

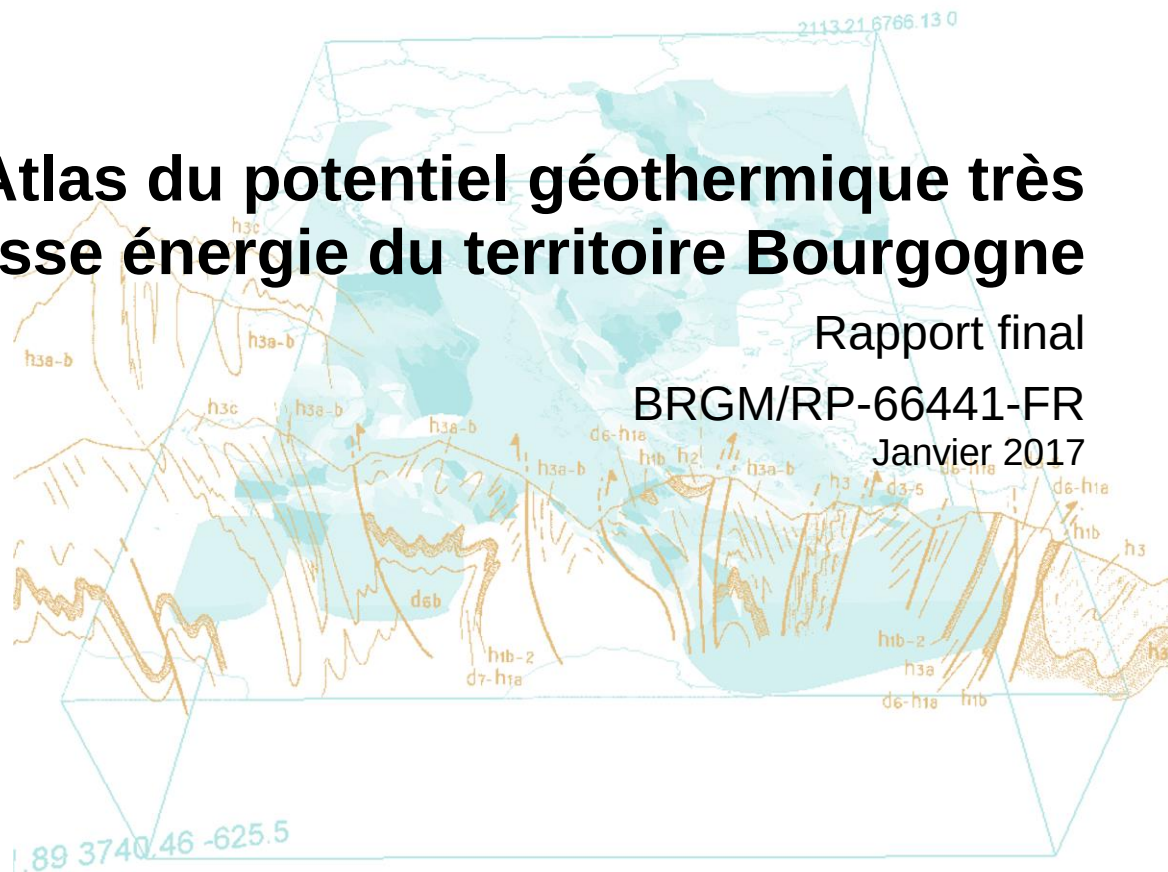


Atlas du potentiel géothermique très basse énergie du territoire Bourgogne

Rapport final

BRGM/RP-66441-FR

Janvier 2017



Atlas du potentiel géothermique très basse énergie du territoire Bourgogne

Rapport final

BRGM/RP-66441-FR

Janvier 2017

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

C. DONEY, V. MALASSIGNE

Avec la collaboration de
P. DURST

Vérificateur :

Nom : J.-C. MARTIN

Fonction : Hydrogéologue

Date : 08/03/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Saada

Fonction Directeur BRGM FRC-BOU

Date : 08/03/2017

Signature :



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

Mots-clés : Géothermie très basse énergie, aquifère, forage, productivité, température, piézomètre, géologie régionale, sonde verticale, potentiel géothermique, Bourgogne, Nièvre, Yonne, Côte-d'Or, Saône-et-Loire.

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

DONEY C., MALASSIGNE V. avec la collaboration de DURST P. (2017) – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région Bourgogne. Rapport final. **BRGM/RP-66441-FR**, 81 p., 48 ill., 3 ann., CD.

Synthèse

L'élaboration d'un atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères et du sous-sol de la Bourgogne est née de la réflexion entre l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) 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 la région Bourgogne comme cela existe en Franche-Comté. Ce projet a été financé par le BRGM sur ses crédits de Service Public, avec une subvention apportée par l'ADEME dans le cadre d'une convention en date du 21 octobre 2015.

Conformément à la demande de l'ADEME lors de la rédaction du cahier des charges, l'emprise de cet atlas se limite aux principaux bassins de population et d'activité de la Bourgogne et non pas sur l'ensemble du territoire. Ainsi, ce sont 3 grandes zones qui ont été délimitées, suivant les limites des communautés de communes, et regroupant la grande majorité de la population bourguignonne :

- une zone Nord correspondant à la vallée de l'Yonne englobant les agglomérations d'Auxerre et de Sens ;
- une zone Ouest correspondant à la vallée de la Nièvre et de la Loire englobant les agglomérations de Nevers, de Décize et de Cosne-sur-Loire ;
- une zone Est et Centre-Est correspondant à la vallée de la Saône, de la Bresse et des anciens bassins houillers de Bourgogne englobant les agglomérations de Dijon, Chalon-sur-Saône, Mâcon, Louhans, Montceau-les-Mines, le Creusot.

La détermination du potentiel géothermique très basse énergie de ces territoires a été mise en œuvre avec deux approches multicritères menées parallèlement :

- 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 la nappe des alluvions des cours d'eau) pour une tranche de profondeur comprise entre 0 et 15 mètres ;
- 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 mètres.

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. Seules les nappes s'écoulant dans les aquifères alluvionnaires ont été prises en compte dans cette étude même si d'autres aquifères existent en Bourgogne. 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 alluvionnaire est favorable sur l'ensemble des 3 zones étudiées.

Les paramètres pris en compte pour évaluer le potentiel géothermique par sondes géothermiques, 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 des 3 zones étudiées en Bourgogne :

- **Très favorable : 32 % du territoire ;**
- **Favorable : 20 % du territoire ;**
- Modérément favorable : 48 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;
- Très 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 de 500 mètres de côté, couvrant le territoire bourguignon.

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	9
2. Présentation de la géothermie très basse énergie.....	11
2.1. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE	11
2.1.1. Pompe à chaleur (PAC) - Principes de fonctionnement	11
2.1.2. Pompe à chaleur sur aquifère	12
2.1.3. Pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales	14
2.2. PRINCIPAUX MECANISMES D'ACCOMPAGNEMENT ET PROCEDURES INCITATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE	16
2.2.1. Garanties AQUAPAC®	16
2.2.2. Démarche qualité pour les sondes géothermiques verticales : Qualiforage	16
2.2.3. Les aides financières	17
2.3. REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE	19
2.3.1. Contexte réglementaire	19
2.3.2. Cartes nationales des risques liés à la géothermie	20
3. La géothermie en région Bourgogne	23
3.1. LES ZONES ETUDIEES DANS LE CADRE DE L'ATLAS DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DE TRES BASSE ENERGIE.....	23
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA BOURGOGNE	24
3.2.1. Contexte géologique régional	24
3.2.2. Contexte géologique et hydrogéologique des zones d'études.....	25
4. Conception de l'atlas du potentiel géothermique	34
4.1. METHODOLOGIE GENERALE	34
4.1.1. Les étapes de réalisation de l'atlas du potentiel géothermique sur aquifère	35
4.2. GEOTHERMIE SUR NAPPE	40
4.2.1. Critères de potentialité géothermique des aquifères	42
4.2.2. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique sur aquifère	43
4.2.3. Bilan de la classification et de l'indexation des critères	58
4.2.4. Cartes du potentiel géothermique des aquifères	59
4.2.5. Aléa qualité de la ressource	61
4.2.6. Limites de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères	63
4.3. GEOTHERMIE SUR SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES	64
4.3.1. Cartographie des différents critères de potentialité géothermique.....	65

4.3.2. Potentiel géothermique du sous-sol.....	69
4.3.3. Carte du potentiel géothermique sur sonde verticale	72
4.3.4. Carte des aléas	74
4.3.5. Limites de l'atlas du potentiel géothermique sur sondes verticales	74
5. Conclusion	76
6. Bibliographie.....	78

Liste des figures

Illustration 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère - ADEME, BRGM mai 2012).	12
Illustration 2 : Schéma de principe de la géothermie sur nappe et sur sonde verticale assistées d'une pompe à chaleur	13
Illustration 3 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe	13
Illustration 4 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique ...	15
Illustration 5 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques.....	16
Illustration 6 : Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie de très basse énergie (sce : MEDDE)	19
Illustration 7 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance sur nappe en Bourgogne. © BRGM	20
Illustration 8 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance sur sondes verticales. © BRGM.....	21
Illustration 9 : Présentation des différentes zones d'étude	23
Illustration 10 : Carte géologique de la Bourgogne. © BRGM.....	24
Illustration 11 : Représentation des grands éléments structuraux du Bassin Bressan	26
Illustration 12 : Coupe géologique du fossé Bressan au niveau de Beaune.....	28
Illustration 13 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)	36
Illustration 14 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)	37
Illustration 15 : Principe de la cartographie multicritères.....	39
Illustration 16 : Présentation des aquifères étudiés.....	41
Illustration 17 – Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional	42
Illustration 18 : schéma explicitant les différents régimes de nappe (source BRGM)	43
Illustration 19 : Répartition de la donnée ponctuelle pour le paramètre profondeur de nappe ...	44
Illustration 20 : Tableau explicatif présentant les données disponibles par nappe alluviale	45
Illustration 21 : Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte	45
Illustration 22 : Carte finale du critère "profondeur de l'aquifère"	47
Illustration 23 : Carte des répartitions des données ponctuelles pour le paramètre productivité de la nappe	49

Illustration 24 : Classes de productivités prises en compte	50
Illustration 25 : Carte finale du critère "productivité de l'aquifère"	51
Illustration 26 : Répartition de la donnée ponctuelle pour le paramètre température de la ressource	52
Illustration 27 : Répartition des quantiles des séries de données de température de chaque département.....	53
Illustration 28 : Classes de températures d'aquifère prises en compte	54
Illustration 29 : Graphique représentant les variations de température de la nappe alluviale de la Loire	55
Illustration 30 : Graphique représentant les variations de température de la nappe alluviale de la Saône dans le département de la Saône et Loire	55
Illustration 31 : Graphique représentant les variations de température dans la nappe alluviale de la Saône dans le département de la Côte d'Or	56
Illustration 32 : Graphique représentant les variations de température dans la nappe alluviale de l'Yonne	56
Illustration 33 : Carte finale du critère "température de la ressource"	57
Illustration 34 : Classification et indexation des critères de potentialité géothermique	58
Illustration 35 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone nord	59
Illustration 36 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone ouest	60
Illustration 37 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone est	61
Illustration 38 : Gamme de paramètres d'évaluation concernant l'altération par corrosion	62
Illustration 39 : Gamme de paramètres d'évaluation concernant l'altération par formation de dépôts	63
Illustration 40 : 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 80 m présents sur les zones d'études	66
Illustration 41 : Nombre de logs lithographiques étudiés par tranche de profondeur	66
Illustration 42 : Carte des répartitions, sur le territoire bourguignon, des forages de plus de 80 mètres de la BSS.	67
Illustration 43 : 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.....	68
Illustration 44 : Découpage de la zone Nord en fonction de sa lithologie	69
Illustration 45 : Découpage de la zone Ouest en fonction de sa lithologie	70
Illustration 46 : Découpage de la zone Est en fonction de sa lithologie	71
Illustration 47 : Potentialité des 3 grandes zones en fonction des différentes classes établies dans la partie §6.3.	72
Illustration 48 : Tableau récapitulatif du potentiel géothermique en fonction des lithologies dominantes présentes sur les zones d'études	73

Liste des annexes

Annexe 1	Liste des entités BD Lisa concernées par l'atlas du potentiel géothermique sur nappe	79
Annexe 2	Cartes du potentiel géothermique régional sur aquifère	85
Annexe 3	Cartes du potentiel géothermique régional sur sondes géothermiques verticales	91

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 l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) de Bourgogne-Franche-Comté et le BRGM Bourgogne-Franche-Comté.

Il s'agit ainsi de caractériser les possibilités en géothermie très basse énergie sur le territoire bourguignon. 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 de l'ADEME et du BRGM 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 existantes, 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) (cf. paragraphe 2.1.1) 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. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE

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

Dans le cas d'une ressource géothermale de très basse énergie, la température naturelle de la ressource en eau souterraine ou du sous-sol 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 d'énergie se fait via un fluide caloporteur ou fluide frigorigène.

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'énergie (compresseur). Dans un fonctionnement 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 » (Illustration 1).

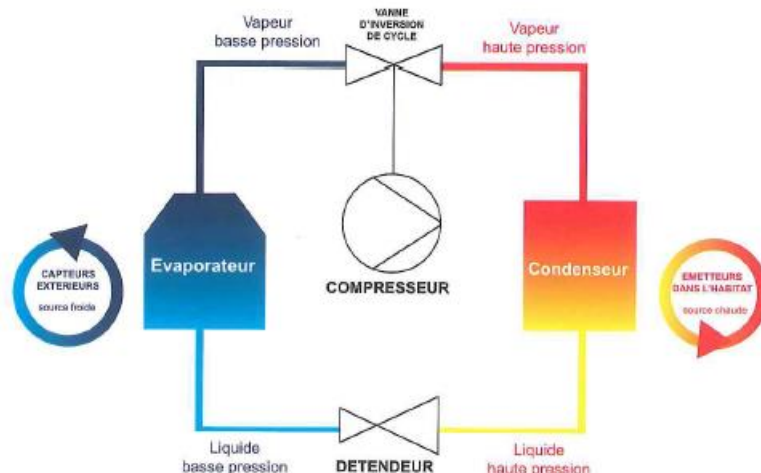


Illustration 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère - ADEME, BRGM mai 2012).

Il est également possible d'utiliser des installations mixtes, PAC réversibles, qui assurent la production de chaleur en hiver et la production de froid en été. Pour ce faire, il convient d'inverser le sens de circulation du fluide frigorigène dans la PAC grâce à une vanne.

La chaleur est prélevée au milieu intérieur (source froide) et rejetée dans le milieu extérieur (source chaude). Dans les mêmes conditions qu'une PAC classique, les PAC réversibles pourront utiliser soit la chaleur du sous-sol, soit la chaleur d'une nappe d'eau souterraine.

2.1.2. 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 mètres. 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.

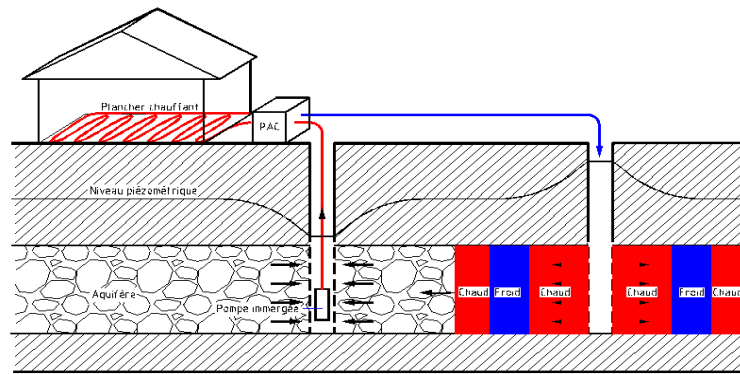


Illustration 2 : Schéma de principe de la géothermie sur nappe assistée d'une pompe à chaleur

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

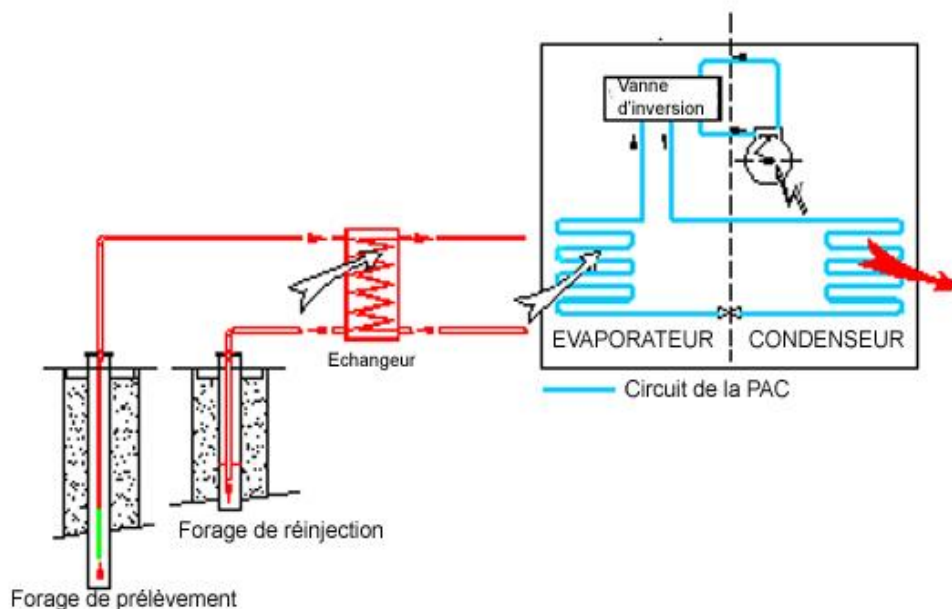


Illustration 3 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe

L'eau est prélevée à travers un premier forage et généralement 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 et aux normes en vigueur,...).

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 permettront 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 des 3 bassins rattachés à la Bourgogne, sont accessibles sur les sites Internet respectifs des Agences de l'Eau : <http://www.eau-loire-bretagne.fr/> ; <http://www.eaurmc.fr/> ; <http://www.eau-seine-normandie.fr/>

De même, les zones à enjeux (zones humides, ZNIEFF, etc...) peuvent être consultées sur le site de la DREAL Bourgogne : <http://www.bourgogne.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).

- **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> .

2.1.3. 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 récupérer 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 verticales correspondent à des capteurs géothermiques verticaux qui descendent à une profondeur généralement inférieure à 100 mètres, mais qui peut 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, en général, par un liquide antigel qui est ensuite mené à la PAC en surface (cf. Illustration 4 ci-dessous).

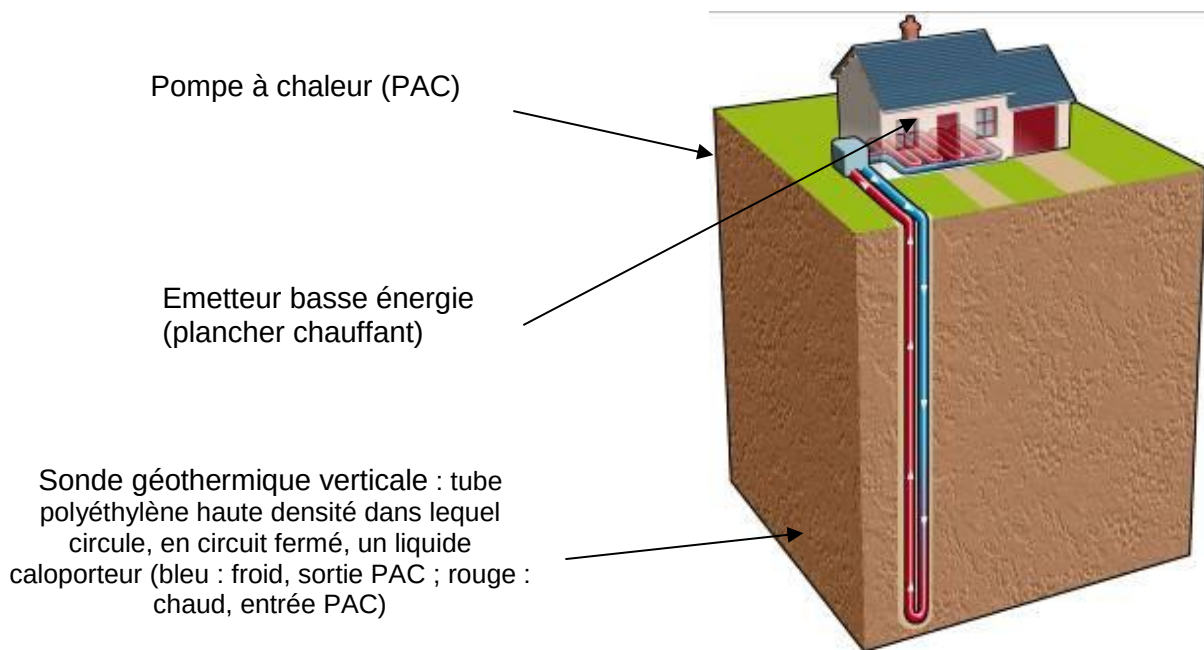


Illustration 4 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique

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.

La capacité de prélèvement de chaleur dépend du contexte géologique et de la nature des roches traversées (conductivités thermiques...). **Elle est de l'ordre de 50 W/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 5 ci-dessous).

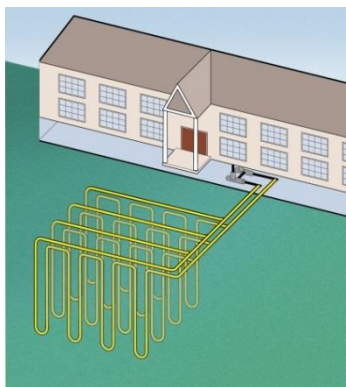


Illustration 5 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques

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> .

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

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

2.2.1. 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> .

2.2.2. Démarche qualité pour les sondes géothermiques verticales : Qualiforage

Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 qui définit et régit 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>.

2.2.3. Les aides financières

a) Pour les particuliers

Le crédit d'impôt Transition Énergétique (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 tertiaire (dont les 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 ces aides : <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 (Fonds 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>

2.3. REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE

2.3.1. 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 6 : 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 de plus amples informations on peut 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>

2.3.2. Cartes nationales 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 mètres dans laquelle peut s'appliquer le régime de minime importance.

Les cartes nationales des risques, zoomées sur le territoire Bourgogne, sont présentées ci-dessous.

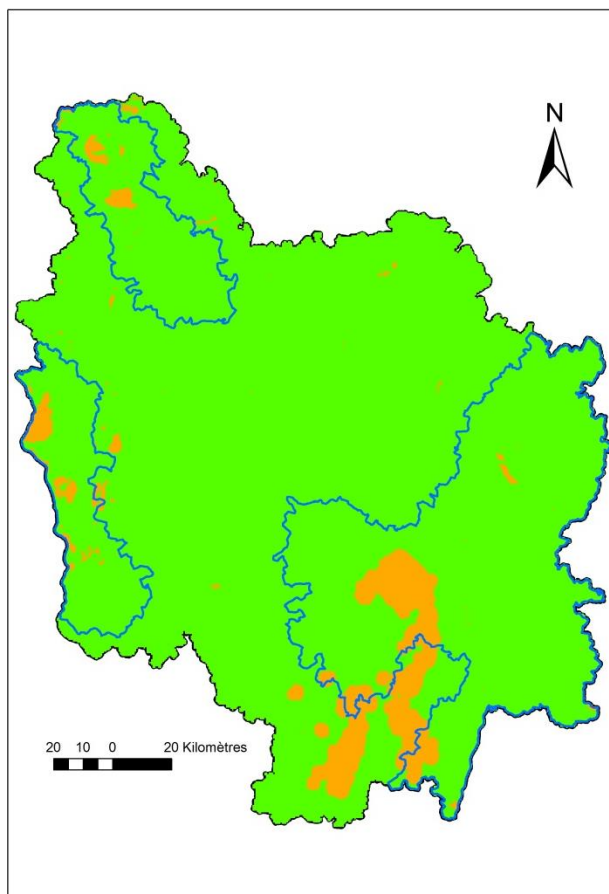


Illustration 7 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance sur nappe en Bourgogne. © BRGM

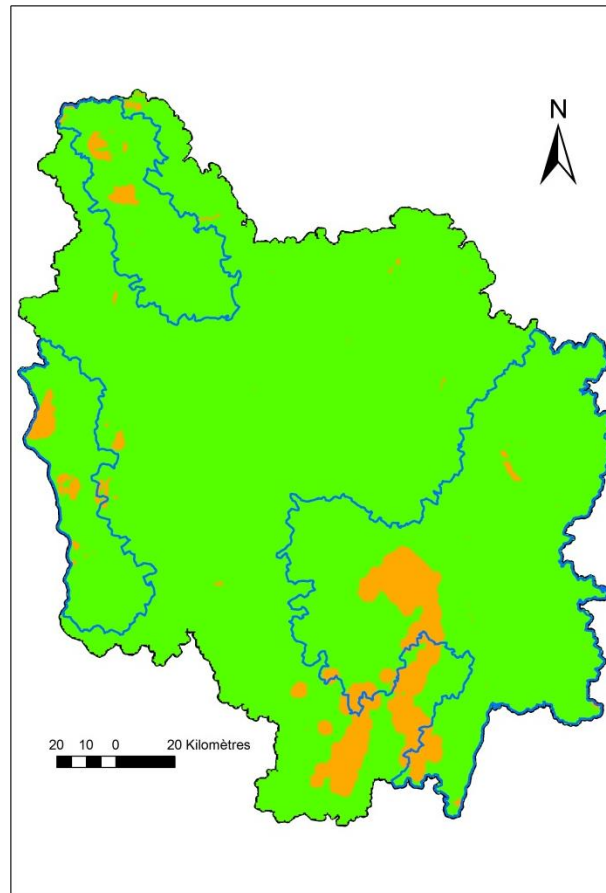


Illustration 8 : Cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance sur sondes verticales. © BRGM

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,...).

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 mètres, 0-100 mètres, 0-200 mètres 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.

3. La géothermie en région Bourgogne

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

Conformément à la demande de l'ADEME lors de la rédaction du cahier des charges, l'emprise de cet atlas se limite aux principaux bassins de population et d'activité de la Bourgogne et non pas sur l'ensemble du territoire. Ainsi, ce sont 3 grandes zones qui ont été délimitées, suivant les limites des communautés de communes, et regroupant la grande majorité de la population bourguignonne :

- une zone Nord correspondant à la vallée de l'Yonne englobant les agglomérations d'Auxerre et de Sens ;
- une zone Ouest correspondant à la vallée de la Nièvre et de la Loire englobant les agglomérations de Nevers, de Décize et de Cosne-sur-Loire ;
- une zone Est et Centre-Est correspondant à la vallée de la Saône, de la Bresse et des anciens bassins houillers de Bourgogne englobant les agglomérations de Dijon, Chalon-sur-Saône, Mâcon, Louhans, Montceau-les-Mines, le Creusot.

L'*Illustration 9* permet de constater que les secteurs étudiés représentent une partie seulement du territoire bourguignon (environ 40%). En revanche, une très large partie des communes les plus peuplées sont concernées.

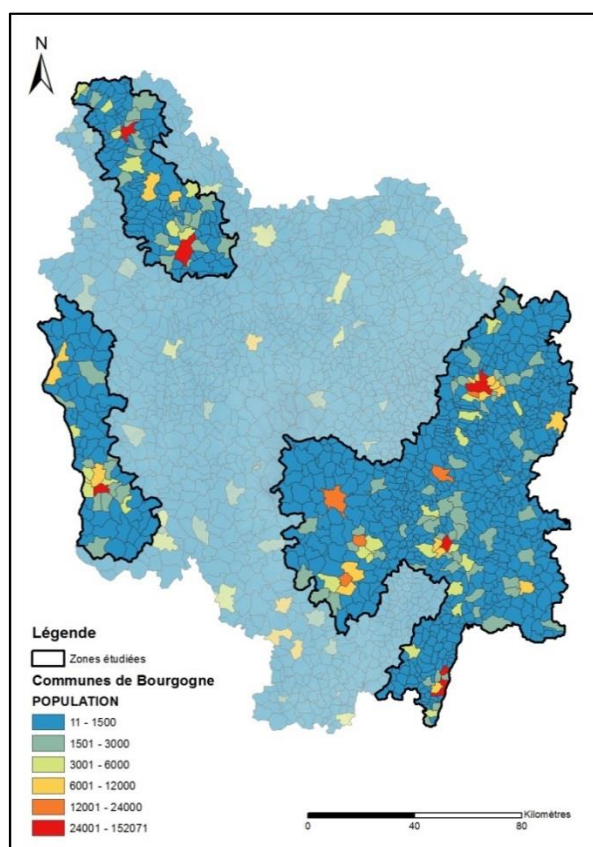


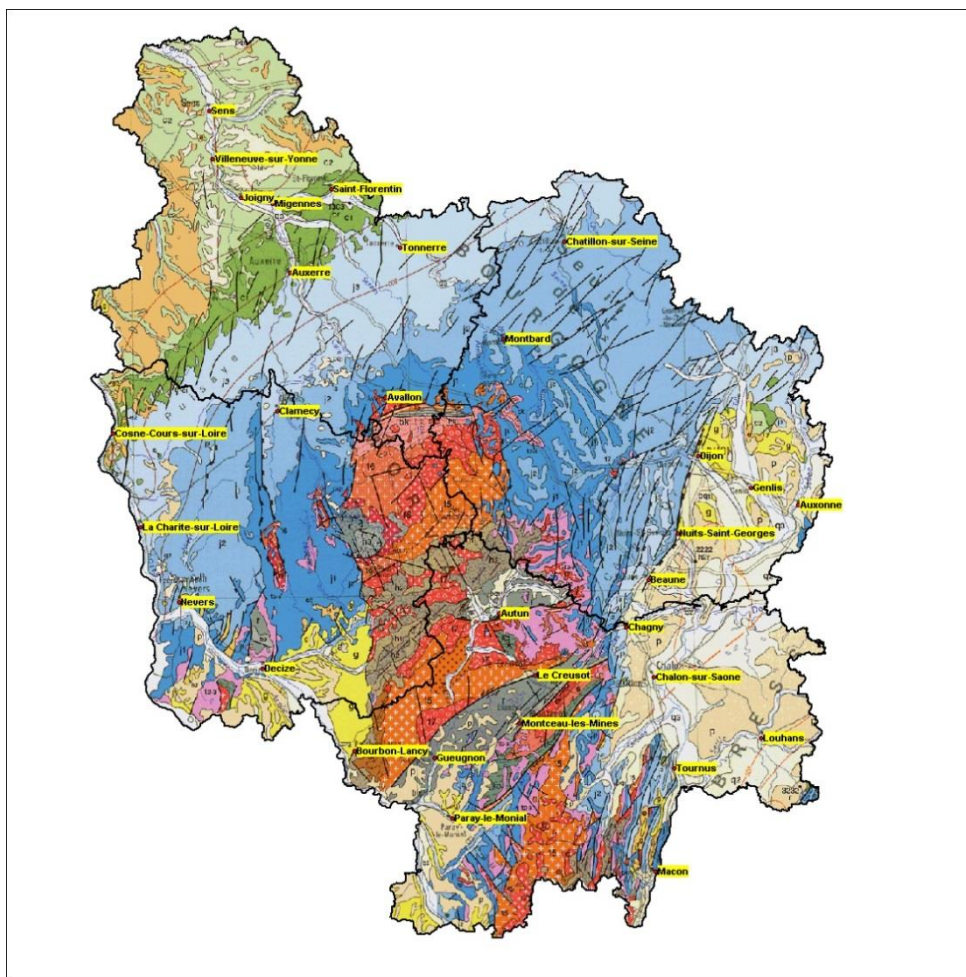
Illustration 9 : Présentation des différentes zones d'étude

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA BOURGOGNE

3.2.1. Contexte géologique régional

La Bourgogne s'étend de part et d'autre de la ligne de partage des eaux (majeure en Europe) entre, d'une part le versant de la Manche et de l'Atlantique par la Seine et la Loire et, d'autre part le versant méditerranéen par la Saône. Cette ligne de partage des eaux orientée Nord-Est / Sud-Ouest qui scinde la Bourgogne en deux, résulte d'une **structure géologique** bien typée :

- côté Seine et Loire, la région occupe la bordure Sud-Est du bassin de Paris,
- côté Saône, la région occupe le fossé bressan,
- entre ces deux parties, s'étend une vaste zone d'altitude élevée (plus de 500 mètres d'altitude) sur la ligne de partage des eaux elle-même et ses abords : le seuil de Bourgogne (coupe ci-dessous), prolongé au Sud-Ouest par le Morvan et le Charolais.



© 1996 – BRGM - Service Géologique National - BP 6009 45060 ORLEANS CEDEX 2 – ISBN 267 15962128-4

Illustration 10 : Carte géologique de la Bourgogne. © BRGM

L'âge des formations géologiques qui constituent le sous-sol de la Bourgogne est particulièrement étendu puisque l'on peut y observer des roches de l'ère primaire ou plus

anciennes encore (âgées d'au moins 250 millions d'années) jusqu'aux dépôts de l'ère quaternaire (moins de 2 millions d'années) en passant par les formations secondaires (250 à 65 millions d'années) et tertiaires (65 à 2 millions d'années).

3.2.2. Contexte géologique et hydrogéologique des zones d'études

1) Vallée de la Saône¹

La Saône circule au droit d'une structure géologique particulière appelée fossé bressan qui correspond à un fossé d'effondrement qui s'est formé au début du Tertiaire et qui s'est progressivement comblé jusqu'au Quaternaire. Il est limité :

- au nord par le seuil morvano-vosgien,
- à l'Ouest par les monts du mâconnais, la côte chalonnaise et la côte Dijonnaise,
- à l'est par le massif du Jura qui vient chevaucher le fossé.

Le soubassement ou substratum du fossé bressan est affecté sur sa bordure Ouest par des failles orientées N/S à NE/SW. Ces failles sub-verticales abaissent en marches d'escalier les compartiments vers la Bresse. De ce fait, les épaisseurs de remplissage augmentent de l'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud pour atteindre plus de 2000 m sur sa bordure Sud-Est (au niveau de Bourg-en-Bresse).

Au sein du fossé bressan s'individualisent de grands bassins plus ou moins effondrés ou surélevés. Il s'agit du nord au sud :

- du seuil de Barges,
- de la fosse de la Bresse du Chalonnaise,
- du seuil de Sennecey-la-Serre,
- de la fosse de la Bresse louhannaise et de mâcon.

Compte-tenu de ces différences morphologiques, la succession des terrains géologiques qui l'ont comblé sera plus ou moins épaisse et plus ou moins complète.

¹ Rapport ANTEA n°67379/B (2012)

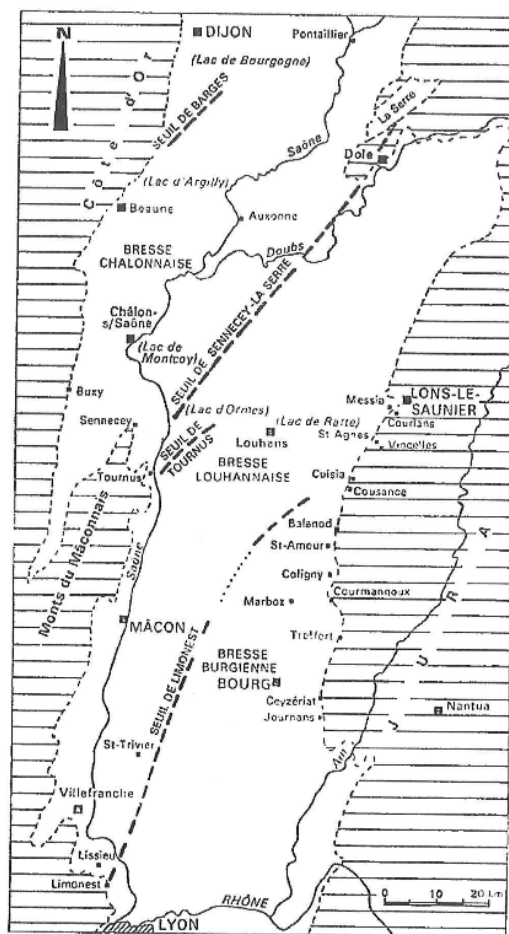


Illustration 11 : Représentation des grands éléments structuraux du Bassin Bressan

Les formations que l'on observe au droit du fossé bressan se déclinent de la façon suivante des plus récentes aux plus anciennes :

Le Quaternaire :

- 1) Les alluvions déposées par la Saône et ses affluents (la Seille, la Vingeanne, la Tille, l'Ouche, la Vouge, la Dheune, et la Grosne) : Ces formations sont les principaux aquifères du bassin bressan. La nappe est continue, facilement accessible et productive car généralement soutenue par le cours d'eau d'accompagnement. Ces eaux sont fortement sollicitées pour l'alimentation en eau potable.
- 2) La formation du Saint-Cosme : Ce sont des dépôts d'origine fluvio-lacustre. Ce sont des graviers surmontés par des argiles sur environ 15 m de haut dans lesquels il peut être observé de rares lentilles sableuses. Cette formation s'est déposée au sein des marnes de Bresse d'âge Plio-Quaternaire. Le niveau graveleux de base est aquifère et contient une nappe productive et captive. Elle peut être en relation avec la nappe des alluvions de la Saône.

Le Tertiaire :

- 1) Le Plio-Quaternaire : Ce sont les Marnes de Bresse qui affleurent sur la majeure partie du fossé bressan. Il est constitué de marnes, d'argiles et de rares lentilles de sables. Cet horizon est globalement imperméable. Ces terrains sont généralement moins épais en

pied de côte à l'est et au nord alors qu'au centre ils peuvent atteindre 200 m d'épaisseur. Sur la bordure Ouest du fossé bressan, au débouché des cours d'eau, des formations sableuses et graveleuses perméables sont généralement assimilées au Plio-Quaternaire. Ce sont des dépôts des affluents de la Saône (Tille, Ouche, Meuzin, Dheune, Grosne, ...) qui ont généralement été recouverts par des argiles. Ces dépôts sont donc généralement emboîtés dans les marnes de Bresse. Une nappe captive (sous pression) prend naissance dans ces terrains (graviers profonds de la Tille, graviers profonds de Dijon-Sud).

- 2) Le Miocène : On ne l'observe qu'au centre et au sud du fossé Bressan, il est constitué d'un horizon sableux (épaisseur 10 à 20 m) parfois conglomératique. Surtout présente dans la partie Rhône-Alpes du fossé Bressan, cette formation, dans la partie Nord et Ouest du fossé, est principalement de nature marneuse et souvent confondue avec le Pliocène.
- 3) L'Oligocène et l'Eocène : Cette formation est présente sur quasi l'ensemble du fossé Bressan. Ce sont essentiellement des terrains marneux avec des passages calcaires lacustres qui sont généralement aquifères. Ces formations sont recouvertes principalement par les marnes de la Bresse sauf dans la partie Nord du fossé (Dijon, pays de l'Ognon, Secteur d la Vingeanne) où l'Oligocène est affleurant. Elle est de nature sableuse, graveleuse au pied de la Côte Bourguignonne. La nappe qui prend naissance dans les calcaires lacustres est de type captive. En pied de la Côte chalonnaise et mâconnaise, ces formations sont présentes sous le Plio-Quaternaire et assurent la transition avec les calcaires du Jurassique sous-jacents. Dans cette zone, elles sont de nature argileuse.

Le Secondaire :

- 1) Le Crétacé : Il affleure seulement au Nord du fossé Bressan (Mirebeau-sur-Bèze) et son extension est mal connue sous la couverture du Tertiaire. Les faciès potentiellement aquifères sont la craie (Cénomaniens et Turonien), les sables de l'Albien et les niveaux calcaires du Crétacé inférieur. En bordure du fossé ces formations sont de faible épaisseur et de nature souvent marneuse donc peu productive. Le crétacé a également été reconnu au centre du fossé bressan mais à de grandes profondeurs (300 à 800 mètres).
- 2) Le Jurassique : Cette formation peut être considérée comme le substratum du fossé Bressan puisqu'il affleure sur toute la bordure Ouest et s'ennoie vers l'Est sous les formations Tertiaire pour réapparaître dans le massif du Jura. En pied de coteau, les terrains du Jurassique sont recouverts par les argiles du Plio-Quaternaire dont l'épaisseur croît vers l'Est. Dans ces formations, il existe deux grands aquifères karstiques, l'aquifère du Jurassique supérieur (Portlandien, Kimméridgien, Oxfordien supérieur) et l'aquifère du Jurassique moyen ou Dogger (Callovien, Bathonien et Bajocien). La karstification est souvent plus développée dans ce dernier et les débits les plus importants. Le Jurassique inférieur (formation du Lias) constitue le substratum imperméable.
- 3) Le Trias : On observe cette formation dans la bordure ouest du fossé d'effondrement bressan au niveau de Mâcon. C'est une formation gréseuse pouvant donner naissance à quelques sources. Plus épais au centre du fossé bressan, il est très profond où les eaux sont fortement minéralisées.

Afin d'illustrer ces propos, une coupe géologique est présentée ci-dessous.

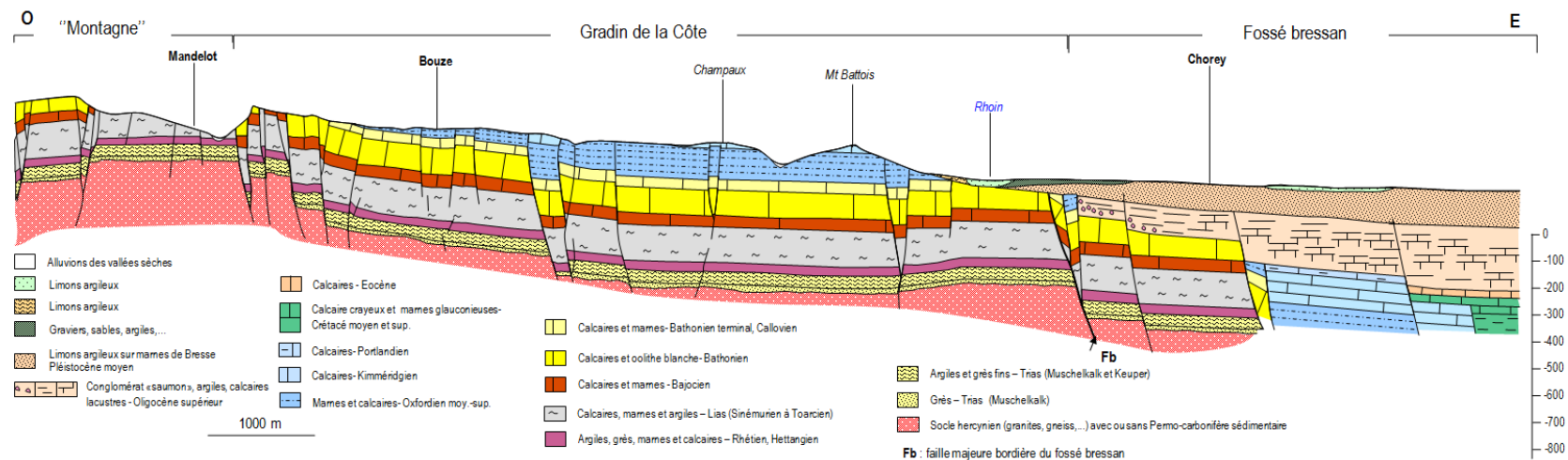


Illustration 12 : Coupe géologique du fossé Bressan au niveau de Beaune

D'après C.Rémond (1973) in *Etude bibliographique sur l'hydrogéologie de Beaune* de J.Toubin (1982) pour le BRGM et Carte géologique de Beaune au 1/50000, éditions BRGM (1985)

2) Bassins houillers de Blanzay, Creusot et Montceau-les-Mines

La zone des bassins houillers comporte, d'un point de vue géologique et hydrogéologique, quatre grands ensembles qui sont, des plus récents aux plus anciens :

- les alluvions des principaux cours d'eau, la Dheune s'écoulant vers la Saône, la Bourbince et l'Arroux, ces deux derniers cours d'eau s'écoulant vers la Loire,
- les formations sédimentaires secondaires et tertiaires, non plissées mais faillées et s'enfonçant vers le fossé de la Loire en direction du Sud-Ouest,
- les formations permo-carbonifères, plissées et faillées et contenant les différents niveaux de houilles anciennement exploités,
- le socle cristallin sur lequel reposent les trois ensembles précédents.

Les alluvions des cours d'eau, sont de nature variée mais généralement sableux et/ou graveleuses contenant des ressources en eau facile à exploiter. Dans cette zone les cours d'eau sont de faible importance, aussi, les alluvions sont souvent peu étendues et peu épaisses ce qui limite la quantité d'eau qu'elles peuvent contenir. Toutefois on peut noter la présence de quelques cours d'eau de tailles relativement importantes que sont la Bourbince et l'Arroux où les nappes sont plus importantes et souvent exploitées pour l'eau potable.

Les formations du Secondaire et du Tertiaires sont, de manière générale, composées de formations peu perméables (argiles du Lias, formations du tertiaire) avec des passages plus calcaires où les ressources aquifères sont notables (calcaires du Dogger). Le tertiaire contient lui aussi quelques passages calcaires aquifères dont les ressources en eau pourraient ne pas être négligeables.

Les formations permo-carbonifères sont composées de grès, conglomérats et de schistes avec des niveaux dolomitiques dans le Permien et des niveaux de houille dans le Carbonifère. Ce sont des roches fortement indurées et impactées par des fissures dans lesquelles peut s'écouler une nappe. Les formations permo-carbonifères sont recouvertes de produits d'altération plus ou moins épais.

Le socle cristallin appartient à la partie nord-est du Massif du Morvan. Il est principalement constitué de différents granites et accessoirement de roches métamorphiques de type gneiss. On peut y observer la présence de nappes qui circulent à travers les fissures et/ou fractures impactant ces formations.

Les produits d'altération qui recouvrent souvent ces formations sont de nature sableuse à fraction argileuse notable (arène). Ils peuvent contenir des volumes d'eau conséquents mais du fait de leur perméabilité médiocre, les productivités y sont faibles.

3) Vallées de la Nièvre de la Loire²

La zone d'étude nivernaise est composée de différentes formations géologiques dont la nature varie d'est en ouest mais également du nord au sud.

La partie ouest est composée par les plateaux du Jurassique moyen et supérieur du Nivernais. Ces formations correspondent à une alternance de faciès calcaires et de faciès marneux. Elles

² Rapport BRGM RR-39291-FR (1997)

vont du Bajocien au Portlandien. L'alternance calcaires et marnes entre ces deux séries ont une épaisseur qui est comprise globalement entre 360 et 485 mètres.

On distingue des différences de faciès entre la partie nord et la partie sud de la zone d'étude avec pour certaines séries des terrains plus calcaires au nord et plus marneux au sud (ex Bajocien supérieur, Bathonien inférieur et moyen, Bathonien supérieur, Callovien inférieur et moyen, Oxfordien moyen et supérieur).

Le Portlandien est lui-même surmonté par les formations du Crétacé. Le contact entre ces deux formations est une couche de calcaire marneux de l'Hauterivien et Barrémien inférieur d'une épaisseur comprise entre 15 à 25 mètres. Ensuite on distingue une alternance d'argiles et de sables datant du Barrémien supérieur, de l'Albien et du Cénomaniens sur une épaisseur d'environ 200 mètres. Ces formations sont à l'affleurement au nord-ouest du département où elles constituent la Puisaye.

La série du Jurassique moyen et supérieur repose sur les marnes du Lias qui constituent ainsi le substratum imperméable de l'ensemble des aquifères des plateaux calcaires du Nivernais. Cette série sédimentaire est affectée d'un pendage général vers l'ouest voir le nord-ouest de sorte qu'en surface, on rencontre les formations de plus en plus récentes lorsqu'on se déplace de l'est vers l'ouest et du sud-est vers le nord-ouest. La zone d'étude est traversée par un réseau de failles orientées nord-nord-est/sud-sud-ouest ou nord/sud faisant apparaître les marnes du Lias (comme dans la partie Nord) et plusieurs fossés d'effondrement remplis de formations tertiaires.

Les formations du Tertiaire sont composées dans notre zone d'étude:

- au nord-ouest (Puisaye) de lambeaux de sables et de cailloutis reposant sur les formations du Portlandien et du Cénomaniens,
- en bordure de Loire entre Cosne et Pouilly, les mêmes formations que ci-dessus mais accompagnées de calcaires et marnes lacustres et reposant sur les même formations que ci-dessus.

Dans la partie ouest et sud de la zone d'étude, les formations sont entaillées par les cours d'eau de la Loire et de la Nièvre les recouvrant de formations alluviales sous forme de terrasse.

Deux types d'alluvions prédominent au sein de la vallée de la Loire et de la Nièvre :

- les alluvions anciennes qui sont de type argilo-sableux peu épais ;
- les alluvions modernes ont de manière générale une épaisseur variant entre 4 et 14 mètres, la médiane se situant vers les 10 mètres.

Les alluvions sont de surface importante au droit des deux principales vallées (lit majeur) :

- Val de Loire : Environ 10 mètres d'épaisseur, elles sont constituées de sables, graviers et galets. En surface elles sont recouvertes de limons argileux.
- Basse vallée de la Nièvre: en surface elles sont constituées de sable argileux, leur épaisseur n'est pas connue avec précision.

Ces formations alluviales reposent sur :

- des argiles et des marnes en amont de Nevers pour la Loire,
- des calcaires et des marnes ou des argiles en aval de Nevers jusqu'à Cosne-sur-Loire,
- des argiles sableuses en aval de Cosne-sur-Loire.

Les alluvions récentes de la Loire et de la Nièvre contiennent une nappe importante et bien alimentée (bonnes caractéristiques hydrodynamiques du réservoir). Cette nappe est exploitée par des captages d'AEP.

4) Vallée de l'Yonne et de ses affluents

La zone étudiée est située sur la partie est du bassin parisien, localisée dans le département de l'Yonne. L'âge des terrains s'étage du Secondaire (Lias) au Quaternaire (dépôts alluviaux). Ces couches géologiques montrent dans l'ensemble un faible pendage vers le nord-ouest. Elles sont fréquemment affectées par des failles.

On peut y distinguer plusieurs types de lithologies toutes décrites ci-dessous en commençant par les terrains les plus récents et en finissant par les terrains les plus anciens :

- Les alluvions anciennes ou modernes

La vallée de l'Yonne est constituée d'une couche d'alluvions épaisse de 3 à 5 mètres reposant sur un substratum dont la nature varie selon la localisation :

- les argiles compactes de l'Albien,
- les calcaires du Jurassique moyen/supérieur,
- la craie altérée du Campanien inférieur.

Ces alluvions sont constitués de manière générale par :

- une couche de terre végétale et de limons argileux épaisse de 0,5 à 3 mètres,
- une couche de sable et de graviers calcaires plus ou moins limoneux épaisse de 1 à 5 mètres.

La nappe phréatique se rencontre entre 0,5 et 3 mètres de profondeur. De manière générale, cette nappe est drainée par l'Yonne avec un axe d'écoulement vers le Nord-Ouest. Des résultats de pompages d'essais, obtenus dans les alluvions au niveau de Villemannoche et de Migennes, montrent une transmissivité comprise entre 10^{-3} et 10^{-2} m²/s et une perméabilité comprise entre 10^{-3} et 10^{-2} m/s dans ces formations alluviales.

Les débits maximaux théoriques calculés lors de ces investigations se situent entre une vingtaine de m³/h à plusieurs centaines de m³/h (remarque : ces débits ont été obtenus avec des forages de 0,08 mètre de diamètre en période de hautes eaux).

Pour les deux principaux affluents de l'Yonne (l'Armançon et le Serein), les alluvions déposées sont principalement sablo-graveleuses, parfois argileuses. Leurs épaisseurs varient entre 1,5 et 5 mètres (moyenne de 3 mètres). Leur substratum correspond selon la localité soit :

- aux sables de l'Albien et du Barrémien,
- aux calcaires du Portlandien.

L'épaisseur des alluvions mouillées est le plus souvent comprise entre 1 et 5 mètres. Les débits d'exploitations connus dans ces formations sont de l'ordre d'une dizaine de m³/h.

- Les formations limono-sableuses (tertiaire ou quaternaire)

Elles se rencontrent dans la partie nord du département, sous forme de placages lenticulaires, plus ou moins étendus. Leur épaisseur est généralement inférieure à 10 mètres, mais peut atteindre localement une trentaine de mètres.

Ces formations recèlent parfois de petites nappes perchées faiblement productives mais, le plus souvent, les eaux météoritiques percolent à travers les terrains en alimentant la nappe de la craie sous-jacente.

- Le Crétacé :

C'est un ensemble à dominante crayeuse. La craie a un pendage faible orienté vers le centre du bassin parisien. Il constitue le principal réservoir aquifère du département. Les niveaux géologiques qui constituent cet aquifère appartiennent au Crétacé supérieur :

- le Turonien et le Sénonien sont des niveaux crayeux très perméables avec une forte porosité (jusqu'à 70%) et une épaisseur d'environ 320 mètres,
- ces formations reposent sur le Cénomani (Crétacé supérieur également) qui est constitué d'une alternance de craie dure et de marne. Ainsi, les marnes imperméables forment le mur de la nappe ; elles permettent de retenir l'eau au sein de la craie sus-jacente.

Les circulations d'eau souterraines y sont complexes et étroitement liées à la fissuration. Les phénomènes karstiques sont fréquents.

- L'Albien

Il s'agit d'un ensemble complexe de couches plus ou moins lenticulaires de sables fins à moyens et d'argiles, pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, contenant des nappes d'eau libres ou captives. Cette eau peut être ferrugineuse. Les débits d'ouvrages de captages sont assez souvent faibles, de l'ordre de quelques m³/h, du fait de la nature argileuse des terrains. Ces aquifères sont donc, jusqu'à présent, relativement peu sollicités.

- l'Aptien - Barrémien

Il s'agit de formations sablo-argileuses discontinues, peu épaisses, plus ou moins aquifères, situées immédiatement sous les sables de l'Albien. Les débits d'ouvrages de captages sont généralement faibles, de l'ordre de quelques m³/h, et l'eau est assez souvent fortement minéralisée.

- Le Jurassique supérieur :

- Portlandien : Seule la partie supérieure de cet étage, constituée de calcaires compacts fissurés et karstifiés, présente un intérêt. Les émergences d'eau souterraines se manifestent soit au toit des formations marneuses du Kimméridgien, soit au mur des formations imperméables du Crétacé inférieur, au niveau d'accidents tectoniques.
- L'Oxfordien moyen et supérieur correspondant à une superposition de calcaires et de quelques niveaux marneux
- Le Kimméridgien inférieur composé de calcaires à Astartes ayant une épaisseur de 25 à 35 mètres
- Kimméridgien moyen et supérieur correspondant de des calcaires et marnes à *Exogyra virgula* d'une épaisseur allant de 55 à 60 mètres.

- Le Jurassique moyen :

Il s'agit d'une puissante masse de calcaire possédant soit une porosité matricielle, soit une porosité fissurale. Les terrains, souvent karstifiés, emmagasinent des quantités importantes d'eaux souterraines émergeant généralement dans le fond des vallées qui constituent un niveau de base.

- Le Jurassique inférieur (Lias) :

Il s'agit d'un ensemble de terrains majoritairement marneux comportant quelques niveaux calcaires, peu épais, entrecoupés de lits marneux : Domérien supérieur, Sinémurien. Ces calcaires sont aquifères et donnent de fréquentes petites sources.

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 régional, 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 500 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 régional.

L'Illustration 17 synthétise la méthodologie de cartographie du potentiel géothermique régional proposée.

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 :

- BSS³ : 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 ;
- ADES⁴ : 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 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.

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 13 ci-dessous explicite le principe de spatialisation des données.

³ Banque du sous-sol, accessible via <http://infoterre.brgm.fr>

⁴ Accès aux Données sur les Eaux Souterraines – <http://www.ades.eaufrance.fr>

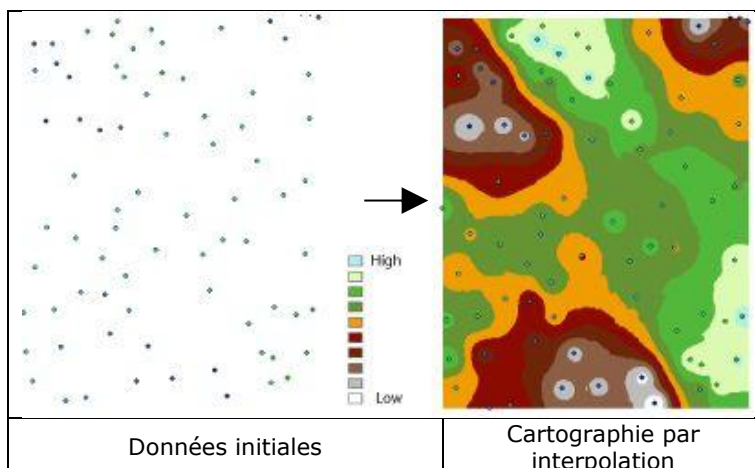


Illustration 13 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)

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 14).

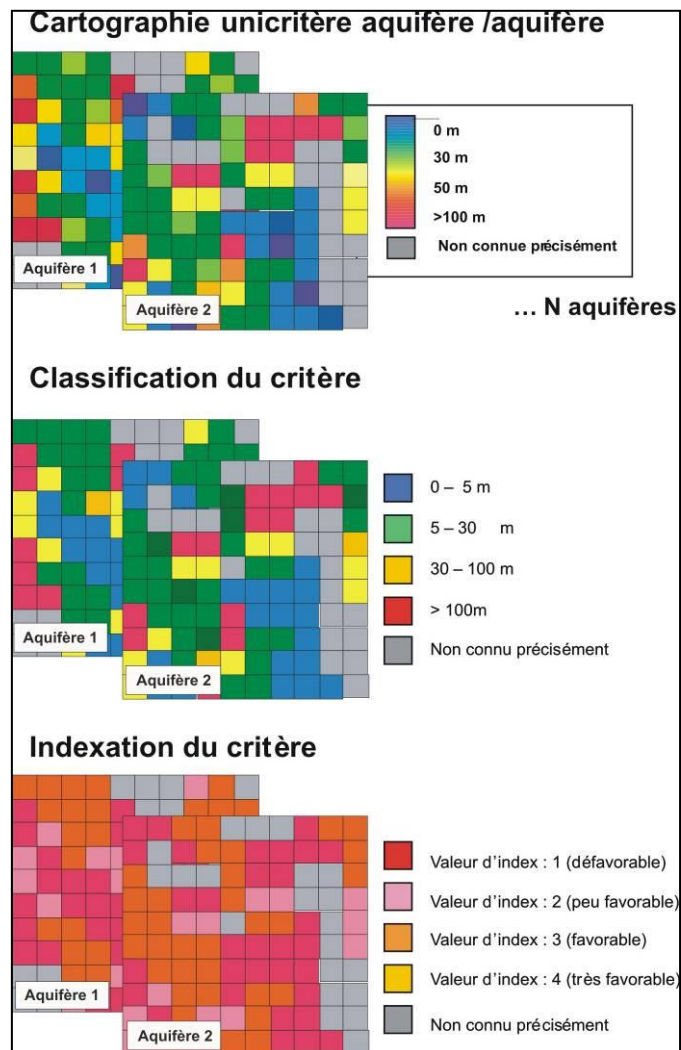


Illustration 14 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)

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.

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 15, ci-dessous, présente le principe de la cartographie multicritères.

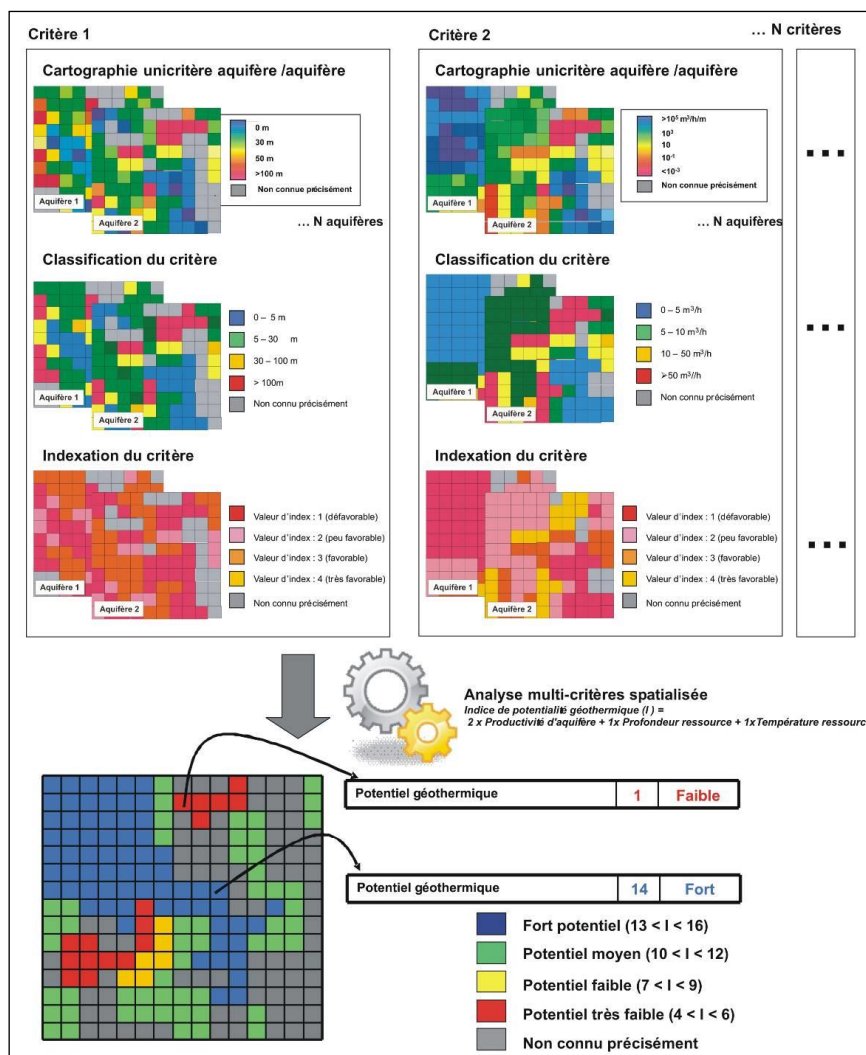


Illustration 15 : Principe de la cartographie multicritères

Etape 4 : Cartographie du potentiel géothermique régional

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 en Bourgogne. Il a été décidé en accord avec l'ADEME 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 (ex : nappe de l'Albien, nappe des formations plio-quaternaire du bassin bressant,...),
- soit l'exploitation est difficile à évaluer à une échelle régionale du fait de la très grande hétérogénéité spatiale de leur productivité (formations calcaires, crayeuses et de socle). 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).

Les aquifères alluviaux étudiés ont été sélectionnés dans les 3 grands bassins d'activités de la région Bourgogne, pour rappel :

- au nord : d'Auxerre jusqu'à Sens,
- à l'ouest : au niveau de la vallée de la Loire,
- à l'est : au niveau de la vallée de la Saône, ainsi que l'ancienne région houillère Creusot-Montceau.

La réalisation de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères de la Bourgogne se base sur les contours des aquifères alluviaux de la BD Lisa (Base de Données Limite des Systèmes Aquifères) complétés par les contours non pris en compte dans BDLisa des formations alluviales et colluviales de la carte géologique 1/50 000^{ème}. Ces contours sont présentés dans l'illustration 16.

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

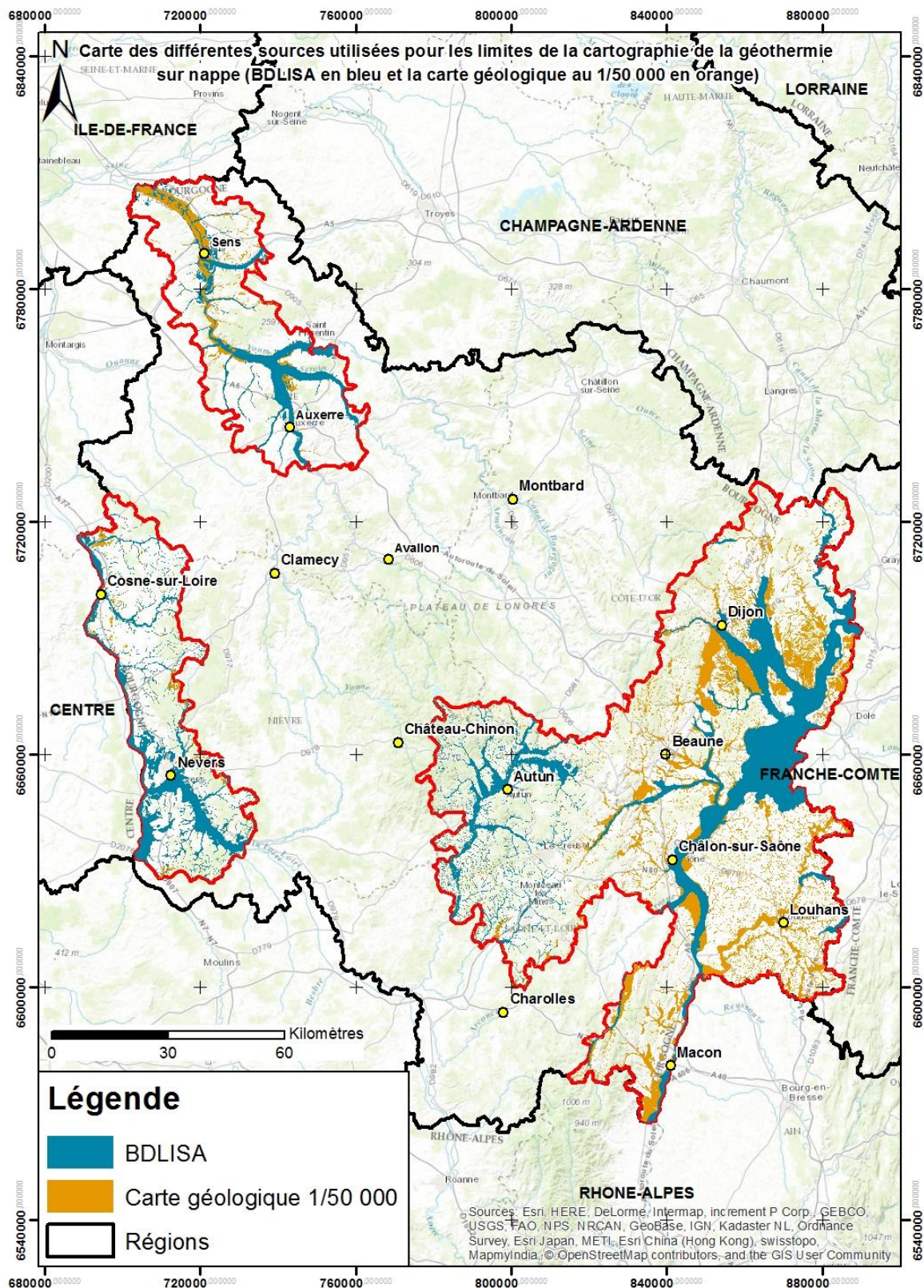


Illustration 16 : Présentation des aquifères étudiés

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 ».

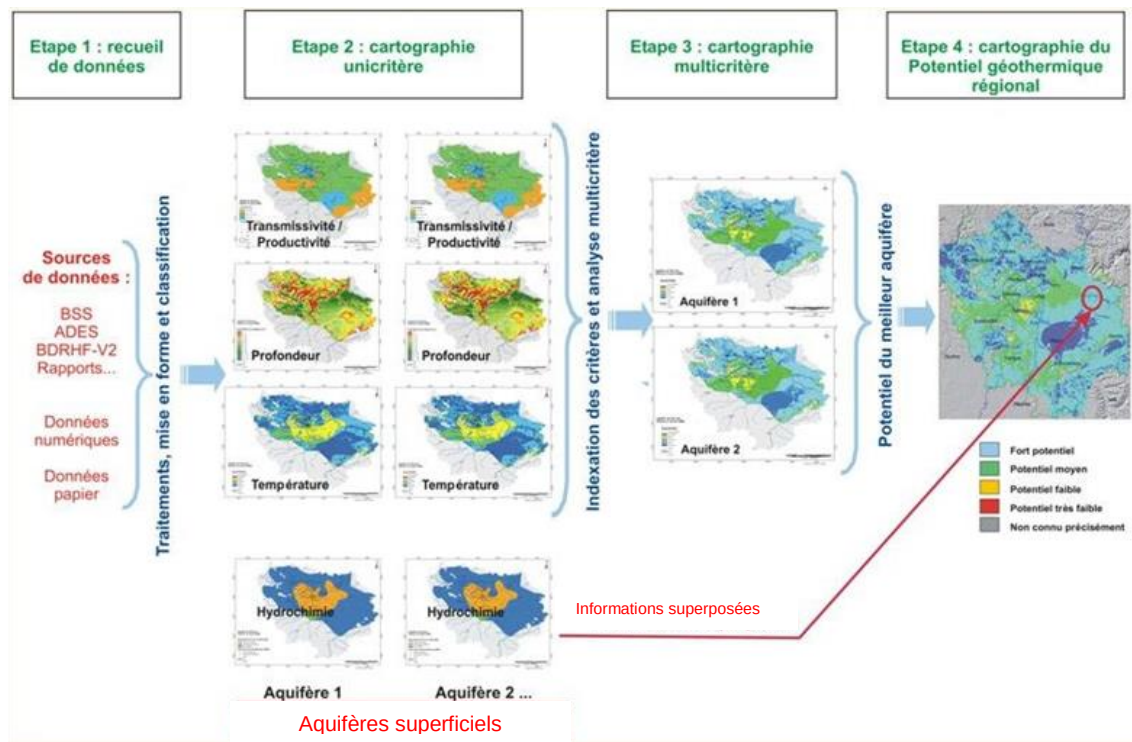


Illustration 17 – Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional

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 18 ci-dessous).

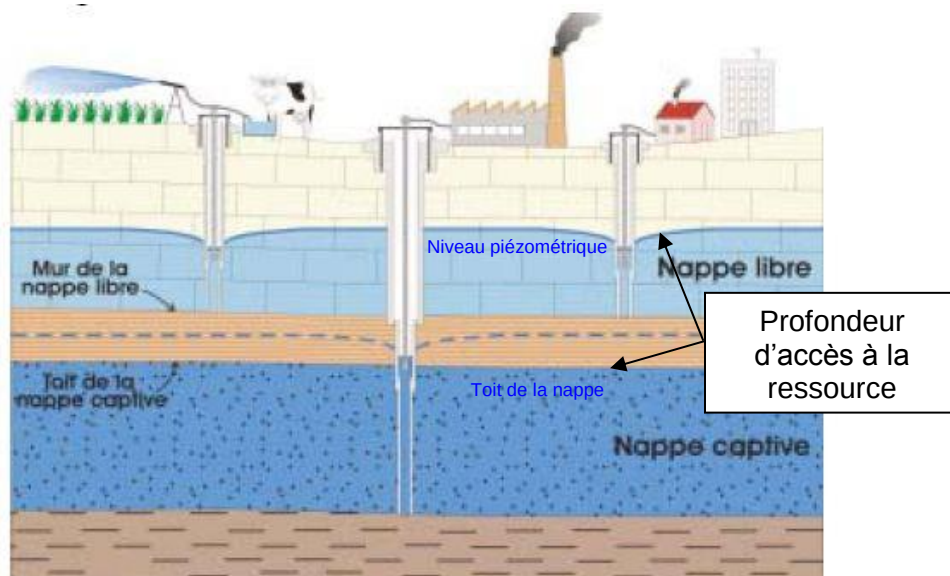


Illustration 18 : schéma explicitant les différents régimes de nappe (source BRGM)

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 4465 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 19), hormis pour le système alluvial de l'Arroux, où on observe moins de données que dans les 3 autres grands domaines alluviaux que sont l'Yonne, la Saône et la Loire (Illustration 20).

La faible densité de points d'accès à la nappe alluviale de l'Arroux peut s'expliquer par la présence d'une population et une occupation des sols moins importantes que dans les autres vallées 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.

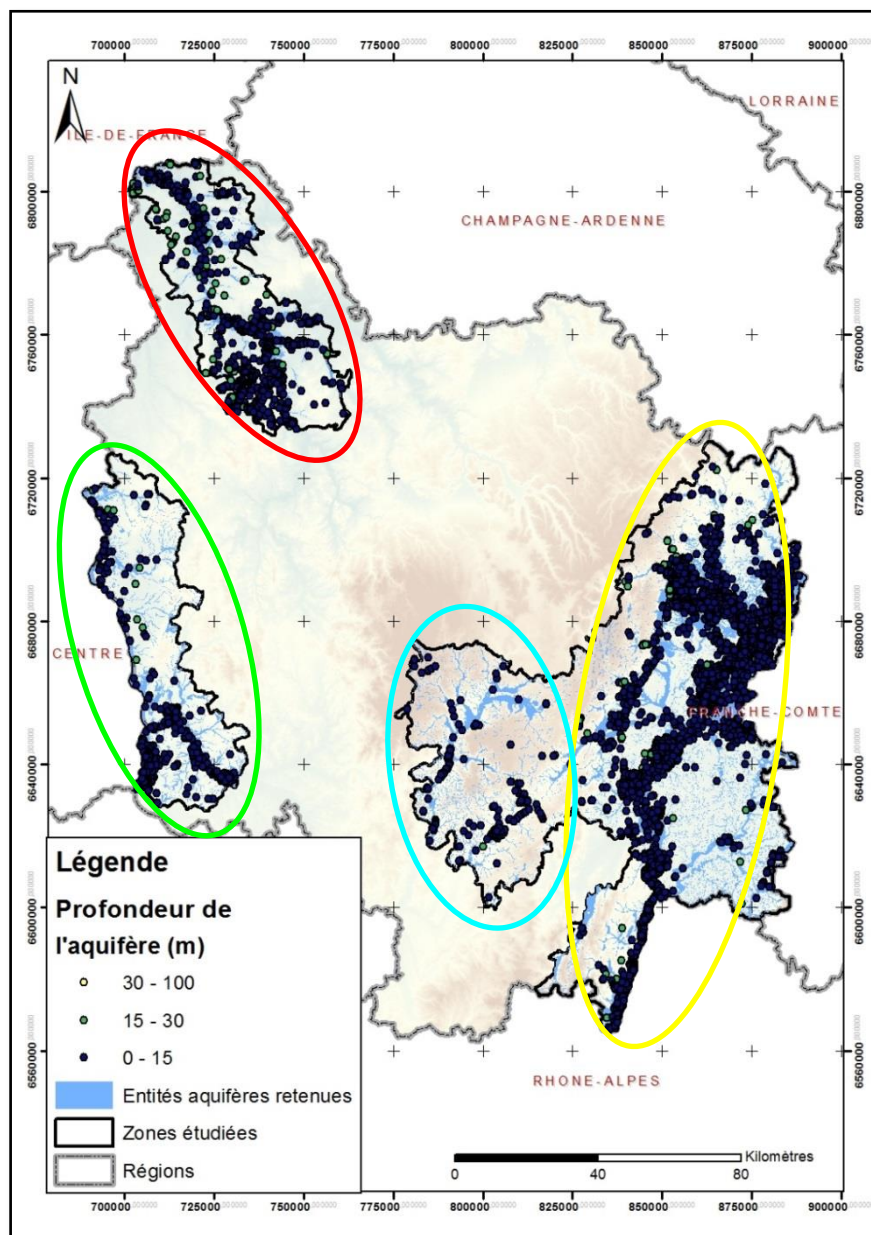


Illustration 19 : Répartition de la donnée ponctuelle pour le paramètre profondeur de nappe

Le tableau présenté en Illustration 20 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 (km ²)	Nombre de points	Profondeur de la ressource en eau		
			Min (m/sol)	Max (m/sol)	Moyenne (m/sol)
Alluvions de la Loire & affluents	465	416	0,2	26	3,86
Alluvions de l'Yonne & affluents	428	979	0,1	19,55	3,76
Alluvions de l'Arroux & affluents	389	232	0,15	12,1	3,14
Alluvions de la Saône & affluents	2130	2838	0,1	25,5	3,25

Illustration 20 : 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, défavorable au projet 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 21 : Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte

e) Méthode de spatialisation des données

Les différentes profondeurs observées avec les données ponctuelles ont été interpolées avec l'outil IDW du logiciel ArcGIS pour spatialiser l'ensemble des données (Illustration 22). La quasi-totalité des données (99%) étant dans la classe 0-15 mètres de profondeur, l'ensemble des aquifères alluviaux se sont vu attribuer la première tranche de valeur, à quelques rares zones près. Cette tranche, de 0 à 15 mètres de profondeur, est celle la plus favorable pour un projet de PAC.

Toutefois, il faut prendre en compte le fait qu'une nappe présente à une profondeur de moins de 5 mètres (ce qui représente 86,4% 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 des profondeurs d'accès à la ressource spatialisées

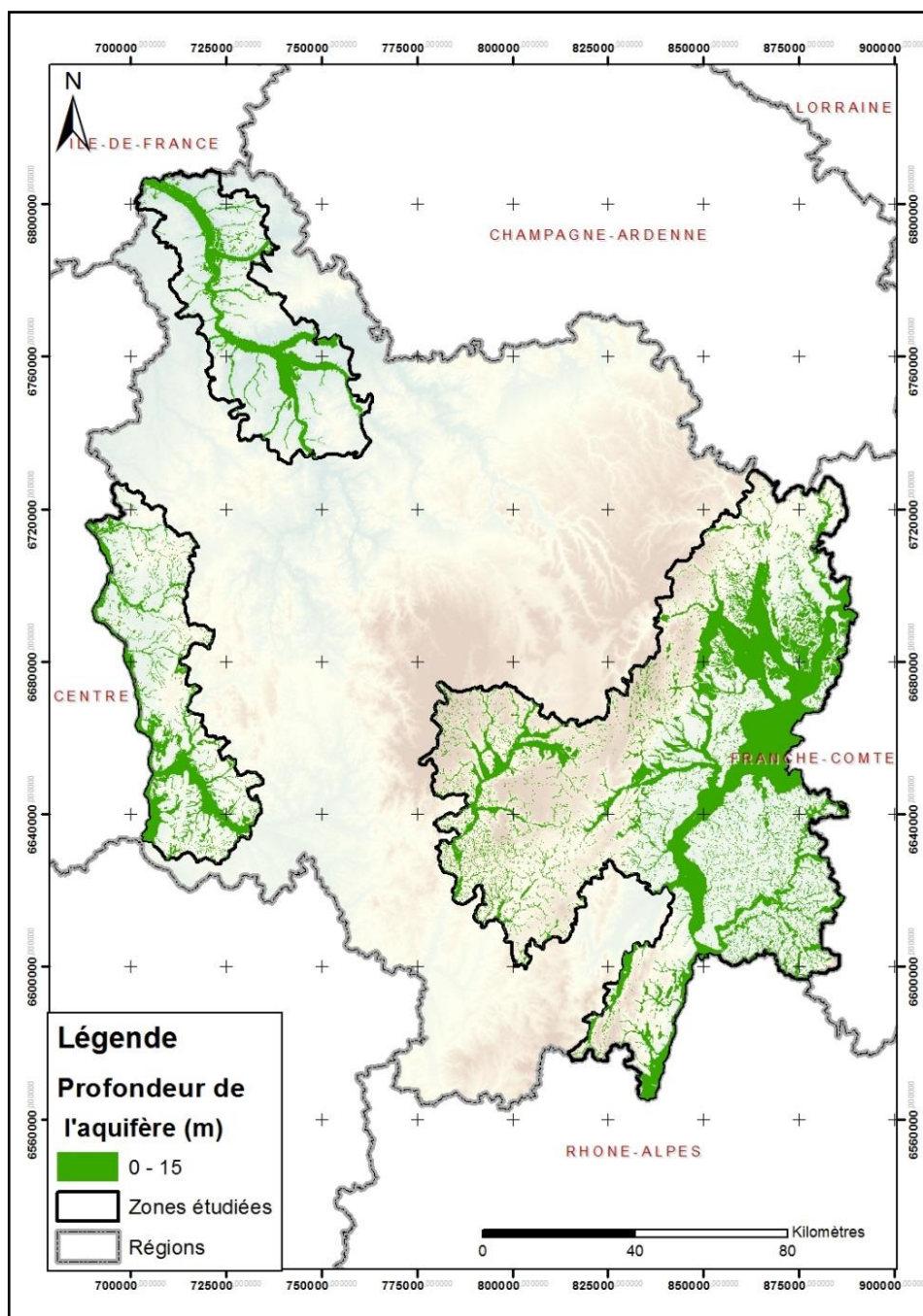


Illustration 22 : Carte finale du critère "profondeur de l'aquifère"

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, la majorité des données de productivité provient de la base de données de l'ARS, qui possède de nombreuses données relatives aux débits règlementaires de chaque captage d'alimentation en eau.

2000 dossiers BSS ont été dépouillés afin d'accroître la densité d'information toutefois, cela n'a permis de récolter qu'une faible quantité de données complémentaire (<20).

Des données sur les débits de pompages ont également été récoltées auprès des communes localisées et/ou des prestataires fermiers (SUEZ, VEOLIA...) dans les 3 secteurs étudiés.

C'est donc un total de 660 valeurs de productivité qui ont été récoltées sur l'ensemble des zones. La répartition des données obtenues pour le critère « productivité de la nappe » est présentée dans la figure suivante (Illustration 23).

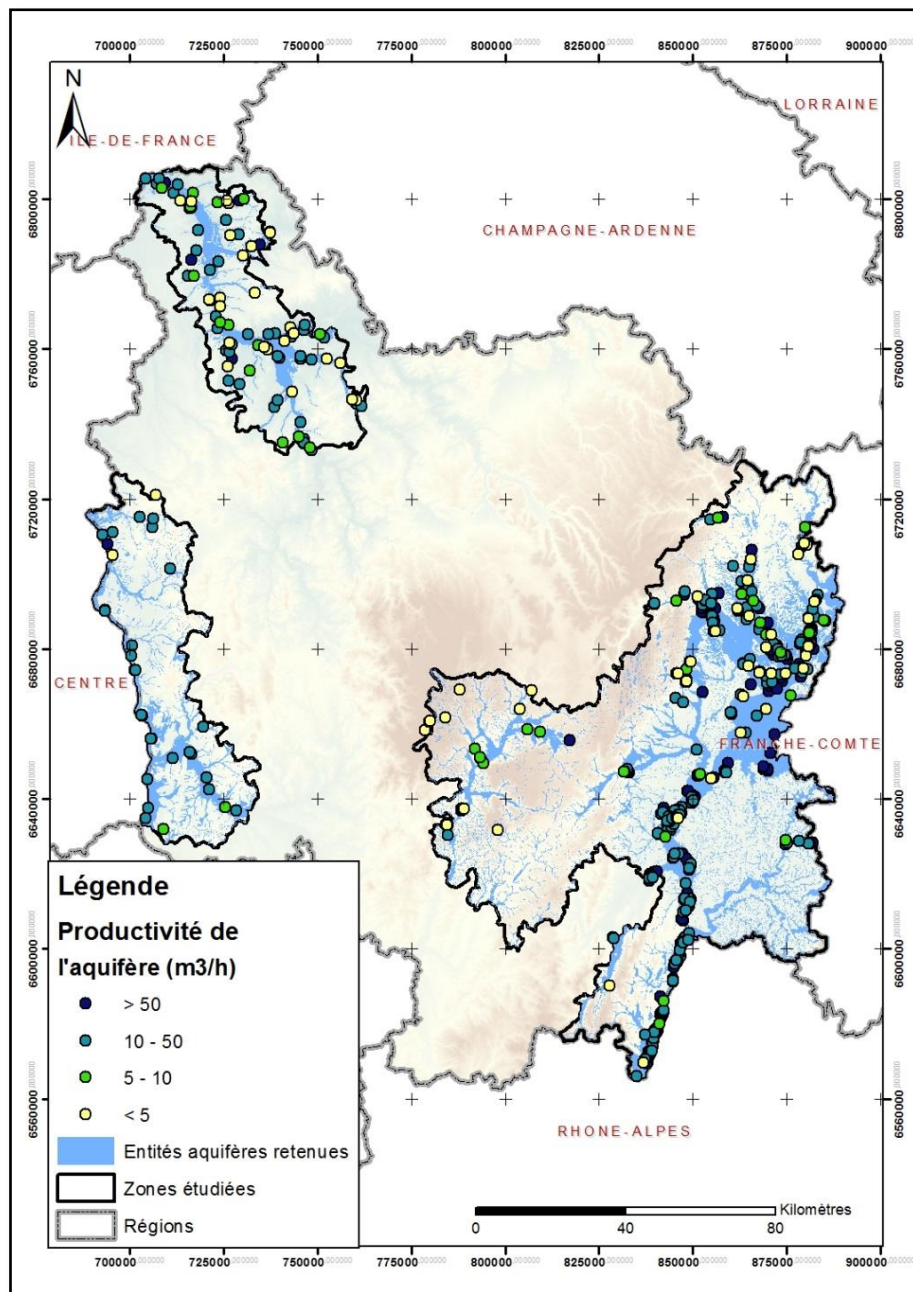


Illustration 23 : Carte des répartitions des données ponctuelles pour le paramètre productivité de la nappe

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 24 : 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, l'approche statistique 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

Toutes les nappes alluviales de la zone nord et de la zone est sont dans la classe de productivité 10 – 50 m³/h, ainsi que la nappe alluviale de l'Arroux, localisée dans le Morvan. La grande nappe alluviale de la Saône et de ses affluents est, quant à elle, dans une classe plus haute, c'est-à-dire que les débits d'exploitation excèdent les 50 m³/h. La carte du critère productivité est présentée ci-dessous (Illustration 25).

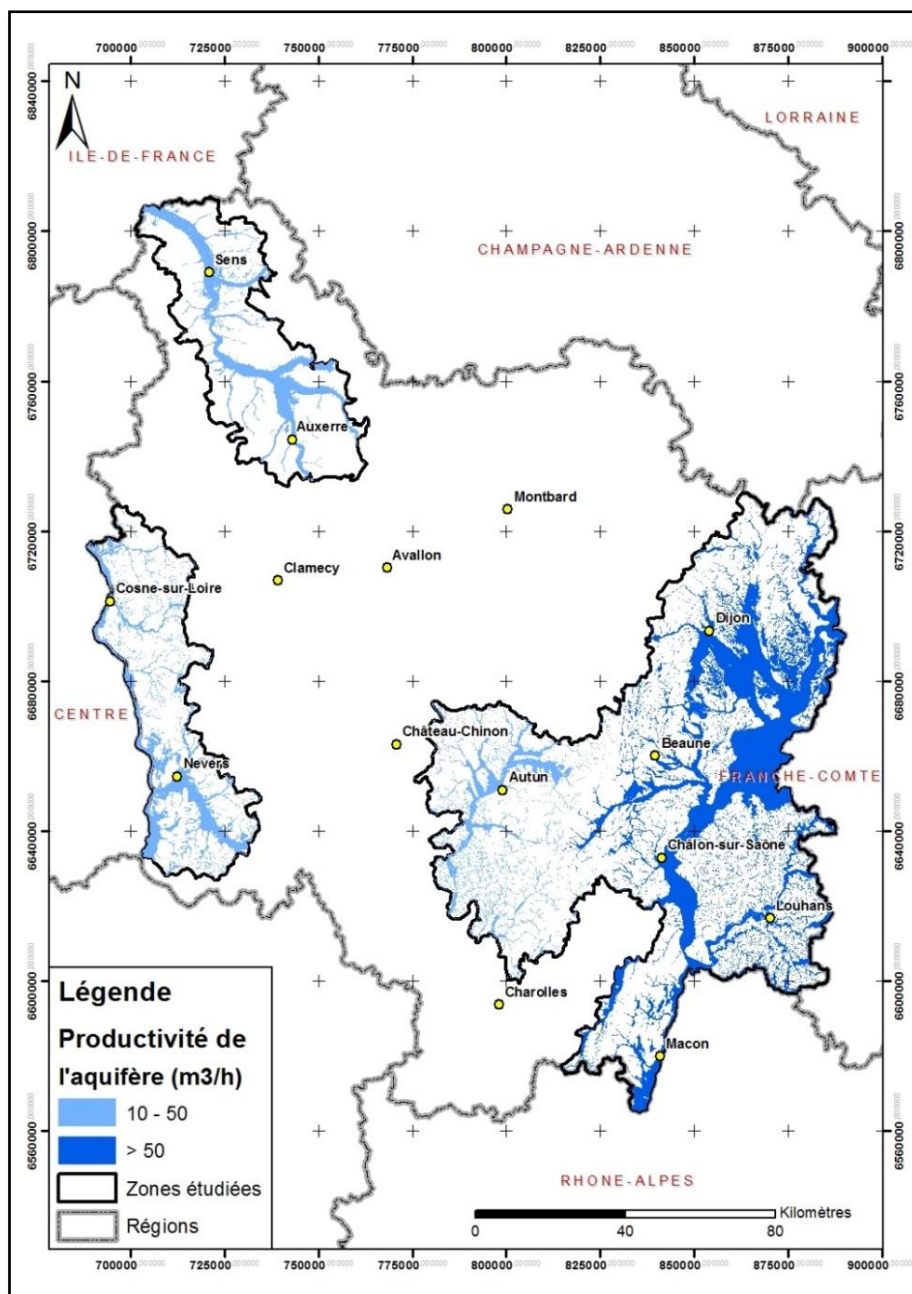


Illustration 25 : Carte finale du critère "productivité de l'aquifère"

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 600 points de mesures de température qui ont été récoltés pour cette étude. La répartition de ces données est présentée dans la figure suivante (Illustration 26) :

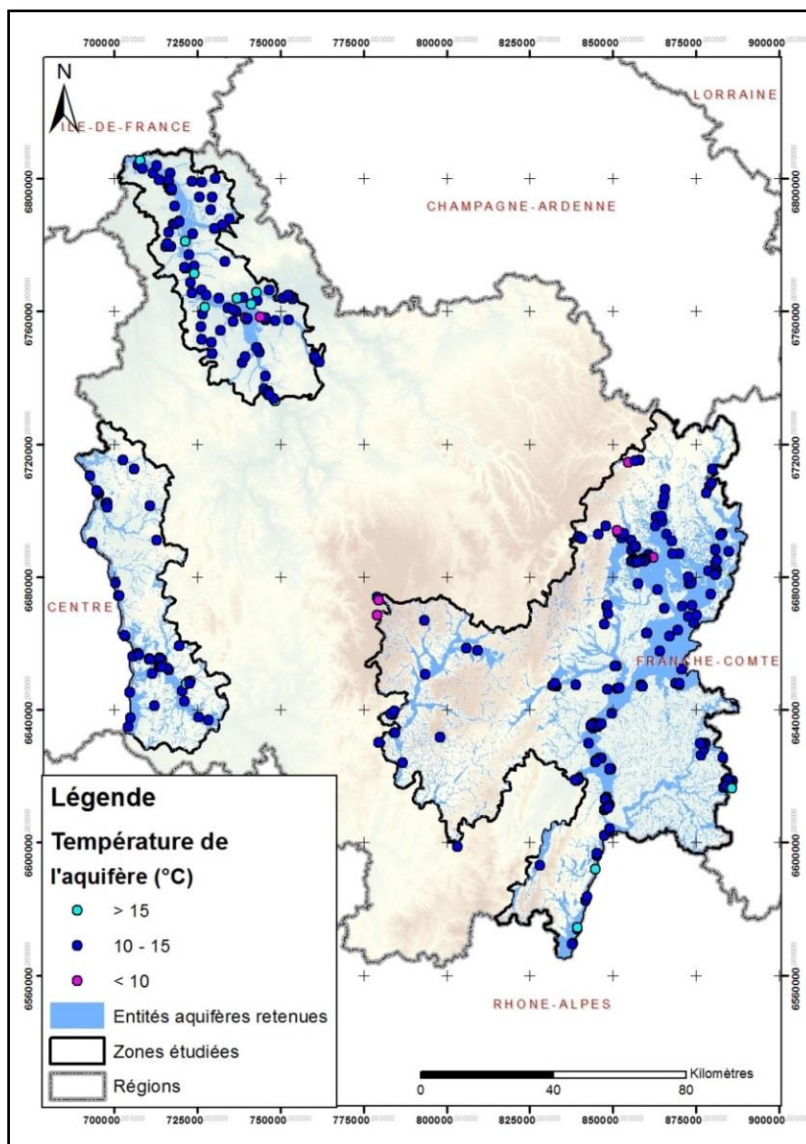


Illustration 26 : Répartition de la donnée ponctuelle pour le paramètre température de la ressource

Avant de procéder à l'analyse statistique des chroniques de données existantes, un traitement des données brutes a été effectué. Ce traitement a été nécessaire du fait de l'hétérogénéité des données. L'objectif était d'éliminer les analyses clairement aberrantes (valeurs de températures dans les alluvions supérieure à 80 °C par exemple, ou alors hausse de température de plus de 5 °C en quelques jours).

Afin de supprimer les valeurs aberrantes, il a été décidé de ne pas garder les 5 premiers et 5 derniers quantiles de nos séries de données.

Une fois ce travail réalisé, le traitement statistique des données a pu s'effectuer : la valeur minimale, maximale et la moyenne ainsi que l'écart-type et le nombre de prélèvements N ont été calculés pour chaque station d'échantillonnage considérée.

Les données ont été traitées département par département (Illustration 27).

Yonne		Saône et Loire		Côte d'Or		Nièvre	
Percentile	Valeur (°C)	Percentile	Valeur (°C)	Percentile	Valeur (°C)	Percentile	Valeur (°C)
Maximum 100%	21,9	Maximum 100%	27,6	Maximum 100%	22,0	Maximum 100%	123,1
99%	20,0	99%	18,1	99%	17,0	99%	21,0
95%	17,6	95%	16,0	95%	15,0	95%	16,0
90%	15,5	90%	15,2	90%	14,0	90%	14,5
3ème Quartile 75%	13,3	3ème Quartile 75%	14,1	3ème Quartile 75%	13,0	3ème Quartile 75%	13,0
Médiane 50%	12,2	Médiane 50%	12,9	Médiane 50%	12,0	Médiane 50%	11,1
1er Quartile 25%	11,5	1er Quartile 25%	11,6	1er Quartile 25%	11,0	1er Quartile 25%	10,0
10%	10,8	10%	10,5	10%	10,0	10%	9,0
5%	10,1	5%	9,5	5%	9,0	5%	8,0
1%	8,4	1%	7,2	1%	8,0	1%	5,9
Minimum 0%	5,0	Minimum 0%	3,4	Minimum 0%	5,0	Minimum 0%	0,0

Illustration 27 : Répartition des quantiles des séries de données de température de chaque département

Ainsi, seules les valeurs se trouvant entre les bornes jaunes (Illustration 27) ont été gardées dans les chroniques de mesures.

Concernant les valeurs de températures, elles s'échelonnent globalement de 8 °C jusqu'à presque 18 °C. Cette forte variabilité est due à la cyclicité saisonnière dont les variations de températures de l'air (ainsi que l'ensoleillement) impactent également celle des nappes alluviales. Ces variations saisonnières seront expliquées plus en détails dans le chapitre suivant.

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 28 : 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.

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.

Ces valeurs de températures relevées au sein des aquifères alluviaux étudiés 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 conséquence de ces résultats, nous avons décidé d'attribuer directement la classe 10-15 °C à tous les aquifères (Illustration 33). Aucune interpolation ne sera réalisée pour ce paramètre.

Cependant, 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, nous avons noté une variabilité saisonnière des températures des nappes alluviales (Illustration 29 ; Illustration 30 ; Illustration 31 ; Illustration 32), allant dans des températures plus froides en hiver (10-11 °C), et plus chaudes en été (15-16 °C), ce qui pourrait impacter de façon minime les performances des PAC.

Il est également important de noter que les températures moyennes globales des nappes semblent avoir tendance à légèrement augmenter depuis ces dernières années, tendance beaucoup plus visible sur la nappe alluviale de la Saône, dans le département de la Côte d'Or, où la température moyenne des nappes a augmenté de près de 1 °C en 5 ans (courbe bleue ciel sur les graphiques ci-dessous).

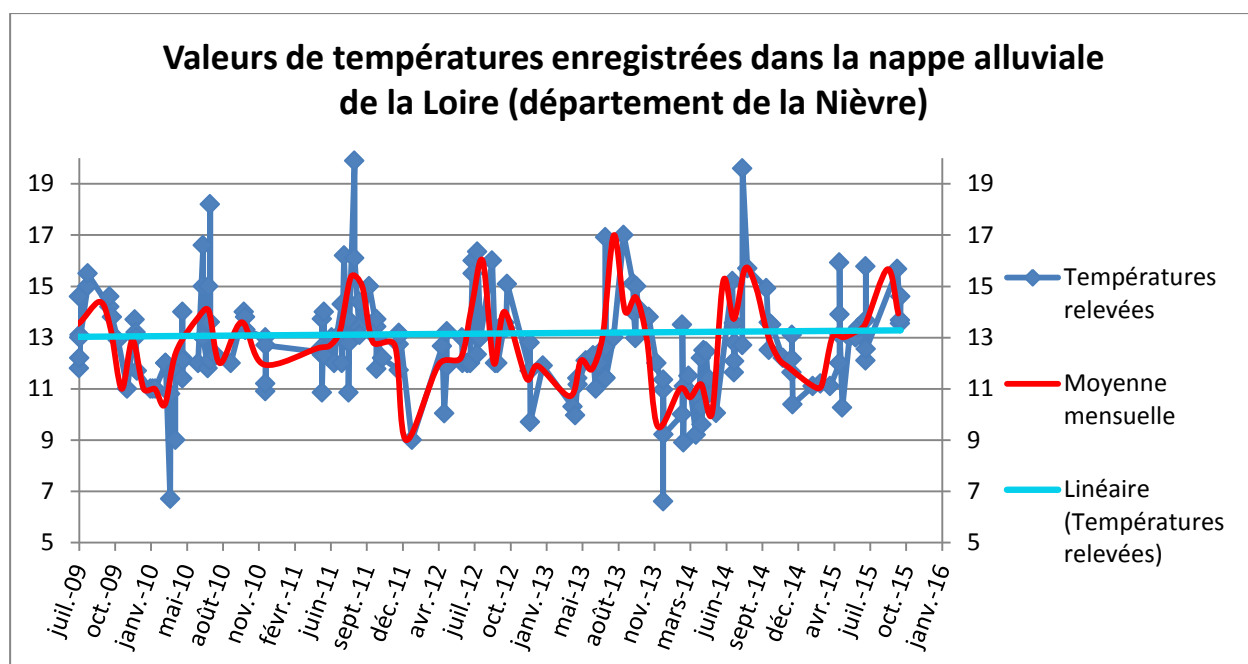


Illustration 29 : Graphique représentant les variations de température de la nappe alluviale de la Loire

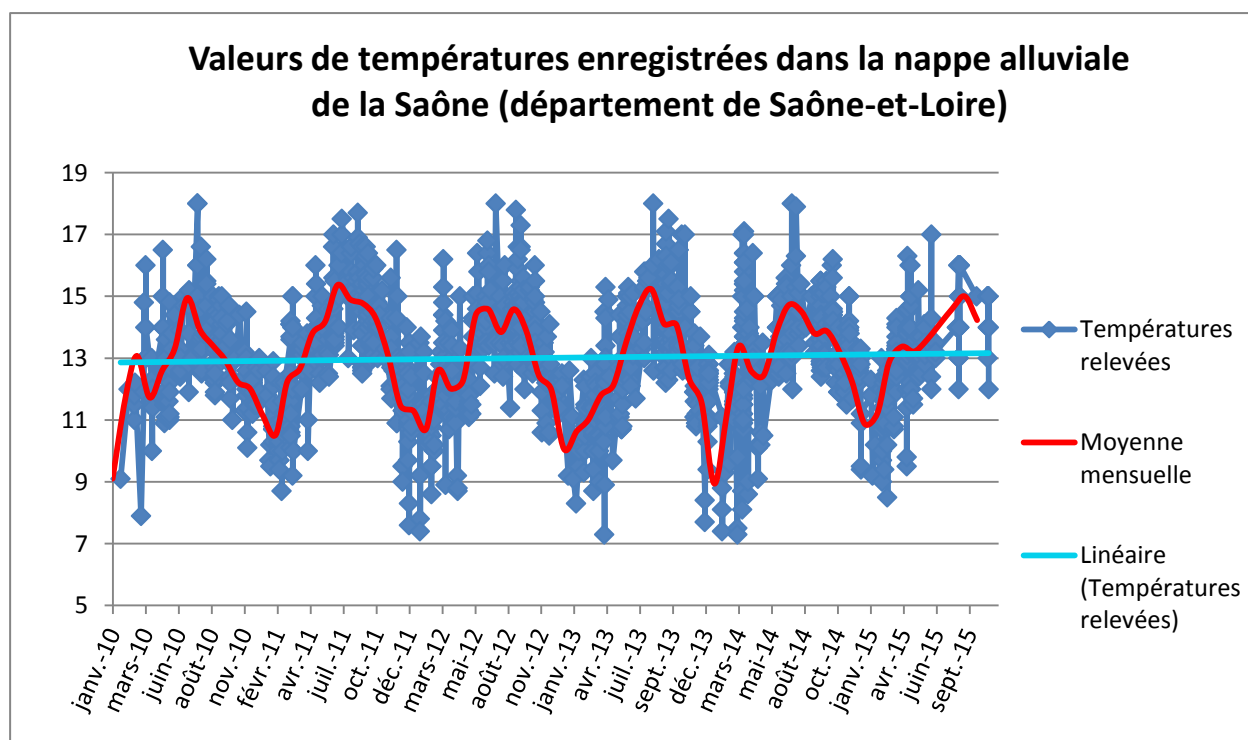


Illustration 30 : Graphique représentant les variations de température de la nappe alluviale de la Saône dans le département de la Saône et Loire

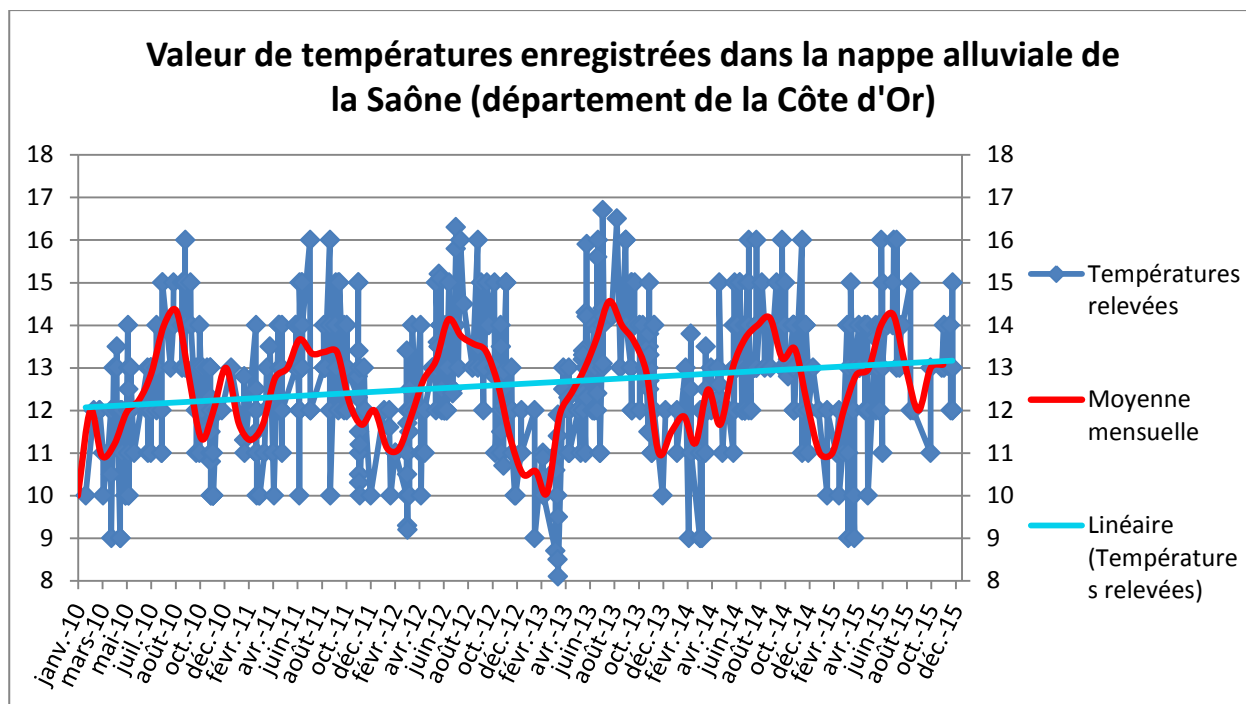


Illustration 31 : Graphique représentant les variations de température dans la nappe alluviale de la Saône dans le département de la Côte d'Or

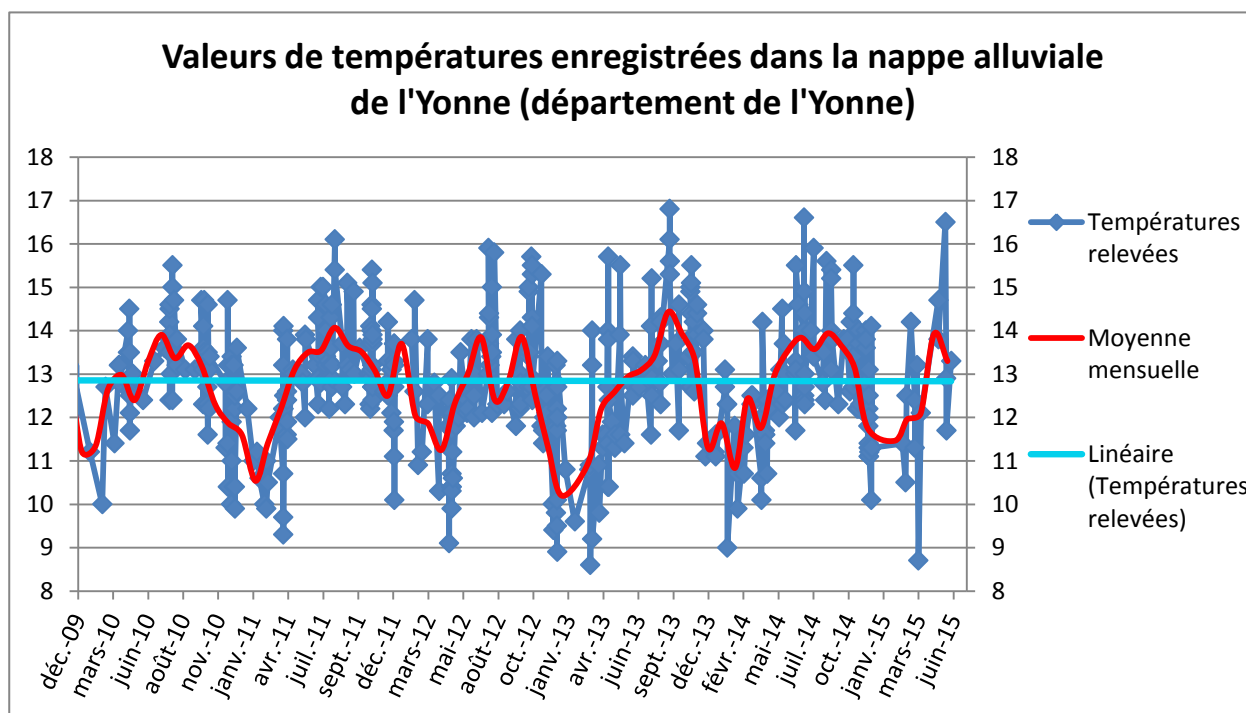


Illustration 32 : Graphique représentant les variations de température dans la nappe alluviale de l'Yonne

Ainsi, à travers ces 4 graphiques, nous pouvons observer la variation saisonnière de la température de l'eau au sein des nappes alluviales. Toutefois, globalement, les valeurs moyennes annuelles restent bien dans la tranche de température 10-15 °C, qui est la température optimale au bon fonctionnement des pompes à chaleur.

e) Carte régionale des températures d'aquifères spatialisées

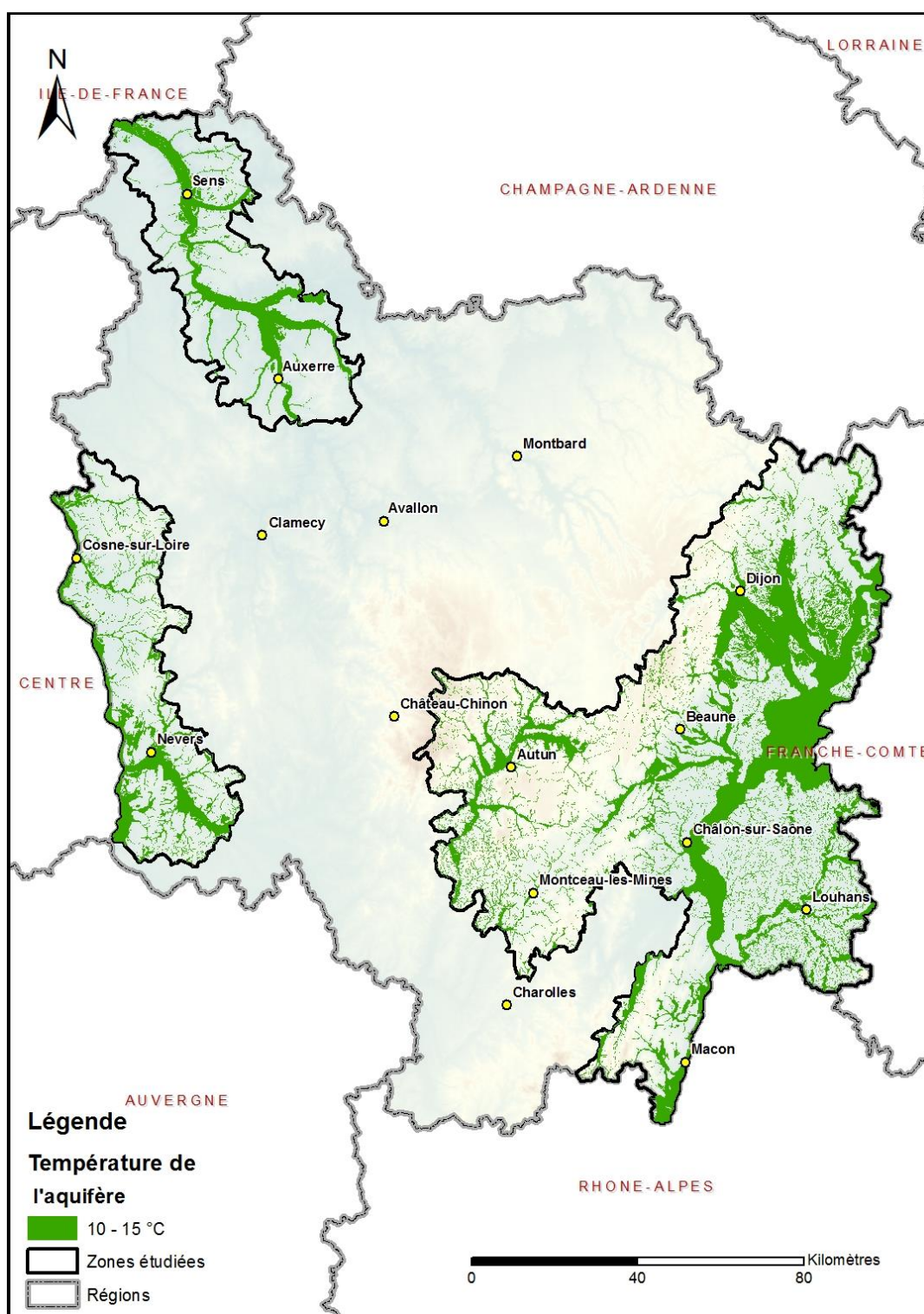


Illustration 33 : Carte finale du critère "température de la ressource"

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 34, 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	$Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$	1	Défavorable
	$5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$	2	Peu favorable
	$10 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$	3	Favorable
	$Q > 50 \text{ m}^3/\text{h}$	4	Très favorable
Température de la ressource	$T < 10^\circ\text{C}$	2	Peu favorable
	$10^\circ\text{C} \leq T < 15^\circ\text{C}$	4	Très favorable
	$T > 15^\circ\text{C}$	3	Favorable

Illustration 34 : 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

Les 3 cartes, présentées ci-dessous (Illustration 35 ; Illustration 36 ; Illustration 37) sont le résultat final de cet atlas, concernant la potentialité géothermique très basse énergie des nappes alluviales.

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 (Yonne Loire, Nièvre, Saône), qui sont des nappes peu profondes et dont la productivité est souvent bonne.

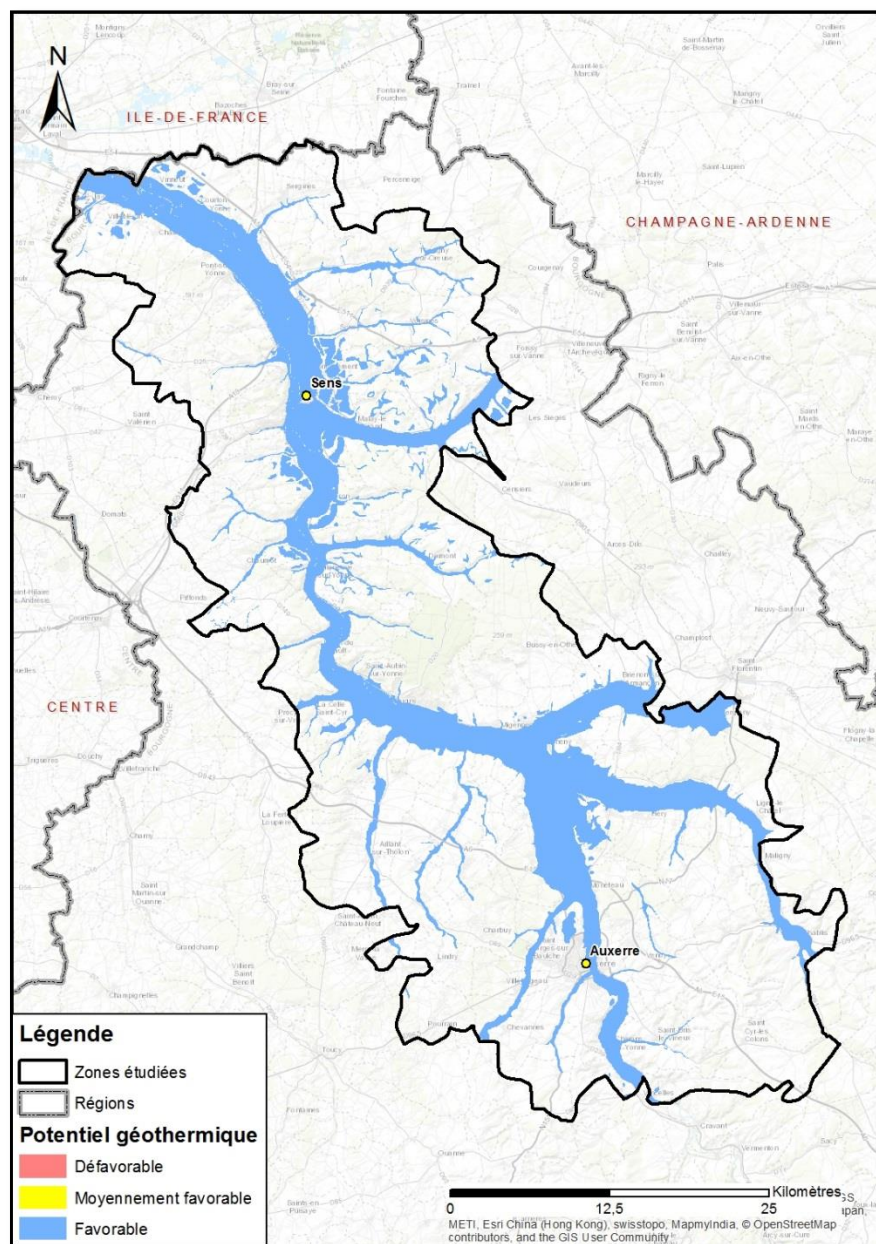


Illustration 35 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone nord

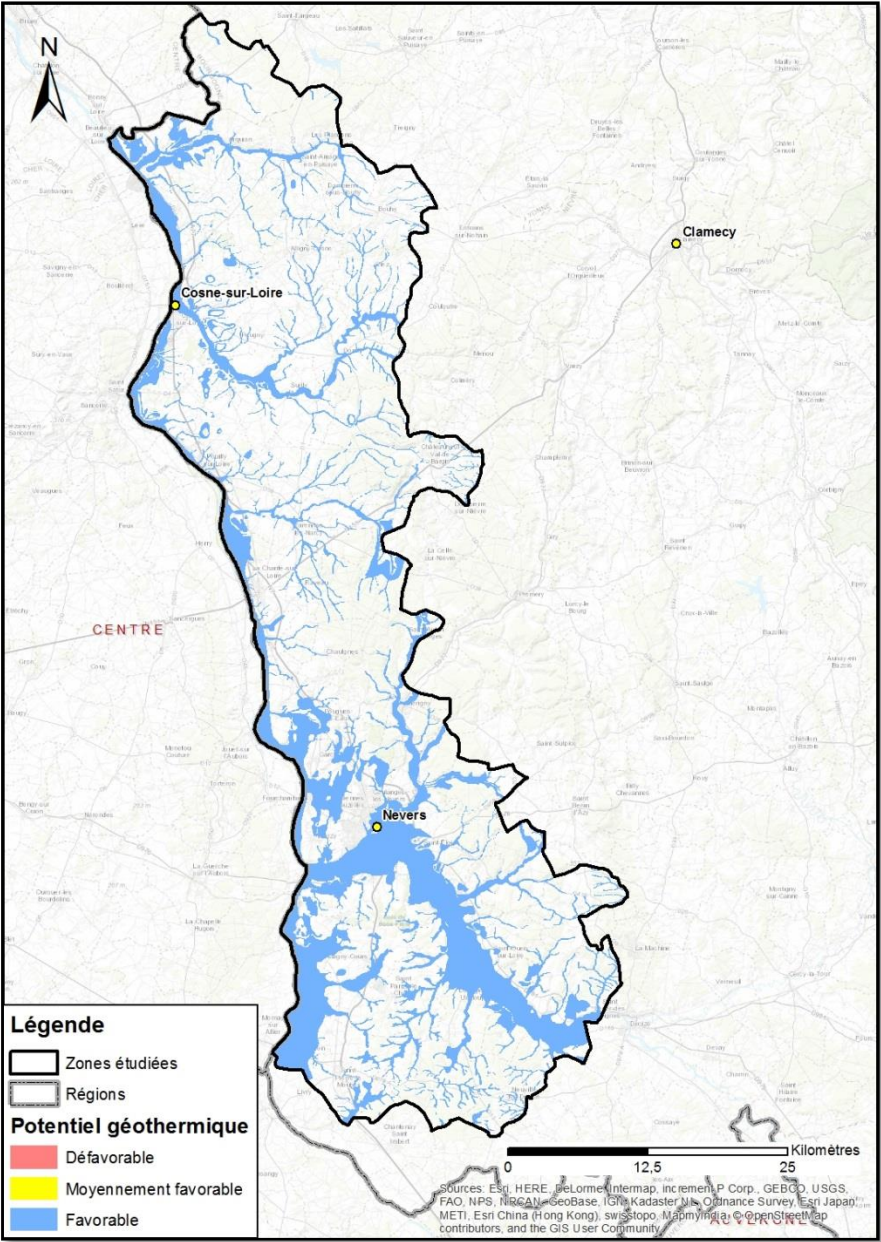


Illustration 36 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone ouest

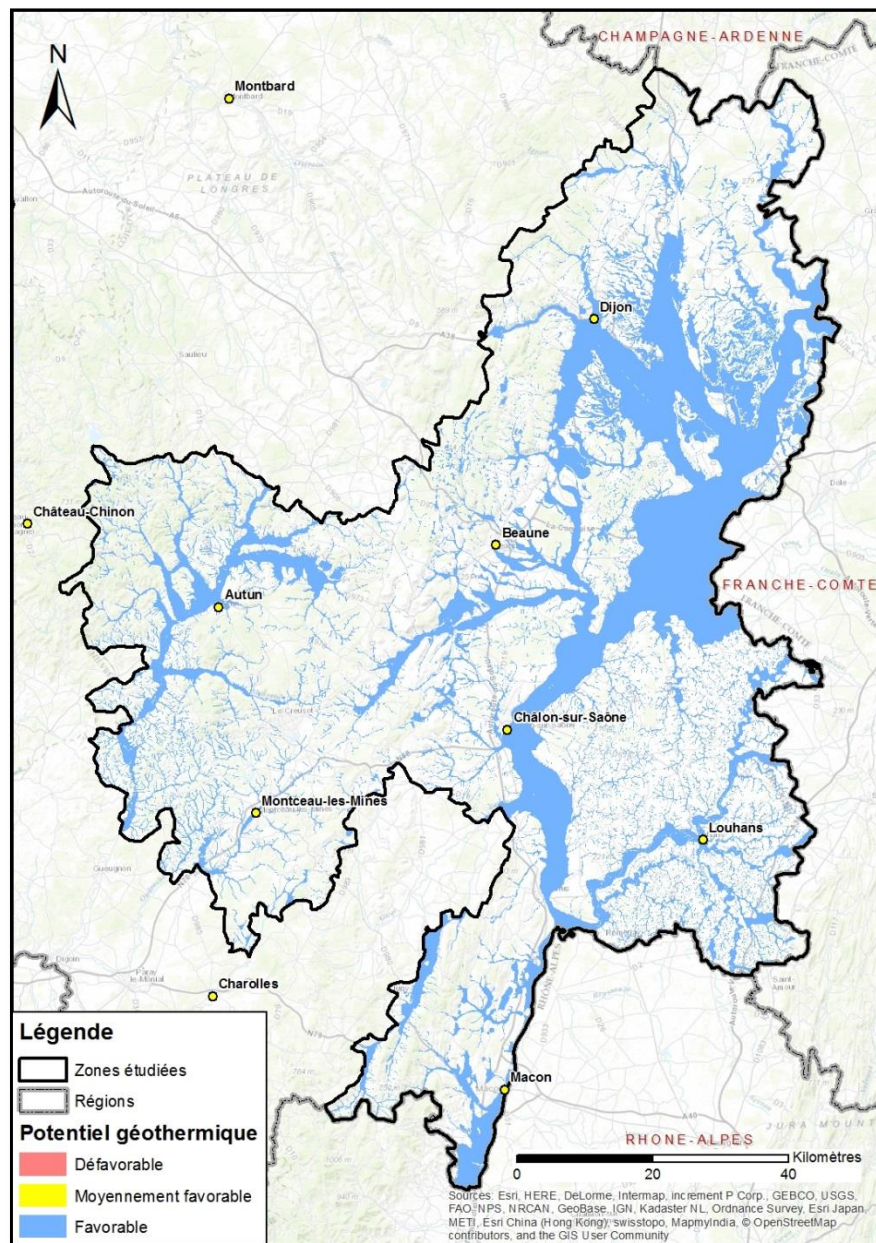


Illustration 37 : Carte finale du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la zone est

Les cartes du potentiel géothermique très basse énergie sur nappe sont présentées en Annexe 2.

4.2.5. Aléa qualité de la ressource

Dans le cadre de l'évaluation du potentiel géothermique, le paramètre « **qualité chimique de la ressource** » peut rendre compte du caractère corrosif, encroûtant ou colmatant d'une eau souterraine. Il joue un rôle sur l'évaluation économique d'un projet car la typologie des matériaux utilisés doit être adaptée à la chimie des eaux. Les phénomènes mis en jeu sont complexes (réactions chimiques de précipitation, réactions biochimiques, dissolution,...) et font intervenir

une gamme importante de paramètres du milieu. A titre informatif, une gamme de paramètres d'évaluation des contraintes d'exploitation liées à la qualité des eaux ainsi que leur classification est définie dans le SEQ Eaux souterraines⁵ (les seuils proposés proviennent d'avis d'experts basés sur la thermodynamique des équilibres électrochimiques et/ou la bibliographie jugée comme faisant référence en ce domaine).

Ainsi, dans le cadre de ce projet, une recherche sur la qualité des eaux des aquifères alluviaux a été réalisée à partir de la base de donnée ADES ; cette analyse devant permettre de définir le caractère corrosif ou encroûtant des eaux pouvant nuire au bon fonctionnement des pompes d'exploitation géothermique. Ainsi, les données de qualité physico-chimique des eaux, c'est-à-dire, l'oxygène dissous, la conductivité, le pH, les sulfates et le potentiel d'oxydoréduction ont été recherchées.

Il a été recensé des chroniques de mesures et des mesures ponctuelles au droit de tous les points d'eau de type qualimètre captant les nappes alluvionnaires étudiées dans le cadre de ce projet.

Une fois ces données obtenues, un premier traitement a été effectué afin d'éliminer les analyses clairement aberrantes. Ce traitement a été nécessaire du fait de l'hétérogénéité des données.

Dans un second temps, un traitement statistique des données a été effectué : la valeur minimale, maximale et la moyenne ainsi que l'écart-type et le nombre de prélèvements N ont été calculés pour chaque station d'échantillonnage considérée.

Enfin, à titre informatif, la valeur moyenne pour chaque paramètre (oxygène dissous, conductivité, pH, sulfates et potentiel d'oxydoréduction) de l'ensemble des qualimètres recensés ont fait l'objet d'une comparaison avec une gamme de paramètres d'évaluation définie dans le SEQ Eaux souterraines chapitre « usage énergie ».

Ces gammes d'évaluation sont présentées dans les illustrations suivantes :

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
CO ₂ dissous	mg/l	50		120	200	
O ₂ dissous	mg/l	absence ou > 8	> 0 et <= 0.1		> 0.1 et <= 4	> 4 et <= 8
Salinité*	g/l NaCl	0.6		1.5	3	
Conductivité*	µS/cm	1300		3000	6000	
pH		> 9.8	> 7 et <= 9.8	>= 6 et <= 7		< 6
Chlorures*	mg/l	150		400	1000	
Sulfates*	mg/l	250		500	1500	
Ferro-bactéries		absence				présence
Bactéries sulfato-réductrices	N/ml	absence	10		100	
Sulfures	mg/l HS ⁻	0.1		8	50	
Eh (potentiel d'oxydoréduction)	mV	<= -600 ou > 0		> - 600 et <= - 500	> -500 et <= - 400	> - 400 et <= 0

* au moins l'un des quatre paramètres doit être mesuré. Le choix pourra être effectué en fonction des problématiques locales.

Illustration 38 : Gamme de paramètres d'évaluation concernant l'altération par corrosion

⁵ SEQ-Eaux souterraines : grille d'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à différents usages et fonctions établie dans le cadre d'une étude inter-agences de l'eau et en collaboration entre Agences de l'Eau, MATE (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (nom à l'époque de la création du SEQ)) et BRGM en 2001.

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
pH		5.00				
Eh - selon la valeur du pH ⁽¹⁾						
pH ≤ 3.5	mV	1500				
3.5 < pH ≤ 9.6		(1)				
pH > 9.6		- 800				
O ₂ dissous	mg/l	0.10		5.5		
Ferro-bactéries		absence				
Indice saturation - selon la valeur du TAC ⁽²⁾						
TAC < 10°F		0.2		2		
10°F < TAC ≤ 25°F		0.2		1		
TAC > 25°F		0.2		0.5		

(1) Potentiel d'oxydo-réduction Eh = 1330 - 166 pH

(2) Indice saturation = pHs-pH. Le pHs est le pH d'équilibre ou de saturation après essai au marbre

Illustration 39 : Gamme de paramètres d'évaluation concernant l'altération par formation de dépôts

D'après notre analyse comparative, il s'avère que seul le paramètre oxygène dissous, peut entraîner une altération de type corrosion ou formation de dépôts. Cependant, ce paramètre est considéré comme un élément d'altération du fait de son rôle dans les phénomènes d'oxydo-réduction. Or, les nappes alluvionnaires des zones étudiées ne présentent pas de teneurs élevées en métaux et les ouvrages en géothermie sont généralement équipés de tubage PVC ou PEHD et de pompes en inox limitant tout risque d'oxydo-réduction et donc d'altération.

Au regard de ces résultats, aucune prescription ou préconisation ne sera donc faite dans ce domaine.

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

L'atlas a été réalisé à une échelle recouvrant les grands territoires bourguignons que sont la vallée de l'Yonne, la vallée de la Loire, la vallée de la Saône et les anciens bassins houilliers de Blanzay, Creusot et Montceau-les-Mines. La qualité et la répartition des données qui ont permis d'établir cet atlas n'étaient pas homogènes. Les zones présentant des grandes agglomérations (Dijon, Chalon-sur-Saône, Nevers, Auxerre,...) présentaient une quantité de données relativement importante alors que certains territoires en présentaient très peu (la Bresse, Nièvre,...).

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 500 mètres / 500 mètres, correspondant à une précision au 1/50000. Malgré cela et du fait des approximations réalisées, l'échelle de

restitution des informations aux utilisateurs ne doit pas excéder le 1/100000 et doit éventuellement 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.

4.3. GEOTHERMIE SUR SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

On présente dans ce chapitre le potentiel géothermique de la région Bourgogne à partir de sondes géothermiques verticales. Le travail est réalisé sur la base d'un découpage spatial en cellules de 500 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 des 3 zones d'études retenues 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 500 mètres sur 500 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 40) a été réalisée afin de retranscrire les différentes lithologies correspondantes aux différentes profondeurs étudiées. 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 utilisées pour la réalisation de cette base de données sont celles provenant de la base de données du sous-sol (BSS), où des logs géologiques présentant plus ou moins précisément les lithologies au droit de chaque point. 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 80 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 800 logs géologiques qui ont été renseignés dans cette base de données.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

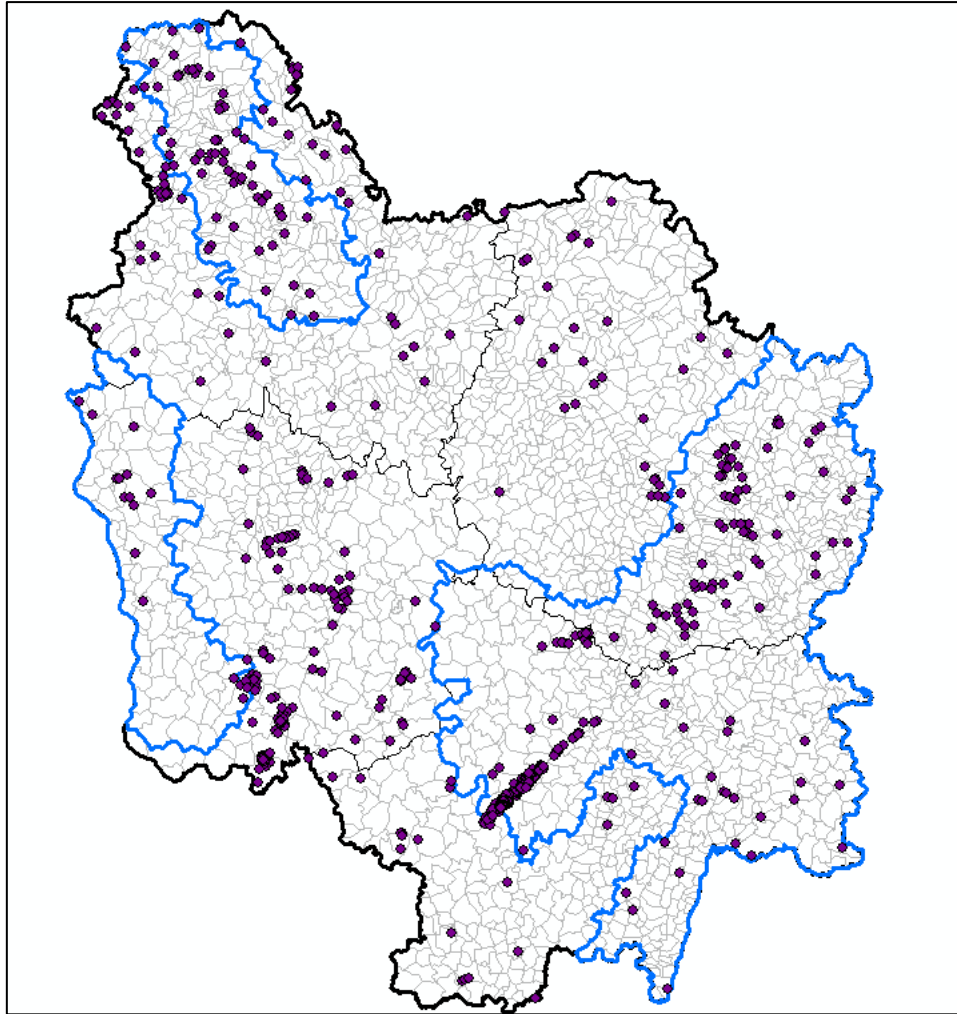


Illustration 42 : Carte des répartitions, sur le territoire bourguignon, des forages de plus de 80 mètres de la BSS.

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 43.

Classe (=note)	1	2	3	4
Critère	Défavorable	modérément 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 marnes ; Calcaires argileux ; Calcaires gréseux ; Calcaires quartzeux ; Calcaires siliceux ; Calcaires finement liés, Travertins	2	
3	Marnes ; Marno-calcaire ; Calcaire et marno-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) ; Houiller	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 43 : 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 40) 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 avec l'aide également de la

BDLisa qu'il a pu être délimité les différents potentiels géothermiques des formations géologiques des territoires étudiés.

4.3.2. Potentiel géothermique du sous-sol

1) Zone nord

La zone nord (Illustration 44) comporte 3 grands types de lithologie :

- une dominante crayeuse, dans la partie nord, qui correspond à la limite sud du bassin parisien ;
- une dominante sablo-argileuse, correspondant à la zone Albien/Aptien ;
- une dominante calcaire, datant du Jurassique supérieur.

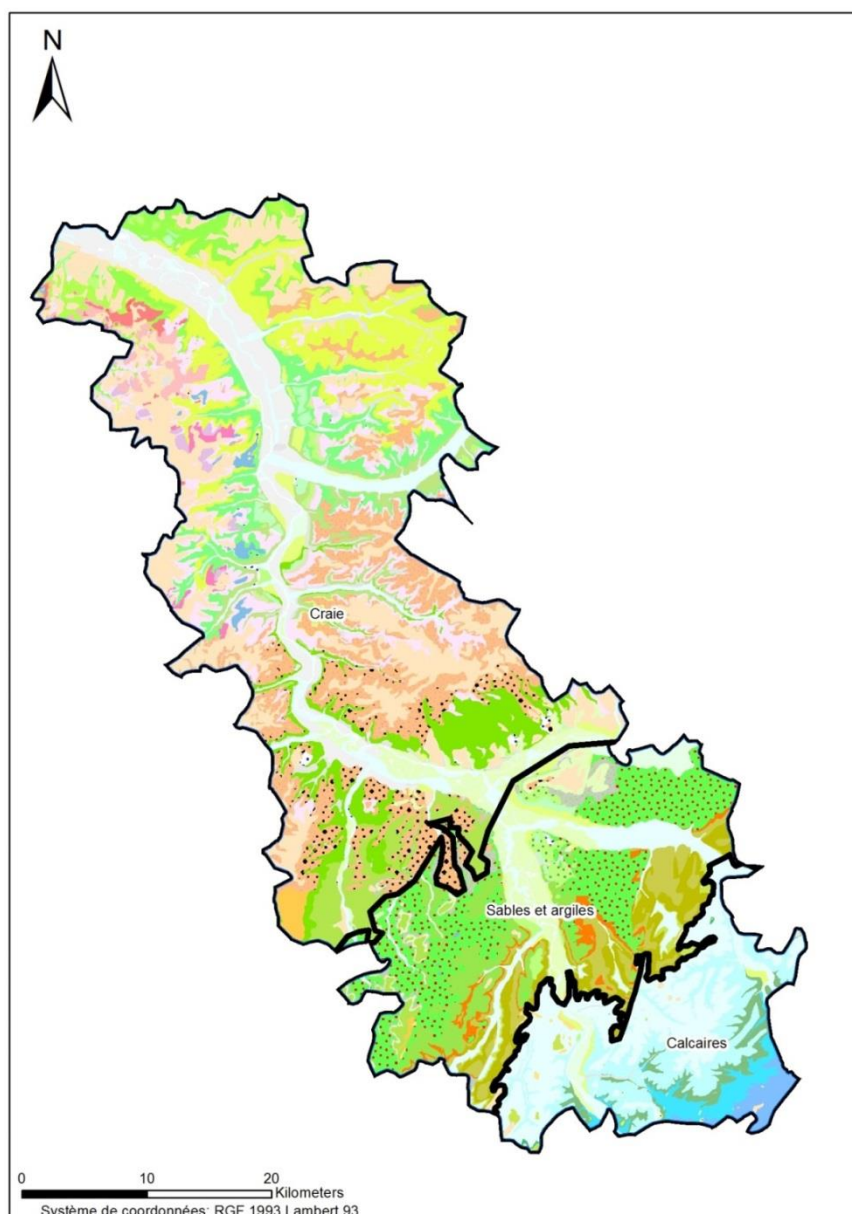


Illustration 44 : Découpage de la zone Nord en fonction de sa lithologie

2) Zone ouest

La zone ouest (Illustration 45) comporte quant à elle 3 grands types de lithologie :

- les sables / argiles de l'Albien/Aptien ;
- les Calcaires du Jurassique supérieur pour la partie nord et du Jurassique inférieur pour la partie sud ;
- les marnes du Jurassique moyen dans la partie sud sud-est ;
- le socle du massif du Morvan.

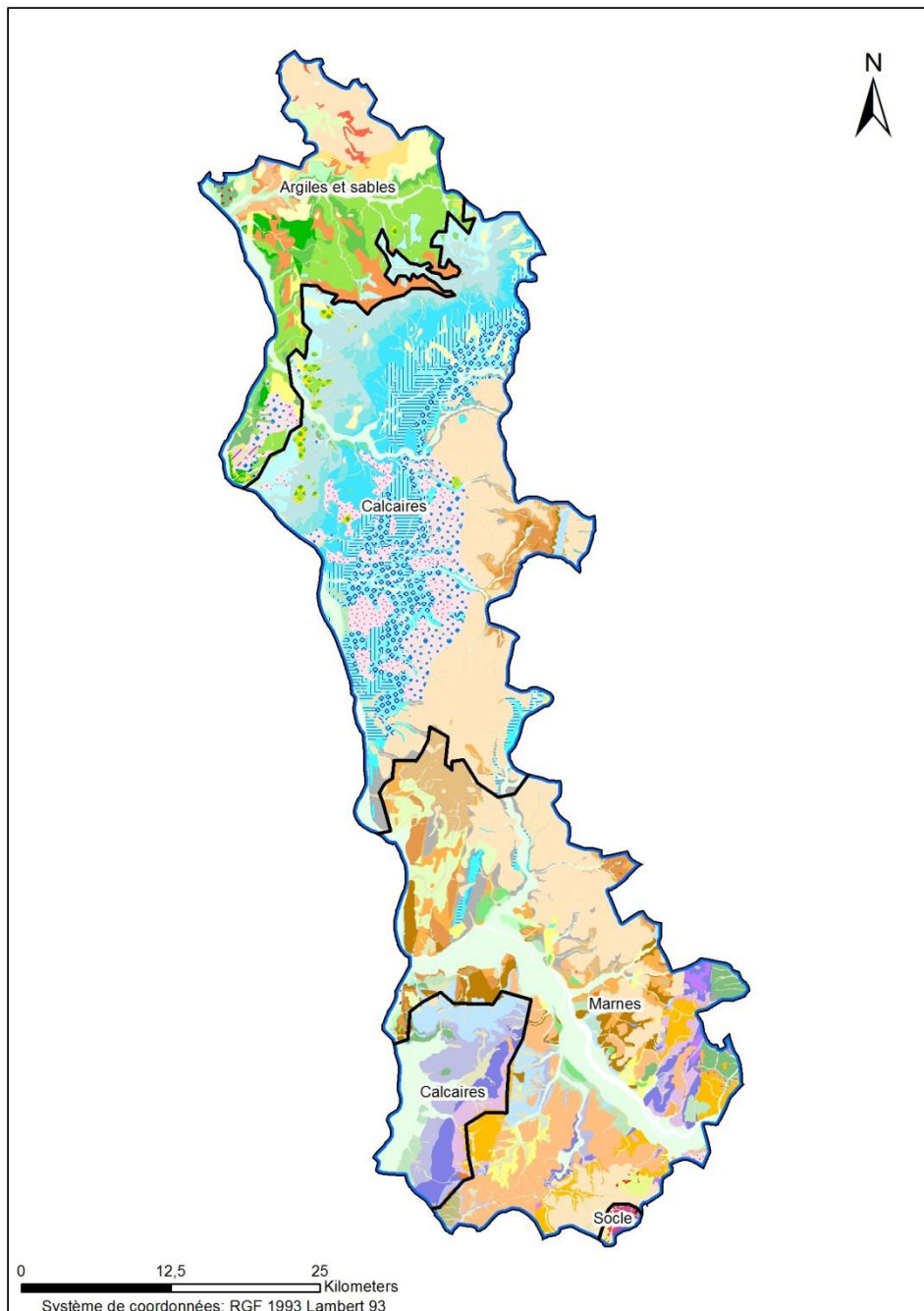


Illustration 45 : Découpage de la zone Ouest en fonction de sa lithologie

3) La zone est

La zone Est (Illustration 46) est la zone la plus grande. Elle comporte 4 grands types de lithologie :

- le socle du massif du Morvan ;
- la zone de grès et de schistes du bassin houiller Monceau-Creusot ;
- les Marnes du bassin Bressan ;
- le calcaire du Jurassique, situé entre le Morvan et le bassin Bressan.

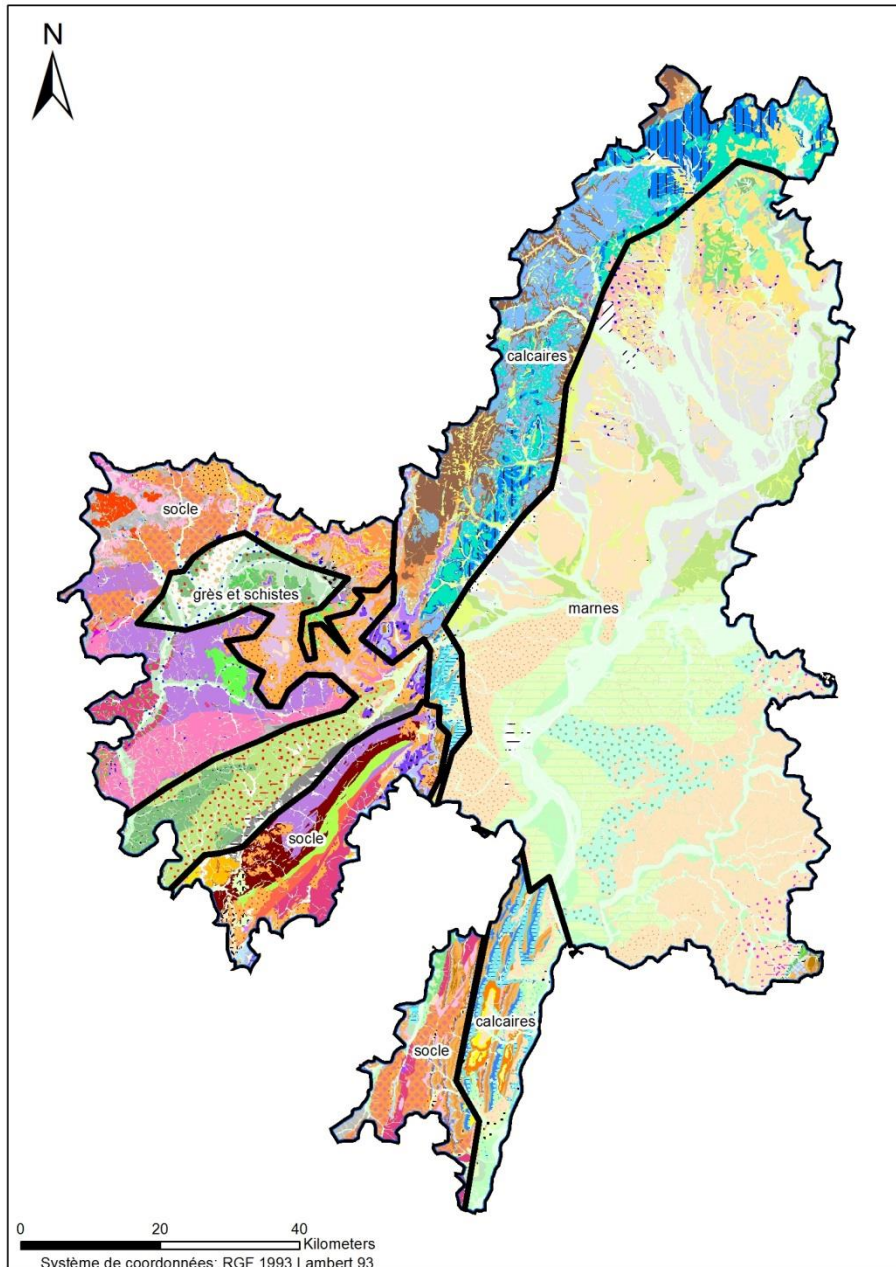


Illustration 46 : Découpage de la zone Est en fonction de sa lithologie

4.3.3. Carte du potentiel géothermique sur sonde verticale

Ainsi, en suivant la classification établie dans le tableau présenté en Illustration 43, nous obtenons un découpage par potentialité illustré ci-dessous :

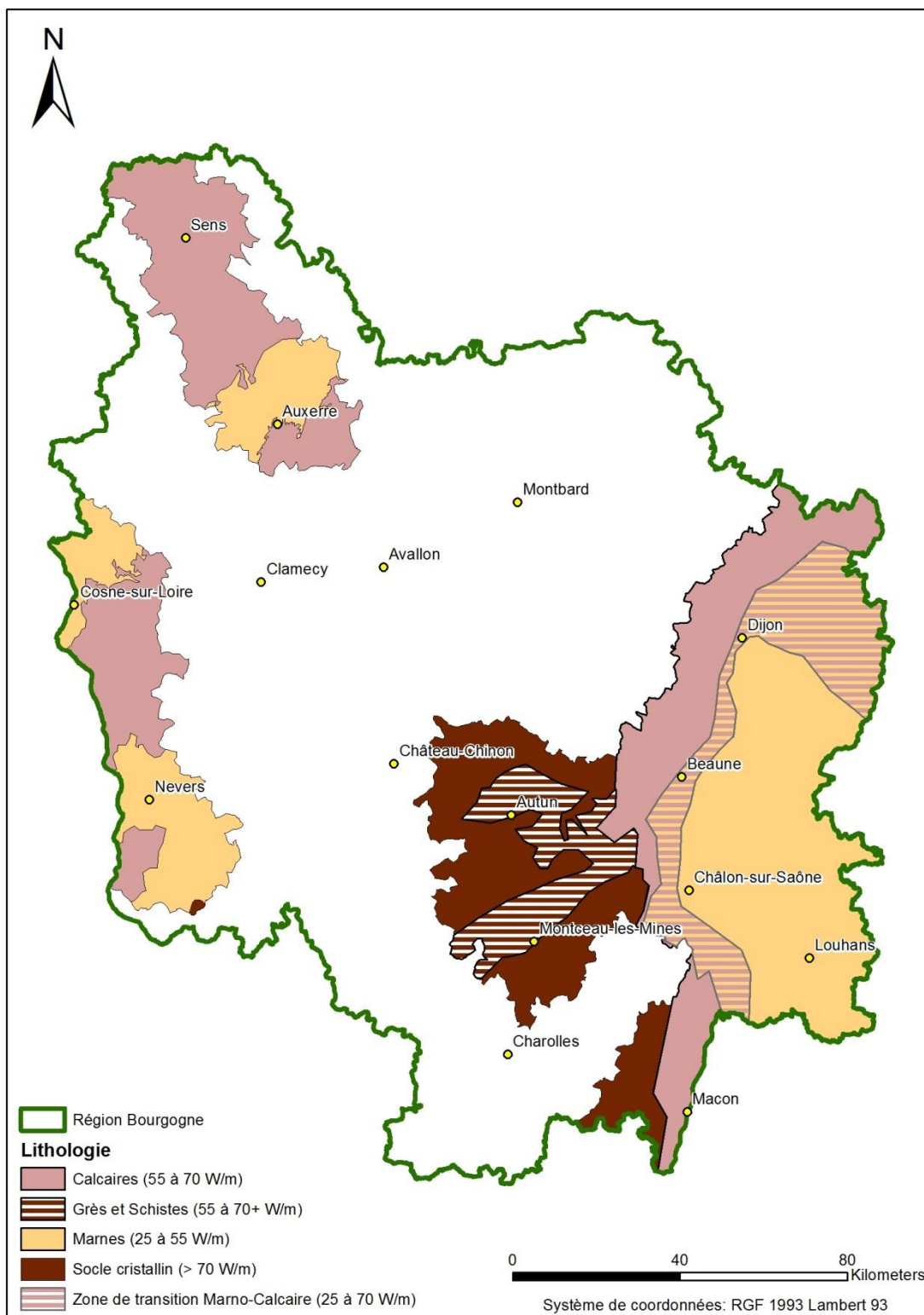


Illustration 47 : Potentialité des 3 grandes zones en fonction des différentes classes établies dans la partie §6.3.

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

Lithologie	Marnes	Zone de transition Marno-calcaire	Calcaires	Grès et schistes	Socle cristallin
Classe (=note)	2	2 à 3	3	3 à 4	4
Potentiel	modérément favorable	de modérément favorable à favorable	favorable	de favorable à très favorable	très favorable
Gamme Puiss. Spec.	25 à 55 W/m	25 à 70 W/m	55 à 70 W/m	55 à >70 W/m	> 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	40 W/m	48 W/m	62 W/m	65 W/m	75 W/m

Illustration 48 : Tableau récapitulatif du potentiel géothermique en fonction des lithologies dominantes présentes sur les zones d'études

Le potentiel géothermique sur sondes verticales obtenu pour ces zones correspond à une valeur globale sur les 200 m de profondeur. Celui-ci a été évalué en prenant la moyenne du potentiel obtenu pour chaque tranche de 10 à 20 m de profondeur (Illustration 40).

Les valeurs les plus fortes de P_{SP} se retrouvent au sein des formations cristallines présentes dans la région correspondant au massif du Morvan et au niveau du Mâconnais. De fortes valeurs de P_{SP} se rencontrent aussi au sein des formations primaires des anciens bassins miniers de Montceau-les-Mines, de Blanzay et du Creusot. Des valeurs moindres mais non négligeables sont observées également dans les roches carbonatées massives. 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 noter que dans la zone Est correspondant au bassin d'effondrement de la Bresse et aux anciens bassins houillers de Montceau-les-Mines et du Creusot, la présence de zones hachurées correspondant :

- à la zone de transition pour la tranche de profondeur 50-200 mètres, entre les formations du Tertiaire/Quaternaire (marne, argiles, sables,...), remplissant le fossé d'effondrement bressan, et les formations calcaires et marneuses du Jurassique de la Côte. Dans cette zone, on trouve les formations Jurassiques à une profondeur moindre que dans le reste du fossé.
- aux bassins houillers comportant des formations de grès et de schistes pouvant engendrer une légère baisse du potentiel géothermique sur sondes verticales par rapport à des formations uniquement de socles (granites, gneiss).

Les cartes du potentiel géothermique sur sondes verticales sont présentées en Annexe 3.

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. Carte des aléas

1) Aléas liés aux formations carbonatées

Comme il l'a été indiqué à plusieurs reprises dans ce rapport, les formations carbonatées (calcaires, craies) ont un bon potentiel géothermique. Toutefois, celui-ci peut être fortement amoindri dans le cas où ces formations sont affectées par des phénomènes karstiques (cavités, zone d'effondrements,...).

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

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 d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.⁶

Il s'est avéré que les principales formations géologiques comportant ces évaporites sont celles du Trias (principalement visibles dans la région de Mâcon) et celles du Primaire (principalement visibles dans les régions de Montceau-les-Mines et Blanzey).

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 42, chaque log géologique représente une donnée ponctuelle sur le territoire. Ces données ne sont pas réparties de manière homogène. En effet, la plupart des données sont concentrées au niveau des zones d'activités, au niveau des grandes agglomérations (Dijon) ou des bassins miniers (bassin minier de Montceau-Creusot). 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

⁶ Rapport BRGM/RP-61768-FR

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.

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 500 mètres / 500 mètres, correspondant à une précision au 1/50000. Malgré cela et du fait des approximations réalisées, l'échelle de restitution des informations aux utilisateurs ne doit pas excéder le 1/100000 et doit éventuellement 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 des 3 zones d'étude de la Bourgogne 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 500 mètres sur 500 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 régions ayant déjà leur atlas du potentiel géothermique, 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 est concernée la ressource potentiellement extractible. 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 des 3 zones étudiées en Bourgogne 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 des 3 zones étudiées en Bourgogne :

- **Très favorable : 32 % du territoire**
- **Favorable : 20 % du territoire ;**
- modérément favorable : 48 % du territoire ;
- Défavorable : 0 % du territoire ;
- Très défavorable : 0 % du territoire.

Du fait de ces différentes approximations réalisées, l'échelle de restitution des informations aux utilisateurs ne doit pas excéder le 1/100 000 et doit éventuellement se limiter à l'échelle de la commune.

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.
- Agence de l'eau, BRGM. 2003. Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines. SEQ Eaux Souterraines. Rapport de présentation. 75p.
- Depardon S., Soncourt E. 2012. Délimitation des ressources majeures pour l'alimentation en eau potable sous couverture du fossé bressan. Phase 1 : synthèse hydrogéologique des 9 secteurs et délimitation des secteurs pré-identifiés comme ressources majeures. Rapport n°67379/B. 110p.
- Billard G. (1981) – Réserve de champs captant dans la vallée de l'Yonne – Etudes hydrogéologiques secteur Villemanoche – Rapport final - 81SGN292 BOU
- Billard G. (1981) – Réserve de champs captant dans la vallée de l'Yonne – Etudes hydrogéologiques secteur Migennes – Rapport final 81SGN264 BOU
- 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
- Jauffret D. (1997) – Synthèse hydrogéologique des aquifères des calcaires jurassiques du Nivernais (département de la Nièvre – Rapport final R.39291
- Moulin M., avec la coll. De Bauer-Cauneille H., Faure M., Percheval J., & Lyant V. (2013) – Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Atlas géothermique et évaluation du potentiel géothermique mobilisable. Rapport final. BRGM/RP-62255-FR.
- Pointet T. (1974) – Reconnaissance hydrogéologique du département de la Nièvre au sud de la Loire et du Val de Loire – Rapport final 74SGN056 JAL
- Camart R., Campinchi J., Jenn A., Megnien Cl., Panetier J.M. et Turland M. (1973) – Recherches hydrogéologiques sur l'Alimentation en eau potable de Pontigny et Vergigny (Yonne)-Vallée du Serein et de l'Armançon – Rapport final 73SGN350 BDP

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

Annexe 1

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

Code entité aquifère	Nom de l'entité aquifère	Surface de l'entité (km ²)
020AX60	Zones tourbeuses au sein des alluvions récentes tourbe. La tourbe est souvent interstratifiée dans les matériaux alluvionnaires et l'épaisseur de la découverte dépasse souvent 1m. Varie entre 0.70m. et 7m.	4,02
040AA05	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 104AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	2,20
040AA33	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 113AC d'ordre relatif 1 sous-jacente	2,24
040AA43	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 113AH d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,03
040AA51	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 113AL d'ordre relatif 1 sous-jacente	9,01
040AA73	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 119AE d'ordre relatif 1 sous-jacente	1,27
040AB07	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 121AQ d'ordre relatif 1 sous-jacente	56,42
040AB23	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 121AY d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,39
040AB53	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 123BQ d'ordre relatif 1 sous-jacente	1,33
040AB55	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 123BR d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,00004
040AB69	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 123BY d'ordre relatif 1 sous-jacente	8,59
040AB75	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 125AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	10,52
040AB77	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 127AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	28,44
040AB79	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 127AC d'ordre relatif 1 sous-jacente	9,61
040AB83	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 127AG d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,02
040AB85	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 131AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	10,06
040AB87	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 133AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	10,39
040AB89	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 135AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	13,36
040AB91	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 135AC d'ordre relatif 1 sous-jacente	49,67
040AB97	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 137AB d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,96
040AC11	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 139AN d'ordre relatif 1 sous-jacente	45,00
040AC13	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 139AO d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,0040
040AC15	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité	8,39

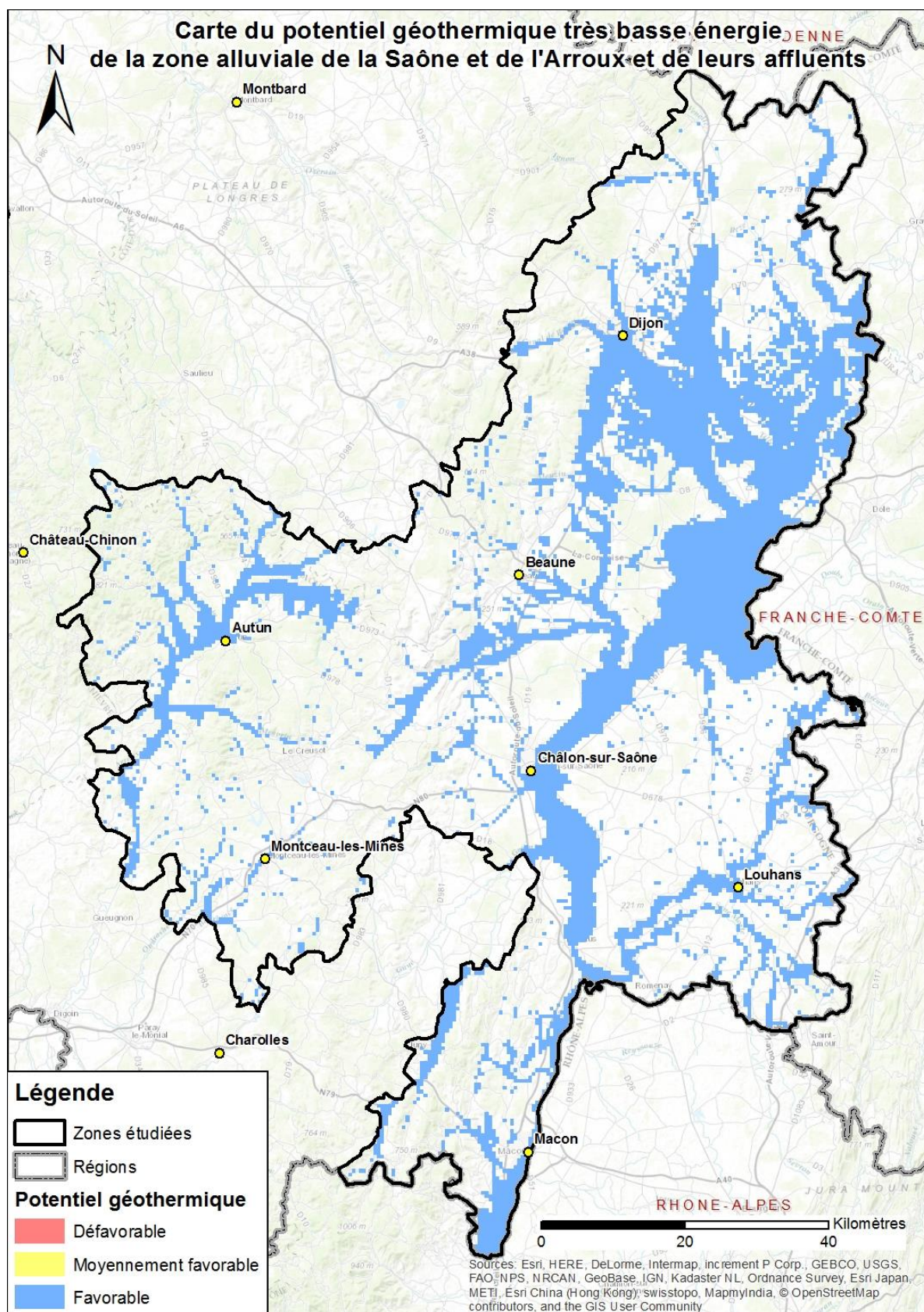
	régionale 139AP d'ordre relatif 1 sous-jacente	
040AC17	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 139AZ d'ordre relatif 1 sous-jacente	2,63
040AC19	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 141AB d'ordre relatif 1 sous-jacente	35,81
040AC21	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 141AC d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,35
040AC25	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 141AG d'ordre relatif 1 sous-jacente	9,46
040AC33	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 143AB d'ordre relatif 1 sous-jacente	1,60
040AC35	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 143AD d'ordre relatif 1 sous-jacente	17,09
040AC69	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 151AG d'ordre relatif 1 sous-jacente	104,06
040AC71	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 151AI d'ordre relatif 1 sous-jacente	38,40
040AE47	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 205AI d'ordre relatif 1 sous-jacente	14,74
040AE51	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 206AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	3,25
040AE53	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 207AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	136,96
040AE55	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 208AA d'ordre relatif 1 sous-jacente	3,41
040AH73	Formations alluviales complémentaires d'extension conforme l'entité régionale 527AO d'ordre relatif 1 sous-jacente	0,000001
119AE72	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 119AE	0,00017
121AQ71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 121AQ	34,09
121AQ73	Alluvions du bassin versant de la Vanne dans l'emprise de l'entité régionale : 121AQ	18,12
123BQ71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 123BQ	0,27
123BQ72	Alluvions du bassin versant de l'Armançon dans l'emprise de l'entité régionale : 123BQ	0,0010
125AA71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 125AA	5,07
125AA76	Alluvions du bassin versant de l'Armançon dans l'emprise de l'entité régionale : 125AA	12,01
125AA79	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 125AA	0,16
127AA71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 127AA	36,25
127AA76	Alluvions du bassin versant de l'Armançon dans l'emprise de l'entité régionale : 127AA	15,88
127AA78	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale :	15,71

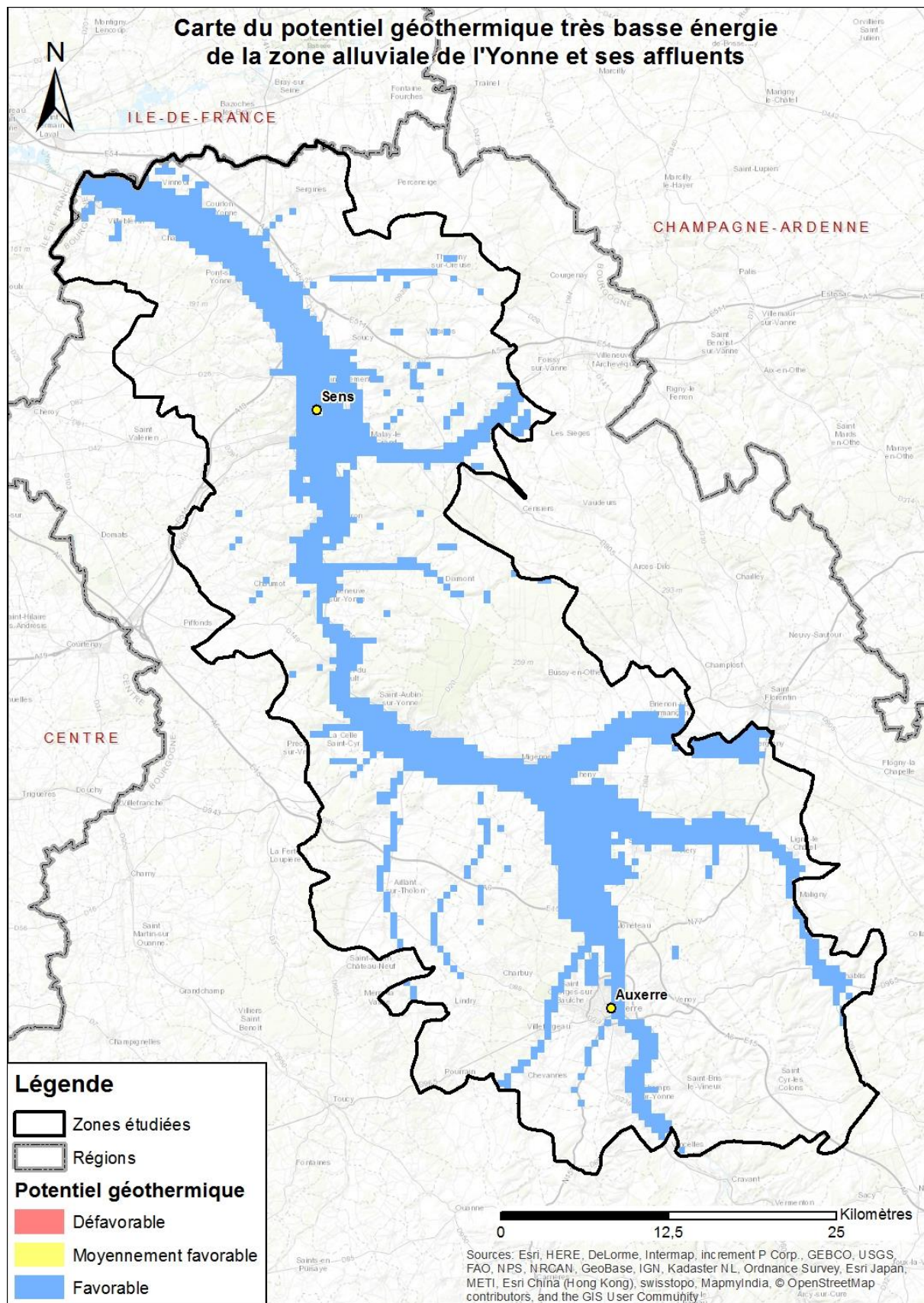
	127AA	
127AC71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 127AC	4,05
127AC76	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 127AC	8,48
127AG71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 127AG	0,00047
127AG76	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 127AG	0,00021
131AA71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 131AA	8,69
131AA78	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 131AA	4,25
133AA71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 133AA	4,99
133AA78	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 133AA	3,41
135AA71	Alluvions de l'Yonne en aval de la confluence avec la Cure dans l'emprise de l'entité régionale : 135AA	4,35
135AA80	Alluvions du bassin versant du Serein dans l'emprise de l'entité régionale : 135AA	2,12
750AR00	Alluvions de l'Ouche	95,86
750AR63	Alluvions de l'Ouche à l'amont de Dijon	4,66
750BL00	Alluvions de la Saône, de la confluence de l'Amance à la confluence avec l'Ognon	13,26
750BL01	Alluvions de la Saône, de Dampierre-sur-Salon à la confluence avec l'Ognon	13,26
760AA02	Alluvions Doubs aval et graviers du ""Saint-Côme"" de la plaine Saône-Doubs	235,41
760AA10	Alluvions de la Saône du seuil calcaire de Tournus à Ambérieux	36,28
760AB11	Alluvions de l'Ognon, de la confluence du Rahin à la confluence avec la Saône	8,22
760AE13	Formations alluviales et fluvioglaciales de la plaine de Bletterans	10,79
760AE15	Alluvions de la Vallière et de la Sorne	8,27
760AF03	Alluvions de la Saône entre l'Ognon et le Doubs	197,78
760AF05	Alluvions de la Saône du confluent du Doubs au seuil calcaire de Tournus	127,44
760AF07	Alluvions de la Vingeanne	30,55
760AF09	Alluvions de la Tille aval	112,68
760AF11	Alluvions de l'Yonne	4,21
760AF13	Alluvions de la Vouge	13,85
760AF15	Alluvions du Meuzin	24,98
760AF17	Alluvions de la Dheune	41,75
760AF19	Alluvions de la Grosne	20,65
900AB45	Alluvions Loire du Massif Central	85,29
900AB47	Alluvions Loire moyenne avant Blois	47,02
900AB55	Alluvions Allier aval	29,66

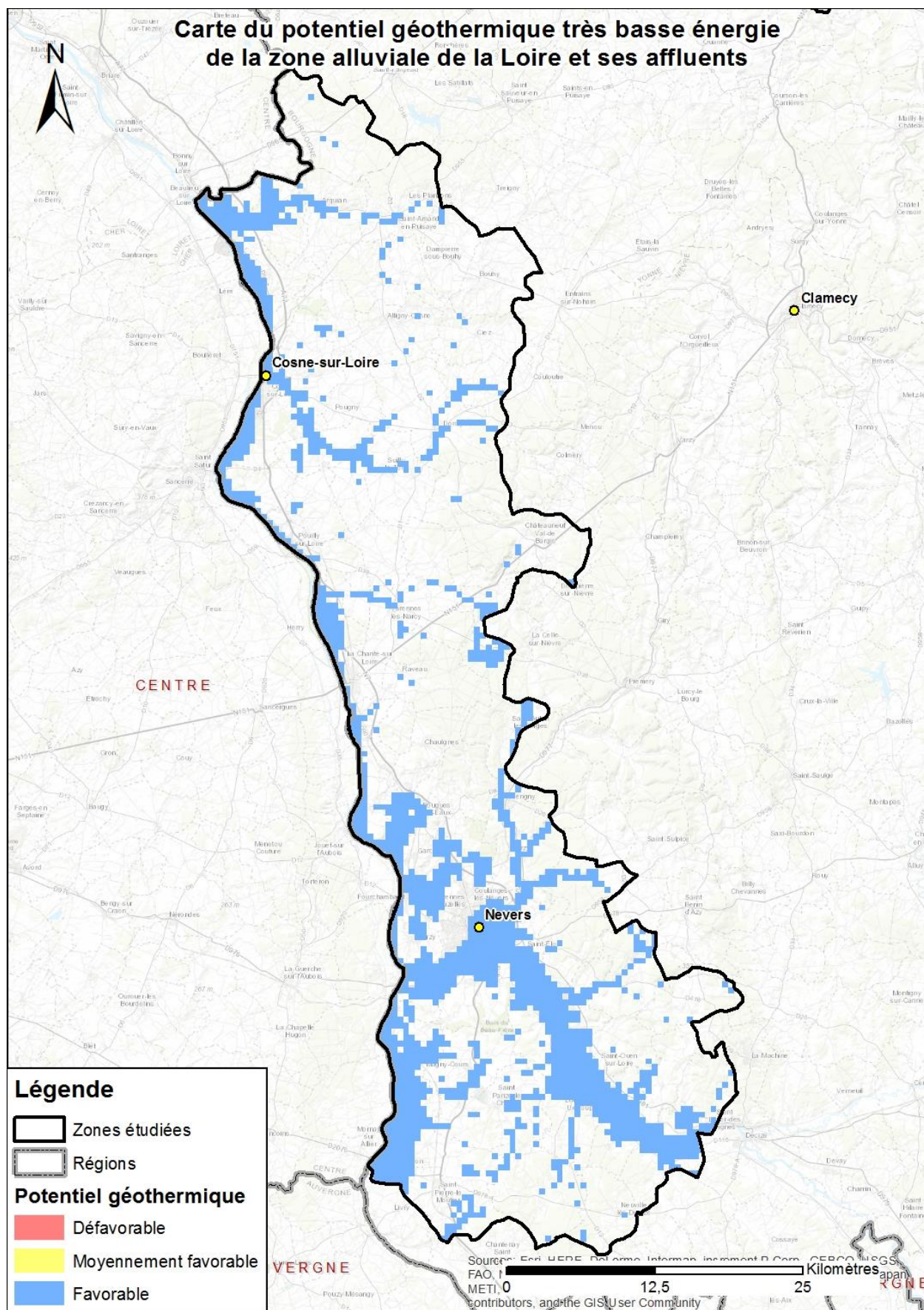
Annexe 2

Cartes du potentiel géothermique régional sur aquifère

Les cartes apparaissent: mode maillage 500 m x 500 m



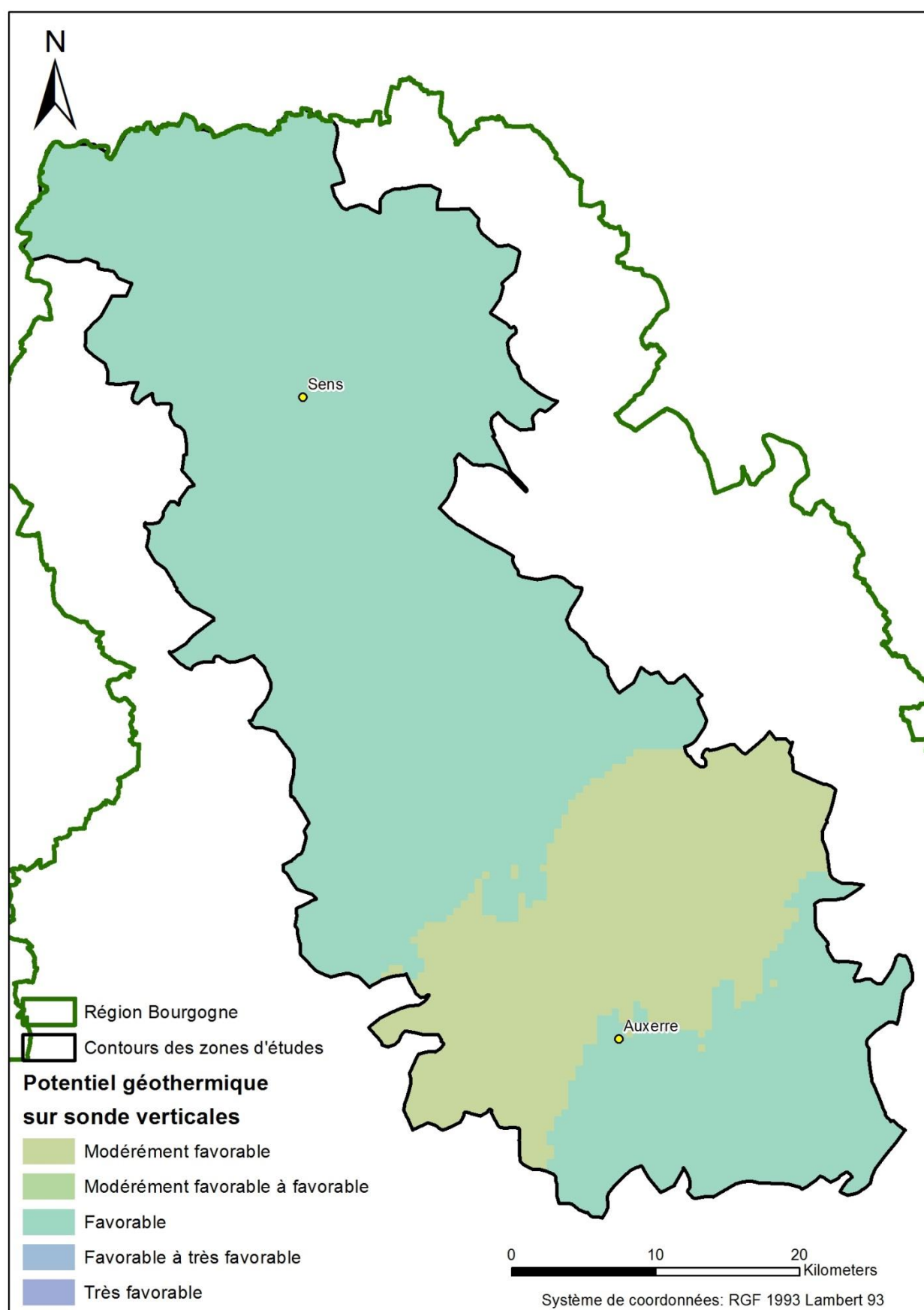


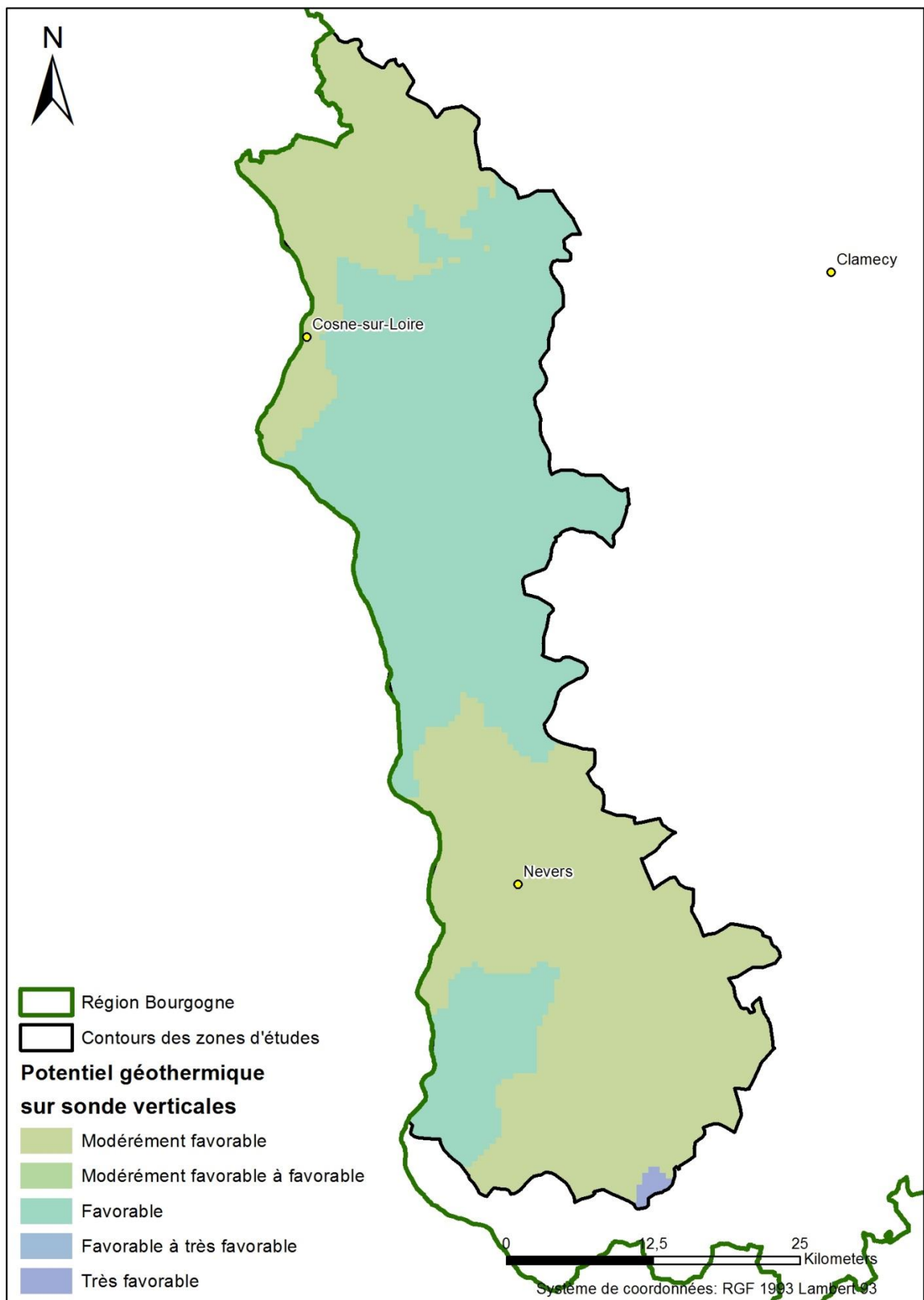


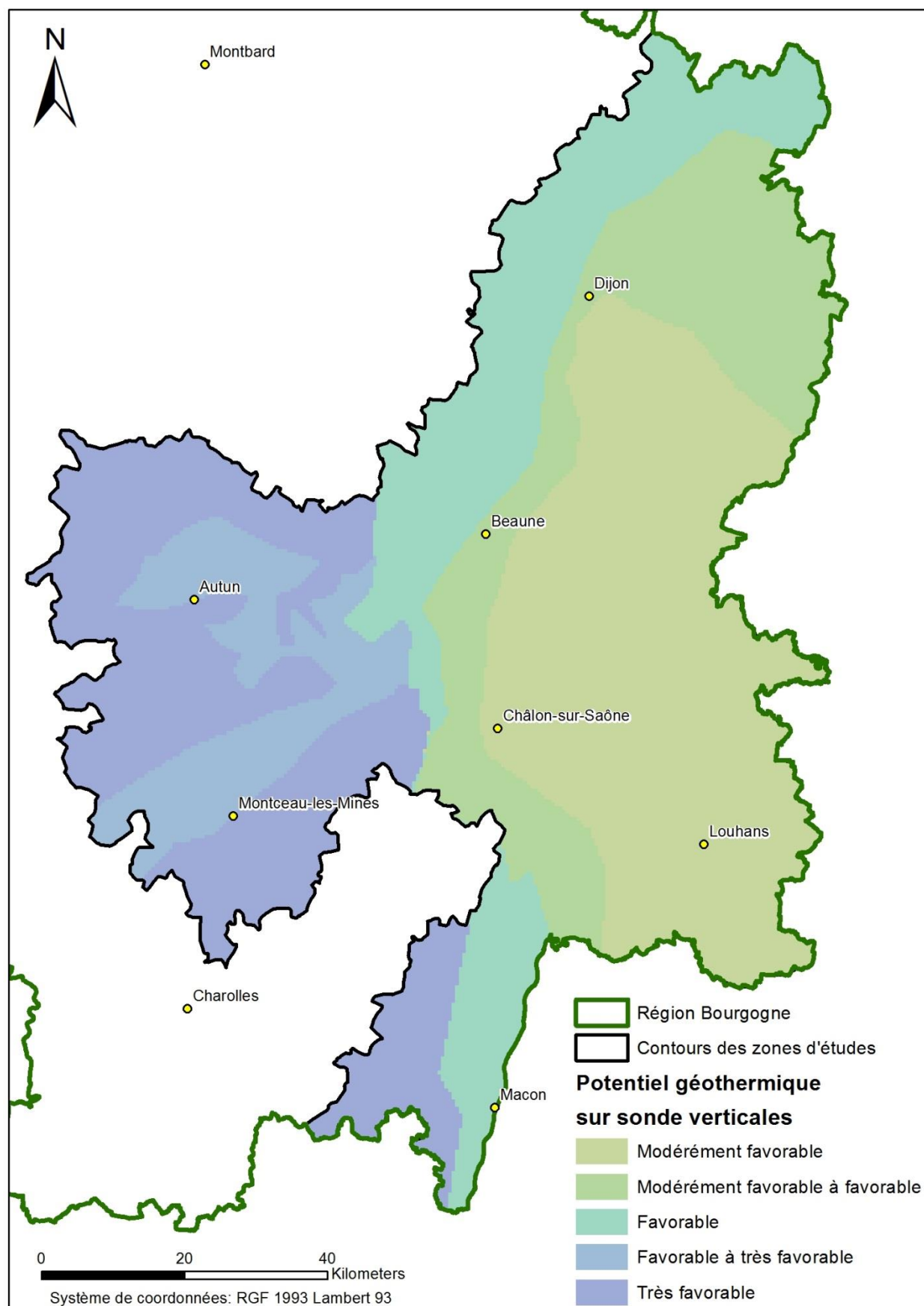
Annexe 3

Cartes du potentiel géothermique régional sur sondes géothermiques verticales

Les cartes apparaissent: mode maillage 500 m x 500 m









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