.2.4. Aquifère multicouche du Bajocien et du Bathonien : 17
2.2.5. Aquifère de la craie : 17
2.2.6. Aquifère de l'Oxfordien-Kimméridgien : 18
2.2.7. Aquifère des sables de l'Albien : 18
2.2.8. « Bassins Tertiaires » : 18
2.2.9. Nappes de socle : 19
2.2.10. Aquifères potentiellement cibles : 20

3. Données du sous-sol disponibles en Normandie 23
3.1. Ex-Haute-Normandie 24
3.1.1. Nappe alluviale (vallée de la Seine) 24
3.1.2. Nappe des Craies séno-turonienne et cénomanienne 24
3.1.3. Nappe des sables Albien 27
3.1.4. Nappe des calcaires et sables de l'Oxfordien-Kimméridgien 27
3.2. Ex-Basse-Normandie 28
3.2.1. Nappe du Bajocien-Bathonien 28
3.2.2. Socle et sédimentaires ancien (Manche et Orne principalement) 31
3.2.3. Formations sédimentaires du secondaire : Lias et Trias 33
3.2.4. Nappes des Sables et Faluns : Bassins tertiaires (Manche) 34

4. Analyse de favorabilité à partir des données disponibles 39
4.1. Analyse de favorabilité pour des installations sur sondes géothermiques verticales (boucles fermées) 39
4.1.1. Critères considérés 39
4.1.2. Résultats 40
4.2. Analyse de favorabilité pour des installations sur nappes avec doublet de forages (boucles ouvertes) 42
Résultats 43

5. Réglementations s'appliquant à la géothermie de surface 45
5.1. Les réglementations liées à la géothermie de surface 45
5.1.1. Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance 45
5.1.2. Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échangeurs relevant de la GMI 48
5.1.3. Les zones réglementaires dans la région Normandie 49
5.2. Réglementations liées à la gestion des eaux et aux usages du sous-sol 53

5.2.1. SDAGE et SAGE 53
5.2.2. Ressources stratégiques 56
5.2.3. Nappes réservées pour l'alimentation en eau potable (NAEP) 58
5.3. Réglementations liées à la protection des captages d'eau 59
5.4. Synthèse des contraintes réglementaires 61
6. Estimation du potentiel de la géothermie de surface : croisement entre ressources et besoins. 63
6.1. Estimation des besoins 63
6.2. Méthodologie 63
6.2.1. Méthodologie d'estimation du potentiel des champs de sondes 63
6.2.2. Méthodologie d'estimation du potentiel des doublets sur aquifères 64
6.3. Résultats du croisement et Analyse 66
7. Conclusions 77
8. Bibliographie 79

Liste des figures

Figure 1 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe 10

Figure 2 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM... 12

Figure 3 : Données de l'observatoire dynamique de la géothermie de surface, les triangles rouges représentent les installations sur sondes verticales et les étoiles bleues représentent les installations sur nappes (source : www.geothermies.fr) 13

Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la Normandie 16

Figure 5 : Modèle conceptuel des aquifères de socle (tiré de Wyns et al., 2004) 20

Figure 6 : Extension et superposition des différentes entités aquifères potentiellement cibles de la région Normandie hors recouvrement (limons, argiles, …) 21

Figure 7 : Nombre d'aquifères potentiellement présents au droit d'une même zone en Normandie 22

Figure 8 : Altitude piézométrique moyenne de la craie 25

Figure 9 : Profondeur du niveau piézométrique (par rapport au sol en mètre) pour la nappe de la craie 26

Figure 10 : Epaisseur du Bajocien-Bathonien (m) 29

Figure 11 : Profondeur du toit du Bajocien-Bathonien (m) 30

Figure 12 : Cartographie de la favorabilité de la géothermie de surface sur sondes géothermiques verticales (boucles fermées) 41

Figure 13 : Distribution de la favorabilité pour des installations sur sondes géothermiques verticales sur l'ensemble du territoire Normand 41

Figure 14 : Cartographie de la favorabilité de la géothermie de surface sur nappe (boucles ouvertes) 43

Figure 15 : Distribution de la favorabilité pour des installations sur nappe sur l'ensemble du territoire Normand 44

Figure 16 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la région Normandie pour la géothermie sur échangeurs ouverts (gauche) et fermés (droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP-72225-FR) 52

Figure 17 : Emprise du bassin Seine-Normandie 54

Figure 18 : État chimique des eaux souterraines sur le bassin Seine-Normandie (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2019) 55

Figure 19 : SAGE en application au niveau de la région Normandie 56

Figure 20 : Carte des nappes stratégiques à réserver pour l'alimentation en eau potable future – Bassin Seine-Normandie (SDAGE 2016-2021) 58

Figure 21 : 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 22 : Agrégation des contraintes réglementaires : Périmètre de protection immédiat et rapproché 61

Figure 23 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement 66

Figure 24 : Estimation du taux de couverture (entre 0 et 1) des besoins de chauffage et ECS par champ de sondes, agrégé à l'échelle communale 67

Figure 25 : Estimation du taux de couverture (entre 0 et 1) des besoins de chauffage et ECS par champ de sondes, agrégé à l'échelle de l'EPCI 68

Figure 26 : Potentiel affiné en TWh pour chaque département 70

Figure 27 : Carte du potentiel géothermique affiné pour chaque EPCI de la région Normandie 72

Figure 28 : Exemple de carte du potentiel sur nappe supérieur à 200 MWh du CA Mont-Saint-Michel Normandie, avec la localisation des piscines municipales (points bleus) 73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques des terrains de socle et sédimentaires anciens 32

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques du secteur Valognes-Montebourg 33

Tableau 3 : Attribution des notes de favorabilité selon trois critères pour les sondes 40

Tableau 4 : Attribution des classes de favorabilité pour les boucles fermées 40

Tableau 5 : Attribution des notes de favorabilité selon 3 critères pour les doublets sur nappe 42

Tableau 6 : Attribution des classes de favorabilité pour les boucles ouvertes 43

Tableau 7 : Répartition des 3 zones réglementaires et selon les 3 gammes de profondeur au sein de la région Normandie en fonction de la surface occupée et de la population 52

Tableau 8 : Paramètres fixés pour l'analyse du potentiel des sondes géothermiques verticales 64

Tableau 9 : Résultats-clés par aquifère 69

Tableau 10 : Potentiel en GWh par EPCI 74

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La Direction régionale Normandie de l'ADEME accompagne le développement de la filière géothermie depuis plusieurs années et apporte des aides pour les installations utilisant la géothermie assistée par pompe à chaleur.
Les objectifs régionaux pour le développement des énergies renouvelables sont ambitieux, et la géothermie peut y contribuer. C'est pourquoi l'ADEME souhaite renforcer la connaissance et la promotion de cette filière renouvelable. Dans ce but, une meilleure connaissance du tissu régional d'acteurs, des installations existantes et de leurs retours d'exploitation, ainsi qu'une sensibilisation des collectivités et entreprises, sont nécessaires.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet composé de 6 missions :

- Mission 1 : Réaliser un état des lieux de la filière de la géothermie assistée par PAC en Normandie
- Mission 2 : Réaliser un audit de 10 installations de géothermie assistée par PAC en Normandie
- **Mission 3 : Évaluer le potentiel de la géothermie très basse énergie en Normandie**
- Mission 4 : Réaliser 10 études d'opportunité auprès de porteurs de projets identifiés et sélectionnés par l'ADEME
- Mission 5 : Accompagner l'ADEME sur un programme de sensibilisation sur la géothermie très basse énergie
- Mission 6 : Accompagner l'ADEME sur la définition d'une stratégie pour le développement de la géothermie TBE en Normandie et la recherche d'une structure porteuse de l'animation sur le long terme

La mission 3 constitue le sujet de ce présent rapport et se compose de :

- Une description des technologies d'exploitation de la ressource géothermale de surface
- Un bref état des lieux des installations déclarées sur le territoire Normand, issue de l'observatoire de la géothermie de surface
- La présentation du contexte géologique et hydrogéologique en Normandie
- Les données du sous-sol disponibles en Normandie
- Une analyse de la favorabilité du sous-sol pour les technologies sur sonde et sur nappe
- Une présentation de la réglementation s'appliquant à la géothermie de surface
- Une estimation du potentiel de la géothermie de surface basée sur le croisement entre besoins énergétiques et ressources

1.2. TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE DE SURFACE

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 (calories et frigories) 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 rafraichissement ou à la climatisation des bâtiments.

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

- Le côté sol : pour valoriser l'énergie présente dans le sous-sol ;
- La pompe à chaleur : appareil thermodynamique qui permet de transférer l'énergie thermique d'une « source froide » vers une « source chaude ». 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 (pièces, processus industriel, piscine, etc.).

1.2.1. 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 1 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 efficients 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 efficients dans les bâtiments dont la demande de refroidissement est relativement élevée, comme les bureaux ou les hôpitaux.

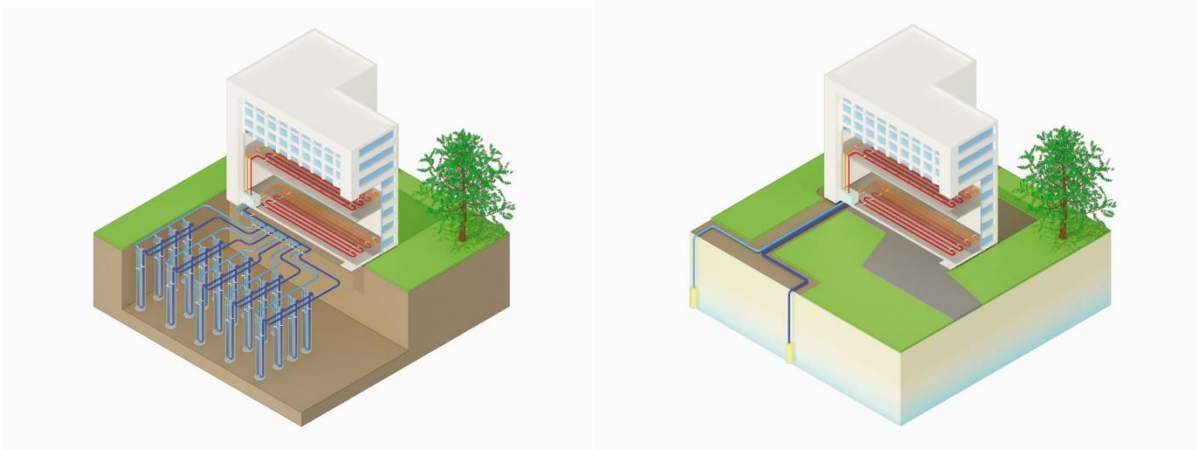


Figure 1 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe

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 1 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. L'échange direct de chaleur avec l'eau souterraine permet en effet **une performance supérieure** par comparaison avec des systèmes en boucle fermée et est **plus avantageux du point de vue économique**.

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 efficient, 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 élevé 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. La présente étude n'est pas pertinente pour ce type d'échangeurs dans la mesure où ces échangeurs se prêtent peu à des zones urbaines denses.

1.2.2. La pompe à chaleur

En mode chauffage (cf. Figure 2 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 le côté bâtiment, plus la performance du système est élevée. La pompe à chaleur (PAC) peut aussi produire du froid par climatisation (cf. Figure 2 bas).

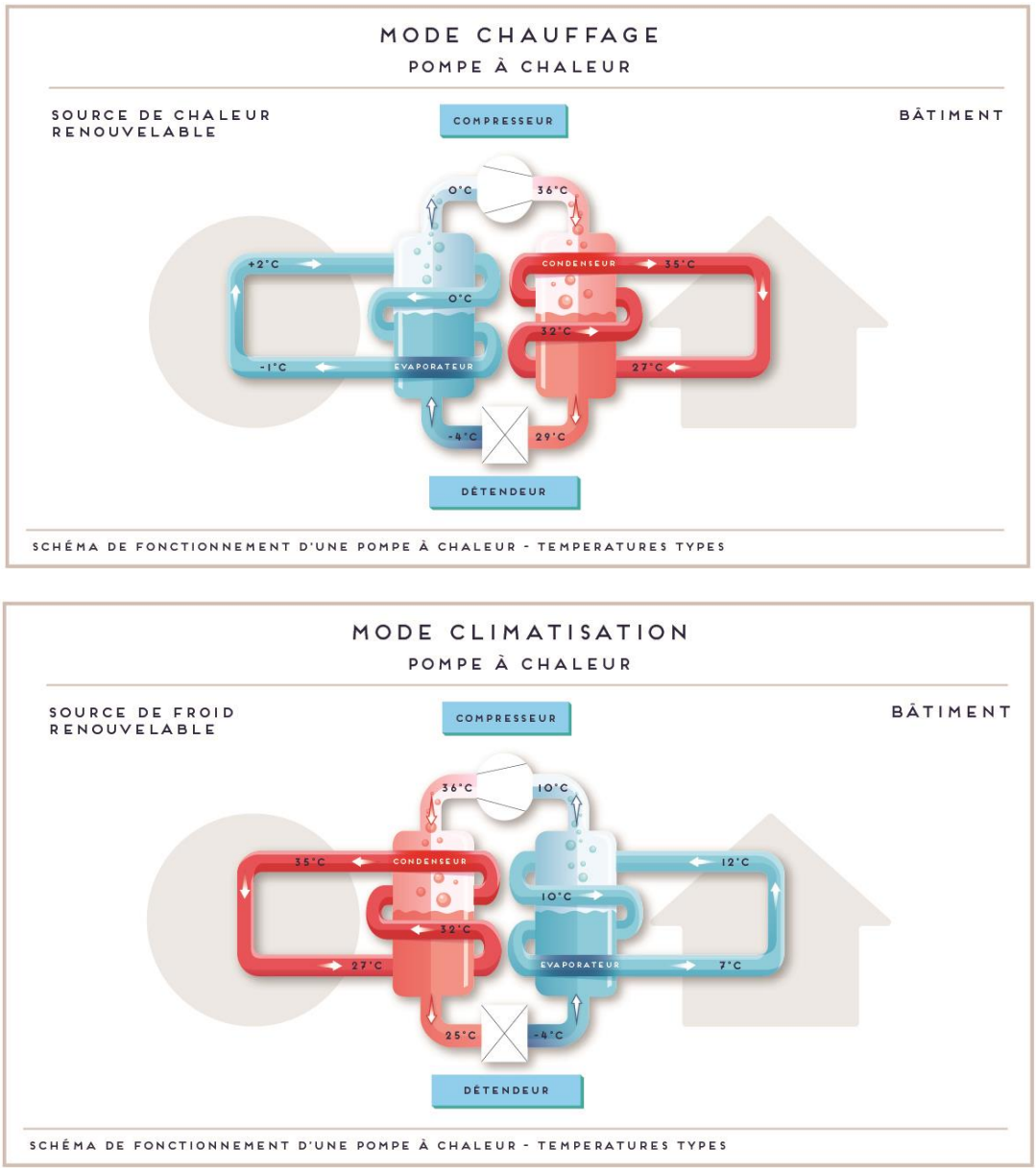


Figure 2 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM

1.3. ETAT DES LIEUX DE LA GEOTHERMIE SUR LE TERRITOIRE

À partir de l'analyse des données de l'Observatoire dynamique de la Géothermie de surface (Baudouin *et al.*, 2022), on notera que 1748 installations déclarées sont actuellement répertoriées comprenant 1174 installations sur sondes géothermiques verticales et 574 installations sur doublets (Figure 3).

À l'échelle de la région, on notera :

- que plus de neuf **installations déclarées sur dix (sonde et nappe confondue)** sont localisées en Basse-Normandie (au sein des départements : Manche, Calvados et Orne).
- qu'environ **deux tiers des installations déclarées** sont des installations sur sondes géothermiques verticales.

- que 98% des installations sur sondes sont localisées en Basse-Normandie (au sein des départements du Calvados, de la Manche et de l'Orne).
- que 78% des installations sur doublets sont localisées en Basse-Normandie.

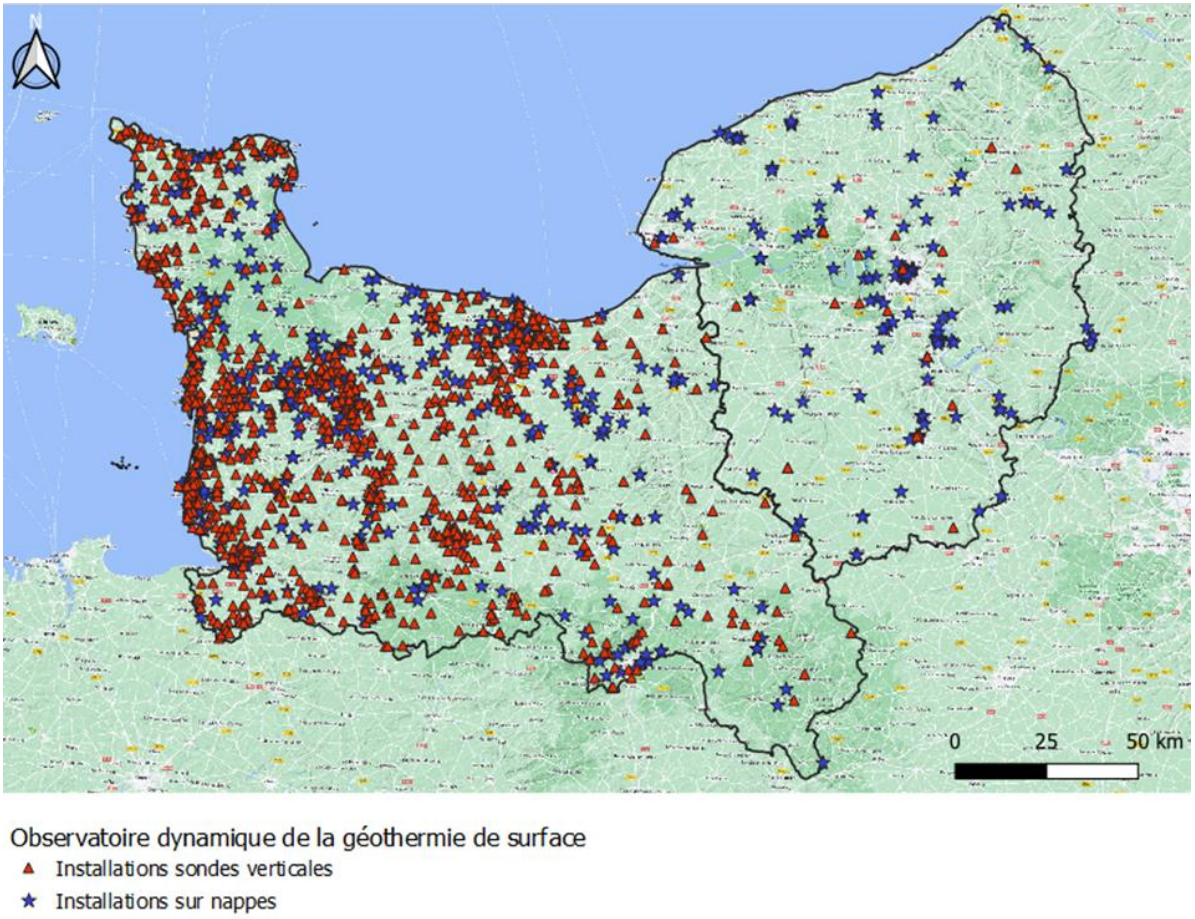


Figure 3 : Données de l'observatoire dynamique de la géothermie de surface, les triangles rouges représentent les installations sur sondes verticales et les étoiles bleues représentent les installations sur nappes (source : www.geothermies.fr)

2. Contexte géologique et hydrogéologique

La région Normandie s'étend sur 5 départements : les départements de la Seine-Maritime (76) et de l'Eure (27) appartenant à l'ex-région Haute-Normandie, et les départements du Calvados (14), de l'Orne (61) et de la Manche (50) appartenant à l'ex-région Basse-Normandie. La région couvre une surface d'environ 29107 km², en Haute-Normandie la Seine-Maritime et l'Eure présentent des superficies relativement équivalentes, soient respectivement, 6040 km² et 6280 km², et en Basse-Normandie le Calvados, la Manche et l'Orne présentent des superficies respectives de 5535 km², 5940 km² et 6103 km².

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La géologie distingue fondamentalement l'identité des deux ex-régions Normandes. La ex-Basse-Normandie appartient essentiellement au Massif Armoricain alors que la ex-Haute-Normandie appartient à la séquence nord-ouest du vaste Bassin parisien (Figure 4).

D'un point de vue géologique, la ex-Haute-Normandie se situe en bordure ouest du bassin de Paris. Les terrains les plus anciens rencontrés sont d'âge jurassique et affleurent le long de la vallée de Calonne et dans le Pays de Bray à la faveur d'un anticlinal. L'ensemble de la région se compose de terrains crayeux formant de vastes plateaux incisés par de grandes vallées comme la Seine et l'Eure (Figure 4). La région est marquée par un réseau hydrographique très peu dense. L'écoulement des eaux est fortement influencé par l'activité karstique qui règne dans les plateaux crayeux. Les conduits karstiques sont influencés par la fracturation, de nombreuses résurgences sont observées le long des grandes vallées qui traversent la région. Ces plateaux crayeux sont recouverts d'argiles à silex résultant de l'altération de la craie sous-jacente. Les limons quaternaires recouvrent quant à eux les hauteurs de ces plateaux.

La ex-Basse-Normandie, d'un point de vue géologique se divise en deux parties de part et d'autre d'une ligne Cherbourg-Alençon (Figure 4). A l'Ouest de cette ligne, est présent le domaine de socle (socle armoricain briovérien, paléozoïque et granitique), composé de terrains plissés précambriens et paléozoïques, représentant 8580 km².

- La série briovérienne, comprend deux grands ensembles, le Briovérien inférieur (Formation de Saint-Lô) correspondant à une puissante série sédimentaire composée d'une alternance de niveaux de siltites, argilites, grès.
- L'auréole de métamorphisme, qui correspond à la formation des Schistes tachetés et à des roches très dures massives, presque entièrement recristallisées : les cornéennes.
- Les granites, qui correspondent essentiellement au massif granodioritique (massif de Vire par exemple).
- En discordance, au-dessus de la chaine cadomienne arasée, une série primaire s'est déposée, composée de sédiments gréseux et argileux, d'âge cambrien, ordovicien et silurien. Les principales formations de la série paléozoïque sont : des conglomérats et grès pourprés (Cambrien), des schistes et calcaires (Cambrien), les grès feldspathiques (Cambrien), les schistes, les Grès (Ordovicien)

A l'Est de cette ligne du socle du Massif Armoricain, on retrouve le domaine sédimentaire composé essentiellement de terrains carbonatés jurassiques et crétacés, débutant part le Trias et finissant par des terrains d'âge plio-quaternaires, ce domaine représente lui environ 8213 km².

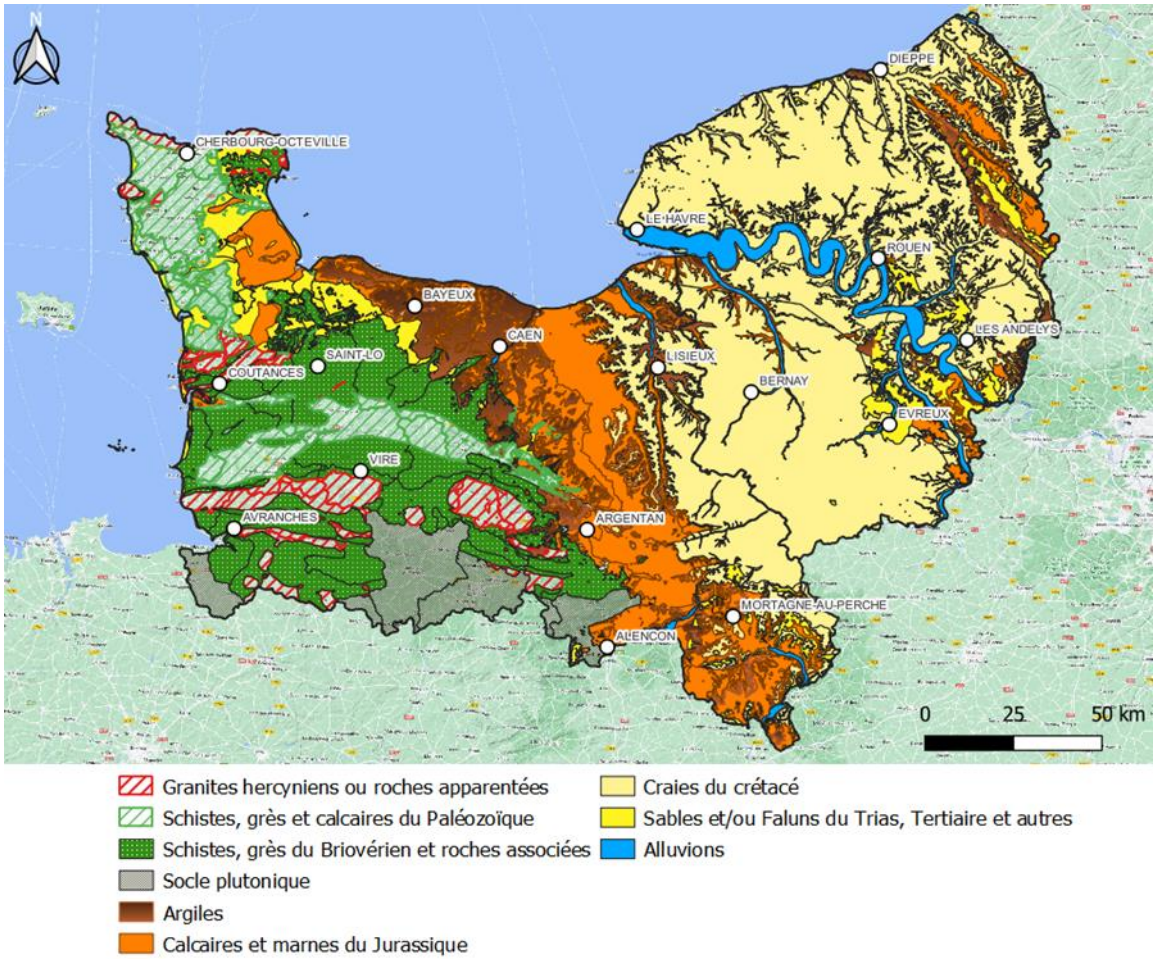


Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la Normandie

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

La sélection des entités hydrogéologiques présentes sur le territoire Normand découle principalement de la base de données d'extension des aquifères de BDLisa et des connaissances régionales. À noter que des aquifères distincts présentant des propriétés hydrogéologiques proches peuvent être regroupés.

Les deux grands domaines (socle et sédimentaire) composant la région Normandie offrent de nombreuses ressources aquifères. Plusieurs systèmes aquifères sont à distinguer et ont fait l'objet, dans la mesure du possible, d'une entité spécifique dans l'étude du potentiel (Figure 6).

2.2.1. Formations alluvionnaires

Les formations alluvionnaires se situent le long des différents cours d'eau. Ces formations sont généralement très hétérogènes et en équilibre dynamique permanent avec deux autres systèmes distincts : l'aquifère sous-jacent situé sous les formations alluviales et sur les coteaux et le cours d'eau.

2.2.2. Aquifère du Trias :

Les premières assises sédimentaires à l'échelle régionale sont les niveaux de sables et galets du Trias. Les formations du Trias sont constituées de sables, de galets et de faciès de calcrêtes. Elles reposent sur le socle primaire et peuvent être recouvertes par endroit d'argiles et de calcaires et marnes de l'Héttangien. Ces formations de recouvrement peuvent atteindre 25 mètres et constituent une couverture imperméable. Les médiocres conditions d'affleurement du Trias et le découpage par la tectonique ont morcelé ce réservoir en autant d'unités à géométrie limitée. Ces formations triasiques présentent des variations latérales de faciès et des variations importantes et rapides d'épaisseur. Certains secteurs se superposent avec les bassins tertiaires décrits ci-après (2.2.8).

2.2.3. Aquifère du Lias :

Les premiers niveaux carbonatés du Lias, peu puissants, avec des séquences marneuses notables et des surfaces affleurantes restreintes, ne sont exploités que par de rares captages.

2.2.4. Aquifère multicouche du Bajocien et du Bathonien :

L'aquifère du Bajocien est constitué de niveaux calcaires du Toarcien supérieur, de l'Aalénien et du Bajocien et constitue un des principaux aquifères du département du Calvados. C'est un réseau aquifère développé dans la fissuration avec une karstification importante sous les vallées. Cet aquifère est libre dans la région de Bayeux et au sud-ouest de Caen dans la vallée de l'Orne. Il devient captif sous les marnes du Bathonien. Au niveau de la nappe libre, la surface piézométrique épouse assez fidèlement la topographie. La productivité peut atteindre jusqu'à 100 m^3/h par endroit.

L'aquifère du Bathonien est constitué de niveaux calcaires multicouches, entrecoupés de caillasses argileuses qui cloisonnent partiellement la nappe. C'est un aquifère libre dont le substratum est constitué par les bancs de calcaires argileux situés à la base de la Pierre de Caen. L'aquifère peut devenir semi-captif à localement captif sous les marnes calloviennes. La surface piézométrique épouse les grands traits de la topographie. La productivité est liée essentiellement aux réseaux de fissures. Dans certaines zones, la productivité peut atteindre plusieurs centaines de mètres cubes par heure.

Par simplification, la ressource correspondante à ces deux précédents aquifères est souvent appelée nappe des calcaires bajociens-bathoniens, bien qu'il soit reconnu qu'il existe de fortes hétérogénéités lithologiques et spatiales.

2.2.5. Aquifère de la craie :

L'aquifère de la craie, formée par une puissante assise crayeuse (> 100 mètres), repose sur les formations de l'Albien (Crétacé Inférieur : Sables verts, Argiles du Gault et Gaize affleurant dans le Pays de Bray). La série crayeuse affleure très largement sur la région sauf au niveau de la boutonnière du Pays de Bray (Crétacé Inférieur et Jurassique Moyen). Elle est recouverte par une formation résiduelle à Silex (Argiles à silex), produit de décalcification de la craie, et par des sables du Paléocène.

La formation géologique concernée est celle de la craie du Sénonien, Turonien et Cénomanien (du plus récent au plus ancien). La série stratigraphique appartient au système du Crétacé Supérieur ; elle offre une grande diversité de faciès. Concrètement, les cuttings des forages montrent de fortes variations lithologiques, avec des séquences de bancs donnant des débris très durs, de la craie molle ou des galets de craie durcie englobés dans une matrice pâteuse.

Une nappe se développe dans les fissures et pores des craies cénomaniennes et turoniennes qui présentent une double porosité : dans la matrice et dans un réseau de fissures plus ou moins importantes.

L'aquifère de la craie repose sur des couches argilo-glauconieuses de base. Ces terrains forment une bande de plateaux constituant les hauteurs du pays d'Auge. La craie contient une nappe libre, fréquemment perchée, donnant lieu à des sources importantes d'importance inégale en périphérie de plateaux. Celle-ci, peut notamment être captive en fonction de la configuration géomorphologique. Le caractère captif s'exprime notamment lorsque le recouvrement des argiles à silex ou des alluvions ont une composante argileuse dominante et présentent une épaisseur significative.

2.2.6. Aquifère de l'Oxfordien-Kimméridgien :

Il est constitué par différentes unités lithologiques superposées (des couches de sable associées aux calcaires de l'Oxfordien moyen et supérieur) et variant latéralement dont le dépôt a été conditionné par le jeu de failles au Mésozoïque : plusieurs réservoirs d'extension limitée. Le mur de cet ensemble est constitué par les marnes à pernes (imperméable).

2.2.7. Aquifère des sables de l'Albien :

L'aquifère crayeux constitue le principal aquifère de la région Haute-Normandie. Les deux autres réservoirs, qui sont les Calcaires et les Sables de l'Éocène sur le plateau de Madrie et les Sables Verts de l'Albien, sont très peu utilisés du fait, respectivement, d'une faible capacité de production et d'une assez grande profondeur (120 à 200 m).

2.2.8. « Bassins Tertiaires » :

Quatres bassins tertaires sont présents dans le seuil du Cotentin : Bassin de Lessay, Bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte, le Bassin de Merderet et le bassin de Sainteny-Marchésieux. La dénomination de Bassin tertiaire fait référence à ces bassins du seuil de Cotentin dont le remplissage comprend des formations du Tertiaire, mais aussi des formations sur Secondaire et du Quaternaire.

Le bassin de Lessay est un petit graben de remplissage Plio-Pléistocène assez homogène. Il est constitué de formations de sables avec quelques passes plus conglomératiques et/ou plus argileuses et localement de sables coquilliers. Ces formations reposent sur les grès de Lessay et sont recouverts par quelques mètres de dépôts de tourbe et d'argiles alluvionnaires en surface.

Le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte est un étroit graben orienté OSO-ENE d'une superficie de 45 km² avec un remplissage tertiaire de 70 mètres d'épaisseur dans sa partie orientale. Sa partie occidentale est mal connue. L'encaissant est constitué de grès et de schistes paléozoïques imperméables sauf dans les zones de fractures. Son remplissage est composé de sables plio-pléistocènes (faluns, sables coquilliers, galets) présentant de nombreuses variations latérales de faciès.

Le bassin du Merderet est un graben situé dans l'axe du bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte. Il s'agit du bassin tertiaire le moins bien connu des 4 bassins. Son remplissage est constitué de faluns miocènes et éocènes, de formations sableuses du Plio-Pléistocène et des alluvions quaternaires (plus précisément des graves) dans le sud du bassin. De nombreux passages latéraux de faciès sont présents dans ce bassin. Son encaissant est constitué de formations paléozoïques et de formations secondaires, notamment les calcaires du Maastrichtien et les calcaires de l'Héttangien.

Le bassin de Sainteny-Marchésieux est composé des 2 sous-bassins connectés : le sous-bassin de Sainteny et le sous-bassin de Marchésieux. Le sous-bassin de Sainteny est composé de sables quaternaires, de faluns pliocènes et de faluns miocènes. Le sous-bassin de Marchésieux se compose de sables quaternaires, d'un complexe formé d'alternances d'argiles, de marnes et de calcaires avec des niveaux à faluns roux et de sables pliocènes. Ces formations ne sont pas réparties de façon homogène dans ces deux sous-bassins et de nombreuses variations latérales de faciès existent.

2.2.9. Nappes de socle :

Dans les régions de socle, le sous-sol est constitué de roches plutoniques (granites) et métamorphiques (schistes, gneiss, …), qui à l'origine sont massives et très peu perméables.

Néanmoins, suite à leur formation, ces roches ont cependant subi différents types de modifications physiques : fracturation d'origine tectonique, altération météorique, altération hydrothermale, etc. Certaines de ces altérations ont eu pour conséquence une amélioration de leurs propriétés hydrodynamiques et expliquent l'existence de ressource en eaux au sein de ces roches à faible profondeur (0 à 100 m) et la possibilité de l'existence d'autres types de ressources à plus grande profondeur.

L'état des connaissances actuelles sur la frange superficielle (0 à 100 m) altérée des aquifères de socles est présenté schématiquement, ci-dessous (Figure 5). Ce modèle conceptuel comporte deux horizons distincts :

- Un horizon superficiel composé de formations d'altérations meubles (les altérites), de porosité relativement importante, lui permettant de jouer le rôle de réservoir capacitif, mais dont la perméabilité reste en général assez faible.
- Une horizon inférieur fissuré, qui comporte en général plusieurs dizaines de fractures, présentant une perméabilité significative. La productivité d'un aquifère présent dans cet horizon dépend de la perméabilité et du nombre de fractures présentes ainsi que de leur connexion au réseau de fissures/fractures voisines et aux altérites sus-jacentes. Ces zones perméables peuvent ainsi atteindre jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur sous la base du profil d'altération.
- Un horizon de roche saine. Celles-ci sont compactes et peu perméables. Elles peuvent cependant être localement traversées par des fractures d'origine tectonique profondes.

De par leur mode de formation, les aquifères de socle présentent donc une structure discontinue et compartimentée, étroitement liée à l'histoire géologique, tant du point de vue de la nature de la roche mère (plus ou moins favorable vis-à-vis des processus d'altération ou de fracturation), que des modifications physiques subies.

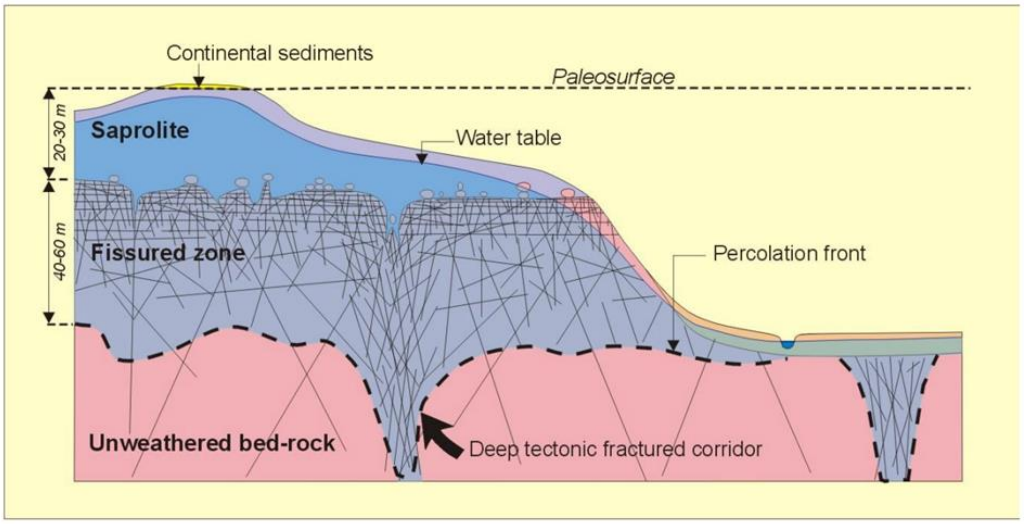


Figure 5 : Modèle conceptuel des aquifères de socle (tiré de Wyns et al., 2004)

2.2.10. Aquifères potentiellement cibles :

En région Normandie, les aquifères susceptibles d'être exploités pour un usage « géothermie de surface / très basse énergie » sont principalement (Figure 6) :

- En ex-Haute-Normandie :
  - La nappe des craies qui constitue la nappe majoritaire ;
  - La nappe alluviale présente essentiellement dans la vallée de la Seine ;
  - La nappe du Tertiaire dans l'Eure (extension très limitée) ;
  - La nappe des sables de l'Albien (peu accessible sur l'ensemble car profonde) ;
  - La nappe des calcaires Oxfordien (peu accessible sur l'ensemble car profonde) ;
- En ex-Basse-Normandie :
  - Les aquifères du Jurassique : Oxfordien, Bajocien-Bathonien
  - La nappe du Trias ;
  - La nappe du Lias ;
  - Les nappes des bassins tertiaires (Sables et Faluns Mio-Pliocène)
  - Les nappes de socle en Basse-Normandie

Du fait de cette diversité, on pourra noter la présence de plusieurs aquifères potentiellement exploitables au droit d'une même zone (Figure 7).

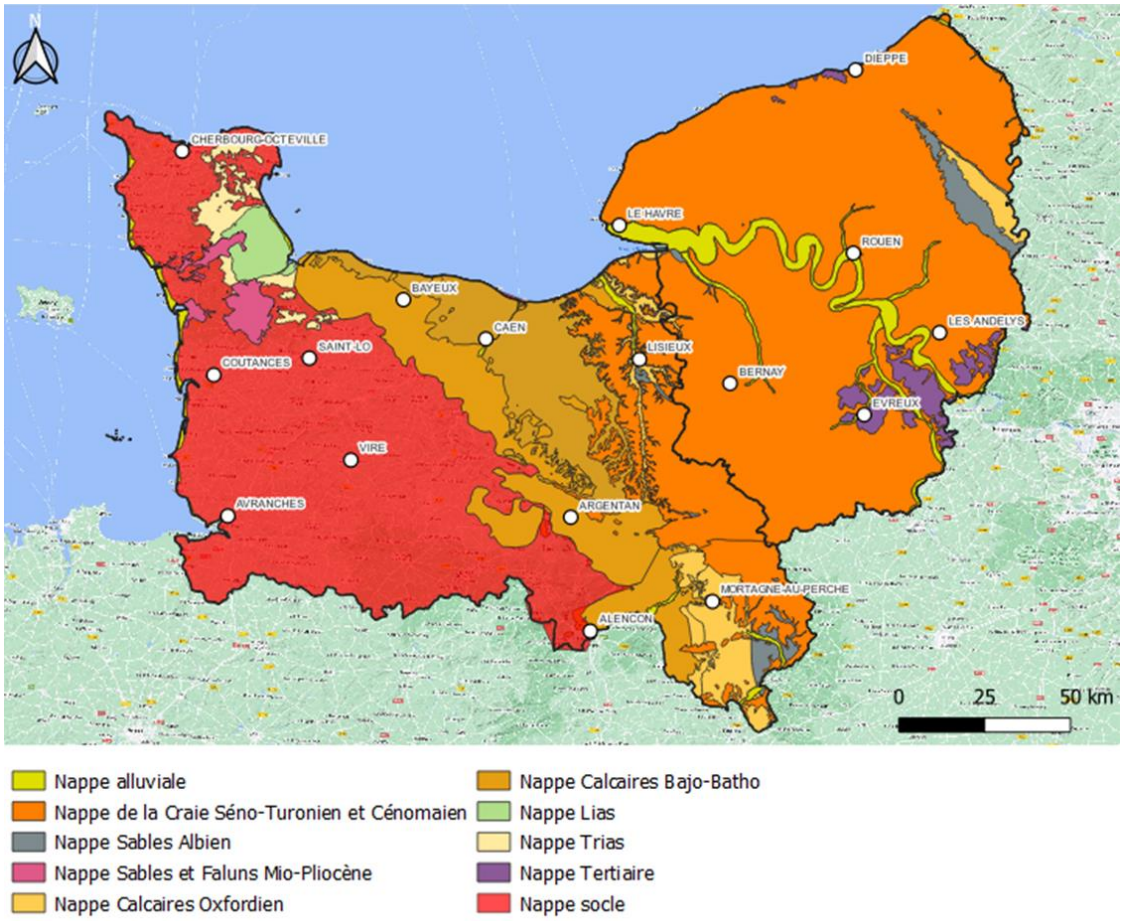


Figure 6 : Extension et superposition des différentes entités aquifères potentiellement cibles de la région Normandie hors recouvrement (limons, argiles, …)

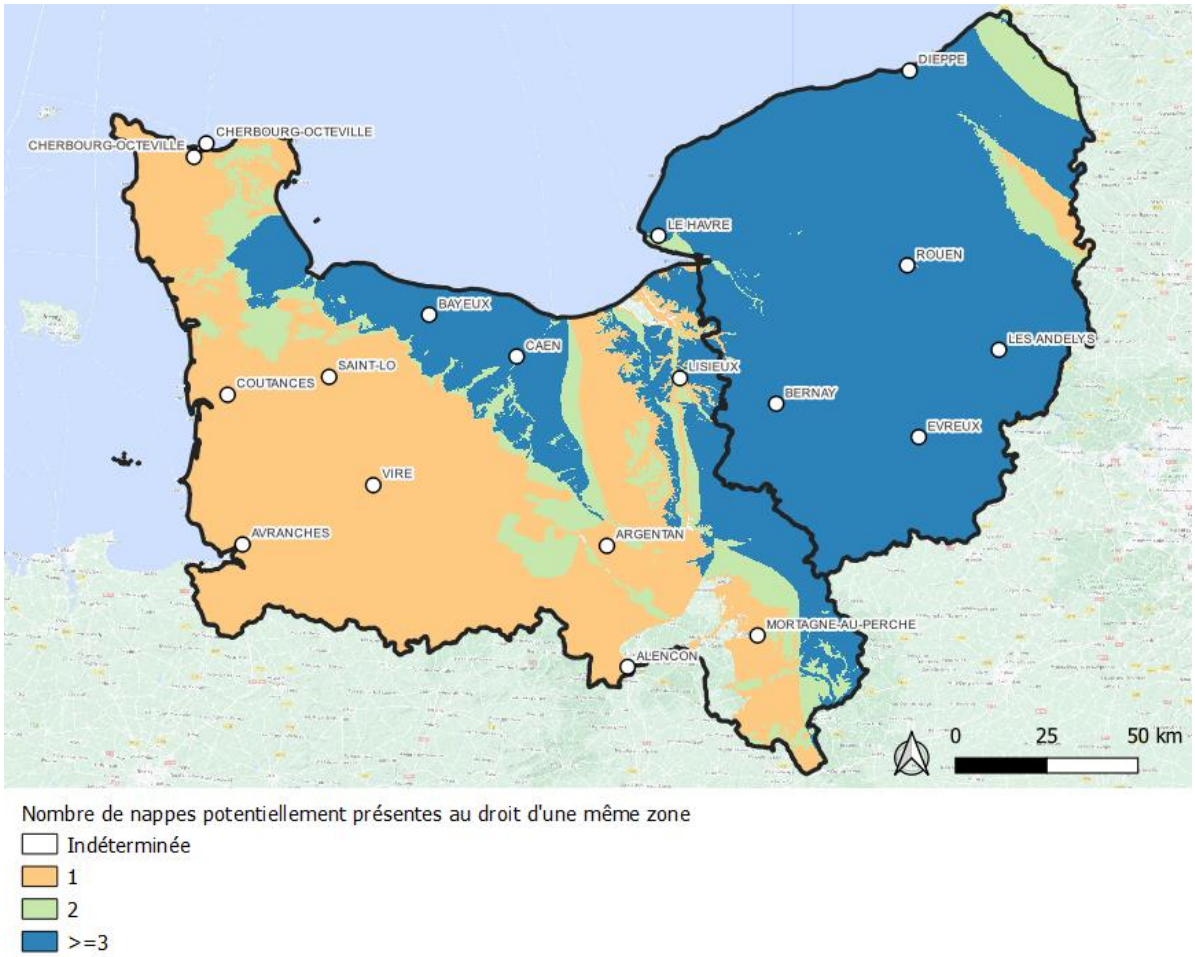


Figure 7 : Nombre d'aquifères potentiellement présents au droit d'une même zone en Normandie

3. Données du sous-sol disponibles en Normandie

Le principe général de conception de cartes de favorabilité repose sur une méthode de cartographie à index avec pondération de critères. Cette méthode est basée sur la combinaison de cartes de divers critères compris dans l'évaluation du potentiel géothermique et propre à chaque technologie (nappe et sonde). La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères ce qui permet la prise en compte relative de chaque critère influençant le potentiel.

Il est important de rappeler que la réalisation de cette cartographie repose avant tout sur le recueil de données et que la qualité des cartes produites est directement liée à la qualité et à la densité des données disponibles. La première étape de la méthodologie est donc le recueil de données et est donc primordial puisqu'elle conditionne les options de cartographie à mettre en œuvre lors des étapes suivantes.

Les sources de données utilisées sont multiples :

- BSS : la Banque de données du Sous-Sol, permet de recueillir des données concernant la géométrie et la nature des formations géologiques, ainsi que des informations sur les caractéristiques hydrauliques : piézométrie, productivité des aquifères (débits, …) ;
- ADES : la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines permet de recueillir des données sur l'aspect quantitatif (piézométrie par exemple) et qualitatif des nappes ;
- BD-Lisa : la base de Données du Référentiel Hydrogéologique Français fournit les contours des entités hydrogéologiques françaises, l'extension des aquifères présentant des potentialités d'exploitation géothermique ;
- Carte géologique ;
- SIGES : le Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines qui renseigne sur les aspects descriptifs et structurels des eaux souterraines du bassin : géologie, hydrogéologie, vulnérabilité, cartographie, référentiels ; les aspects qualitatif et quantitatif : chimie, piézométrie, réseaux de mesures ; les aspects pressions : captages, prélèvements pour différents usages, agriculture ; les aspects réglementaires et les aspects bibliographiques ;
- Données issues de modèles hydrodynamiques ;
- Rapports divers archivés et récoltés :
    - RP-55671-FR – Atlas hydrogéologique numérique du Calvados ;
    - RP-62002-FR – Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives ;
    - RP-69331-FR – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne. ;
    - RP-69128-FR – Etat des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines de département de la Manche ;
    - RP-59301-FR – Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux ;
    - R 38796 – Système d'information géographique des eaux souterraines de la Seine-Maritime ;
    - RP-52988-FR – Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure ;

3.1. EX-HAUTE-NORMANDIE

3.1.1. Nappe alluviale (vallée de la Seine)

a) *Géométrie – extension*

L'épaisseur des dépôts alluvionnaires varie de 5 à 10 m en général, mais localement en basse vallée de la Seine, des épaisseurs plus importantes (jusqu'à 30 – 40 m) peuvent être observées.

b) *Piézométrie – sens d'écoulement*

Les écoulements en nappe alluviale suivent grossièrement ceux du cours d'eau mais peuvent être extrêmement variables, influencés par la marée et également par les pompages industriels.

c) *Paramètres hydrodynamiques*

Les graviers de la base sont très perméables. A l'approche des vallées, leur perméabilité est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} m/s. Les matériaux fins qui les surmontent : silts, argiles, tourbes compactes, sont semi-perméables à imperméables. Cette forte valeur contraste avec les faibles coefficients des sablons de l'estuaire (de l'ordre de 1.10^{-5} m/s selon des mesures faites sur échantillon au laboratoire) ou des sédiments limono-argileux et tourbeux (de l'ordre de 1.10^{-7} à 1.10^{-9} m/s).

3.1.2. Nappe des Craies séno-turonienne et cénomanienne

a) *Géométrie – extension*

Sur le plan hydrogéologique, la craie a une faible perméabilité intrinsèque. Elle ne contient de l'eau mobilisable que lorsqu'elle est fracturée ou altérée.

L'épaisseur de l'aquifère (zone saturée et non saturée), exceptés les effets plus ou moins locaux des accidents structuraux, passe d'une cinquantaine de mètres au sud-ouest de la région (limite départementale Eure-Calvados-Orne) à plus de 200 mètres dans la majorité du territoire, pour atteindre une valeur maximale supérieure à 300 mètres dans le Vexin. L'ensemble de ces valeurs est réduit par les effets de l'érosion en vallées. Cette extension sur le territoire et son épaisseur importante font de l'aquifère de la craie, la principale ressource aquifère sur le territoire de la ex-Haute-Normandie.

La nappe peut être libre à captive en fonction de la configuration géomorphologique des secteurs.

Le caractère captif va s'exprimer notamment lorsque le recouvrement des argiles à silex ou des alluvions ont une composante argileuse dominante et présentent une épaisseur significative.

b) *Piézométrie*

La surface piézométrique de la nappe de la craie (Figure 8) épouse fortement la morphologie du sol qui, elle, dépend en partie de la répartition de la fissuration de la craie. Elle forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère, peu fissuré, a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive (vallées humides et sèches, réseaux « karstiques »). Les eaux convergent des plateaux vers les vallées sèches et humides, puis les eaux de la nappe de la craie alimentent la nappe alluviale et le cours d'eau qui la draine.

La profondeur du niveau piézométrique (par rapport au sol en mètre) de la nappe de la craie (Figure 9) montre que la nappe est globalement facilement accessible (peu profonde) sur l'ensemble de son

étendue, néanmoins cette profondeur devient plus importante au niveau des plateaux crayeux à proximité de la vallée de la Seine, ce qui rendra plus contraignant dans ces zones l'accès à cette ressource (Figure 9). La profondeur moyenne du niveau piézométrique est de 40 m sur l'ensemble de son étendue et cette profondeur peut atteindre plus de 100m au niveau des plateaux crayeux.

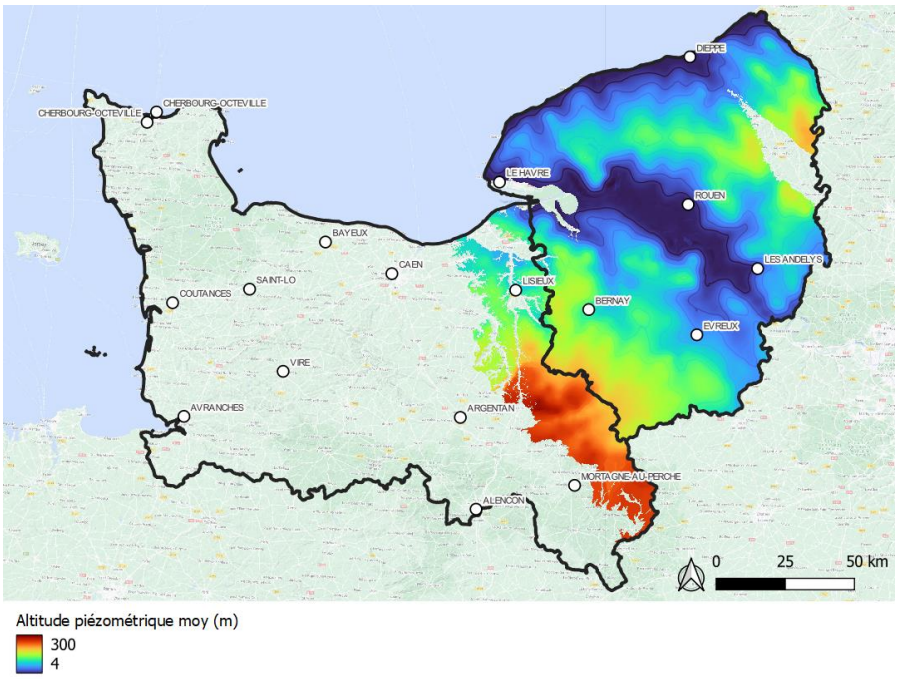


Figure 8 : Altitude piézométrique moyenne de la craie

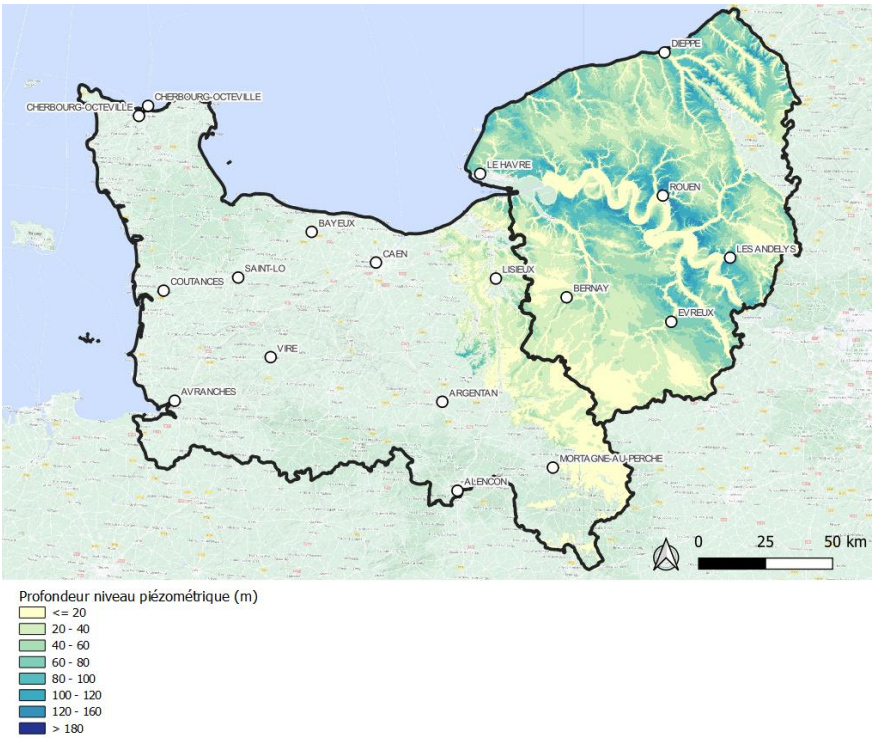


Figure 9 : Profondeur du niveau piézométrique (par rapport au sol en mètre) pour la nappe de la craie

c) *Paramètres hydrodynamiques et productivité*

L'aquifère de la craie est caractérisé par l'existence d'une triple porosité (une porosité de matrice, de fracture et de conduits).

- la porosité matricielle inter-granulaire a une fonction capacitive conséquente de 15 à 45% selon les horizons lithologiques et les auteurs ; cependant la porosité efficace reste faible ; les valeurs de conductivité hydraulique ou perméabilité sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6} m/s. Ces valeurs conduisent à des vitesses de transport dans le milieu souterrain de l'ordre du mètre par an ;
- la porosité de fracture, selon l'importance de la fracturation et des processus de dissolution qui peuvent les affecter, conduit à des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} m/s à 10^{-6} m/s, soit des vitesses de transfert de l'ordre de quelques mètres par mois. Cette porosité est associée à la fonction de stockage temporaire dans les formations superficielles ; elle pourrait expliquer le retard de la recharge de l'aquifère comme l'attestent les variations piézométriques au cours d'un cycle hydrologique. Cette porosité peut ainsi jouer un rôle dans la fonction capacitive de l'aquifère, mais exerce surtout un rôle primordial dans la fonction transmissive de l'aquifère et dans l'organisation des gradients hydrauliques ;
- la porosité de conduits karstiques peut, localement (selon des connexions actives avec les bétoires), assurer des vitesses de transfert (depuis un point d'infiltration préférentiel à l'exutoire du système karstique) pouvant atteindre et dépasser 100 m/h. Les perméabilités associées sont de l'ordre de 10^{-1} m/s à 10^{-3} m/s. La porosité de conduits n'a qu'un rôle transmissif dans les transferts rapides. Ce rôle reste en partie contrôlé par les gradients hydrauliques hérités de la porosité de fracture et le contexte structural régional ; son importance et les vitesses de transfert qui en découlent exercent aussi un rôle primordial sur la vulnérabilité des ressources exploitées.

La productivité de l'aquifère de la craie est très bonne : les ouvrages exploités permettent d'obtenir des débits compris entre 65 et plus de 200 m^3/h.

La transmissivité est évaluée entre 1,5 et 5 $.10^{-3}$ m^2/s, l'emmagasinement entre 1 et 5 % lorsque la nappe est libre à semi-captive, moins si elle est captive.

L'aquifère est plus productif lorsque celui-ci est affecté par des fissures ou fractures ou lorsqu'il est affecté par des circulations karstiques.

Compte tenu de sa géométrie et de son extension sur le territoire Normand, ainsi que ses caractéristiques hydrauliques (épaisseur mouillée et productivité), l'aquifère de la craie constitue la principale ressource (nappe), notamment sur l'ex-Haute-Normandie. À défaut de la présence de cette nappe (par exemple dans le pays de Bray), on pourra retrouver les nappes des sables de l'Albien ou des calcaires et sables de l'Oxfordien-Kimméridgien.

3.1.3. Nappe des sables Albien

a) *Géométrie - extension*

Les sables verts de l'Albien s'étendent sous presque tout le territoire de la ex-Haute-Normandie et disparaissent progressivement vers le sud-ouest. Ils forment, à l'affleurement, une frange entourant le cœur de l'anticlinal de Bray. En s'éloignant de l'axe anticlinal, les couches plongent sous les terrains plus récents. La nappe devient alors progressivement captive sous les argiles du Gault.

L'épaisseur de ces couches diminue rapidement au sud-ouest d'une ligne reliant le Havre, Bernay et Verneuil. Dans le Lieuvin et l'ouest du Pays d'Ouche, les sables verts sont réduits à quelques lentilles dans des argiles. Dans le département de l'Eure, la nappe des sables verts n'est puissante qu'au nord et à l'est du département.

En dehors du pourtour du pays de Bray, de l'anticlinal de Vernon et de l'embouchure de la Seine, l'aquifère de l'Albien est profond de plusieurs centaines de mètres.

b) *Paramètres hydrodynamiques et productivité*

Les sables de l'Albien sont hétérogènes et des productions avoisinant les 90 m^3/h peuvent être obtenus en Haute-Normandie au nord de la Seine.

Dans l'Eure, la puissance de la série (qui remonte vers la surface du sol au sud du département) diminue et les productions se réduisent à des valeurs de 30 à 40 m^3/h.

Par contre, dans le Bec-de-Caux, les sables deviennent argileux et paraissent inexploitables.

3.1.4. Nappe des calcaires et sables de l'Oxfordien-Kimméridgien

a) *Géométrie – extension*

Les formations géologiques de l'ensemble des « calcaires et sables de l'Oxfordien – Kimméridgien » sont constituées de différentes unités lithologiques superposées et variant latéralement dont le dépôt a été conditionné par le jeu des failles au Mésozoïque (aquifère très compartimenté). Le mur de cet ensemble aquifère est constitué par les marnes à pernes (imperméable).

Les principales formations sont de la base au sommet : Le Roussier de Gacé / Sables de Mortagne, Le Grouais / Calcaires du Bellêmois / Calcaires coralligènes, les sables et grès de l'Ormoie /

Calcaires à Astartes. Chacune de ces formations peut constituer un petit ensemble aquifère plus ou moins indépendant des autres. L'épaisseur totale de cet ensemble peut dépasser la centaine de mètres. L'épaisseur des formations augmente vers l'est également.

Chaque ensemble lithologique peut constituer un petit aquifère plus ou moins indépendant des autres (réservoirs discontinus)

b) *Paramètres hydrodynamiques et productivité*

De par sa forte hétérogénéité et notamment au caractère libre ou captif de ces formations, la productivité de cet ensemble aquifère est très variable : de quelques dizaines de m^3/h à plus d'une centaine de m^3/h.

Les formations sableuses de la base de l'aquifère semblent conduire une grande partie du débit des ouvrages d'exploitations qui les ont rencontrées et constitueraient donc la couche la plus productive de cet ensemble aquifère.

Les quelques valeurs de transmissivités calculées sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s lors de la mise en œuvre de pompages d'essai sur des ouvrages. Certains ont pu mettre en évidence l'existence de limites étanches (failles colmatées) en particulier sur le secteur de Bellême-Mortagne.

3.2. EX-BASSE-NORMANDIE

3.2.1. Nappe du Bajocien-Bathonien

a) *Géométrie – extension*

Dans cette synthèse les éléments relatifs aux formations calcaires du Toarcien, de l'Aalénien et du Bajocien et Bathonien, constituent un seul ensemble, bien qu'il soit reconnu qu'il existe de fortes hétérogénéités lithologiques et spatiales. Par simplification, cette ressource est souvent appelée nappe des calcaires bajociens-bathoniens. Le mur de cette formation est constitué des argiles toarciennes, lorsqu'elles sont présentes, ou directement par les formations du socle.

Dans l'ensemble, les terrains s'approfondissent et gagnent en épaisseur vers l'est. Leur épaisseur, modeste sur la zone de bordure au contact du domaine armoricain, augmente vers l'est pour dépasser la cinquantaine de mètres et pouvant atteindre plus de 100 m (Figure 10).

La nappe des calcaires peut être libre dans la partie ouest du territoire sur les secteurs où les formations sont affleurantes, puis semi-captive à captive vers l'est sous le recouvrement de plus en plus important des calcaires et marnes du Callovien, puis du Cénomanien (Figure 11).

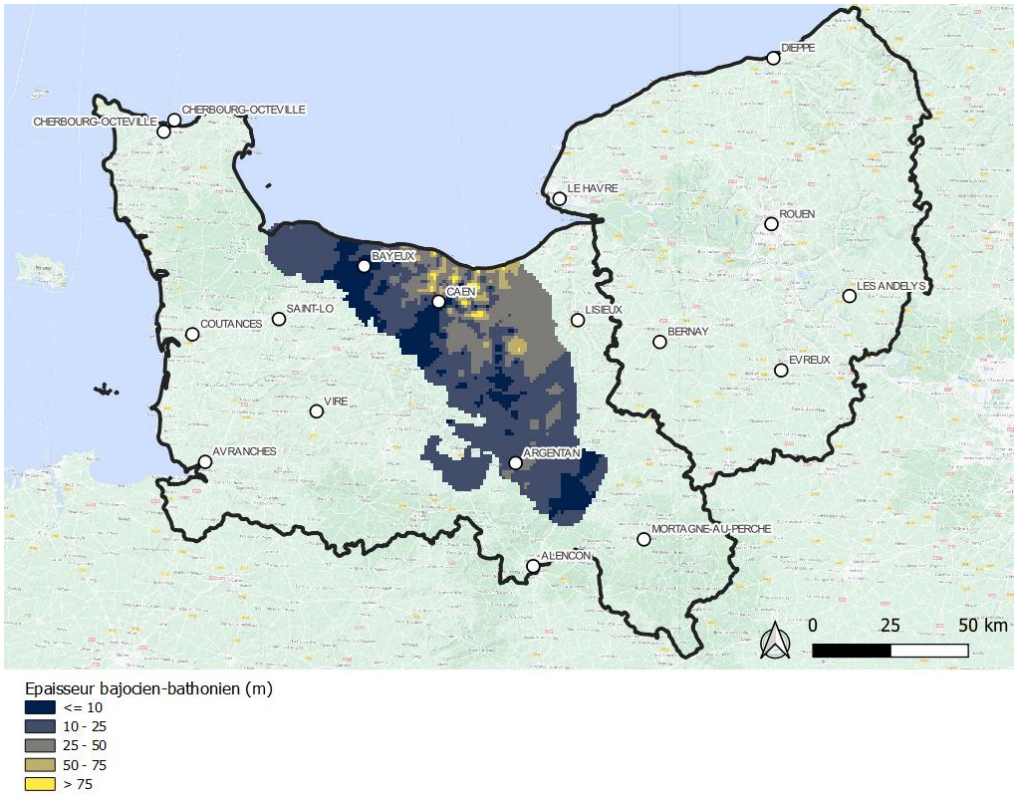


Figure 10 : Epaisseur du Bajocien-Bathonien (m)

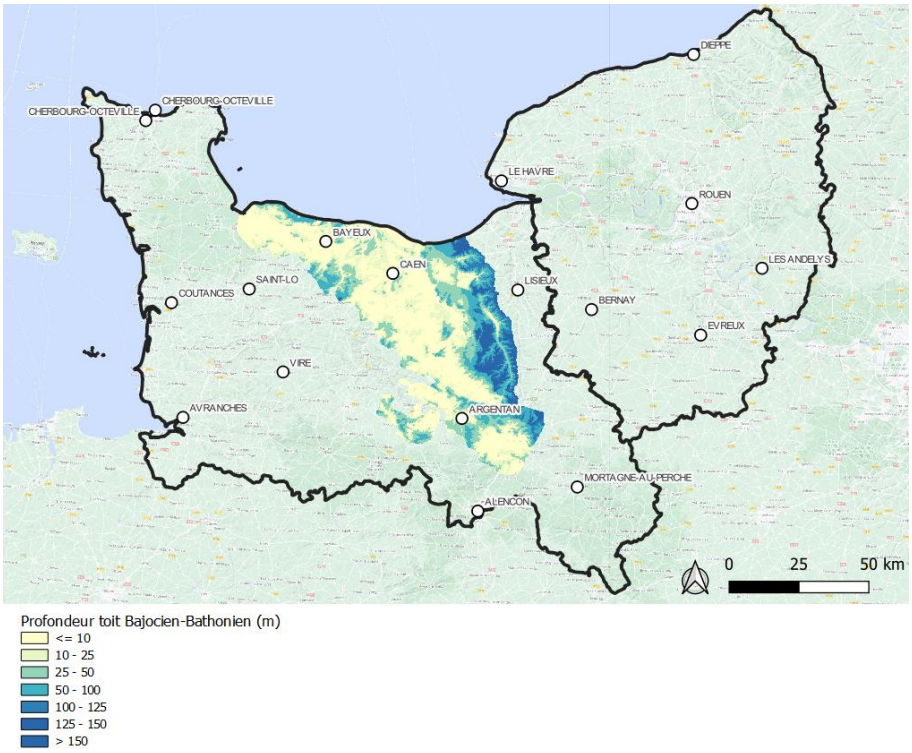


Figure 11 : Profondeur du toit du Bajocien-Bathonien (m)

b) *Piézométrie*

Dans sa partie libre, la surface piézométrique de la nappe épouse la morphologie du terrain, en partie conditionnée par la fissuration des calcaires. Les lignes de partage des eaux souterraines correspondent sensiblement à celles des bassins hydrographiques. La nappe forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère peu fissuré a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive que sont les vallées humides et les vallées sèches. Hormis sous les principaux estuaires où la surface piézométrique est quasiment plane, les ordres de grandeur du gradient hydraulique sont de 5 à 8% sur les versants et entre 0,5 et 1 % sous les plateaux.

c) *Paramètres hydrodynamiques et productivité*

La nappe est contenue dans les calcaires et la productivité dépend du couple nature des calcaires/fracturation ; en effet, l'aquifère sera d'autant plus développé dans les calcaires lorsqu'ils sont ± sableux et intensément fracturés permettant un bon emmagasinement et un écoulement facilité (Lithologic, 2009). Il semblerait également qu'au contact du socle, les calcaires présentent des comportements hydrodynamiques différents car plus grossiers et mieux cimentés.

Les débits instantanés à la foration et les débits de production peuvent être très variables d'un secteur à un autre (de moins de 10 m^3/h à plus 200 m^3/h), en fonction du contexte. D'après la bibliographie, il semble que les critères suivants soient prédominants pour une zone de production favorable :

- calcaires grossiers ou sableux,
- se trouver dans une zone de drainage de la nappe,
- présence de calcaires fissurés ou fracturés, proximité d'une zone de faille ou de décompression ou encore du gelifract,

- l'altération et les dissolutions, jusqu'à la formation de conduits karstiques parfois,
- dépression topographique,
- proximité des cours d'eau.

Quand les calcaires sont situés sur les plateaux, la fissuration mécanique y est généralement plus faible et les transmissivités sont de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} m^2/s. Les débits y dépassent rarement la dizaine de m^3/h.

Dans les vallées sèches ou humides, la fracturation y est plus intense et les phénomènes de dissolution plus actifs. Les transmissivités sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-1} m^2/s. Les débits exploités sont fréquemment supérieurs à 100 m^3/h.

3.2.2. Socle et sédimentaires ancien (Manche et Orne principalement)

a) *Géométrie – extension*

D'un point de vue lithologique, deux grands ensembles se distinguent :

 La partie constituée de terrains précambriens (schistes et grès briovérien) et paléozoiques (alternances de grès, schistes, et parfois de calcaires)

 La partie composée majoritairement de granitoïdes plus ou moins fracturés et de leurs auréoles de métamorphisme. Dans ces massifs on distingue deux horizons productifs :

- **dans les arènes granitiques et les altérites** (granite et cornéennes) d'une part, où l'horizon est relativement discontinu, notamment en termes d'épaisseur. Cette arène a en général une épaisseur de 20 mètres environ,
- **dans l'horizon fissuré/fracturé** du granite ou des cornéennes, plus en profondeur, d'autre part. En effet, ces formations, très dures, ont un comportement tectonique fragile. Elles sont toutes affectées de failles, au moins en bordure et sous les massifs, qui en fonction du degré de connexion du réseau de fissures et fractures (réservoir discontinu) va conférer à cet horizon un rôle plus transmissif.

Les aquifères des formations de socle et sédimentaires anciennes sont en général assez localisés.

b) *Piézométrie – sens d'écoulement*

Pour les formations de socle et sédimentaires anciennes la circulation de l'eau est favorisée par la fracturation.

Pour les formations de socle, les principales arrivées d'eau se situent en moyenne entre 30 et 70 mètres de profondeur. Les premières arrivées d'eau en revanche se situent vers 15 - 20 mètres de profondeur, ce qui correspond à l'épaisseur moyenne de l'arène granitique. La circulation de l'eau est rapide dans les arènes granitiques, mais elles jouent surtout un rôle sur l'emmagasinement de l'eau et réalimentent efficacement l'aquifère granitique fissuré.

Pour les formations sédimentaires anciennes, les principales arrivées d'eau des formations briovériennes sont comprises entre 40 et 60 mètres de profondeur en moyenne tandis que celles des formations cambriennes se situent en moyenne autour de 65 mètres de profondeur. Les zones de contact avec des filons de quartz favorisent la circulation de l'eau et correspondent souvent aux principales arrivées d'eau (Poignant L., 2015). D'un point de vue global, l'écoulement de la nappe semble conforme à la topographie et est dirigée vers les cours d'eau.

c) *Paramètres hydrodynamiques*

Les paramètres hydrodynamiques des nappes de ces formations de socle et sédimentaires anciennes sont assez variables, quelques valeurs moyennes sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques des terrains de socle et sédimentaires anciens

Formations aquifères		Paramètres hydrodynamiques	
		Débit spécifique (en $m^3/h/m$)	**Transmissivité (en m^2/s)**
Formations de socle		Valeurs assez élevées, entre 2 et 20	Valeurs assez variables, entre 2.10^{-4} et 1.10^{-2}
Formations sédimentaires anciennes	**Formations briovériennes**	▪ Schistes tachetés : entre 10 et 12 en moyenne ▪ Cornéennes : entre 2 et 20	▪ Schistes tachetés : autour de 2.10^{-3} ▪ Cornéennes : entre 10^{-4} et 10^{-2}
	Formations paléozoïques	En moyenne autour de 3,5	Entre 2.10^{-4} et 8.10^{-4} mais pouvant atteindre 5.10^{-3} pour les formations cambriennes

d) *Productivité*

La productivité de ces formations est de manière générale très variable : de quelques dizaines mais pouvant atteindre plus d'une centaine de m^3/h selon la configuration des sites. La productivité des aquifères situés dans les formations de socle dépend en grande partie de la fracturation et fissuration des roches, mais également de la présence ou non d'une arène granitique. Ainsi les formations fortement fracturées et surmontées d'une arène épaisse (entre 5 et 20 mètres) présentent un meilleur potentiel de productivité. En dehors de ces zones, ces formations magmatiques sont peu productives (faible circulation de l'eau et pas de stockage) (Poignant L., 2015).

Les nappes situées au sein des formations de socle avec une arène présentent un débit d'exploitation potentiel autour de 20 m^3/h en moyenne, mais pouvant atteindre 50 m^3/h notamment dans les massifs de la Vire et d'Avranches. Sans arène, ce débit est compris entre 10 et 15 m^3/h (Poignant L., 2015).

Tout comme les formations de socle, la productivité des nappes situées dans les formations sédimentaires anciennes dépend de la fracturation des roches. Parmi les sites fortement fracturés présentant de bons potentiels figurent les secteurs de la faille de Granville et de Montmartin-sur-Mer. Les zones présentant des filons quartziques sont aussi des zones à bons potentiels car ils permettent une bonne circulation de l'eau.

Des différences de potentiel sont également observables en fonction de la nature des roches. Ainsi, les formations du Briovérien sont plus souvent productives que les formations du Paléozoïque. De plus, au sein des formations briovériennes, les schistes tachetés présentent un meilleur potentiel que les cornéennes, d'autant plus si la nappe des schistes tachetés est en communication avec une nappe alluviale ce qui augmente sa productivité. Et pour les formations du Paléozoïque, les

formations de grès et de conglomérats sont celles présentant le meilleur potentiel car elles permettent une bonne circulation de l'eau.

Les nappes situées au sein des formations du Paléozoïque présentent un débit d'exploitation, en moyenne autour de 10 m^3/h, mais ne dépassant que très rarement 20 m^3/h dans la Manche. A contrario, dans l'Orne la productivité peut être particulièrement intéressante et les débits exploités dépasser les 100 m^3/h. Les nappes situées dans les formations briovériennes présentent des débits d'exploitation potentiels assez variables, mais en moyenne compris entre 2 et 20 m^3/h. Les débits moyens d'exploitation potentiels des schistes tachetés sont cependant situés autour de 20 m^3/h, mais ils peuvent atteindre 50 m^3/h lors de la présence d'une nappe alluviale en couverture. Le débit potentiel des cornéennes est très faible (Poignant L., 2015).

Dans tous les cas, la présence de fracturation joue un rôle important dans la productivité des aquifères. Cependant, il est important de préciser que ces failles, fractures et fissures ne doivent pas être comblées par des matériaux argileux ce qui les rend, au contraire, alors imperméables. Des productivités très élevées ont notamment été relevées dans les unités aquifères du Houlme et du bassin du Noireau. Pour ces sites, les transmissivités calculées dans les horizons fracturés sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s ; le coefficient d'emmagasinement est faible et de l'ordre de 0,1 à 0,2 %.

3.2.3. Formations sédimentaires du secondaire : Lias et Trias

a) *Géométrie – extension*

Trois secteurs principaux sont identifiés et concernent des bassins d'effondrement : secteur de Valognes-Montebourg, vallée du Merderet et bassin de Carentan.

- Le secteur de Valognes-Montebourg se situe au niveau du synclinal de Valognes, faillé sur ces 2 flans, constituant ainsi un bassin effondré de remplissage secondaire. Les formations du Trias sont constituées de sables, de galets et de faciès de calcrêtes. Elles reposent sur le socle primaire et ces formations de recouvrement peuvent atteindre 25 mètres.
- Le secteur de la vallée du Merderet est un fossé d'effondrement de direction nord-ouest / sud-est comblé en partie par des formations triasiques puis par des formations jurassiques et tertiaires.
- Le secteur Nord du bassin de Carentan est également un bassin d'effondrement encadré par des failles. Le sud de ce secteur correspond au sous-bassin de « Sainteny ». Les formations du Trias présentes sont des galets usés dans une matrice sablo-argileuse, des calcrêtes massives à caverneuse et des argiles (Freslon M. *et al*, 2000).

b) *Paramètres hydrodynamiques*

Dans le secteur de Valognes, les valeurs disponibles pour les paramètres hydrodynamiques font l'objet du Tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques du secteur Valognes-Montebourg

Paramètres hydrodynamiques	Zone Nord-Est	Zone de Valognes	Zone d'Ozeville
Transmissivité	/	De l'ordre de 10^{-4} m^2/s	Entre 10^{-2} et 10^{-4} m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	/	10^{-5}, caractéristique d'une nappe captive	Entre 10^{-1} et 10^{-3}
Débit spécifique	/	/	Entre 6 et 7,5 m^3/h/m

Pour le secteur de la vallée du Merderet, la transmissivité mesurée de la nappe du Trias est de l'ordre de 10^{-3} m²/s dans le sud du secteur puis celle-ci diminue progressivement vers le nord pour être de l'ordre de 10^{-4} m²/s. Le débit spécifique est moyen et de 5 m³/h/m. Cependant, tout comme la transmissivité, il décroit vers le nord (Freslon M. *et al*, 2000).

Pour le bassin de Carentan, dans la zone de Saint-Jores, la transmissivité de la nappe du Trias est de l'ordre de 10^{-4} et 10^{-3} m²/s et dans la zone de Veys, sa transmissivité est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} m²/s et son coefficient d'emmagasinement est très variable (entre 10^{-1} et 10^{-5}), mais généralement de l'ordre de 10^{-3} (Freslon M. *et al*, 2000).

c) *Productivité*

Les ressources du secteur Valognes-Montebourg sont assez variables. Ainsi, celles situées au Nord-Est du secteur ont une productivité relativement faible (avec un débit au soufflage de cette zone très faible : 4,5 m³/h) à cause d'une faible perméabilité et d'un faible coefficient d'emmagasinement. La zone de Valognes Est présente une bonne productivité avec une nappe captive d'une puissance de 40 mètres avec une couverture imperméable de 25 mètres environ. Contrairement à la zone décrite précédemment, la zone de Valognes présente un débit au soufflage compris entre 15 et 45 m³/h et un débit critique supérieur à 40 m³/h. La zone d'Ozeville fait apparaitre une lentille de Trias d'une épaisseur de 15 mètres au maximum avec des arrivées d'eau très dispersées à cause d'une perméabilité dite en chenaux. Son débit critique est d'environ 20 m³/h. Les rapports consultés mentionnent 4 forages privés exploitant la nappe avec un débit d'exploitation de 83 m³/h.

Le secteur de la vallée du Merderet présente plusieurs nappes (calcaires maestrichiens et faluns tertiaires) dont la nappe captive du Trias assez productive (Freslon M. *et al*, 2000). Les horizons productifs sont bien individualisés, les arrivées d'eau se localisant au niveau des interfaces de contact entre les différentes lithologies.
La présence d'un débit d'exploitation de 50 m³/h au niveau du forage privé de Montessy (00945X0029) et l'amélioration des paramètres hydrodynamiques de cette nappe du Trias vers le sud de la vallée du Merderet laissent présager un secteur intéressant du point de vue de la ressource en eau (Freslon M. *et al*, 2000).

Actuellement, 4 forages privés exploitent la nappe du Trias et prélèvent environ 2000 m³/j (Freslon M. *et al*, 2001).

Dans le bassin de Carentant, la nappe du Trias du secteur de Saint-Jores est exploitée par 6 forages dont le débit d'exploitation est compris entre 63 et 79 m³/h. La nappe du Trias du secteur d'Auvers-Carentan est exploitée par 5 ouvrages dont le débit d'exploitation est compris entre 42 et 129 m³/h. La nappe du Trias du secteur des Veys est exploitée par 4 ouvrages dont le débit d'exploitation est compris entre 17 et 42 m³/h (Freslon M. *et al*, 2000 et Freslon M. *et al*, 2001).

3.2.4. Nappes des Sables et Faluns : Bassins tertiaires (Manche)

a) *Géométrie – extension : Bassin de Lessay*

Le bassin de Lessay est un petit graben de remplissage Plio-Pléistocène assez homogène. Il est constitué de formations de sables avec quelques passes plus conglomératiques et/ou plus argileuses (Sables de la Lande de Millières, Sables de Saint-Vigor et Sables de Saint-Sauveur-de-Pierrepont) et localement de sables coquilliers. Ces formations reposent sur les grès de Lessay et sont recouverts par quelques mètres de dépôts de tourbe et d'argiles alluvionnaires en surface.

L'épaisseur de ces formations est comprise entre 15 à 30 mètres dans sa partie occidentale (Vernoux J.F. *et al.*, 2000).

b) *Paramètres hydrodynamiques et productivité : Bassin de Lessay*

Les transmissivités calculées suite aux résultats des pompages d'essai indiquent des valeurs supérieures à 10^{-2} m²/s. Les débits spécifiques déterminés sont compris entre 10 et 75 m³/h/m.

Les coefficients d'emmagasinements calculés sont représentatifs d'une nappe semi-captive.

Les hautes valeurs de transmissivité permettent des débits d'exploitation supérieurs à 100 m³/h. Les débits d'exploitation des captages AEP varient entre 60 et 150 m³/h (données SDEAU 50).

Les principales arrivées d'eau se situent dans les derniers niveaux de la série, au niveau des galets roulés, ce qui constituerait le niveau le plus productif de la nappe (Vernoux J.F. *et al.*, 2000).

c) *Géométrie – extension : Bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte*

Le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte est un étroit graben orienté OSO-ENE d'une superficie de 45 km² avec un remplissage tertiaire de 70 mètres d'épaisseur dans sa partie orientale. Sa partie occidentale est mal connue.

L'encaissant est constitué de grès et de schistes paléozoïques imperméables sauf dans les zones de fractures. Son remplissage est composé de sables plio-pléistocènes (faluns, sables coquilliers, galets) présentant de nombreuses variations latérales de faciès.

d) *Paramètres hydrodynamiques et productivité : Bassin de Lessay*

Les valeurs de transmissivité de la nappe sont comprises entre 0,001 et 0,05 m²/s.
Les coefficients d'emmagasinement déterminés sont très variables et compris entre 0,0006 et 0,02, ce qui est à la fois caractéristique d'une nappe captive et d'une nappe libre.

Une valeur de débit spécifique a été mesurée sur le forage 00937X0033, celle-ci était de 13,5 m³/h/m (avec une transmissivité de 0,04 m²/s).

Les débits d'exploitation des captages AEP varient entre 120 et 200 m³/h (données SDEAU 50).

La grande hétérogénéité des formations ne permet pas d'identifier des niveaux et des profondeurs plus productives. Cependant, sur les forages profonds, il a été constaté que d'importants volumes d'eau étaient rencontrés à une quarantaine de mètres de profondeur.

e) *Géométrie – extension : Bassin du Merderet*

Le bassin du Merderet est un graben situé dans l'axe du bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte. Il s'agit du bassin tertiaire le moins bien connu des 4 bassins.

Son remplissage est constitué de faluns miocènes et éocènes, de formations sableuses du Plio-Pléistocène et des alluvions quaternaires (plus précisément des graves) dans le sud du bassin. De nombreux passages latéraux de faciès sont présents dans ce bassin.

Son encaissant est constitué de formations paléozoïques et de formations secondaires, notamment les calcaires du Maastrichtien et les calcaires de l'Héttangien.

L'épaisseur des alluvions est comprise entre 2 et 18 mètres, celle des faluns entre 17 et 30 mètres, celle des calcaires de l'Héttangien d'environ 18 mètres (Vernoux J.F. *et al.*, 2000).

f) *Paramètres hydrodynamiques et productivité : Bassin de Lessay*

La transmissivité de ces aquifères : alluvionnaire, tertiaire et secondaire, est comprise entre 0,001 et 0,1 m²/s.

Les débits spécifiques sont très variables pour l'ensemble des aquifères cités : alluvionnaire, tertiaire et crétacé. Ils sont cependant 50 fois plus importants pour la nappe des alluvions (autour de 100 m^3/h/m) que celle des formations secondaires.

La seule valeur de coefficient d'emmagasinement disponible est de 0,001. Elle correspond à la nappe des faluns de l'Eocène (Tertiaire ; ouvrage AEP 00941X0030 - Le Tiers) (Vernoux J.F. *et al.*, 2000).

Peu de données de débits d'exploitation sont disponibles. Les forages 00941X0030 et 00945X0013, respectivement implantés dans les faluns de l'Eocène et les calcaires du Maastrichtien, ont un débit d'exploitation de 75 m^3/h soit 600 m^3/j (Vernoux J.F. *et al.*, 2000 et données du SDEAU 50).

g) *Géométrie – extension : Bassin de Sainteny-Marchésieux*

Le bassin de Sainteny-Marchésieux est composé des 2 sous-bassins connectés (Vittecoq B. *et al.*, 2016) : le sous-bassin de Sainteny et le sous-bassin de Marchésieux.

Le sous-bassin de Sainteny est composé de sables quaternaires (dit Sables de Saint-Vigor), de faluns roux pliocènes et de faluns blancs miocènes. Le sous-bassin de Marchésieux se compose de sables quaternaires, d'un complexe formé d'alternances d'argiles, de marnes et de calcaires avec des niveaux à faluns roux et de sables pliocènes (Vernoux J.F. *et al.,* 2000).

Au sein du sous-bassin de Marchésieux, les sables de Saint-Vigor ont une épaisseur maximale de 30 mètres, les faluns de Bohon ont une épaisseur de 70 mètres et se situent à une profondeur comprise entre 11 et 90 mètres, enfin les marnes du Bosq d'Aubigny se situent à une profondeur de 26 à 160 mètres.

h) *Paramètres hydrodynamiques et productivité : Bassin de Sainteny-Marchésieux*

Les paramètres hydrodynamiques disponibles pour ces formations sont présentées ci-dessous (Laurent A. *et al*., 2014) :

- Sables de Saint-Vigor : aucune valeur de perméabilité ou de coefficient d'emmagasinement n'a été déterminée.

- Faluns de Bléhou : ils présentent les meilleures transmissivités du sous-bassin de Sainteny, elles sont comprises entre 0,1 et 0,2 m^2/s.

- Faluns de Bohon : ses caractéristiques hydrodynamiques ne sont pas homogènes à cause des changements granulométriques de cette formation. La transmissivité est comprise entre 0,01 et 0,09 m^2/s, il s'agit des meilleures transmissivités du sous-bassin de Marchésieux. Une valeur de coefficient d'emmagasinement a été déterminée, elle est de 0,0025. Son débit spécifique peut atteindre 100 m^3/h/m.

- Marnes du Bosq d'Aubigny : les valeurs de transmissivité de ces formations sont comprises entre 0,004 et 0,02 m^2/s. Une valeur de coefficient d'emmagasinement a été déterminée, elle est de 0,0005.

- Aquifères de socle : les valeurs de transmissivité des aquifères de socle sont les plus faibles et sont comprises entre 0,0003 et 0,002 m^2/s.

Les débits spécifiques déterminés pour le bassin de Sainteny montrent des valeurs importantes qui dépassent fréquemment les 300 m^3/h/m (Vernoux J.F. *et al.,* 2000). Cependant pour le sous-bassin

de Sainteny, les débits d'exploitation des captages AEP varient entre 100 et 250 m^3/h pour une moyenne à 190 m^3/h (données SDEAU 50).
Le captage AEP 01176X0004 captant les sables de Saint-Vigor du sous-bassin de Marchésieux a un débit d'exploitation de 50 m^3/h (données SDEAU 50).

Le débit maximal autorisé pour les captages AEP des communes de Sainteny et de Saint-Germain-sur-Sèves est de 150 m^3/h. Il est de 21 m^3/h pour le captage de la commune de Marchésieux et de 6 m^3/h pour celui de la commune de Graignes (Laurent A. *et al*., 2014). Analyse de la favorabilité.

4. Analyse de favorabilité à partir des données disponibles

Il doit être souligné que la notion de « favorabilité » de la ressource a pu être considérée dans certaines études précédentes comme une analyse d'un potentiel (Compere F., 2018). Dans ce présent projet, le potentiel de la ressource correspond à un niveau d'information plus précis (intégration des besoins, considération de la surface et de la géométrie de l'espace disponible) pour l'estimation du potentiel sur sondes et sur nappes. La première étape est donc une analyse des ressources classiques afin d'assigner un indice de niveau de favorabilité sur une zone donnée.

Cette information constitue un préalable et un résultat de l'analyse du sous-sol du territoire et offre une lecture immédiate de l'intérêt d'utiliser telle ou telle ressource. Les critères utilisés n'intègrent pas à ce stade les zones de contraintes, mais reprennent les paramètres de capacités du milieu à mobiliser la ressource (conductivité thermique ou débit), la température de la ressource et la prise en compte des épaisseurs des lithologies.

4.1. ANALYSE DE FAVORABILITE POUR DES INSTALLATIONS SUR SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES (BOUCLES FERMEES)

4.1.1. Critères considérés

Pour attribuer un niveau de favorabilité à l'implantation d'une sonde, 3 critères ont été utilisés :

- La conductivité thermique moyenne des terrains
- La température de la ressource
- La difficulté d'accès à la ressource

Le calcul permettant d'attribuer une notation repose sur la somme de ces 3 critères pondérés, et est mise en correspondance avec une des 4 classes de favorabilité (faible, moyenne, bonne et excellente) du Tableau 3, ci-dessous. La note maximale que peut atteindre une zone est de (2×4)+(4x1)+(4x1) = 16. La subdivision en classe de favorabilité de faible à excellente est ensuite basée sur la définition de gamme de valeurs en lien avec la notation du potentiel de ressource sur sonde (Tableau 4).

Tableau 3 : Attribution des notes de favorabilité selon trois critères pour les sondes

Critère de potentialité géothermique	Facteur	Classification de critères	Indexation des classes		CCLLA
Conductivité thermique moyenne	2	λ < 1,5 W/m.K	1	faible	
		1,5 W/m.K < λ < 2 W/m.K	2	moyenne	<===
		2 W/m.K < λ < 3 W/m.K	3	bonne	<===
		λ > 3 W/m.K	4	excellent	<===
Température de la ressource	1	T < 10 °C	2		
		10°C < T < 15 °C	4	excellent	<===
		T > 15°C	3		
Difficulté d'accès à la ressource (mise en oeuvre des sondes)	1	0 m < Ep. < 5 m	4	très faible	<===
		5 m < Ep. < 20 m	3	faible	<===
		20 m < Ep. < 50 m	2	moyenne	<===
		50 m < Ep. < 100 m	1	élevée	<===
		Ep. > 100 m	0	très élevée	

Tableau 4 : Attribution des classes de favorabilité pour les boucles fermées

Notation du potentiel de ressource sur sonde	Favorabilité Classe
<= 9	Faible
> 9 et <=11	Moyen
>11 et <=13	Bon
>13	Excellent

4.1.2. Résultats

Outre la possibilité d'une restitution cartographique de la favorabilité de la géothermie de surface sur sondes géothermiques verticales (Figure 12) à partir des données récoltées qui permet une lecture directe, des analyses chiffrées peuvent être réalisées.

Sur l'ensemble du territoire de la région Normandie, on pourra retenir que la quasi-totalité du territoire présente des caractéristiques favorables pour recevoir des installations de géothermie de surface sur sondes géothermiques verticales. Plus précisément, 98% du territoire présente une favorabilité de bonne à excellente (Figure 13). La favorabilité excellente étant principalement liée à la présence de roche de socle qui présente des bonnes caractéristiques thermiques (conductivité thermique élevée).

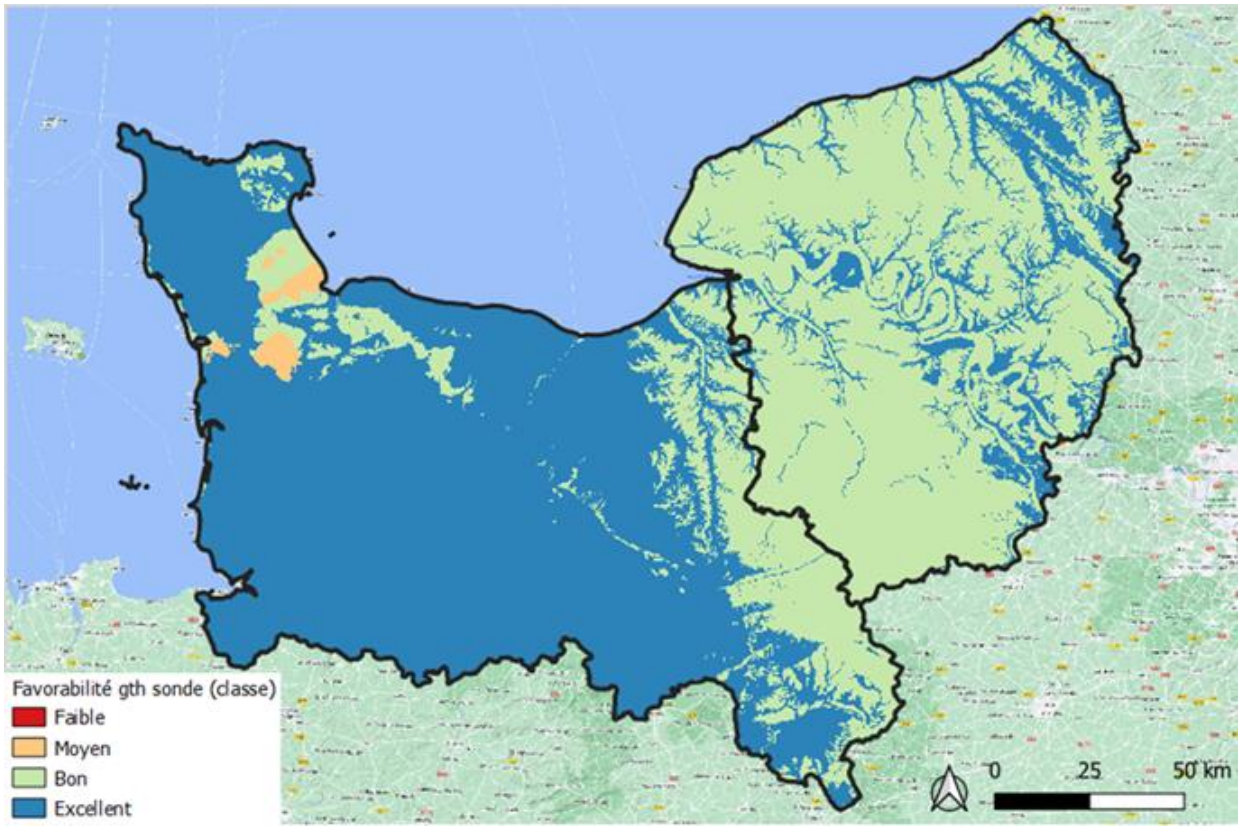


Figure 12 : Cartographie de la favorabilité de la géothermie de surface sur sondes géothermiques verticales (boucles fermées)

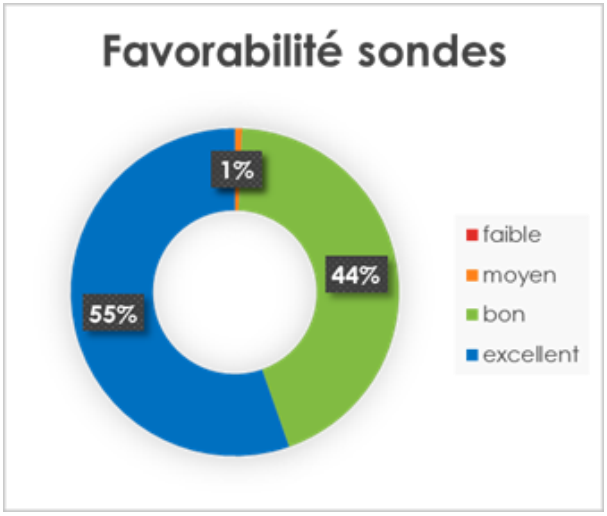


Figure 13 : Distribution de la favorabilité pour des installations sur sondes géothermiques verticales sur l'ensemble du territoire Normand

4.2. ANALYSE DE FAVORABILITE POUR DES INSTALLATIONS SUR NAPPES AVEC DOUBLET DE FORAGES (BOUCLES OUVERTES)

Le calcul (Tableau 5) permettant d'attribuer une notation à la favorabilité d'un aquifère au regard de son potentiel géothermique repose sur trois critères que sont :

- la productivité de l'aquifère,
- la température de la ressource,
- la profondeur d'accès à la ressource.

Ce calcul repose sur une méthode fixée nationalement, afin d'obtenir des résultats homogènes pour les diverses régions. La note maximale que peut atteindre un aquifère en un point donné est de (2x5)+(4x1)+(4x1) = 18. La subdivision en classe de favorabilité de faible à excellente est ensuite basée sur la définition de gamme de valeurs en lien avec la notation du potentiel de ressource sur nappe (Tableau 6).

La gamme des températures est favorable au fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC) en mode chauffage et rafraîchissement par free-cooling (via un échangeur passif). Concernant les débits, il est important de rappeler qu'il existe un aléa important quant au débit exploitable et aux caractéristiques hydrodynamiques (aquifère de socle ou domaine sédimentaire). De ce fait une étude spécifique locale réalisée en amont sera nécessaire.

Tableau 5 : Attribution des notes de favorabilité selon 3 critères pour les doublets sur nappe

Critère de potentialité géothermique	Facteur	Classification de critères	Indexation des classes	CCLLA
Productivité de l'aquifère	2	Q < 5 m3/h	1	<===
		5 m3/h < Q < 10 m3/h	2	<===
		10 m3/h < Q < 50 m3/h	3	<===
		50 m3/h < Q < 100 m3/h	4	
		Q > 100 m3/h	5	
Température de la ressource	1	T < 10 °C	2	
		10°C < T < 15 °C	4	<===
		T > 15°C	3	
Profondeur d'accès à la ressource	1	0 < Prof < 5 m	1	<===
		5 m < Prof < 15 m	4	<===
		15 m < Prof < 30 m	3	<===
		30 m < Prof < 100 m	2	<===
		100 m < Prof < 250 m	1	
		Prof > 250 m	0	

Tableau 6 : Attribution des classes de favorabilité pour les boucles ouvertes

Notation du potentiel de ressource sur nappe	***Favorabilité Classe***
<= 8	Faible
> 8 et <= 10	Moyen
> 10 et <= 12	Bon
>12	Excellent

Résultats

Outre la possibilité d'une restitution cartographique de la favorabilité de la géothermie de surface sur nappe (Figure 14) à partir des données récoltées qui permet une lecture directe, des analyses chiffrées peuvent être réalisées.

Sur l'ensemble du territoire Normand, on pourra retenir que plus de trois-quarts du territoire présente des caractéristiques favorables pour recevoir des installations de géothermie de surface sur nappe. Plus précisément, 80% du territoire présente une favorabilité de bonne à excellente (Figure 15). Cette favorabilité découle principalement de la présence des aquifères majeurs : l'aquifère de la craie (en ex-Haute-Normandie) et du jurassique (en ex-Basse-Normandie).

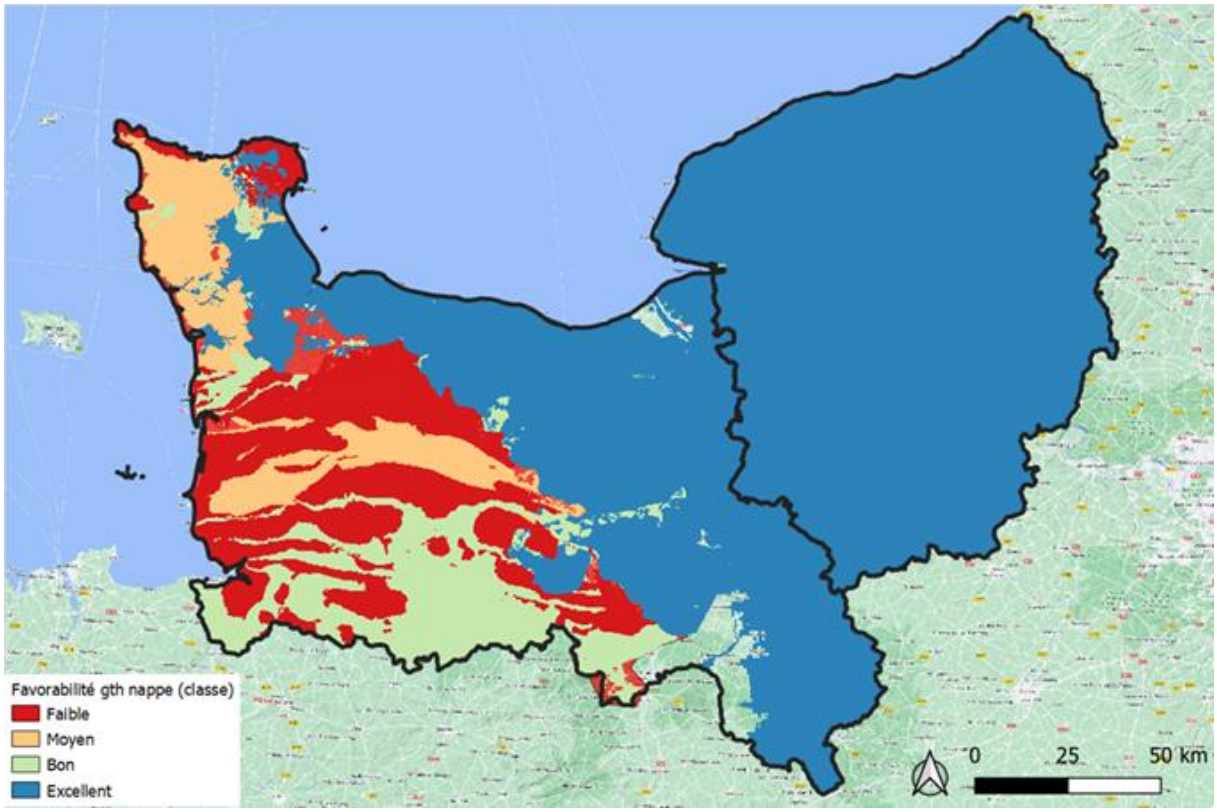


Figure 14 : Cartographie de la favorabilité de la géothermie de surface sur nappe (boucles ouvertes)

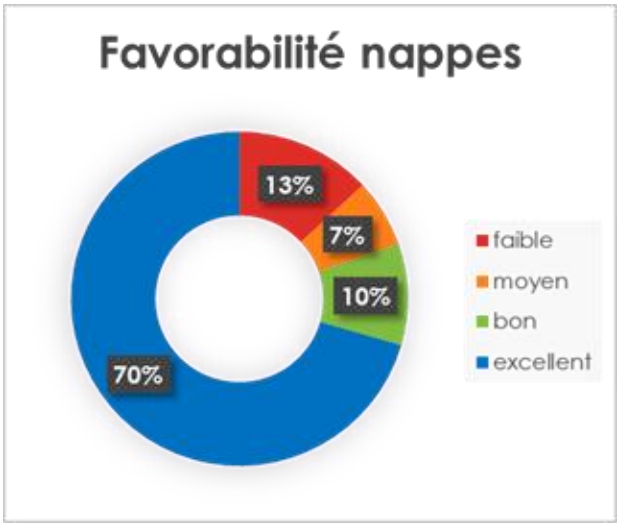


Figure 15 : Distribution de la favorabilité pour des installations sur nappe sur l'ensemble du territoire Normand

5. Réglementations s'appliquant à la géothermie de surface

5.1. 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 normand sont présentés 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.

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

a) *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**[1] qui précise notamment les conditions d'appartenance des exploitations à la géothermie de minime importance et les contraintes et zones réglementaires associées.

[1] 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. 112-1**[2] **et L. 112-3**[3] **du Code Minier** et il modifie le **décret n° 78-498 du 28 mars 1978**[4] modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le **décret n° 2006-649 du 2 juin 2006**[5] 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°78-498[6] 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 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 ;

---

2 https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=3648590E7B12FDD3CB583E49202528E3.tplgfr35s_2?idArticle=LEGIARTI000025560263&cidTexte=LEGITEXT000023501962&categorieLien=id&dateTexte=

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

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

5 https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000609345

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

c) La **puissance thermique maximale** échangée avec le 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 ;

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 m^3/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 b) 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. »

b) *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 agrée 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 danger ou inconvénient soumise à un simple régime déclaratif.

- **Arrêté relatif à l'agrément d'experts en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté expose le cadre et les modalités d'agrément des experts, les modalités dans lesquelles 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.

c) *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. Les normes suivantes doivent être 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 (aout 2014) relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

5.1.2. 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 5.1.1 paragraphe a)) doivent être déclarées via le service de téléservice (aussi appelé télé-déclaration) de la GMI[7], 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 ; A noter qu'un nouveau décret n°2024-230 entraine quelques modifications, notamment par rapport aux périmètres de protection rapprochée : Décret n° 2024-230 du 15 mars 2024 portant diverses dispositions en matière de géothermie de minime importance

[7] https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/?timeout=timeout

- à moins de 35 mètres ;
    - d'un **ouvrage souterrain de prélèvement d'eau** destinée à la consommation humaine ;
    - des **stockages** d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines ;
    - 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 positionner 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 souterraines[8].

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, lorsqu'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.

5.1.3. Les zones réglementaires dans la région Normandie

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur la région Normandie, une révision a été engagée, 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

[8] Consultation possible du site reseaux-et-canalisations.gouv.fr

des phénomènes redoutés. Au total **6 nouvelles cartes réglementaires de la GMI ont été réalisées au niveau de la région Normandie 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 250 mètres de côté** (Figure 16). Elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones dites « **rouges** » dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance. Pas de procédure simplifiée, un dossier d'autorisation doit être déposé ;

- les zones dites « **orange** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles est exigée la production d'une attestation de compatibilité d'un projet de géothermie de minime importance, rédigée par un expert agréé prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié. La déclaration du projet est réalisée via un téléservice avec attestation de compatibilité d'un projet de GMI établie par un expert agréé ;

- les zones dites « **vertes** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves. La déclaration du projet est réalisée via un téléservice.

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur la Normandie, la DGPR, l'ADEME et le BRGM ont financé la révision de la carte sur la région. Celle-ci a été réalisée conjointement par le BRGM et le Cerema pour le compte de la DREAL de Normandie

Les zones réglementaires de la GMI s'appuient sur **9 phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux redoutés** pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Conformément au guide méthodologique de 2015, les phénomènes retenus sont :

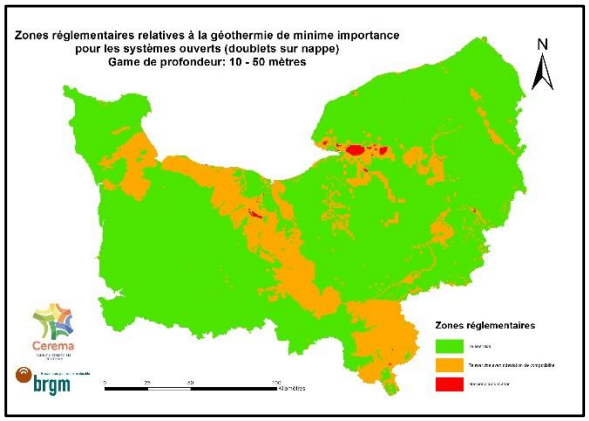
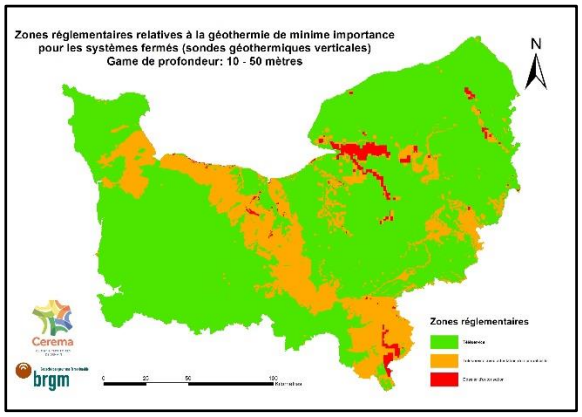
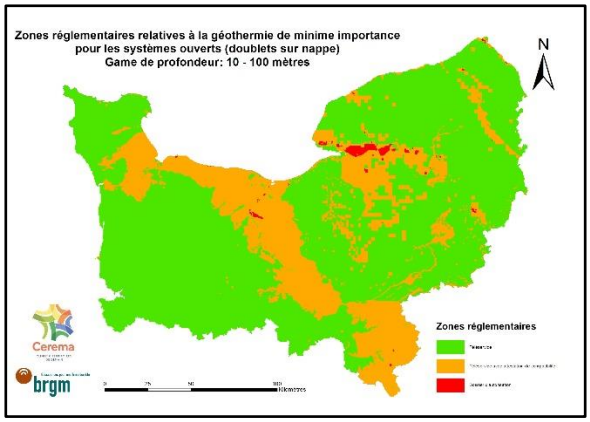
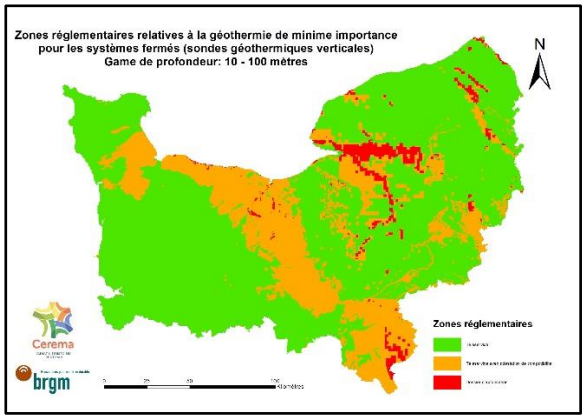
- Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
- Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
- Affaissement/effondrement lié aux cavités minières ;
- Mouvement de terrain de type glissement ;
- Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
- Artésianisme ;
- Mise en communication d'aquifères ;
- Remontée de nappe ;
- Biseau salé - salinisation.

Pour chacun de ces phénomènes, des niveaux d'aléa ou de susceptibilité ont été attribués conformément aux recommandations du guide méthodologique. Cependant, pour 2 phénomènes, les niveaux d'aléa ont été affinés afin de mieux correspondre aux spécificités normandes. Les 2 phénomènes concernés sont « Pollution des sols et/ou des nappes souterraines » et « Artésianisme ».

Après validation des critères par les services de l'Etat, consultation publique et publication d'un arrêté par le Préfet, les cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance de la région Normandie seront mises à disposition sur le site internet http://www.geothermies.fr

Les phénomènes redoutés amenant à une classification en zones dites « rouge » sont les risques liés à l'artésianisme et au biseau salé. Le phénomène d'artésianisme se localise

essentiellement dans les vallées à de faibles profondeurs car les toits des aquifères artésiens y sont majoritairement moins profonds, même s'ils sont présents sur un territoire plus large. Ainsi, ce phénomène est également présent sous les plateaux mais pour des profondeurs plus importantes. C'est par exemple le cas de la principale nappe artésienne de Normandie : la nappe de l'Albien. Le phénomène de biseau salé se localise principalement au niveau de l'estuaire de la Seine.

	Echangeurs ouverts	Echangeurs fermés
50 m		
100 m		

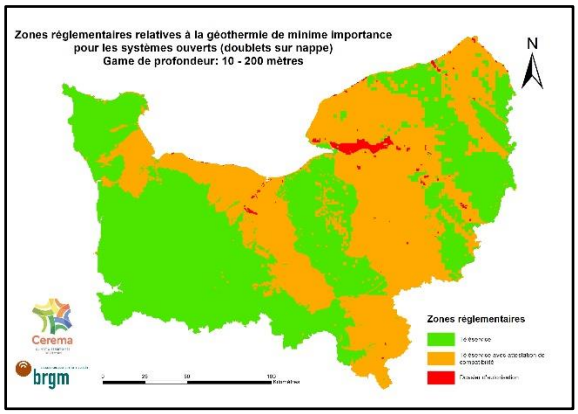
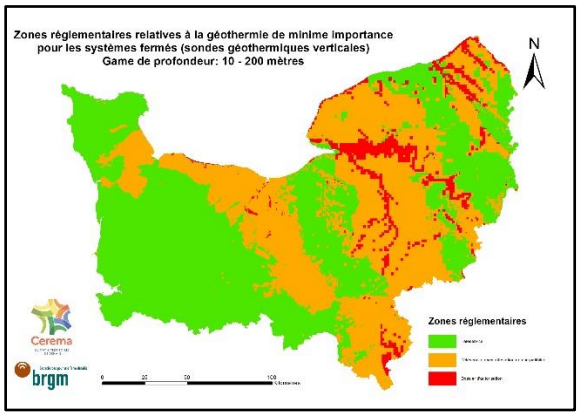
200 m		

Figure 16 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la région Normandie pour la géothermie sur échangeurs ouverts (gauche) et fermés (droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP-72225-FR)

La répartition des 3 zones réglementaires au sein de la région Normandie est présentée dans les tableaux ci-dessous en fonction de la surface occupée et de la population (les données utilisées sont celles de 2017, disponibles sur le site de l'Institut national de la statistique et des études économiques).

Tableau 7 : Répartition des 3 zones réglementaires et selon les 3 gammes de profondeur au sein de la région Normandie en fonction de la surface occupée et de la population

Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
10 - 50 mètres	81 %	71 %	79 %	71 %
	19 %	28 %	19 %	27 %
	< 1 %	1 %	1 %	2 %

Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
10 - 100 mètres	74 %	57 %	72 %	56 %
	26 %	41 %	25 %	37 %
	< 1 %	2 %	3 %	7 %

Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
10 - 200 mètres	55 %	36 %	54 %	36 %
	44 %	60 %	41 %	53 %
	1%	4 %	6 %	11 %

5.2. 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.

5.2.1. SDAGE et SAGE

a) *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).

La région Normandie est concernée par le SDAGE Seine-Normandie 2022-2027[9] (Figure 17).

[9] https://www.gesteau.fr/consulter-les-sdage

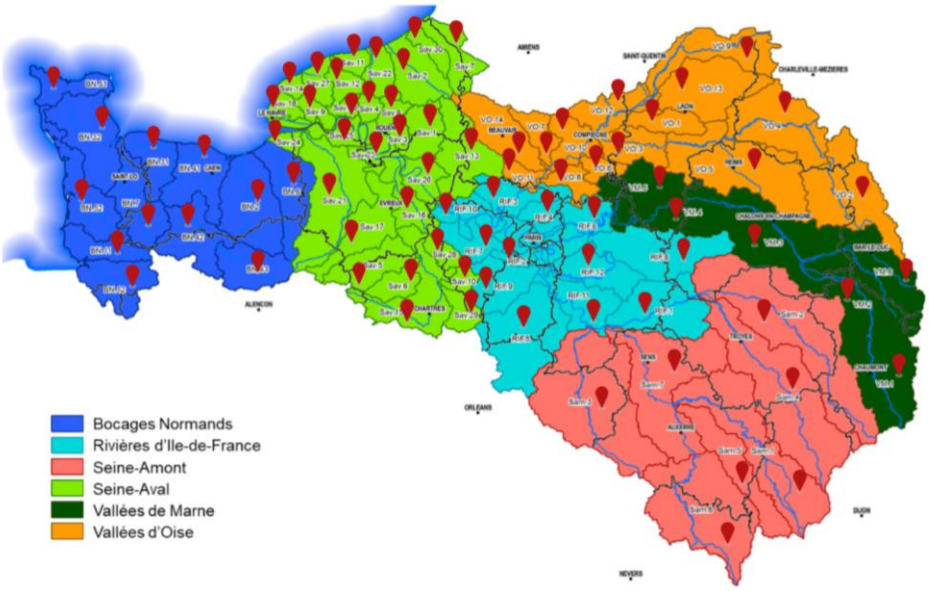


Figure 17 : Emprise du bassin Seine-Normandie

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 2019 [10].

Le suivi des objectifs du SDAGE se poursuit, comme par exemple pour l'état chimique des eaux souterraines (Figure 18).

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

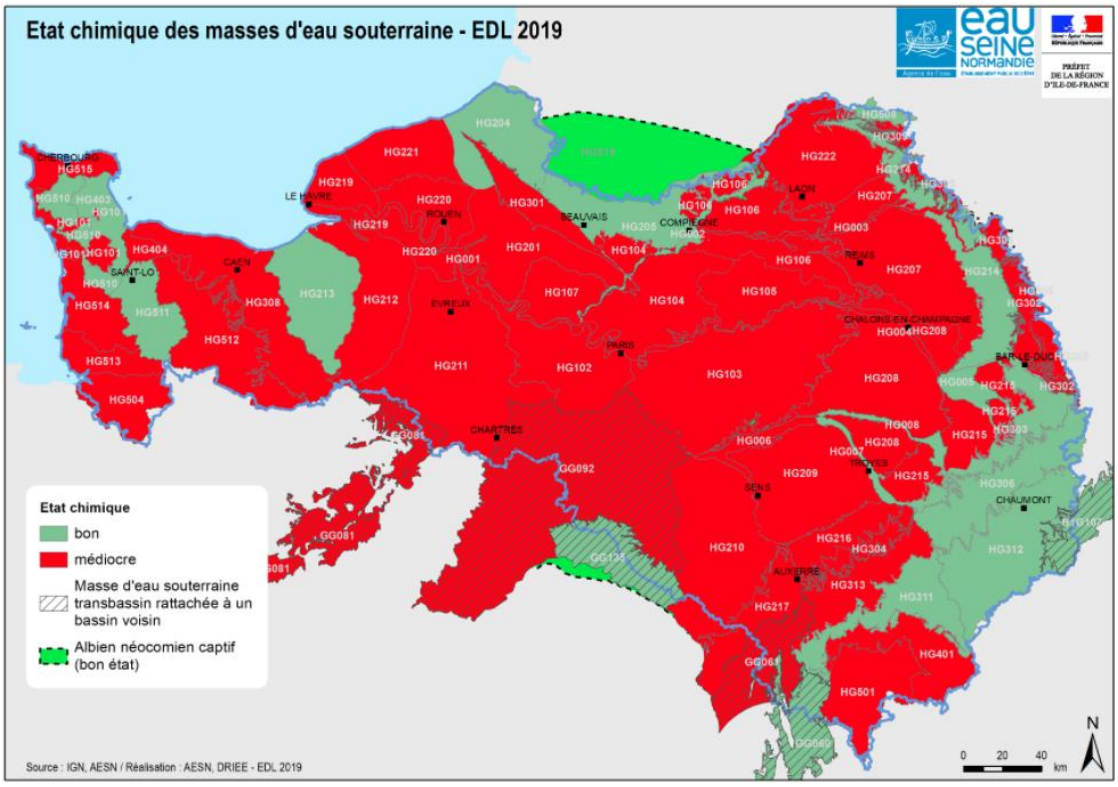


Figure 18 : État chimique des eaux souterraines sur le bassin Seine-Normandie (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2019)

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 :

« 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. »

b) *SAGE*

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).

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.

La région Normandie est couverte par 22 SAGE[11] cf. Figure 19.

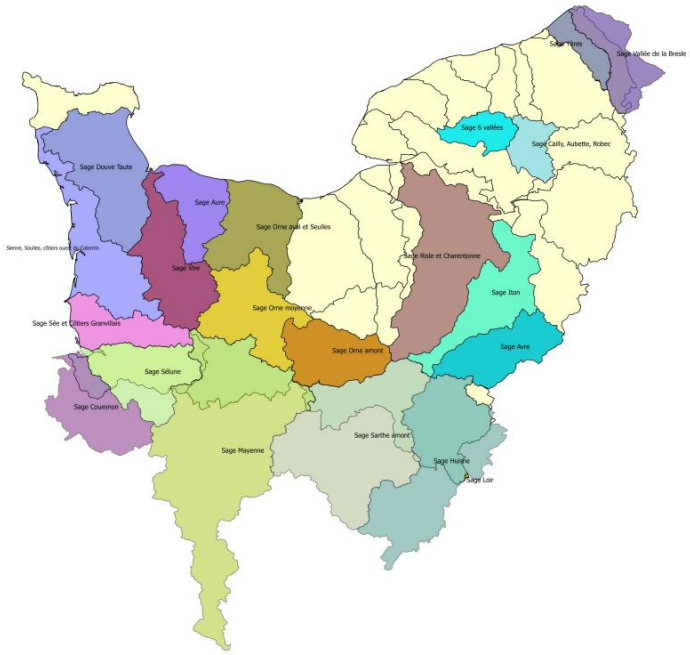


Figure 19 : SAGE en application au niveau de la région Normandie

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.

5.2.2. Ressources stratégiques

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 et dans l'optique d'une anticipation des effets du changement climatique. Les nappes stratégiques présentent un réel enjeu pour l'alimentation en eau potable actuelle et future.

[11] https://www.gesteau.fr/sage#8/47.957/2.159/sage ; https://www.gesteau.fr/telecharger/sage

En Seine-Normandie, ces ressources sont désignées et délimitées depuis le premier SDAGE de 1996. A l'occasion de la rédaction du SDAGE 2016-2021, l'Agence de l'eau, la DRIEAT et le BRGM ont réalisé des travaux de mise à jour de la liste des ressources à préserver et de précision des limites de ces ressources.

Au total, 10 masses d'eau souterraine contenant des nappes stratégiques à protéger sont identifiées :

- FRHG006 : Alluvions de la Bassée
- FRHG101 : Isthme du Cotentin
- FRHG103 : Tertiaire du Brie Champigny et du Soissonnais (nappe du Champigny en ZRE)
- FRHG104 : Eocène du Valois (nappe de l'Yprésien)
- FRHG202 : Craie altérée de l'estuaire de la Seine (nappe de la Craie dans les bassins versants du Commerce, de l'Aubette et du Robec et de la craie sous alluvions dans la vallée de la Seine)
- FRHG211 : Craie altérée du Neubourg – Iton - Plaine S^{t}-André (nappe de la Craie dans les bassins versants de l'Avre et de l'Iton)
- FRHG218 : Albien - Néocomien captif
- FRHG308 : Bathonien – Bajocien - Plaine de Caen et du Bessin (partie libre)
- FRGG092 : Calcaires tertiaires libres et Craie sénonienne de Beauce (craie séno-turonienne sous la Beauce, calcaires d'Etampes captif, Eocène de la nappe de Beauce en Ile-de-France)
- FRGG135 : Calcaires tertiaires captifs de Beauce sous forêt d'Orléans

De plus, les nappes des masses d'eau suivantes ont été identifiées comme susceptibles d'être classées comme nappes stratégiques et ont été cartographiées dans le cadre d'une étude réalisée à l'échelle du bassin Seine-Normandie. Elles doivent faire l'objet d'analyses complémentaires en concertation avec les acteurs locaux :

- FRHG007 : Alluvions Seine amont
- FRHG008 : Alluvions Aube
- FRHG402 : Trias du Cotentin Est et Bessin (nappe du Calcaire - entité BDLISA 144AA03)
- FRGG081 : Sables et grès du Cénomanien sarthois (nappes des sables du Cénomanien)

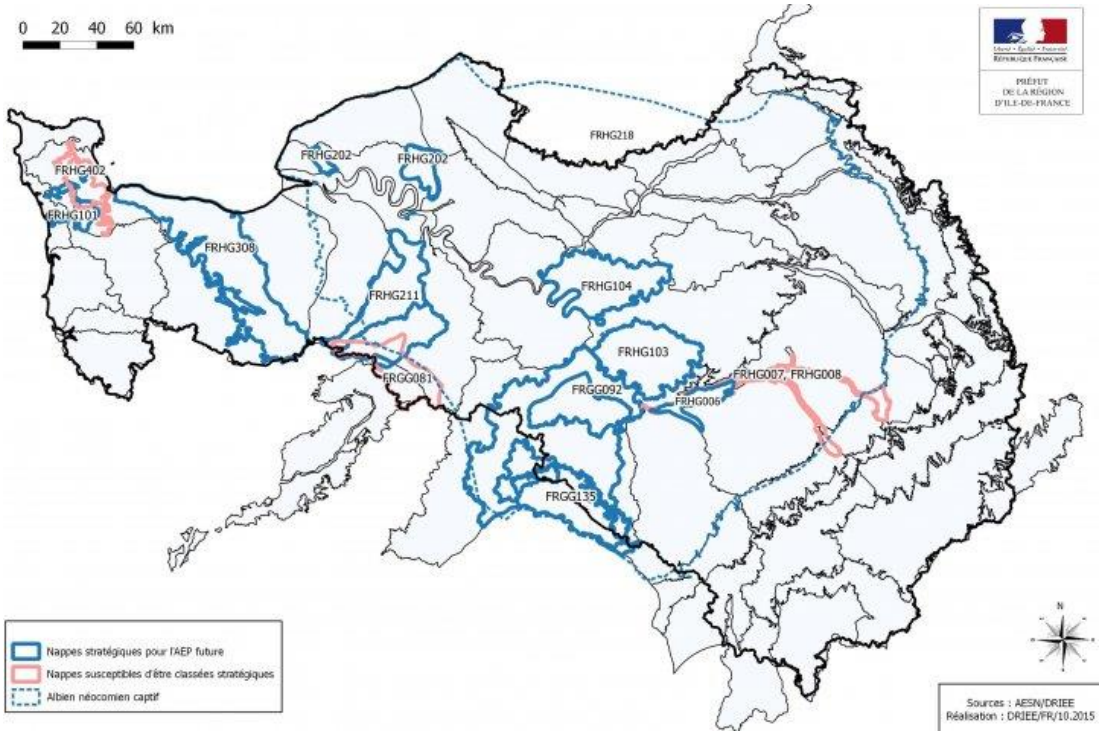


Figure 20 : Carte des nappes stratégiques à réserver pour l'alimentation en eau potable future – Bassin Seine-Normandie (SDAGE 2016-2021)

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

Comme cela est mentionné dans le SDAGE Seine-Normandie (Comité Du Bassin Seine-Normandie 2016), 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 partie 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.

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 forages réalisé dans ces zones et ainsi de privilégier les doublets géothermiques pour limiter les risques de pollutions des nappes NAEP.

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 captages 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.**

5.3. REGLEMENTATIONS LIEES A 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 découlent 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 21). 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** ;
- 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).

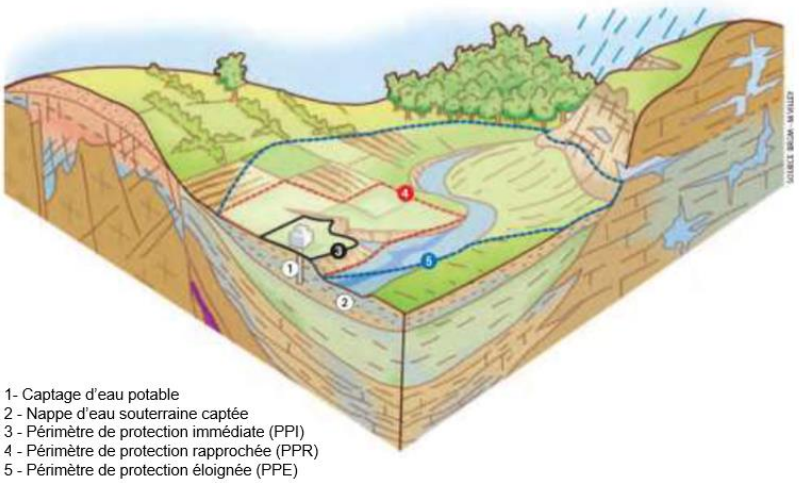


Figure 21 : Les différents périmètres de protection des ouvrages pour la consommation humaine et des sources d'eaux minérales naturelles conditionnées (source : BRGM, M. Villey)

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.

Le guide technique édité par le Ministère de la santé et des sports (2008, http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-70449-FR) donne un cadre pour l'action des hydrogéologues agréés et aux services de l'Etat qui sollicitent leur intervention ainsi que pour la définition des périmètres de protection. Dans les PPR, en présence de document d'urbanisme, en cas de maintien des zones constructibles, les doublets géothermiques doivent être interdits. Selon l'annexe 11 de ce guide, les doublets géothermiques doivent être interdits dans les PPR (rejets d'eau froide, risques liés au chantier et au vieillissement des ouvrages) et les sondes si la protection de la nappe est faible.

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.

5.4. SYNTHESE DES CONTRAINTES REGLEMENTAIRES

Pour chaque projet d'installation, il convient donc 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, une agrégation des PPI et PPR où la GMI ne s'applique pas (cf. Figure 22) a été réalisée. A l'échelle de la région, les périmètres de protection rapprochée représentent environ 3% de la surface totale.

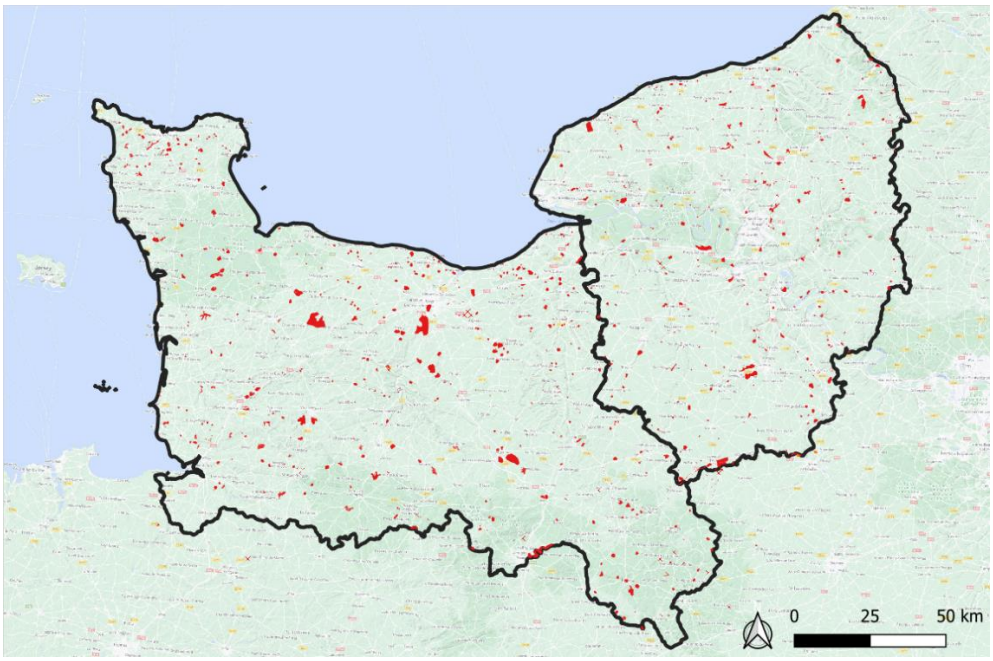


Figure 22 : Agrégation des contraintes réglementaires : Périmètre de protection immédiat et rapproché

6. Estimation du potentiel de la géothermie de surface : croisement entre ressources et besoins

6.1. ESTIMATION DES BESOINS

Les besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) ont été estimés à la parcelle par Inddigo. La base de données constituée inclus 1 566 705 parcelles. L'agrégation de ces besoins sur l'ensemble de la Région montre que la consommation actuelle en énergie thermique (chaud) est de :

- Besoin de chauffage : 66,7 TWh/a
- Besoin d'Eau Chaude Sanitaire : 8,9 TWh/a

6.2. METHODOLOGIE

La méthodologie employée repose sur l'estimation, à la parcelle, d'un taux de couverture maximal des besoins de chauffage et d'ECS par une pompe à chaleur géothermique sur champs de sondes géothermiques verticales ou sur doublets sur aquifères. On commence par estimer le foncier disponible pour l'implantation des forages. Pour ce faire, on construit un buffer (tampon) d'exclusion de 5 m autour de chacun des usages suivants du sol définis par la BD-TOPO :

- Bâtiments,
- Terrains de sport,
- Surfaces hydrographiques,
- Réservoirs,
- Pylônes,
- Postes de transformation,
- Plans d'eau,
- Equipements de transport,
- Cimetières,
- Aérodromes.

Ces polygones et leurs buffers sont exclus du foncier disponible pour l'implantation des échangeurs géothermiques. Deux critères réglementaires complexifient la mise en place des échangeurs géothermiques car le régime déclaratif simplifié de la Géothermie de Minime Importance ne s'applique pas : les zones rouges de la cartographie définie par le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 et Code Minier (cf. p45) et les Périmètres de Protection Rapprochée des captages d'eau potable (cf. §5.3 p59). Un potentiel est donc aussi calculé en considérant uniquement les parcelles ne se trouvant dans une aucune de ces situations réglementaires.

6.2.1. Méthodologie d'estimation du potentiel des champs de sondes

La méthode utilisée a été développée pour l'estimation du potentiel de la Communauté de Commune de Loire Layon Aubance (Baudouin et al., 2020), d'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 À 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 imposé 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, pris égal à zéro pour cette étude [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 8). Les températures extrêmes acceptables sont fixées par la réglementation, i.e. par la géothermie de minime importance (cf. section 5.1.1). Le rayon et la résistance de forage sont des valeurs caractéristiques observées en France (Maragna *et al.*, 2021a).

Tableau 8 : Paramètres fixés pour l'analyse du potentiel des sondes géothermiques verticales

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}]	2,0
	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

6.2.2. Méthodologie d'estimation du 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/a : 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. Il convient de souligner que ce critère seuil utilisé reste assez restrictif mais basé sur les résultats d'une étude sur l'estimation des coûts des doublets géothermiques dans le contexte de la Métropole d'Orléans (réalisé par Utilities Performance). Selon les spécificités locales et/ou du projet une installation sur doublet pourra être réalisée pour des besoins moins importants que ce seuil (tout en restant économiquement viable). Le choix de la solution nécessite une approche holistique, prenant en compte les besoins énergétiques, les ressources disponibles, les coûts, la réglementation et d'autres facteurs locaux ; ce qui nécessite donc l'avis d'experts en géothermie et d'entreprises spécialisées qui sauront orienter vers la solution technique la plus adaptée.

A l'échelle de la Région, cela représente seulement 5% des parcelles mais un besoin significatif (43%, soit 33,5 TWh/a). 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 23) ;
- 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.

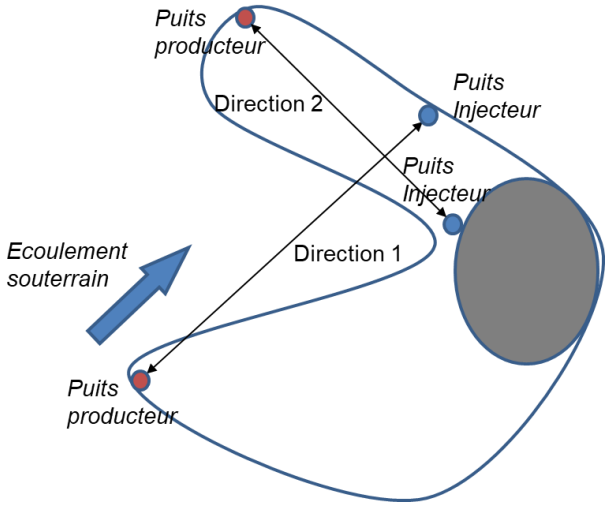


Figure 23 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement

6.3. RESULTATS DU CROISEMENT ET ANALYSE

Les fichiers géomatiques (format shapefile) représentant le potentiel énergétique de la géothermie de surface ont été remis à Inddigo pour préparation d'une restitution cartographique agrégée à l'EPCI.

A l'échelle de la Région, 57,8 TWh/a serait couvrable par des pompes à chaleur géothermiques sur sondes verticales, soit 77 % des besoins de chauffage et ECS (cf. Figure 24 et Figure 25). Globalement, le potentiel est plus élevé dans les zones où le foncier disponible est important. La contribution des aquifères est moindre puisqu'elle est estimée à 2,2 TWh/a. D'après ces estimations, le principal facteur limitant est le manque d'espace au sein d'une parcelle donnée pour y placer le doublet (cf. Tableau 9). Il convient de souligner que la contribution moindre des aquifères est en partie liée au critère seuil utilisé (150 MWh/a) et donc qu'une fraction du potentiel estimé couvrable par les sondes géothermiques verticales pourra être couvert par des installations sur doublet.

Les deux contraintes réglementaires mentionnées en introduction, à savoir se situer en-dehors des zones rouges de la GMI et des PPR, ont un impact limité sur le potentiel, puisqu'à l'échelle de la Région, il est alors de 50,5 TWh/a pour les sondes et 2,0 TWh/a pour les aquifères.

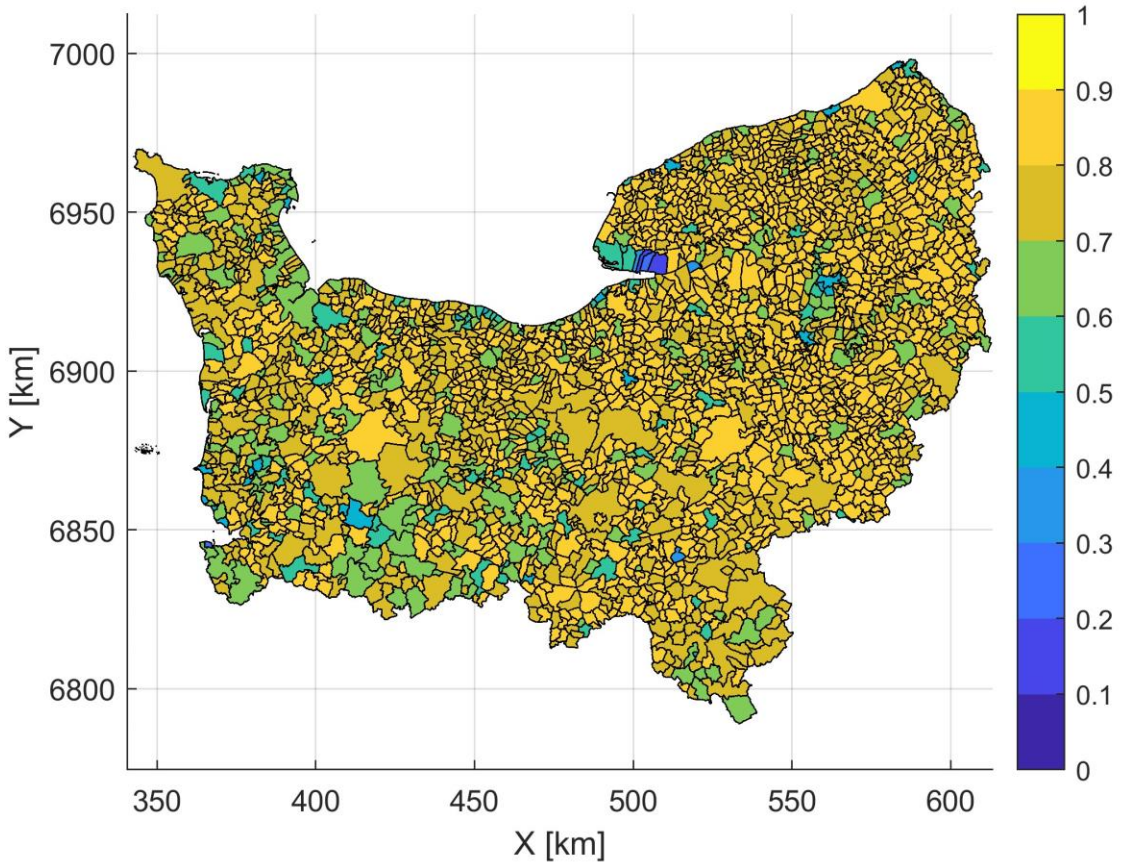


Figure 24 : Estimation du taux de couverture (entre 0 et 1) des besoins de chauffage et ECS par champ de sondes, agrégé à l'échelle communale

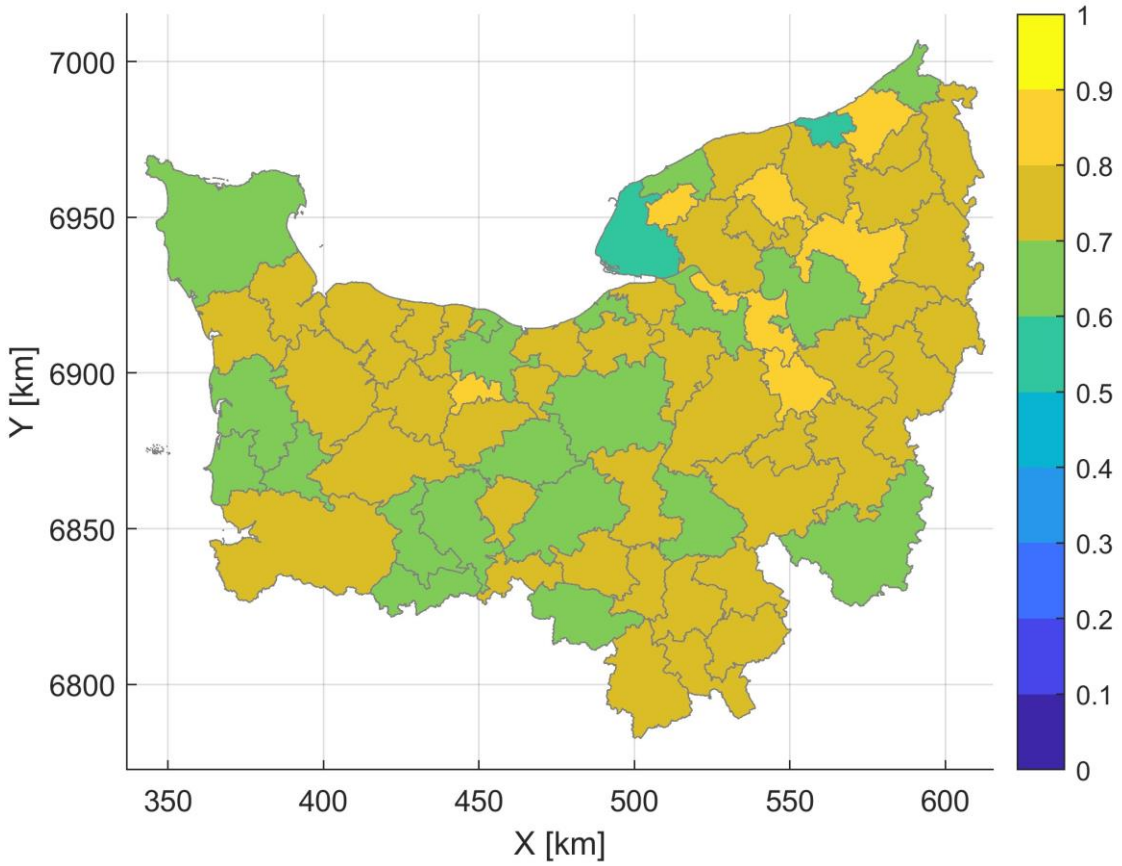


Figure 25 : Estimation du taux de couverture (entre 0 et 1) des besoins de chauffage et ECS par champ de sondes, agrégé à l'échelle de l'EPCI

Tableau 9 : Résultats-clés par aquifère

Aquifère	Nombre de bâtiments au-dessus de l'aquifère	Nombre de bâtiments au-dessus du seuil de 150 MWh/a	Energie (chauffage et ECS) au-dessus de l'aquifère	Energie (chauffage et ECS) au-dessus du seuil de 150 MWh/a	Energie prélevable par aquifère
Bajocien-bathonien	494620	27316	13,34	6,04	0,09
Craie	1326600	58734	42,21	15,35	1,79
Faluns	6389	236	0,26	0,07	0,01
Lias (Calvados)	258869	15325	6,74	3,78	0,06
Lias (Manche)	267330	15659	0,35	0,10	0,01
Nappe alluviale de la Seine	1378192	62998	4,57	3,03	0,18
Trias	169692	9297	10,33	5,12	0,10

Ce potentiel “brut” est ensuite affiné, avec l’application de divers filtres détaillés ci-dessous, afin de s’approcher d’un potentiel plus “réaliste” (et prioritaire) de la production géothermique sur sondes et nappe du territoire.

Ont ainsi été supprimés du potentiel :

- Les bâtiments ayant en production actuelle :
  - Chauffage électrique
  - Bois (chaudières, poêles...)
  - Pompes à chaleur air / air, géothermique
  - Réseaux de chaleur
- Les bâtiments situés à moins de 500 mètres d’un réseau de chaleur existant
- Les potentiels en géothermie inférieurs à 10 MWh (équivalent en moyenne aux particuliers)
- Bâtiments construits avant 1950
- Industriels (régimes de températures bien souvent non adaptés à la géothermie).

Cela ne veut pas dire toutefois que ces bâtiments supprimés ne peuvent pas mettre en place une géothermie, moyennant des travaux de rénovation, mais ils ne sont pas identifiés dans le potentiel “prioritaire” actuel.

Pour les modes de chauffage des bâtiments, la donnée n’était fournie que pour 15% à 20% des bâtiments, principalement pour le secteur Résidentiel, via les DPE. En analysant ces 15-20%, il a été appliqué la répartition des modes de chauffage du reste du résidentiel, et de fait environ 50% du secteur résidentiel a été considéré avec un mode de chauffage non compatible.

Le potentiel affiné estimé est alors le suivant, par département :

- Département 14 : 5,98 TWh dont 0,08 TWh nappe
- Département 27 : 3,65 TWh dont 0,02 TWh nappe
- Département 50 : 4,54 TWh dont 0,01 TWh nappe
- Département 61 : 1,86 TWh dont 0,03 TWh nappe
- Département 76 : 6,58 TWh dont 0,04 TWh nappe

A l'échelle des départements, on pourra noter que la Seine-Maritime dispose du plus fort potentiel avec 6,58 TWh (Figure 26).

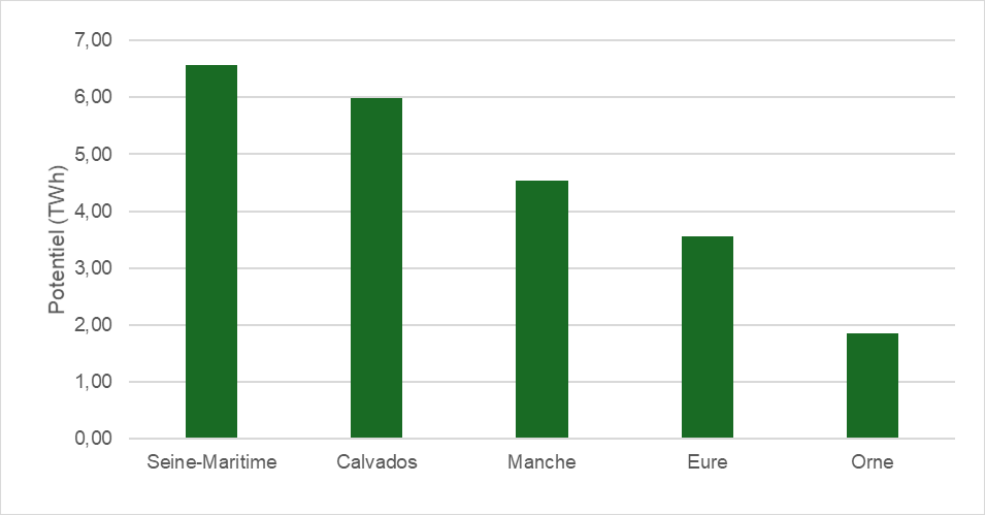


Figure 26 : Potentiel affiné en TWh pour chaque département

Au total sur l'ensemble de la région Normandie, le potentiel couvrable par la géothermie de surface représente 22.5 TWh dont 0,18 TWh sur nappe.

Ces résultats ont été exportés pour chaque département au format Excel. Chaque fichier Excel est composé de 23 colonnes :

fid : Identifiant de la parcelle

code_commune : Le code insee de la commune à laquelle appartient la parcelle

libelle_commune : Le nom de la commune à laquelle appartient la parcelle

code_epci : le code de l'EPCI à laquelle appartient la parcelle

bdtopo_bat_l_nature : Catégorie de nature du bâtiment

bdtopo_bat_l_usage_1 : usage principal du bâtiment

bdtopo_bat l_usage_2 : usage secondaire du bâtiment

dpe_logtype_ch_gen_lib_princ : Type de générateur de chauffage principal

dpe_logtype_ch_type_ener_corr : Type d'énergie de chauffage (concaténé)

ffo_bat_annee_construction : Année de construction

ffo_bat_nb_log : Nombre de logements

chauffage_2 : Besoin de chauffage [MWh/a] à la parcelle

ecs_2 : Besoin d'Eau Chaude Sanitaire [MWh/a] à la parcelle

500m_rdc : Présence d'un réseau de chaleur à moins de 500 m

E_cal_craie_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère de la Craie - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_nappe_alluviale_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur la nappe alluviale - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_batho-bajocien_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère du bathonien-bajocien - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_lias_manche_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère du Lias (département de la Manche) - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_lias_calvados_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère du Lias (département du Calvados) - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_trias_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère du Trias - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_faluns_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur l'aquifère des Faluns - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_SGV_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par une pompe à chaleur sur sonde géothermique verticale profonde de 200 m - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

E_cal_best_reglcheck_MWh : Energie calorifique (chauffage + Eau Chaude Sanitaire) fournie par la meilleure solution - zones rouges de la Géothermie de Minime Importance et Périmètres de Protection Rapproché des captages d'eau potable exclus [MWh/a]

Les fichiers Excel sont disponibles dans le dossier nommé « Export fichier par département ».

Le potentiel affiné à l'échelle de la parcelle a ensuite été agrégé à l'échelle de chaque EPCI de la région Normandie. Les résultats du potentiel pour chaque EPCI sont synthétisés dans les tableaux suivants (Tableau 10) et ont été traduits selon deux types de cartes :

- Une carte du potentiel géothermique par EPCI, à l'échelle de la région (Figure 27) et des dérivées (zoom sur chaque département) sont disponibles dans le dossier nommé « Potentiel par EPCI ».

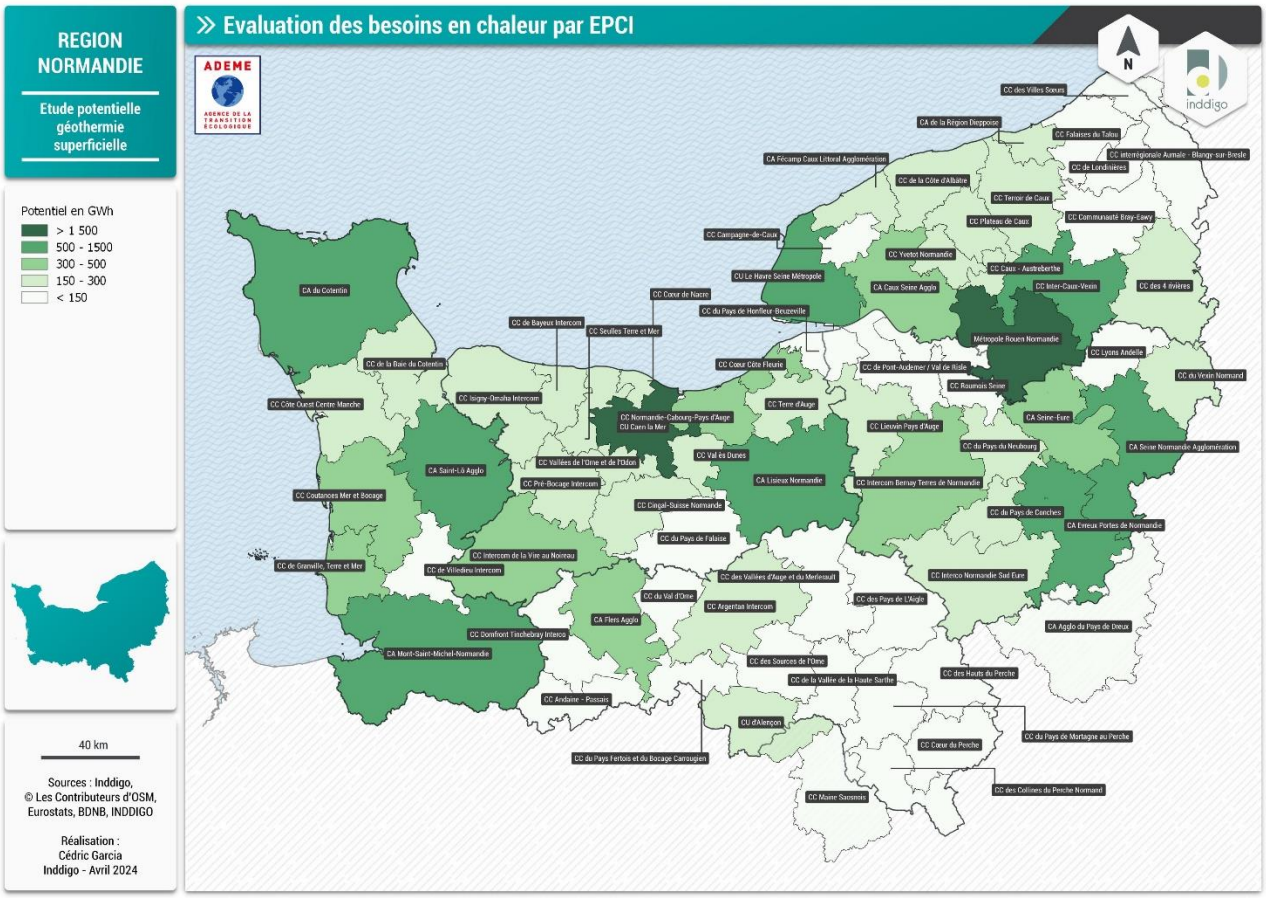


Figure 27 : Carte du potentiel géothermique affiné pour chaque EPCI de la région Normandie

La synthèse du potentiel à cette échelle des EPCI Normands montrent notamment que les plus forts potentiels (potentiel supérieur à 1500 GWh) correspondent à la CU Caen la Mer et à la Métropole de Rouen Normandie. Ces plus forts potentiels sont suivis par les EPCI de la CA du Cotentin, la CU Le Havre Seine Métropole, la CA Mont-Saint-Michel-Normandie, la CA Saint-Lô Agglo, la CA Evreux Portes de Normandie, la CA Seine Normandie Agglomération, la CA Lisieux Normandie et la CC Inter-Caux-Vexin qui présentent des potentiels supérieurs à 500 GWh.

- Des cartes représentant le potentiel affiné sur nappe, dont le potentiel est supérieur à 200 MWh pour chaque EPCI (Figure 28), avec superposition de la localisation des piscines municipales. Ces cartes sont disponibles dans le dossier nommé « Potentiel sup 200 MWh ».

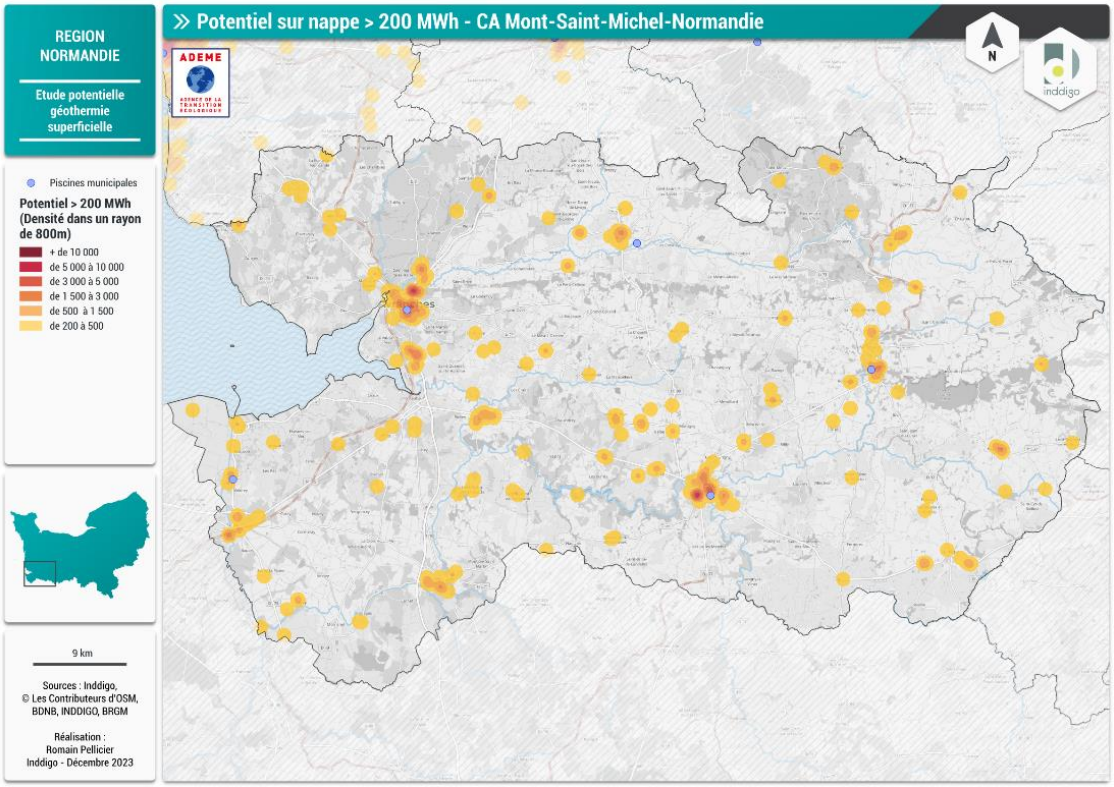


Figure 28 : Exemple de carte du potentiel sur nappe supérieur à 200 MWh du CA Mont-Saint-Michel Normandie, avec la localisation des piscines municipales (points bleus)

Tableau 10 : Potentiel en GWh par EPCI

NOM EPCI	NOM DÉPARTEMENT	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EN GWh
CU Caen la Mer	Calvados	2277,52
CA Lisieux Normandie	Calvados	533,82
CC Intercom de la Vire au Noireau	Calvados	462,68
CC Normandie-Cabourg-Pays d'Auge	Calvados	426,41
CC Cœur Côte Fleurie	Calvados	367,67
CC de Bayeux Intercom	Calvados	259,48
CC Cœur de Nacre	Calvados	225,38
CC Terre d'Auge	Calvados	221,25
CC Pré-Bocage Intercom	Calvados	211,38
CC Isigny-Omaha Intercom	Calvados	187,11
CC Cingal-Suisse Normande	Calvados	185,95
CC Vallées de l'Orne et de l'Odon	Calvados	172,05
CC Seulles Terre et Mer	Calvados	156,15
CC Val ès Dunes	Calvados	152,47
CC du Pays de Falaise	Calvados	142,99

NOM EPCI	NOM DÉPARTEMENT	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EN GWh
CA Evreux Portes de Normandie	Eure	697,04
CA Seine Normandie Agglomération	Eure	557,15
CC Intercom Bernay Terres de Normandie	Eure	401,29
CA Seine-Eure	Eure	391,39
CC Interco Normandie Sud Eure	Eure	273,83
CC du Vexin Normand	Eure	246,93
CC du Pays du Neubourg	Eure	213,23
CC du Pays de Conches	Eure	166,64
CC Lieuvin Pays d'Auge	Eure	162,51
CC Lyons Andelle	Eure	143,63
CC de Pont-Audemer / Val de Risle	Eure	138,43
CC du Pays de Honfleur-Beuzeville	Eure	88,27
CA Agglo du Pays de Dreux	Eure (En partie)	81
CC Roumois Seine	Eure	1,11

NOM EPCI	NOM DÉPARTEMENT	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EN GWh
Métropole Rouen Normandie	Seine-Maritime	2230,08
CU Le Havre Seine Métropole	Seine-Maritime	1040,77
CC Inter-Caux-Vexin	Seine-Maritime	512,94
CA Caux Seine Agglo	Seine-Maritime	419,33
CA de la Région Dieppoise	Seine-Maritime	290,03
CC Terroir de Caux	Seine-Maritime	289,3
CC Caux - Austreberthe	Seine-Maritime	225,47
CA Fécamp Caux Littoral Agglomération	Seine-Maritime	224,52
CC de la Côte d'Albâtre	Seine-Maritime	218,7
CC Yvetot Normandie	Seine-Maritime	212,98
CC des 4 rivières	Seine-Maritime	188,53
CC Plateau de Caux	Seine-Maritime	155,01
CC Communauté Bray-Eawy	Seine-Maritime	121,77
CC Falaises du Talou	Seine-Maritime	117,66
CC des Villes Sœurs	Seine-Maritime	111,95
CC Campagne-de-Caux	Seine-Maritime	100,34
CC interrégionale Aumale - Blangy-sur-Bresle	Seine-Maritime	100,08
CC de Londinières	Seine-Maritime	15,44

NOM EPCI	NOM DÉPARTEMENT	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EN GWh
CA Flers Agglo	Orne	384,77
CU d'Alençon	Orne	265,61
CC Argentan Intercom	Orne	163,16
CC des Pays de L'Aigle	Orne	140,97
CC des Vallées d'Auge et du Merlerault	Orne	135,94
CC Domfront Tinchebray Interco	Orne	132,54
CC du Pays de Mortagne au Perche	Orne	126,73
CC Andaine - Passais	Orne	109,97
CC des Collines du Perche Normand	Orne	99,11
CC des Sources de l'Orne	Orne	74,74
CC des Hauts du Perche	Orne	68,31
CC Cœur du Perche	Orne	56,32
CC de la Vallée de la Haute Sarthe	Orne	44,01
CC du Val d'Orne	Orne	30,02
CC du Pays Fertois et du Bocage Carrougien	Orne	28,16
CC Maine Saosnois	Orne (En partie)	3,29

NOM EPCI	NOM DÉPARTEMENT	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EN GWh
CA du Cotentin	Manche	1422,05
CA Mont-Saint-Michel-Normandie	Manche	845,06
CA Saint-Lô Agglo	Manche	759,47
CC de Granville, Terre et Mer	Manche	490,33
CC Coutances Mer et Bocage	Manche	453,78
CC Côte Ouest Centre Manche	Manche	226,5
CC de la Baie du Cotentin	Manche	220,81
CC de Villedieu Intercom	Manche	122,54

7. Conclusions

L'étude du potentiel géothermique sur le territoire de la Normandie a conduit à analyser et croiser plusieurs critères afin d'estimer le taux de recouvrement à la parcelle des besoins de production de chaleur (Chauffage et ECS) par l'exploitation au moyen de Pompes à Chaleurs (PAC), de ressources géothermiques identifiées.

La géologie distingue fondamentalement l'identité des deux ex-régions Normandes. L'ex-Basse-Normandie appartient essentiellement au Massif Armoricain qui est composé principalement de roches de socle (roches « dures ») alors que l'ex-Haute-Normandie appartient à la séquence nord-ouest du vaste Bassin parisien, majoritairement composé de terrains sédimentaires (roches « meubles »). D'un point de vue hydrogéologique, les deux grands domaines (socle et sédimentaire) composant la région Normandie offrent de nombreuses ressources aquifères (nappe alluviale, nappe du Bajocien-Bathonien, nappe du Lias et du Trias, nappe des sables et faluns, nappe de socle et nappe de la craie). Compte tenu de sa géométrie et de son extension sur le territoire Normand, ainsi que par ses caractéristiques hydrauliques favorables, l'aquifère de la craie constitue la principale ressource (nappe), principalement présent sur le territoire de l'ex-Haute-Normandie.

Sur la base de l'analyse des données du sous-sol du territoire, des cartes de favorabilité ont été produites offrant ainsi une lecture immédiate de l'intérêt et de la possibilité éventuelle d'utiliser une ressource en fonction des deux technologies considérées (nappe et sondes). Il est important de souligner que les cartes de favorabilité restituées à l'échelle régionale ne garantissent pas la présence absolue ni la viabilité des ressources géothermiques dans une zone locale donnée. En effet, ces cartes sont issues de synthèses de paramètres du sous-sol (disponibles) traduisant la capacité du milieu à mobiliser la ressource géothermique (comme par exemple la conductivité thermique ou le débit) et n'intègrent pas à ce stade les contraintes réglementaires. Ces cartes offrent une lecture directe de la favorabilité du sous-sol de la région et mettent en avant la très bonne favorabilité du territoire au développement de la géothermie de surface (GMI). En complément, les implications des différentes réglementations (s'appliquant sur le territoire) sur le déploiement de la géothermie ont été analysées, puis intégrées dans la méthodologie suivante d'estimation du potentiel.

Dans un second temps, une méthodologie a été mise en œuvre afin d'estimer l'adéquation entre les ressources géothermales identifiées sur le territoire Normand et les besoins énergétiques en surface. L'estimation des besoins réalisée à l'échelle de la parcelle par Inddigo montre qu'à l'échelle du territoire Normand, la consommation actuelle en énergie thermique (chauffage et eau chaude sanitaire) équivaut à un besoin de l'ordre de 75,6 TWh/a, avec un besoin en chauffage de 66,7 TWh/a et d'ECS de 8,9 TWh/a. L'estimation du potentiel brut de la géothermie de surface (croisement besoins – ressources) à l'échelle de la Région, serait de 57,8 TWh/a couvrable par des pompes à chaleur géothermiques sur sondes verticales, soit environ 79 % des besoins de chauffage et ECS. Afin de s'approcher d'un potentiel plus "réaliste" et prioritaire, ce potentiel a ensuite été affiné par l'intégration de différentes contraintes (système de chauffage actuel, proximité d'un réseau de chaleur, année de construction du bâtiment, ...) ce qui résulte en une estimation de 22.5 TWh/a qui pourrait être couverte par la géothermie de surface (sondes et nappe), soit environ 30% des besoins globaux. Au sein de cette estimation globale et en lien avec la méthodologie employée et les critères définis, le potentiel sur nappe serait de 0.18 TWh/a. Il convient de rappeler que la contribution moindre des aquifères est en partie liée au critère seuil utilisé (150 MWh/a) et qu'une fraction du potentiel estimé couvrable par les sondes géothermiques verticales pourra être couverte par des installations sur doublet, le choix final de la solution restant soumis à avis d'expert en géothermie et fonction des spécificités du projet et de sa localisation.

Enfin, sur la base des estimations du potentiel affiné à la parcelle, des cartes présentant le potentiel à l'échelle de chacun des EPCI Normands ont été produites. La synthèse du potentiel à cette échelle des EPCIs Normands montre notamment que les plus forts potentiels (potentiel supérieur à 1500 GWh) correspondent à la Métropole de Rouen Normandie et la CU Caen la Mer. Ces plus forts potentiels sont suivis par les EPCI de la CA du Cotentin, la CU Le Havre Seine Métropole, la CA Mont-Saint-Michel-Normandie, la CA Saint-Lô Agglo, la CA Evreux Portes de Normandie, la CA Seine Normandie Agglomération, la CA Lisieux Normandie et la CC Inter-Caux-Vexin qui présentent des potentiels supérieurs à 500 GWh. A l'échelle des départements, on pourra noter que le plus fort potentiel est présent sur le département de la Seine-Maritime et que le plus faible correspond à celui du département de l'Orne.

En complément, des cartes à l'échelle des communautés de communes représentant le potentiel affiné sur nappe, permettent de mettre en avant les bâtiments ayant des grands besoins (> 200 MWh) et pouvant être couverts par la technologie sur nappe. Une attention particulière est donnée aux piscines municipales (par l'affichage de leur localisation) pour lesquelles la géothermie sur nappe est particulièrement adaptée.

L'objectif d'une carte de potentiel géothermique à l'échelle d'un EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale) est de fournir une vision globale du potentiel géothermique présent sur le territoire. Cette carte vise donc à donner une représentation directe du potentiel de développement en GWh que pourrait représenter la filière géothermie très basse énergie à l'échelle de chaque EPCI. En utilisant ces cartes, les décideurs locaux peuvent évaluer le potentiel de développement de la géothermie sur leur territoire et ainsi prendre des décisions éclairées en matière d'aménagement du territoire et de transition énergétique.

Il est important de souligner que les cartes de potentiel géothermique ne garantissent pas localement la présence absolue ni la viabilité des ressources géothermiques dans les territoires. Elles fournissent plutôt une évaluation préliminaire basée sur des synthèses de données disponibles (sous-sol et surface) ainsi que sur les hypothèses utilisées dans l'analyse. Bien qu'elles offrent une première évaluation du potentiel géothermique dans la région Normandie, ces cartes doivent être considérées comme un outil de diagnostic préliminaire. Il est primordial de comprendre que des études de préfaisabilité géothermique plus approfondies sont nécessaires pour évaluer de manière exhaustive la faisabilité technique, économique et environnementale de chaque projet géothermique spécifique. Ces études devraient comprendre une analyse détaillée du contexte local, des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques, ainsi que des besoins énergétiques spécifiques de la zone ciblée. Par conséquent, il est essentiel de consulter des experts en géothermie et de mener des études de terrain approfondies avant de prendre toute décision concernant le développement d'un projet géothermique. Ces études permettront d'identifier les éventuelles contraintes, de définir les technologies appropriées et d'évaluer la viabilité du projet.

8. Bibliographie

Baudouin, V., Hameau, S., Durendeau, 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.

Freslon M. (2005). Ressources et alimentation en eau potable dans le département de la Manche – Evolution depuis 25 ans

Freslon M., Brajon C. (2000). Programme départemental 2000-2002 de recherches hydrogéologiques sur le Trias - Phase 1 : Etude de synthèse préalable sur les formations aquifères du Trias dans le département de la Manche. DDAF

Freslon M., Chauviere O. (2001). Programme départemental 2000-2002 de recherches hydrogéologiques sur le Trias - Phase 2 : Synthèse des premières études et prospections effectuées au cours des années 2000-2001. DDAF

Freslon M., Laurent A. et Orange A. (2017). Recherches d'eau en terrain de socle et en bassins sédimentaires : des résultats contrastés et un atout pour le département de la Manche en matière de développement et de connaissance. Article de Géologues

Freslon M., Loyant D., Lepetit S. et Ghyselen P. (2005). Etude hydrogéologique de la basse vallée de l'Ay (région de Lessay) - Programme départemental 1995-1998. DDAF

Idée E., Jallais N., Boisson A., Neveux A. avec la collaboration de Gresselin F., Dugué O. (2019) - Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne, Volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-69331-FR, 258p., 122 ill., 20 tabl., 3 ann.

N. Jallais, P.-Y. David, D. Pennequin (BRGM), M. Hamel (SDEAU 50) (2019) – Etat des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines du département de la Manche. Rapport final. BRGM/RP-69128-FR, 159 p., 92 ill., 2 ann.

Laurent A., N'Gom M. et Dugue O. (2014). Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux - Partie 1 Exploitation des données existantes. Rapport final. BRGM/RP-62855-FR.

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.

MOUGIN B., BRANELLEC M., DAVID P-Y., ZAMMIT C., BOURGINE B. (2011) - Atlas hydrogéologique régional de Haute- Normandie - Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux - Rapport final - BRGM/RP-59301-FR- 102 p., 51 ill., 2 ann., 1 CD

Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffe R., Tourlière B. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet relatif aux aquifères de socle. Rapport BRGM/RP-55671-FR, 78 p,., 33 illustrations, 2 annexes.

Poignant L. (2015). Synthèse géologique et hydrogéologique du Sud-Manche. SDeau50

Vernoux J.F., Deroin J.P., Lebret P., Petit V. et Siegel P. (2000). Ressources en eau souterraine de l'Isthme du Cotentin - Synthèse des connaissances, rapport BRGM R40824, 136 pages, 71 figures, 17 tableaux, 12 annexes

Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M., Bourgine B., Croiset N., Marchard de Gramont H., Pannet P., Tourlière B., Dugué O., (2013) - Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dive. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP-62002-FR. 178 oages, 84 ill., 35 tab., 24 annexes.

Wyns R., Baltassat J., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., Mathieu F. (2004). Application of proton magnetic resonance sounding to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bulletin de la société géologique de France 175, 21-34.

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

BRGM
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr