

Document confidentiel



Atlas du potentiel géothermique très basse énergie du Grand Besançon

Rapport Final

BRGM/RP-67001-FR

Juin 2017



région **BOURGOGNE**
FRANCHE-COMTÉ



Atlas du potentiel géothermique très basse énergie du Grand Besançon

Rapport Final

BRGM/RP-67001-FR

Juin 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets) de Service public du BRGM

C. Doney, V. Malassigné

Vérificateur :

Nom : P. DURST

Fonction : Ingénieur

Date : 26/06/17

Signature :



Approbateur :

Nom : A. SAADA

Fonction Directeur BRGM BFC

Date : 26/06/17

Signature :



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



région **BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ**



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Géothermie basse énergie, aquifère, nappe, forage, productivité, température, piézométrie, géologie, sonde verticale, doublet géothermique, forage, potentiel géothermique, Franche-Comté, Doubs, Grand Besançon.

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

Doney C., Malassigné V. (2017) – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie du Grand Besançon. Rapport final. BRGM/RP-67001-FR, 83 p., 46 ill., 1 ann., CD.

Synthèse

Elaboration d'un atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères et du sous-sol de l'agglomération de Besançon est né de la réflexion entre le Grand Besançon et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) sur le besoin de mettre à disposition du public des données sur les ressources géothermales de l'agglomération. Ce projet a été financé par le Grand Besançon avec l'aide de la région Bourgogne/Franche-Comté, des fonds FEDER et par le financement du BRGM sur ses crédits de Service Public dans le cadre d'une convention en date du 8 septembre 2015.

La détermination du potentiel géothermique très basse énergie de ce territoire a été mise en œuvre avec deux approches multicritères menées en parallèle :

- la première vise à évaluer le potentiel géothermique très basse énergie des aquifères superficiels avec un système de pompe à chaleur sur nappe, appelé circuit ouvert, (dans notre cas seule la nappe des alluvions des cours d'eau a été étudiée) pour une tranche de profondeur comprise entre 0 et 15 m ;
- la seconde permet d'évaluer le potentiel géothermique des formations géologiques (hors secteurs d'aquifères superficiels) avec un système de pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales, appelé circuit fermé, pour une tranche de profondeur comprise entre 0 et 200 m.

Les paramètres pris en compte pour l'analyse multicritères sur les aquifères superficiels concernent la profondeur d'accès à la ressource, la productivité et la température de l'aquifère. Dans le cadre de ce projet, seule les nappes s'écoulant dans les aquifères alluvionnaires ont été prises en compte. D'autres aquifères existent dans la zone d'étude mais ceux-ci sont majoritairement calcaires. Ces aquifères ont un comportement hydraulique très hétérogènes, dépendant de la fracturation de la roche, des réseaux karstiques, etc, rendant très difficile l'analyse du potentiel géothermique dans ce milieu.

En raison du nombre restreint de données de base et de leur forte variabilité, l'approche statistique ou par sectorisation a quasi-systématiquement été privilégiée. L'étude montre que le potentiel géothermique sur aquifère est favorable sur l'ensemble de la zone étudiée.

Les paramètres pris en compte pour évaluer le potentiel géothermique par sondes verticales, sont la nature, l'épaisseur des formations géologiques et la puissance exploitable de celles-ci. Cinq classes de potentialité géothermique ont ainsi été définies, exprimées ici en pourcentage de couverture du territoire du Grand Besançon :

Tranche 0 – 50 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- **Favorable : 36 % du territoire ;**
- **De Favorable à Modérément Favorable : 56 % du territoire ;**
- **Modérément favorable : 8 % du territoire ;**
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Tranche 50 – 100 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- **Favorable : 23 % du territoire ;**
- **De Favorable à Modérément Favorable : 67 % du territoire ;**
- Modérément favorable : 0 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Tranche 100 – 200 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- Favorable : 0 % du territoire ;
- **De Favorable à Modérément Favorable : 100 % du territoire ;**
- Modérément favorable : 0 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Les résultats du potentiel géothermique des aquifères et du potentiel du sous-sol avec sondes géothermiques ont été intégrés dans une même couche d'information géographique (SIG), en privilégiant les informations sur les aquifères superficiels (hors aquifères karstiques). Elle permet à l'utilisateur de connaître le potentiel géothermique des aquifères superficiels ou du sous-sol sur des mailles couvrant l'agglomération de Besançon.

L'atlas étant constitué de cartes, une attention particulière a été apportée lors de la réalisation de la cartographie des paramètres considérés, en veillant à suivre une démarche cohérente, adaptée à la disponibilité et la distribution des données. Toutefois, les résultats obtenus sont indicatifs, en raison de la faible densité des données de base et de la perte de précision liée à la spatialisation et aux traitements de ces données.

Cet atlas constitue ainsi une première approche à destination des maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les informations transmises ne peuvent et ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire qui permettra d'obtenir des gammes de puissance plus précises.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Présentation de la géothermie très basse énergie.....	13
2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE	13
2.2. DIFFERENTES RESSOURCES GEOTHERMALES	13
2.3. DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE	14
2.3.1. Géothermie moyenne et haute énergie	14
2.3.2. Géothermie basse énergie	15
2.3.3. Géothermie très basse énergie	15
2.4. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE	15
2.4.1. Echange direct de chaleur	15
2.4.2. Pompe à chaleur (PAC) - Principes de fonctionnement	19
2.5. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE	20
2.5.1. Pompe à chaleur sur aquifère	20
2.5.2. Pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales	22
2.6. PRINCIPAUX MECANISMES D'ACCOMPAGNEMENT ET PROCEDURES INCITATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE	24
2.6.1. Garanties AQUAPAC®	24
2.6.2. Démarche qualité pour les sondes géothermiques verticales : Qualiforage	24
2.6.3. Les aides financières	25
2.7. REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE	26
2.7.1. Contexte réglementaire	26
2.7.2. Cartes nationale des risques liés à la géothermie	29
3. La géothermie dans le grand Besançon	31
3.1. LES ZONES ETUDIEES DANS LE CADRE DE L'ATLAS DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DE TRES BASSE ENERGIE.....	31
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU GRAND BESANÇON	32
3.2.1. Contexte géologique	32
3.2.2. Contexte hydrogéologique	39
4. Conception de l'atlas du potentiel géothermique	42
4.1. METHODOLOGIE GENERALE	42
4.1.1. Les étapes de réalisation de l'atlas du potentiel géothermique sur aquifère	43

4.2. GEOTHERMIE SUR NAPPE	48
4.2.1. Critères de potentialité géothermique des aquifères	49
4.2.2. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique sur aquifère 51	
4.2.3. Bilan de la classification et de l'indexation des critères	65
4.2.4. Cartes du potentiel géothermique des aquifères.....	66
4.2.5.4 Limites de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères	67
4.3. GEOTHERMIE SUR SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES.....	68
4.3.1. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique	69
4.3.2. Potentiel géothermique du sous-sol.....	73
4.3.3. Carte du potentiel géothermique sur sonde verticale	74
4.3.4. Cartes des aléas	77
4.3.5. Limites de l'atlas du potentiel géothermique sur sondes verticales	79
5. Conclusion	81
6. Bibliographie.....	83

Liste des figures

Illustration 1 : Les différents types de géothermie	14
Illustration 2 : Principe de l'échange direct de chaleur.	16
Illustration 3 : Dispositifs de pompage	17
Illustration 4 : Doublets géothermiques avec différentes technologies de forage.	18
Illustration 5 : Evolution du COPréel en fonction de la température d'évaporation (T_e) et de la température de condensation à la source chaude (T_c)	20
Illustration 6 : Schémas de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe.....	21
Illustration 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques	23
Illustration 8 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques.....	24
Illustration 9 : Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie de très basse énergie (sce : MEDDE)	28
Illustration 10 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance dans le grand Besançon. © BRGM.....	29
Illustration 11 : Présentation de l'agglomération du Grand Besançon	31
Illustration 12 : Présentation géologique générale du Grand Besançon, sur fond de carte géologique harmonisée (1/50000 ^{ème})	33
Illustration 13 : Colonne stratigraphique de l'agglomération de Besançon (Source : Jura Bisontin, Reliefs, Paysages et Roches. Pierre Chauve et Patrick Rolin, 2015)	38
Illustration 14 : Fonctionnement hydrogéologique type de la vallée du Doubs au droit de la zone d'étude. Relations hydrodynamiques entre la rivière, la nappe alluviale et la nappe du versant (Extrait du rapport BRGM R 35673 FRC 4S 92).....	40

Illustration 15 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)	44
Illustration 16 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)	45
Illustration 17 : Principe de la cartographie multicritères	47
Illustration 18 : Localisations des différentes nappes alluviales de l'agglomération du grand Besançon	49
Illustration 19 – Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional	50
Illustration 20 : schéma explicitant les différents régimes de nappe (source BRGM)	51
Illustration 21 : localisation de la données ponctuelle concernant la profondeur d'accès aux nappes alluviales	52
Illustration 22 : Tableau explicatif présentant les données disponibles par nappe alluviale	53
Illustration 23 : Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte	53
Illustration 24 : Carte de la spatialisation des profondeur des nappes alluviales de l'agglomération du Grand Besançon	54
Illustration 25 : Carte de la répartition de la données ponctuelle relative à la productivité des nappes alluviales	56
Illustration 26 : Classes de productivités prises en compte	57
Illustration 27 : Carte de la spatialisation du paramètre productivité des nappes de l'agglomération du Grand Besançon	58
Illustration 28 : Répartition géographique de la données ponctuelle concernant la température de la ressource en eau	59
Illustration 29 : Classes de températures d'aquifère prises en compte	60
Illustration 30 : Graphique présentant les chroniques de températures relevées par 4 stations le long du Doubs, année par année et mois par mois	62
Illustration 31 : Graphique présentant l'ensemble des chroniques de température des 4 stations sélectionnées, de 1987 à 2016	63
Illustration 32 : Carte de la spatialisation du paramètre température de la ressource en eau	64
Illustration 33 : Classification et indexation des critères de potentialité géothermique	65
Illustration 34 : Carte du potentiel géothermique sur nappe de l'agglomération du Grand Besançon	66
Illustration 35 : Tableau récapitulatif des lithologies dominantes sur les tranches de profondeur 0-50m, 50-100 m et 100-200m des forages de la BSS de plus de 20 m présents sur les zones d'études	70
Illustration 36 : Répartition des différents logs en fonction de la profondeur de lithologie renseignée	70
Illustration 37 : Répartition de la donnée ponctuelle des logs géologiques, avec l'épaisseur de lithologie renseignée	71
Illustration 38 : Liens entre les puissances spécifiques et les notes appliquées dans chaque cellule, et affectation de notes à différents types de roches, d'après les puissances spécifiques qui leur sont attribuées dans la littérature	72
Illustration 39 : Présentation de la géologie (lithologie et stratigraphie) de l'agglomération du Grand Besançon	73
Illustration 40 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 0 à 50 mètres	74

Illustration 41 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 50 à 100 mètres	75
Illustration 42 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 100 à 200 mètres	75
Illustration 43 : Tableau récapitulatif du potentiel géothermique en fonction des lithologies dominantes présentes sur la zone étudiée	76
Illustration 44 : Localisation des différentes cavités souterraines recensées sur le territoire du Grand Besançon	77
Illustration 45 : Localisation des zones à "risque" évaporitique, avec la localisation des logs géologiques où l'on a trouvé la présence d'évaporite (avec la profondeur indiquée)	78

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des entités BD Lisa concernées par l'atlas du potentiel géothermique sur nappe	84
Annexe 2 Cartes du potentiel géothermique régional sur aquifère	86
Annexe 3 Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 0 à 50 mètres de profondeur	88
Annexe 4 Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 50 à 100 mètres de profondeur	90
Annexe 5 Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 100 à 200 mètres de profondeur.....	92

1. Introduction

La production de chaleur d'origine géothermique peut provenir de différents types de ressources en fonction de la profondeur et de la température exploitée.

L'énergie contenue dans les couches superficielles du sous-sol, que ce soit dans les terrains eux-mêmes, les nappes alluviales ou les aquifères peu profonds, peut ainsi être exploitée dans des conditions très intéressantes grâce à la mise en œuvre des pompes à chaleur (PAC), systèmes thermodynamiques qui permettent d'obtenir une température compatible avec les besoins de locaux à chauffer.

L'objet du présent projet est d'évaluer les potentialités que représentent les ressources géothermiques superficielles, situées à une profondeur inférieure à 200 m. On parle alors de géothermie très basse énergie. Ce projet fait l'objet d'une convention entre le Grand Besançon et le BRGM Bourgogne-Franche-Comté.

Il s'agit ainsi de caractériser les possibilités en géothermie très basse énergie sur le territoire de l'agglomération du Grand Besançon. Cette caractérisation porte en priorité sur l'énergie contenue dans les aquifères alluviaux (on parle de potentiel géothermique des aquifères) et d'autre part sur l'énergie contenue directement dans le sous-sol exploitable grâce à l'utilisation de sondes géothermiques verticales.

L'atlas comprend un système d'information géographique (SIG) mis en ligne via le site Internet du Grand Besançon et celui spécifique à la géothermie www.geothermie-perspectives.fr.

Cet atlas s'inscrit comme un outil d'aide à la décision, en première approche, destiné au grand public, maîtres d'œuvres (bureaux d'études, architectes) et maîtres d'ouvrages afin qu'ils puissent envisager une solution géothermique lors d'un choix énergétique. **Les informations présentées revêtent un caractère indicatif, la détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessite une étude de faisabilité qui sera confiée par le maître d'ouvrage à un bureau d'études spécialisé.**

Le présent rapport détail la méthodologie employée pour élaborer cet atlas. Il explicite également les différentes techniques d'exploitation géothermique existant, les principaux mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives liées à la géothermie, ainsi qu'un volet concernant la réglementation.

2. Présentation de la géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est inférieure à 30°C. A cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée par un simple échangeur de chaleur, et nécessite donc la mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) qui prélève l'énergie de la source de chaleur à basse température (roche, nappe aquifère) pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage.

La ressource géothermique de très basse énergie correspond à l'énergie naturellement présente dans le proche sous-sol, ou dans les aquifères peu profonds.

2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE

La géothermie se définit comme l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre et ayant pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes. L'énergie géothermique est présente partout à la surface du globe ; elle se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de 3,3°C par 100 m à l'échelle de la Terre. Des variations locales de gradient géothermiques sont néanmoins observées ; elles sont reliées à l'âge des formations géologiques à leur composition et au contexte géologique local.

L'énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation, le rafraîchissement, ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies. La possibilité de mettre en œuvre chacune de ces technologies dépend du contexte géologique et hydrogéologique.

2.2. DIFFERENTES RESSOURCES GEOTHERMALES

Dans le cas de l'utilisation de géothermie pour la production de chaleur, un système géothermal est constitué d'une source de chaleur, associée à un dispositif de prélèvement de chaleur permettant son transfert pour utilisation. La source de chaleur est caractérisée, d'une part par son niveau de température (en °C) et par la nature et les caractéristiques du milieu concerné.

La température dépend de la profondeur et du gradient local. En ce qui concerne le milieu souterrain où l'on envisage de prélever de la chaleur, il peut être constitué de roches perméables ou imperméables, compactes, poreuses, fissurées ou karstifiées.

Lorsque les formations géologiques sont suffisamment poreuses et/ou fissurées et gorgées d'eau, elles sont dites « aquifères » ou « nappes d'eau souterraine » ou désignées comme « réservoirs ». Les caractéristiques physiques de ces aquifères permettent le prélèvement de l'eau en quantité suffisante par captage.

Les formations aquifères se rencontrent dans des couches géologiques sédimentaires (craie, calcaire, sable, ...), cristallines ou volcaniques.

Sont distingués ensuite les aquifères superficiels des aquifères profonds. Les aquifères profonds se trouvent, dans les bassins sédimentaires, au-delà d'une centaine de mètres et peuvent atteindre pour certains, des profondeurs dépassant 2 000 m.

Les principaux bassins sédimentaires français sont le Bassin parisien et le Bassin aquitain mais on trouve également d'autres bassins ou fossés d'effondrement de taille plus modeste : Alsace, Couloir rhodanien, Bresse, Limagne, Hainaut, etc.

2.3. DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE

On distingue généralement : la géothermie très basse énergie, la géothermie basse énergie, la géothermie moyenne énergie, et la géothermie haute énergie.

La figure ci-dessous illustre ces différentes géothermies.

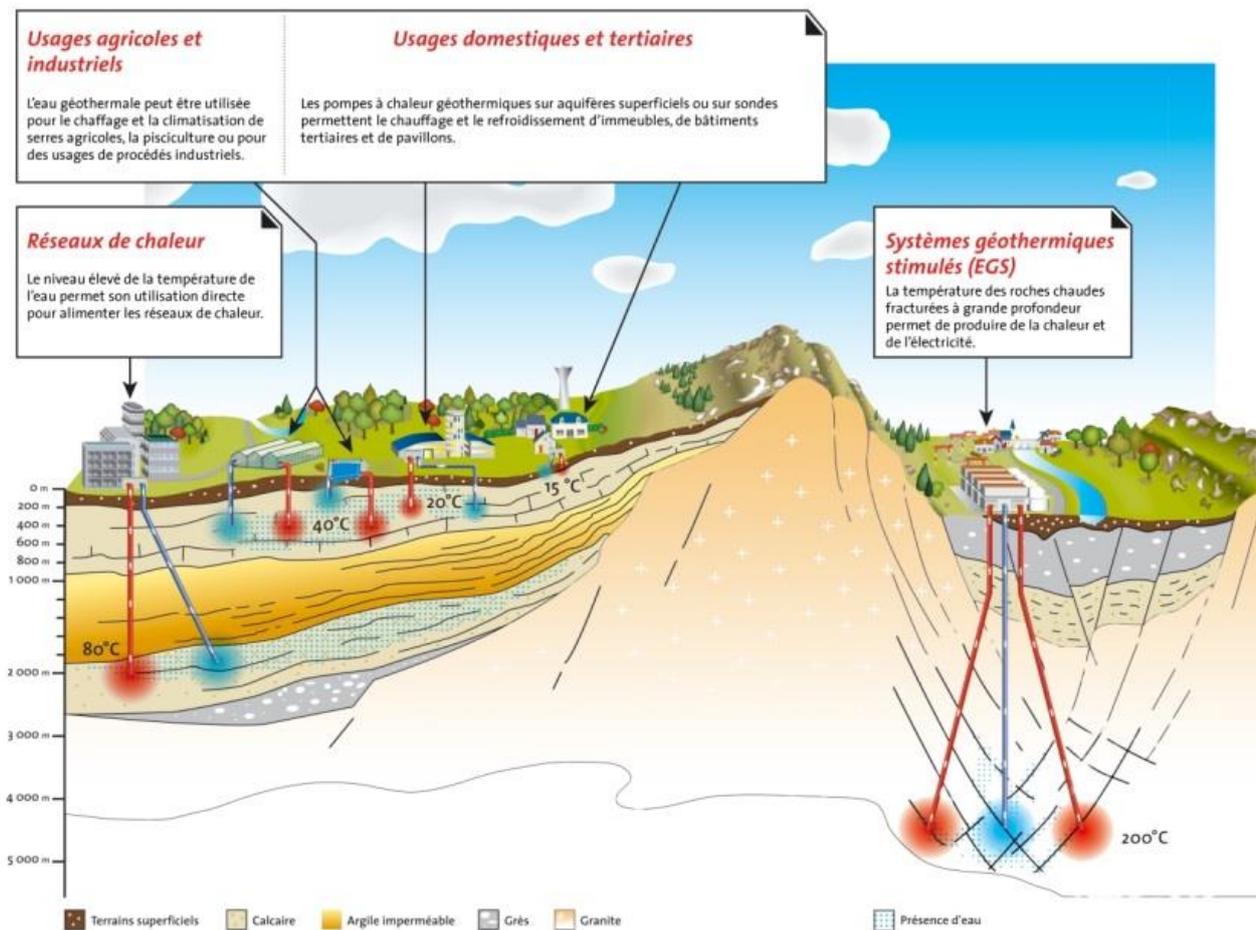


Illustration 1 : Les différents types de géothermie (jusqu'à 200 °C)

2.3.1. Géothermie moyenne et haute énergie

Ces types d'énergie géothermique correspondent à l'utilisation des ressources thermiques (eau et vapeur) dont la température est comprise entre 90 et 150°C (moyenne énergie) ou supérieure à 150°C (haute énergie). Ces ressources sont utilisées directement ou indirectement

pour la production d'électricité et sont localisées à proximité des grands arcs volcaniques ou des zones à fort gradient thermique.

Du fait de son contexte géologique, le Grand Besançon n'est pas concerné par ces types de géothermie, le gradient géothermique y étant égal au gradient moyen soit 3,3°C pour 100 m. En effet pour ce gradient, il faut descendre au-delà de 3000 m de profondeur pour espérer atteindre une température de 100°C.

2.3.2. Géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est comprise entre 30 et 90°C. Ces ressources sont exploitables de plusieurs manières, en fonction de la température de la ressource : soit par échange direct de chaleur, soit par l'intermédiaire d'une **Pompe à Chaleur (PAC)**.

Ce type d'énergie géothermique est surtout localisé dans les bassins sédimentaires tels le bassin parisien ou le bassin aquitain, en présence d'un aquifère offrant une perméabilité satisfaisante et une température acceptable.

2.3.3. Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est inférieure à 30°C. A cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée par un simple échangeur de chaleur, et nécessite donc la mise en place d'une pompe à chaleur (PAC). qui prélève l'énergie de la source de chaleur à basse température (roche, nappe aquifère) pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage.

La ressource géothermique de très basse énergie correspond à l'énergie naturellement présente dans le proche sous-sol, ou dans les aquifères peu profonds.

2.4. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE

Selon la température de la ressource et l'existence ou pas d'un aquifère au droit du site visé, plusieurs technologies d'exploitation sont envisageables : les technologies par échange de chaleur direct ou assistées par PAC, par prélèvement sur nappes ou par échange sur sous-sol.

Pour les dispositifs équipés de PAC, selon les besoins, il est possible de fournir du chaud, du froid ou les deux alternativement ou simultanément.

Enfin, quelle que soit la technologie utilisée pour produire de la chaleur ou du rafraîchissement, les dispositifs terminaux doivent être compatibles avec le niveau de température de la chaleur fournie.

2.4.1. Echange direct de chaleur

Les installations fonctionnant par échange direct de chaleur utilisent les eaux géothermales et s'intéressent donc aux nappes d'eau souterraine dont la température est naturellement élevée (géothermie basse énergie).

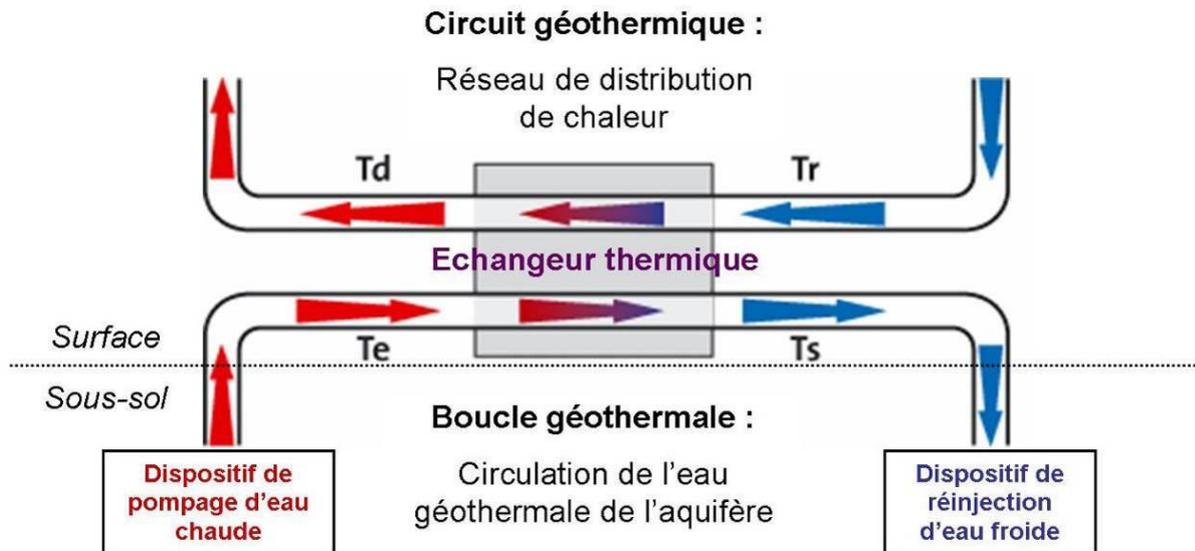


Illustration 2 : Principe de l'échange direct de chaleur.

L'eau géothermale est prélevée dans l'aquifère au niveau d'un forage de prélèvement ou **puits de production**, puis elle circule jusqu'à un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur depuis l'eau prélevée vers le « circuit géothermique ». L'eau géothermale refroidie est ensuite renvoyée dans l'aquifère d'origine par le biais d'un second forage dit **puits d'injection**.

Le chemin suivi par l'eau géothermale depuis son prélèvement jusqu'à sa réinjection constitue la « **boucle géothermale** ». Ce fonctionnement comprenant un puits de prélèvement et un puits d'injection est appelé « doublet géothermique ».

Le « circuit géothermique » correspond au réseau de distribution de la chaleur ; il permet l'approvisionnement en chaleur des utilisateurs.

Les installations de ce type nécessitent donc la création de forages. Ceux-ci doivent être réalisés selon les règles de l'art (norme AFNOR expérimentale NF X10-999 et fascicule FD X10-980) afin d'assurer une durée de vie correcte à l'installation et d'éviter tout risque de dégradation de la ressource en eau souterraine.

a) Dispositif de pompage

Pour fonctionner, ce type d'installation géothermique doit bénéficier d'un débit d'eau régulier et suffisant. Dans certains cas, si la pression de l'eau contenue dans le réservoir est supérieure à la pression atmosphérique, le débit est *artésien* et peut se suffire à lui-même. Dans le cas contraire, pour exploiter un débit supérieur au débit artésien, il est alors nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage.

Les pompes comportent toutes une partie hydraulique immergée descendue en profondeur (de 100 à 400 m de profondeur selon le rabattement appliqué à la nappe) et un moteur. On distingue généralement trois types de pompes selon l'emplacement du moteur :

- Pompes immergées : le moteur est immergé sous le dispositif hydraulique ;
- Pompes à arbre long : le moteur est placé en surface ;
- Turbopompe : ce système fonctionne grâce à une circulation d'eau géothermale surpressée en surface, il présente un rendement inférieur aux deux autres types de pompes mais une durée de vie supérieure aux pompes immergées.

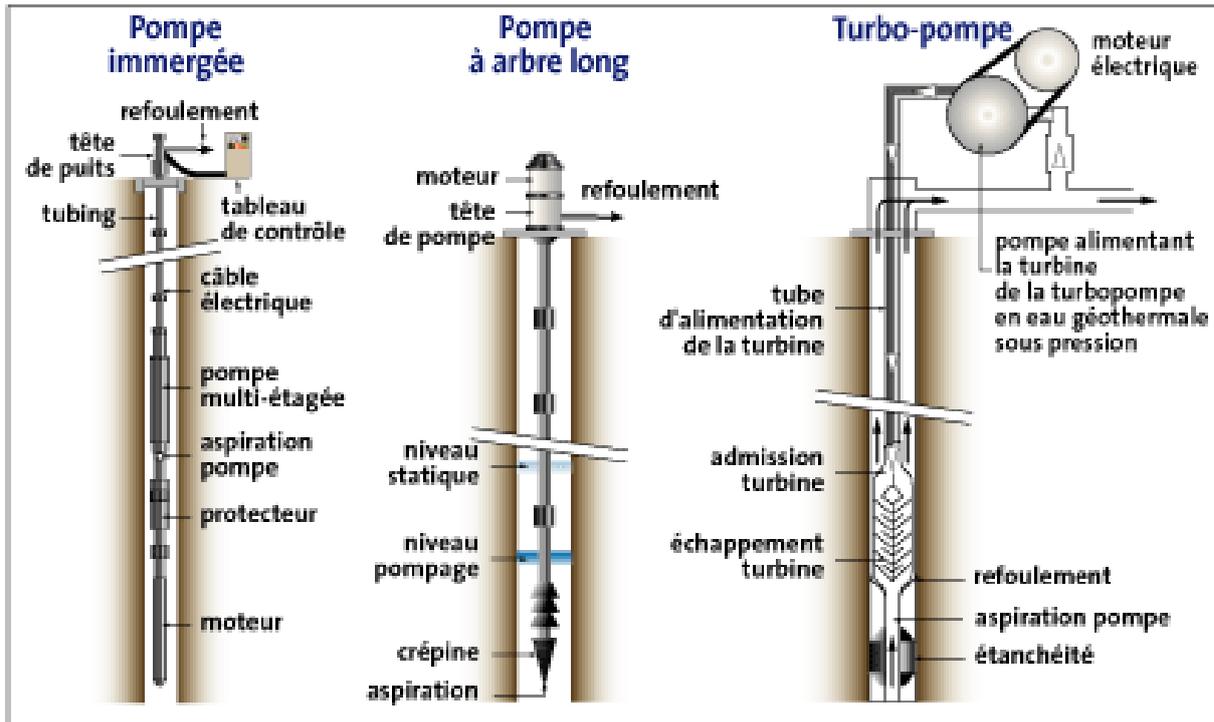


Illustration 3 : Dispositifs de pompage

La *colonne d'exhaure* amène ensuite l'eau de la pompe à la surface du sol où elle est reprise par d'autres canalisations jusqu'à l'échangeur de chaleur. Les pompes immergées sont largement utilisées dans le bassin parisien pour pomper la nappe du Dogger. Elles permettent d'obtenir des débits importants supérieurs à 300 m³/h.

b) Les échangeurs de chaleur

Dans le cas d'une installation géothermique de basse énergie, un échangeur de chaleur est placé entre la « boucle géothermale » et le « circuit géothermique » de distribution de chaleur. L'eau chaude issue de l'aquifère, chargée de sels minéraux, circule alors uniquement dans la « boucle géothermale ». Les eaux géothermales étant généralement corrosives, ce fonctionnement permet d'éviter la corrosion du réseau de chaleur. Les échangeurs peuvent être de types différents : échangeurs multitubulaires, échangeurs spirales, échangeurs à plaques. Les échangeurs à plaques, plus performants et plus commodes pour la maintenance, sont les plus utilisés.

La performance d'un échangeur placé dans une installation de géothermie est caractérisée par l'écart entre les températures à l'entrée de la boucle géothermale (T_e) et à la sortie du circuit géothermique (T_d) (cf. Illustration 2). Cet écart appelé « pincement », doit être aussi faible que possible (de l'ordre de 2°C).

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques de faible épaisseur, assemblées verticalement les unes à la suite des autres. Les espaces entre les plaques sont alternativement traversés par le circuit primaire (eau géothermale) et par le circuit secondaire (circuit géothermique). Ces échangeurs permettent d'avoir une surface d'échange importante pour un espace réduit. Ils peuvent être agrandis en ajoutant le nombre de plaques nécessaires. Les matériaux utilisés dans les échangeurs doivent pouvoir résister à la corrosion inhérente à la majorité des fluides géothermaux. Ils peuvent être constitués en acier revêtu, en acier

inoxydable ou en titane. Ce dernier matériau s'est révélé particulièrement adapté aux exigences d'exploitation du fluide du Dogger du bassin parisien chargé notamment en sulfures.

c) Réinjection

Pour des raisons de protection quantitative de la ressource en eau souterraine, il est recommandé de pratiquer la réinjection de l'eau géothermale refroidie (à la température T_s) dans l'aquifère d'origine. Cette technique permet de maintenir les pressions au sein du réservoir aquifère. Aussi, les dispositifs de pompage sans réinjection ne seront pas évoqués dans le présent rapport.

Sur le plan thermique, ce dispositif entraîne la création d'une zone froide d'extension progressivement croissante autour du forage d'injection. Le doublet doit donc être dimensionné de façon à ce que le front froid n'atteigne pas le puits de production avant amortissement de celui-ci (20 à 30 ans) et ne perturbe pas les exploitations voisines. Il s'agit de gérer durablement la ressource et son exploitation.

Le dimensionnement de ces dispositifs est basé sur une bonne connaissance du contexte hydrogéologique. Le risque de recyclage thermique, la distance à respecter entre les puits (de production, d'injection et d'autres usages) et le temps de percée thermique du doublet (temps nécessaire à la contamination thermique du puits de production par l'eau injectée dans le puits d'injection) doivent être évalués lors de l'étude de dimensionnement des installations.

Ces considérations spatiales, associées à l'obligation de respect des périmètres de protection autour des puits de prélèvement et de réinjection, peuvent avoir des impacts fonciers importants, qui ne sont pas toujours acceptables, surtout en contexte urbain. Dans de telles situations, le recours à des technologies de forage particulières, comme les forages inclinés ou déviés, peut pallier au manque d'espace disponible en surface. En effet, ceux-ci permettent un écartement important entre les puits de production et d'injection, tout en limitant l'impact foncier en surface.

Les forages déviés ne sont envisageables que pour les aquifères profonds. Pour les aquifères supérieurs, la déviation ne conduirait pas à un écartement suffisant des points de prélèvement et de réinjection.

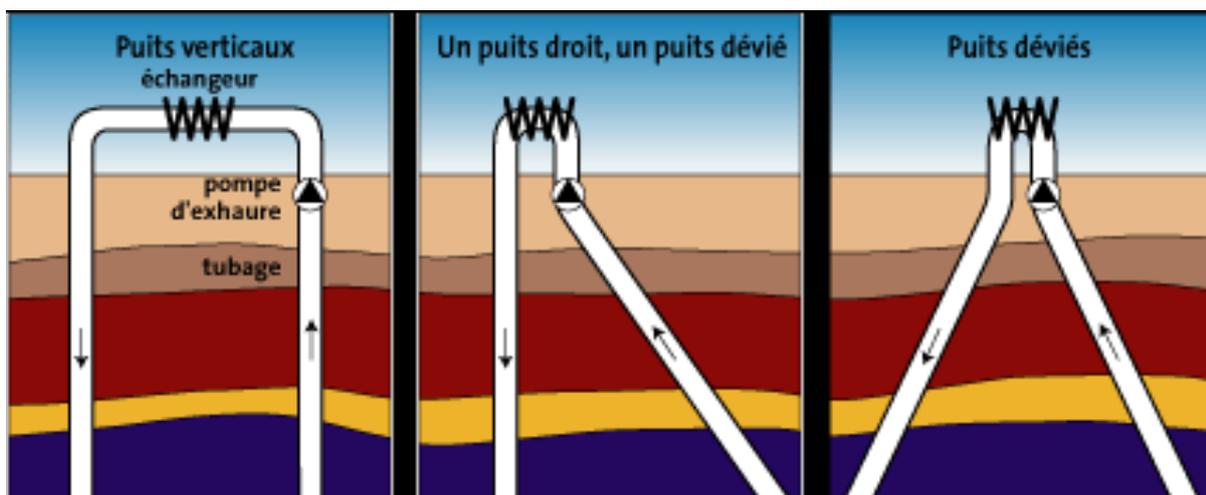


Illustration 4 : Doublets géothermiques avec différentes technologies de forage.

Dans le cas où l'aquifère pourrait présenter des eaux de qualité suffisante pour être une ressource en eau potable, il est possible d'envisager un système de pompage géothermique en doublet fonctionnant toute l'année et couplé à un système d'Alimentation en Eau Potable (AEP) utilisé seulement en cas de nécessité (réserve de secours). Des mesures de précaution seront alors nécessaires.

2.4.2. Pompe à chaleur (PAC) - Principes de fonctionnement

Si la température naturelle de la ressource en eau souterraine n'est pas suffisamment élevée pour mettre en pratique l'échange direct de chaleur, le recours aux pompes à chaleur permet malgré tout de produire de la chaleur et/ou de la fraîcheur.

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à prélever des calories à basse température dans un milieu (source froide) et de les transférer à plus haute température dans un autre (source chaude). Ce transfert se fait via un fluide caloporteur ou fluide frigorigène qui présente un point d'ébullition à basse température.

Le fluide circule en circuit fermé, et le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude ne peut se réaliser que s'il y a apport extérieur d'énergie¹ (compresseur). Dans un fonctionnement classique en mode chauffage, la source froide correspond au milieu extérieur (nappe aquifère, sous-sol) et la source chaude correspond au bâtiment cible à chauffer.

Une pompe à chaleur est caractérisée par son Coefficient de Performance COP qui est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie dépensée sous forme mécanique. L'énergie mécanique est généralement apportée par un compresseur entraîné par un moteur électrique. Les autres constituants de la PAC sont un échangeur côté source froide dénommé « évaporateur » et un échangeur côté source chaude nommé « condenseur ». Dans la pratique, du fait de la difficulté d'évaluer selon le cycle théorique de Carnot et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...), le COP réel est affecté d'un coefficient de 0.4 à 0.7. Le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la source et le milieu à chauffer sera faible.

La performance du système est fonction à la fois de la température où l'on prélève les calories (source froide) et du milieu où on transfère la chaleur (source chaude).

¹ ADEME, ARENE, BRGM, EDF, 2008 – Guide technique – Pompe à chaleur géothermique sur aquifère – Conception et mise en œuvre.

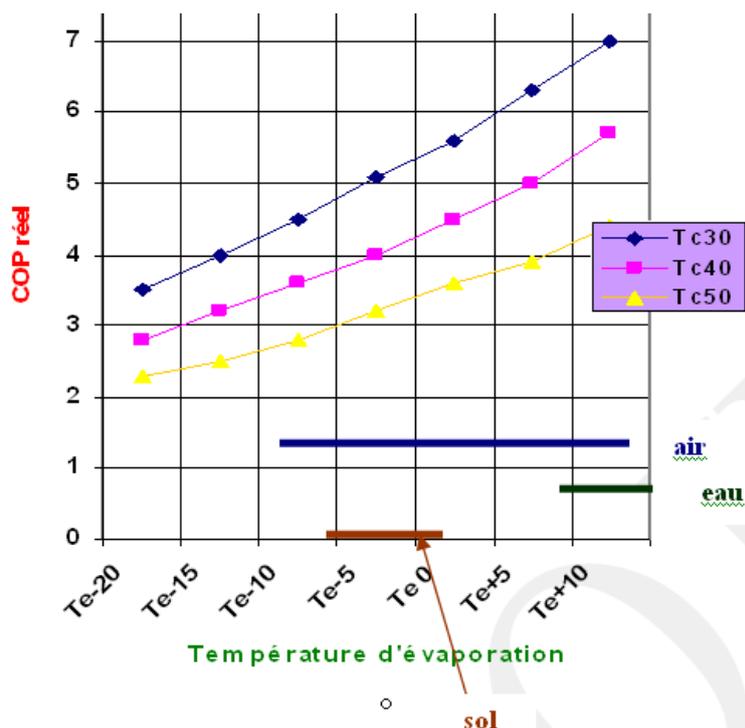


Illustration 5 : Evolution du COPréel en fonction de la température d'évaporation (T_e) et de la température de condensation à la source chaude (T_c).

Il existe aujourd'hui deux grandes familles de pompes à chaleur selon la nature de l'énergie apportée au système :

- les pompes à chaleur à **compression** (énergie mécanique)
- les pompes à chaleur à **absorption** (énergie thermique) largement moins diffusées.

2.5. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE

2.5.1. Pompe à chaleur sur aquifère

a) Principe de fonctionnement

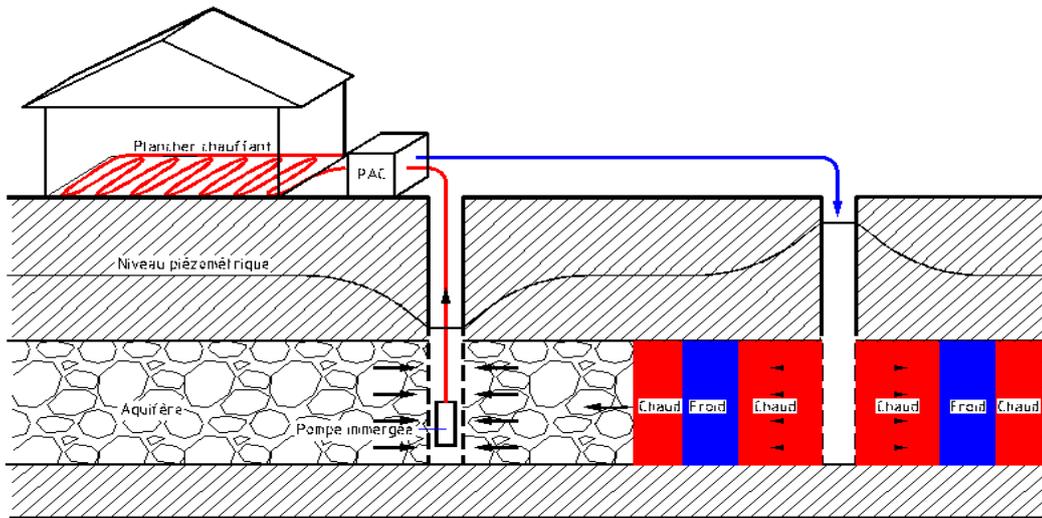
Le principe des pompes à chaleur sur aquifère repose sur le prélèvement et le transfert des calories contenues dans les eaux souterraines, généralement situées à des profondeurs inférieures à 100 m. Il existe donc une infrastructure souterraine destinée à assurer le flux d'eau depuis la nappe jusqu'à son point de rejet en passant par la PAC.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

Boucle géothermale {

- prélèvement d'eau souterraine ;
- production de chaleur au niveau de la PAC ;

- réinjection dans l'aquifère d'origine.



Ce schéma montre un fonctionnement alternatif en production de chaud en hiver et de froid en été.

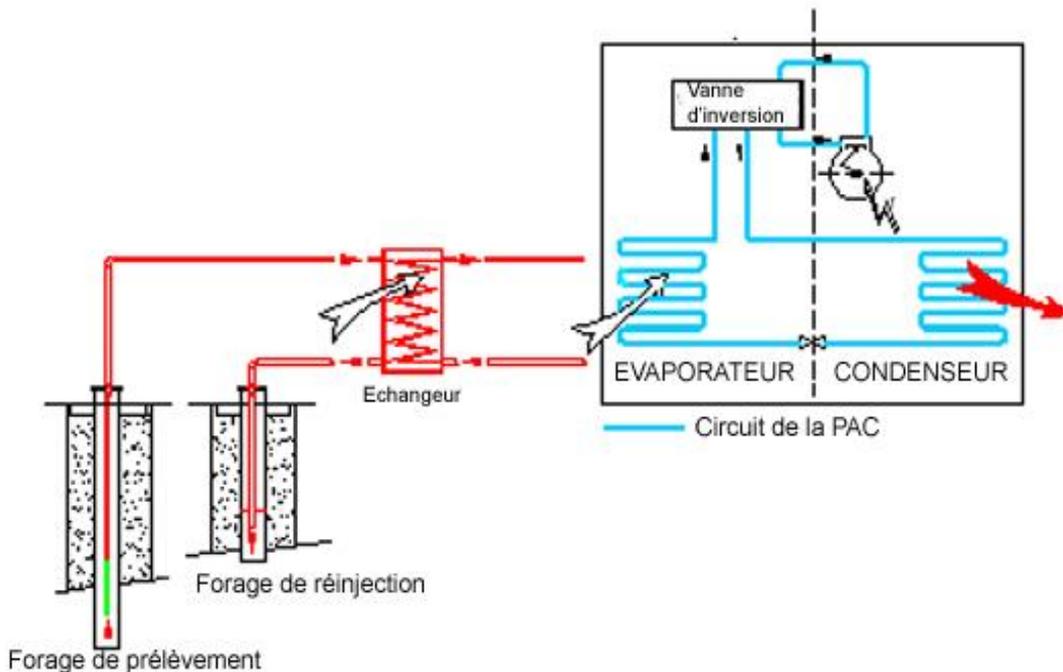


Illustration 6 : Schémas de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe

L'eau est prélevée à travers un premier forage et réinjectée, après passage par la PAC, dans un deuxième forage (principe du doublet). Le dispositif de doublet géothermique est conservé, et des précautions de dimensionnement et de réalisation doivent être prises (éviter les interférences hydrauliques et thermiques entre puits d'injection et puits de production et entre doublets géothermiques et forages environnants, réalisation des forages conformément aux règles de l'art...).

b) Procédure technique pour la mise en œuvre de pompes à chaleur sur aquifère

La validation d'un projet de pompe à chaleur sur nappe nécessite, en plus des études de conception nécessaires à tout projet, une approche spécifique de la connaissance de la ressource en eau souterraine qui sera sollicitée.

Les principales étapes de la mise en œuvre sont les suivantes :

- **Détermination des besoins.**

Il s'agit de déterminer les puissances chaud et froid qu'il faudra fournir au bâtiment.

- **Convertir ces deux puissances en débit d'eau à prélever sur la nappe ;**

- **Identification préalable de la ressource.**

L'analyse des données de l'atlas et l'estimation du débit nécessaire pour satisfaire tout ou partie des besoins thermiques permettra une première orientation.

- **Etude de faisabilité hydrogéologique.**

Cette étape requiert l'intervention d'un bureau d'étude spécialisé, car il s'agit d'affiner la démarche d'identification préalable de la ressource, en intégrant en particulier le nombre et le dimensionnement préalable des ouvrages, leur positionnement prévisionnel en fonction des contraintes du site.

Une première approche réglementaire peut également être réalisée à ce niveau ; ce qui permettra de connaître les documents administratifs à prévoir et les contraintes réglementaires.

Les zonages des ressources stratégiques en eau souterraine, des aquifères en déséquilibre quantitatif, et des zones de répartition des eaux (ZRE), ainsi que les orientations des SDAGE du bassin RMC, qui est accessible sur le site Internet de l'Agences de l'Eau : <http://www.eaurmc.fr/>

De même, les zones à enjeux (zones humides, ZNIEFF, etc...) peuvent être consultées sur le site de la DREAL Bourgogne : <http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/>

Les zonages, prescriptions et interdictions relatives aux périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable peuvent être obtenues auprès des délégations territoriales de l'Agence Régionale de Santé (ARS) ainsi que sur les plans locaux d'urbanismes de chaque commune.

- **Conception, suivi, réception des travaux en sous-sol.**

Les forages devront être réalisés dans les règles de l'Art, afin de garantir l'absence d'impact sur les eaux souterraines. La norme AFNOR NF X 10-999 décrit les bonnes pratiques de conception, de réalisation, de suivi, de fermeture de forages d'eau et de géothermie, en tenant compte des exigences réglementaires : <http://www.geothermie-perspectives.fr/actualites/annonces/nouvelle-norme-nf-x-10-999-forage-deau-geothermie-publiee> .

2.5.2. Pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales

Dans les endroits où le sous-sol ne révèle pas d'aquifères exploitables, ou si l'exploitation des aquifères superficiels présente des difficultés, il est possible, pour des usages thermiques, de

recupérer la chaleur emmagasinée dans le sous-sol par le biais de sondes géothermiques. Dans ce cas, l'énergie du sous-sol est directement exploitée.

Les sondes géothermiques correspondent à des capteurs géothermiques verticaux qui descendent à une profondeur généralement inférieure à 100 m, mais qui pourrait être supérieure. Elles sont également appelées « géosondes » ou « sondes sèches ». Elles présentent l'avantage d'avoir une faible emprise foncière et sont donc adaptées aux projets où la surface disponible est limitée.

La sonde correspond à deux tubes en U en matériau synthétique placés dans le forage. Le contact entre ce capteur et le sous-sol se fait par l'intermédiaire d'un mélange de ciment et de bentonite. Le système est parcouru par un liquide antigel qui est ensuite mené à la PAC en surface (cf. Illustration 7 ci-dessous).

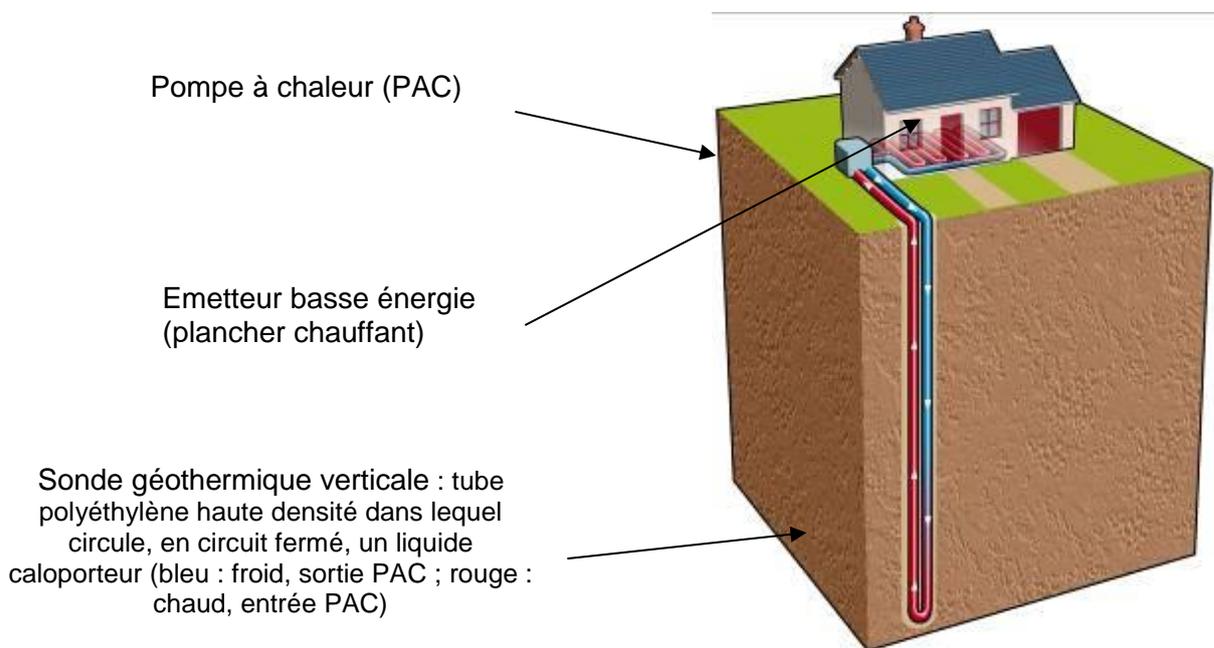


Illustration 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques

La PAC restitue en surface, en l'amplifiant, la chaleur prélevée pour chauffer une habitation, de préférence au moyen d'un plancher chauffant. En été, le système peut être inversé pour fonctionner en mode rafraîchissement (géocooling).

Le géocooling consiste à utiliser directement la ressource du sol pour rafraîchir les bâtiments, sans avoir recours à un groupe frigorifique intermédiaire. Le système se compose donc d'un échangeur souterrain ou d'un captage sur nappe d'eau souterraine. La consommation d'énergie du système se résume donc à celles des circulateurs utilisés.

La capacité de prélèvement de chaleur dépend du contexte géologique et de la nature des roches traversées (conductivité thermiques...). **Elle est de l'ordre de 50W/m de sonde.** Pour assurer des puissances comparables à celles prélevées sur aquifère, il est nécessaire d'utiliser plusieurs sondes dont l'implantation doit respecter certaines dispositions. On constitue alors un « champ de sondes » (cf. Illustration 8 ci-dessous).

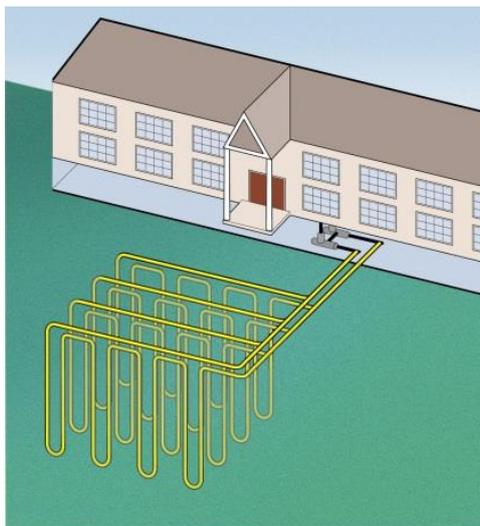


Illustration 8 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques

La norme NF X 10-970 sur la sonde géothermique verticale, homologuée depuis le 28 août 2010, définit les prescriptions relatives au dimensionnement et à la mise en œuvre d'une sonde géothermique verticale : <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/norme-nf-x10-970> .

2.6. PRINCIPAUX MECANISMES D'ACCOMPAGNEMENT ET PROCEDURES INCITATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE

Dans le cadre du développement des énergies renouvelable, plusieurs systèmes d'accompagnement ont été mis en place afin d'inciter au développement de la géothermie.

2.6.1. Garanties AQUAPAC®

La garantie AQUAPAC est gérée par la SAF-Environnement (Société Auxiliaire de Financement), filiale de la Caisse des dépôts et des consignations (CDC). Elle a été créée en 1983 par l'ADEME, le BRGM et EDF.

Cette garantie s'adresse à des projets faisant appel à une ressource d'une profondeur de moins de 100 m et utilisant une pompe à chaleur de plus de 30 kW.

Elle assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage, le transfert et la réinjection dans la ressource.

Les renseignements liés à cette garantie sont disponibles au lien suivant : <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/garantie-aquapac> .

2.6.2. Démarche qualité pour les sondes géothermiques verticales : Qualiforage

Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 qui définit et réglemente les activités de géothermie dite "de minime importance" a été publié en 2015.

Il est pris en application des articles L. 112-1 et L. 112-3 du code minier et il modifie notamment:

- le décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie,
- le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 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.

Il 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.

Le texte précise également les règles relatives aux droits et obligations des exploitants notamment en cas de dommages ainsi que celles relatives à l'arrêt de l'exploitation. Il prévoit, notamment, que les travaux devront obligatoirement être réalisés par des entreprises prestataires de forage disposant de qualifications particulières. Cette qualification particulière correspond à **QUALIFORAGE**.

Qualiforage a été initiée par l'ADEME et le BRGM, mais est gérée actuellement par Qualit'EnR.

Cette démarche vise à encadrer le marché des pompes à chaleur sur sondes géothermiques verticales grâce à :

- la mise en place d'un « standard de qualité », avec un cahier des charges de référence pour la réalisation de sondes selon les règles de l'art,
- la promotion d'une image de marque optimale de la sonde géothermique verticale.

La performance de l'ensemble de l'installation de chauffage est conditionnée par la bonne mise en œuvre de la sonde géothermique avec les règles suivantes à respecter :

- le dimensionnement des sondes, en fonction notamment de la nature des terrains, et de la présence ou non d'eau souterraines, pour répondre correctement aux besoins de chauffage,
- le respect de l'espacement minimal de dix mètres entre deux sondes pour éviter l'interaction entre les sondes et le risque de refroidissement rapide du sous-sol,
- les conditions techniques de réalisation avec la mise en œuvre d'une technique de forage adaptée, la mise en place des tubes à l'aide d'un touret pour ne pas endommager la sonde, la cimentation sous pression depuis la base de la sonde,
- le test in-situ de l'étanchéité des sondes,
- le respect de la réglementation et la clarification des responsabilités entre le foreur, le chauffagiste et le client.

Pour installer des sondes géothermiques verticales, les entreprises de forage doivent être qualifiées RGE. La liste de ces entreprises peut être consultée sur le site <http://www.qualit-enr.org/annuaire>.

2.6.3. Les aides financières

a) Pour les particuliers

Le crédit d'impôt Transition Energétique (C.I.T.E.) est le principal mécanisme d'aide pour les particuliers, à l'échelon national. Des aides régionales et départementales peuvent cependant venir s'additionner. De plus il est possible, selon des conditions bien définies, d'être éligible au prêt à taux zéro.

La liste des sites internet présentée ci-dessous permet d'accéder à de plus amples informations :

- <http://www.ademe.fr/aides-financieres-2016>
- <http://www.renovation-info-service.gouv.fr/mes-aides-financieres>
- <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/etape-4-solliciter-aide-financiere-particulier>

b) Pour les opérations collectif et tertiaires (dont réseaux de chaleur, hors particulier)

L'ADEME a mis en place un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie permettant de financer :

- des études de faisabilité et des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage,
- des investissements tant pour la réhabilitation d'opérations existantes que pour la réalisation de nouvelles opérations, avec la mise en place du Fonds Chaleur.

Le site Internet de l'ADEME donne de plus amples détails sur le montant des aides allouées et sur la démarche à effectuer pour bénéficier de cette aide : <http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref> .

Les porteurs de projet sont invités, dès le montage du dossier, à contacter la Direction Régionale de l'ADEME compétente sur le site d'implantation de leur projet (www.ademe.fr , rubrique NOS DIRECTIONS REGIONALES).

Vous trouverez également des informations sur les aides financières pour les collectivités et entreprises au lien suivant : <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/etape-4-aides-financieres-entreprises-collectivites>

Il existe également les fonds FEDER (Fond européen de développement régional) dont le rôle est de promouvoir l'investissement et de contribuer à réduire les déséquilibres entre les régions de l'Union européenne. Les bénéficiaires potentiels des aides FEDER sont les maîtres d'ouvrage publics et privés. Le guichet instructeur des demandes de subvention se situe au Conseil Régional Bourgogne - Franche-Comté.

Des compléments d'informations sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.europe-bourgogne.fr/engagement-europe/les-autres-programmes-europeens.htm>

2.7. REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE

2.7.1. Contexte réglementaire

Les principaux textes réglementaires s'appliquant à l'exploitation des eaux souterraines par forage et à l'exploitation des calories souterraines, donc aux opérations de géothermie sont :

- le Code minier et ses textes d'application, qui relèvent du ministre chargé des mines (la réglementation est appliquée par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement : DREAL) ;
- le Code de l'environnement qui relève du ministre chargé de l'environnement ;
- le Code de la Santé Publique, qui relève du ministre chargé de la santé ;
- Code Général des Collectivités Territoriales qui relève du ministre de l'intérieur.

Un tableau récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie utilisés vous est présenté ci-dessous :

Type de géothermie	Conditions	Régime administratif
Géothermie avec puits canadiens, corbeilles ou géostructures thermiques	Aucune	
Échangeurs géothermiques fermés (de types sondes géothermiques) horizontaux, d'une profondeur inférieure à 10m,	Profondeur < 10m, puissance < 500kW	Code minier non applicable dès publication au JORF
Échangeurs géothermiques ouverts	Profondeur < 10m, puissance < 500kW, débit < 80m ³ /h et réinjection même nappe	
	Profondeur > 10m et < 200m, puissance < 500kW, débit < 80m ³ /h, réinjection même nappe et en zone verte ou orange, prescriptions nationales et qualification des foreurs	Déclaration simplifiée au 1/7/2015
	Profondeur > 200m ou puissance > 500kW ou débit > 80m ³ /h ou pas de réinjection en même nappe ou zone rouge	Autorisation instruite par les services de l'État
Échangeurs géothermiques fermés (capteurs verticaux) d'une profondeur de 10 à 200m	Puissance < 500kW et zone verte ou orange, prescriptions nationales et qualification des foreurs	Déclaration simplifiée au 1/7/2015
	Puissance > 500kW ou zone rouge	Autorisation instruite par les services de l'État

Procédures au titre du code minier

Aucune	
Déclaration simplifiée	
Autorisation instruite pas les services de l'État	

Illustration 9 : Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie de très basse énergie (sce : MEDDE)

Il est à noter que les installations de géothermie qui répondent aux conditions de la géothermie de minime importance ne sont soumises qu'à une simple déclaration. Celle-ci doit se faire sur le site du Ministère <https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/>.

Pour plus amples informations vous pouvez consulter le site internet « geothermie-perspectives », plus particulièrement :

- <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/etape-3-reglementation-demarches>
- <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/nouveau-cadre-reglementaire-geothermie-minime-importance>

2.7.2. Cartes nationale des risques liés à la géothermie

Pour encadrer le développement de cette énergie renouvelable et prévenir les risques de dommages matériels et environnementaux, les pouvoirs publics ont mis au point une carte réglementaire précisant les risques géologiques associés à la réalisation de forages géothermiques. La carte a été réalisée à l'échelle nationale pour la tranche de profondeur 10-200 m dans laquelle peut s'appliquer le régime de minime importance.

La carte nationale des risques, zoomées sur le territoire du Grand Besançon, vous est présentée ci-dessous. Elle regroupe les risques pour la géothermie sur sondes verticale et celle sur nappe.

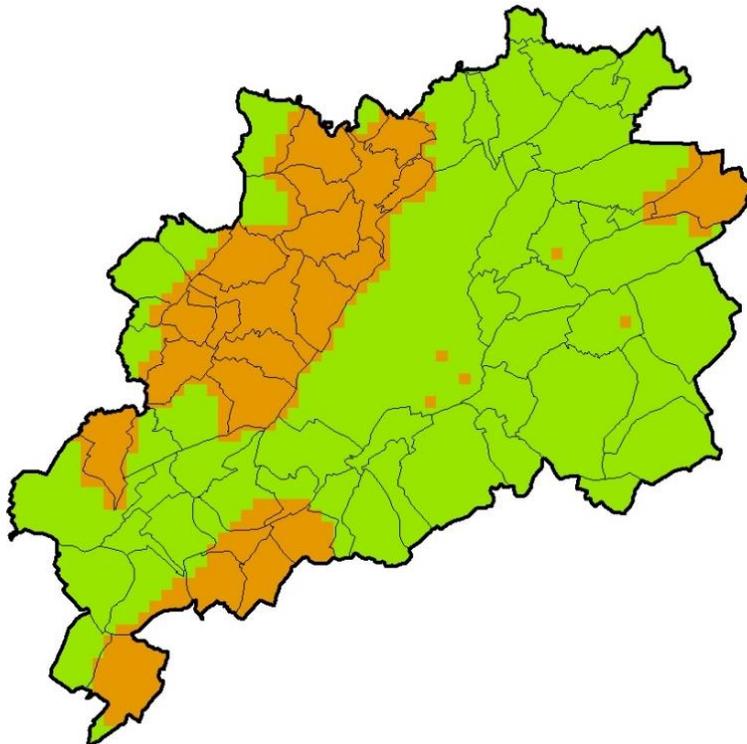


Illustration 10 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance dans le grand Besançon. © BRGM

On peut distinguer 2 zones principales :

- **la zone verte** : ne présentant pas de risques identifiés ;
- **la zone orange** : nécessitant l'avis d'un expert agréé du fait de la présence de risques (ex : cavités, formations évaporitiques, site et sols pollués,...). Les grandes zones orange au sud du territoire du Grand Besançon et à l'est sont dues au fait de la présence de formations évaporitiques, tout comme la petite zone à l'est. Les 4 autres zones ponctuelles sont dues à la présence de sites BASOL (sites et sols reconnus comme étant pollués)

Remarque : Certaines régions (Lorraine, Alsace,...) ont une carte plus détaillée réalisée à l'échelle de leur territoire. Celle-ci est effectuée pour trois gammes de profondeur : 0-50 m, 0-100 m, 0-200 m et possède une couleur supplémentaire qui est le rouge correspondant à la zone où la réalisation d'ouvrages de géothermie ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance et nécessite donc une autorisation au titre du code minier

Cette carte à l'échelle régionale n'existe pas encore pour la région Bourgogne-Franche-Comté.

2.7.3. Étapes pour la mise en œuvre d'un projet de géothermie

Plusieurs étapes sont nécessaires à la mise en place d'un projet géothermique. Ces différentes étapes sont listées et présentées sur le site géothermie-perspective, disponible au lien suivant : <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/projet-geothermie> . Le site possède d'ailleurs un très grande variété d'informations liée à la géothermie, s'adressant autant au grand public, qu'à une personne experte.

3. La géothermie dans le grand Besançon

3.1. LES ZONES ETUDIEES DANS LE CADRE DE L'ATLAS DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DE TRES BASSE ENERGIE

Conformément à la demande du grand Besançon lors de la rédaction du cahier des charges, l'emprise de cet atlas se limite aux limites de l'agglomération de Besançon. Cependant 15 nouvelles communes étant été rajoutées au 1^{er} Janvier 2017 suite à un arrêté préfectoral datant du 29 mars 2016, qui a fixé le schéma départemental de coopération intercommunal et officialisé l'extension du périmètre du grand Besançon. Ces 15 nouvelles communes ont également été prises en compte dans les limites de l'atlas.

L'illustration 11 présente la zone qui sera étudiée dans cet atlas géothermique très basse énergie. Les 15 nouvelles communes intégrées au grand Besançon en janvier 2017 sont affichées en hachuré rouge sur la carte. Elles agrandissent la zone étudiée d'environ 20-30%. Le grand changement sera pour la géothermie sur nappe, où les alluvions de l'Ognon, qui n'étaient pas pris en compte jusqu'à maintenant, le sont avec l'intégration des nouvelles communes.

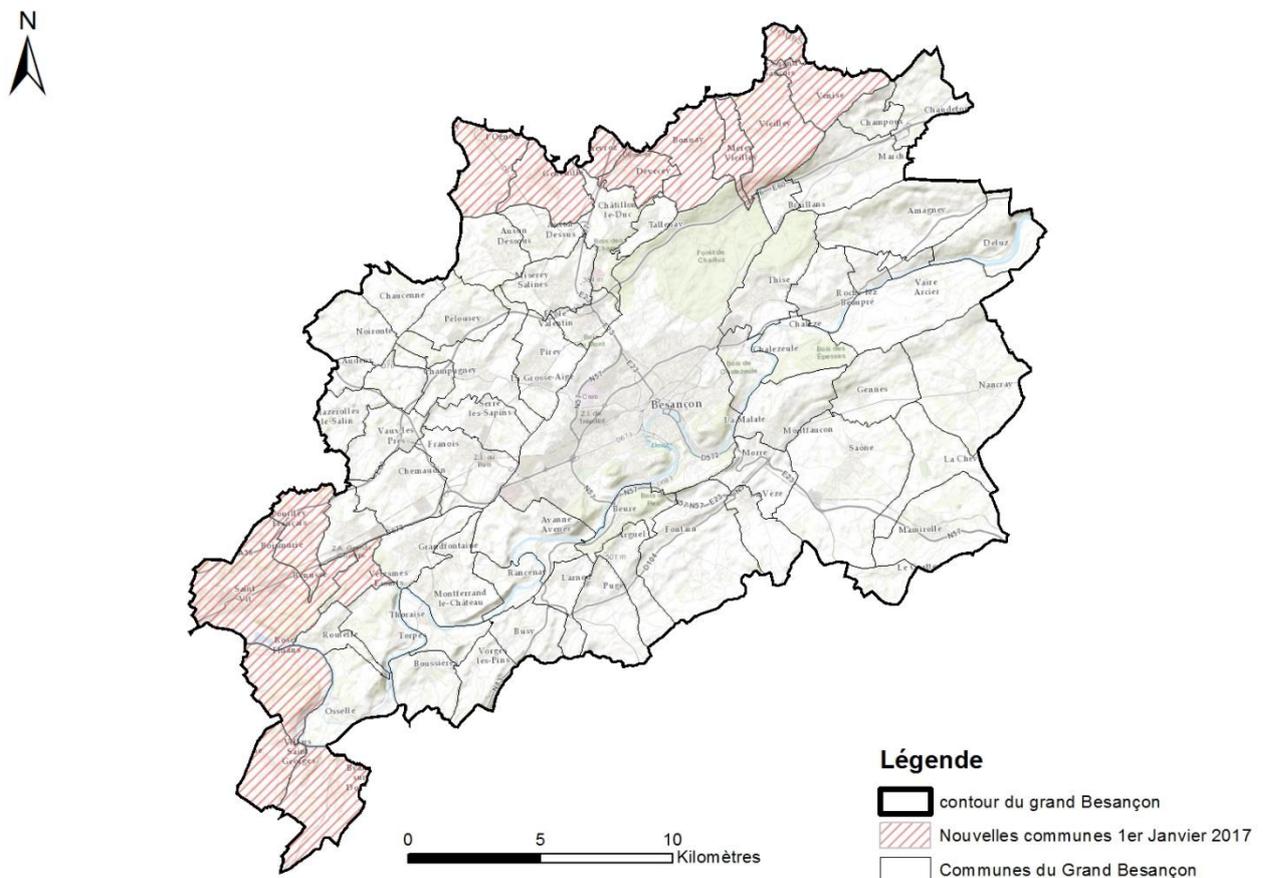


Illustration 11 : Présentation de l'agglomération du Grand Besançon

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU GRAND BESANÇON

3.2.1. Contexte géologique

L'agglomération de Besançon s'inscrit dans le Jura externe, partie NE de la Chaîne du Jura qui est un arc montagneux à la forme d'un croissant dont la convexité est tournée vers le NW. L'agglomération est bordé au SW et au NE, respectivement, par le faisceau Bisontin et les Avant-Monts et repose sur le large plateau de Besançon. Le faisceau Bisontin s'étend depuis la commune d'Avanne-Aveney au Sud à la commune de Deluz au Nord. Cet ensemble étroit de quatre kilomètres de largeur forme trois alignements de collines allongées et orientés NE-SW culminant à 600 mètres d'altitude à ses plus hauts sommets. Le premier correspond aux monts de Bregille, de la Citadelle, de Chaudanne, de Rosemont et de Planoise, séparés par les méandres anciens et actuels du Doubs. Le second est constitué de deux longues barres calcaires, crêtes redressés qui encadrent la combe des Mercureaux qui est au cœur de l'anticlinal du même nom. Ces deux alignements sont séparés par un val, dépression topographique de la Chapelle des Buis occupée partiellement par la vallée du Doubs. Le dernier est la voûte préservée de l'anticlinal de Montfaucon, localement percée par la combe du château de Montfaucon. La coupe perpendiculaire aux structures représente une succession de plis anticlinaux et synclinaux se chevauchant les uns les autres par le biais de failles inverses, chevauchantes vers l'Ouest. L'anticlinal des Mercureaux chevauche le synclinal de la Chapelle des Buis, auquel vient s'enchaîner l'anticlinal de la Citadelle de Besançon. L'érosion permet de voir affleurer le Trias (Keuper Supérieur), sous forme de bandes étroites, au niveau des communes de Morre, Fontain, Arguel, Beure, Vorges-les-Pins et Busy. Il se compose de deux ensembles d'argiles bariolées séparées par un niveau gréseux et un niveau dolomitique. Il est à noter que le niveau argileux inférieur est parfois gypsifère.

Le faisceau des Avant-Monts est la dernière unité géologique composant le Massif du Jura en direction du Nord-Ouest avant d'atteindre le plateau Haut-Saônois. Ce faisceau se caractérise par une zone très fracturée de quatre à six kilomètres de large et d'une trentaine de kilomètres de long. Il concerne l'extrême NW de l'agglomération bisontine en partant des communes de Mazerolle-le-Salin, Vaux-les-Près et Audeux à l'Ouest jusqu'aux communes de Châtilion-le-Duc et Tallenay à l'Est. Ils forment un alignement de collines sur un axe SW-NE dont le point culminant est celle de la Dame Blanche. La voûte calcaire du mont est marquée d'une combe délimitée de part et d'autre par des crêtes, supportant au Sud le fort de Chailluz. Le dernier pli du Jura est un anticlinal déversé qui chevauche la structure synclinale de l'Ognon par l'intermédiaire d'une faille inverse hercynienne : la « Faille de l'Ognon ». À noter que le caractère chevauchant du faisceau s'atténue progressivement vers le Sud. Cette structure tectonique de grande ampleur constitue le chevauchement frontal du Jura. L'anticlinal fait majoritairement affleurer les formations géologiques du Jurassique : le Dogger calcaire formant les reliefs les plus marqués et les marnes du Lias érodé se retrouvant le plus souvent dans le fond des combes. L'érosion est également à l'origine de l'apparition d'affleurements triasiques qui se retrouvent au cœur du pli anticlinal déversé, mis à jour par l'usure du temps.

La dépression synclinale de l'Ognon, chevauchée par le faisceau des Avant-Monts, est constituée de quelques affleurements de Crétacé calcaire (Hauterivien et Cénomaniens) et sableux (Albien) et de Jurassique supérieur, calcaire sublithographique (Séquaniens). Le reste du secteur étant recouvert par les alluvions du Plio-Quaternaire venant s'ajouter aux plis

récents des affluents de l'Ognon. Ces alluvions recouvrent en discordance le plateau de Haute-Saône sur plus d'un kilomètre et demi en partant des Avant-Monts vers le NW.

Le plateau de Besançon, à l'instar des autres plateaux du Jura, présente une structure globalement horizontale. Bien qu'un peu incliné de 3° vers la vallée du Doubs.

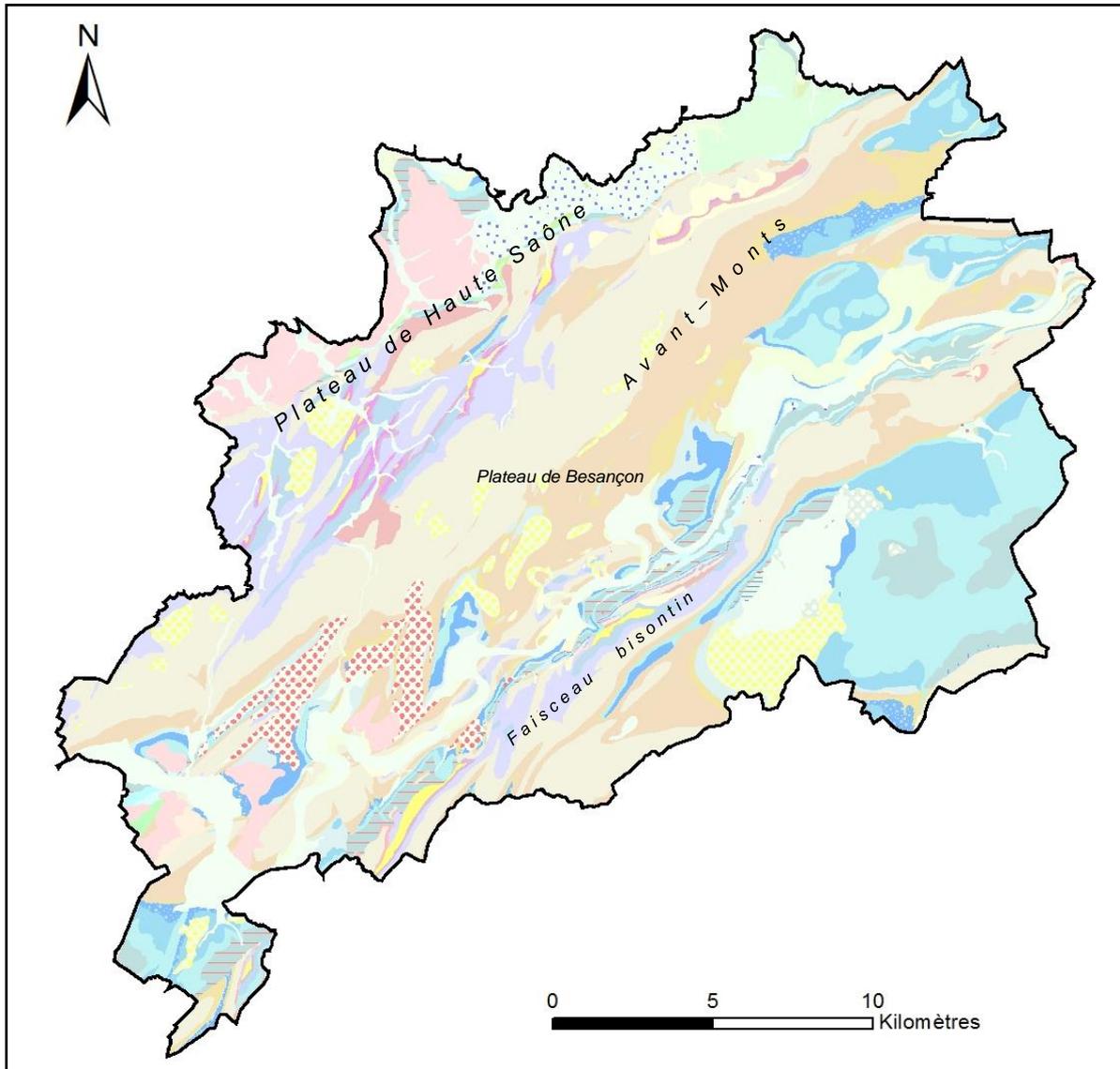


Illustration 12 : Présentation géologique générale du Grand Besançon, sur fond de carte géologique harmonisée (1/50000^{ème})

D'un point de vue tectonique, les secteurs de l'agglomération les plus déformés sont le faisceau Bisontin et les Avant-Monts. Tandis que le plateau de Besançon sur lequel repose la majorité de l'agglomération est que peu faillé, malgré quelques-unes secondaires N°15, N°50, N°160 qui le taillent à moindre intensité que les faisceaux. De nature inverse, les failles sont représentatives de la déformation qui a eu lieu associée à la compression occasionnée par la poussée alpine survenue à la fin du Tertiaire. Mis à part quelques failles décrochantes orientées NW-SE, l'ensemble des failles présentes sur le territoire de l'agglomération sont orientées NE-SW en suivant le tracé en forme de croissant de l'arc jurassien.

Le territoire du Grand Besançon possède une assez faible diversité de système géologique. La quasi-totalité du territoire est occupé par des terrains du Jurassique. Cependant on peut également observer de façon sporadique des terrains du Trias (marnes et argiles) ou bien encore du Crétacé (calcaires, et sables de l'Albien), notamment au nord, au niveau de la vallée de l'Ognon. Les différents étages observés sont décrit ci-après.

- *Le Trias*

- Buntsandstein

Il est représenté essentiellement par des grès plus ou moins argileux, étant de nature détritique.

- Muschelkalk

Le Muschelkalk est marneux du mur jusqu'à la moitié de son épaisseur et est carbonaté dans sa partie supérieur par une variation de calcaire à dolomie.

- Keuper et Rhétien

Le Keuper est composé de marnes bariolées à son sommet. Les marnes sont rouges lie-de-vin et vertes grisées. Cette différence de couleur est due à différents degrés d'oxydation du fer dans les argiles. Lorsque le fer est oxydé sous la forme de Fe³⁺, la marne est rouge. À l'inverse de verte à grise lorsque le fer est réduit sous la forme de Fe²⁺. Ce niveau marneux présente également des intercalations de grès et de dolomies. Le Rhétien quant à lui est composé de marnes noires caractéristiques. On les retrouve notamment au fond de la combe de Morre, en bordure des champs longeant la nationale. C'est principalement dans ces 2 étages que l'on rencontre les évaporites de l'agglomération du grand Besançon.

- *Le Jurassique inférieur ou Lias*

Le Lias est dominé par des marnes et est sensible à l'érosion. Il est remarquable dans le paysage par des zones déprimées faiblement pentus. Il se trouve fréquemment dans les prés. Les zones où il est le plus facilement observable se situent dans les prés entourant le Truchot (Morre) et la combe à l'Est de « le Seu » (Montfaucon).

- Le Sinémurien et l'Hettangien (I3-2) : 7m

C'est le seul niveau calcaire du Lias. Son épaisseur ne dépasse pas la quinzaine de mètres. Ce calcaire de couleur grise à bleue, dû à une forte concentration en matière organique, est le seul à présenter ce faciès particulier. Il constitue un niveau repère dans la région du Jura. Il est constitué d'une alternance de bancs calcaires de quelques mètres et d'interbancs marneux plus fins. On le nomme calcaire à gryphée archée de par la concentration importante de bivalves *Gryphea Arcuata* qui se sont majoritairement fossilisés en positions de vie et indiquent la polarité du banc. On retrouve cet étage au fond de la combe de Morre.

- Le Pliensbachien, le Toarcien et l'Aalénien inférieur (I4-3, I6-5) : 130m

Ces niveaux sont caractérisés par des argilites carbonatées (marnes) grises et plastiques. Le seul niveau remarquable à l’affleurement est celui des « schistes cartons ». Cet horizon est formé d’un fin litage de feuillet argileux millimétriques à centimétriques, friables et quelquefois bitumineux. Il forme parfois un rejet de pente dans les pâturages. Il est visible dans la combe de Morre sur de longs segments entourés de Marnes qui comblent le reste de la dépression. Leur couleur de grise à noire est due la forte présence de matière organique et d’hydrocarbure.

Suite aux dépôts marneux du Lias, la sédimentation calcaire s’installe à l’Aalénien supérieur et se poursuit pendant tout le Jurassique moyen.

- *Le Jurassique moyen ou Dogger*
 - L’Aalénien supérieur (I6b) : 10m

Ce niveau est présent à l’affleurement aux orées ouest du Bois de la Côte (Morre) et du Bois de la Roche (Montfaucon). C’est un calcaire marneux roux à entroques, bioclastiques et contenant des oolithes ferrugineuses de proportions à peu près égales. Cette couleur rousse est due aux oxydes de fer très présents dans la roche.

- Le Bajocien

La série Bajocienne est divisée en deux faciès le Bajocien Inférieur et le Bajocien Supérieur. Le dépôt c’est fait dans un domaine marin de type « plateforme carbonatée ». Cette série affleure à proximité du Fort de Montfaucon ainsi que dans le Bois de la Côte

- Le Bajocien inférieur (J1a) : 60m

Ce calcaire de type grainstone est formé d’entroques et de récifs de polypiers : sa moitié côté mur est bioclastique à entroques et à sa moitié côté toit il est bioclastique à polypiers. Il peut montrer des stratifications obliques. La première moitié de l’étage (à entroque) est la plus fréquente dans le secteur de Besançon, sa surface d’érosion est reconnaissable par sa couleur grise foncée, rugueuse.

- Le Bajocien supérieur (J1b) : 60m

Son appellation locale est la « Grande Oolithe ». Il est jaunâtre avec la présence de quelques oncolithes ainsi que quelques intercalations de passées micritiques. Une stratification entrecroisée est bien marquée. Ses bancs sont pluri-centimétriques à métrique peu anguleux avec des surfaces de bancs plus irrégulières avec un débit de dalle. A la cassure fraîche nous trouvons des oolithes en différentes proportions, plus ou moins dense selon où nous nous trouvons dans la colonne de roche.

- Le Bathonien (j2) : 80m

Appelé localement « Calcaire de la Citadelle », ce calcaire est observable dans les environs de Vigner (Morre) ainsi que dans le Bois de Ratte (Montfaucon). Il est micritique, sublithographique, compact, de couleur beige et très pauvre en fossile. Ces bancs sont de tailles métriques. Cet étage a souvent été rencontré dans la région sous forme de lapiatz, où les strates sont illisibles, mélangées aux fractures et/ou diaclases. Cet aspect de la roche est caractéristique de la nature karstique de notre région.

- Le Callovien (j3) : 15m

Ce calcaire est composé en majorité d'entrouques et de bioclastes (coraux, bryozoaires et coquilles) d'où son nom local de « Dalle Nacrée ». On y trouve quelques passées oolithiques. Les bancs calcaires décimétriques sont séparés par des joints marneux centimétriques. Le sommet de cet étage est surmonté d'une couche de Marnes jaunes de quelques dizaines de centimètres. Ce faciès ne dépasse que rarement une quinzaine de mètres. Présence limitée à l'affleurement dans le secteur de Besançon.

- *Le Jurassique supérieur ou Malm*

- L'Oxfordien (j4) : 30m

Ce faciès est caractérisé par des marnes bleues comprenant de nombreuses Ammonites pyriteuses dont les fossiles sont facilement observables. Elles forment néanmoins un replat dans la topographie facilement identifiable entre l'horizon calcaire du Callovien et le niveau riche en chailles de l'Argovien. Les marnes oxfordiennes sont présentes dans les prés bordants Chalezeule ainsi que dans ceux de « les Fours à Chaux » (Est de Morre et Montfaucon)

- L'Argovien (j5) : 30m

La base de la formation est composée d'une couche de marne jaune caractéristique permettant de mettre en évidence aisément le passage avec l'Oxfordiens. Elle est surmontée par l'alternance de bancs marno-calcaires et de bancs crayeux riches en chailles. On passe ensuite à un faciès bioclastiques silicifiés qui est caractéristique de la série Argovienne dans la région. De nombreux blocs de Chailles et de silices non altérés affleurent et forment un repère stratigraphique facilement identifiable. Cette série affleure dans son intégralité entre le Réservoir du Fort Benoit (Chalezeule) et le Mont de Brégille. Elle est aussi présente à proximité de Morre, le long du chemin de grandes randonnées « Ceinture de Besançon ».

- Le Rauracien (j6) : 30m

Le Rauracien est composé de deux faciès calcaires. A sa base c'est un calcaire beige récifal riche en Polypiers et Solénopores formant parfois des colonies pouvant atteindre un mètre d'épaisseur. La partie supérieure est un calcaire blanchâtre à oolithes et oncolithes. Le Rauracien est présent dans la continuité des affleurements de l'Argovien ainsi que dans l'écaille tectonique de Morre.

- Le Séquanien (j7) : 100m

C'est un calcaire micritique compact de couleur beige séparé par un banc marneux au milieu de la série qu'on l'on devine lors de replats dans la topographie. A la base se trouve un banc prismatique qui est un bon repère stratigraphique. Au sommet, on peut parfois identifier un banc de glauconie. Le Séquanien est présent à l'affleurement tout le long du chevauchement, du Sud de « Beau Site » (Morre) à la « Côte d'Arbois ».

- Le Kimméridgien (j8) : 100m

Ce calcaire très présent sur notre carte dans le prolongement des affleurements du Séquanien le long du chevauchement et peut se diviser en deux unités. A la base c'est un calcaire micritique sublithographique avec à son sommet des concrétions alguaires rouges. La partie sommitale est une alternance de marnes brunes et de calcaire micritiques.

- Le Portlandien (j9) : 15m

Ce faciès est un calcaire blanc compact, sublithographique et organisé en bancs métriques. On le retrouve le long du chevauchement le long du chemin de grandes randonnées de la « Ceinture de Besançon » et à proximité du « Communal de Chevriot » (Montfaucon).

- *Le Crétacé*

Le Crétacé, représenté par l'Hauterivien, l'Albien et le Cénomaniens, n'est que très peu présent sur l'étendu de l'agglomération, on ne le trouve que de manière éparse près des Auxons, au Nord de Cayenne et de Venise. Il est majoritairement recouvert par des formations superficielles et délimité par des failles.

- *Le Paléogène*

- Oligocène (10m)

L'oligocène est un niveau discordant présent au sommet des forts reliefs de notre secteur, au niveau du Château de Montfaucon. C'est un niveau massif formé de conglomérat dont les blocs peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

- *Les formations superficielles*

- Alluvions (10m)

Formations superficielles prépondérantes des abords des cours d'eau, ils ne représentent généralement que quelques mètres d'épaisseur visibles au fond des vallées, dans les champs. Formés au Quaternaire, ils sont essentiellement composé de matériaux fins, on peut toutefois y trouver quelques blocs détritiques plus imposants de type poudingue. Elles sont bien développées dans la vallée de l'Ognon sous forme de graviers siliceux d'origine vosgienne, et dans celle du Doubs où elles sont essentiellement calcaires. Les ruisseaux affluents de l'Ognon déposent surtout des matériaux argileux provenant des marnes liasiques ; il en est de même des quelques torrents temporaires dont les cônes de déjection atteignent les rives du Doubs (Montfaucon).

Les terrains de l'agglomération du Grand Besançon vont du Jurassique supérieur au Trias supérieur. Des affleurements de terrains du crétacé peuvent cependant être observés au nord de l'agglomération. Un log géologique général de la zone est présenté en illustration ci-dessous

JURA BISON TIN

RELIEFS, PAYSAGES ET ROCHES

1 | Lithostratigraphie de la région de Besançon.

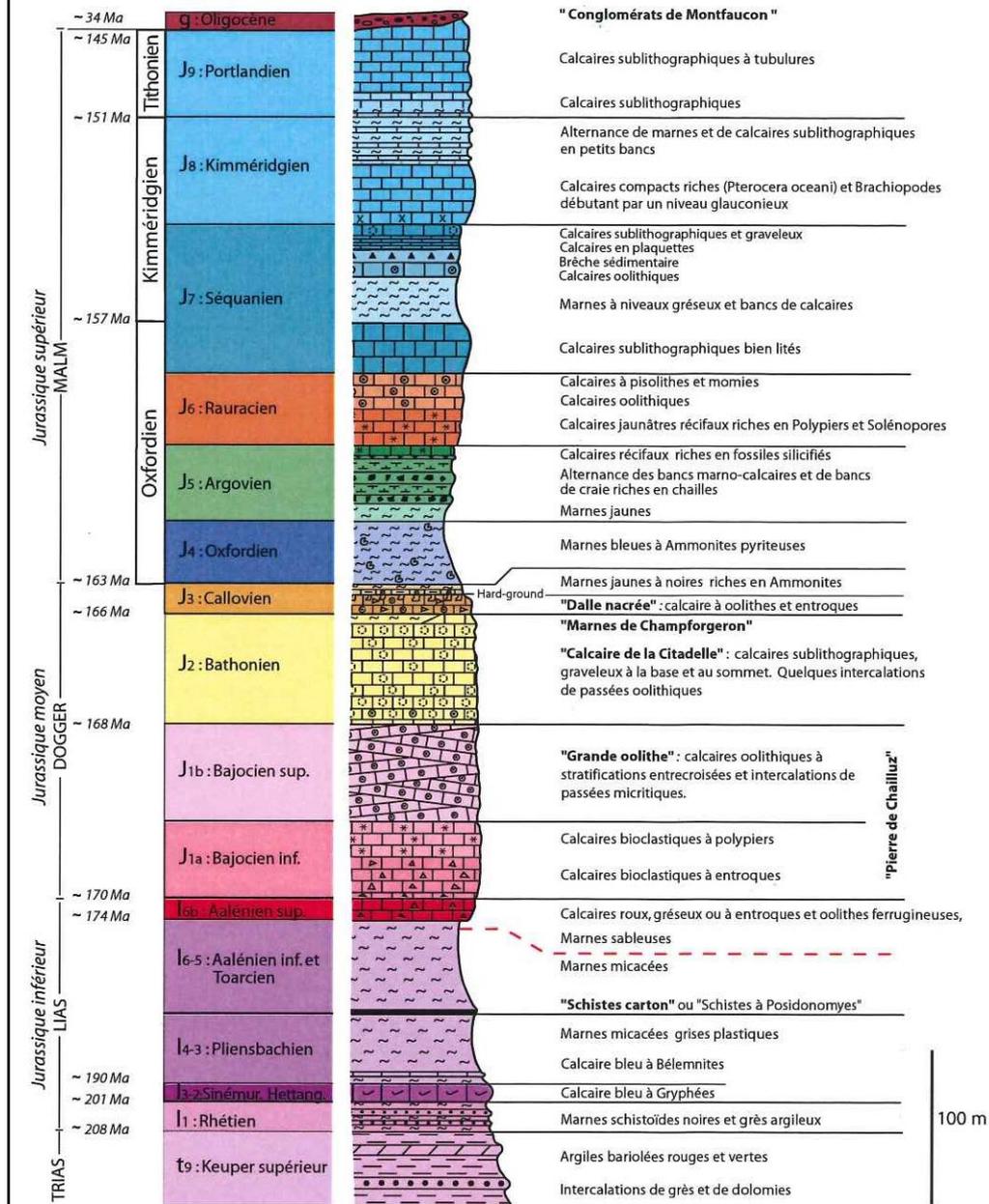


Illustration 13 : Colonne stratigraphique de l'agglomération de Besançon (Source : Jura Bisontin, Reliefs, Paysages et Roches. Pierre Chauve et Patrick Rolin, 2015)

L'agglomération de Besançon s'étalant majoritairement sur la carte géologique de Besançon mais également sur celles de Vercel et de Quingey, Suite aux descriptions géologiques présentées ci-dessus, on constate que la nature du sous-sol du territoire du Grand Besançon est peu diversifiée malgré la forte diversité des âges géologiques. Il s'agit principalement d'une alternance de calcaires et de marnes sur plus de 600 m d'épaisseur.

3.2.2. Contexte hydrogéologique

Comme présenté dans le chapitre précédent, la grande majorité du territoire du Grand Besançon est composé de roches sédimentaires datant du Jurassique. Ces formations, aquifères, affleurantes sur tout le territoire, sont drainées par 2 cours d'eau : le Doubs et l'Ognon. Dans toute la partie nord du massif jurassien, le substratum des aquifères karstiques des calcaires jurassiques est constitué par le niveau des argiles du Lias. Ces formations calcaires sont aquifères donc potentiellement utilisables pour la géothermie. Un champ captant de la région bisontine exploite d'ailleurs la nappe profonde des calcaires à un débit d'exploitation de plus de 1000 m³/h. Des bonnes productivités ont été mesurées ailleurs aussi, cependant, la profondeur des forages à utiliser augmenterait de beaucoup le budget du projet géothermique.

Le Doubs constitue le drain principal des aquifères présents de part et d'autre de la vallée. Il constitue ainsi le niveau de base de ces aquifères, notamment des aquifères karstiques.

Les limites d'extension de sa zone d'appel vis-à-vis des aquifères sont conditionnées :

- D'une part, par la présence, au nord et au sud, d'autres cours d'eau également drains majeurs : au nord de l'Ognon, au sud la Loue ;
- Et d'autre part, par des données structurales, notamment la remontée des argiles du Lias.

- *Les alluvions du Doubs*

Les alluvions du Doubs se surimposent aux différents niveaux de la série lithostratigraphique Trias/Jurassique. Elles occupent la plaine inondable dont la largeur dépend de la nature des formations sous-jacentes. L'épaisseur de ces alluvions est de 3 à 5 mètres, mais peut atteindre en certains endroits plus de 10 mètres. Elles sont sablo-graveleuse, mais plus grossières à la base qu'au sommet, sont intercalées et peuvent être recouvertes de limons d'inondation peu perméables. Signalons qu'entre le confluent de l'Allan à l'amont et Routelle à l'aval existent quelques seuils rocheux dans le lit du Doubs au droit desquels les alluvions sont absentes. Les alluvions récentes du Doubs sont à éléments calcaires dominants.

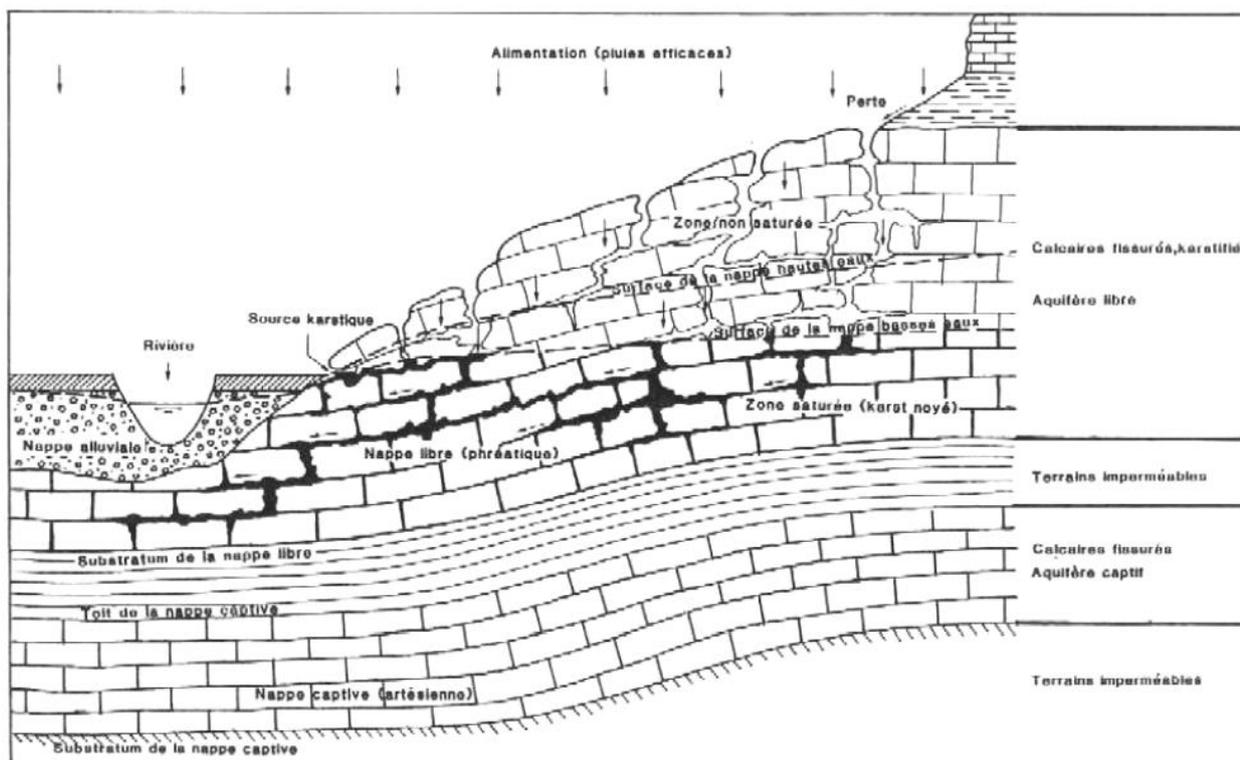


Illustration 14 : Fonctionnement hydrogéologique type de la vallée du Doubs au droit de la zone d'étude. Relations hydrodynamiques entre la rivière, la nappe alluviale et la nappe du versant (Extrait du rapport BRGM R 35673 FRC 4S 92)

A l'aval de Choisey, le Doubs débouche dans la plaine de Bresse et la plaine devient beaucoup plus large (plusieurs kilomètres). Les alluvions graveleuses, d'une épaisseur proche de 10 mètres, y sont recouvertes de limons argileux de plusieurs mètres d'épaisseur.

Enfin, on note entre Montbéliard et Dole, plusieurs placages d'alluvions anciennes à des altitudes de 20 à 50 mètres au-dessus du lit du cours d'eau. Ces alluvions anciennes sont altérées (matrice souvent argileuse) et de nature essentiellement siliceuses (ancien cours du Doubs grossit de l'Aar descendant des Alpes).

- Les alluvions de l'Ognon
 - Les alluvions pliocènes

Les dépôts pliocènes apparaissent à Geneuille et se développent en aval, essentiellement en rive gauche, jusqu'à Pesmes. En aval de Pesmes et jusqu'au confluent, ils occupent tout le bassin versant et constituent le substratum des alluvions récentes de l'Ognon. Ils comportent des argiles, des silts, des sables plus ou moins argileux avec, localement des intercalations de niveaux graveleux. Cet ensemble, épais de plusieurs dizaines de mètres est caractérisé par une sédimentation lenticulaire qui se traduit par des variations de faciès constantes tant verticalement que latéralement. Les niveaux les plus grossiers sont aquifères.

- Les alluvions des anciennes terrasses

Les alluvions anciennes forment des placages discontinus, étagés à différentes altitudes sur les flancs de la vallée. Elles sont composées de matériaux sableux, parfois graveleux mais généralement colmatés par une matrice argileuse ou limoneuse abondante et constituent un milieu semi-perméable, de faible potentialité aquifère.

En effet, outre leur perméabilité très médiocre, leur extension est trop restreinte pour permettre l'établissement d'une nappe de quelque importance.

Ainsi, les alluvions anciennes des terrasses sont susceptibles de présenter un intérêt pour des besoins en eau individuels, mais ne peuvent concourir à l'alimentation en eau potable des collectivités ou à des entreprises ou industries.

- Les alluvions de la basse plaine alluviale

Les alluvions sablo-graveleuses de la basse plaine alluviale recèlent une nappe d'un grand intérêt, activement exploitée pour l'alimentation en eau potable des collectivités, tout le long de la vallée de l'Ognon.

La nappe des alluvions de la basse plaine de l'Ognon

L'aquifère alluvionnaire de la vallée de l'Ognon se limite aux alluvions sablo-graveleuses de fond de vallée que l'on trouve sous la couverture argilo-limoneuse.

Lorsque la base de l'aquifère alluvial est en contact direct avec les calcaires du Jurassique ou les grès du Trias, on peut envisager l'existence d'une continuité hydraulique. D'ailleurs, les sources d'origine karstique jalonnent le contact versant – plaine alluviale, ce qui permet de supposer que l'Ognon représente le niveau de base des eaux souterraines circulant dans les roches fissurées des versants. D'une manière générale, l'aquifère alluvial perméable est étroit et, le plus souvent inférieur à 1km. Son écoulement est très faible par rapport à celui de l'Ognon et toute action importante sur les alluvions aura pour effet d'induire la rivière.

En aval de Rougemont, l'aquifère est généralement captif, en charge sous la couche argilo-limoneuse superficielle, à quelques exceptions près, très localisées, en liaison avec des exploitations de graviers qui ont pour effet de rabattre le niveau de la nappe à leur périphérie. Toutefois, dans les secteurs où l'épaisseur du recouvrement est relativement faible, la mise en charge de la nappe est faible et l'on observe une alternance nappe libre – nappe captive, en fonction des saisons ou, localement du rythme des pompages.

4. Conception de l'atlas du potentiel géothermique

4.1. METHODOLOGIE GENERALE

Le principe général de l'atlas repose sur une méthode de cartographie de critères qui caractérisent le potentiel géothermique avec une pondération de ces critères. Cette méthode est basée sur la combinaison pondérée de cartes de paramètres (dites cartes unicritères) intervenant dans l'évaluation d'une propriété régionale.

Cette méthode permet la prise en compte relative de chaque critère influençant le potentiel général. La difficulté lors de sa mise en œuvre réside essentiellement dans le choix des critères, leur notation et le poids qu'on leur attribue.

L'atlas du potentiel géothermique est constitué de cartes unicritères pour chacun des paramètres étudiés représentant tous les aquifères ou la qualité du sous-sol, et d'une carte de synthèse générale, dite carte du potentiel géothermique de l'agglomération, qui correspond à la compilation des meilleures potentialités par aquifère (géothermie sur nappe) ou par formation géologique (géothermie sur sondes).

La cartographie et la combinaison des cartes se font au moyen de logiciels de traitement cartographique (SIG) ; les données sont traitées sous forme de polygones correspondant au contour des aquifères issus de la BDLISA et de la carte géologique 1/50 000^{ème}, puis intégrées dans une grille avec des mailles de 200 mètres de côté. Toutes les cartes produites sont géo-référencées. Les données sont rassemblées dans une géodatabase, fournie dans le CD d'accompagnement du présent rapport.

Sa réalisation repose sur quatre étapes principales :

- le recueil de données,
- la cartographie unicritère,
- la cartographie multicritère,
- la cartographie du potentiel géothermique du grand Besançon.

4.1.1. Les étapes de réalisation de l'atlas du potentiel géothermique sur aquifère

Etape 1 : Recueil de données

Cette étape comprend le recueil de données relatives à chaque critère disponible au format numérique dans différentes bases de données, la numérisation et la bancarisation (mise en base de données) de données bibliographiques papier.

Il est important de noter que la réalisation de l'atlas repose avant tout sur le recueil de données et que la précision et la qualité des cartes produites est directement liée à la qualité et à la densité des données disponibles. Cette première étape est donc très importante ; elle permet de décider des options de cartographie à mettre en œuvre lors des étapes suivantes.

Les sources de données utilisées sont :

- BSS² : la Banque de données du Sous-Sol apporte des données sur la géométrie et la nature des formations géologiques, sur la piézométrie, la température et la productivité des aquifères ;
- ADES³ : la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines apporte des informations sur la température et la qualité physico-chimique des eaux souterraines ainsi que sur les profondeurs de niveaux d'eau complémentaires à la BSS ;
- BDLISA : le référentiel hydrogéologique français contient les contours des entités hydrogéologiques à 3 échelles de précision (N1 : nationale, N2 : régionale et N3 : locale) ;
- les Cartes géologiques BRGM au 1/50 000^{ème},
- la base bibliographique du BRGM,
- la base de données de l'ADEME,
- la base de données de l'ARS
- données des foreurs
- données des communes.

Etape 2 : Cartographie unicritère

a) Spatialisation des données

L'objectif de la spatialisation est de passer de données ponctuelles échantillonnées de manière aléatoire (données disponibles relatives à des ouvrages ponctuels) à une couverture régulière de valeurs estimées du critère considéré, et ce pour l'ensemble de la surface étudiée.

L'illustration 15 ci-dessous explicite le principe de spatialisation des données.

² Banque du sous-sol, accessible via <http://infoterre.brgm.fr>

³ Accès aux Données sur les Eaux Souterraines – <http://www.ades.eaufrance.fr>

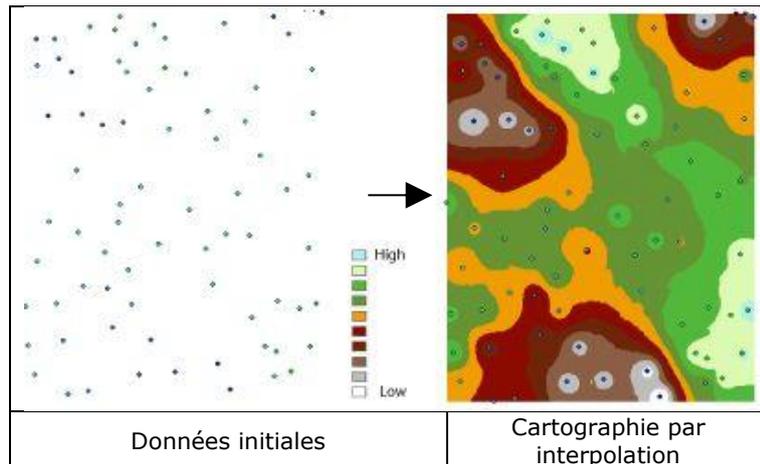


Illustration 15 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)

En d'autres termes, cela revient à estimer des valeurs de surface en des points non échantillonnés, sur la base des valeurs de surface connues des points environnants. Plusieurs approches existent.

En effet, le traitement réalisé pour aboutir aux cartes spatialisées a été différent selon l'aquifère et le critère considérés, en fonction de la quantité de données disponibles, leur homogénéité et leur répartition géographique.

Ainsi, plusieurs types de traitement ont été réalisés, faisant appel soit à une interpolation mathématique, soit à une approche statistique, soit à dire d'expert. Les principaux cas de figure rencontrés sont les suivants :

Approche statistique

Dans les cas où une interpolation mathématique n'était pas envisageable par manque de données, une analyse statistique a été réalisée. Lorsque les données disponibles ne présentaient pas une variabilité trop grande, la valeur moyenne a été attribuée au critère, pour l'ensemble de la zone considérée (aquifère ou formation géologique).

Approche « naturaliste »

Cette méthode consiste à confronter les données ponctuelles aux informations cartographiques (cartes géologiques, modèle numérique de terrain, cartes piézométriques...). Cette technique a été privilégiée sur les méthodes géostatistiques qui ne tiennent pas compte de la réalité de terrain.

Sectorisation du critère au sein d'un même aquifère

Lorsque les données ponctuelles pour un critère et un aquifère donné présentaient une forte variabilité selon la position géographique, une sectorisation de l'aquifère ou de la formation géologique a été réalisée, à l'aide des contours (hydro)géologiques, des cartes géologiques,... L'interpolation mathématique ou l'approche statistique a ensuite été réalisée pour chacun des secteurs définis au sein de l'aquifère.

Pour chaque critère et chaque élément étudié (aquifère ou formation géologique), toutes ces approches sont mises en œuvre. Leur pertinence vis-à-vis des données ponctuelles est ensuite évaluée, et permet de décider des méthodes de spatialisation les plus adaptées.

Ainsi, le traitement réalisé pour aboutir aux cartes spatialisées a été différent selon l'aquifère ou la formation géologique étudié(e) et le critère considéré, en fonction de la quantité de données disponibles, de leur homogénéité et de leur distribution géographique.

b) Classification des données et indexation des classes

Pour rendre lisibles les cartes de chaque critère, les données utilisées pour leur élaboration sont triées par classe. On affecte à chaque classe un index ou une note représentative du potentiel géothermique associé : note faible pour le potentiel le moins bon et note élevée pour le meilleur potentiel. Les notes varient de 1 à 4, de la situation la moins favorable à la géothermie très basse énergie, à la situation la plus favorable (Illustration 16).

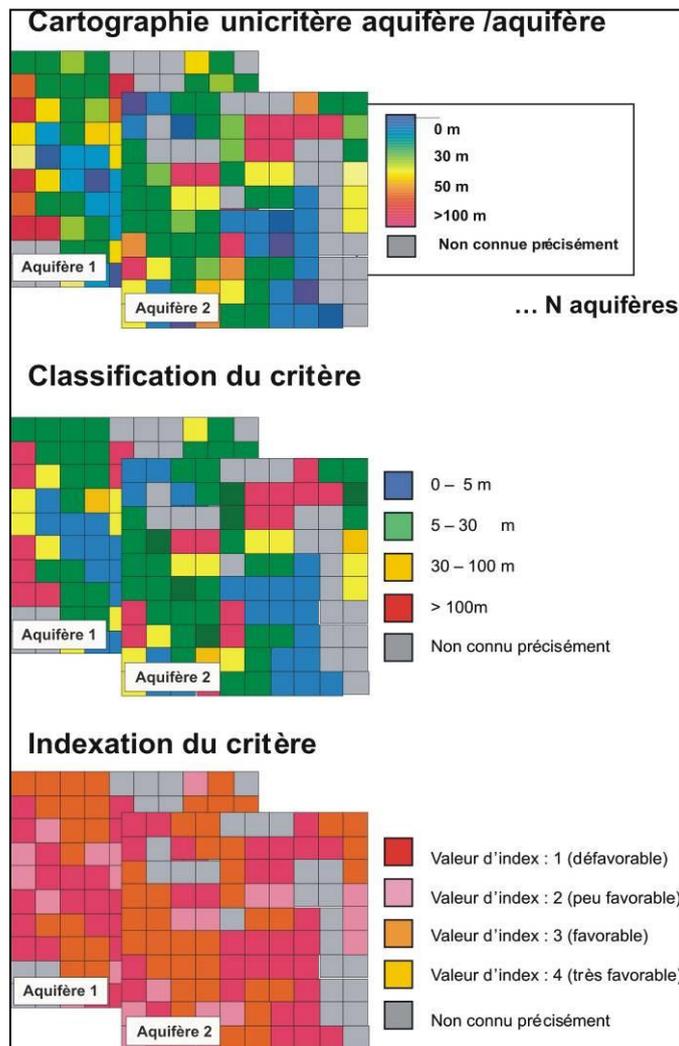


Illustration 16 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)

c) Cartographie de chaque critère

Afin d'apprécier le potentiel géothermique vis-à-vis de chaque critère, des cartes thématiques sont réalisées en tenant compte de la classification et de l'indexation des critères.

Ainsi pour le potentiel géothermique sur nappe, les cartes suivantes ont été créées :

- « profondeur d'accès à la ressource » ;
- « productivité de l'aquifère » (carte des débits exploitables) ;
- « température des eaux souterraines ».

Pour le potentiel géothermique sur sonde verticale, la carte suivante a été créée :

- nature des formations géologiques ;
- l'épaisseur des formations ;
- potentiel énergétique.

Etape 3 : Cartographie multicritère

a) Pondération des critères

Certains critères ont une influence plus forte que d'autres sur le potentiel géothermique de l'aquifère. Pour rendre compte de cet état de fait, un poids est attribué à chaque critère en fonction de son importance vis-à-vis du potentiel géothermique. Un poids fort est attribué aux critères les plus sensibles, un poids faible pour les critères moins importants.

Pour le potentiel géothermique sur sonde, il n'y a pas eu de pondération compte-tenu du fait qu'un seul critère a été utilisé pour le déterminer.

b) Cartographie du potentiel géothermique par aquifère

La carte du potentiel géothermique de chaque aquifère est obtenue par combinaison pondérée des cartes unicritères. Un indice de potentialité géothermique est calculé par addition pondérée des index de potentialité unicritère, attribués dans chaque maille de la grille cartographique. Une carte de répartition des indices de potentialité est alors établie ; elle correspond à la carte du potentiel géothermique de l'aquifère.

L'illustration 17, ci-dessous, présente le principe de la cartographie multicritères.

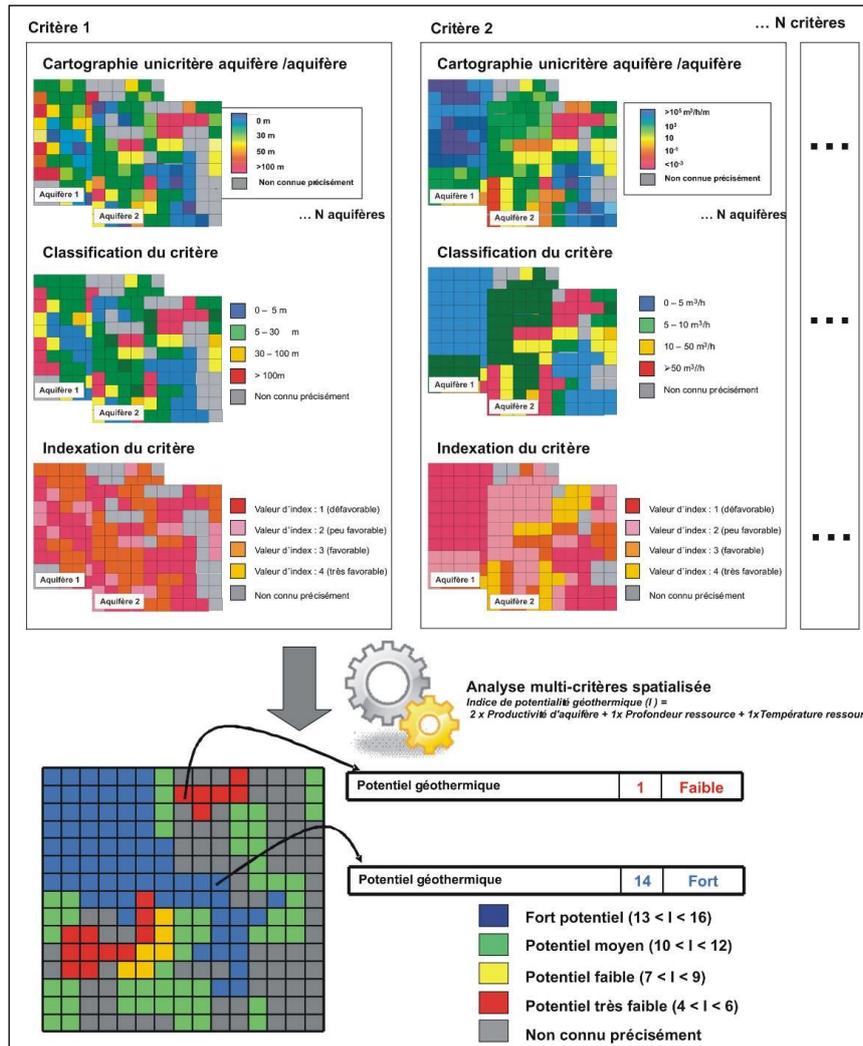


Illustration 17 : Principe de la cartographie multicritères

Étape 4 : Cartographie du potentiel géothermique

L'analyse multicritères conduit à l'élaboration d'une carte du potentiel géothermique. Une carte présentant le potentiel géothermique sur nappe et une seconde présentant le potentiel géothermique sur sondes verticales indiquant les secteurs favorables à l'implantation de pompes à chaleur sur nappe ou sur sondes verticales.

L'obtention de ces cartes passe par la sélection pour chaque maille de la grille cartographique, des meilleurs indices de potentialité géothermique parmi ceux calculés pour chaque aquifère et chaque formation géologique.

4.2. GEOTHERMIE SUR NAPPE

L'objectif de l'atlas est de réaliser une cartographie des possibilités d'utilisation de pompes à chaleur sur les principaux aquifères facilement accessibles dans le Grand Besançon. Il a été décidé en accord avec le grand Besançon de traiter uniquement les aquifères alluviaux, dont les potentiels géothermiques sont parmi les plus importants. Bien entendu, il existe d'autres aquifères dans ce territoire, comme présentés dans la description géologique et hydrogéologique (cf. chapitre 3.3). Ces derniers sont :

- soit mal connus et ne permettent pas de définir de façon fiable le potentiel géothermique à l'échelle régionale,
- soit l'exploitation est difficile à évaluer à une échelle locale du fait de la très grande hétérogénéité spatiale de leur productivité (formations calcaires). En effet les aquifères ont une productivité directement liée à la perméabilité des formations géologiques, qui, en domaine karstique ou fissuré, est très discontinue, c'est à dire très variable dans l'espace (perméabilité de fracture). Or, la méthodologie classiquement mise en œuvre pour l'évaluation du potentiel géothermique des aquifères n'a de sens qu'en domaine relativement continu (non karstique et non fissuré). Afin d'évaluer le potentiel en aquifère karstique, il sera nécessaire de réaliser une étude à l'échelle parcellaire.

Les aquifères alluviaux étudiés ont été sélectionnés dans les 2 grandes vallées alluviales identifiées sur le territoire du grand Besançon, pour rappel :

- au nord : la vallée de l'Ognon,
- traversant de part et d'autre le grand Besançon, la vallée du Doubs.

La réalisation de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères du grand Besançon se base sur les contours des aquifères alluviaux de la BD Lisa (Base de Données Limite des Systèmes Aquifères). En revanche la totalité des alluvions ne seront pas pris en compte dans l'évaluation du potentiel géothermique. En effet, n'ayant pas assez d'information sur les affluents du Doubs et de l'Ognon, la caractérisation du potentiel se révèle impossible, et une association du potentiel de la nappe d'accompagnement des 2 cours d'eau à celle des affluents ne serait pas pertinente. Le potentiel de ces affluents sera donc caractérisé comme étant « non connu précisément » Ces contours sont présentés dans la figure ci-dessous.

La liste des entités hydrogéologiques BD-Lisa concernées par ce projet est présentée en annexe.

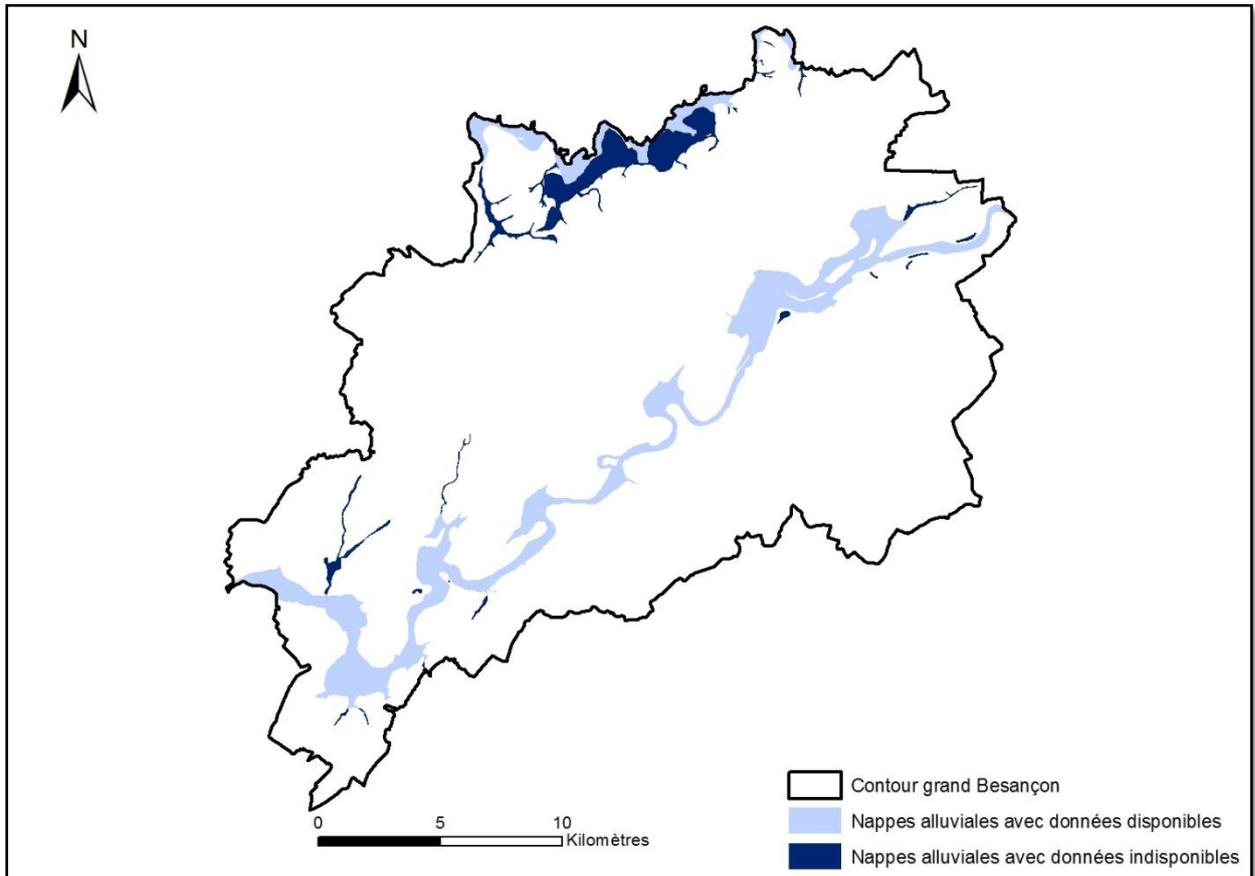


Illustration 18 : Localisations des différentes nappes alluviale de l'agglomération du grand Besançon

4.2.1. Critères de potentialité géothermique des aquifères

Pour rendre compte du potentiel géothermique à très basse énergie des aquifères superficiels, trois critères sont pris en compte :

- « Profondeur d'accès à la ressource » : il s'agit soit de la profondeur d'accès à l'eau pour les nappes phréatiques libres soit la profondeur d'accès à la formation géologique aquifère pour les nappes captives sous couverture ;
- « Productivité de l'aquifère » ou débit exploitable ;
- « Température de la ressource ».

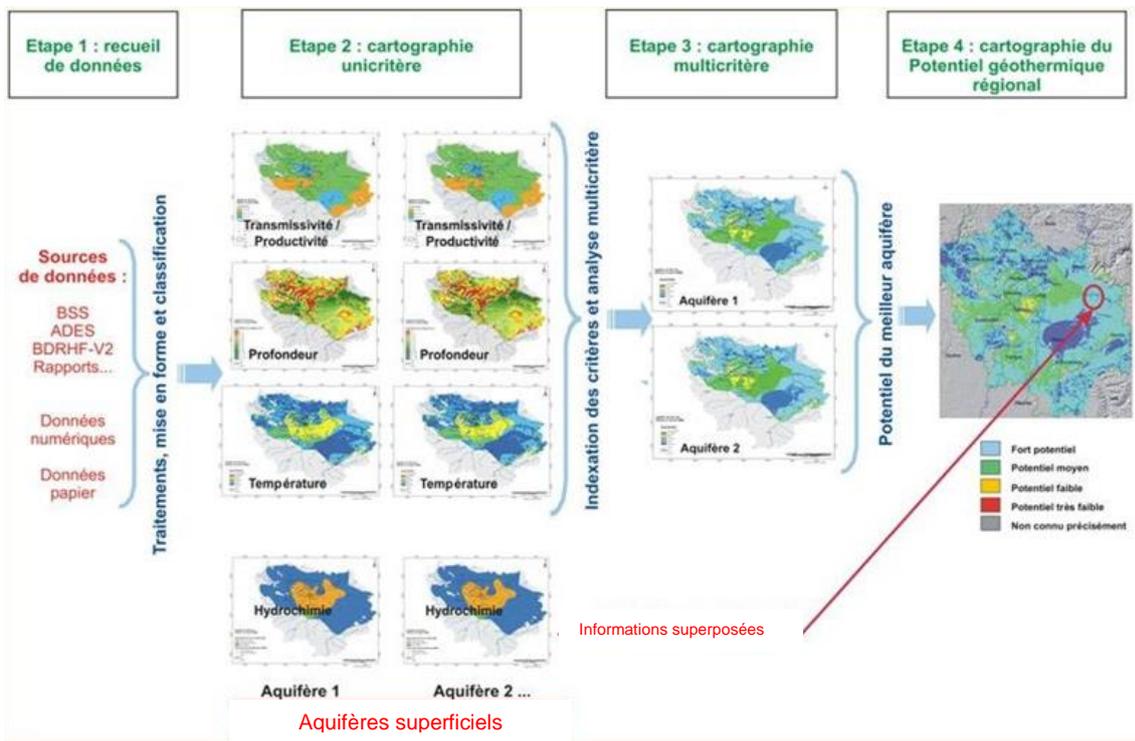


Illustration 19 – Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional

Les deux derniers critères sont représentatifs de la puissance thermique potentielle de l'aquifère pour un usage géothermique ; le premier est dit « économique » car il impacte directement le coût d'investissement et le coût d'exploitation d'un projet. Leur analyse simultanée permet de rendre compte de l'intérêt d'une opération de géothermie.

4.2.2. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique sur aquifère

1) Profondeur d'accès à la ressource

a) Définition

La profondeur d'accès à la ressource dans le cas d'un aquifère libre correspond à la piézométrie de la nappe. Dans le cas d'un aquifère captif, elle correspond à la profondeur du toit de l'aquifère considéré (cf. Illustration 20 ci-dessous).

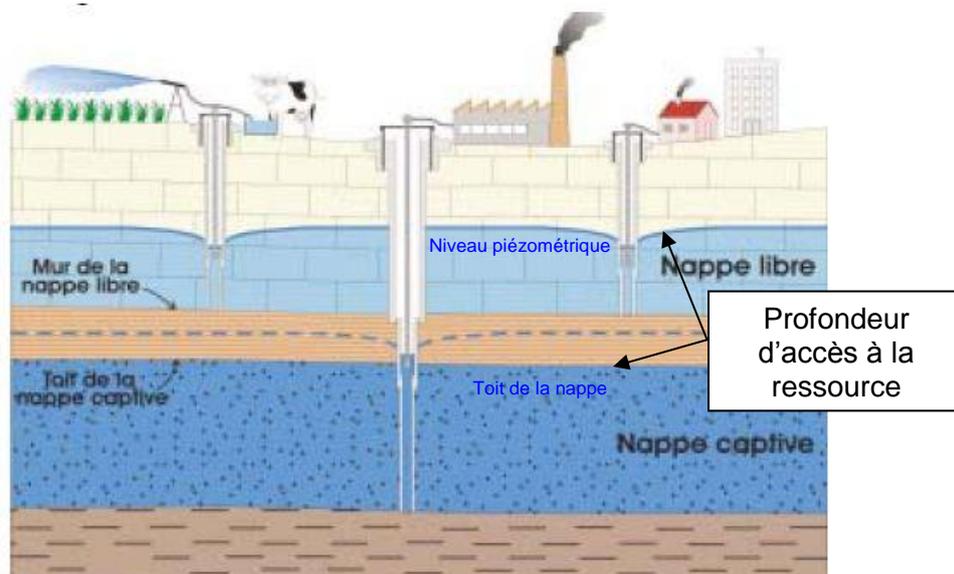


Illustration 20 : schéma explicitant les différents régimes de nappe (source BRGM)

Ce critère rend compte de deux aspects de la potentialité géothermique d'un aquifère :

- le coût de l'opération : coûts de foration (directement liés à la profondeur des forages), coûts d'équipement (type et puissance de pompe liée à la hauteur de refoulement) et coûts de fonctionnement (consommation électrique de la pompe) ;
- le risque que la surcote piézométrique provoquée par l'injection de l'eau prélevée, soit défavorable au projet (débordement de nappe, ennoyage d'aménagements souterrains).

b) Sources de données

Les données prises en compte pour la cartographie de ce critère sont les valeurs ponctuelles de piézométrie disponibles en BSS, dans ADES et dans la bibliographie existante.

c) Données disponibles

Grâce à l'exploitation de la BSS, c'est un total de 398 valeurs ponctuelles qui ont été utilisées pour la caractérisation du paramètre « profondeur de la ressource ». Le nombre de données par zone est assez homogène (Illustration 21), hormis pour le système alluvial de l'Ognon, où on observe une densité de points plus faible.

La faible densité de points d'accès à la nappe alluviale de l'Ognon peut s'expliquer par la présence d'une population et une occupation des sols moins importantes que dans la vallée du Doubs et donc des besoins en eau limités. De plus, les cours d'eau sont ici de moyenne à petite taille, leur nappe d'accompagnement est donc moins importante et donc moins favorable pour l'exploitation notamment en eau potable.

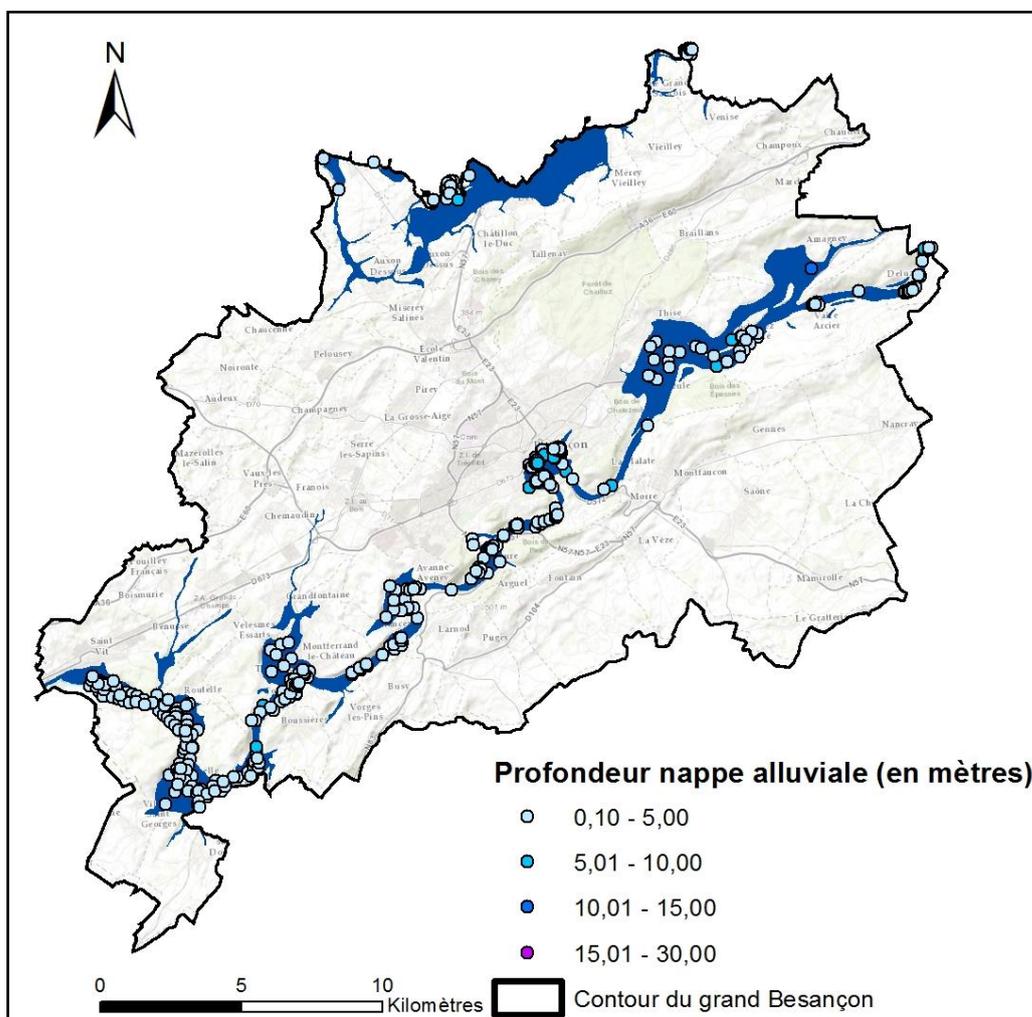


Illustration 21 : localisation de la données ponctuelle concernant la profondeur d'accès aux nappes alluviales

Le tableau présenté en Illustration 22 détaille de façon précise les données des différents secteurs. Ainsi, on peut remarquer que la profondeur d'accès à la nappe est très variable allant d'une dizaine de centimètres à plusieurs mètres. Toutefois lorsqu'on réalise une moyenne de l'ensemble des profondeurs d'accès à la nappe pour chaque vallée, on constate que l'on trouve des valeurs quasi équivalentes se situant à une profondeur proche de 3 mètres.

Zone	Surface hors affluents et zone « non connues précisément » (km ²)	Nombre de points	Profondeur de la ressource en eau		
			Min (m/sol)	Max (m/sol)	Moyenne [médiane] (m/sol)
Alluvions du Doubs	37,6	356	0,1	20	3,6 [3,3]
Alluvions de l'Ognon	7,2	42	0,6	19,1	3 [2,1]

Illustration 22 : Tableau explicatif présentant les données disponibles par nappe alluviale

d) Classification

En fonction des données disponibles à l'échelle de l'étude, la classification retenue pour le critère d'accès à la ressource est la suivante :

Classe de la profondeur d'accès à la ressource	Commentaire
0 m < Profondeur < 15 m	Forage de moindre coût permettant la réalisation économique d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon, <u>mais avec risque de surcote piézométrique à l'injection, en cas de nappe comprise entre 0 et 5 m</u>
15 m < Profondeur < 30 m	le coût du forage pèse fortement sur l'économie d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon
30 m < Profondeur < 200 m	le coût du forage ne peut être amorti que par une forte consommation en surface (petit collectif ou ensemble de plusieurs pavillons)

Illustration 23 : Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte

e) Méthode de spatialisation des données

Sur les 398 valeurs de profondeur de nappe obtenues (Doubs et Ognon), toutes se situent dans la tranche 0 à 15 mètres de profondeur, c'est-à-dire dans la tranche la plus favorable pour un projet de PAC. Ainsi la totalité des valeurs recueillies sont comprises dans la première classe de profondeur « 0 – 15m ». Une interpolation spatiale des données serait donc inutile car aucune donnée n'est en dehors de cette classe. Par conséquent, les nappes alluviales de l'Ognon et du Doubs ont été classées dans la première tranche de profondeur, ce qui correspond globalement à la classe de toutes les nappes alluviales, sauf exceptions.

Toutefois, il faut prendre en compte le fait qu'une nappe présente à une profondeur de moins de 5 mètres (ce qui représente 89% des données) peut entraîner un risque de surcote piézométrique au niveau du forage de rejet si l'aquifère est peu transmissif et s'il possède un faible coefficient d'emménagement. Ainsi, les eaux de rejet de la PAC peuvent entraîner un débordement de la nappe.

En effet, plus une transmissivité et le coefficient d'emménagement sera élevée, plus le milieu aura de la facilité à faire écouler/infiltrer l'eau. A contrario, un milieu peu transmissif avec un faible coefficient d'emménagement aura des difficultés pour faire infiltrer ou s'écouler l'eau, ce qui peut engendrer dans certains rares cas, des problèmes d'inondation.

Les aquifères étudiés dans ce projet correspondent à des aquifères alluviaux qui sont composés majoritairement de sables et graviers. Ces formations sont généralement connues pour avoir de fortes valeurs de transmissivité. Les risques de surcote, lors de la réinjection, devraient être donc limités. Toutefois, ce paramètre sera à vérifier par les maîtres d'ouvrage lors de la réalisation de projet de géothermie sur nappe.

f) Carte du critère profondeurs d'accès à la ressource spatialisées

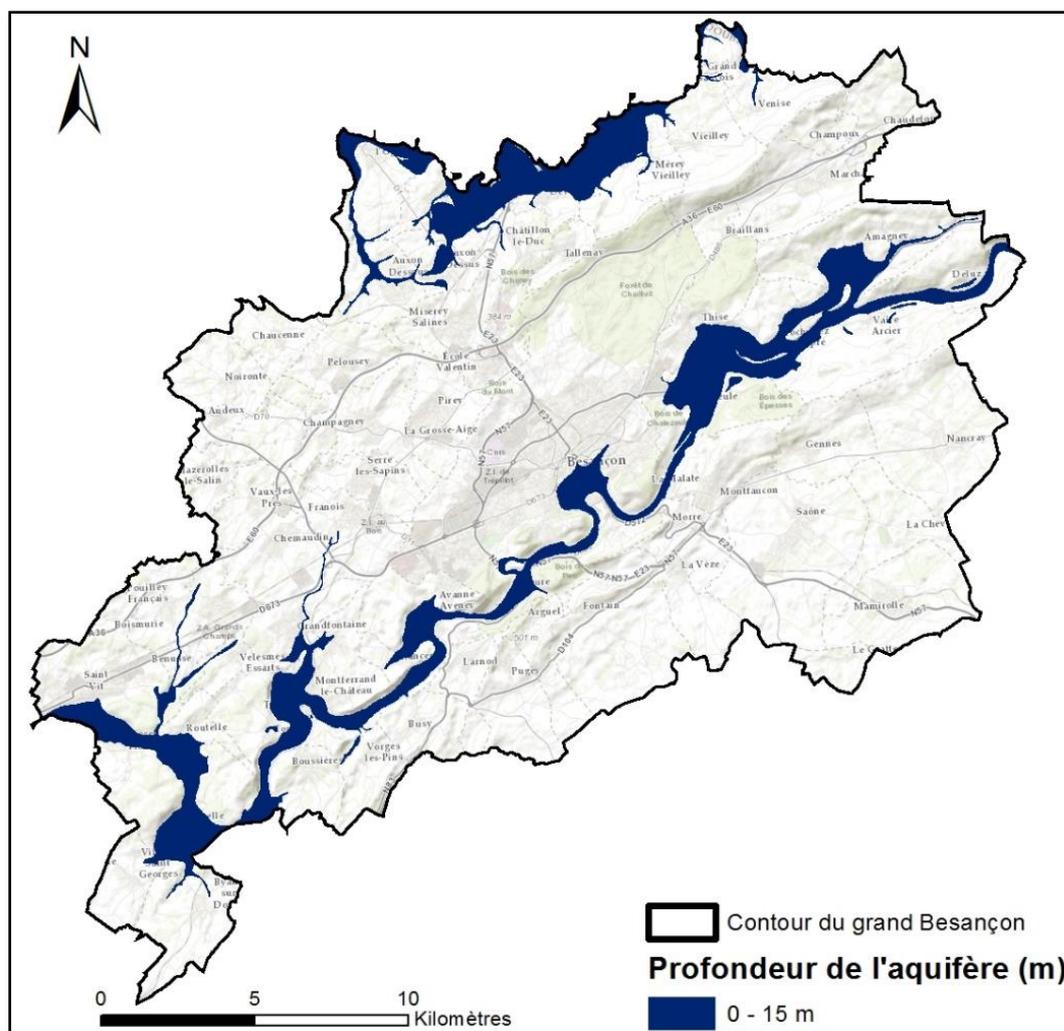


Illustration 24 : Carte de la spatialisation des profondeurs des nappes alluviales de l'agglomération du Grand Besançon

2) Productivité des aquifères

a) Définition et sources de données

La productivité d'un aquifère correspond à l'évaluation de la ressource en eau extractible du réservoir aquifère. Les données de base utilisées pour l'évaluer sont :

- La transmissivité (notée T) et la perméabilité (notée k) : paramètres intrinsèques à l'aquifère (représentant sa capacité de production), très représentatifs de la ressource. Les données de perméabilité doivent être couplées aux données d'épaisseur mouillée d'aquifère (notée e) pour reconstituer les données de transmissivité ($T = k \times e$).
- L'épaisseur mouillée de l'aquifère (e), correspond à la différence entre la profondeur de la base de l'aquifère et la profondeur du niveau piézométrique observé au droit de l'ouvrage.

Les données de base pour T et k sont issues des rapports de pompages d'essai (souvent archivés en BSS). La densité de ces données intrinsèques est faible, ce qui rend difficile leur exploitation pour une cartographie régionale. Pour l'épaisseur mouillée, les données proviennent des coupes lithologiques des ouvrages, archivées en BSS.

- Le débit spécifique (noté Q_s) : correspond au rapport du débit pompé dans un ouvrage rapporté à la hauteur de rabattement dans l'ouvrage.

Ce paramètre est représentatif des propriétés de l'aquifère, mais également des propriétés techniques des ouvrages de captage. Il est donc moins représentatif de la ressource que la transmissivité.

Les données de base sont l'ensemble des mesures ponctuelles de débits/rabattement disponibles en BSS et les résultats de pompage d'essais réalisés lors d'études antérieures.

- Les débits de production de forage : ce paramètre correspond à des débits exploitables, mais est surtout représentatif des propriétés techniques des ouvrages de captage et des besoins associés aux usages de la ressource. Il est peu représentatif de la capacité de production de la ressource proprement dite mais présente un nombre de données important notamment grâce aux ouvrages AEP (Alimentation en Eau Potable) suivis par l'Agence Régionale de Santé (A.R.S).

b) Données disponibles

Dans le cadre de ce projet, une partie des données de productivité provient de la base de données de l'ARS, qui possède des données relatives aux débits règlementaires de chaque captage d'alimentation en eau. Les autres données proviennent de la bibliographie et d'études diverses réalisées sur la vallée alluviale du Doubs.

Aucune données de productivité n'a pu être récoltée pour les alluvions de l'Ognon.

C'est un total de 21 valeurs de productivité qui ont été récoltées au niveau de la nappe des alluvions du Doubs. La répartition des données obtenues pour le critère « productivité de la nappe » est présentée dans la figure suivante (Illustration 25).

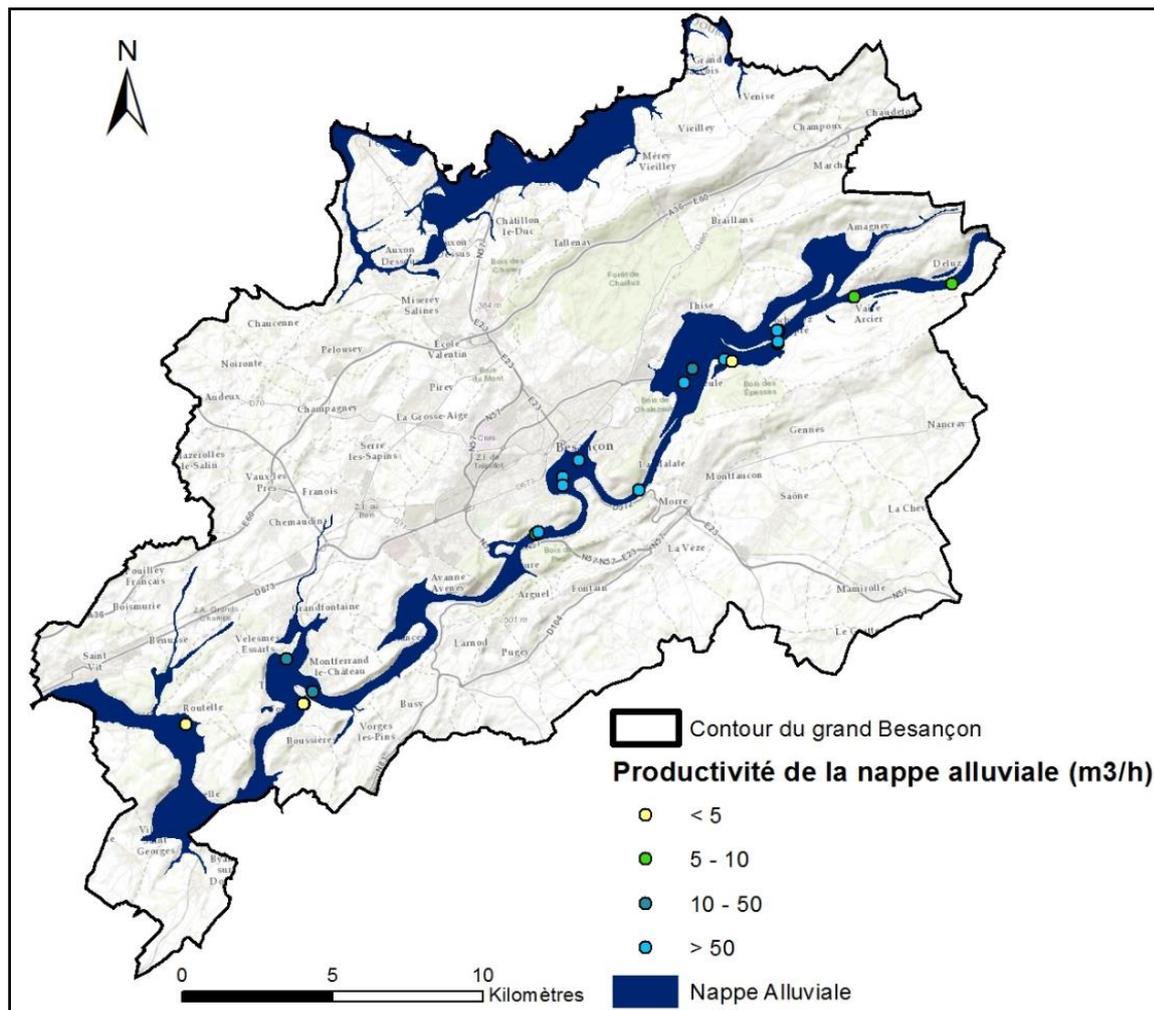


Illustration 25 : Carte de la répartition de la données ponctuelle relative à la productivité des nappes alluviales

Remarque : Les débits de prélèvements des captages AEP, utilisés dans ce projet, sont établis au regard des besoins d'une commune ou d'un ensemble de population. On ne caractérise donc pas de façon précise la productivité de l'aquifère. Cependant, cela nous permet tout de même d'approcher la capacité de production de la nappe. En effet, les valeurs obtenues au droit des captages AEP indiquent que la nappe exploitée est capable de produire au minimum ces débits (en prenant en compte les caractéristiques techniques propres du forage). Ces débits d'exploitation sont, en effet, dépendants de l'hydrodynamisme de la nappe mais également des caractéristiques techniques des forages et des puits (diamètre, épaisseur d'eau,...).

Toutefois, la méthode établie pour la réalisation de l'Atlas du potentiel géothermique définit les classes de productivité selon des fourchettes de valeurs relativement larges. Les classes correspondant à un potentiel géothermique favorable, pour ce critère, débute à partir d'une productivité de 10 m³/h. Or les données obtenues au droit des captages AEP sont, pour la plus part, égales ou supérieures à cette valeur. Ainsi, l'utilisation de ces données de productivité, qui ne correspondent pas réellement à la productivité réelle de l'aquifère, n'est pas une limite à la

caractérisation de ce paramètre. Il est cependant vrai, que l'apport de données plus précises, si elles existaient aurait permis d'obtenir un rendu plus réaliste concernant ce critère.

L'utilisation de ces données AEP confère donc une imprécision à l'atlas au regard de ce critère.

c) Classification retenue

La classification retenue pour le critère « productivité de l'aquifère » est la suivante :

Classe de productivité	Commentaire
$Q_{\text{exploitable}} < 5 \text{ m}^3/\text{h}$	Le risque d'échec de production est élevé. La ressource est considérée comme faible.
$5 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{\text{exploitable}} < 10 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d'envisager le chauffage de logements individuels.
$10 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{\text{exploitable}} < 50 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d'envisager le chauffage de bâtiments de 1 000 à 5 000 m ² .
$Q_{\text{exploitable}} > 50 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d'envisager le chauffage de bâtiments supérieurs à 5 000 m ² .

Illustration 26 : Classes de productivités prises en compte

d) Méthodes de spatialisation des données

Le choix de la méthode de spatialisation des données dépend essentiellement de la nature et de la disponibilité des données de base, qui conditionnent elles-mêmes la précision du zonage et sa représentativité des hétérogénéités régionales.

Pour ce critère de productivité de l'aquifère, compte-tenu de la faible densité des données disponibles, l'approche naturaliste a été mise en œuvre, avec attribution d'une valeur de productivité unique par aquifère (ou secteur d'aquifère), correspondant à la moyenne des données du secteur considéré.

e) Carte régionale de productivités des aquifères spatialisées

Des valeurs de débits spécifiques relevés à Palise sont de l'ordre de $1.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, ce qui correspond, pour un aquifère épais de 5 m, à un débit d'exploitation de $18 \text{ m}^3/\text{h}$. Des valeurs de débits spécifiques 10 fois plus importantes ont également été mesurées sur la commune de Boulot, et en aval de cette commune. Des débits d'exploitations de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ seraient alors envisageable (sous réserve de réaliser une étude plus poussée). Cependant l'ensemble du secteur étudié ne peut être classé dans la tranche de débit exploitable supérieur à $50 \text{ m}^3/\text{h}$, faut de retours d'expérience attestant des débits réels pouvant être exploités.

La nappe alluviale de l'Ognon s'est donc vu attribuer la tranche de productivité $10 - 50 \text{ m}^3/\text{h}$. Cependant, seule la zone alluviale principale, la nappe d'accompagnement de l'Ognon peut être classée dans cette tranche. Tous les petits cours d'eau affluents ne peuvent être classés,

du fait de l'extrême pauvreté des données concernant ces zones et du fait de la faible capacité aquifère de ces zones alluviales, composées d'alluvions plus anciens. Il est important de noter que la nappe alluviale de l'Ognon est principalement captive, en charge sous la couche argilo-limoneuse superficielle.

La nappe alluviale du Doubs quant à elle, a été intégrée dans la tranche de productivité supérieure à 50 m³/h, du fait des bonnes productivités observées, que l'on peut étendre à toute la vallée alluviale du Doubs, du fait que sa géométrie et sa géologie soient quasiment identique tout le long de la nappe du Doubs observée. Des valeurs de plus de 100 m³/h sont exploitées au niveau de Besançon ou de Vaire-Arcier. Des valeurs entre 10 et 50 m³/h sont exploitées plus en aval, mais sont plus faibles car les besoins du secteur sont moindres. La capacité d'exploitation de la nappe peut être bien supérieure. La nappe alluviale est similaire tout du long, composée d'alluvions quaternaires sous recouvrement sablo-limoneux. On observe une relation nappe-rivière assez marquée, avec la nappe du substratum qui alimente la nappe du Doubs en période d'étiage.

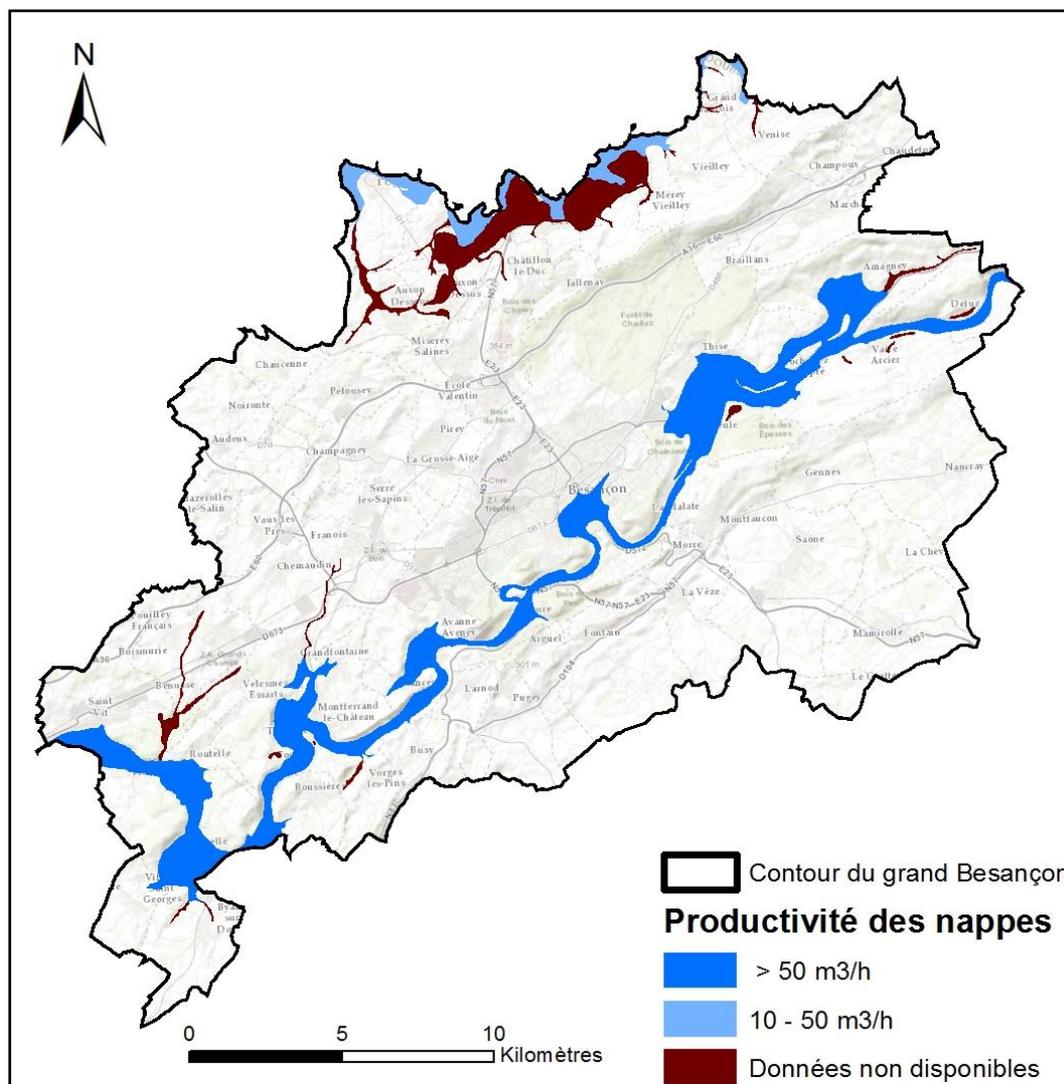


Illustration 27 : Carte de la spatialisation du paramètre productivité des nappes de l'agglomération du Grand Besançon

3) Température de la ressource

a) Sources de données

Les données prises en compte pour la cartographie de ce critère sont les suivantes :

- mesures ponctuelles en forage issues de la BSS ;
- mesures présentes dans la Banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) ;
- mesures ponctuelles issues de la recherche bibliographique.

Les chroniques de températures sont issues de la base de données ADES.

b) Données disponibles

C'est au total près de 24 points de mesures de température qui ont été récoltés pour cette étude. La répartition de ces données est présentée dans la figure suivante (Illustration 28) :

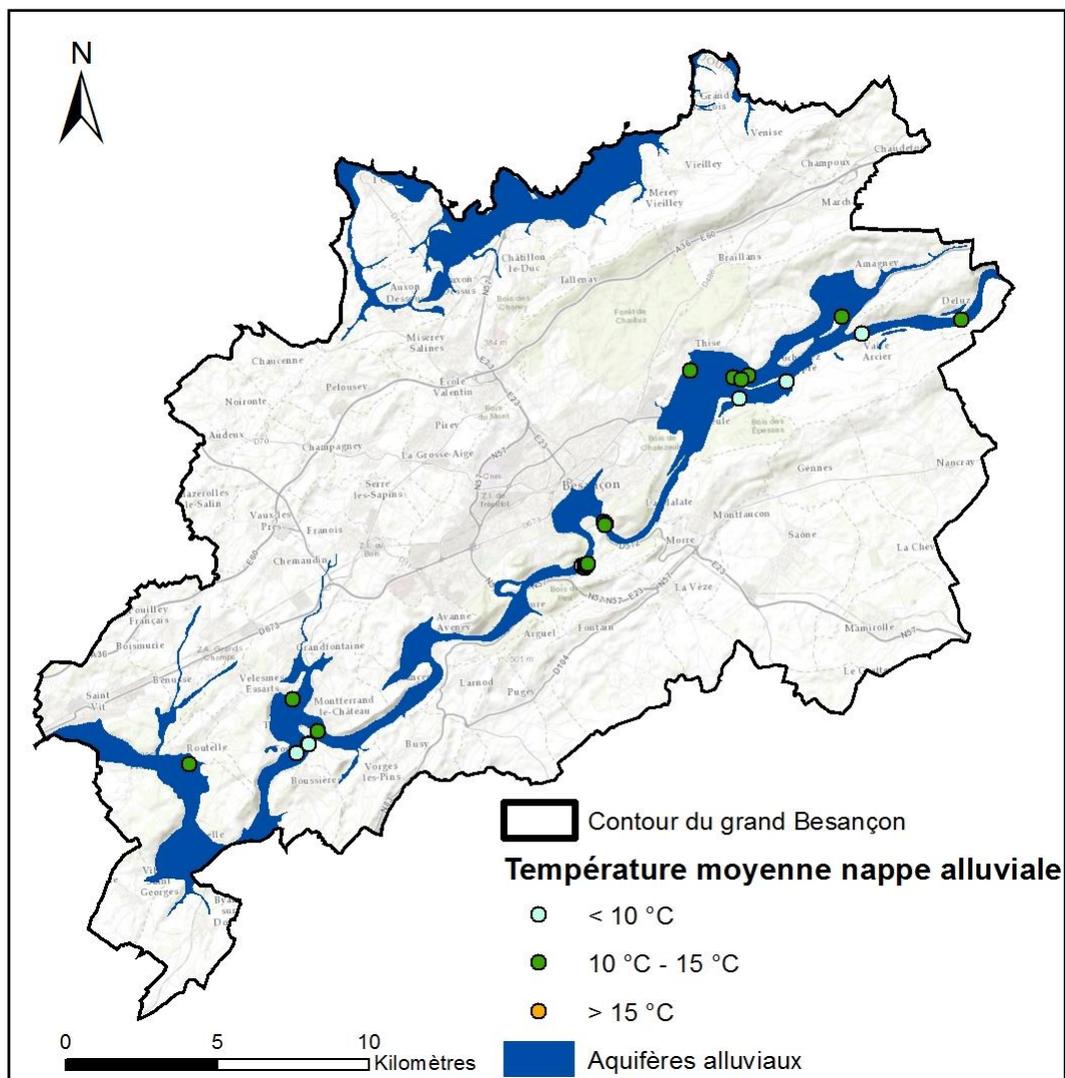


Illustration 28 : Répartition géographique de la données ponctuelle concernant la température de la ressource en eau

c) Classification retenue

La classification retenue pour le critère température, basée sur l'évolution du degré d'efficacité d'une PAC utilisée en mode chauffage en fonction de la température de la ressource, est la suivante :

Classe de température	Commentaire
Température < 10°C	Diminution des performances pour le fonctionnement d'une PAC en mode chauffage.
10°C ≤ Température < 15°C	Très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage et climatisation et au free-cooling.
T > 15°C	Diminution des performances pour le fonctionnement d'une PAC en mode climatisation.

Illustration 29 : Classes de températures d'aquifère prises en compte

d) Méthodes de spatialisation des données

Les données utilisées pour déterminer le critère température correspondant à des chroniques de température, il a fallu simplifier celles-ci en ne proposant qu'une température par point d'information. La valeur médiane a été utilisée pour caractériser les valeurs de température entre les différents aquifères. La valeur médiane a été préférée car c'est une valeur plus robuste que la moyenne qui est plus affectée par les valeurs extrêmes.

Pour la nappe alluviale de l'Ognon, aucune station de mesure ne se trouvait dans notre zone d'étude, qui est très petite si l'on regarde l'étendue totale de la nappe alluviale de l'Ognon. Cependant, d'autres stations de mesures, situées sur l'Ognon, ont été sélectionnées afin de pouvoir analyser les chroniques de température. L'ensemble des températures relevées se trouvaient dans la tranche 10-15 °C. Malheureusement, le manque de données nous empêche de réaliser des études plus poussées, notamment statistiques.

Concernant la nappe alluviale du Doubs, 4 stations possédant de longues chroniques de températures ont été sélectionnées, sur un tronçon allant de Montbéliard à Dole. Les valeurs de températures relevées au sein des alluvions du Doubs sont principalement comprises entre 10 et 15 °C. Seuls quelques points de mesures ont des températures en deçà ou au-delà de la tranche 10-15 °C.

En observant les données brutes, nous avons observé une certaine disparité des valeurs de températures au sein d'une même chronique. A savoir que ces chroniques sont des valeurs de températures mesurées au fil de l'année sur chaque station.

En réalisant des graphiques regroupant l'ensemble des valeurs de chaque chronique de chaque station de la nappe du Doubs, nous avons noté une variabilité saisonnière des températures des nappes alluviales (Illustration 30 et Illustration 31) allant dans des températures plus froides en hiver (10-11 °C), et plus chaudes en été (15-16 °C). Ces variations de températures n'auraient donc qu'un impact minime sur les performances des PAC.

L'analyse des données de température de la nappe des alluvions du Doubs mets également en exergue le réchauffement des eaux alluviales, qui augmente en moyenne de près de 3°C (Illustration 31) sur une période de 29 ans. Toutefois ces données sont à prendre avec précaution compte-tenu du fait que ces observations ont été réalisées seulement à partir de 4 stations de mesures. Mettre en place un vrai réseau de mesure pourrait non seulement améliorer les connaissances de la nappe alluviale du Doubs, mais également d'observer les impacts directs du changement climatique et de l'urbanisation sur cette nappe, et ainsi mieux faire face, et surtout prévoir les changements à venir.

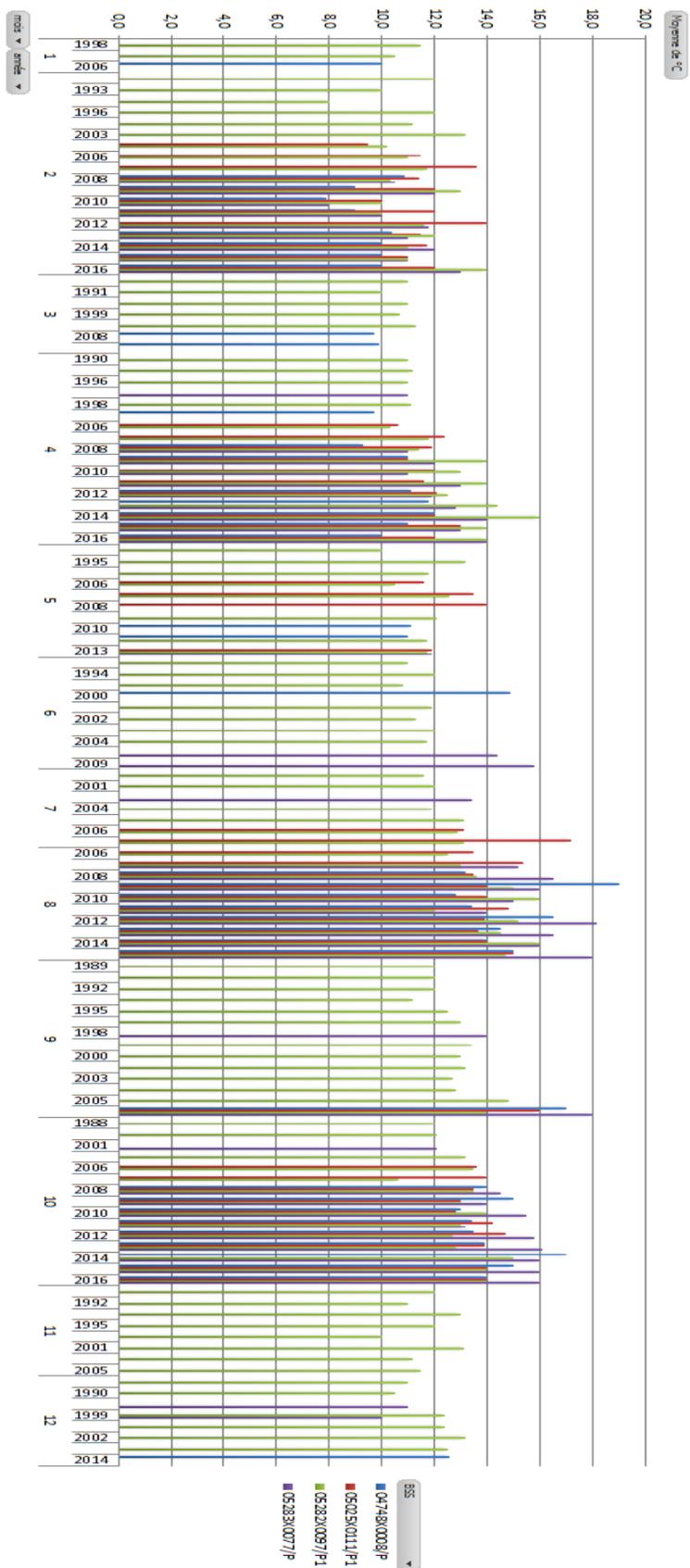


Illustration 30 : Graphique présentant les chroniques de températures relevées par 4 stations le long du Doubs, année par année et mois par mois

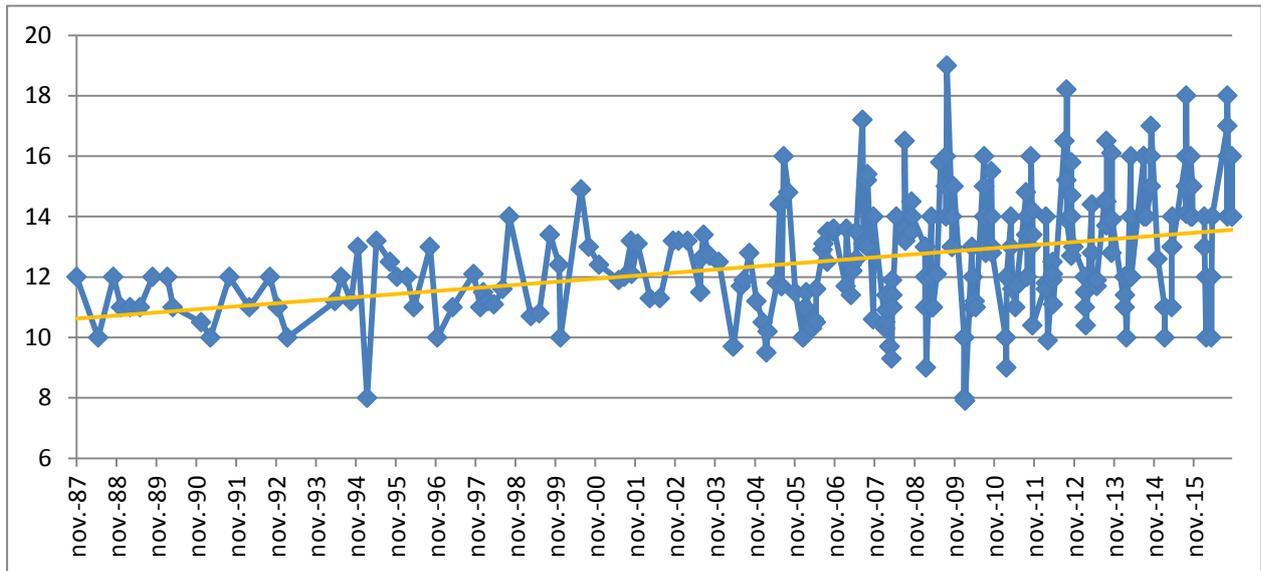


Illustration 31 : Graphique présentant l'ensemble des chroniques de température des 4 stations sélectionnées, de 1987 à 2016

e) Carte régionale de température des aquifères spatialisées

La valeur médiane des températures des nappes alluviales est d'environ 12 °C, ce qui, pour un projet de géothermie très basse énergie sur nappe est tout à fait acceptable, voire optimal.

En conséquence de ces résultats, nous avons décidé d'attribuer directement la classe 10-15 °C à tous les aquifères (Illustration 32). Aucune interpolation ne sera réalisée pour ce paramètre.

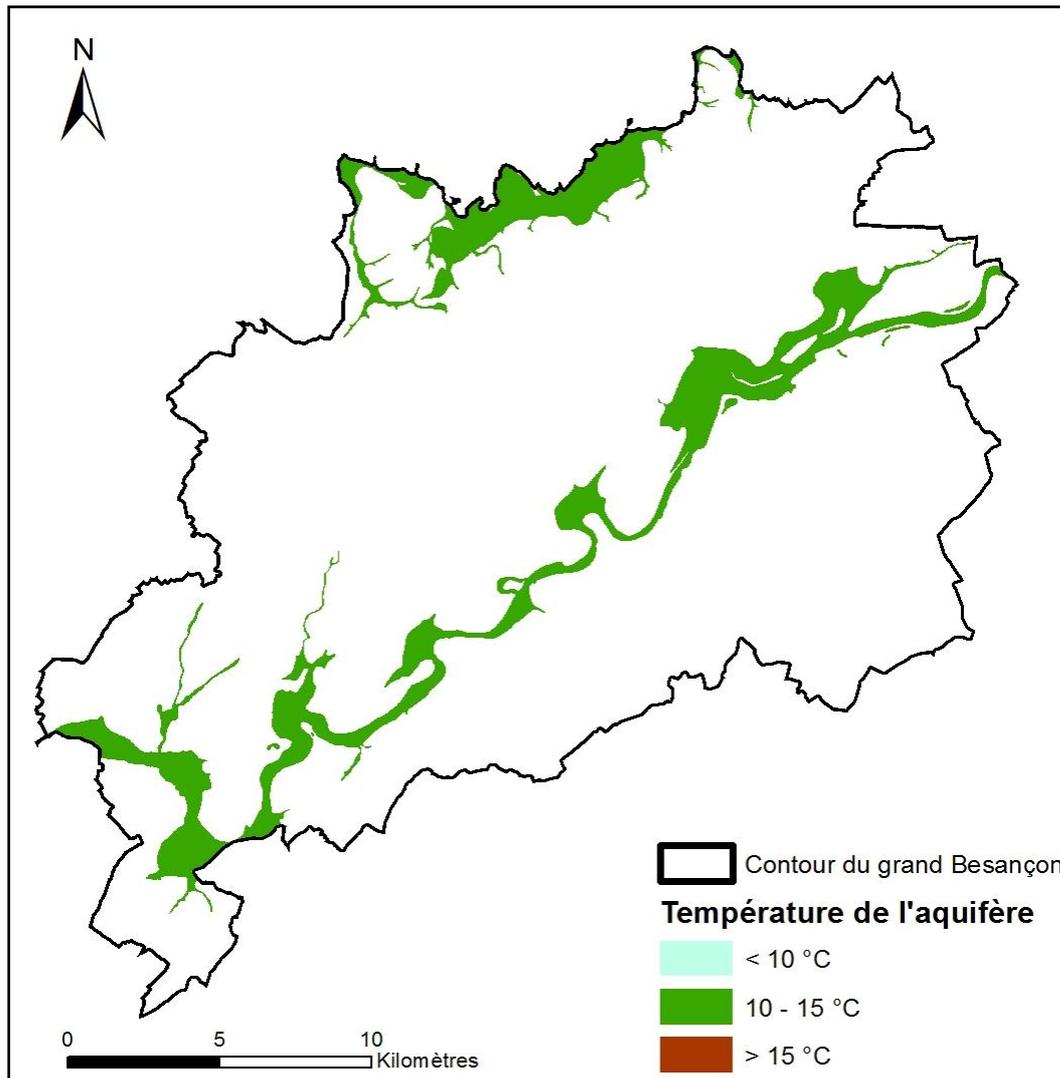


Illustration 32 : Carte de la spatialisation du paramètre température de la ressource en eau

4.2.3. Bilan de la classification et de l'indexation des critères

La classification retenue pour les différents critères de potentialité géothermique ainsi que leur indexation est présentée en Illustration 33, ci-après.

Critère de potentialité géothermique	Classification de critères	Indexation des classes	Potentiel géothermique
Profondeur d'accès à la ressource	0 m < Prof < 15 m	4	Très favorable
	15 m < Prof < 30 m	3	Favorable
Productivité de l'aquifère	Q < 5 m ³ /h	1	Défavorable
	5 m ³ /h < Q < 10 m ³ /h	2	Peu favorable
	10 m ³ /h < Q < 50 m ³ /h	3	Favorable
	Q > 50 m ³ /h	4	Très favorable
Température de la ressource	T < 10°C	2	Peu favorable
	10°C ≤ T < 15°C	4	Très favorable
	T > 15°C	3	Favorable

Illustration 33 : Classification et indexation des critères de potentialité géothermique

Après avoir procédé au recueil des données de base, réalisé des cartes spatialisées par critère et par aquifère (à partir des données de base ponctuelles), il a été procédé à une analyse simultanée de ces cartes par le biais d'un calcul automatisé multicritères, mené sous SIG. Ce calcul aboutit à une carte du potentiel géothermique pour chaque aquifère.

La méthode de calcul employée a été fixée nationalement, afin d'homogénéiser les rendus des atlas des différentes régions.

Cette méthode revient à évaluer la potentialité géothermique uniquement sur la base des critères productivité, température et profondeur d'accès.

Le code de calcul multicritères pris en compte est le suivant :

$$\text{Potentiel géothermique} = 2x (\text{Productivité de l'aquifère}) + 1x (\text{Température}) + 1x (\text{Profondeur d'accès})$$

4.2.4. Cartes du potentiel géothermique des aquifères

La carte, présentée ci-dessous (Illustration 34) est le résultat final de cet atlas, concernant la potentialité géothermique très basse énergie des nappes alluviales.

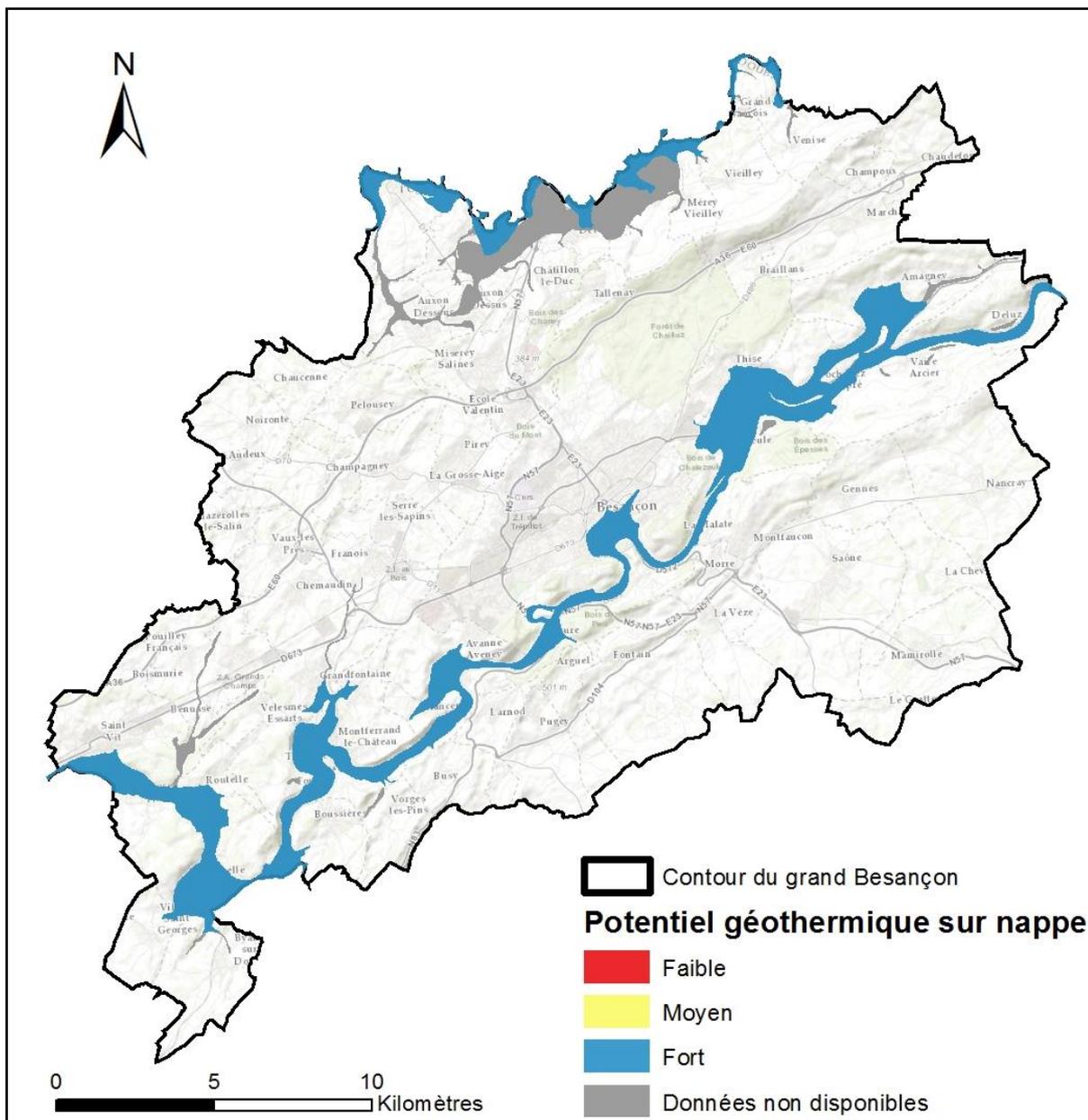


Illustration 34 : Carte du potentiel géothermique sur nappe de l'agglomération du Grand Besançon

L'ensemble des nappes alluviales, après calcul, a été classée en potentiel favorable. Ceci n'est pas surprenant, par rapport aux caractéristiques hydrogéologiques des nappes alluviales, notamment celles d'accompagnement des principaux cours d'eau de la région (Ognon, Doubs), qui sont des nappes peu profondes et dont la productivité est souvent bonne. Seules certaines zones restent sans potentiel du fait du manque de données disponibles au niveau de ces zones.

4.2.5. Limites de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères

L'atlas a été réalisé à une échelle recouvrant le grand Besançon à savoir la vallée du Doubs et de l'Ognon. La qualité et la répartition des données qui ont permis d'établir cet atlas n'étaient pas homogènes. La zone de la commune de Besançon présentait une quantité de données relativement importante alors que certains territoires en présentaient très peu (toute la vallée de l'Ognon, la partie amont du Doubs de la zone étudiée).

La représentativité de l'information n'est donc pas homogène sur l'ensemble des territoires étudiés et cela n'a pas permis de spécialiser ces données de façon géostatistique mais plutôt de manière statistique, naturaliste ou encore par sectorisation.

D'autre part, la qualité des données utilisées pour effectuer cet atlas était variable selon les paramètres pouvant ainsi engendrer quelques approximations. En effet, le critère « productivité de la nappe », faute de données précises, a été principalement défini à partir des valeurs de débit réglementaire d'exploitation des captages AEP (Alimentation en Eau Potable). Or, si ces débits ont bien été définis en prenant en compte les capacités de la nappe, le deuxième paramètre pris en compte est le besoin d'une population. De ce fait, certaines valeurs ont tendance à minimiser la capacité de production réelle de la nappe.

Toutefois si ces approximations existent bien, nous pouvons également mettre en avant le fait que la méthode employée pour définir le potentiel géothermique très basse énergie ne nécessite pas une précision importante de la donnée car le processus est établi selon un système de notes définies selon des fourchettes de valeurs relativement larges.

L'échelle cartographique de l'atlas est de 200 mètres / 200 mètres, correspondant à une précision au 1/20000.

Nous rappelons que l'atlas constitue ainsi une première approche à destination des maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les informations transmises ne peuvent et ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire.

4.3. GEOTHERMIE SUR SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

On présente dans ce chapitre le potentiel géothermique du grand Besançon à partir de sondes géothermiques verticales. Le travail est réalisé sur la base d'un découpage spatial en cellules de 200 mètres de côtés, similaire et concordant avec le découpage ayant prévalu dans le cadre de la géothermie sur nappe.

Un projet de capteurs géothermiques verticaux par forage ne peut être bien conçu et bien réalisé que s'il s'appuie sur une *bonne connaissance préalable du sous-sol*, notamment de la nature et de la profondeur probable des couches géologiques et des niveaux aquifères.

Ainsi, la méthodologie développée pour évaluer le potentiel géothermique du sous-sol pour la mise en place de sondes verticales en circuit fermé s'appuie sur cette problématique. Elle vise à déterminer les formations géologiques favorables, sur les 200 premiers mètres de profondeurs, pour la mise en place de sondes.

Deux méthodes d'approche ont été testées, ayant pour objectif de caractériser la nature géologique des terrains présents sur les 200 premiers mètres de profondeur et d'en déduire leur plus ou moins grande aptitude à la mise en place de dispositifs géothermiques sur sonde en circuit fermé :

- 1^{ère} méthode : spatialisation de la lithologie grâce à une interpolation (ArcGIS) basée sur les informations contenues dans les logs géologiques disponibles sur chaque point de la BSS.
- 2^{ème} méthode : délimitation de grandes zones géologiques à partir de l'étude des cartes géologiques et des logs géologiques présents dans la BSS afin de faire ressortir les zones plus ou moins favorables à la géothermie sur sonde verticale.

Faute de données ponctuelles disponibles en répartition et en quantité suffisantes, la première méthode ne présente pas de résultats assez réalistes et pertinents pour être choisie. La seconde méthode a donc été privilégiée et mise en œuvre à l'échelle de la zone d'étude retenue pour ce projet, afin de rendre compte du potentiel du sous-sol pour la mise en place de sondes géothermiques en circuit fermé.

Elle est explicitée dans les paragraphes suivants. Les résultats de cette méthodologie sont très étroitement liés à la quantité et à la qualité des données disponibles ; ils ne peuvent être dissociés de l'échelle de l'étude qui limite dès le départ la précision des résultats obtenus. Des études plus locales devront bien évidemment être réalisées dans le cas de l'implantation d'un projet de géothermie sur sondes verticales.

4.3.1. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique

La nature des formations géologiques est un élément essentiel pour la mise en place de sondes géothermiques, principalement en raison de leur conductivité thermique, qui peut faire varier le rendement d'un projet du simple au double. La présence de cavités, notamment les cavités naturelles (boyaux karstiques) peuvent entraîner des déperditions d'énergie si le puits de forage passe par l'une de celles-ci.

D'autres paramètres, principalement liés à l'installation elle-même, entrent en compte dans la productivité de l'installation :

- La température des terrains ;
- La température du fluide caloporteur ;
- Le type de fluide caloporteur ;
- La résistance thermique du forage (type de coulis de remplissage) ;
- Le type de sonde ;
- La longueur de la (des) sonde(s) verticale(s).

Tous ces paramètres ne peuvent pas être pris en compte dans cet atlas, car différents en fonction de chaque installation, et en fonction des foreurs. Seuls les paramètres « naturels », c'est-à-dire la température mais surtout la capacité énergétique des terrains peuvent être étudiés dans le cadre de ce projet.

Le principe développé dans ce projet est donc le suivant :

Sur la base du maillage de 200 mètres sur 200 mètres de côté, il est estimé la puissance extractible au sein de chaque maille avec une estimation d'une puissance spécifique (Psp exprimée en Watt/mètres), correspondant à la puissance moyenne restituable par un mètre de terrain traversé par une sonde verticale d'échange calorifique avec le sous-sol.

C'est pourquoi, une base de données Excel (Illustration 35) a été réalisée afin de retranscrire les différentes lithologies correspondantes aux différentes profondeurs étudiées pour l'agglomération du grand Besançon. Afin d'avoir une base de données précise, il a été décidé de renseigner la lithologie dominante par tranche de 10 mètres, de 0 à 100 mètres de profondeur, et par tranche de 20 mètres, de 100 à 200 mètres de profondeur.

Les données de forage utilisées pour la réalisation de cette base de données sont celles provenant de la base de données du sous-sol (BSS) ou les données de forages obtenues directement auprès des foreurs. Ce sont les logs géologiques des forages présentant plus ou moins précisément les lithologies au droit de chaque point qui ont été analysés pour cette partie du projet. Ainsi, seule la lithologie dominante a été renseignée par tranche de 10 mètres. Si par exemple on a sur 10 mètres, 6 mètres d'argiles et 4 mètres de sables, seuls les 6 mètres d'argiles seront renseignés correspondant donc à une simplification de la lithologie.

Tous les forages présents dans les zones étudiées et d'une profondeur supérieure à 20 mètres ont été saisis dans cette base de données, sous réserve qu'il y ait un log géologique présent dans le dossier BSS.

Au total, ce sont plus de 289 logs géologiques qui ont été renseignés dans cette base de données.

lien	0-50 m																		50-100					
	0-10m			10-20m			20-30m			30-40m			40-50m			50-60m		60-70m		70-80m				
	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin	nom	% domin						
05023X0004	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
05024X0001	100	Argile	2	60	marne	2		gypse	0		gypse	0		gypse	0		gypse	0		gypse	0			
05026X0001	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
04728X0057	100	Argile	2	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	100		
05026X0002	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
05028X0072	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05023X0005	100	Argile	2	100	Argile	2	100	Argile	2	100	Argile	2	100	Argile	2	55	calcaire	3	100	Argile	2	100		
05024X0082	100	Calcaire	3	100	calcaire	3	80	calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05024X0014	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05023X0001	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
05023X0002	60	Marne	2	100	Marne	2	80	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
05024X0044	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05023X0013	60	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	60	Calcaire	3	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100		
05023X0065	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	60	calcaire	3	100	Marne	2	100	marne	2	60	marne	2	60		
05031X0072	100	alluvion	3	60	Marne	2	100	Marne	2	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05023X0066	100	marne	2	100	marne	2	100	marne	2	60	calcaire	3	100	Marne	2	100	marne	2	60	marne	2	60		
05292X0015	80	Marne	2	100	Marne	2	40	Gypse	0	100	Marne	2	60	Marne	2	70	calcaire	3	90	Marne	2	100		
05024X0022	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05027X0629	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	70	Calcaire	3	100		
05024X0050	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05024X0051	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	50	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05035X0007	30	Marne	2	50	Marne	2	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
05024X0018	30	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05028X0017	65	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	63	calcaire	3	100	Calcaire	3	55	Marne	2	100	calcaire	3	70		
05028X0417	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05028X0020	40	Marne	2	65	Marne	2	65	Marne	2	75	Calcaire	3	65	Calcaire	3	67	Calcaire	3	97	Calcaire	3	62		
05028X0416	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05024X0045	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100	Calcaire	3	100		
inconnu	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100	Calcaire	3	100	calcaire	3	100	calcaire	3	100		
05023X0003	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	60	calcaire	3	100	Marne	2	100		
05027X0613	100	Calcaire	3	53	Marne	2	100	Calcaire	3	72	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	60	Calcaire	3	100		
05023X0011	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	100	Marne	2	70	Gypse	0	80	Marne	2	100	Calcaire	3	100		

Illustration 35 : Tableau récapitulatif des lithologies dominantes sur les tranches de profondeur 0-50m, 50-100 m et 100-200m des forages de la BSS de plus de 20 m présents sur les zones d'études

Les logs qui ont été dépouillés pour cette étude atteignent des profondeurs comprises entre 20 et 200 mètres. La majorité des coupes de forages utilisés ont une profondeur comprise entre 20 et 40 mètres comme le montre le graphique ci-dessous (Illustration 36) :

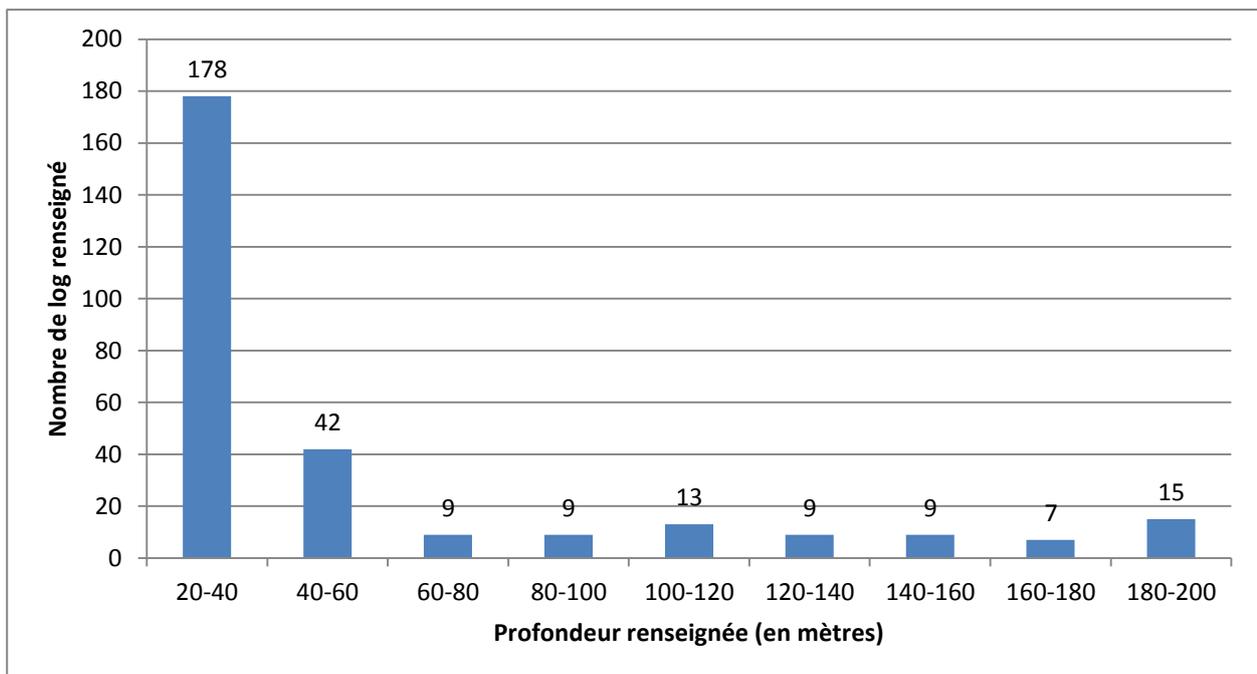


Illustration 36 : Répartition des différents logs en fonction de la profondeur de lithologie renseignée

Le nombre de log disponible est assez conséquent, cependant, leur répartition géographique n'est pas homogène.

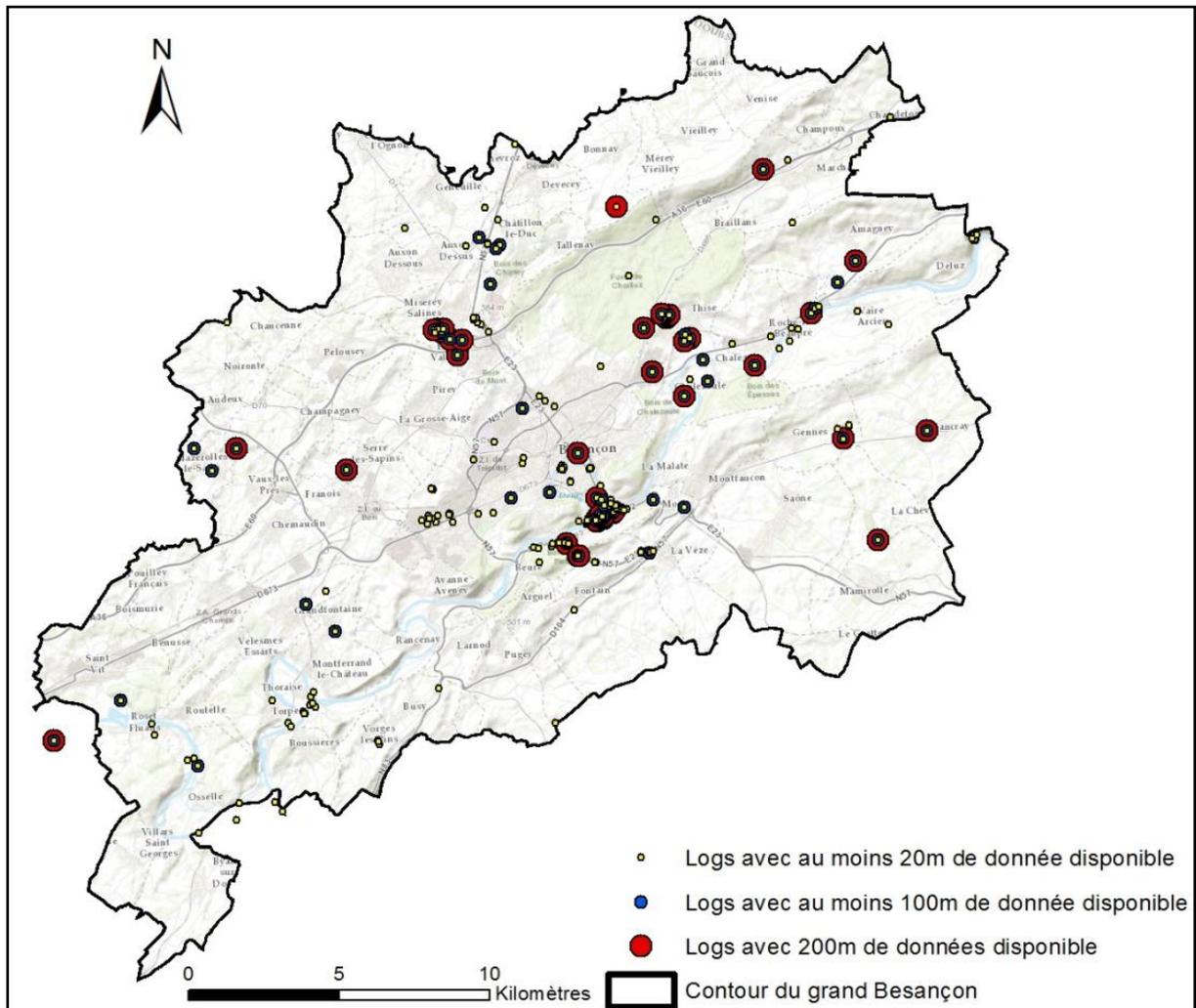


Illustration 37 : Répartition de la donnée ponctuelle des logs géologiques, avec l'épaisseur de lithologie renseignée

Les différents types de lithologie sont ensuite associés à des « puissances spécifiques », en W/m, correspondant à la puissance moyenne restituable par un mètre de terrain traversé par une sonde verticale d'échange calorifique avec le sous-sol.

Chaque type de roche se voit donc attribuer une valeur moyenne Psp, issue de la moyenne des données empiriques trouvées dans la littérature (Pahud, 2002). Quatre classes de puissance spécifique ont conduit à quatre Psp moyennes. Elles sont synthétisées dans les tableaux de l'illustration 38.

Classe (= note)	1	2	3	4
Critère	défavorable	peu favorable	favorable	très favorable
Gamme Puiss. spec.	<= 25 W/m	25 à 55 W/m	55 à 70 W/m	> 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	12 W/m	40 W/m	62 W/m	75 W/m

CODE	TYPE ROCHES	NOTE	FAMILLE
1	Calcaires massifs ; Calcaires ; Calcaires et dolomies	3	Roches sédimentaires carbonatées
2	Calcaires mameux ; Calcaires et mames ; Calcaires argileux, Calcaires gréseux, Calcaires quartzeux, Calcaires siliceux, Calcaires finement lités, Travertins	2	
3	Mames ; Mamo-calcaire ; Calcaire et mamo-calcaire	2	
4	Dolomies	3	
5	Sables ; Galets ; Dunes marines ; alluvions	1	Roches sédimentaires détritiques non consolidées
6	Grès ; Molasses ; Loess ; Pérites ; Argilites, Calcarénites, Calcaires sableux	3	Roches sédimentaires détritiques consolidées
7	Conglomérats ; Poudingues ; Brèche ; Moraines ; scories et tufs volcaniques ; Cargneules, formations volcano-détritiques ou volcano-sédimentaires	3	
8	Flyschs	3	
9	Granite ; Microgranite ; Aplites ; Pegmatites ; Lamprophyre ; Gabbros ; Diorites	4	Roches magmatiques plutoniques
10	Basalte ; Rhyolite ; coulée de rhyolite et filon de rhyolite ; Laves dacitiques ; Andésites	3	Roches magmatiques volcaniques
11	Gneiss ; Cipolins ; Marbre ; Eclogites, Dolérites, Ophiolites ; Leptynites	4	Roches métamorphiques
12	Schistes ; Micaschistes ; calcschiste ; Quartzites (car souvent intercalés dans schistes et micaschistes) ; Houllier	4	
13	Migmatites ; anatexites ; agmatites	4	
14	Amphibolites	4	
15	Alluvions ; Formations anthropiques ; Eboulis ; Terres noires ; Tourbes récentes ; Gypse ; Moraines	2	Autres
16	Argiles ; Limons	2	

Illustration 38 : Liens entre les puissances spécifiques et les notes appliquées dans chaque cellule, et affectation de notes à différents types de roches, d'après les puissances spécifiques qui leur sont attribuées dans la littérature.

La puissance spécifique moyenne a été renseignée pour chaque log lithographique des forages de la BSS recensés dans le tableau présenté ci-dessus (Illustration 35) par tranche de 10 mètres de 0 à 100 mètres de profondeur, et par tranche de 20 mètres de 100 à 200 mètres de profondeur.

Dans les zones où il n'existait pas ou peu de forages avec des logs lithologiques permettant de connaître la succession et la nature des couches géologiques et donc la capacité énergétique de celles-ci, nous nous sommes alors appuyés sur les cartes géologiques au 1/50000 qui décrivent de façon précise les terrains géologiques.

Ces données ont ensuite été importées sur le logiciel ArcGIS, afin d'être spatialisées et ainsi permettre de voir sur carte, la localisation des différents logs lithographiques, et de voir la puissance spécifique moyenne du sous-sol, de manière ponctuelle, par tranche de profondeur (0-50 mètres ; 50-100 mètres et 100-200 mètres).

Cette cartographie des logs lithographiques a ensuite été associée aux cartes géologiques au 1/50000 dont les notices nous donnent de précieux renseignements sur les lithologies en profondeurs, ainsi que l'épaisseur des couches, complétant l'analyse des logs lithologiques. C'est à partir de l'analyse de ces logs et de ces cartes géologiques qu'il a pu être délimité les différents potentiels géothermiques des formations géologiques des territoires étudiés.

4.3.2. Potentiel géothermique du sous-sol

Comme le montre la figure suivante, la zone d'étude comporte 2 grands types de lithologie (formations du cénozoïque mises à part) :

- Les calcaires du Jurassique supérieur et moyen
- Les marnes du Jurassique moyen et inférieur et du Trias

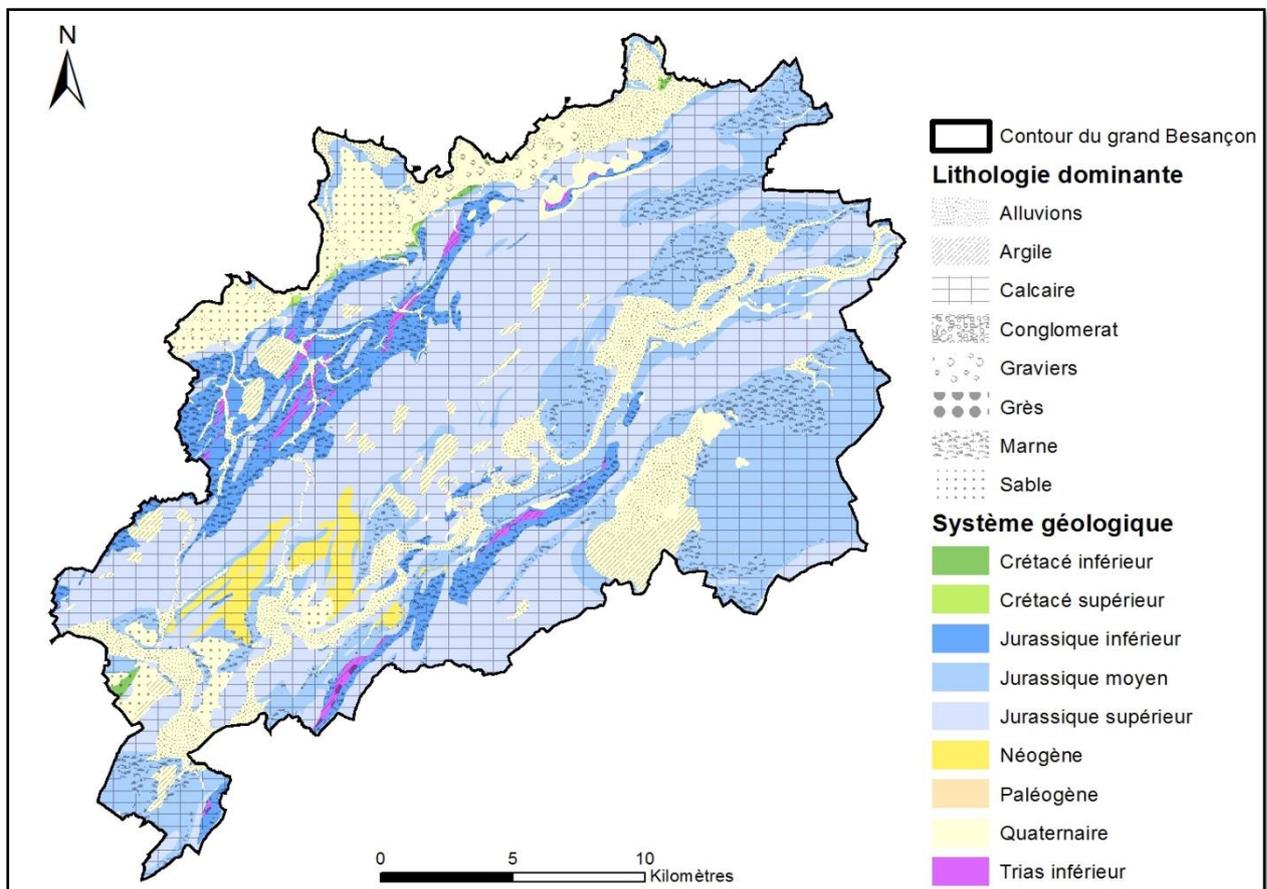


Illustration 39 : Présentation de la géologie (lithologie et stratigraphie) de l'agglomération du Grand Besançon

4.3.3. Carte du potentiel géothermique sur sonde verticale

Ainsi, en suivant la classification établie dans le tableau présenté en Illustration 38, nous obtenons un découpage par potentialité illustré ci-dessous :

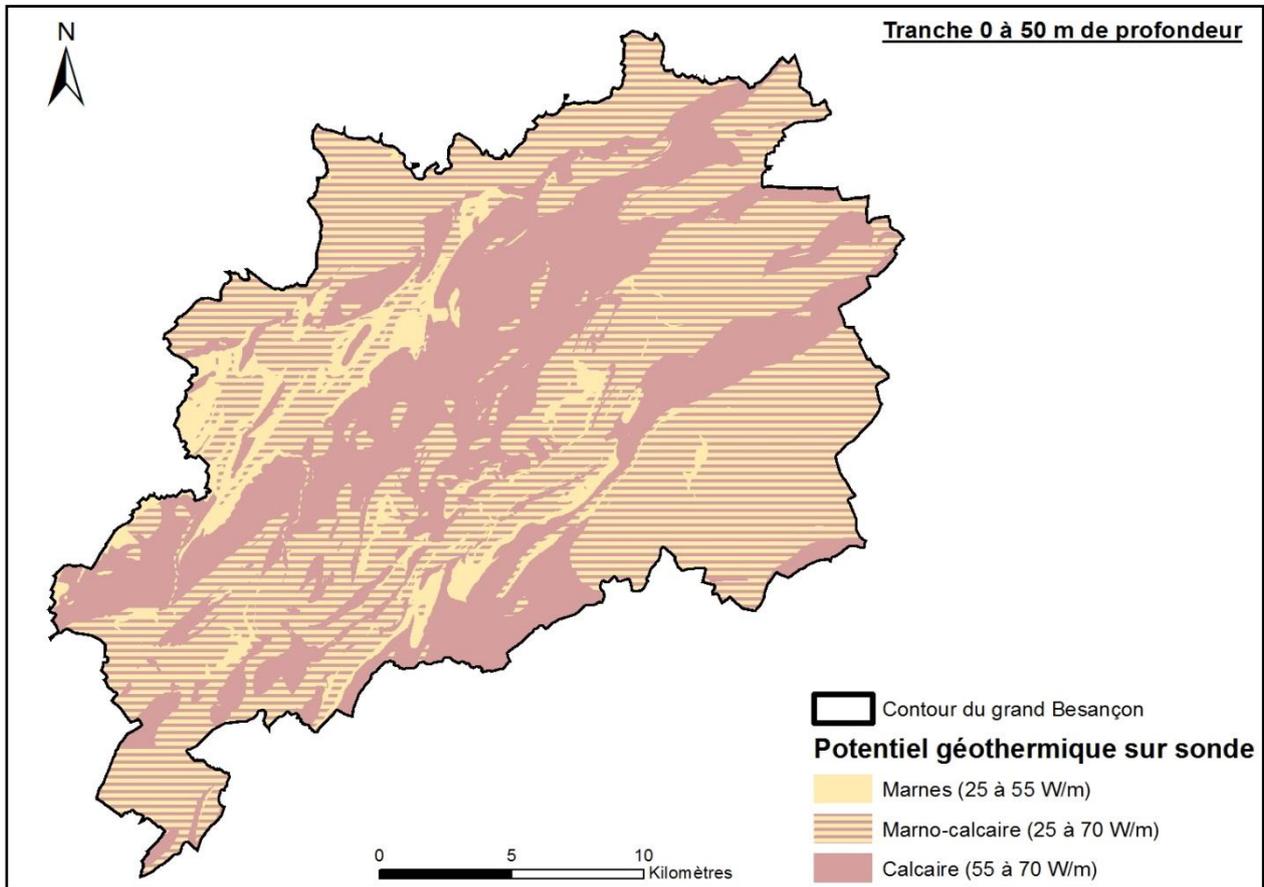


Illustration 40 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 0 à 50 mètres

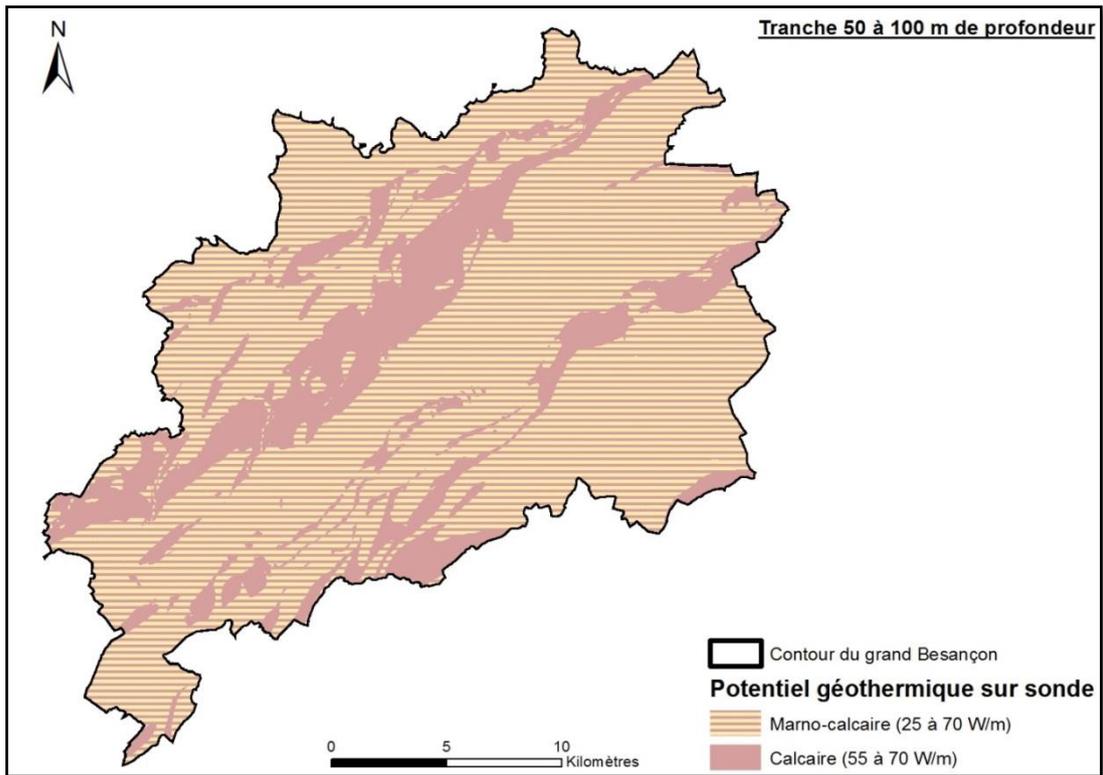


Illustration 41 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 50 à 100 mètres

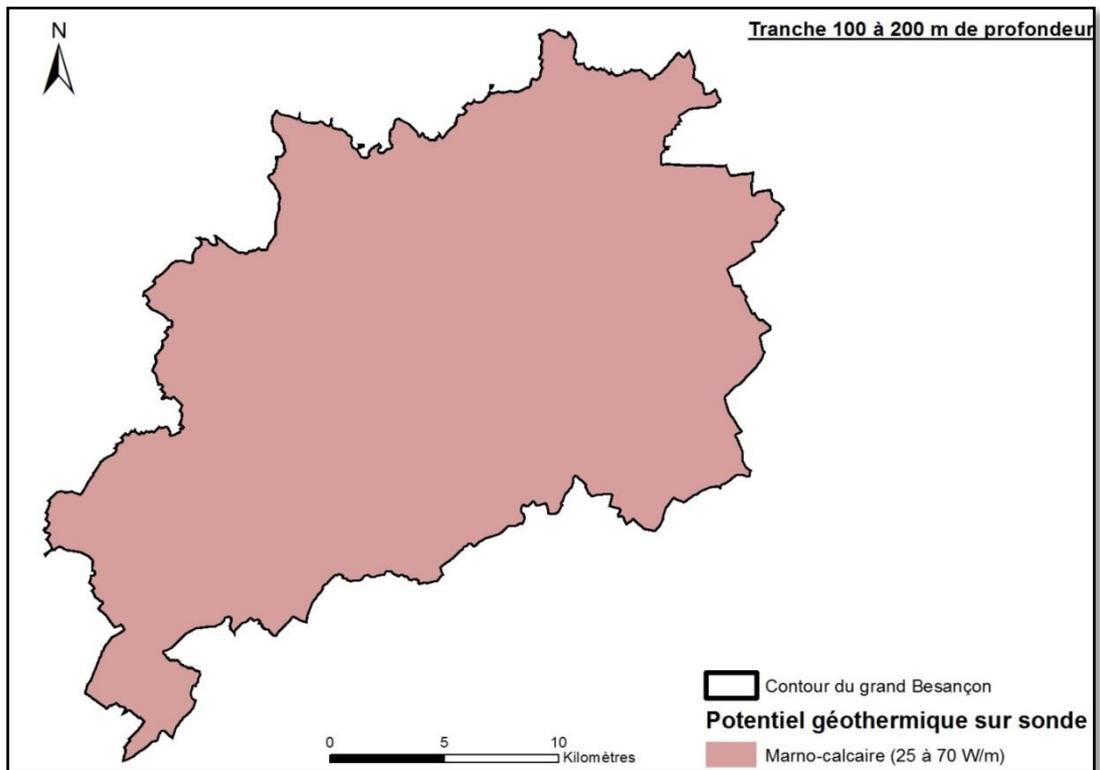


Illustration 42 : Potentiel géothermique sur sonde du Grand Besançon sur la tranche de profondeur 100 à 200 mètres

Un tableau récapitulatif du potentiel géothermique en fonction des lithologies vous est présenté ci-dessous :

Lithologie	Marnes	Zone de transition Marno-calcaire	Calcaires
Classe (=note)	2	2 à 3	3
Potentiel	modérément favorable	de modérément favorable à favorable	favorable
Gamme Puiss. Spec.	25 à 55 W/m	25 à 70 W/m	55 à 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	40 W/m	48 W/m	62 W/m

Illustration 43 : Tableau récapitulatif du potentiel géothermique en fonction des lithologies dominantes présentes sur la zone étudiée

Les valeurs les plus fortes de P_{SP} se retrouvent au sein des formations calcaires du bathonien/bajocien. Toutefois, il est à noter que ces dernières formations peuvent être affectées par des phénomènes karstiques pouvant engendrer l'abaissement des performances des installations, la conductivité thermique de l'air (isolant) étant plus faible que celle des terrains traversés.

Les valeurs les plus « faibles » de P_{SP} se retrouvent dans les formations meubles (argiles, marnes,...) ou dans les formations à forte porosité (Sables, alluvions,...).

On peut également remarquer la présence de zones hachurées, réparties sur l'ensemble du grand Besançon, correspondant à des zones où les calcaires et les marnes sont conjointement présentes. Cette zone est donc classée dans un potentiel allant de modérément favorable à favorable. La succession de couches marneuses et calcaire empêchant de classer la zone dans l'une des 2 classes.

Il est également à noter que malgré la faible densité de données disponible, la variation de la nature de ces couches sédimentaires étant assez simple (succession de couches calcaires et marneuses), cela ne remettra pas en cause la possibilité de faire de la géothermie, malgré la présence de nombreuses failles tectoniques, pouvant chambouler la succession des couches, le potentiel restera au minimum modérément favorable.

Remarque : Un milieu humide ou saturé en eau aura pour conséquence d'augmenter de façon non négligeable la puissance extractible du sous-sol. Cette augmentation peut varier de 10 % en fonction de la lithologie et de la bibliographie.

4.3.4. Cartes des aléas

1) Aléas liés aux formations carbonatées

Comme il l'a été indiqué à plusieurs reprises dans ce rapport, les formations carbonatées (calcaires) ont un bon potentiel géothermique. Toutefois, celui-ci peut être amoindri dans le cas où ces formations sont affectées par des phénomènes karstiques (cavités, zone d'effondrements,...). En effet, la présence de vide a un rôle plutôt défavorable, du fait du caractère isolant du point de vue thermique de l'air, qui pourrait engendrer, en cas de vide conséquent (de taille métrique), une perte de puissance de l'installation. De plus, cela peut rendre problématique la cimentation du forage qui a pour but d'empêcher les communications d'eau entre les aquifères ainsi qu'entre la surface et les aquifères. Les formations calcaires de la région de Besançon sont connues pour être très fracturée, notamment celles du bathonien dont la fissuration assez importante favorise le développement du karst. Une carte (non exhaustive) présentant la localisation des différentes cavités souterraine est présente ci-dessous.

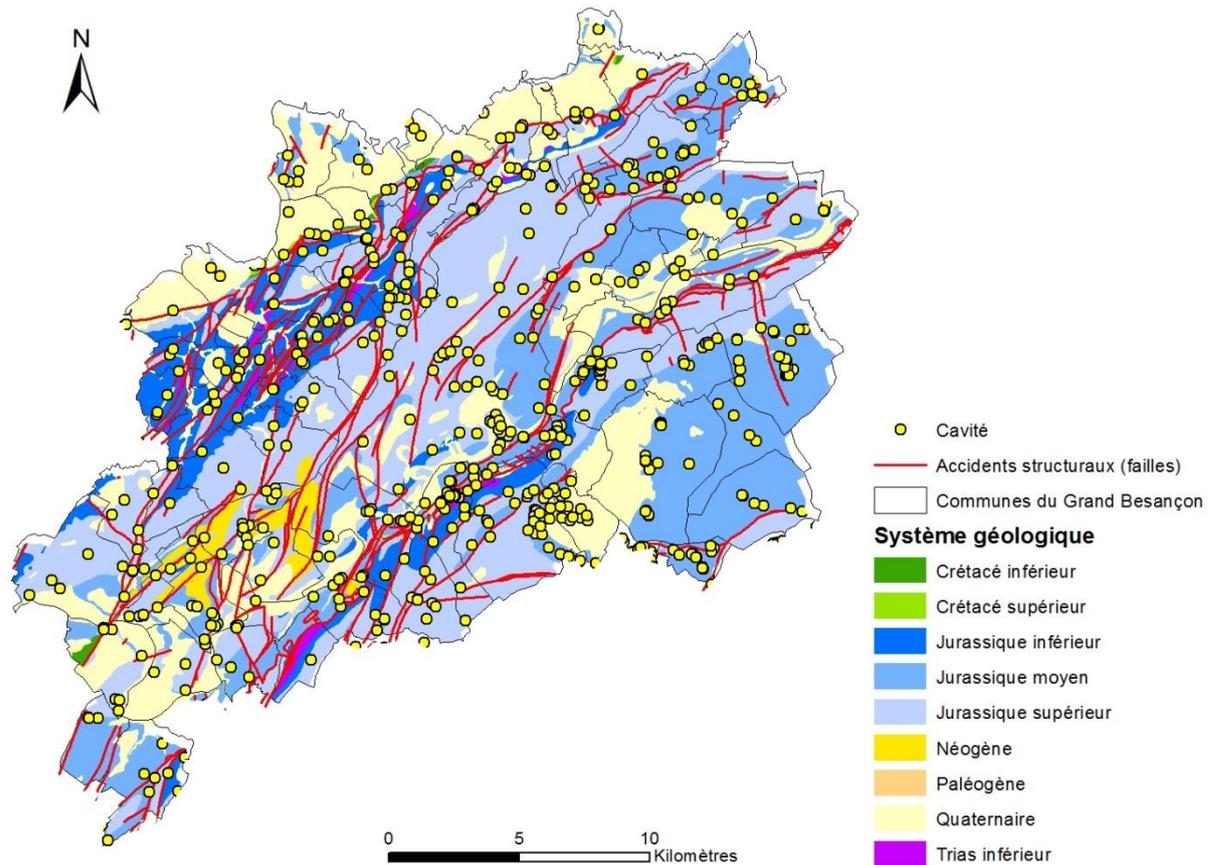


Illustration 44 : Localisation des différentes cavités souterraines recensées sur le territoire du Grand Besançon

Si la géothermie sur sondes verticales est possible sur le territoire de l'agglomération, le futur maître d'ouvrage doit toutefois prendre en considération les risques potentiels de surcoût de forage lié à la présence potentielle de cavités (surcoût de cimentation ou nécessité de réaliser des forages complémentaires par rapport aux prévisions,...). Un suivi rigoureux des travaux de forage est également recommandé afin d'éviter l'installation de sondes verticales dans des

cavités. Il sera donc nécessaire de faire attention lors du forage en cas de présence de vides trop importants, et de prendre en compte ce risque d'aléas lors du montage de projets géothermiques sur sondes verticales.

2) Aléas liés à la présence d'évaporites dans les sous-sols

Les évaporites sont des dépôts riches en chlorures et sulfates alcalins. Ces dépôts correspondent souvent à un épisode de régression, et s'intercalent entre des calcaires marins francs. Les évaporites (notamment le gypse) sont communes dans le Trias supérieur de la région Bisontine. Le phénomène redouté dans le cas où il y aurait la présence d'évaporites dans le sous-sol est l'affaissement voire l'effondrement ou la surrection des terrains de surface liés soit à la dissolution d'un niveau évaporite, soit au gonflement de ce niveau en cas de présence d'anhydrite. Ces phénomènes sont provoqués par la mise en communication de nappes phréatiques (superficielles ou profondes) avec les horizons évaporitiques à la faveur de forages mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.⁴

Il s'est avéré que les principales formations géologiques comportant ces évaporites au droit de l'agglomération du Grand Besançon sont celles du Trias (principalement visibles dans la commune de Beure, où le gypse a déjà été exploité, ainsi que Miserey Saline). Ces zones sont représentées en figuré hachurer violet sur la figure ci-dessous :

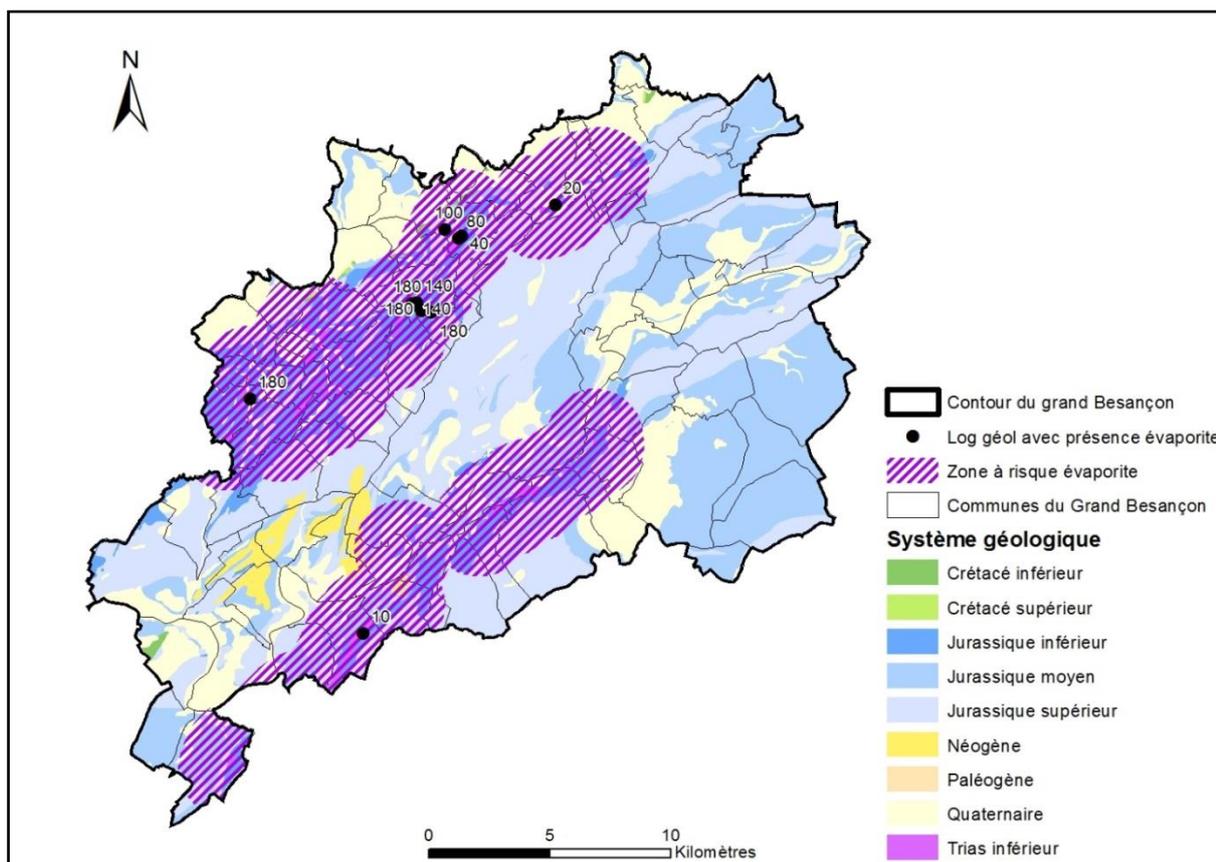


Illustration 45 : Localisation des zones à "risque" évaporitique, avec la localisation des logs géologiques où l'on a trouvé la présence d'évaporite (avec la profondeur indiquée)

⁴ Rapport BRGM/RP-61768-FR

Remarque : Dans ces zones présentant potentiellement des évaporites, il est conseillé de réaliser une étude préalable du contexte géologique plus particulièrement de l'organisation et de la nature des couches géologique en profondeur, afin d'identifier la présence ou non d'évaporite.

De plus, il est conseillé au maître d'ouvrage de réaliser un suivi rigoureux des travaux de forage afin de vérifier que ceux-ci soit réalisés dans les règles de l'art. Il est notamment nécessaire d'isoler les nappes d'eau traversées des terrains sous-jacents, particulièrement lors de la présence connue de formations évaporitiques.

3) Aléas liés à la présence de pollutions potentielles, sur nappe et sur sols, lié aux sites industriels et activités de services

Dans le cas où les travaux de forages géothermiques (sur nappe et sur sondes verticale) se situent au droit ou à proximité de sites et sols pollués, ceux-ci peuvent entraîner une remobilisation de pollutions. Dans le cas, les phénomènes redoutés correspondent à l'infiltration de polluants depuis la surface ou la mise en contact de nappes polluées avec des nappes saines.

Les principales bases de données recueillant les informations ou les inventaires relatifs à la thématique des sites et sols pollués sont les suivantes:

- BASIAS (Inventaire des Anciens Sites Industriels et Activités de Service, potentiellement polluants) = <http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inventaire-historique-des-sites-industriels-et-activites-en-service-basias#/>
- BASOL recensant les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif = <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>

Il est conseillé au maître d'ouvrage voulant réaliser de la géothermie, de vérifier si son projet se situe au droit ou à proximité d'un site pollué. Dans le cas où la présence d'un site pollué est avérée, il devra à minima s'assurer qu'il n'existe pas de restriction d'usage lié à ce site, notamment concernant les forages. Dans le cas où les forages sont autorisés, le maître d'ouvrage devra réaliser un suivi minutieux des travaux afin de s'assurer qu'ils ne remobilisent pas de pollution et ne provoquent pas la contamination de sols sains et de nappes saines par des polluants.

4.3.5. Limites de l'atlas du potentiel géothermique sur sondes verticales

La simplification de la lithologie est la première limite à cet atlas du potentiel géothermique sur sondes verticales. Une partie de la lithologie n'est pas prise en compte dans le dépouillement des logs lithographiques de la BSS provoquant une perte de précision. Cependant, renseigner les données lithologiques avec une précision de moins de 10 mètres aurait nécessité un travail plus fastidieux incompatible avec la durée de ce projet et n'aurait pas amené une véritable plus-value à l'échelle de cet atlas.

Une deuxième limite liée à cet atlas géothermique sur sondes verticales est due à la répartition géographique des données. Comme on a pu le voir sur l'illustration 31, chaque log géologique représente une donnée ponctuelle sur le territoire. Ces données ne sont pas réparties de manière homogène. Il a donc été nécessaire de renseigner les zones sans données de forages,

à l'aide des notices et des cartes géologiques au 1/50000 permettant d'estimer la succession, la nature et l'épaisseur des formations géologiques mais en perdant de la précision par rapport à des logs lithographiques.

Enfin la troisième limite de cet atlas correspond à l'attribution de puissance spécifique des roches. En effet, il a été utilisé des valeurs théoriques, qui ne correspondent pas forcément à la réalité du terrain. Nous avons pu observer une différence entre les valeurs théoriques et les valeurs réelles mesurées sur site. Malheureusement, n'ayant pas assez de retour d'expérience, nous ne pouvions que nous baser sur des valeurs théoriques. Un plus grand nombre de résultats de tests de réponses thermique permettra sans doute de recalibrer les valeurs théoriques ultérieurement.

Nous avons donc une Potentialité « moyenne » théorique, qui peut être sur ou sous-estimée en fonction du contexte local.

L'échelle cartographique de l'atlas est de 200 mètres / 200 mètres, correspondant à une précision au 1/20000. Malgré cela et du fait des approximations réalisées, l'échelle de restitution des informations aux utilisateurs doit se limiter à l'échelle de la commune.

Nous rappelons que l'atlas constitue ainsi une première approche à destination des maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les informations transmises ne peuvent et ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire.

5. Conclusion

La détermination des ressources géothermiques très basse énergie au droit de l'agglomération du Grand Besançon a été effectuée en distinguant la géothermie sur nappe (au niveau des zones alluvionnaires) et la géothermie sur sondes verticales.

Un atlas du gisement des ressources géothermiques a ainsi été établi, avec, comme hypothèse de base que les informations relatives à la géothermie en nappe seraient prépondérantes sur celles issues de la géothermie hors nappe. Si une zone est concernée par les deux thématiques alors il ne sera reporté dans l'atlas que la thématique relative à la géothermie sur nappe.

Les zones d'études ont été découpées selon un maillage de 200 mètres sur 200 mètres où pour chaque maille il a été renseigné le potentiel géothermique du milieu pour la géothermie sur nappe et pour la géothermie sur sondes verticales selon des critères préalablement définis.

Les données seront disponibles sur le site www.geothermie-perspectives.fr.

Les données utilisées pour réaliser cet atlas (température, débits, profondeur de la nappe, logs lithographique...) sont issues de données ponctuelles provenant de la Banque de données du Sous-Sol ou d'études ponctuelles, et ne peuvent être considérées que comme des données moyennes.

Comme pour les autres zones ayant déjà leur atlas du potentiel géothermique (notamment les atlas régionaux, il a été décidé que la susceptibilité des nappes vis-à-vis de la géothermie en nappe apparaîtrait sous des teintes : rouges (défavorable), jaunes (moyennement favorable) et bleues (favorable), tandis que les terrains vis-à-vis de la géothermie hors nappe apparaîtraient dans les teintes marron (du plus clair ; le plus défavorable, au plus foncé ; le plus favorable).

Il faut préciser seule la ressource potentiellement extractible est concernée. L'atlas ne prend en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux ou d'occupation de l'espace qui pourraient exister au droit de cette ressource.

Les paramètres pris en compte pour l'analyse multicritères sur les aquifères superficiels (hors aquifères karstiques) concernent la profondeur d'accès à la ressource, la productivité et la température de l'aquifère. En raison du nombre restreint de données de base et de leur forte variabilité, l'approche statistique ou par sectorisation a quasi-systématiquement été privilégiée. **Le résultat obtenu pour le potentiel géothermique sur aquifère exprimé en pourcentage de couverture des formations alluvionnaires de la zone du Grand Besançon est de 100 % favorable.**

Concernant l'analyse multicritères réalisée pour évaluer le potentiel géothermique du sous-sol pour la mise en place de sondes géothermiques, les paramètres pris en compte sont la nature et épaisseur des formations géologiques, la puissance exploitable des formations géologiques observées par formation géologique. Cinq classes de potentialité géothermique ont ainsi été définies, exprimées ici en pourcentage de couverture du territoire du Grand Besançon :

Tranche 0 – 50 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- **Favorable : 36 % du territoire ;**
- **De Favorable à Modérément Favorable : 56 % du territoire ;**
- **Modérément favorable : 8 % du territoire ;**
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Tranche 50 – 100 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- **Favorable : 23 % du territoire ;**
- **De Favorable à Modérément Favorable : 67 % du territoire ;**
- Modérément favorable : 0 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Tranche 100 – 200 mètres :

- Très favorable : 0 % du territoire ;
- Favorable : 0 % du territoire ;
- **De Favorable à Modérément Favorable : 100 % du territoire ;**
- Modérément favorable : 0 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;

Du fait de ces différentes approximations réalisées, l'échelle de restitution des informations aux utilisateurs ne doit pas excéder le 1/25 000^{ème}.

L'atlas constitue ainsi une première approche à destination des maîtres d'ouvrages, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les informations transmises ne peuvent ni ne doivent donc en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire.

6. Bibliographie

- ADEME, ARENE, BRGM, EDF, 2008 – Guide technique – Pompe à chaleur géothermique sur aquifère – Conception et mise en œuvre.
- Chauve P., Rolin P. (2015) – Jura Bisontin, Reliefs, Paysages et Roches. Édition citadelle – Patrimoine mondial/Muséum de Besançon. 211 p.
- Directive 2003/87/CE du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la communauté et modifiant la directive 91/61/CE du Conseil
- Dupuis P., Turenne J., Bal J-L. 2007. Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale. Comité opérationnel n°10. 59p.
- Pahud D. (2002) - Geothermal energy and heat storage. SUPSI-DCT-LEEE, Laboratorio di Energia, Ecologia ad Economia
- Schomburgk S., Jauffret D., Pointet T. avec la collaboration de Longet A. et Ruppert N. (2002) – Étude des nappes aquifères au voisinage du Doubs navigable et de ses dérivations entre la limite est du département du Doubs et la confluence avec la Saône. BRGM/RP-51463-FR, 74 p., 19 fig., 11 tab., 30 pl., 3 ann. (pl. et ann. Sur CD-ROM).

Sites internet :

- ✚ <http://www.ademe.fr/aides-financieres-2016>
- ✚ <http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref>
- ✚ www.afpac.org
- ✚ www.europe-bourgogne.fr/engagement-europe/les-autres-programmes-europeens.htm
- ✚ www.europe-bourgogne.fr/engagement-europe/les-autres-programmes-europeens.htm
- ✚ www.foragesdomestiques.developpement-durable.gouv.fr
- ✚ www.geothermie-perspectives.fr
- ✚ www.promotelec.com
- ✚ www.qualit-enr.org/annuaire
- ✚ www.renovation-info-service.gouv.fr/trouvez-un-professionnel
- ✚ www.renovation-info-service.gouv.fr/mes-aides-financieres
- ✚ www.renovation-info-service.gouv.fr/mes-aides-financieres
- ✚ www.georisques.gouv.fr/dossiers/inventaire-historique-des-sites-industriels-et-activites-en-service-basias/
- ✚ <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>

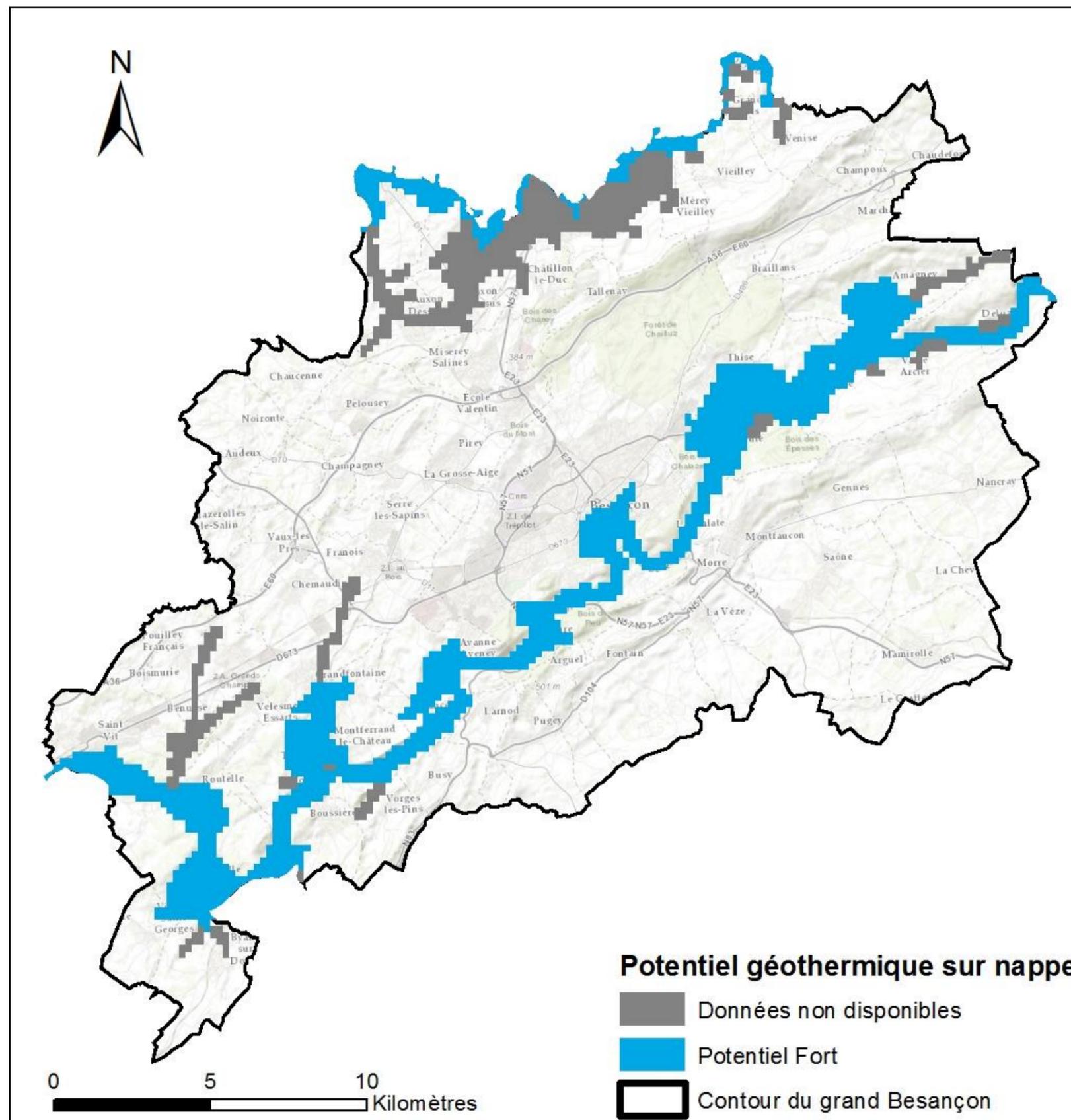
Annexe 1

Liste des entités BD Lisa concernées par l'atlas du potentiel géothermique sur nappe

Code	Libelle
040AI55	Alluvions calcaires anciennes (Terrasses basses du Doubs...) (code geol : Fy2)
040AI67	Alluvions fluviales actuelles et récentes (Holocène) (code geol : Fz)
040AJ83	Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, garviers, sables, argiles (code geol : Fz)
040AJ85	Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, graviers, sables, argiles (code geol : Fz)
040AK69	Graviers, sables, silts, argiles (terrasse haute : +30/+50m de la vallée du Doubs (Besançon) (code geol : Fy1)

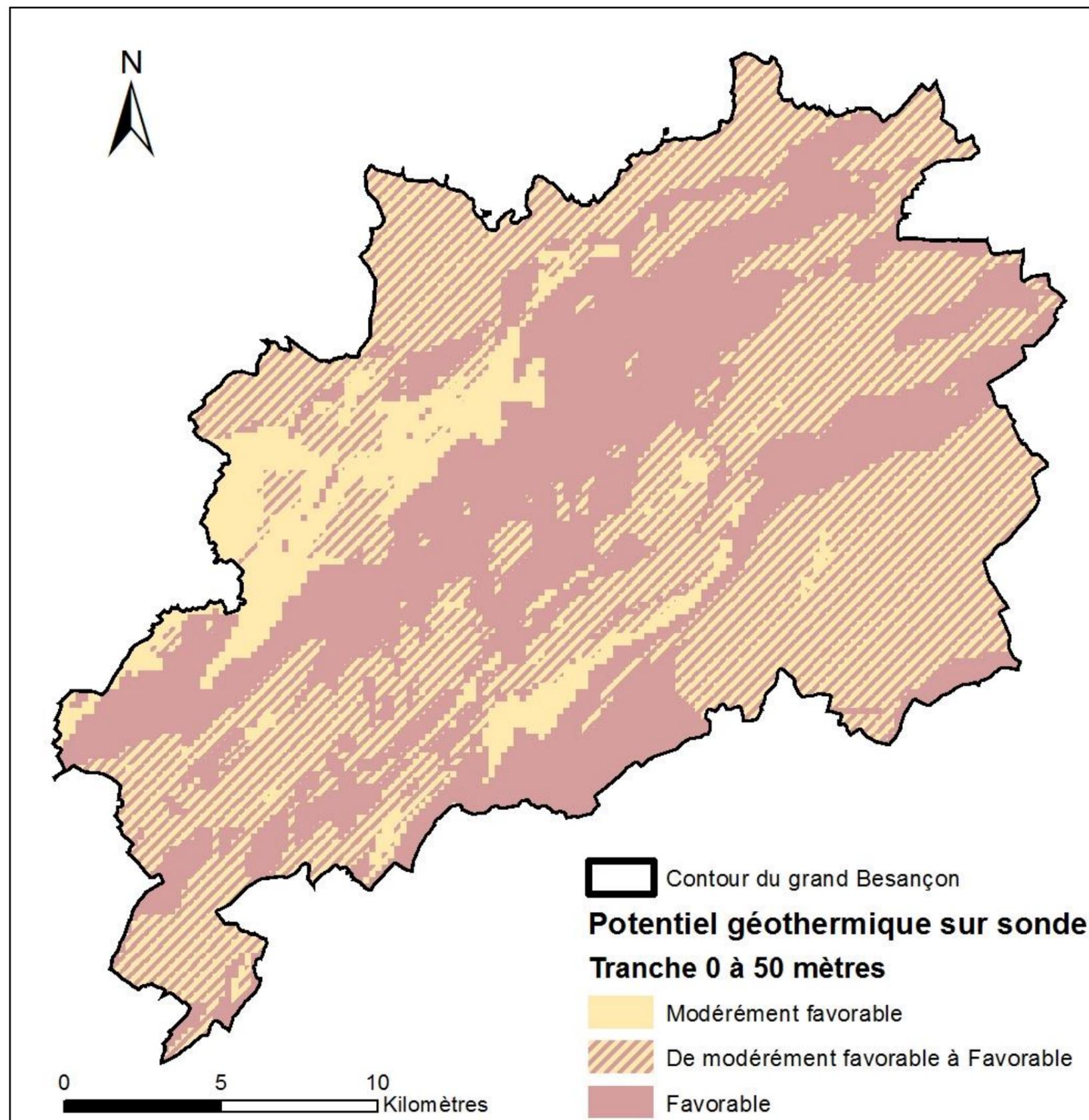
Annexe 2

Cartes du potentiel géothermique régional sur aquifère



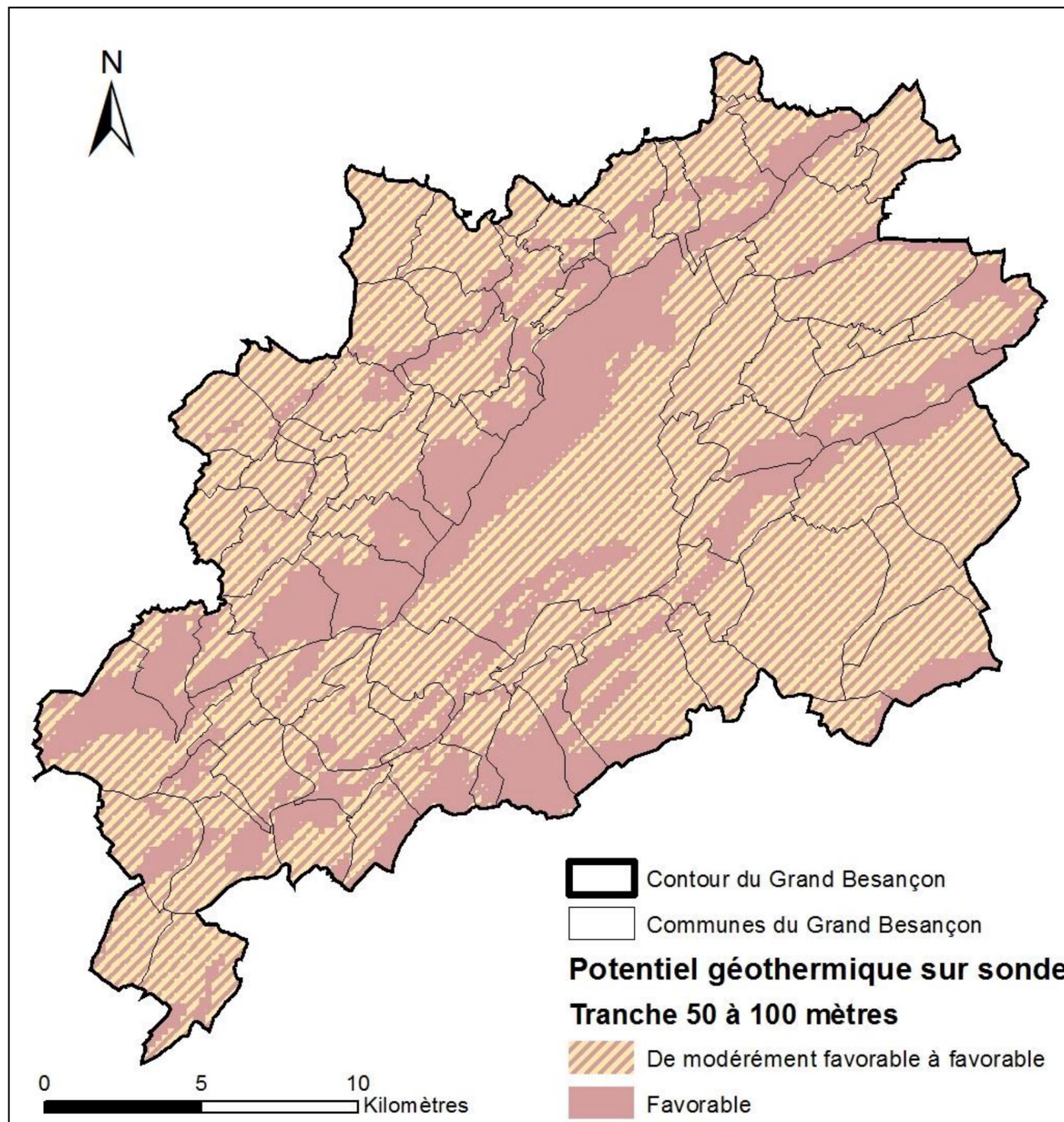
Annexe 3

Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 0 à 50 mètres de profondeur



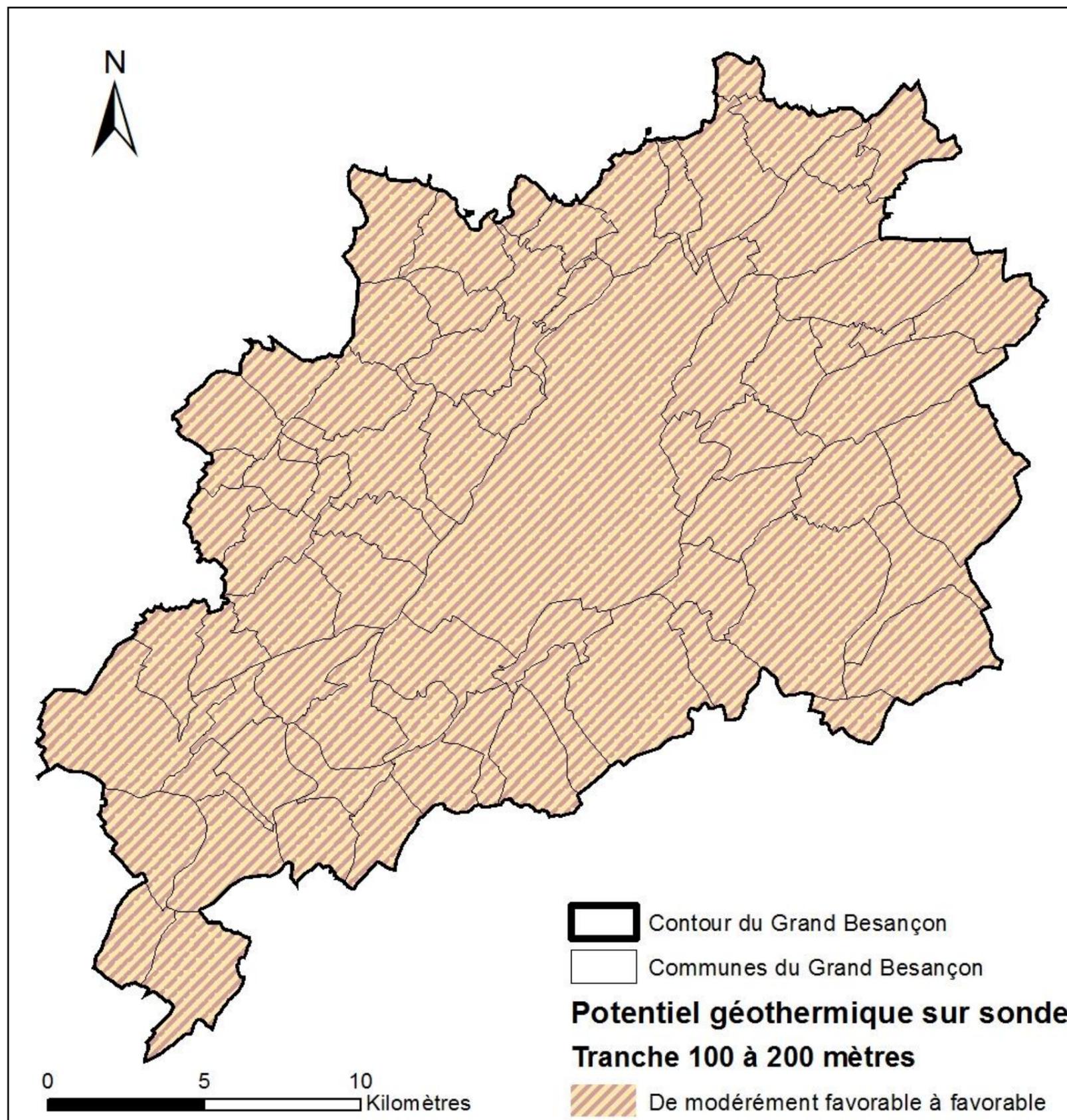
Annexe 4

Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 50 à 100 mètres de profondeur



Annexe 5

Grille du potentiel géothermique sur sonde, sur la tranche 100 à 200 mètres de profondeur





Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Bourgogne - Franche-Comté
27 rue Louis de Broglie
21000 – DIJON – France
Tél. : 03 80 72 90 40