

Document public

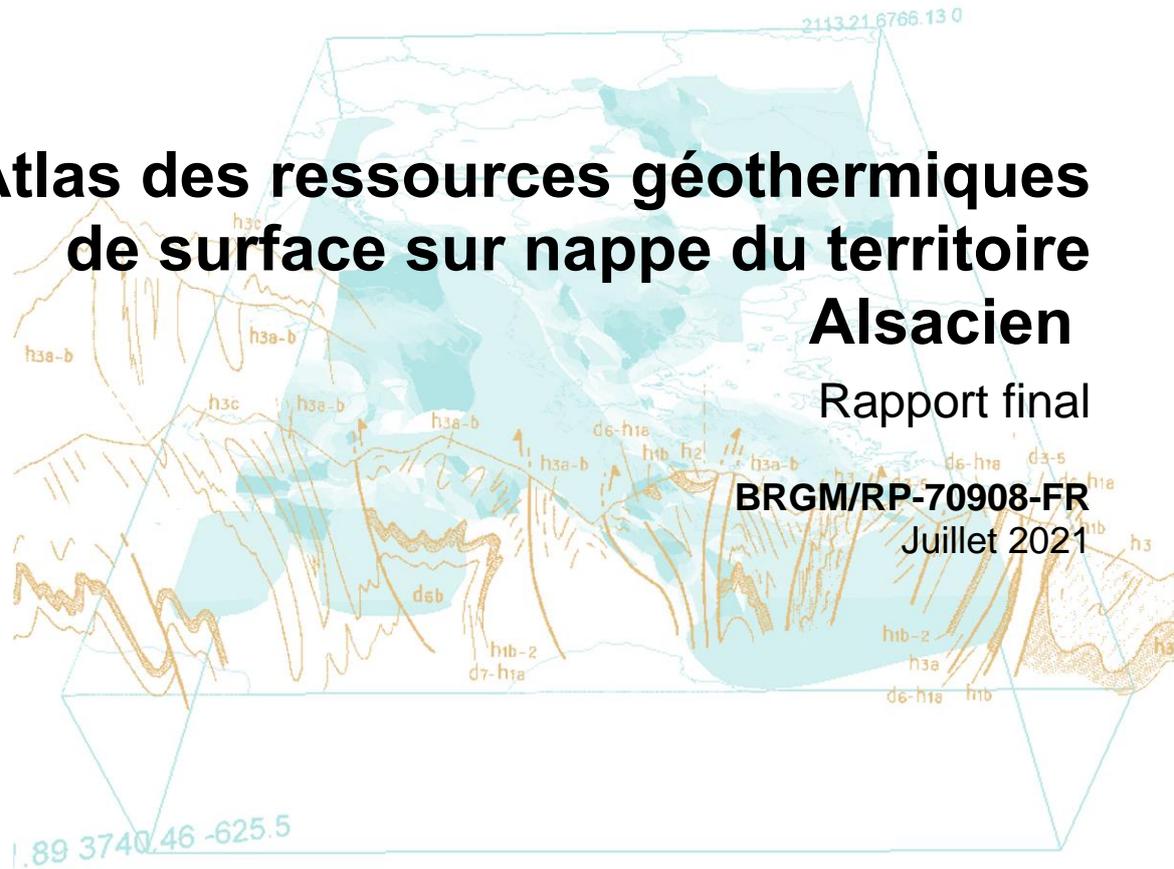


Atlas des ressources géothermiques de surface sur nappe du territoire Alsacien

Rapport final

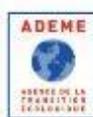
BRGM/RP-70908-FR

Juillet 2021



Direction régionale
de l'environnement,
de l'aménagement
et du logement

Avec le soutien de



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Atlas des ressources géothermiques de surface sur nappe du territoire Alsacien

Rapport final

BRGM/RP-70908-FR

Juillet 2021

Étude réalisée dans le cadre du projet AP18STB027
de Service public du BRGM

M. CHABART

Avec la collaboration de
G. FOURNIQUET, E. GIUGLARIS

Vérificateur :

Nom : P. DURST

Fonction : Référent thématique

Date : 08/07/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : D. SALQUEBRE

Fonction Directeur régional délégué

Date : 09/07/2021

Signature :

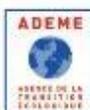


Direction régionale
de l'environnement,
de l'aménagement
et du logement

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

Avec le soutien de

climaxion
anticiper - économiser - valoriser



Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE
L'Europe s'invente chez nous



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Géothermie basse énergie, aquifère, nappe, forage, productivité, température, piézométrie, géologie, Bas-Rhin, Haut-Rhin.

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

CHABART M., FOURNIQUET G., GIUGLARIS E. (2021) – Atlas des ressources géothermiques de surface sur nappe du territoire Alsacien. Rapport final. BRGM/RP-70908-FR, 114 p., 71 fig., 15 tabl., 5 ann.

Synthèse

Ce rapport dresse la synthèse des travaux qui ont conduit à l'élaboration de l'atlas des ressources géothermiques de surface sur nappe du territoire alsacien. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision qui doit éclairer sur l'exploitabilité locale des principaux aquifères pour alimenter une installation géothermique très basse énergie (TBE), de type pompe à chaleur eau – eau. Il sera mis à disposition sur le site internet <https://www.geothermies.fr/regions/grand-est>, en complément des atlas préexistants, en Champagne-Ardenne et en Lorraine.

L'atlas a été établi, avec comme hypothèse de base le fait que les informations relatives à la géothermie en nappe seraient prépondérantes ; la géothermie hors nappe / sur sonde n'a pas été étudiée. Les zones moins perméables voire imperméables sont associées à une ressource géothermique sur nappe très faible et la solution d'une géothermie TBE sur sonde devra être recherchée en priorité.

La zone d'étude a été découpée en 7 nappes et selon un maillage de 500 mètres sur 500 mètres. Pour chaque maille, il a été renseigné le potentiel géothermique sur nappe classé de fort (en bleu pour traduire le caractère favorable) à très faible (en rouge pour traduire le caractère défavorable) et calculé selon la méthodologie nationale à partir des trois critères préalablement définis et analysés à l'échelle de chaque nappe considérée : profondeur d'accès à la nappe, productivité (débits) et température.

Les données utilisées pour réaliser cet atlas sont généralement des mesures ponctuelles provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), d'études ponctuelles ou de travaux d'opérateurs tels que l'ARS¹ ou l'APRONA². Pour tenir compte de l'hétérogénéité de la répartition de ces données, elles ont été traitées par interpolation et analyse statistique sectorisée (nappe ou entité hydrogéologique BDLISA³), moyennées à l'échelle de chaque maille et corrigées le cas échéant dans le cadre d'une approche naturaliste (à dire d'expert).

Seule la ressource sur nappe potentiellement utilisable à moins de 200 m de profondeur est concernée. L'atlas ne prend en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux, ni l'occupation du sol, ni la qualité de la ressource qui pourraient constituer des freins à l'utilisation de cette ressource pour des opérations de géothermie TBE.

En complément de l'atlas et afin d'apporter des éléments de réflexions en amont d'un projet géothermique, il est néanmoins proposé une cartographie des valeurs moyennes mesurées de quelques paramètres physico-chimiques (conductivité, pH, dureté, TAC⁴, teneurs en fer et manganèse) qui interviennent dans l'apparition des phénomènes de corrosion ou de colmatage affectant les performances du forage. Cette information disponible uniquement sur quelques mailles de la zone d'étude (6 à 8 %) sera communiquée parallèlement aux valeurs de potentiel même si son calcul n'en tient pas compte.

Le résultat final obtenu pour le potentiel géothermique sur aquifère exprimé en pourcentage de couverture des nappes du territoire alsacien est favorable à 46 % (toutes nappes confondues) et à 91 % en nappe d'Alsace.

¹ ARS : Agence Régionale de la Santé

² APRONA : Association pour la protection de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace

³ BDLISA : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères

⁴ TAC : Titre Alcalimétrique Complet

La qualité et la quantité des données utilisées s'étant avérées être hétérogènes à l'échelle du territoire alsacien, certaines approximations ont été faites. Cependant, la méthodologie employée pour définir le potentiel géothermique très basse énergie ne nécessite pas une précision importante de la donnée. En effet, le processus de classification est établi selon un système d'index et 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 1/50 000. Malgré cela et du fait des 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.

En résumé, il convient de préciser que l'atlas constitue une première approche à destination des maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales ou particuliers afin qu'ils puissent examiner la possibilité d'utiliser ou pas la géothermie TBE sur nappe lors d'un choix énergétique.

Les informations constituant l'atlas ne peuvent et ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Présentation de la géothermie très basse énergie.....	17
2.1. DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE	17
2.1.1. Pompe à chaleur (PAC) – principes de fonctionnement	17
2.1.2. Pompe à chaleur sur nappe	18
2.1.3. Pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales (SGV).....	20
2.2. PRINCIPAUX MECANISMES D'ACCOMPAGNEMENT ET PROCEDURES INCITATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE	22
2.2.1. Garantie AQUAPAC ®	22
2.2.2. Démarche qualité pour les forages géothermiques : Qualiforage	22
2.2.3. Aides financières	23
2.3. REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE	23
2.3.1. Contexte réglementaire.....	23
2.3.2. Cartes nationales des risques liés à la géothermie	25
3. Contexte géothermique, géologique et hydrogéologique de l'Alsace.....	26
3.1. QUELQUES RAPPELS SUR L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'ALSACE	26
3.2. CONTEXTE GEOTHERMIQUE EN ALSACE	27
3.2.1. Potentiel géothermique moyenne et haute température – à titre indicatif	27
3.2.2. Potentiel géothermique très basse température – Objet du présent rapport.....	27
3.3. GRANDES UNITES GEOLOGIQUES EN ALSACE – DECOUPAGE PRELIMINAIRE ..	29
3.4. PRINCIPALES NAPPES RETENUES POUR LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE.....	31
3.4.1. Critères de définition	31
3.4.2. Formations du Muschelkalk	34
3.4.3. Grès du Trias inférieur	35
3.4.4. Nappe d'Alsace.....	36
3.4.5. Pliocène de Haguenau-Riedseltz	37
3.4.6. Champ de fractures de Saverne	37
3.4.7. Socle vosgien	37
3.4.8. Sundgau et Jura alsacien.....	37
3.4.9. Nappes profondes du fossé rhénan	38
Calcaires du Malm du fossé rhénan - Rauracien-Séquanien pour l'Oxfordien	39
Calcaires du Dogger du fossé rhénan - Grande Oolithe du Bajocien sup-Bathonien inf.....	39

Calcaires du Muschelkalk supérieur jusqu'à Lettenkohle du fossé rhénan - Trias moyen.....	39
Grès du Buntsandstein du fossé rhénan - Trias inférieur	39
4. Conception de l'Atlas du potentiel géothermique	41
4.1. METHODOLOGIE GENERALE ET PRINCIPALES ETAPES	41
4.2. ETAPE 1 : INVENTAIRE ET RECUEIL DES DONNEES	42
4.3. ETAPE 2 : CARTOGRAPHIES UNICRITERES	43
4.3.1. Introduction méthodologique	43
Spatialisation des données	43
Classification des données et indexation des classes	45
4.3.2. Critère 1 : Profondeur d'accès à la nappe.....	46
Définition et source des données.....	46
Analyse des données exploitables.....	49
Classification retenue.....	55
Spatialisation des données	55
Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur	60
4.3.3. Critère 2 : Productivité des aquifères.....	62
Définition et source des données.....	62
Analyse des données exploitables.....	66
Classification retenue.....	74
Spatialisation des données	75
Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur	75
4.3.4. Critère 3 : Température de l'eau souterraine	76
Définition et source des données.....	76
Analyse des données exploitables.....	82
Classification retenue.....	88
Spatialisation des données	89
Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur	89
4.4. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE MULTICRITERE	90
4.4.1. Introduction méthodologique	90

Pondération des critères	90
Cartographie multicritères par aquifère	90
4.4.2. Bilan de la classification et de l'indexation des critères en Alsace.....	92
4.4.3. Cartographies multicritères par aquifère	92
4.5. ETAPE 4 : CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUR NAPPE EN ALSACE.....	93
5. Compléments sur la qualité de la ressource	95
5.1. INTRODUCTION	95
5.2. POTENTIEL HYDROGENE	98
5.3. CONDUCTIVITE	101
5.4. TITRE ALCALIMETRIQUE ET TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET	104
5.5. DURETE TOTALE OU TITRE HYDROTOMETRIQUE	106
5.6. TENEUR EN FER.....	108
5.7. TENEUR EN MANGANESE.....	110
6. Conclusions.....	113
Rappels sur les limites de l'atlas	114
7. Bibliographie	115

Liste des figures

Figure 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).....	18
Figure 2 : Schéma de principe de la géothermie sur nappe assistée d'une pompe à chaleur	19
Figure 3 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe	19
Figure 4 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique	21
Figure 5 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques.....	22
Figure 6 : Carte des ressources en eau en Alsace dressée en 1985 et mise à disposition sur le SIGES (URBAN S., BOUCHER J., 2011).....	28
Figure 7 : Carte des différentes unités géologiques sur le territoire alsacien pour la caractérisation des zones de potentiel géothermique sur aquifère (source : SIGES Rhin-Meuse ©BRGM)	30
Figure 8 : Cartes de localisation des principales formations aquifères identifiées en Alsace	32
Figure 9 : Illustration de la cohérence entre les principales formations aquifères identifiées pour la cartographie du potentiel géothermique, les masses d'eau souterraine (EDL 2019 version) et les unités géologiques sur le territoire alsacien	33

Figure 10 : Potentiel géothermique de la nappe du Mulschelkalk en Lorraine. D'après BOURGINE et al., 2007.	34
Figure 11 : Potentiel géothermique de la nappe du Buntsandstein en Lorraine. D'après BOURGINE et al., 2007.	36
Figure 12 : Méthodologie pour l'élaboration des cartes du potentiel géothermique	42
Figure 13 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)	43
Figure 14 : Illustration des méthodes d'interpolation IDW et TIN définies dans le logiciel QGIS (https://docs.qgis.org/)	44
Figure 15 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)	46
Figure 16 : Schéma explicitant la notion de profondeur d'accès à la ressource (source BRGM).....	46
Figure 17 : Graphique de répartition (a) des mesures collectées par origine et (b) du nombre de points de mesure associés	48
Figure 18 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesures des niveaux d'eau par commune du territoire alsacien	49
Figure 19 : Carte des communes identifiées comme étant « sans mesure de niveau d'eau » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes)	50
Figure 20 : Graphique de répartition des ouvrages avec des mesures exploitables de niveau d'eau par nappe	51
Figure 21 : Histogramme des mesures moyennes de niveau d'eau par nappe.....	51
Figure 22 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les niveaux d'eau par nappe	52
Figure 23 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les niveaux d'eau par nappe	52
Figure 24 : Carte de répartition des données ponctuelles pour le critère « profondeur d'accès à la nappe »	53
Figure 25 : Carte de répartition des niveaux d'eau moyens (mesures ponctuelles sur forage) par classe de valeur.....	54
Figure 26 : Extrait des cartes piézométriques disponibles sur les grès du Trias – secteur Alsace bossue (sources : BRGM, 1995 & 2010).....	56
Figure 27 : Spatialisation des cotes piézométriques de la nappe des grès du Trias en m NGF – secteur Alsace bossue.....	56
Figure 28 : Spatialisation des profondeurs de niveau d'eau en mètre par rapport au sol de la nappe des grès du Trias – secteur Alsace bossue.....	58
Figure 29 : Carte piézométrique en moyennes eaux de la nappe d'Alsace (source APRONA, 2009)	59
Figure 30 : Spatialisation des cotes piézométriques de la nappe d'Alsace en m NGF et des profondeurs de niveau d'eau en mètres par rapport au sol de la nappe d'Alsace.....	60
Figure 31 : Carte du critère « profondeur d'accès à la nappe » spatialisé par classe de valeur	61
Figure 32 : Graphique de répartition des mesures collectées par origine : (a) tous les points d'eau quelle que soit la nature (b) uniquement les forages ou puits	65
Figure 33 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesures des débits par commune du territoire alsacien	66
Figure 34 : Carte des communes identifiées comme « sans mesure de débit » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes).....	67
Figure 35 : Répartition des débits par type de mesure	68

Figure 36 : Critère « productivité de la nappe » - Graphique de répartition des points avec mesures de débit par nappe	69
Figure 37 : Critère « productivité de la nappe » - Graphique de répartition des forages ou puits avec mesures de débit par nappe	69
Figure 38 : Histogramme des débits moyens obtenus sur forage par nappe	70
Figure 39 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les débits moyens obtenus sur forage par nappe.....	70
Figure 40 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les débits moyens obtenus sur forage par nappe	71
Figure 41 : Carte de répartition des forages avec mesure de débits	72
Figure 42 : Carte de répartition des sources avec mesure de débits	72
Figure 43 : Carte de répartition des mesures de débit moyen par forage selon 4 classes	73
Figure 44 : Carte de répartition des mesures de débit moyen par source selon 4 classes	74
Figure 45 : Carte du critère « productivité » spatialisé par classe de valeur	75
Figure 46 : Evolution du nombre de point d'eau suivis par l'APRONA et du nombre de mesures acquises entre 2007 et fin 2019	77
Figure 47 : Carte de répartition des points d'eau ADES avec mesure de température en Alsace (source ADES, 24/09/2020)	78
Figure 48 : Carte de répartition des points d'eau ERMES avec mesure de température en Alsace (source APRONA, 2016).....	79
Figure 49 : Localisation des suivis de températures en nappe d'alsace (https://www.aprona.net/)	80
Figure 50 : Evolution du nombre de points d'eau suivis et du nombre de mesures acquises entre 2007 et fin 2019	80
Figure 51 : Carte de répartition des points d'eau APRONA avec suivi de température en Alsace (source APRONA, 2019).....	81
Figure 52 : Carte de répartition des points d'eau BSSES ou BSS avec mesure de température en Alsace (source BRGM, 2020)	82
Figure 53 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesure de la température par communes du territoire alsacien	83
Figure 54 : Carte des communes identifiées comme étant « sans mesure de température » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes)	84
Figure 55 : Graphique de répartition des ouvrages avec des mesures exploitables de température par nappe	85
Figure 56 : Histogramme des mesures moyennes de température par nappe	85
Figure 57 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les températures par nappe	86
Figure 58 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les températures par nappe	86
Figure 59 : Carte de répartition des données ponctuelles pour le critère « température de l'eau souterraine »	87
Figure 60 : Carte de répartition des mesures moyennes de température par classe	88
Figure 61 : Carte du critère « température de la nappe » spatialisé par classe de valeur	89
Figure 62 : Principe de la cartographie multicritères.....	91
Figure 63 : Carte finale du potentiel aquifère sur le territoire alsacien	94

Figure 64 – Classes d’aptitude de l’eau pour l’usage « énergie ». D’après SEQ-Eaux souterraine, 2003.	95
Figure 65 – Lien entre classes d’aptitude de l’usage « énergie » et classes de qualité des trois types altérations considérées (température, corrosion, formation de dépôts). D’après SEQ-Eaux souterraines, 2003.	95
Figure 66 - Carte du paramètre « potentiel hydrogène » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500).....	100
Figure 67 - Carte du paramètre « conductivité » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)...	103
Figure 68 - Carte du paramètre « titre alcalimétrique » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500).....	105
Figure 69 - Carte du paramètre « dureté » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)	107
Figure 70 - Carte du paramètre « fer » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)	109
Figure 71 - Carte du paramètre « manganèse » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)...	111

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie de très basse énergie (D’après http://sigesrm.brgm.fr/Geothermie-de-minime-importance)	24
Tableau 2 : Classes de profondeur d’accès à la nappe prises en compte.....	55
Tableau 3 : Classes de productivités de l’aquifère prises en compte	74
Tableau 4 : Classes de température de l’eau souterraine prises en compte	88
Tableau 5 : Classification et indexation des critères de potentialité géothermique	92
Tableau 6 : Statistiques concernant le potentiel géothermique selon la nappe et les classes de valeur	93
Tableau 7 : Valeurs seuils pour l’altération « température. D’après SEQ-Eaux souterraines, 2003	96
Tableau 8 : Valeurs seuils pour l’altération « corrosion ». D’après SEQ-Eaux souterraines, 2003	96
Tableau 9 : Valeurs seuils pour l’altération « formation de dépôts ». D’après SEQ-Eaux souterraines, 2003.....	97
Tableau 10 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de pH en Alsace	99
Tableau 11 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de conductivité en Alsace...	102
Tableau 12 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de TA et TAC en Alsace	104
Tableau 13 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de dureté en Alsace.....	106
Tableau 14 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les teneurs en fer en Alsace	108
Tableau 15 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les teneurs en manganèse en Alsace...	110

Liste des annexes

Annexe 1 : Définition des principales formations aquifères à partir des entités hydrogéologiques BDLISA niveau 3.....	117
Annexe 2 : Cartes du critère spatialisé « profondeur d'accès à la nappe » par nappe et classe de valeur	121
Annexe 3 : Cartes du critère spatialisé « productivité » par nappe et classe de valeur	131
Annexe 4 : Cartes du critère spatialisé « température » par nappe et classe de valeur	141
Annexe 5 : Cartes du potentiel géothermique de la ressource [résultat de l'analyse multicritères] par nappe	151

1. Introduction

L'élaboration d'un **Atlas des ressources géothermiques de surface sur nappe du territoire Alsacien** a été proposé par le BRGM dans le cadre des missions de service public qui lui sont dévolues par son contrat d'objectif et de performance avec l'Etat, ainsi que dans le cadre du développement des énergies renouvelables en Alsace. Le projet bénéficie d'une aide accordée par la Région dans le cadre du programme Climaxion, co-financé par l'ADEME et la Région (convention n°18P03931) et d'une subvention de la DREAL Grand Est (convention n°2201135128).

L'objectif est d'élaborer et de mettre à disposition, sur le site internet <https://www.geothermies.fr/regions/grand-est>, un outil d'aide à la décision permettant de déterminer l'exploitabilité locale des principaux aquifères pour alimenter une installation géothermique très basse énergie, de type pompe à chaleur eau – eau.

Cet outil, présenté sous la forme d'un atlas cartographique, a été élaboré en cohérence avec la méthodologie nationale et dans la mesure du possible avec les atlas préexistants sur la région Grand Est :

- atlas du potentiel très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne → [Rapport BRGM/RP-60024-FR](#) de 2012 (Chabart et al.) ;
- atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains → [Rapport BRGM/RP-54987-FR](#) de 2007 (Bourguine et al.) ; ce dernier plus ancien n'a pas été établi selon la même méthodologie nationale et conduit à envisager à court terme une harmonisation à l'échelle de la région Grand Est, qui n'est pas envisageable dans le cadre de la présente étude.

La réalisation s'accompagne de conditions limitatives liées à la méthodologie nationale et au contexte local :

- l'exploitation des données et les résultats de l'analyse menée est limité à la tranche de terrain comprise entre **0 et 200 m de profondeur** ;
- les résultats apportés ne s'affranchiront en aucun cas d'une **étude de faisabilité locale** à engager avant toute réalisation d'opération de géothermie ;
- la **précision des résultats** est fonction de la qualité et de la densité des données disponibles ;
- l'échelle de l'étude a été adaptée au contexte géologique et hydrogéologique du territoire alsacien ; ainsi, certaines couches aquifères traitées ont été regroupées afin de garder une cohérence par grandes unités géologiques et tenir compte du nombre de données disponibles par entité hydrogéologique (BDLISA).

L'outil élaboré a pour vocation d'apporter un soutien technique au plus grand nombre (collectivités, professionnels ou particuliers) pour prendre une décision argumentée lors d'un choix énergétique. La diffusion des résultats, notamment cartographiques, pourra ainsi être élargie au [SIGES Rhin-Meuse](#) ainsi qu'au [Géoservices \(OGC\) du BRGM](#).

2. Présentation de la géothermie très basse énergie

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

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

2.1. 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 un 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 » (Figure 1).

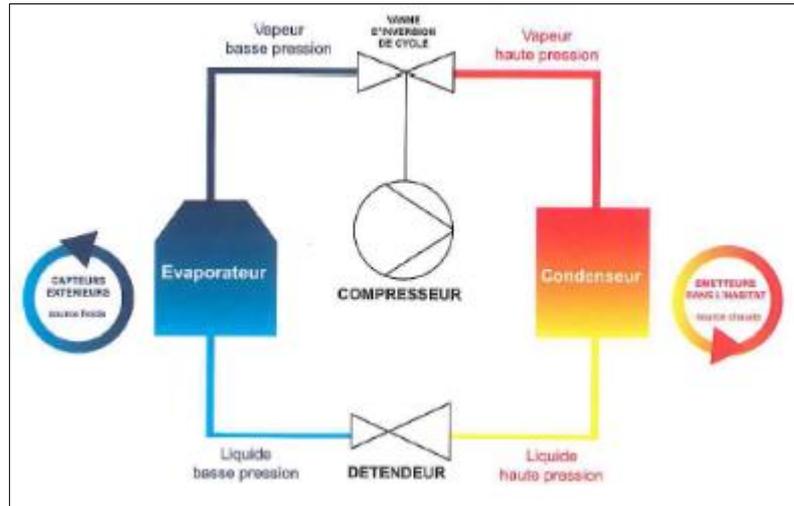


Figure 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère - ADEME, BRGM mai 2012).

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 nappe

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.

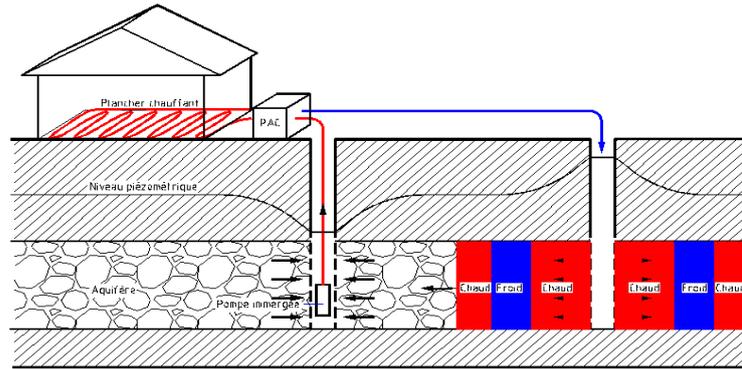


Figure 2 : Schéma de principe de la géothermie sur nappe assistée d'une pompe à chaleur

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

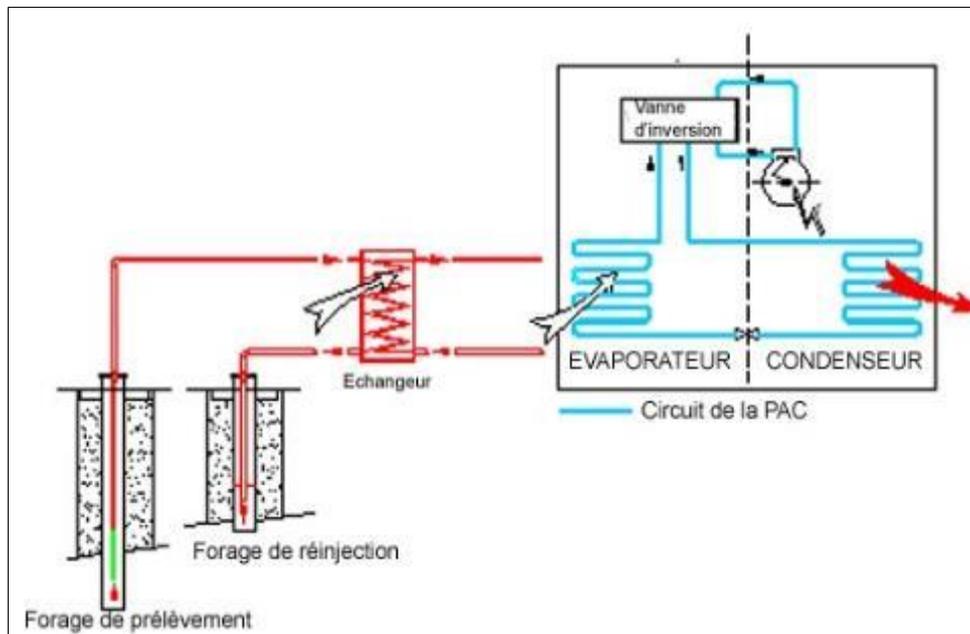


Figure 3 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe

L'eau est prélevée par 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.

- **étude 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 du SDAGE du bassin Rhin-Meuse, sont accessibles sur le site Internet <https://www.eau-rhin-meuse.fr/>.

De même, les zones à enjeux (zones humides, ZNIEFF, etc...) peuvent être consultées sur le site de la DREAL Grand Est (<http://www.grand-est.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 ou ARS (<https://www.grand-est.ars.sante.fr/>).

- **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.

2.1.3. Pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales (SGV)

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 (Figure 4).

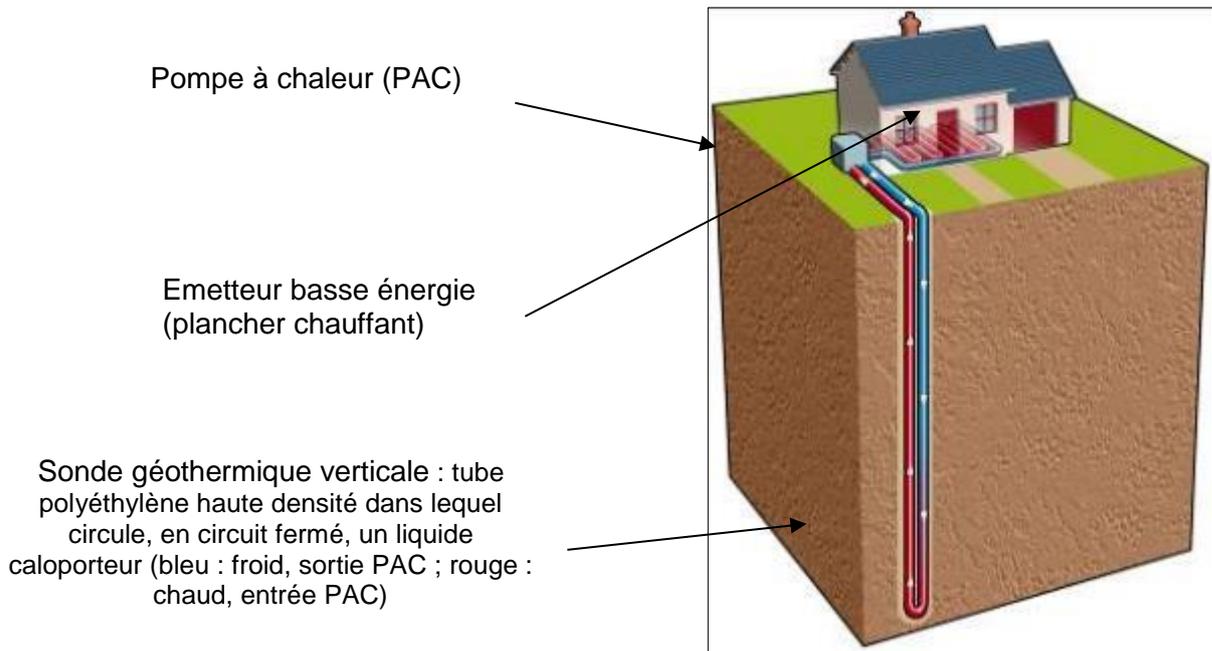


Figure 4 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique

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 » (Figure 5).

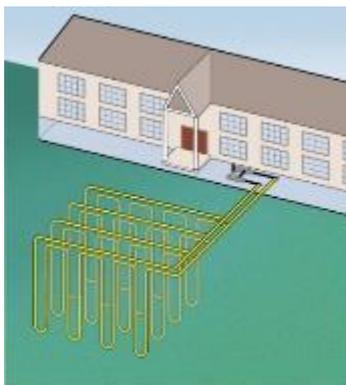


Figure 5 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques

La [norme AFNOR 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.

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. Garantie 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.

2.2.2. Démarche qualité pour les forages géothermiques : Qualiforage

Le [décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015](#) qui définit et régleme 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** et est gérée actuellement par [Qualit'EnR](#).

La liste des entreprises qualifiées peut être consultée sur le site <http://www.qualit-enr.org/annuaire>.

2.2.3. Aides financières

Il existe différents dispositifs de soutien en région pour les particuliers, les entreprises et les collectivités. La consultation du site <https://www.geothermies.fr/regions/grand-est> offre une information détaillée et actualisée.

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 ;
- le Code Général des Collectivités Territoriales qui relève du ministre de l'intérieur.

Un article récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie utilisés est présenté sur le site du [SIGES Rhin-Meuse](#) (Tableau 1).

Type de géothermie	Conditions générales	Régime administratif
Géothermie avec puits canadiens, géostructures thermiques ou corbeilles	Aucune	Code minier non applicable [2]
Géothermie avec des échangeurs thermiques fermés horizontaux (profondeur < 10 m)	Profondeur inférieure à 10 m	Code minier non applicable [1]
Échangeurs géothermiques ouverts (forages d'eau)	Profondeur < 10 m, puissance < 500 kW, température < 25 °C, débit < 80 m ³ /h et réinjection même nappe	Code minier non applicable [1]
	Profondeur > 10 m et < 200 m, puissance < 500 kW, température < 25 °C, débit < 80 m ³ /h, réinjection même nappe et en zone verte ou orange	Déclaration
	Profondeur > 200 m ou puissance > 500 kW ou température > 25 °C ou débit > 80 m ³ /h ou pas de réinjection en même nappe ou zone rouge	Autorisation instruite par les services de l'État
Échangeurs géothermiques fermés (sondes géothermiques)	Profondeur < 10 m, puissance < 500 kW	Code minier non applicable [1]
	Profondeur > 10 m et < 200 m Puissance < 500 kW et zone verte ou orange	Déclaration
	Profondeur > 200 m ou puissance > 500 kW ou zone rouge	Autorisation instruite par les services de l'État
Échangeurs géothermiques d'une profondeur supérieure à 200 m	Profondeur > 200 m	Autorisation instruite par les services de l'État
<p>[1] Article R214-1 du code de l'environnement (extrait) : 5.1.1.0. Réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie, l'exhaure des mines et carrières ou lors des travaux de génie civil, la capacité totale de réinjection étant : 1° Supérieure ou égale à 80 m³/h (A) ; 2° Supérieure à 8 m³/h, mais inférieure à 80 m³/h (D).</p>		
<p>[2] Pour ces forages de moins de 10 m de profondeur, d'autres réglementations peuvent s'appliquer, en particulier les dispositions du code de l'environnement (livre 2, titre 1^{er}, relatif à l'eau, aux milieux aquatiques et marins) et le code général des collectivités territoriales (CGCT) qui prévoit une information des Maires en cas de forage (pour les forages qui ne sont pas soumis à une procédure au titre du code de l'environnement).</p>		

Tableau 1 : Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie de très basse énergie (D'après <http://sigesrm.brgm.fr/Geothermie-de-minime-importance>)

Il est à noter que les installations de géothermie qui répondent aux conditions de la **géothermie de minime importance (GMI)** ne sont soumises qu'à une simple déclaration, réalisable en ligne sur le site du Ministère <https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/>.

Pour de plus amples informations, on peut consulter le site internet : <https://www.geothermies.fr/>.

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 méthodologie appliquée est compilée dans le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance publié en 2015 et disponible en ligne sur le site Geothermies.fr. Il fait suite à une étude régionale pilote menée par le CEREMA et le BRGM sur la Lorraine et l'Alsace en 2014 (Rapport BRGM/RP-63616-FR).

Sur chacune de ces cartes, on identifie 3 zones réglementaires définies selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les **zones vertes** qui ne présentent pas d'enjeux identifiés ;
- les **zones oranges** dans lesquelles un examen des projets au cas par cas est nécessaire avec l'intervention d'un d'expert pour un avis favorable ;
- les **zones rouges** dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance prévu par l'article L.112-3 du code minier. Il reste possible de demander une autorisation aux services de l'Etat.

3. Contexte géothermique, géologique et hydrogéologique de l'Alsace

3.1. QUELQUES RAPPELS SUR L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'ALSACE

Au cours des ères géologiques, la région rhénane a connu une alternance de phases de sédimentation (marines ou continentales) et d'érosion. Le jeu des orogénèses et de la tectonique a modifié ces sédimentations et provoqué l'enfoncement des séries dans le sous-sol de la plaine rhénane. L'histoire géologique du territoire alsacien peut se résumer en 7 grandes périodes :

1. Le **milieu marin pré-orogénique** (500-390 millions d'années) : C'est l'époque des premiers dépôts sédimentaires (séries de Villé et de Steige et volcanites de la future Série de Sainte-Marie-aux-Mines).
2. L'**orogénèse varisque ou hercynienne dans les Vosges** (400 - 315 millions d'années) : C'est la mise en place d'un massif montagneux couvrant les Vosges, la Forêt-Noire et l'actuelle plaine rhénane et parcouru de failles (direction NNE-SSW).
3. Le **démantèlement de la chaîne hercynienne** (325-250 millions d'années) : Du Carbonifère supérieur au Trias inférieur, de petits bassins d'effondrement apparaissent et les vallées se remplissent à la faveur des apports résultant de l'érosion. A la fin de l'ère primaire, il reste une grande pénéplaine formée de roches issues du socle, des sables et des grès argileux.
4. La **sédimentation mésozoïque** (250-150 millions d'années) : Au début de l'ère secondaire (Trias) se déposent sur l'ensemble de cette pénéplaine des sédiments variables : Les formations gréseuses du Buntsandstein (dépôts fluvio-deltaïque du Trias inférieur), les formations marno-calcaires du Muschelkalk et de la Lettenkohle (dépôts marins tels que grès coquilliers, calcaires à Entroques ou à Cératites du Trias moyen), les formations marneuses et gypsifères du Keuper (dépôts lagunaires déposés dans un milieu sursalé au Trias supérieur) et les dépôts gréseux détritiques du Rhétien (Trias supérieur). Au Jurassique inférieur, le milieu s'approfondit, la sédimentation est surtout marno-calcaire (Lias et Aalénien). Au Jurassique moyen, les niveaux calcaires sont prédominants (Grande Oolithe du Dogger) avant une nouvelle sédimentation plus marneuse ou marno calcaire au Callovien-Oxfordien, puis à nouveau calcaire au Jurassique supérieur (Rauracien-Séquanien).
5. La **lacune sédimentaire crétacée** (150-50 millions d'années) : Après les dépôts calcaires du Jurassique débute une phase d'émersion de tout le massif qui se traduit par une lacune totale du Crétacé et une érosion des formations jurassiques. Cette érosion est plus importante au nord de l'Alsace (au-delà de Haguenau) du fait des phases de plissements et de soulèvements.

6. La **sédimentation tertiaire et le Fossé rhénan** (50-5 millions d'années) : L'ère tertiaire correspond à la surrection des bordures (Vosges, Forêt-Noire, Jura) et à l'enfoncement du fossé rhénan. La nouvelle phase de sédimentation au cours de l'Eocène et de l'Oligocène est essentiellement marneuse et argileuse avec un développement de niveaux de gypse d'anhydrite de sel gemme et de potasse dans les compartiments effondrés du fossé rhénan (secteur de Mulhouse). Dans le Sundgau, les dépôts éocènes et oligocènes sont moins épais, moins salifères et moins marneux. A partir du Miocène, la mer se retire progressivement et définitivement laissant place à un milieu continental.
7. Les **glaciations et la plaine alluviale rhénane** (5 millions d'années - actuel) : La subsidence reprend au Pliocène avec l'accumulation de sédiments détritiques issus de l'érosion. Puis, pendant tout le Quaternaire, la plaine d'Alsace fonctionne comme un piège à sédiments. Ceux-ci, d'origine alpine ou vosgienne, viennent grossir les dépôts alluviaux, notamment du Rhin et de l'Ill. Les apports éoliens de loess, sous climat péri-glaciaire, complètent les dépôts de la plaine alluviale. A l'inverse, à la faveur des glaciations quaternaires, le massif vosgien est érodé et de nombreux dépôts morainiques en résultent. Ces anciennes glaciations sont à l'origine de la morphologie actuelle des Vosges tandis que les divers épandages continentaux continuent d'être guidés par le réseau hydrographique moderne, tant au niveau des rivières vosgiennes que dans le Fossé rhénan.

3.2. CONTEXTE GEOTHERMIQUE EN ALSACE

3.2.1. Potentiel géothermique moyenne et haute température – à titre indicatif

Le **potentiel géothermique moyenne et haute température** en Alsace est important de par son histoire et sa structure géologique. En effet le graben du Fossé Rhénan offre des possibilités intéressantes pour ce type d'exploitations profondes. Les potentialités sont ou ont été étudiées dans le cadre :

- du projet européen [GeORG](#) financé dans le cadre du programme **Interreg IV Rhin supérieur**. Entre octobre 2008 et jusqu'au décembre 2012, les partenaires suisses, français et allemands de ce projet transfrontalier ont établi des informations sur la structure géologique du Fossé rhénan. L'ensemble des résultats ont été mis à disposition des professionnels et du grand public ;
- du projet de géothermie profonde sur le site de Sultz-sous-Forêts (cf. les sites [BRGM](#), [EDF](#), [Geothermies.fr](#)) ;
- d'autres projets en cours de réalisation (cf. site de l'[ADEME Grand Est](#)).

3.2.2. Potentiel géothermique très basse température – Objet du présent rapport

Le **potentiel géothermique très basse température** (ou très basse énergie - TBE) en Alsace, est conditionné et largement favorisé par l'existence d'un aquifère peu profond, la nappe alluviale rhénane qui est l'une des plus importantes réserves en eau souterraine d'Europe. La quantité d'eau stockée, pour sa seule partie alsacienne, est estimée à environ 35 milliards de m³. Les connaissances générales montrent que sa température varie peu au fil des saisons, entre 8 et 12 °C, et assure une efficacité élevée même en hiver, dans le cas de son exploitation à travers des pompes à chaleur.

Le BRGM a édité en juin 1985 une cartographie détaillée des potentialités et des contraintes de géothermie basse température en Alsace : « Utilisation énergétique des nappes phréatiques du département du Bas-Rhin AQUAPAC ». Il s'agit d'un jeu de cartes avec notices réalisé pour chaque département (cartes « AQUAPAC »).

Cette cartographie a été mise à disposition du public en 2008 (URBAN S., BOUCHER J., 2011) pour communiquer sur les possibilités d'utilisation de pompes à chaleur (PAC) sur nappe ou sur sonde thermique (cf. [espace cartographique du SIGES de l'Aquifère Rhénan](#) ou [Geothermies.fr](#)).

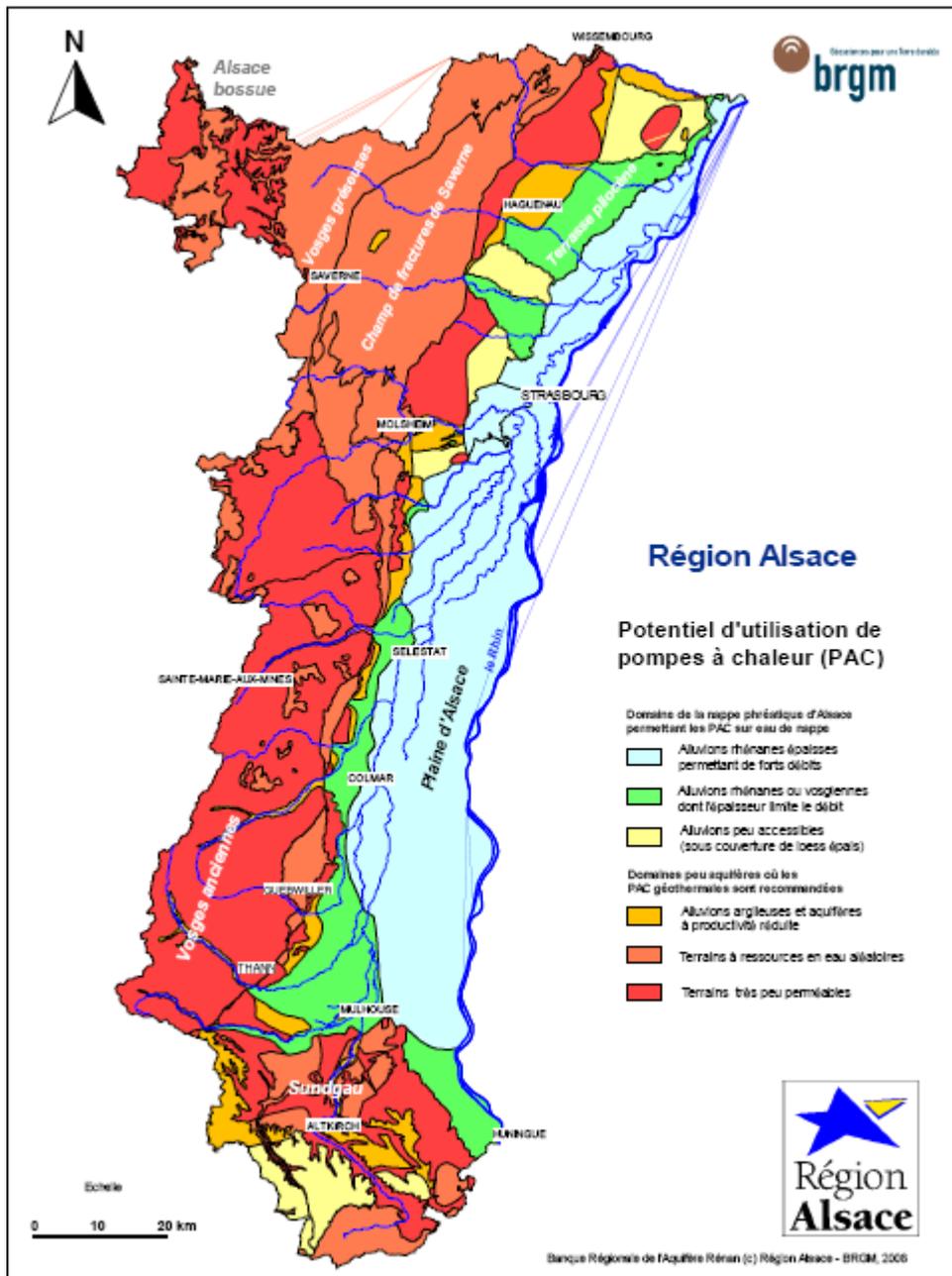


Figure 6 : Carte des ressources en eau en Alsace dressée en 1985 et mise à disposition sur le SIGES (URBAN S., BOUCHER J., 2011)

Sur cette carte (Figure 6), on distingue 2 domaines et 6 sous-domaines :

- le domaine de la nappe d'Alsace permettant les PAC sur nappe
 - les alluvions où la nappe d'Alsace est suffisamment puissante pour permettre de forts débits (en bleu) ;
 - les alluvions où la nappe est moins productive (en vert) ;
 - les alluvions sous couverture de loess épais (en jaune) où la ressource est peu accessible.
- les domaines peu aquifères où les sondes verticales sont recommandées :
 - les alluvions argileuses à productivité réduite (en orange clair) ;
 - les terrains à ressources en eau aléatoires (en orange foncé) ;
 - les terrains très peu perméables (en rouge).

3.3. GRANDES UNITES GEOLOGIQUES EN ALSACE – DECOUPAGE PRELIMINAIRE

On distingue, 7 grandes unités géologiques en Alsace qui peuvent se caractériser selon l'accessibilité à la ressource en eau ou selon sa productivité (Figure 7) :

1. **Le Plio-quaternaire du fossé rhénan** ou plaine d'Alsace (en bleu clair sur la carte)
 - qui comprend **la nappe alluviale rhénane**, qui se dégage comme le potentiel majeur pour l'exploitation géothermique sur aquifère ;
 - qui intègre les **formations pliocènes** affleurant dans le Nord bien que leurs potentialités soient plus aléatoires que la nappe alluviale stricto sensu ;
2. **L'Alsace Bossue** (en rouge foncé) qui comprend les séries sédimentaires structurellement liées au système du bassin de Paris. A ce titre le potentiel géothermique sur aquifère est lié à deux systèmes aquifères distincts dont les potentialités exactes restent à déterminer ;
3. **Les champs de fractures en bordure de la Plaine d'Alsace** (en rouge clair) constituent des zones géologiquement et hydrogéologiquement complexes aux potentialités variables. Ces zones fracturées demandent également des applications géothermiques bien encadrées en raison des risques liés aux aquifères captifs ;
4. **Les Vosges du socle cristallin** (en gris) sont globalement peu propices à la géothermie sur aquifère, hormis peut-être sur les nappes alluviales d'accompagnement des principales rivières vosgiennes ou bien encore dans les formations gréseuses du Trias qui surplombent localement le socle cristallin dans sa partie Nord ;
5. **Le Sundgau** (en bleu foncé) regroupe plusieurs situations géologiques et hydrogéologiques contrastées (aquifères des cailloutis du Sundgau, Horst de Mulhouse, Jura Alsacien) qui demandent des approches détaillées pour en définir les potentiels particuliers ;
6. **Les formations de l'Oligocène** (en vert) essentiellement marneuses sont peu propices au développement de géothermie sur aquifère ;

7. **La vallée de la Plaine** (en violet) est une zone limitrophe du massif vosgien qui comme pour l'Alsace Bossue se rattache aux séries du Bassin Parisien. Intégrant des formations de socle suivies de quelques séries sédimentaires essentiellement gréseuses, ses potentialités sont liées à ces séries.

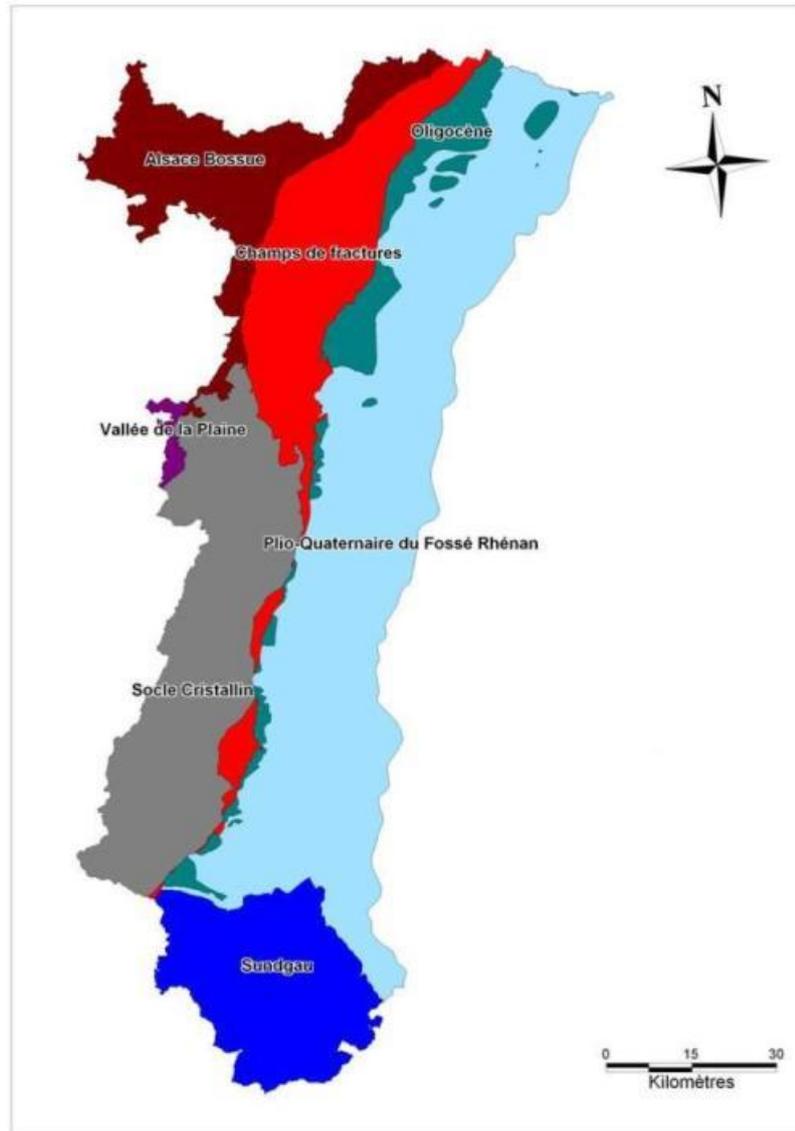


Figure 7 : Carte des différentes unités géologiques sur le territoire alsacien pour la caractérisation des zones de potentiel géothermique sur aquifère (source : [SIGES Rhin-Meuse](#) ©BRGM)

3.4. PRINCIPALES NAPPES RETENUES POUR LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE

3.4.1. Critères de définition

La cartographie de la ressource géothermique s'appuie sur une cartographie des principaux aquifères dont l'identification respecte les critères suivants :

- un nombre restreint d'aquifères afin de pouvoir disposer d'une information suffisante pour chacun d'eux (Figure 8) :
 - pour l'Alsace, le choix de 10 aquifères a été retenu en première approche dont 3 aquifères profonds pour lesquels il faudra vérifier la profondeur d'accès (nécessairement < 200 m) et la disponibilité des données.
- une cohérence géographique pour chaque aquifère :
 - pour l'Alsace, le choix s'appuie sur les grandes unités géologiques précédemment définies (§ 3.3) avec quelques différences notables (Figure 9) : rattachement les unités moins perméables à des unités plus perméable contiguës (Oligocène attaché au Plio-quadernaire de la Plaine d'Alsace) et le rattachement des champs de fractures les moins développés au sud de Barr (Ribeauvillé, Vieux-Thann) au socle vosgien.
- une cohérence avec les entités hydrogéologiques [BDLISA](#) version 2 :
 - le contour des formations aquifères retenues a été obtenu par fusion des entités BLISA de niveau 3 (nature = aquifère ou semi-perméable – annexe 1). Cette opération s'appuie sur les travaux réalisés en décembre 2018 par la DREAL et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse pour le Référentiel des masses d'eau souterraines du bassin Rhin-Meuse-Etat des Lieux de 2019.
- une cohérence avec la nouvelle définition des masses d'eau souterraine établie par la DREAL et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse pour le Référentiel des masses d'eau souterraines du bassin Rhin-Meuse-Etat des Lieux de 2019 (Figure 9).

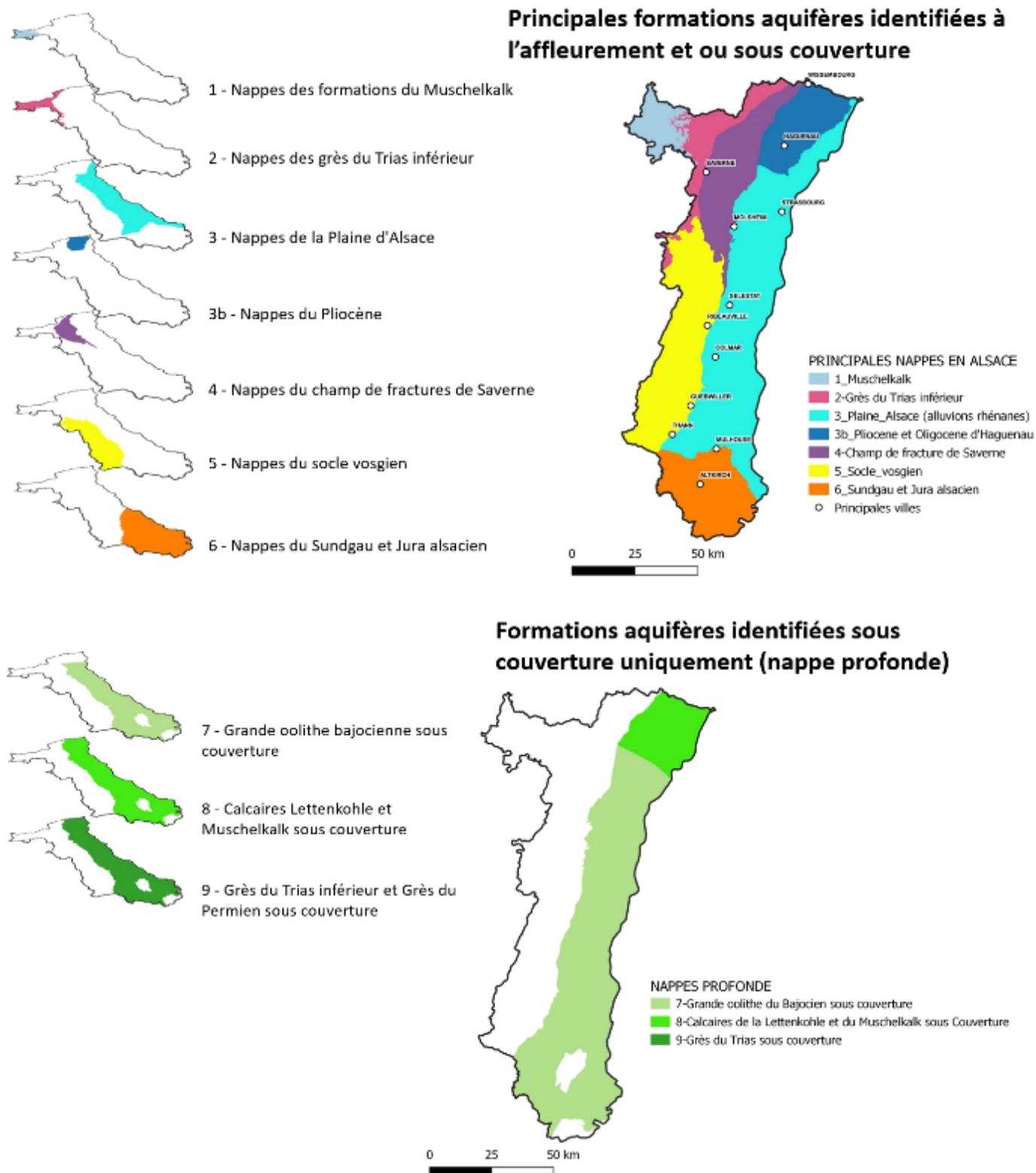


Figure 8 : Cartes de localisation des principales formations aquifères identifiées en Alsace

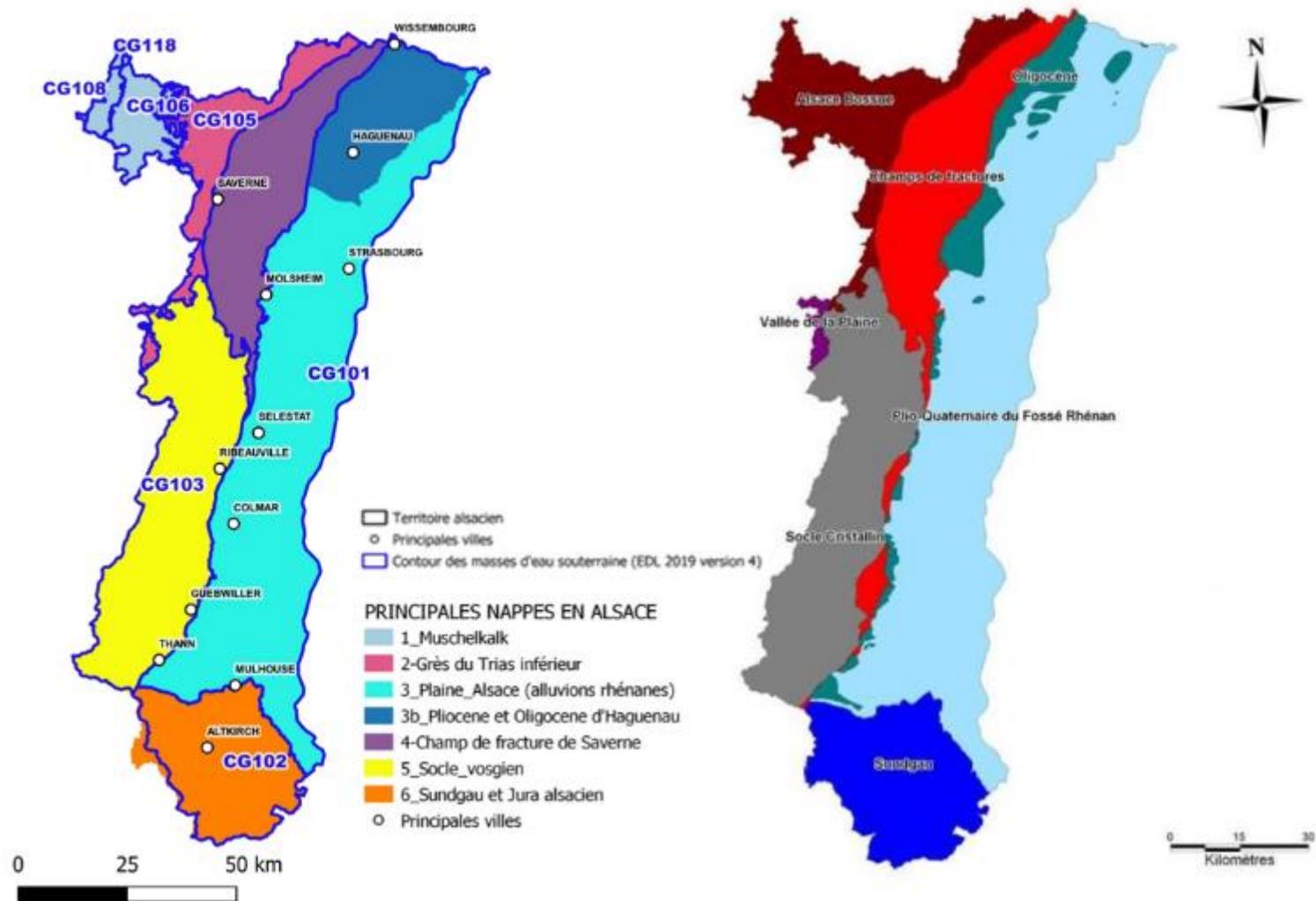


Figure 9 : Illustration de la cohérence entre les principales formations aquifères identifiées pour la cartographie du potentiel géothermique, les masses d'eau souterraine (EDL 2019 version) et les unités géologiques sur le territoire alsacien

3.4.2. Formations du Muschelkalk

Les formations calcaro-dolomitiques du Muschelkalk (Trias moyen) affleurent au nord-ouest du département (Alsace Bossue) en recouvrement des formations gréseuses du Trias inférieur (cf. 3.4.3). Les couches plongent progressivement vers l'Ouest et le Sud-Ouest sous les formations du Keuper et se rattachent aux formations largement représentées en Lorraine et traitées dans le cadre de l'Atlas du potentiel géothermique de Lorraine (Figure 10).

Le secteur d'étude concerne pour partie les calcaires du « Muschelkalk de Haute-Sarre » qui forment un arc de cercle depuis la Meurthe jusqu'à la frontière allemande et se présentent sous forme d'une cuesta calcaire. Il s'agit d'un aquifère multicouches intégrant les calcaires à entroques (10 à 20 m), les calcaires à Cératites (≈ 40 m), les calcaires à Térébratules (≈ 6 m), les couches essentiellement dolomitiques de la Lettenkohle (≈ 30 m).

Les ressources en eau se trouvent principalement dans les formations du Muschelkalk supérieur, le Muschelkalk moyen étant essentiellement marneux. De par sa nature fissurée et karstique, cet aquifère présente à l'affleurement une perméabilité généralement assez forte, des débits intéressants et une minéralisation moyenne (faciès bicarbonaté calcique à tendance sulfaté).

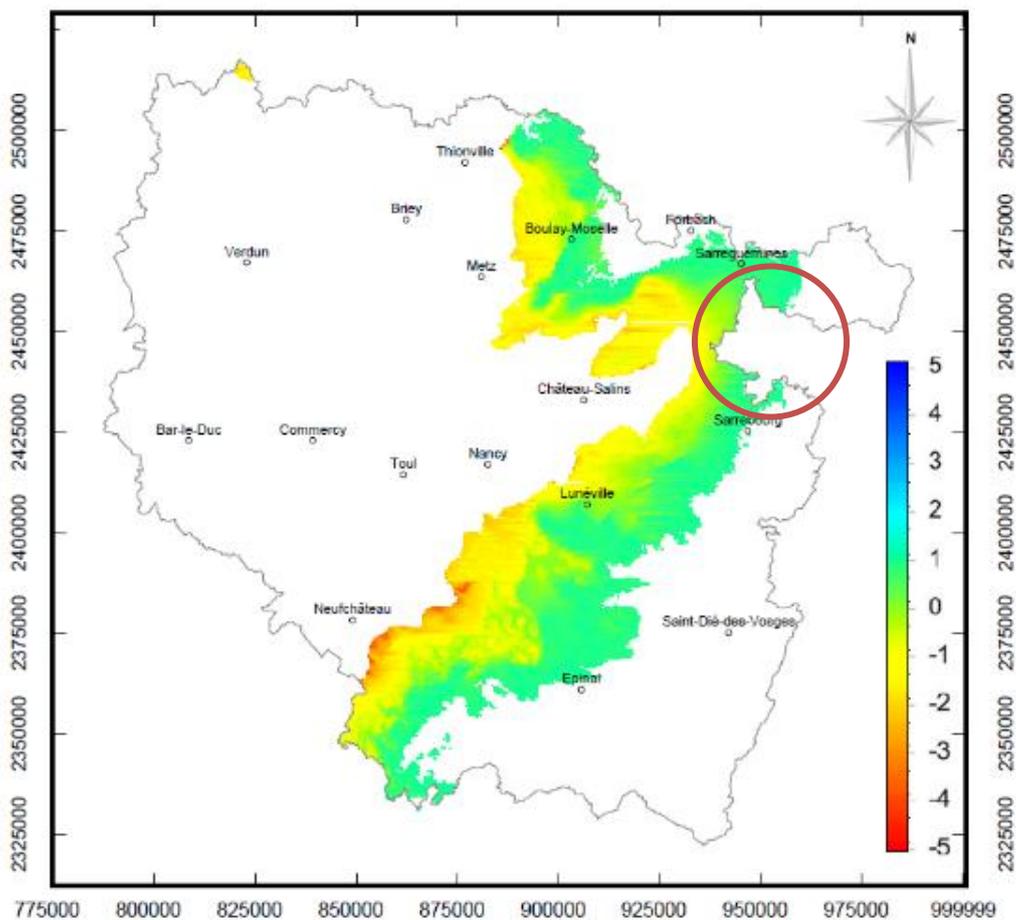


Figure 10 : Potentiel géothermique de la nappe du Muschelkalk en Lorraine.
D'après BOURGINE et al., 2007.

3.4.3. Grès du Trias inférieur

Les formations gréseuses du Trias inférieur (Buntsandstein) affleurent au nord-ouest du département (Alsace Bossue) et sont également présentes sous recouvrement du Muschelkalk. Les formations sont sus-jacentes au socle hercynien et se rattachent aux formations largement représentées en Lorraine et traitées dans le cadre de l'Atlas du potentiel géothermique de Lorraine (Figure 11).

Le secteur d'étude concerne une petite partie de cet aquifère largement représenté à l'Est du bassin Rhin Meuse et plus particulièrement les « Grès du Trias inférieur de la Hardt » qui affleurent largement au nord du Massif vosgien jusqu'à la frontière allemande (Parc Naturel Régional des Vosges du Nord et Pays de Bitche). Il s'agit d'un aquifère principalement gréseux (parfois conglomératique) extrêmement poreux (porosité d'interstices) et localement fissuré comprenant les grès d'Annweiler, les grès vosgiens, les couches intermédiaires, les grès à Voltzia. L'épaisseur totale est importante à l'affleurement dans les Vosges du Nord (jusqu'à 500 m ; 350 m à la Petite-Pierre) et diminue vers l'ouest (plongement progressif des couches vers le centre du bassin de Paris). Les ressources se trouvent principalement dans les Grès Vosgiens avec une exploitation pour les besoins en eau potable et industriels et quelques spécificités locales liées à d'importantes fractures propices à l'émergence d'eaux « minérales » ou « thermales » (Niederbronn, Morsbronn-les-Bains, Merkwiler-Pechelbronn).

A l'affleurement les eaux sont peu minéralisées, de faible dureté, acides, agressives et parfois chargées en fer. Sous couverture, les eaux se chargent progressivement vers l'ouest et la minéralisation, commandée par la profondeur du niveau piézométrique, s'intensifie en lien notamment avec des phénomènes de drainance descendante ou des zones faillées qui favorise les échanges avec les eaux salées du Muschelkalk et du Keuper.

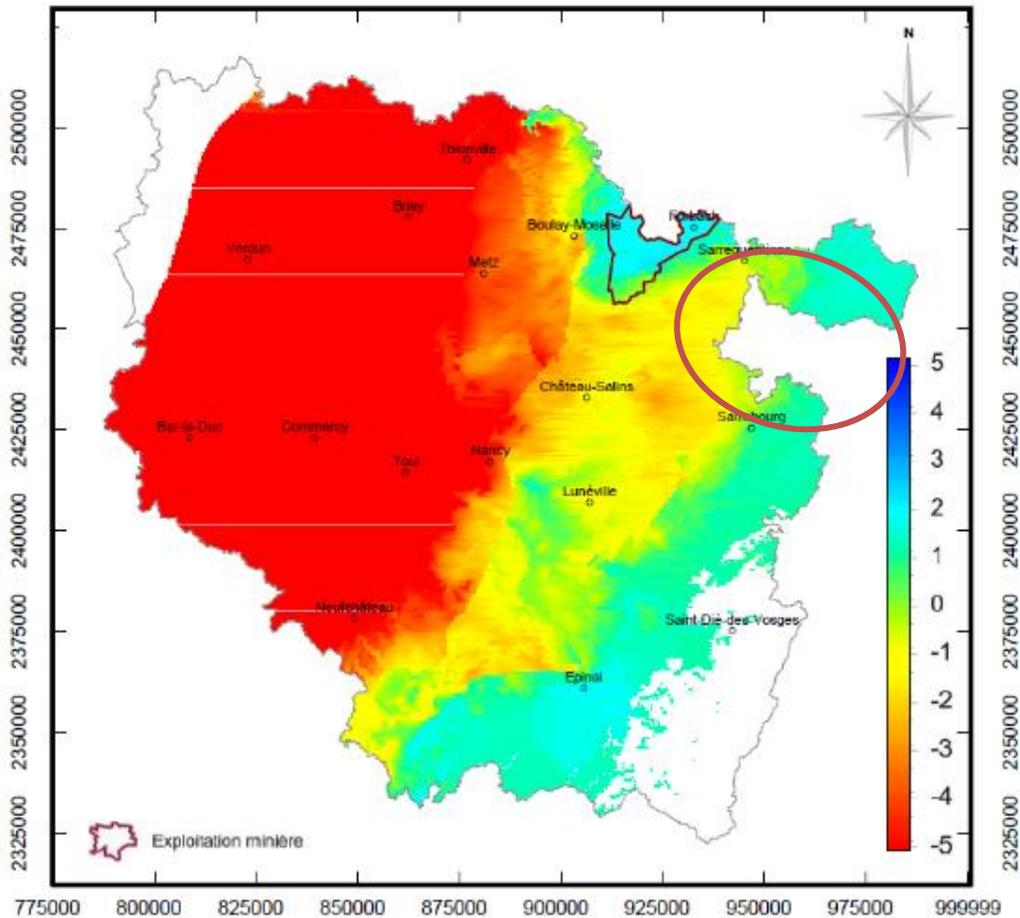


Figure 11 : Potentiel géothermique de la nappe du Buntsandstein en Lorraine. D'après BOURGINE et al., 2007.

3.4.4. Nappe d'Alsace

La nappe d'Alsace également nommée **nappe alluviale du Quaternaire en Plaine d'Alsace** ou nappe phréatique de la plaine du Rhin supérieur, est un ensemble hydraulique relativement homogène avec des ressources « quantitatives » en eau souterraine considérables. En revanche, sa vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses ou ponctuelles est très importante et implique la mise en œuvre de mesures de protection adaptées aux risques liés à l'exploitation de la ressource (y compris pour les projets de géothermie).

L'épaisseur des formations alluviales (comprise entre la surface du sol et le substratum tertiaire imperméable) est en moyenne de 120 m et peut atteindre 200 à 250 m par endroits (fosse de Geiswasser). Les formations tertiaires sous-jacentes aux alluvions rhénanes sont imperméables et aucune autre nappe n'est identifiée à moins de 200 m de profondeur (cf. 3.4.9).

3.4.5. Pliocène de Haguenau-Riedseltz

La nappe correspond à un système composite formé par les terrasses pliocènes et quaternaires du secteur de Haguenau. Cette nappe captive est constituée de dépôts sablo-argileux d'une épaisseur de 15 m à l'ouest à plus de 60 m à l'Est. L'exploitation de cette ressource, très productive et protégée des pollutions de surface par un niveau argileux, se fait par forage d'une profondeur de 20 à 70 m (débits jusqu'à 100 m³/h).

3.4.6. Champ de fractures de Saverne

Les champs de fractures se situent dans les collines sous vosgiennes au piémont des Vosges entre la faille vosgienne et la faille rhénane. Les terrains d'âge secondaire et tertiaire alternent entre couches perméables et couches imperméables formant un ensemble localement aquifère très complexe et très faillé.

Le « Champ de fractures de Saverne » est l'entité la plus importante comparativement aux champs de fractures de Ribeauvillé, de Guebwiller et de Vieux-Thann (cf. 3.4.7).

Au nord, le secteur de Merkwiler-Pechelbronn (champ pétrolifère) se caractérise par une anomalie géothermique connue de longue date. Les investigations géothermiques menées sur le socle granitique concerne des profondeurs entre 400 et 3500 m et n'entrent pas dans le cadre de cette étude.

3.4.7. Socle vosgien

A l'ouest du fossé rhénan, le socle vosgien est constitué de roches dures variées, tectonisées et altérées. La perméabilité est variable en fonction du type de roche et de sa faculté à développer une zone d'altération potentiellement aquifère (Chabart et al., 2020).

Les nombreuses sources du socle constituent les exutoires des petites nappes libres associées à ce réservoir hétérogène qui intègre également :

- les lambeaux de grès sur les hauteurs (vestiges de la couverture gréseuse du socle hercynien érodée après la surrection du tertiaire) qui donne naissance à des sources dont la productivité est proportionnelle à la surface d'affleurement ;
- les alluvions fluvio-glaciaires des vallées vosgiennes (Giessen et Liepvrette, Fecht, Thur, Doller) et les formations morainiques remplissant les surcreusements du socle ou cuvettes glaciaires parfois très profondes (70 m à Wesserling), exploitées préférentiellement par forage ;
- au sud de Sélestat, la zone faillée située entre la faille rhénane (délimitant le fossé rhénan) et la faille vosgienne (délimitant le socle vosgien) est constituée des champs de fractures de Ribeauvillé, de Guebwiller et de Vieux-Thann.

3.4.8. Sundgau et Jura alsacien

Le fossé rhénan butte, au sud de l'Alsace, sur une région naturelle, dénommée Sundgau, qui contient en son centre le « horst de Mulhouse » encadré à l'ouest par le « fossé de Dannemarie » et à l'est par le « fossé de Sierentz » et au sud par le chevauchement des plis du Jura suisse.

Ce secteur particulièrement complexe regroupe trois unités géologiques et hydrogéologiques identifiées sous les dénominations :

- Molasse Alsacienne : Formations de l'Eocène et de l'Oligocène affleurantes du Sundgau et du piémont vosgien ;
- Cailloutis du Sundgau : système aquifère composé par les alluvions pliocènes reposant sur les marnes oligocènes et recouvertes de loess ;
- Jura Alsacien : système aquifère karstique du Jurassique plissé.

Molasse alsacienne : Les forages exploitent les horizons sableux ou gréseux intercalés dans les marnes avec des débits variant entre 10 à 20 m³/h (Altenach, Leymen, Neuwiller), des calcaires oligocènes karstifiés amenés à l'affleurement par le jeu des failles du horst de Mulhouse (Tagolsheim, Steinbrunn) ou des lambeaux d'anciennes terrasses alluvionnaires du Rhin (Blotzheim). Les eaux sont bicarbonatées calciques avec une minéralisation totale de l'ordre de 600 mg/l.

Cailloutis du Sundgau : L'exploitation pour l'eau potable porte généralement sur des sources émergeant le long des affleurements. L'exploitation par forage est réalisée localement et à faible profondeur (nappe perchée). Les eaux sont bicarbonatées calciques avec une minéralisation totale de l'ordre de 400 mg/l.

Jura Alsacien : L'exploitation concerne, comme précédemment et avant tout, des sources à gros débit issues des calcaires du Dogger (formation karstique dite « Grande Oolithe bajocienne »). Les eaux sont bicarbonatées calciques avec une minéralisation totale de l'ordre de 500 mg/l et localement des minéralisations naturelles de type arsénifères.

3.4.9. Nappes profondes du fossé rhénan

Le remplissage sédimentaire du fossé d'effondrement rhénan peut atteindre 3000 m au nord de la plaine d'Alsace (secteur de Lauterbourg). Plusieurs formations perméables ont été reconnues par des forages profonds sous les formations alluviales perméables et les formations tertiaires imperméables. Il s'agit en Plaine d'Alsace de la moins profonde à la plus profonde :

- les calcaires du Malm (Rauracien-Séquanien pour l'Oxfordien) du fossé rhénan ;
- les calcaires du Dogger (Grande Oolithe du Bajocien supérieur et Bathonien inférieur) du fossé rhénan ;
- les calcaires du Muschelkalk supérieur et Lettenkohle (Trias moyen) du fossé rhénan ;
- les grès du Buntsandstein (Trias inférieur) du fossé rhénan.

Deux rapports publiés en 1979 (Munck.F et al.) et en 1983 (Daessle.M.) dressent la synthèse des données existantes sur ces aquifères profonds du fossé rhénan. Les informations suivantes en sont tirées.

Calcaires du Malm du fossé rhénan - Rauracien-Séquanien pour l'Oxfordien

La série n'est pas retrouvée complète sur l'ensemble du territoire (érosion crétacée). On la retrouve à l'extrême sud du territoire alsacien à une profondeur variant de 0 (à l'affleurement dans le Jura Alsacien) à 1580 m (sous couverture entre Mulhouse et Belfort). On retrouve ces calcaires localement dans le horst de Mulhouse à moins de 200 m de profondeur avec une épaisseur d'environ 120 m. La nappe des calcaires du Malm, malgré une très faible porosité, peut s'avérer intéressante dans la perspective d'une exploitation géothermique dans ces secteurs (Jura Alsacien et Horst de Mulhouse) en fonction de la fracturation.

Calcaires du Dogger du fossé rhénan - Grande Oolithe du Bajocien sup-Bathonien inf.

La Grande Oolithe du Dogger est le réservoir profond le mieux connu en plaine d'Alsace. L'entité aquifère n'est pas identifiée au nord d'Haguenau ; la Grande Oolithe (vers 1600 m de profondeur) devient marneuse et compacte, donc très peu perméable.

Au sud de Haguenau, la Grande Oolithe est perméable avec des caractéristiques optimales entre Strasbourg et Colmar. Plus au sud, ces caractéristiques deviennent aléatoires en fonction du rôle prépondérant de la fracturation. Du fait d'une profondeur très importante, comprises entre 500 m (domaine de bordure dans le secteur de Haguenau) et 1500 m et jusqu'à 2200 m (secteur de Strasbourg et au nord de Mulhouse), cette nappe n'est pas prise en considération dans l'atlas du potentiel géothermique TBE.

Calcaires du Muschelkalk supérieur jusqu'à Lettenkohle du fossé rhénan - Trias moyen

Les calcaires du Muschelkalk supérieur (calcaires à Entroques et calcaires à Cératites) forment avec les formations du Muschelkalk moyen (essentiellement argileuses en partie inférieure, marneuses et parfois salifères en partie moyenne, à intercalations calcaires et dolomitiques en partie supérieure) et avec les dolomies ou calcaires ou grès dolomitiques de la Lettenkohle, une nappe avec un potentiel très inégal en fonction de la fracturation et des variations latérales de faciès. Sa profondeur varie de 263 m (au nord de Haguenau) à environ 2500 m au nord de Mulhouse. Cette nappe n'est donc pas prise en considération dans l'atlas du potentiel géothermique TBE

Grès du Buntsandstein du fossé rhénan - Trias inférieur

Le Buntsandstein érodé au crétacé est néanmoins présent en profondeur sur l'ensemble du fossé rhénan. La formation gréseuse du Trias inférieur est perméable avec des caractéristiques variables en fonction de la fracturation. Les caractéristiques optimales sont observées au nord du fossé rhénan (homogénéité lithologique, profondeur, épaisseur, gradient géothermique). Sa profondeur très importante dépassant localement les 3000 m (secteur de Strasbourg-Cronenbourg) exclue cette nappe de l'atlas géothermique TBE.

4. Conception de l'Atlas du potentiel géothermique

4.1. METHODOLOGIE GENERALE ET PRINCIPALES ETAPES

Le principe général de l'atlas repose sur une méthode de cartographie des critères caractérisant le potentiel géothermique et une pondération de ces critères. L'élaboration de la carte de potentialité (dite « **carte multicritère** ») repose sur la combinaison pondérée des cartes des différents paramètres (dites « **cartes unicritères** ») caractérisant les différents aquifères ou la qualité du sous-sol.

La mise en œuvre de cette méthode permet la prise en compte relative de chaque critère influençant le potentiel général, avec comme difficulté le choix des critères, leur notation et le poids qu'on leur attribue.

L'atlas du potentiel géothermique est ainsi constitué des différentes cartes unicritères, multicritère et de la carte de synthèse générale ou **carte du potentiel géothermique Alsace** (potentialités par aquifère [géothermie sur nappe]).

La cartographie et la combinaison des cartes se font au moyen d'un logiciel de traitement cartographique (QGIS). Les données ponctuelles sont traitées par interpolation à l'échelle de chaque polygone correspondant au contour des nappes aquifères définies sur la base des entités hydrogéologiques BDLISA, puis intégrées dans une grille avec des mailles de 500 mètres de côté.

La cartographie du potentiel géothermique mise en œuvre sur le territoire alsacien repose sur quatre étapes principales, qui seront détaillées ensuite (Figure 12) :

- étape 1 – l'inventaire et le recueil de données ;
- étape 2 - les cartographies unicritères ;
- étape 3 - la cartographie multicritère par aquifère ;
- étape 4 - la cartographie du potentiel géothermique en Alsace.

Un atlas du potentiel géothermique se structure généralement autour des cartographies suivantes :

- les cartes des données de base : géologie, hydrogéologie, hydrogéochimie (paramètres physico-chimiques tels que pH, TH, TAC, température, conductivité, teneurs en fer ou en manganèse) ;
- la carte des débits potentiels : débits instantanés mesurés in-situ, débits exploitables calculés avec un rabattement imposé de la nappe. On estime généralement qu'un rabattement de 5 m est cohérent avec la notion de coût d'exploitation et de rentabilité des installations, mais cette valeur pourra être revue selon les conditions particulières du territoire alsacien ;
- la carte d'exploitabilité : établie à partir du croisement et de la pondération des 3 critères qui influencent l'exploitabilité d'une installation avec PAC eau-eau (profondeur d'accès à la nappe, productivité et température).

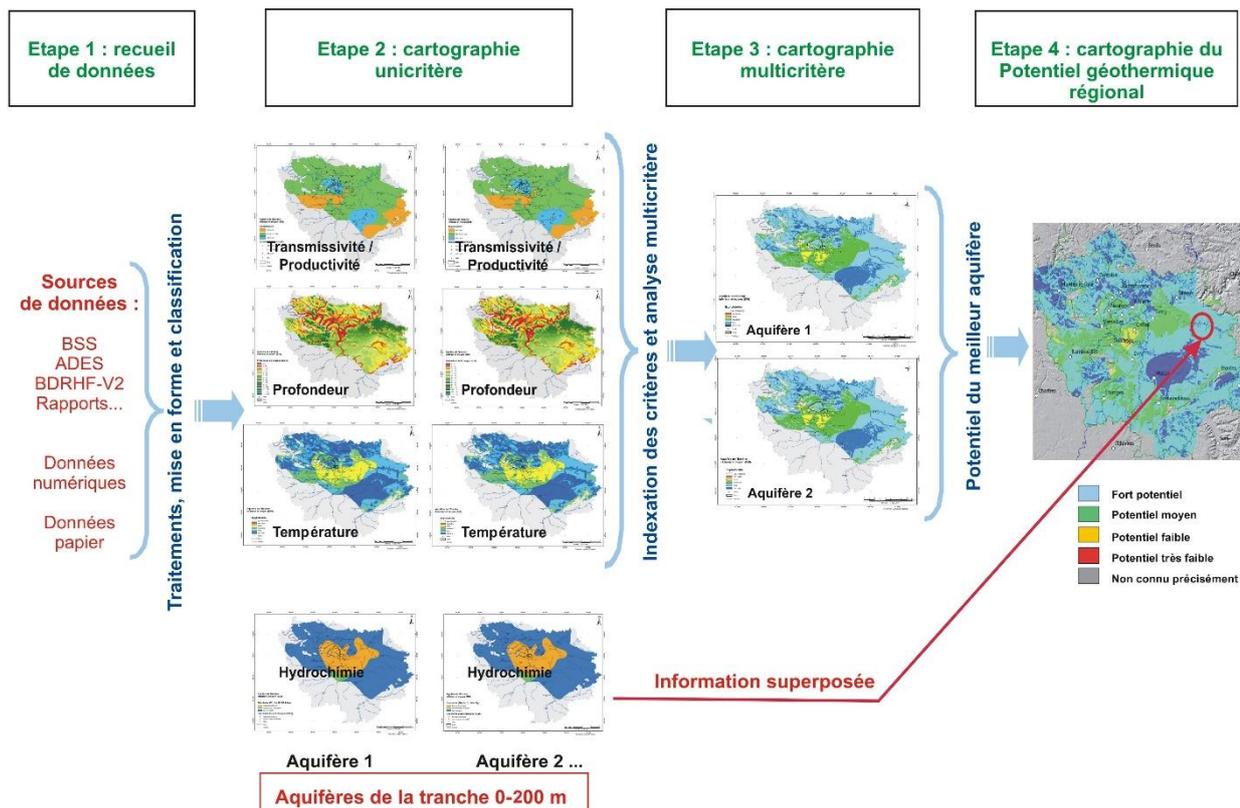


Figure 12 : Méthodologie pour l'élaboration des cartes du potentiel géothermique

4.2. ETAPE 1 : INVENTAIRE ET RECUEIL DES DONNEES

Cette étape comprend l'inventaire et le recueil de données relatives à chaque critère disponible au format numérique dans les différentes bases de données accessibles ou documentations papiers, ainsi que la numérisation, le géoréférencement et la bancarisation de ces informations.

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 qui ont été utilisées sont :

- BSS⁵ : la Banque de données du Sous-Sol qui apporte des données sur la géométrie et la nature des formations géologiques, sur la piézométrie, la température et la productivité des aquifères ;
- ADES⁶ : la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines apporte des informations sur la température et la qualité physico-chimique des eaux souterraines ainsi que sur les profondeurs de niveaux d'eau complémentaires à la BSS ;

⁵ Banque du sous-sol, accessible via <http://infoterre.brgm.fr>

⁶ Accès aux Données sur les Eaux Souterraines – <http://www.ades.eaufrance.fr>

- 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'ARS,
- la base de données de l'APRONA.

4.3. ETAPE 2 : CARTOGRAPHIES UNICRITERES

4.3.1. Introduction méthodologique

Le potentiel géothermique sur nappe est défini sur la base des 3 critères suivants :

- critère 1 : La profondeur d'accès à la nappe ou niveau piézométrique ;
- critère 2 : La productivité de l'aquifère ou débit potentiel ;
- critère 3 : La température de l'eau souterraine.

Chaque donnée collectée pour ces trois thématiques doit être analysée (analyse critique, identification des valeurs aberrantes, analyse statistique), spatialisée et classifiée avant de pouvoir établir la cartographie unicritère finale tenant compte de la classification et de l'indexation du critère étudié.

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 (Figure 13). 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.

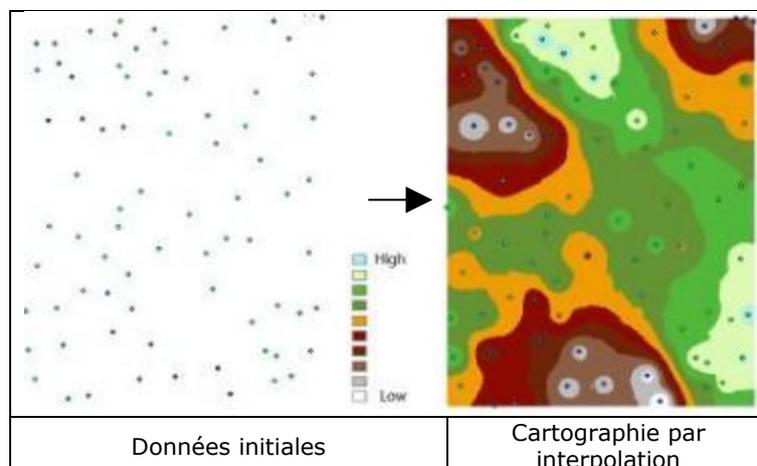


Figure 13 : Principe de spatialisation des données par géostatistique (source ArcGis Desktop)

Plusieurs approches existent et peuvent être appliquées en fonction de l'aquifère étudié, du critère considéré ou de la quantité de données disponibles, leur homogénéité et leur répartition géographique.

Interpolation spatiale

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation, dont 2 largement utilisées dans les outils cartographiques tels que ARCGIS ou QGIS (Figure 14), à savoir la **Pondération par Distance inverse (IDW)** et l'**Interpolation Triangulaire (TIN)**.

Dans la méthode d'interpolation IDW, les points d'échantillons sont pondérés durant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre décline avec la distance du point inconnu à créer. Désavantage de la méthode : la qualité du résultat d'interpolation peut diminuer si la distribution des points de données échantillon est irrégulière. De plus, les valeurs maximales et minimales dans la surface interpolée peuvent seulement se produire aux points de données échantillon. Il en résulte souvent des petits pics et creux autour des points de données échantillon.

La méthode d'interpolation TIN (ou Triangulation de Delaunay) tente de créer une surface de triangles formés par des points voisins les plus proches. Pour faire ceci, les cercles circonscrits autour des points d'échantillon sélectionnés sont créés et leurs intersections sont connectées à un réseau de triangles non-superposés et aussi compacts que possible. Désavantages de la méthode : les surfaces ne sont pas lisses et peuvent donner une apparence déchiquetée. Ceci est dû à des pentes discontinues aux coins des triangles et des points de données échantillon. De plus, la triangulation ne convient généralement pas pour l'extrapolation au-delà de la zone avec des points de données échantillon récoltés.

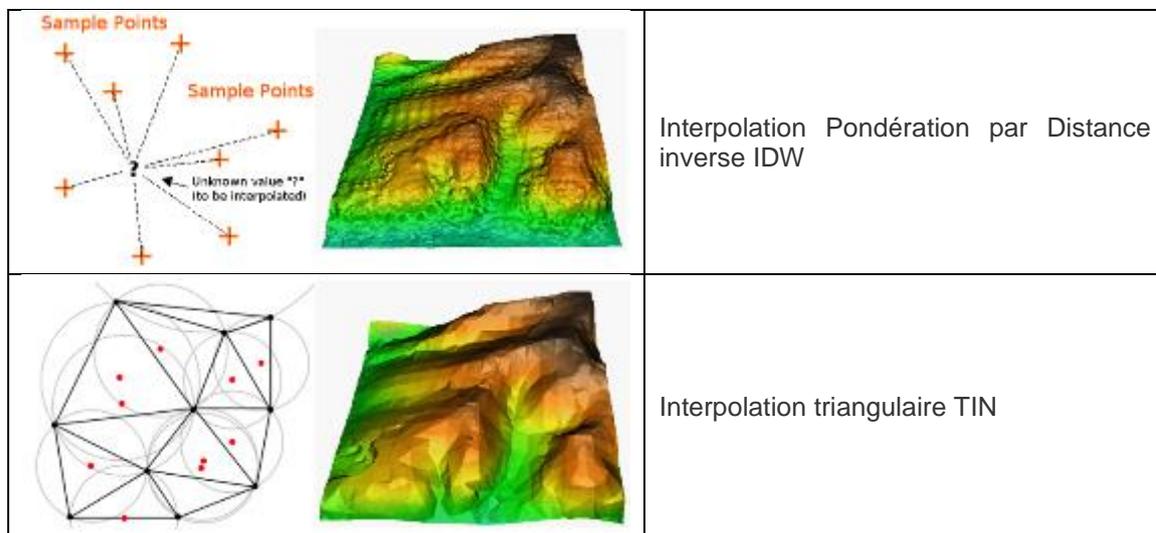


Figure 14 : Illustration des méthodes d'interpolation IDW et TIN définies dans le logiciel QGIS (<https://docs.qgis.org/>)

Approche statistique

Dans les cas où une interpolation mathématique n'est pas envisageable par manque de données, une analyse statistique est réalisée. Lorsque les données disponibles ne présentent pas une variabilité trop grande, la valeur moyenne est attribuée au critère, pour l'ensemble de la zone considérée.

Approche « naturaliste » ou à dire d'expert

Cette méthode consiste à confronter les données ponctuelles aux informations cartographiques (cartes géologiques, modèle numérique de terrain, cartes piézométriques...). Cette technique peut être localement 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 donnés présente une forte variabilité selon la position géographique, une sectorisation de l'aquifère ou de la formation géologique peut être réalisée, à l'aide des contours (hydro)géologiques ou des cartes géologiques par exemple. Une interpolation mathématique ou une approche statistique peut ensuite s'appliquer pour chacun des secteurs définis au sein de l'aquifère.

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 à la géothermie très basse énergie (Figure 15).

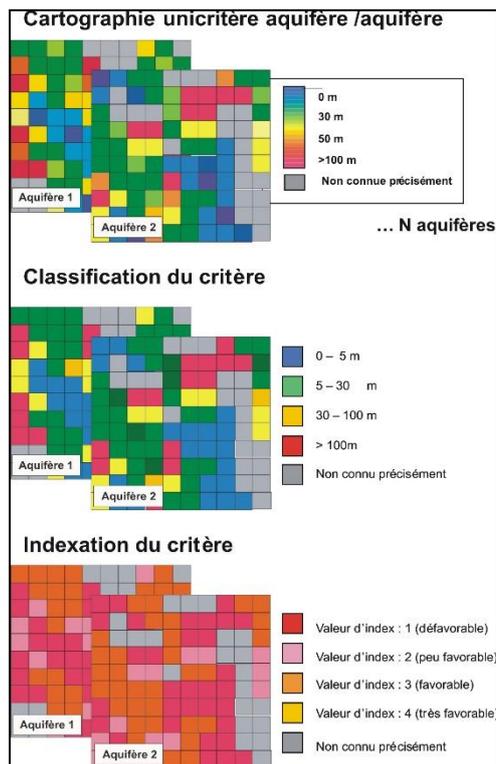


Figure 15 : Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)

4.3.2. Critère 1 : Profondeur d'accès à la nappe

Définition et source des données

La **profondeur d'accès à la ressource** dans le cas d'un aquifère libre correspond à la **profondeur du niveau d'eau** ou piézométrie de la nappe. Dans le cas d'un aquifère captif, elle correspond à la **profondeur du toit de l'aquifère** considéré (Figure 16).

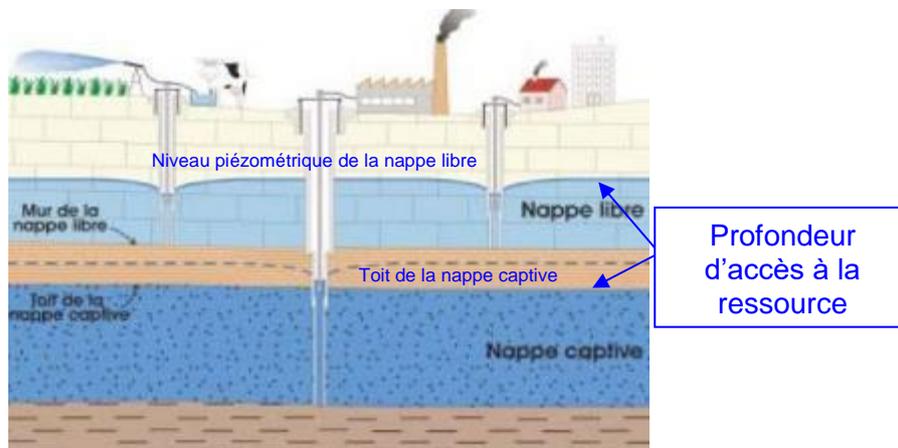


Figure 16 : Schéma explicitant la notion de profondeur d'accès à la ressource (source BRGM)

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).

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

- les mesures ponctuelles en forage issues de la [BSS](#) ou de la bibliographie existante ;
- les chroniques disponibles dans la base [BSSSES](#) (non rattachée à un réseau), ayant vocation à terme à basculer dans ADES ;
- les chroniques piézométriques présentes dans la Banque [ADES](#) (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) et provenant de différents producteurs notamment BRGM et APRONA (réseaux de suivi en Alsace) ;
- les cartes piézométriques dressées par l'APRONA sur la nappe alluviale rhénane en 2009 [moyennes eaux] (cf. [SIGES Aquifère rhénan](#)) ;
- les cartes piézométriques dressées par le BRGM sur la nappe des grès du Trias inférieur en 1993⁷ et 2010⁸ (cf. [SIGES Rhin-Meuse](#)).

Données de la BSS ou de la bibliographie

Les données issues de la BSS sont des données ponctuelles de niveau d'eau mesurées généralement en fin de campagne de forage ou lors de campagnes de mesure exceptionnelle. A ce jour on dispose de 9670 points avec une mesure de niveau d'eau sur la période 1879-2020.

Données BSSSES

La BSSSES est l'ancienne base de données du BRGM spécifique aux eaux souterraines, pour partie intégrée à la BSS et consultable sur [InfoTerre](#). La base de données intègre certaines mesures de niveau d'eau déjà présentes en BSS ou dans ADES ; il y a donc nécessité à supprimer les doublons. Par contre, certaines données n'ont pas été intégrées dans la base ADES. Il s'agit généralement de points d'eau suivis sur une courte période et qui ne sont pas rattachés à un réseau en particulier. L'extraction faite le 06/10/2020 intègre 633389 mesures exploitables sur 2717 points d'eau. On compte entre 1 et 2295 mesures par point d'eau sur la période 1928-2001.

Données ADES

L'extraction ADES réalisée début janvier 2021 sur les piézomètres suivis en Alsace, comporte 1 315 253 mesures entre 1908 (pour la mesure la plus ancienne) et 2021 (pour la donnée la plus récente). Les mesures exploitables portent sur 2961 points d'eau, disposant de 1 à 12207 mesures chacun.

⁷ Il s'agit de la piézométrie en 2010 à l'échelle 1/250 000 issue du rapport carte piézométrique de la nappe des grès du Trias inférieur en 2010 (Nguyen-Thé D., Ollagnier S., Pétrignet M., rapport BRGM/RP-59294-FR).

⁸ Il s'agit de la piézométrie moyenne de 1990 à 1993 issue de la synthèse cartographique à l'échelle 1/250 000 des réservoirs aquifères du bassin Rhin-Meuse (Le Nindre Y.M., rapport BRGM/RR-38618-FR).

Le graphique suivant (Figure 17) donne la répartition des mesures de niveau d'eau collectées en fonction de l'origine des données. Il s'agit majoritairement de données issues de la base ADES (67%), ce qui est logique si l'on considère que cette base a pour vocation la bancarisation de données journalières pour des piézomètres faisant l'objet d'un suivi sur le long terme. Rapporté au nombre de points d'eau concernés par ces mesures, c'est la BSS (63%) qui apporte la plus forte contribution (1 point d'eau ⇔ une mesure de niveau d'eau).

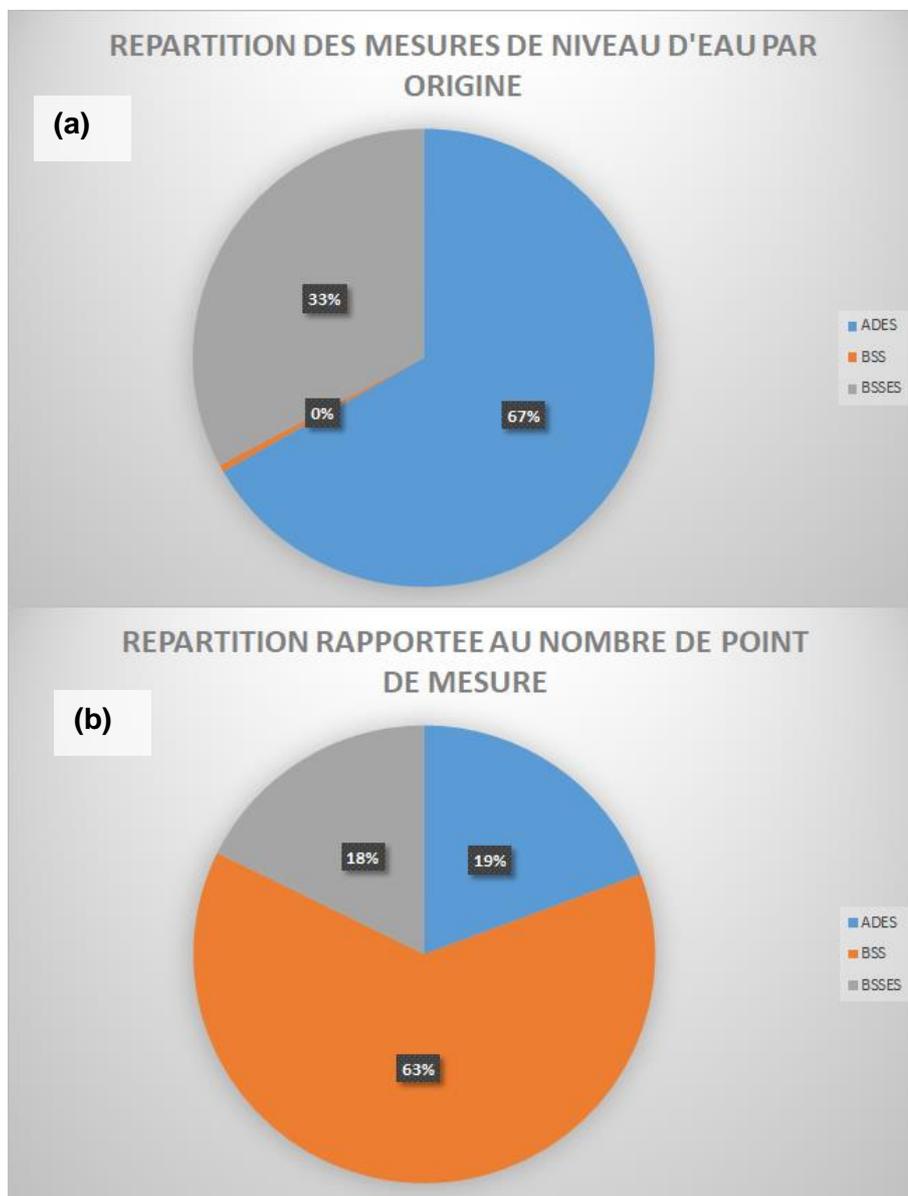


Figure 17 : Graphique de répartition (a) des mesures collectées par origine et (b) du nombre de points de mesure associés

Analyse des données exploitables

Bilan par commune

La répartition des données de niveau d'eau bancarisées s'est avérée inégale à l'échelle du territoire alsacien, et a nécessité des compléments d'information (bibliographie complémentaire) notamment au nord-ouest du département bas-rhinois.

Suite à la compilation de nouvelles données, il reste encore 206 communes qui ne disposent d'aucune mesure de niveau d'eau (Figure 18). Précisons qu'une grande majorité des communes sans mesure de niveau d'eau sont situées hors du domaine aquifère (formations imperméables à semi perméables), pouvant ainsi expliquer la rareté des points d'eau et des mesures associées (Figure 19).

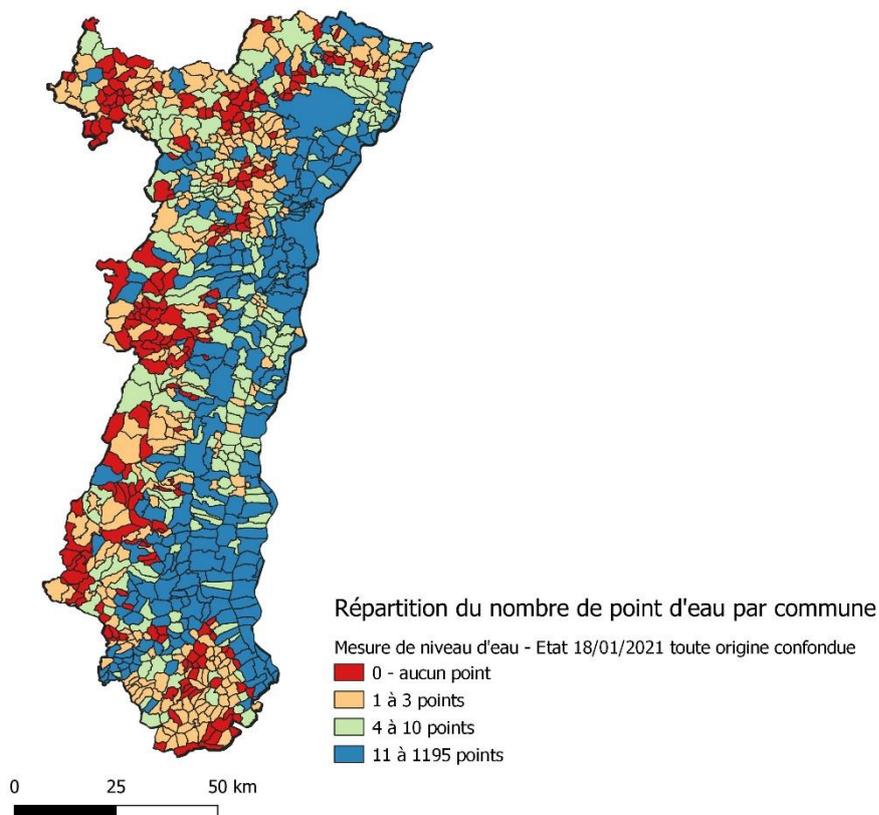


Figure 18 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesures des niveaux d'eau par commune du territoire alsacien

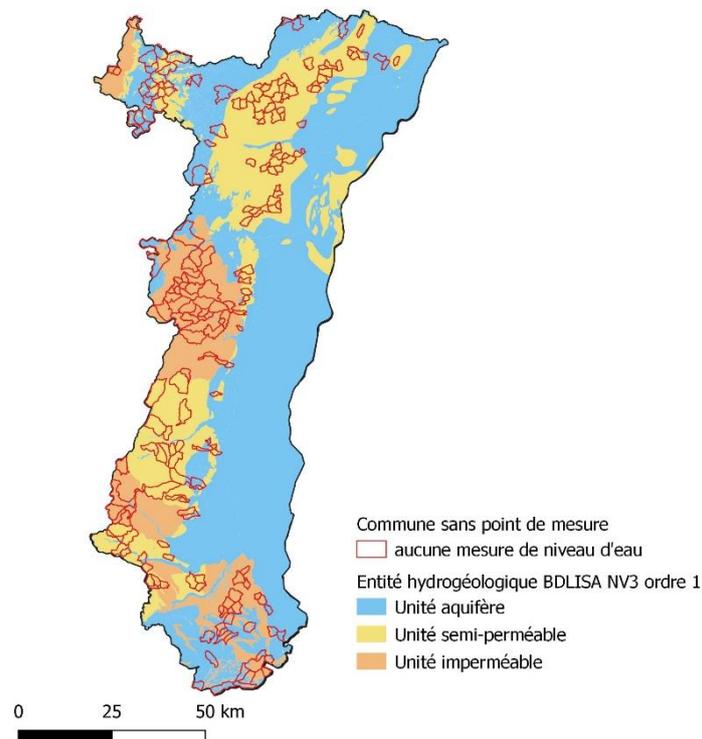


Figure 19 : Carte des communes identifiées comme étant « sans mesure de niveau d'eau » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes)

Répartition des données exploitables par nappe ou aquifère

L'analyse statistique des données de profondeur du niveau d'eau a été précédée d'un traitement des données brutes afin d'éliminer les analyses clairement aberrantes et de ne conserver que les mesures exploitables ; ainsi les données relatives aux eaux superficielles et aux plans d'eau ont été écartées.

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 mesure N ont été calculés pour chaque point d'eau considérée.

Les 10431 points d'eau disposant de mesures exploitables sont rattachés à une entité BDLISA et une nappe telle que définis au chapitre 3.4. On constate que la grande majorité des points de mesures (81%) concerne les formations de la nappe d'Alsace et du Pliocène (Figure 20).

Pour la plupart des nappes, les mesures de niveau d'eau sont dans la tranche 0-10 m (Figure 21 et Figure 22), à l'exception des formations du Trias (> 10 m), et présentent généralement une distribution de type normal, laissant supposer l'existence d'une structure spatiale (Figure 23).

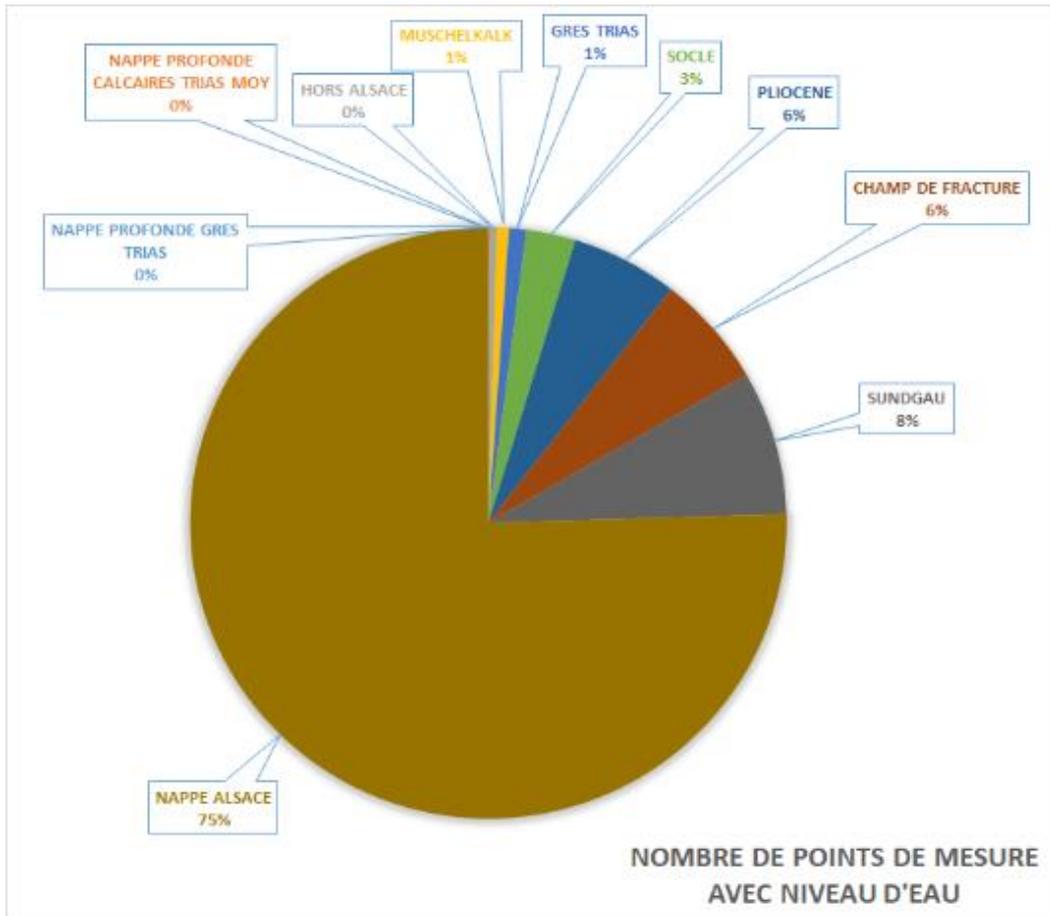


Figure 20 : Graphique de répartition des ouvrages avec des mesures exploitables de niveau d'eau par nappe

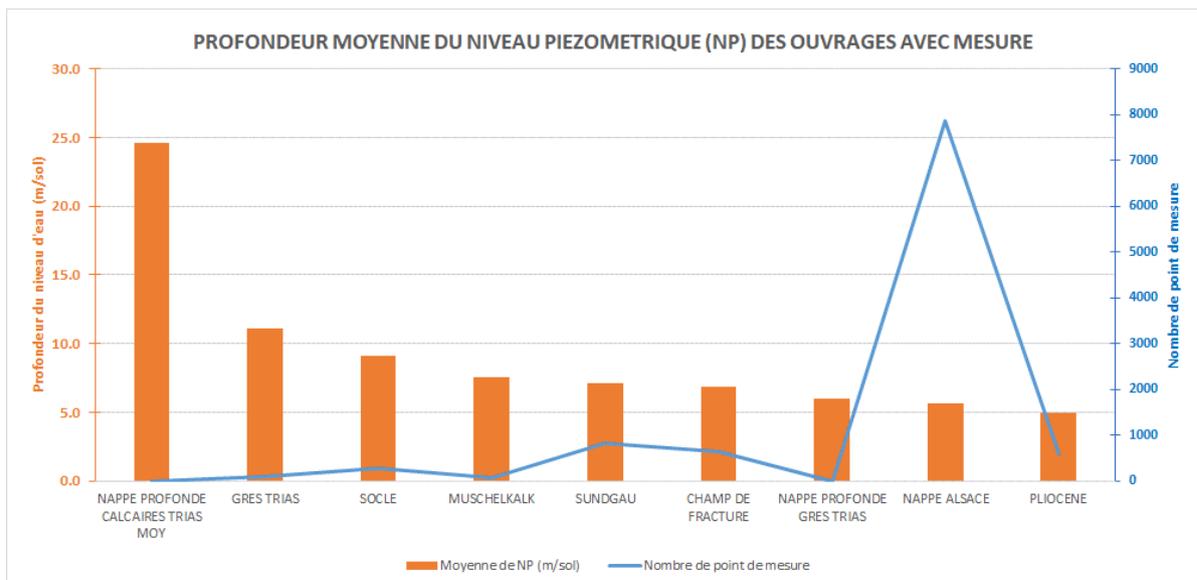


Figure 21 : Histogramme des mesures moyennes de niveau d'eau par nappe

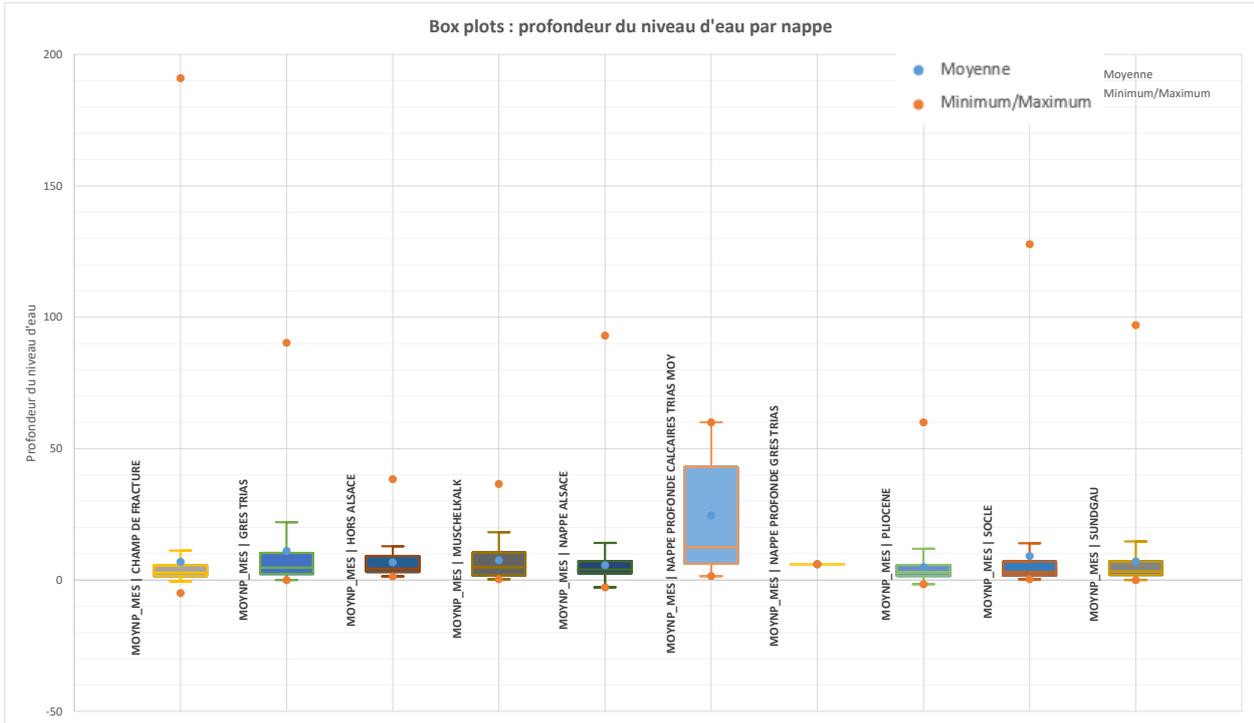


Figure 22 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les niveaux d'eau par nappe

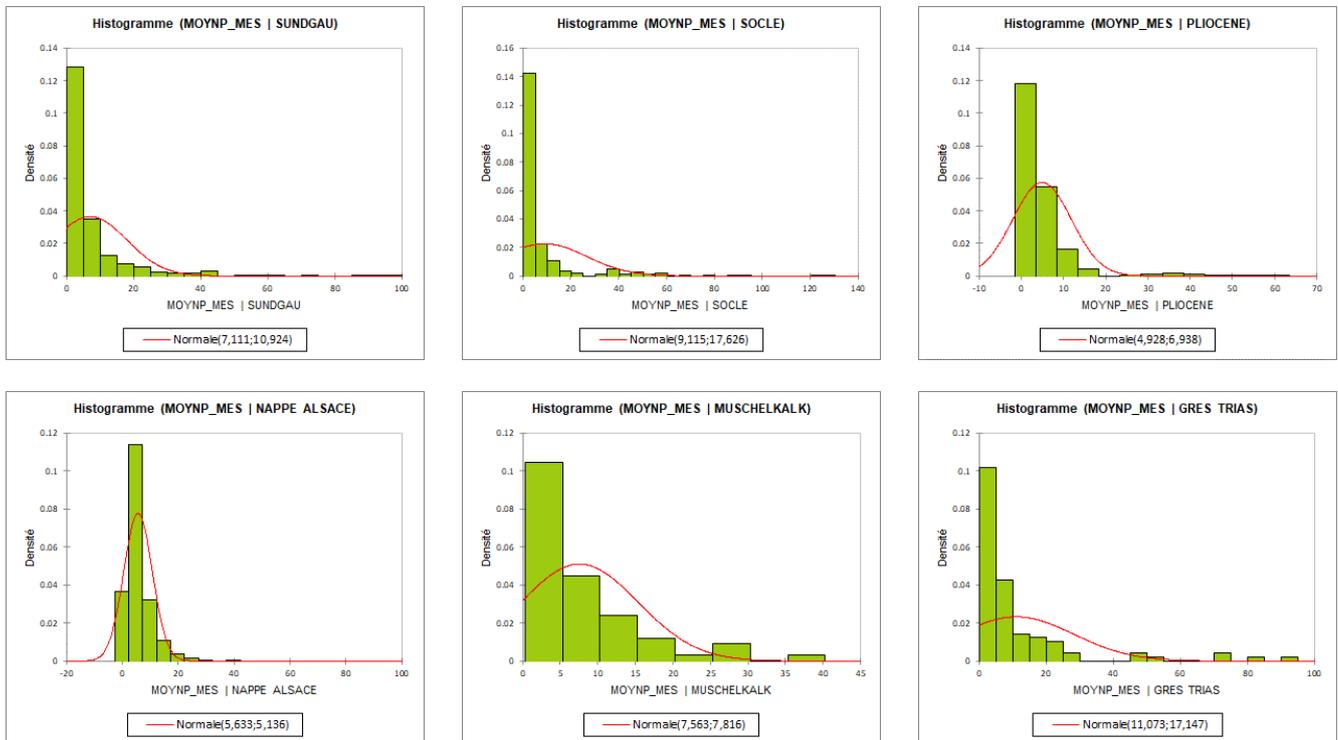


Figure 23 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les niveaux d'eau par nappe

La répartition géographique des points de mesure à l'échelle des différentes nappes considérées est assez homogène avec une forte concentration des points en plaine d'Alsace (Figure 24).

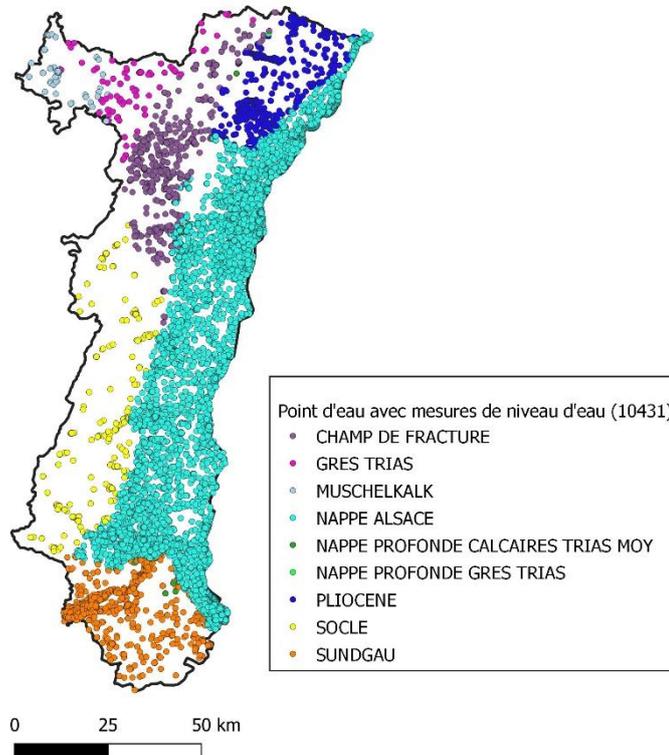


Figure 24 : Carte de répartition des données ponctuelles pour le critère « profondeur d'accès à la nappe »

Répartition spatiale des données exploitables par classe de valeur

La Figure 25 présente la répartition des valeurs moyennes de niveau d'eau (piézométrie ponctuelle) calculées pour les 10431 points d'eau (forages ou puits) disposant de valeurs exploitables selon les 4 classes recommandées dans la méthodologie nationale. Les points d'eau sont implantés majoritairement en plaine d'Alsace et le long des axes des principales vallées. La majorité des points d'eau ont un niveau d'eau moyen inférieur à 5 m (63 %) voire à 15 m (94 %).

Pour rappel, une nappe accessible à une profondeur de moins de 5 mètres 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.

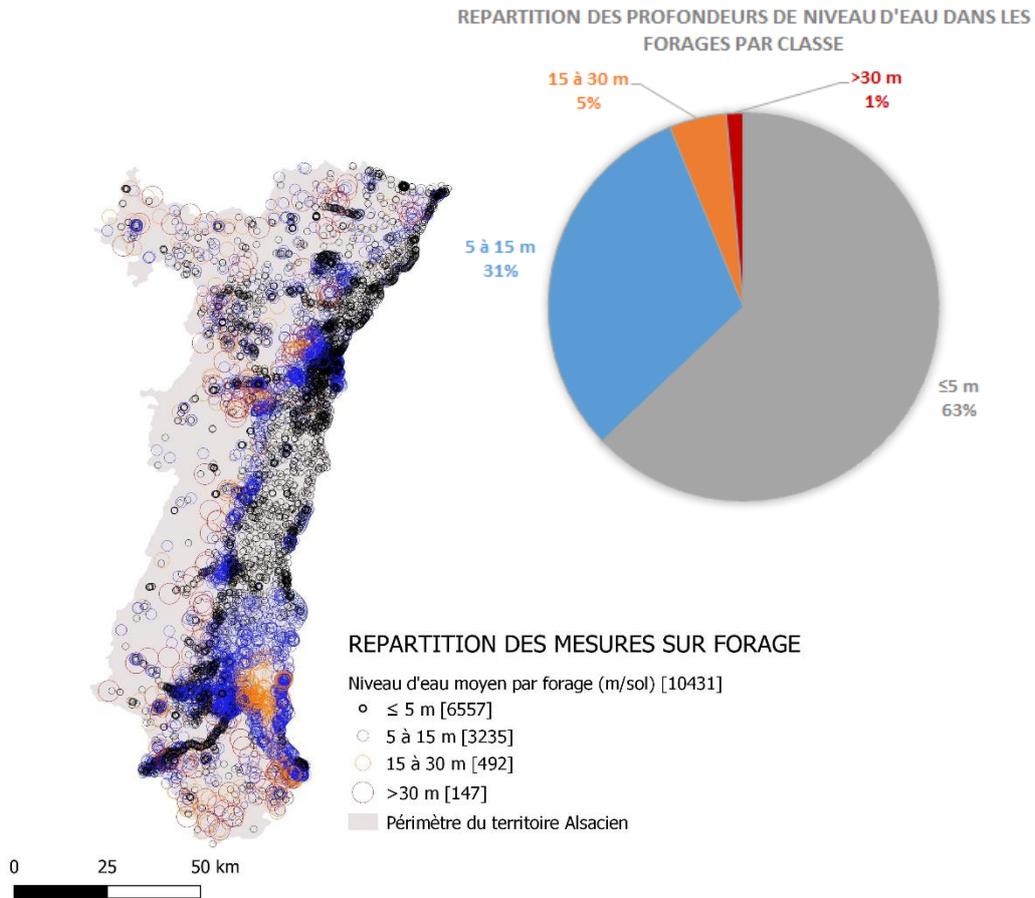


Figure 25 : Carte de répartition des niveaux d'eau moyens (mesures ponctuelles sur forage) par classe de valeur

Classification retenue

En fonction des données disponibles à l'échelle de l'étude et en cohérence avec la méthodologie nationale, la classification retenue pour le critère « profondeur d'accès à la nappe » est la suivante :

Classe de la profondeur d'accès à la ressource		Commentaires
1	0 m < Profondeur ≤ 5 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>
2	5 m < Profondeur ≤ 15 m	Forage de moindre coût permettant la réalisation économique d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon
3	15 m < Profondeur ≤ 30 m	le coût du forage pèse fortement sur l'économie d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon
4	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)
5	Profondeur > 200 m	Hors périmètre de l'étude

Tableau 2 : Classes de profondeur d'accès à la nappe prises en compte

Spatialisation des données

On dispose pour la spatialisation d'une part des données ponctuelles pour chacune des 7 nappes considérées et d'autre part des cartes piézométriques pour les grès du Trias et la nappe d'Alsace.

A partir des cartes piézométriques des grès du Trias (1993 et 2010)

L'interpolation a été menée avec l'outil « topo vers raster » d'ARCGIS à partir des valeurs de cotes piézométriques, isopièzes de 1993 et 2010 (Figure 26 et Figure 27). L'emprise des cartes piézométriques dépasse largement l'emprise de l'Alsace bossue et concerne également le territoire lorrain ; les résultats de l'interpolation peuvent ainsi être considérés comme plus fiables.

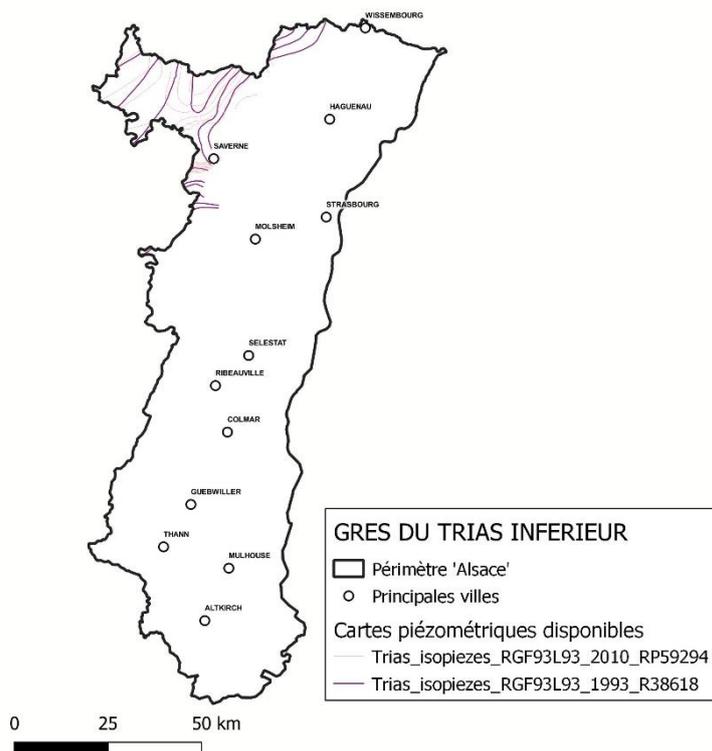


Figure 26 : Extrait des cartes piézométriques disponibles sur les grès du Trias – secteur Alsace bossue (sources : BRGM, 1995 & 2010)

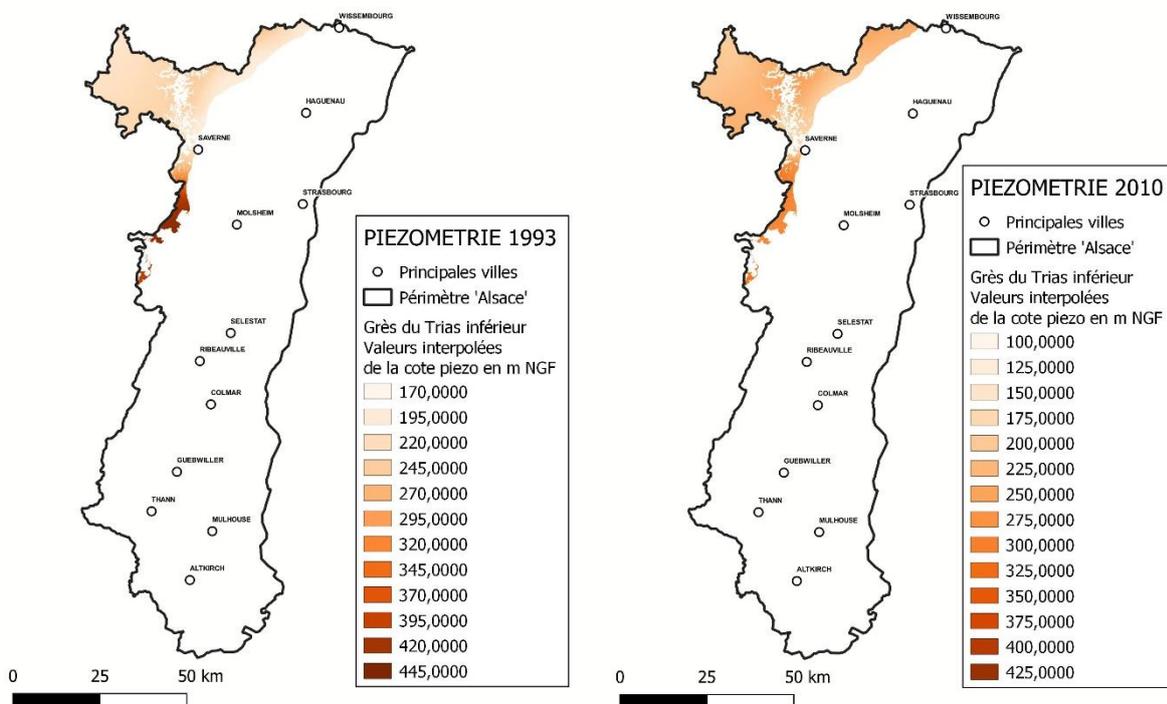


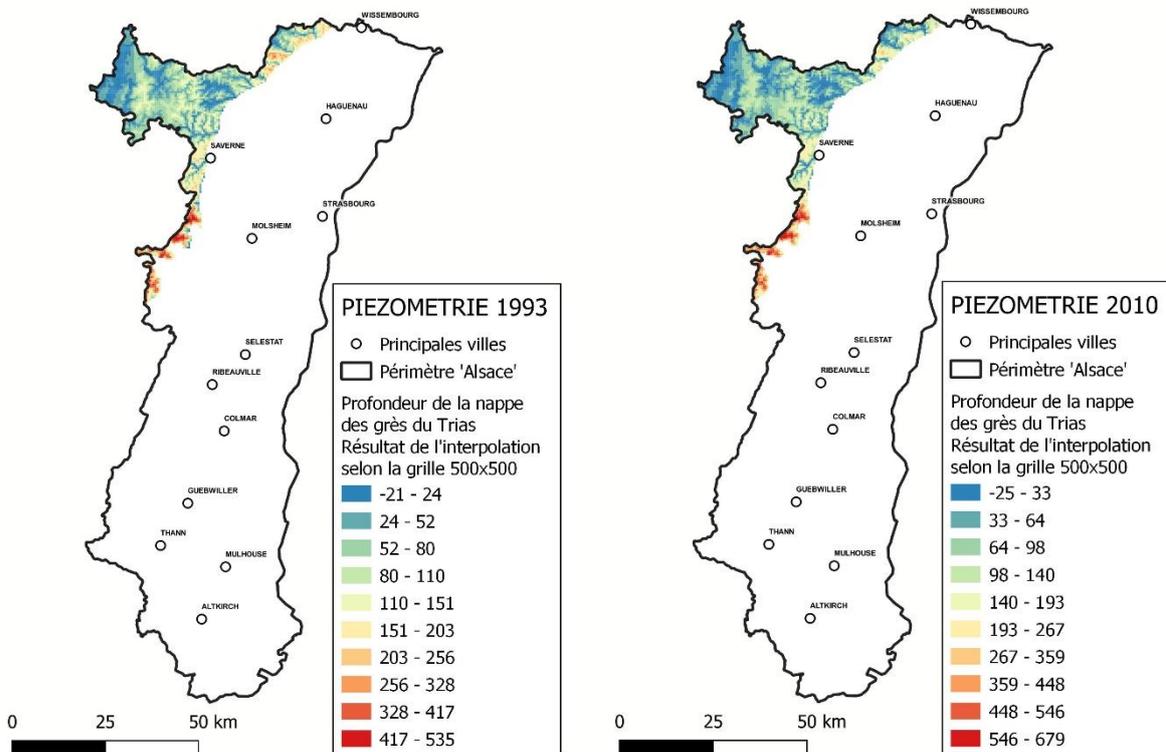
Figure 27 : Spatialisation des cotes piézométriques de la nappe des grès du Trias en m NGF – secteur Alsace bossue

Le calcul des profondeurs par rapport au sol s'est effectué par soustraction des cotes moyennes (1993-2010) à la cote du sol et rapporté à la moyenne sur la maille 500 x 500 correspondante (Figure 28).

On dispose également sur ce secteur des cotes du mur des formations du Muschelkalk considéré comme étant le toit des grès du Trias, ce qui permet de définir l'état libre ou captif de la nappe (Figure 28).

La cartographie finale du critère « profondeur d'accès à la nappe » pour les grès du Trias Inférieur (annexe 2) tient compte de l'état de nappe :

- sur la partie libre de la nappe (cote piézométrique < cote du toit), la profondeur d'accès à la nappe est prise comme étant la profondeur moyenne de la nappe ;
- sur la partie captive de la nappe (cote piézométrique > cote du toit), la profondeur d'accès à la nappe est prise comme étant la profondeur du toit.



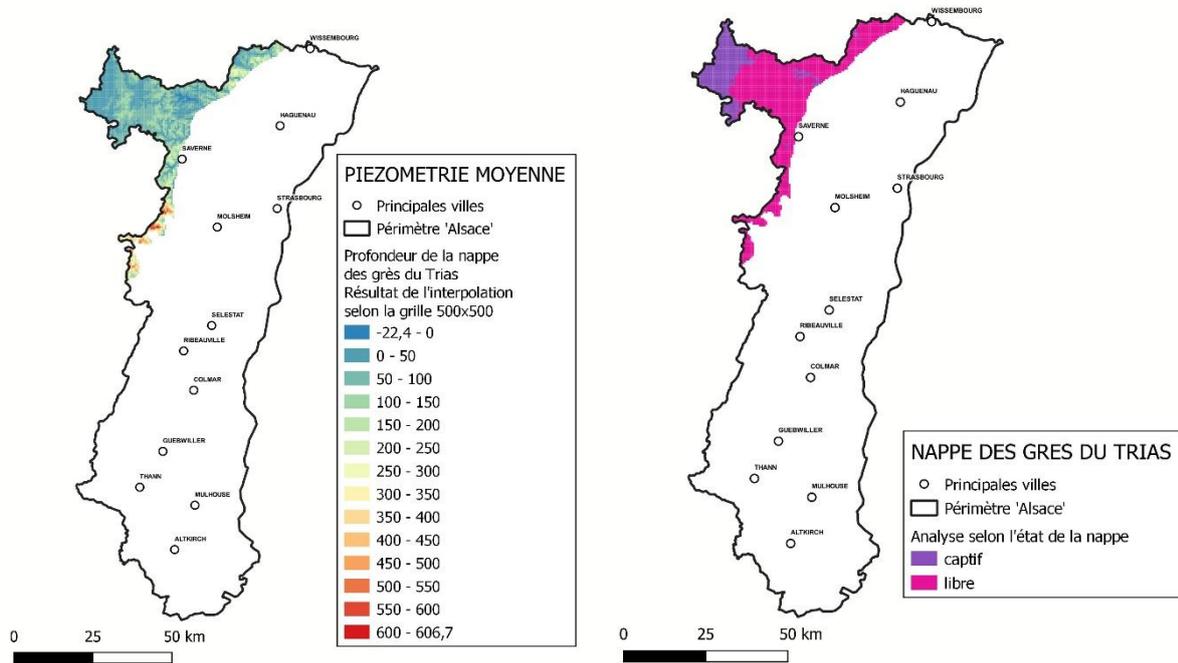


Figure 28 : Spatialisation des profondeurs de niveau d'eau en mètre par rapport au sol de la nappe des grès du Trias – secteur Alsace bossue

A partir de la carte piézométrique des alluvions de la nappe d'Alsace (2009)

L'interpolation a été menée avec l'outil « topo vers raster » d'ARCGIS à partir des valeurs de cotes piézométriques en moyennes eaux (situation intermédiaire entre basses eaux et hautes eaux), isopièzes de 2009 dressée par l'APRONA (Figure 29).

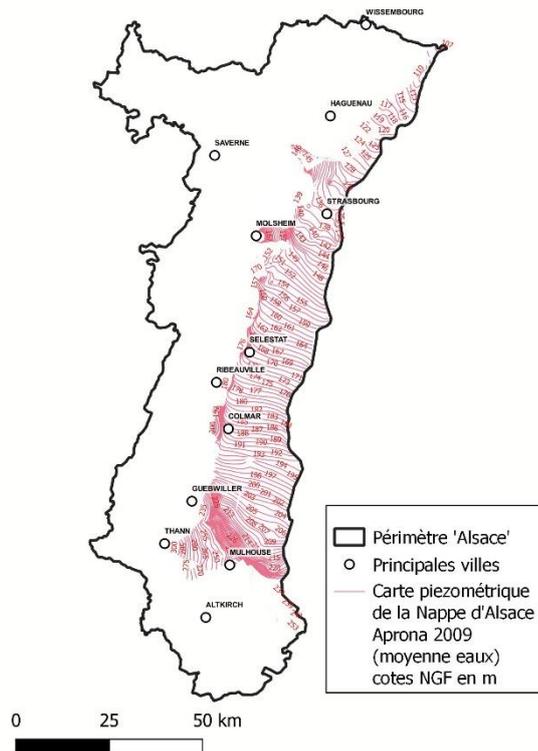


Figure 29 : Carte piézométrique en moyennes eaux de la nappe d'Alsace (source APRONA, 2009)

Le calcul des profondeurs par rapport au sol s'est effectué par soustraction de la cote piézométrique en moyennes eaux (2009) à la cote du sol et rapporté à la moyenne sur la maille 500 x 500 correspondante (Figure 30).

La nappe d'Alsace peut localement être captive avec des niveaux piézométriques localement supérieurs à la surface du sol. La nappe étant néanmoins en grande partie « libre », cette hypothèse a été généralisée et la profondeur d'accès à la nappe retenue correspond systématiquement à la profondeur du niveau d'eau moyen sur chaque maille 500 x 500.

On constate que le rendu des valeurs interpolées présente quelques anomalies sur les limites de l'emprise de la carte piézométrique (Figure 30). Des modifications seront apportées à la cartographie unicritère à partir des résultats de l'analyse statistique et de l'interpolation des mesures ponctuelles mais également à dire d'expert.

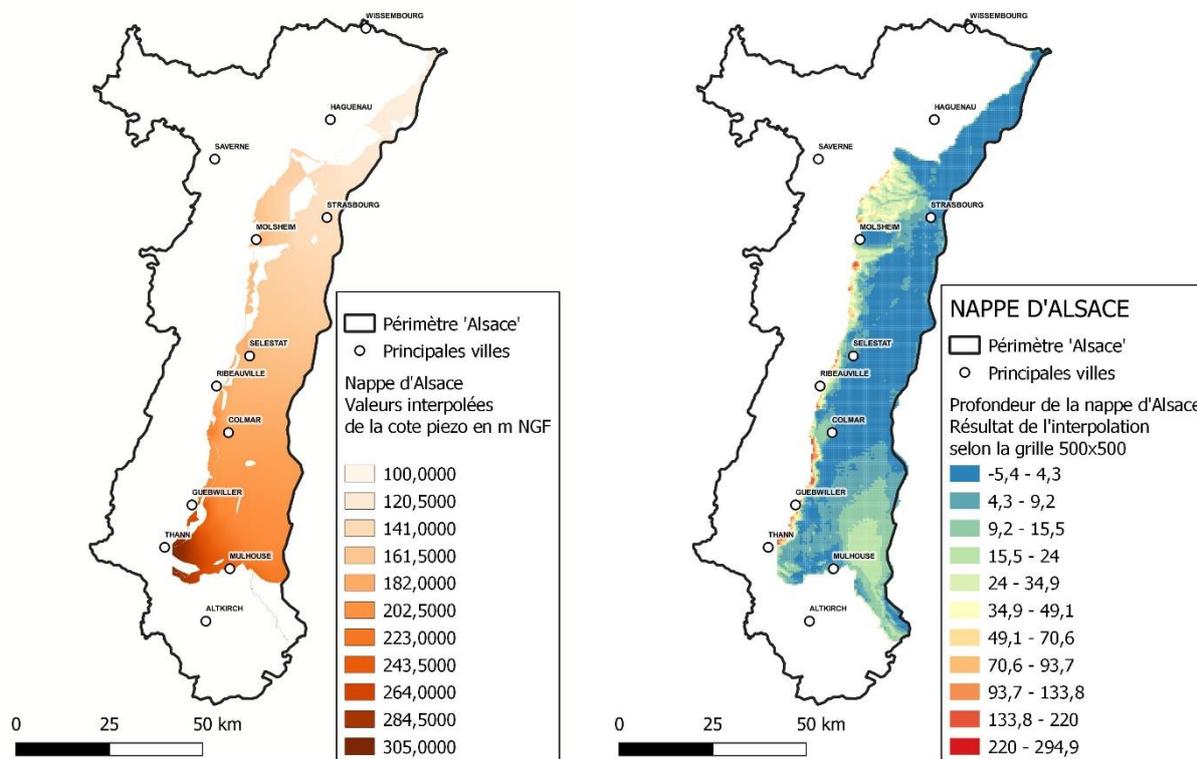


Figure 30 : Spatialisation des cotes piézométriques de la nappe d'Alsace en m NGF et des profondeurs de niveau d'eau en mètres par rapport au sol de la nappe d'Alsace

A partir des données ponctuelles

Pour chaque nappe considérée, l'interpolation a été menée avec l'outil IDW de GRASS QGIS à partir des mesures ponctuelles collectées : profondeur de la nappe par rapport au sol à date variable. Comme précédemment, on a affecté à la maille 500 x 500 la moyenne des valeurs interpolées.

Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur

Comme précédemment expliqué, la cartographie unicritère pour la « profondeur d'accès à la nappe » tient compte de l'interpolation des isopièzes si disponibles (Grès du Trias inférieur et nappe d'Alsace), de l'analyse statistique et de l'interpolation des mesures ponctuelles mais également de l'approche naturaliste (modification à la marge à dire d'expert).

Chaque valeur moyenne de profondeur d'accès à la nappe a été associée à une classe entre 1 et 5 (Tableau 2), afin de dresser les cartographies du critère « profondeur d'accès à la nappe » spatialisé par classes de valeur (1 carte pour chaque nappe considérée - annexe 2).

La Figure 31 présente l'agrégation des 7 cartographies à l'échelle du territoire alsacien. Pour rappel, l'Alsace bossue se caractérise par la superposition du Muschelkalk (à l'affleurement) et des grès du Trias inférieur (pour partie sous-recouvrement) ; il conviendra dans la cartographie finale de sélectionner sur ce secteur particulier le potentiel du meilleur aquifère.

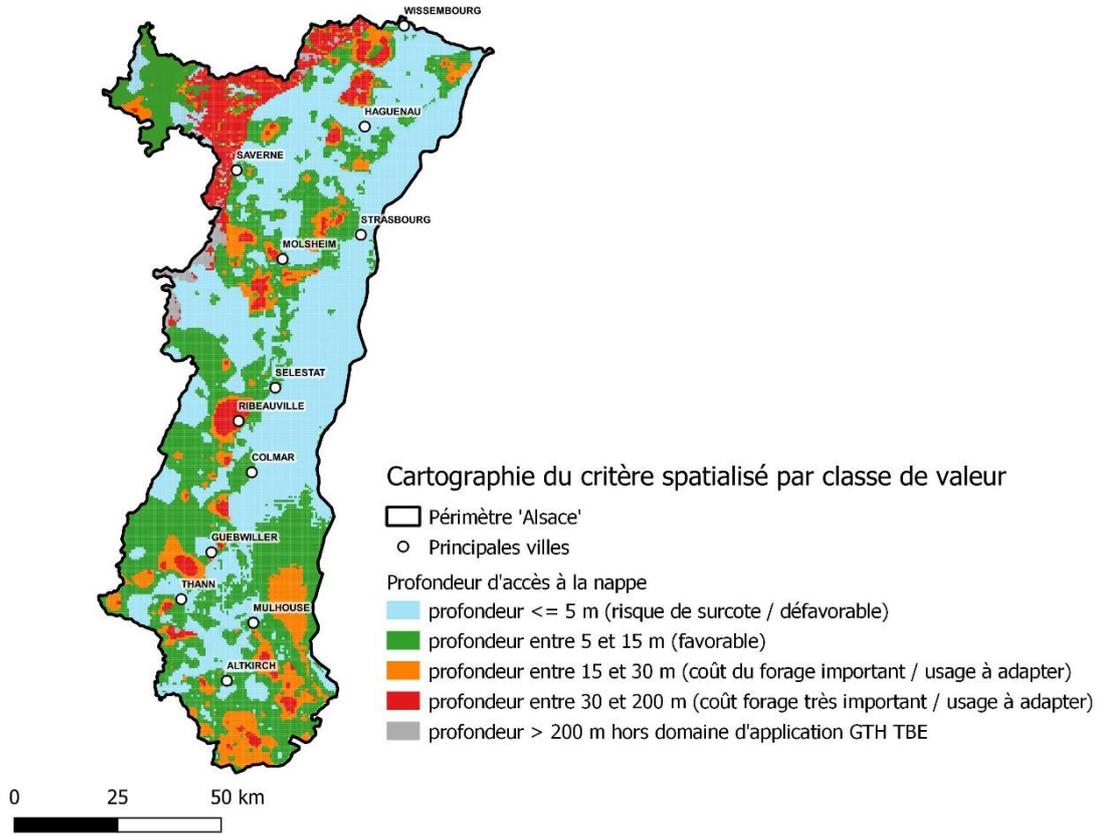


Figure 31 : Carte du critère « profondeur d'accès à la nappe » spatialisé par classe de valeur

4.3.3. Critère 2 : Productivité des aquifères

Définition et source des données

La **productivité d'un aquifère** correspond à l'évaluation de la ressource en eau extractible du réservoir aquifère et est évaluée à partir des valeurs de productivité des captages qui l'exploitent. On distingue deux types de captages d'eau souterraine : les sources et les forages (ou puits).

Source = lieu et phénomène d'apparition et d'écoulement naturel d'eau souterraine à la surface du sol, assez bien individualisés et à l'origine en général d'un cours d'eau de surface [Castany, Margat, 1977].

Forage/puits = Trou artificiel résultant des travaux de creusement du sous-sol jusqu'à une profondeur définie et équipé (tubages pleins et crépinés) afin de capter l'eau des réservoirs souterrains traversés. L'eau est ensuite extraite par pompage sauf dans le cas d'un ouvrage artésien (eau jaillissant au dessus du niveau du sol de façon naturelle sans effet de pompage).

La **productivité d'un captage de type forage** est le débit (potentiel) maximal qui peut être pompé après effacement de l'effet de capacité, dans des conditions définies et en régime d'exploitation normal, en fonction des contraintes physiques du milieu (caractéristiques locales de l'aquifère et du captage). La productivité du forage est liée notamment au choix d'un rabattement admissible (critères techniques et économiques) et se réfère à l'état initial (de l'ouvrage et de la nappe) [Castany et Margat, 1977]. On parle également de **débit exploitable maximal**, de **débit utile** ou de **débit potentiel instantané**, à distinguer du **débit de production ou d'exploitation** qui est la quantité d'eau produite par un captage pendant l'exploitation sur une durée déterminée.

L'aptitude de l'aquifère et/ou de l'ouvrage à être exploité (et donc la productivité) sont caractérisés par l'estimation de paramètres hydrodynamiques tels que la **transmissivité**, la **perméabilité**, le **coefficient d'emménagement**, la **porosité efficace** ou le **débit spécifique**.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la cartographie du potentiel géothermique, on s'intéressera principalement à la **notion de débit**, avec (en fonction des données disponibles localement) :

- le **débit spécifique** (calculé et noté Q_s) qui 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 ;
- le **débit exploitable maximal** (calculé) qui correspond au débit maximum que l'on peut pomper, en admettant pour les nappes libres un rabattement raisonnable de la nappe fixé au 1/3 de son épaisseur. Les débits exploitables garantissent la ressource à long terme dans la mesure où le 2/3 de l'épaisseur de la nappe est préservé. Pour les aquifères captifs, le critère de rabattement sera celui de ne pas atteindre le toit de l'aquifère ;

- le **débit instantané** (mesuré in-situ) qui correspond au débit relevé par le foreur après la réalisation de l'ouvrage. Ce débit correspond au débit fixé par l'installation (demande client) et non au débit que peut fournir réellement la nappe. Le débit instantané peut ainsi être inférieur au débit maximum que peut fournir la nappe ou supérieur (rabattement important du niveau de la nappe, avec comme risque à court et moyen terme, l'appauvrissement de la ressource) ;
- le **débit de production ou d'exploitation** (mesuré), qui correspond à la valeur à laquelle le pompage de l'ouvrage est réalisé en condition d'exploitation. Cette valeur, surtout représentative des propriétés techniques du captage et des besoins associés aux usages de la ressource, est à considérer avec prudence, en fonction de la représentativité de l'essai de pompage et de l'homogénéité des terrains. Le débit de production est peu représentatif de la capacité de production de la ressource proprement dite mais présente un nombre de données important notamment grâce aux ouvrages destinés à l'alimentation en Eau Potable (AEP) et suivis par l'Agence Régionale de Santé (ARS).

Parmi les sources de données accessibles dans le cadre de l'étude on compte donc :

- les données issues de la BSS, autres banques associées ou de la bibliographie existante :
 - débit de source ;
 - ils sont obtenus par jaugeage ou mesurés avec un débitmètre ;
 - débit instantané mesuré sur forage ;
 - cette valeur est généralement estimée ou mesurée au moment de la foration (dossier foreur) ou ponctuellement lors de l'exploitation ;
 - débit exploitable maximal calculé sur forage ;
 - le débit maximal exploitable est calculé sur la base des résultats d'essai de pompage ;
 - le débit exploitable peut également être calculé à partir du débit spécifique et de l'épaisseur mouillée de l'aquifère (différence entre la profondeur de la base de l'aquifère et la profondeur du niveau piézométrique observé au droit de l'ouvrage). Cette méthode, utilisée dans l'atlas du potentiel géothermique en Champagne-Ardenne, nécessite l'étude des coupes lithologiques des forages ;
- les débits pour les captages destinés à l'AEP et bancarisés par l'ARS (base SISEAUX) :
 - les débits de production sont établis au regard des besoins d'une commune ou d'un ensemble de population ;
 - ces débits sont dépendants de l'hydrodynamisme de la nappe mais également des caractéristiques techniques des forages et des puits (diamètre, épaisseur d'eau...) ;
 - ils permettent néanmoins d'approcher la capacité de production de la nappe ;
 - le débit réglementaire est utilisé pour programmer le contrôle sanitaire. Il ne correspond pas nécessairement au débit de prélèvement maximum autorisé par arrêté, mais il donne une bonne approximation du débit prélevé à chaque captage ;
 - les valeurs de débit de la base SISEAUX ne sont pas actualisés et doivent être considérés avec prudence.

Données de la BSS ou de la bibliographie

On compte en Alsace 40155 ouvrages en [BSS](#) dont 26976 points d'eau (PE). Parmi ces ouvrages, on dispose de données bancarisées pour les eaux souterraines concernant les essais de pompages sur forages ou puits (820 mesures sur 798 points d'eau) et les mesures de débits sur sources principalement (1058 mesures sur 594 points d'eau) (Figure 32). Il s'agit généralement de données issues des documents scannés disponibles en BSS et bancarisés pour certains points d'eau. La base de données n'est pas exhaustive : elle est représentative des données associées aux déclarations des ouvrages en BSS et aux études hydrogéologiques réalisées dans la mesure où le BRGM en aurait été destinataire et des contraintes liées à la confidentialité de certaines données non publiques. La saisie de ces données n'est pas systématique et a été réalisée au cas par cas si elle s'avérait pertinente.

Dans le cadre d'un projet récent sur les ressources en eaux souterraines du socle vosgien (CHABART et al., 2020), on dispose également d'une base regroupant des données sur des forages (217 PE sur le socle en Alsace) et sur des sources (1094 PE sur le socle en Alsace) (Figure 32). Les données correspondent soit à des débits spécifiques ou des débits maximum d'essai de pompage pour les forages soit à des débits ponctuels ou instantanés pour les sources.

Il reste donc à ce jour de nombreuses mesures de débits dans les dossiers de la BSS ou dans la bibliographie qui nécessite un travail complémentaire de saisie. Ce travail a été mené ponctuellement sur les communes pour lesquels aucune mesure n'étaient disponibles dans la base de données.

Données de l'ARS

Afin de compléter les données de la BSS, la collecte a également porté sur les débits des captages AEP bancarisés par l'ARS (Figure 32). Il s'agit des débits moyens de production et des débits réglementaires.

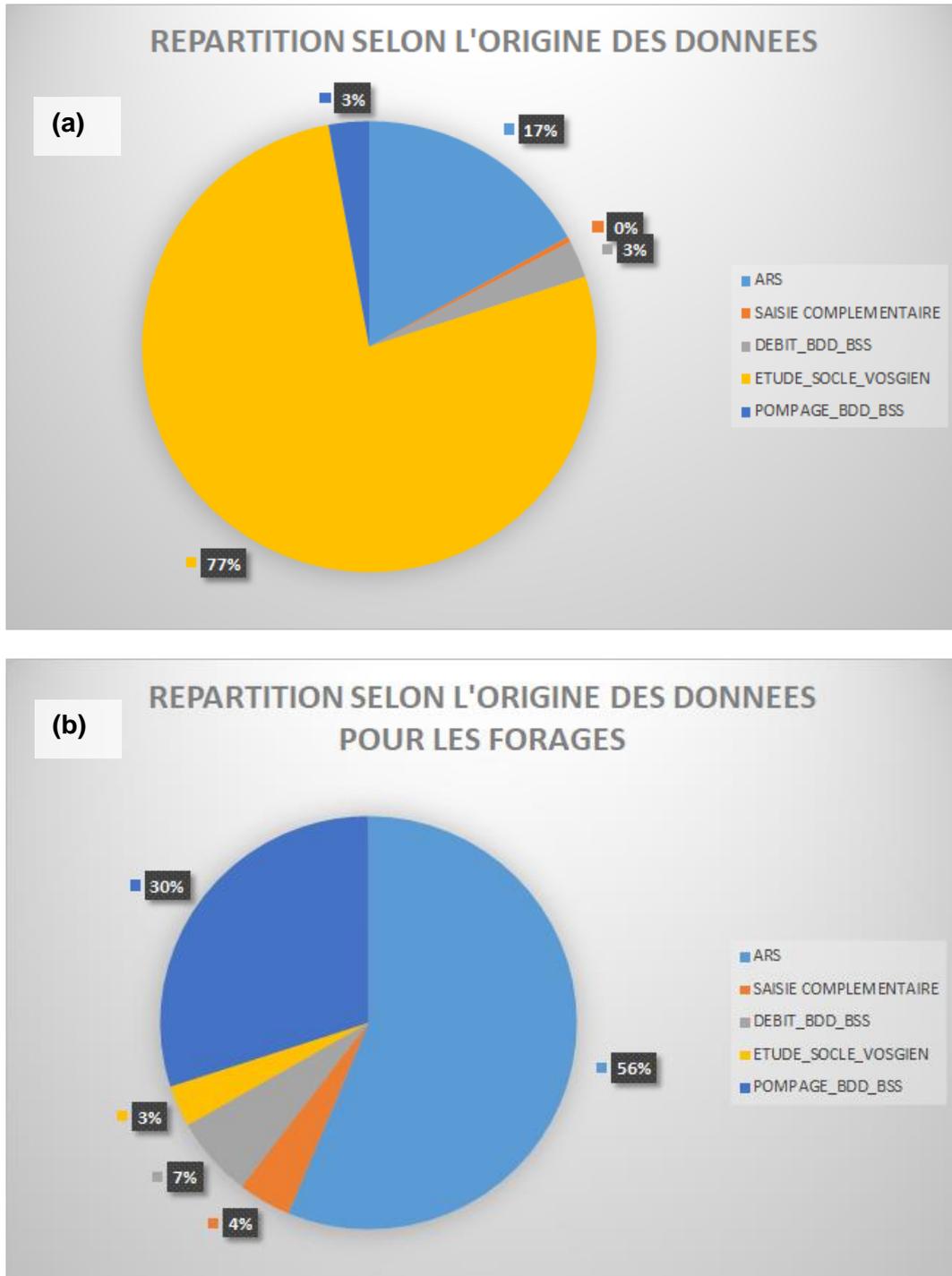


Figure 32 : Graphique de répartition des mesures collectées par origine : (a) tous les points d'eau quelle que soit la nature (b) uniquement les forages ou puits

Analyse des données exploitables

Bilan par commune

La répartition des données actuellement bancarisées s'est avérée inégale à l'échelle du territoire alsacien, et a nécessité des compléments d'information (bibliographie complémentaire et données ARS) notamment au nord du département bas-rhinois (hors plaine d'alsace). Lors d'une première analyse sur les 904 communes du territoire, 54 % n'avaient aucune donnée de débit. Suite à la compilation de nouvelles données, le pourcentage s'est abaissé à 36 % (Figure 33). Précisons qu'une grande majorité des communes sans mesure de débit sont situées hors du domaine aquifère (formations imperméables à semi perméables), pouvant ainsi expliquer la rareté des points d'eau et des mesures associées à leur exploitation (Figure 34).

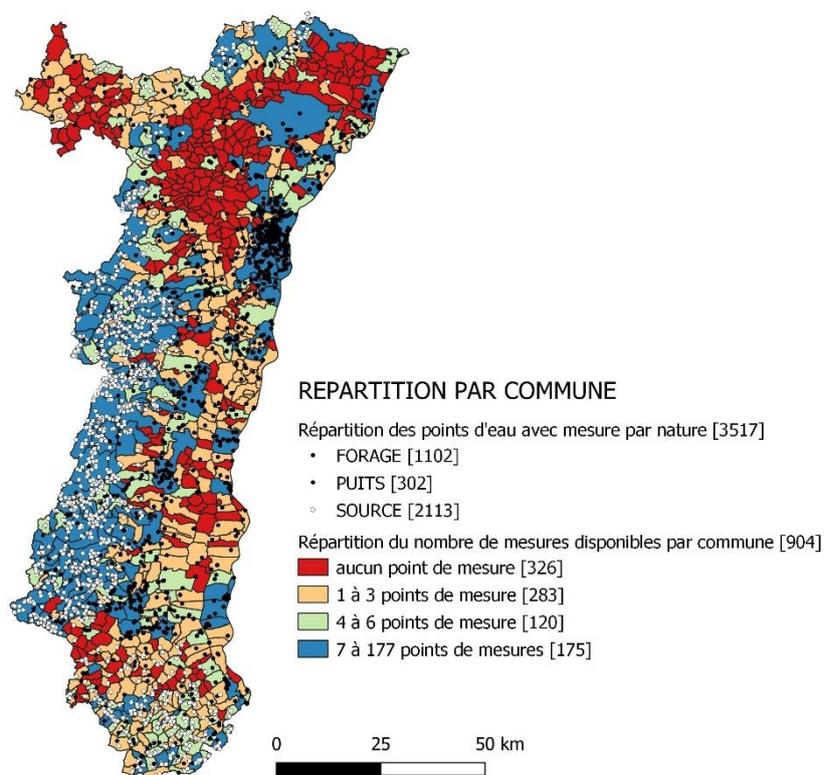


Figure 33 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesures des débits par commune du territoire alsacien

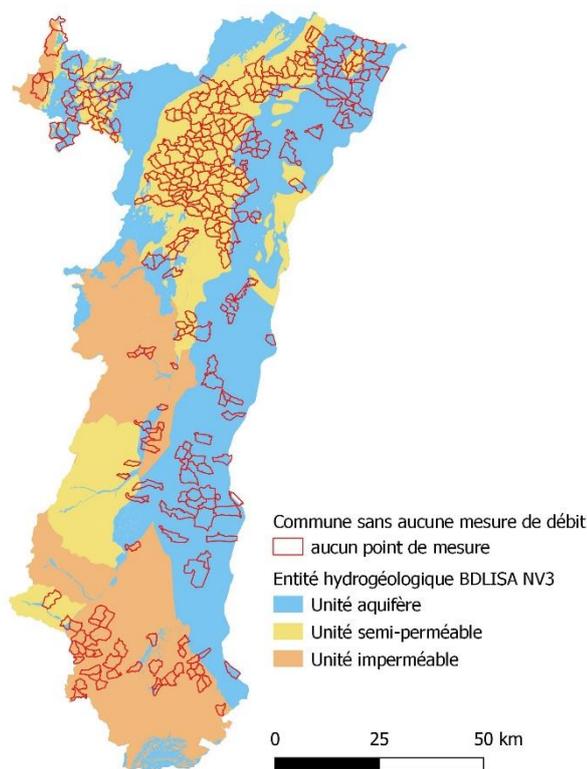


Figure 34 : Carte des communes identifiées comme « sans mesure de débit » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes)

Type de mesure de débit

Les données disponibles (Figure 35) sont majoritairement des **mesures ponctuelles de débit** (80%), dont le mode d'obtention n'est pas précisé dans les documents consultés : il pourrait s'agir soit de débit instantané (mesuré) soit de débit exploitable (calculé). 10 % des mesures de débit correspondent à un **débit moyen**. Les **débites réglementaires** recueillis auprès de l'ARS représentent 7 % des mesures. Les mesures de **débit maximal exploitable** ne représentent qu'une minorité avec 3 %. On compte une seule mesure de **débit critique**.

L'exploitation des mesures de **débites spécifiques**, selon la méthodologie nationale⁹, ne s'est pas avérée nécessaire : pour un même point on a en effet privilégié la collecte des mesures de débit instantané ou exploitable ; d'autre part les mesures disponibles étaient très peu nombreuses.

⁹ Définition du débit exploitable à partir du débit spécifique et de l'épaisseur mouillée

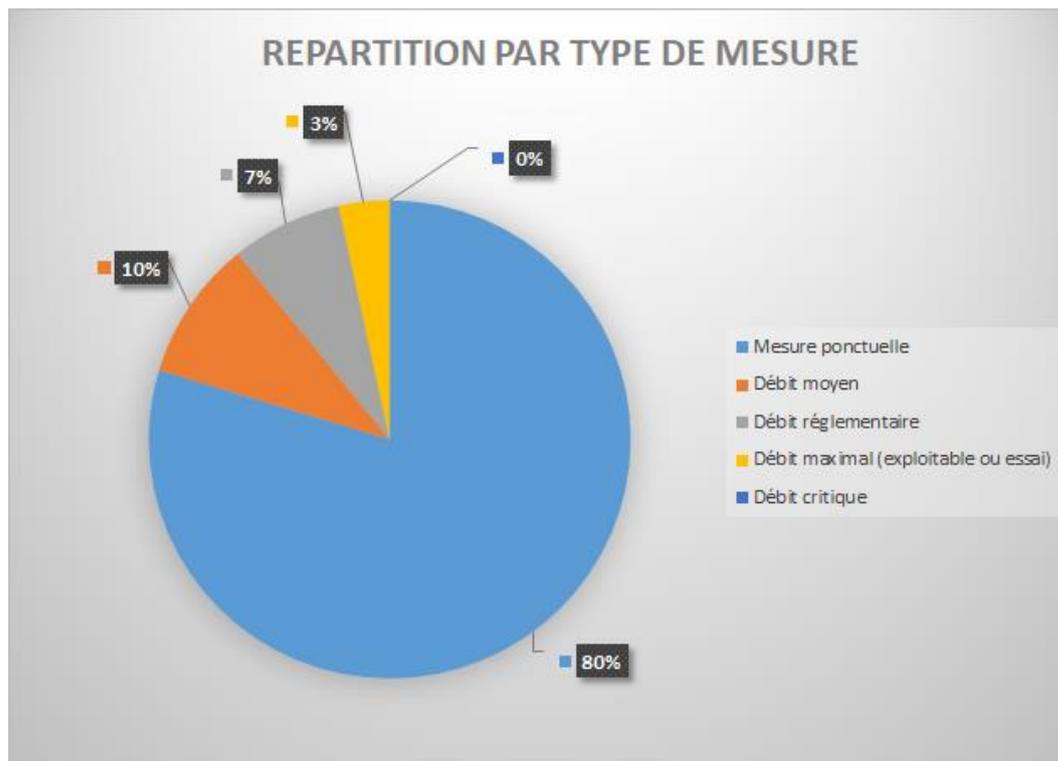


Figure 35 : Répartition des débits par type de mesure

Répartition des données exploitables par nappe ou aquifère

L'analyse statistique des données de débit a été précédée d'un traitement des données brutes afin d'éliminer les analyses clairement aberrantes et de ne conserver que les mesures exploitables ; ainsi les données relatives aux eaux superficielles et aux plans d'eau ont été écartées.

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 mesure N ont été calculés pour chaque point d'eau considéré.

La majorité des points avec mesure de débit (Figure 36) concerne le socle (42 %) et la nappe d'Alsace (31 %). Pour rappel, le socle a fait l'objet d'une collecte spécifique lors d'une étude antérieure.

Si on se focalise uniquement sur les forages (Figure 37), la nappe d'Alsace représente 76 % des mesures, les autres aquifères représentant entre 1 % et 13 %. On ne dispose que d'une seule mesure pour chacun des aquifères profonds du fossé rhénan. De fait, il ne sera pas possible de caractériser le potentiel sur ces formations profondes.

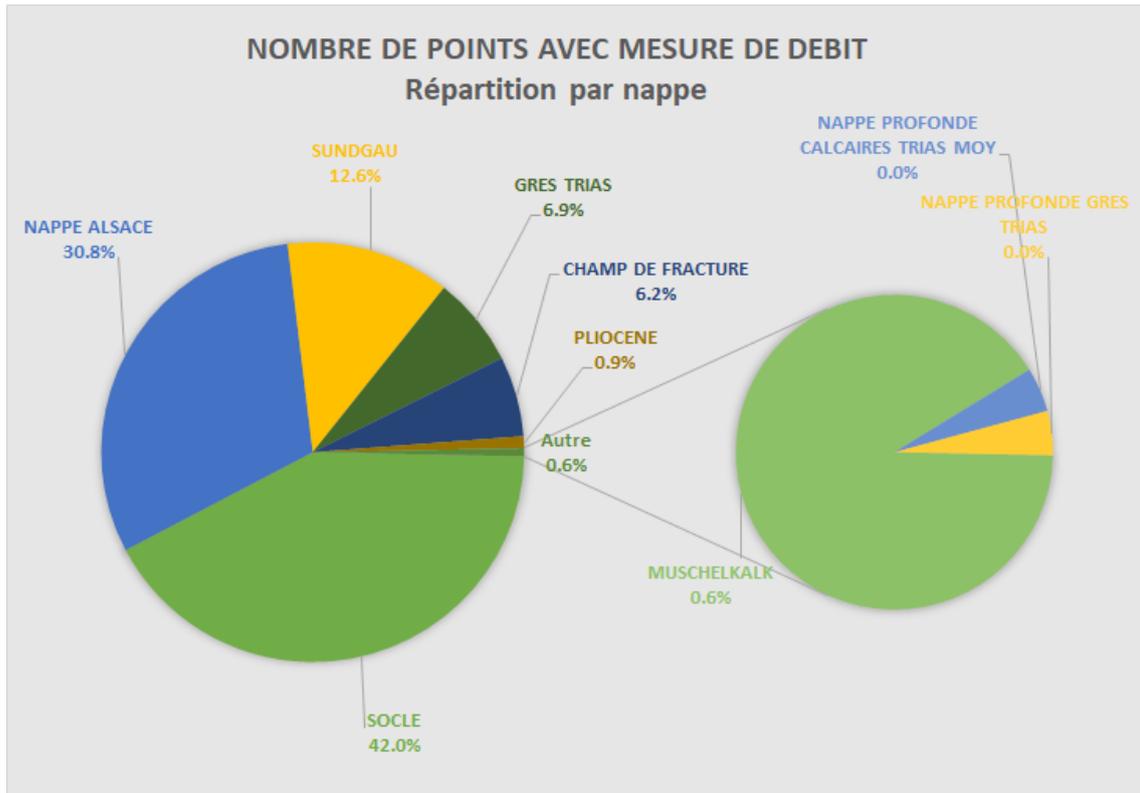


Figure 36 : Critère « productivité de la nappe » - Graphique de répartition des points avec mesures de débit par nappe

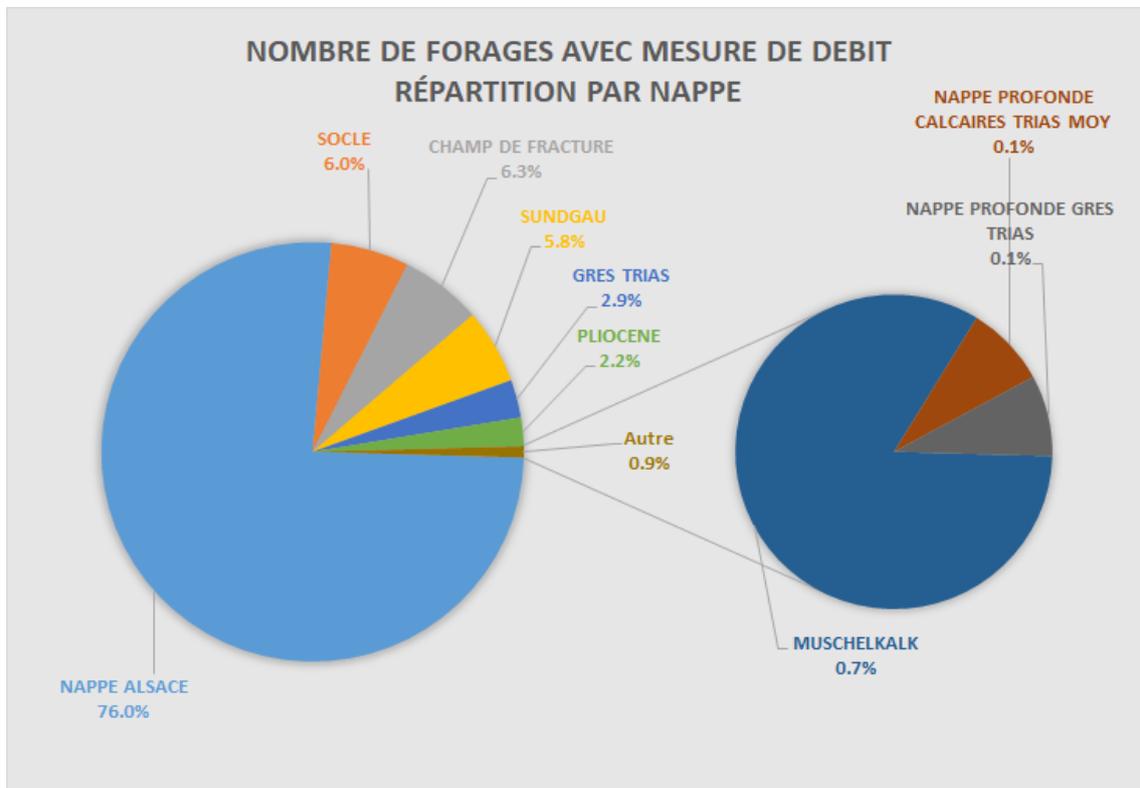


Figure 37 : Critère « productivité de la nappe » - Graphique de répartition des forages ou puits avec mesures de débit par nappe

La nappe alluviale de la plaine d'Alsace présente les débits les plus élevés, avec en moyenne plus de 190 m³/h (Figure 38). Toutes les autres nappes présentent des débits moyens compris entre 10 et 50 m³/h. Globalement et indépendamment des autres critères, ces productivités sont tout à fait intéressantes pour des projets de géothermie très basse énergie, sauf exception dans certains contextes locaux. En effet, on observe une dispersion importante des valeurs (Figure 39 et Figure 40) notamment pour le socle et le pliocène avec 5 % des valeurs de débits inférieures à 0.1 m³/h. La plupart des nappes ont 95 % de valeurs de débits supérieures à 20 m³/h (voire 100 m³/h pour la nappe d'Alsace) à l'exception du socle et des formations du Sundgau.

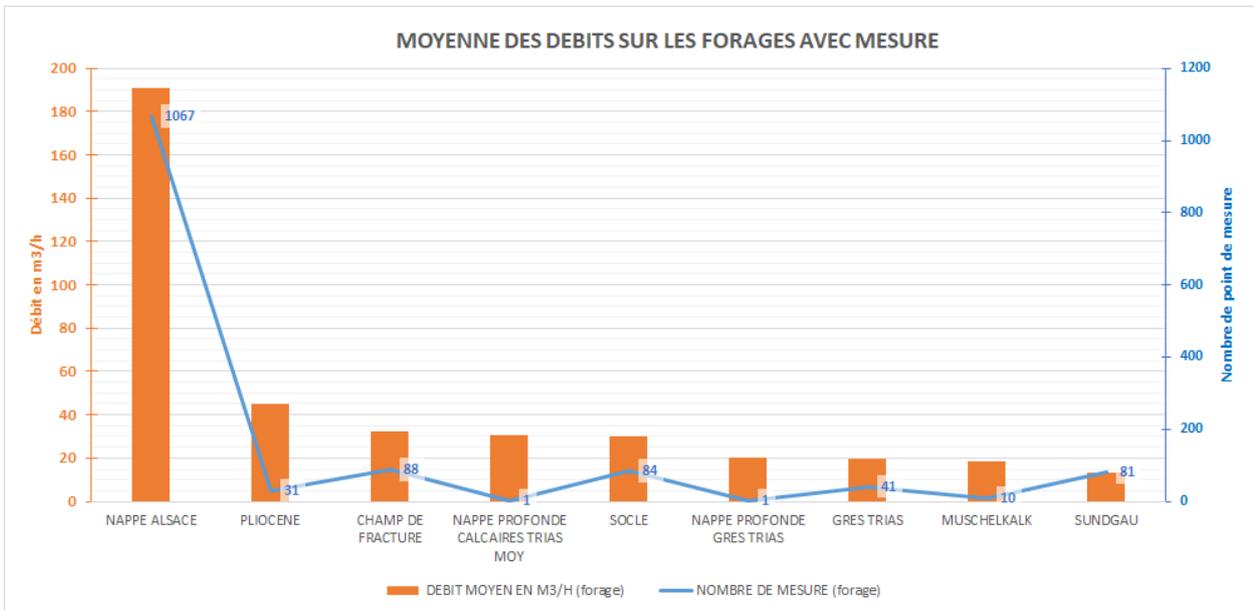


Figure 38 : Histogramme des débits moyens obtenus sur forage par nappe

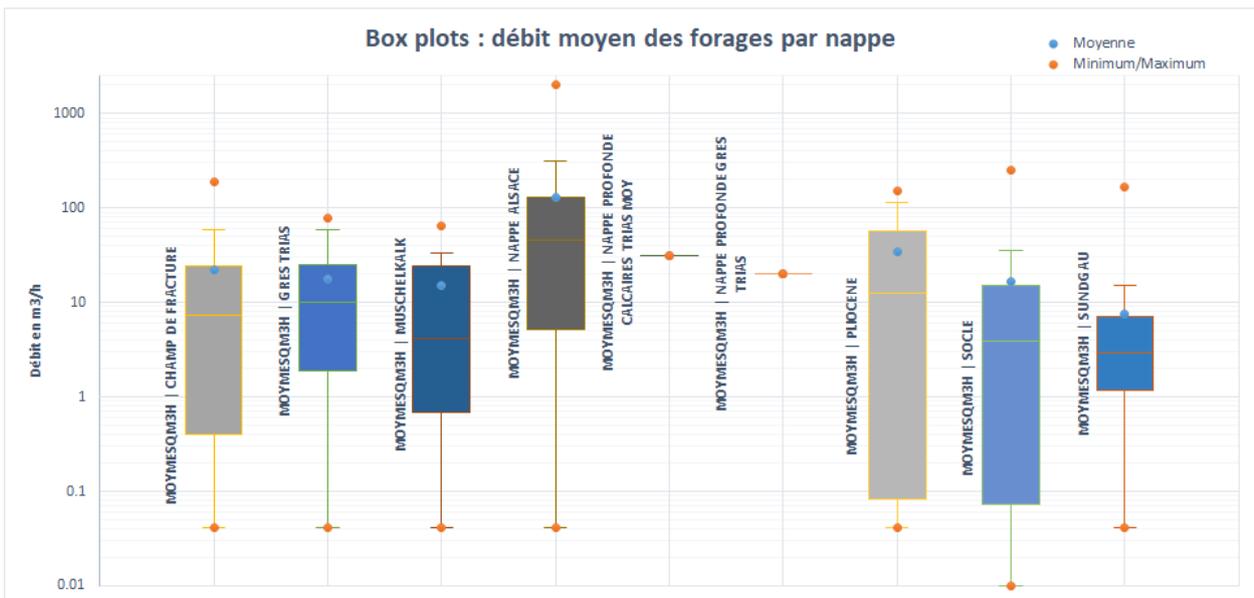


Figure 39 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les débits moyens obtenus sur forage par nappe

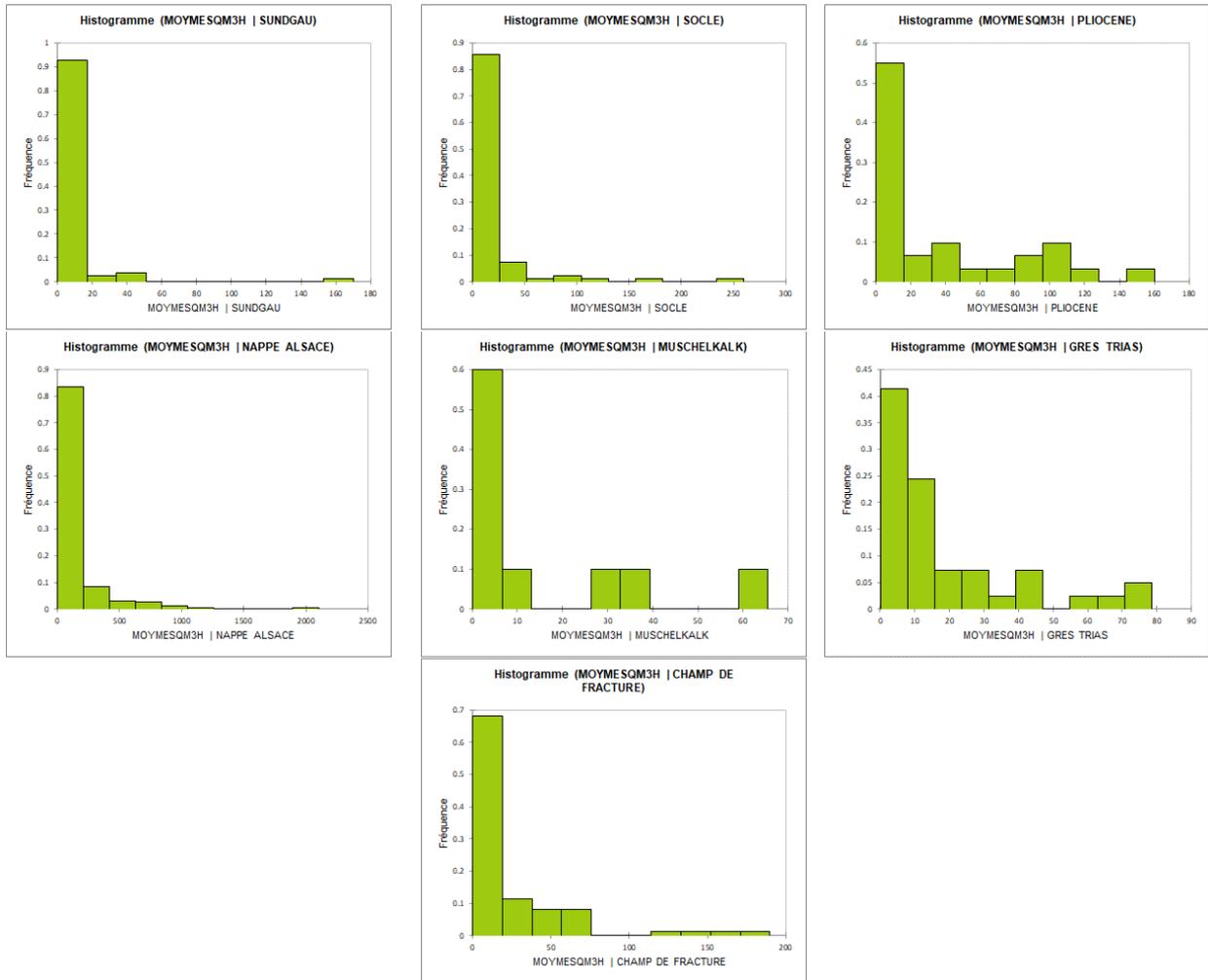


Figure 40 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les débits moyens obtenus sur forage par nappe

La Figure 41 et la Figure 42 rendent compte respectivement de la répartition des forages et des sources avec mesures. Elles permettent d'apprécier la grande disparité dans la répartition géographique des points, qui s'explique par la collecte (forte concentration au droit de secteurs ayant fait l'objet d'étude spécifique comme le socle) et par le contexte hydrogéologique (forte concentration là où la nappe est facilement accessible et exploitable comme en plaine d'Alsace et faible concentration dans les secteurs considérés comme imperméables ou semi perméables).

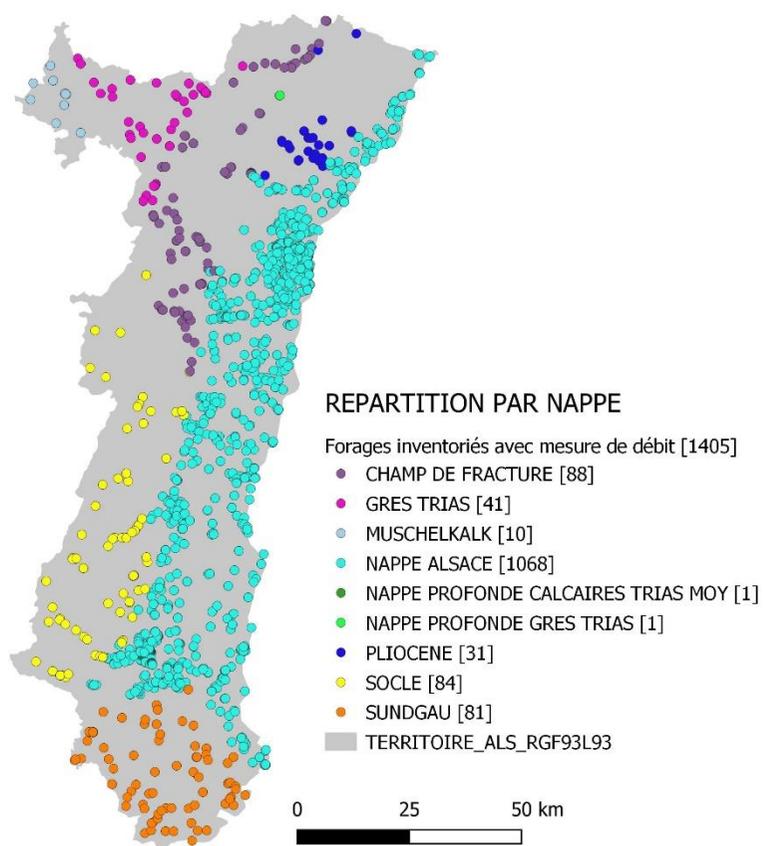


Figure 41 : Carte de répartition des forages avec mesure de débits

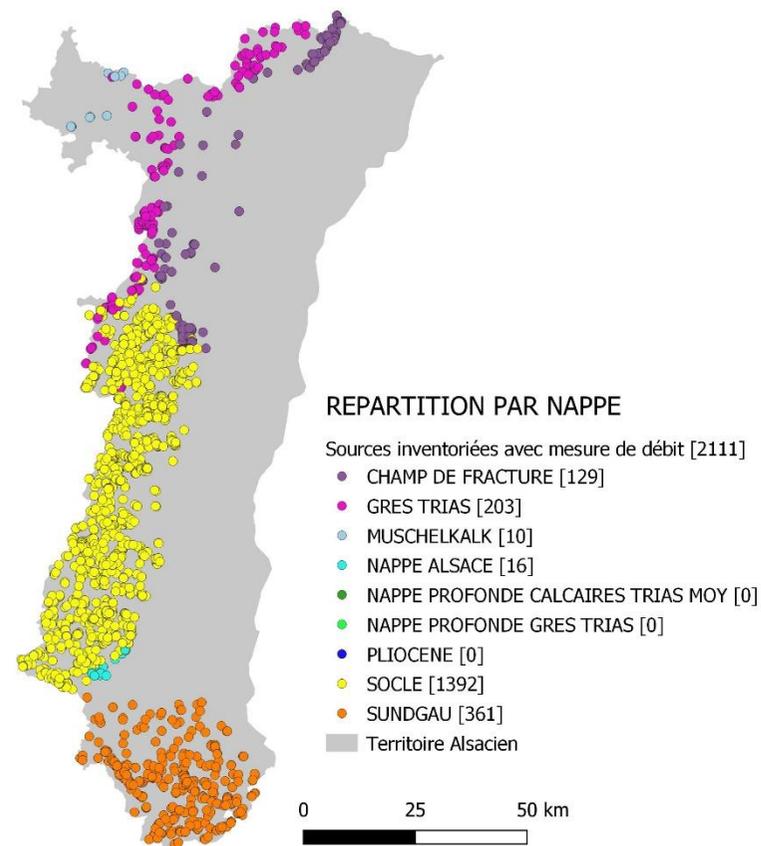


Figure 42 : Carte de répartition des sources avec mesure de débits

Répartition spatiale des données exploitables par classe de valeur

La Figure 43 présente la répartition des valeurs moyennes de débit calculées pour les 1404 forages ou puits disposant de valeurs exploitables selon les 4 classes recommandées dans la méthodologie nationale. Les points sont implantés majoritairement en plaine d'Alsace et le long des axes des principales vallées.

La Figure 44 présente la répartition des valeurs moyennes calculées pour les 2113 sources disposant de valeurs. La plupart des points se situent au sud (Sundgau) et à l'ouest du département (socle vosgien). Cette répartition s'explique par la nature des formations aquifères à l'affleurement (majoritairement imperméable ou semi-perméable).

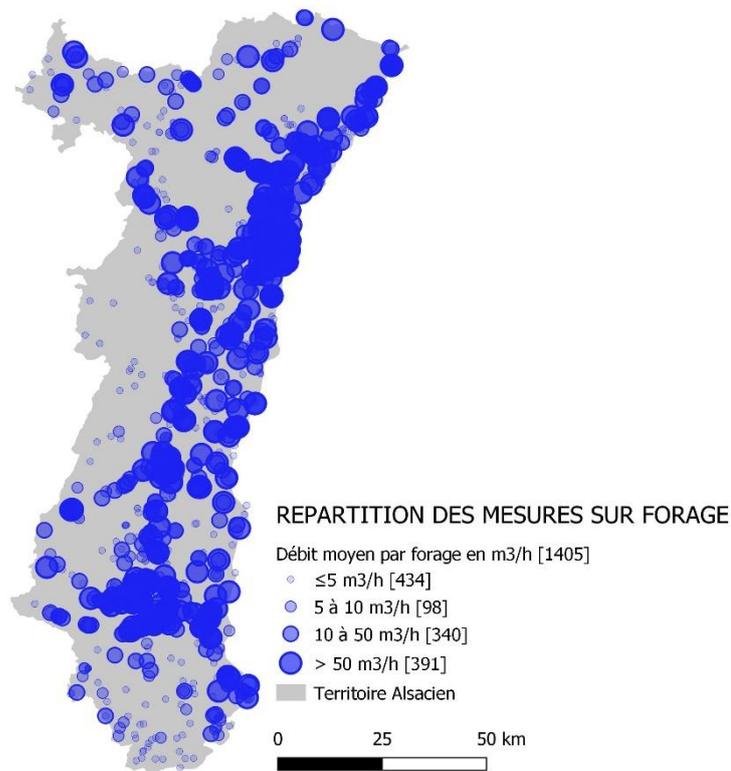


Figure 43 : Carte de répartition des mesures de débit moyen par forage selon 4 classes

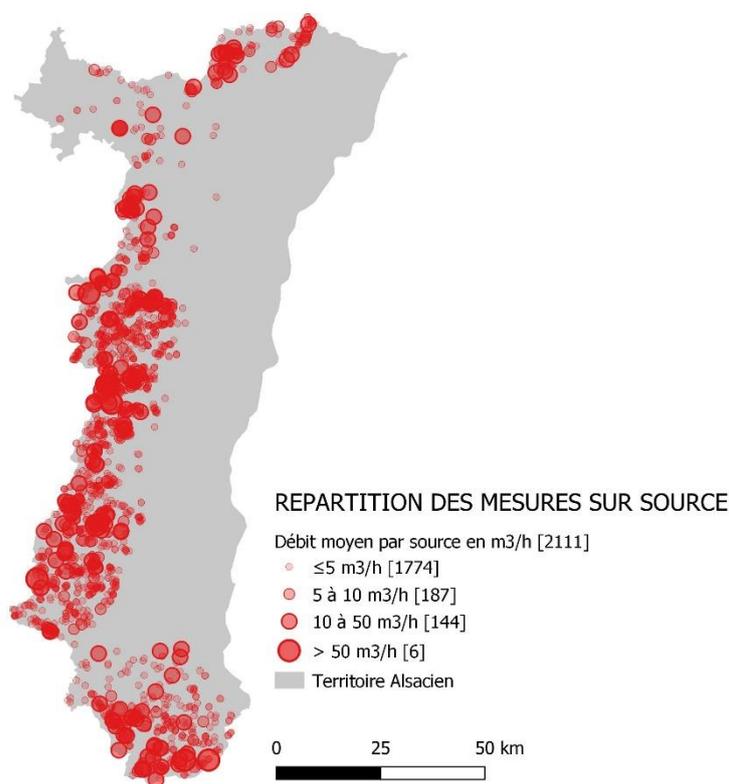


Figure 44 : Carte de répartition des mesures de débit moyen par source selon 4 classes

Classification retenue

La classification retenue pour le critère « productivité de l’aquifère » est conforme à la classification nationale (Tableau 3).

Classe de productivité		Commentaires
1	$Q_{\text{exploitable}} \leq 5 \text{ m}^3/\text{h}$	Le risque d’échec de production est élevé. La ressource est considérée comme faible.
2	$5 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{\text{exploitable}} \leq 10 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d’envisager le chauffage de logements individuels.
3	$10 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{\text{exploitable}} \leq 50 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d’envisager le chauffage de bâtiments de 1 000 à 5 000 m ² .
4	$Q_{\text{exploitable}} > 50 \text{ m}^3/\text{h}$	Cette gamme de débits permet d’envisager le chauffage de bâtiments supérieurs à 5 000 m ² .

Tableau 3 : Classes de productivités de l’aquifère prises en compte

Spatialisation des données

Pour chaque nappe considérée, l'interpolation a été menée avec l'outil IDW de GRASS QGIS à partir des mesures ponctuelles de débit collectées (date variable). Comme précédemment, on a affecté à la maille 500 x 500 la moyenne des valeurs interpolées.

Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur

La cartographie unicritère pour la « productivité » tient compte de l'analyse statistique et de l'interpolation des mesures ponctuelles mais également de l'approche naturaliste (modification à la marge à dire d'expert).

Chaque valeur moyenne de débit a été associée à une classe entre 1 et 4 (Tableau 3), afin de dresser les cartographies du critère « productivité » spatialisé par classes de valeur (1 carte pour chaque nappe considérée - annexe 3).

La Figure 45 présente l'agrégation des 7 cartographies à l'échelle du territoire alsacien. Pour rappel, l'Alsace bossue se caractérise par la superposition du Muschelkalk (à l'affleurement) et des grès du Trias inférieur (pour partie sous-recouvrement) ; il conviendra dans la cartographie finale de sélectionner sur ce secteur particulier le potentiel du meilleur aquifère.

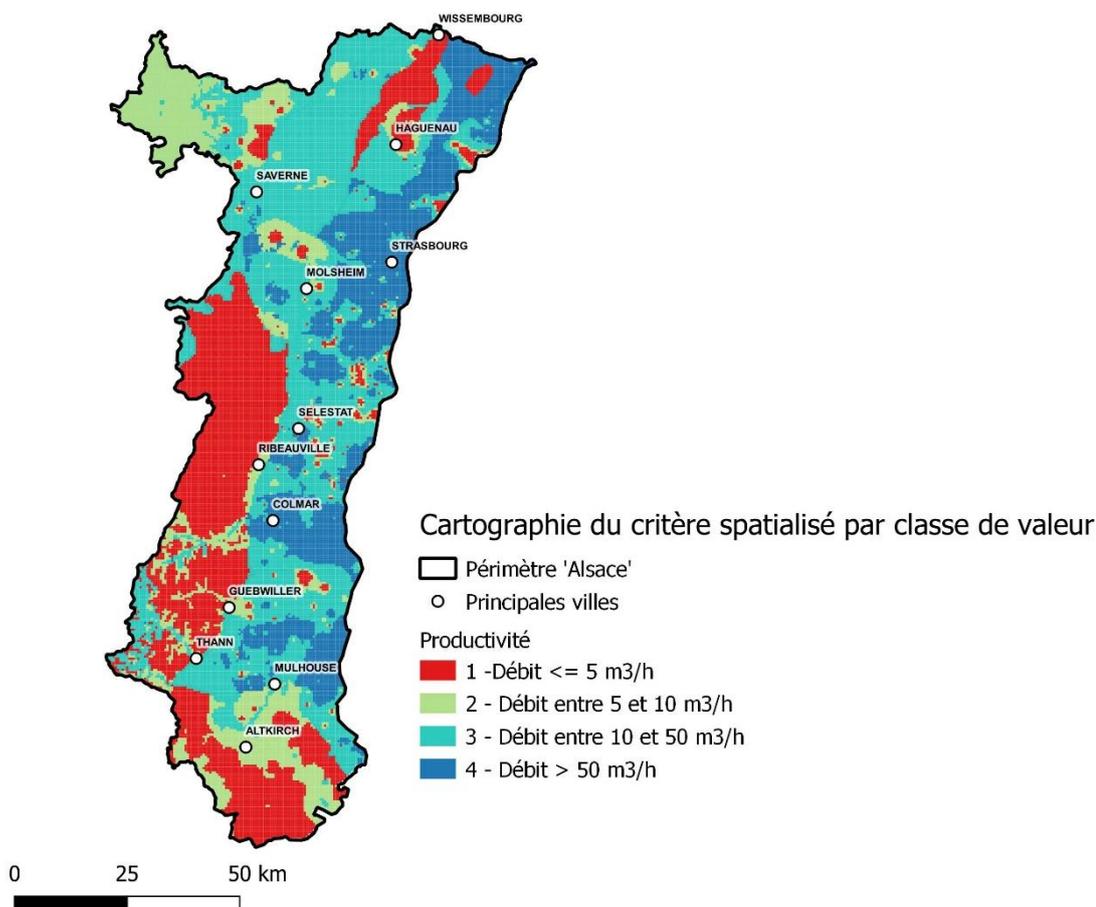


Figure 45 : Carte du critère « productivité » spatialisé par classe de valeur

Cette carte a été réalisée essentiellement à partir de données de prélèvement. Il est possible, dans certaines nappes, que les débits de réinjection soient inférieurs et donc limitent le débit maximal exploitable d'une installation de géothermie.

4.3.4. Critère 3 : Température de l'eau souterraine

Définition et source des données

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

- les mesures présentes dans la Banque [ADES](#) (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) ;
- les mesures ponctuelles résultant du programme [ERMES](#)¹⁰ ;
- les chroniques de températures résultant du suivi de la nappe rhénane par l'[APRONA](#) ;
- les mesures ponctuelles en forage issues de la [BSS](#), de la [BSES](#) ou de la bibliographie.

Données ADES

L'extraction réalisée sur le paramètre température¹¹ en Alsace, porte sur 3838 points d'eau et 50903 mesures de température. Si les premières mesures recensées datent de 1920, la plupart des données sont sur la période 1986 à 2017, les pics en nombre de mesures et nombre de points correspondant à des campagnes d'analyses exceptionnelles (Figure 46).

¹⁰ Programme ERMES-Rhin 2016 : Evolution de la Ressource et Monitoring des Eaux Souterraines du Rhin supérieur : Il s'agit d'un inventaire de la qualité de la nappe d'Alsace réalisé en 2016 sous maîtrise d'ouvrage de l'APRONA dans le cadre d'un projet transfrontalier inscrit au programme européen INTERREG V.

¹¹ Codes [SANDRE](#) pour le paramètre température retenus pour l'extraction : [1301/7861/6484](#)

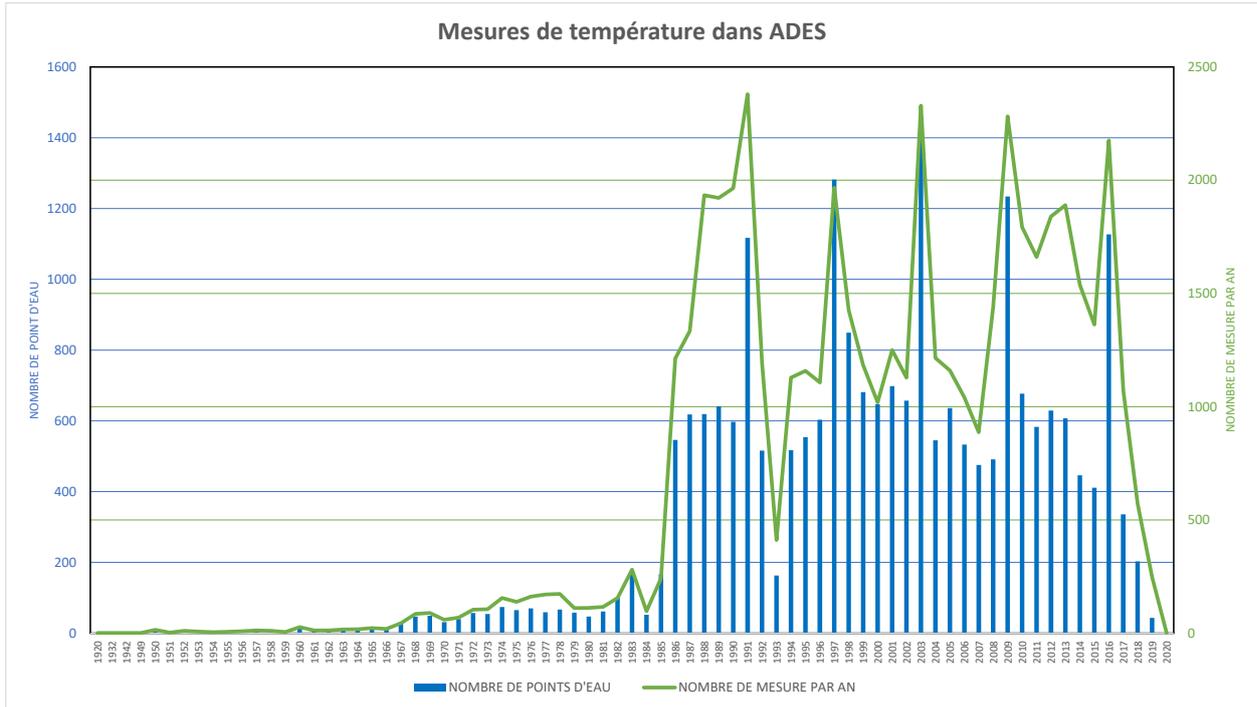


Figure 46 : Evolution du nombre de point d'eau suivis par l'APRONA et du nombre de mesures acquises entre 2007 et fin 2019

La répartition géographique des mesures (indépendamment d'un rattachement à une entité hydrogéologique spécifique ou groupement d'aquifère particulier) montre une répartition relativement bonne à l'échelle de la zone d'étude à l'exception (Figure 47) :

- d'une forte concentration des points de mesures en plaine d'Alsace ;
- d'une absence de mesure dans la partie centrale du champ de fracture et en plaine d'Alsace au droit des formations oligocènes du Bassin du Pechelbronn en Alsace.

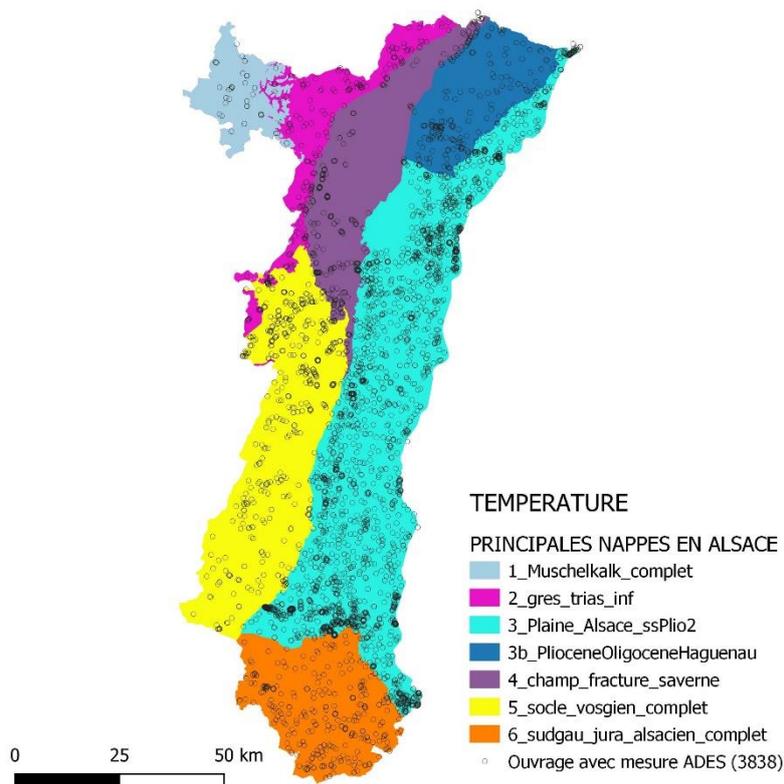


Figure 47 : Carte de répartition des points d'eau ADES avec mesure de température en Alsace (source ADES, 24/09/2020)

Données ERMES

Les données du projet ERMES (Evolution de la Ressource et Monitoring des Eaux Souterraines) s'inscrivent dans la continuité des « inventaires généraux de la qualité des eaux souterraines » initiés à partir de 1973 qui ont pris une dimension transfrontalière à partir de 1991.

L'inventaire 2016 a été réalisé sous maîtrise d'ouvrage de l'APRONA dans le cadre d'un projet transfrontalier inscrit au programme européen INTERREG V. Ce projet s'intitule ERMES-Rhin 2016 « Evolution de la Ressource et Monitoring des Eaux Souterraines du Rhin supérieur ».

Les paramètres analysés sont ceux recherchés lors des inventaires précédents, les paramètres physico-chimiques **dont la température**, les pesticides, les COHV... ainsi que les « polluants émergents » (exemple : les résidus de médicaments) dans le cadre d'un volet novateur. L'APRONA met à disposition les données brutes sur son site internet ([lien](#)).

Le secteur géographique couvert est limité à la plaine d'Alsace et au Sundgau et Jura Alsacien (Figure 48).

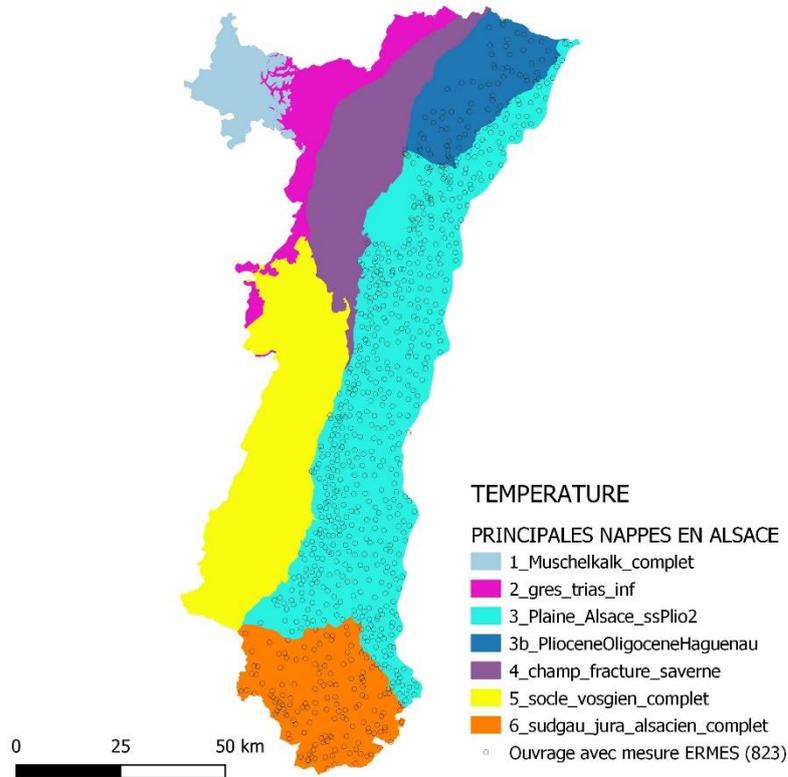


Figure 48 : Carte de répartition des points d'eau ERMES avec mesure de température en Alsace (source APRONA, 2016)

Données de l'APRONA

L'APRONA gère un réseau de piézomètres sur lesquels un suivi de la température est mis en œuvre parallèlement aux mesures de niveau d'eau. Un rapport « température » est publié annuellement par l'APRONA et les données sont mises à disposition sur le site internet ([lien](#) - Figure 49).

Le nombre de points évolue progressivement en fonction des besoins (Figure 50). Les résultats de suivi de la température entre 2007 (1 point) et 2019 (une centaine de points) ont une fréquence moyenne de 2 mesures par jour à 12h d'intervalle). La répartition géographique des points est assez hétérogène et ne concerne que la nappe d'Alsace (Figure 51).

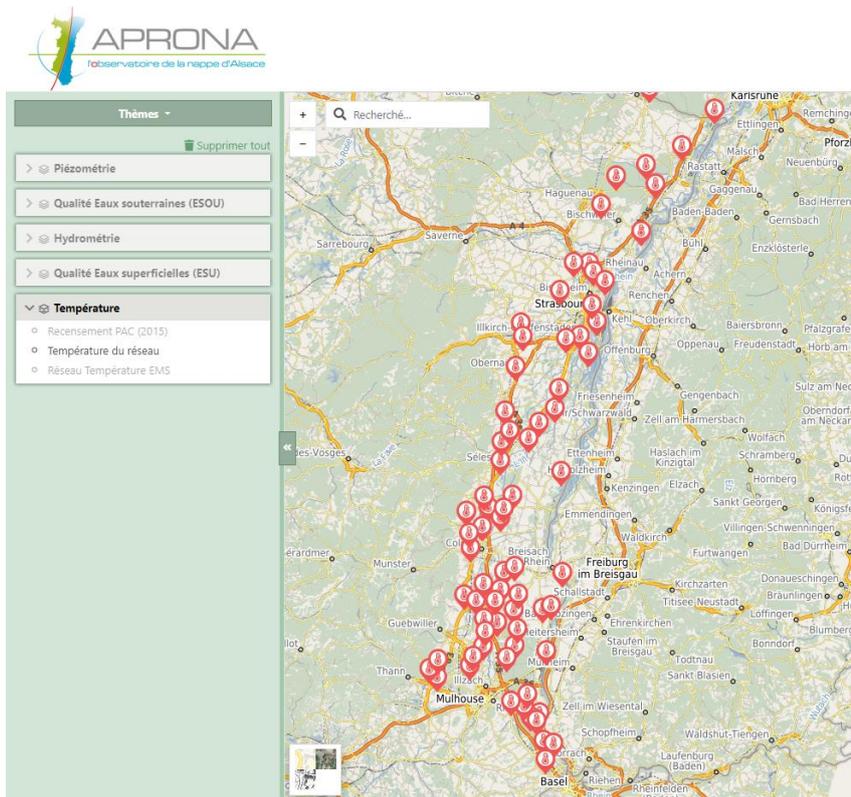


Figure 49 : Localisation des suivis de températures en nappe d'alsace (<https://www.aprona.net/>)

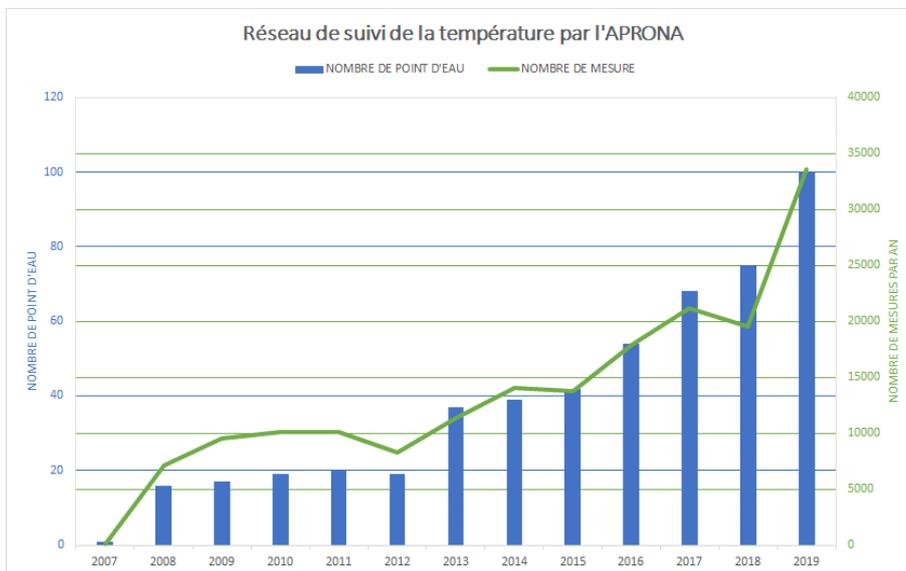


Figure 50 : Evolution du nombre de points d'eau suivis et du nombre de mesures acquises entre 2007 et fin 2019

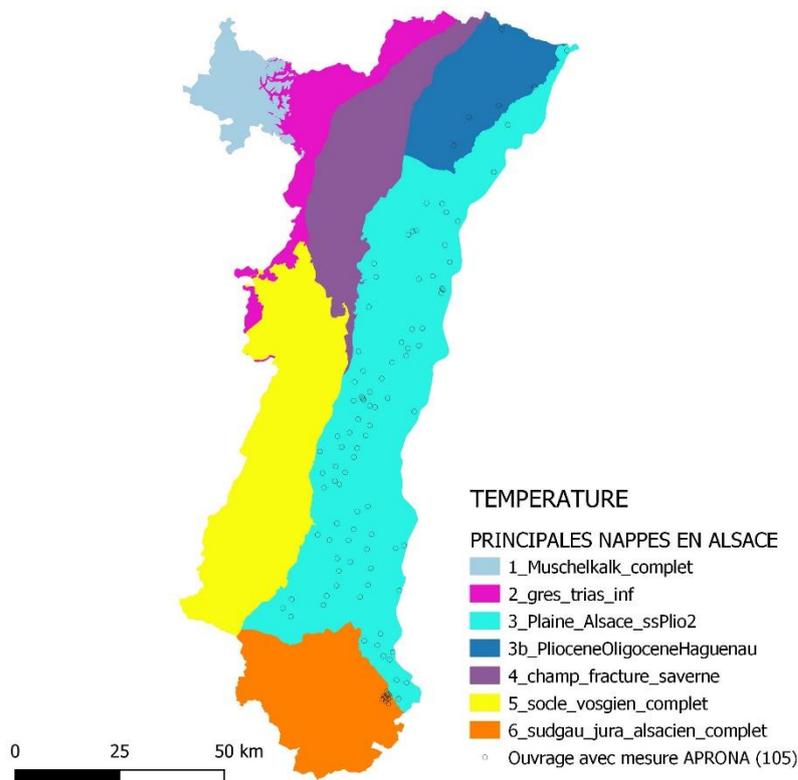


Figure 51 : Carte de répartition des points d'eau APRONA avec suivi de température en Alsace (source APRONA, 2019)

Données de la BSES et de la BSS (bibliographie associée)

La BSES est l'ancienne base de données du BRGM spécifique aux eaux souterraines, pour partie intégrée à BSS consultable sur [InfoTerre](#). La base de données intègre certaines mesures de température déjà présentes en BSS ou dans ADES ; il y a donc nécessité à supprimer les doublons. Par contre, certaines données n'ont pas été intégrées dans la base ADES. Il s'agit généralement de points d'eau suivis sur une courte période et qui ne sont pas rattachés à un réseau en particulier. L'extraction faite le 06/10/2020 intègre 42383 mesures exploitables sur 4225 points d'eau. On compte entre 1 et 147 mesures par point d'eau sur la période 1912-2009. En complément, les documents présents en BSS ont permis de collecter 69 mesures complémentaires sur 69 points d'eau implantés au droit de communes identifiées comme dépourvues d'informations (Figure 52).

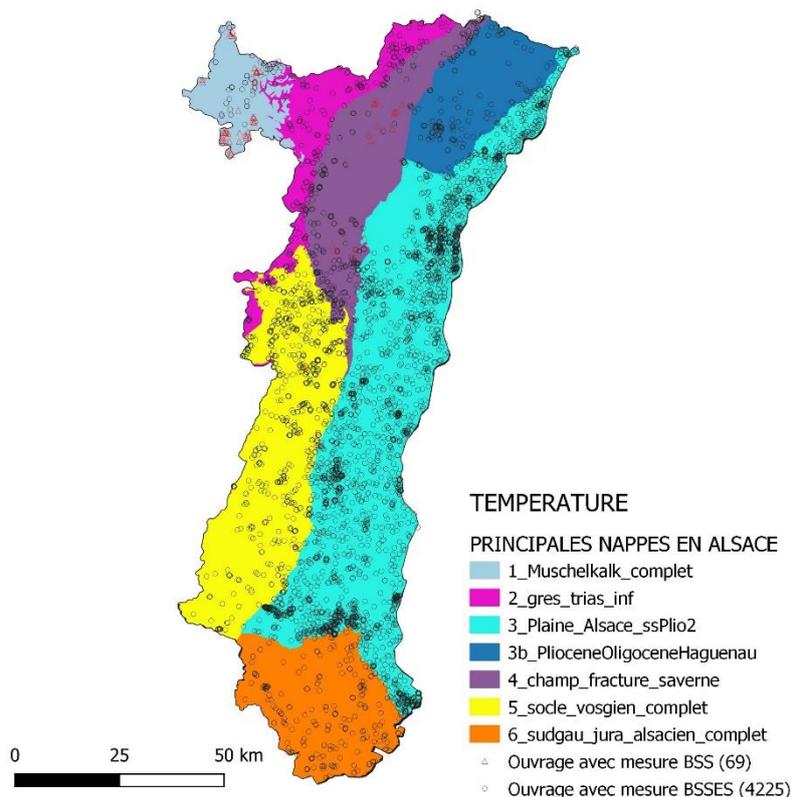


Figure 52 : Carte de répartition des points d'eau BSES ou BSS avec mesure de température en Alsace (source BRGM, 2020)

Analyse des données exploitables

Bilan par commune

La répartition des données de température bancarisées s'est avérée inégale à l'échelle du territoire alsacien, et a nécessité des compléments d'information (bibliographie complémentaire) notamment au nord-ouest du département bas-rhinois.

Suite à la compilation de nouvelles données, il reste encore 211 communes qui ne disposent d'aucune mesure de température (Figure 53). Précisons qu'une grande majorité des communes sans mesure de température sont situées hors du domaine aquifère (formations imperméables à semi perméables), pouvant ainsi expliquer la rareté des points d'eau et des mesures associées (Figure 54).

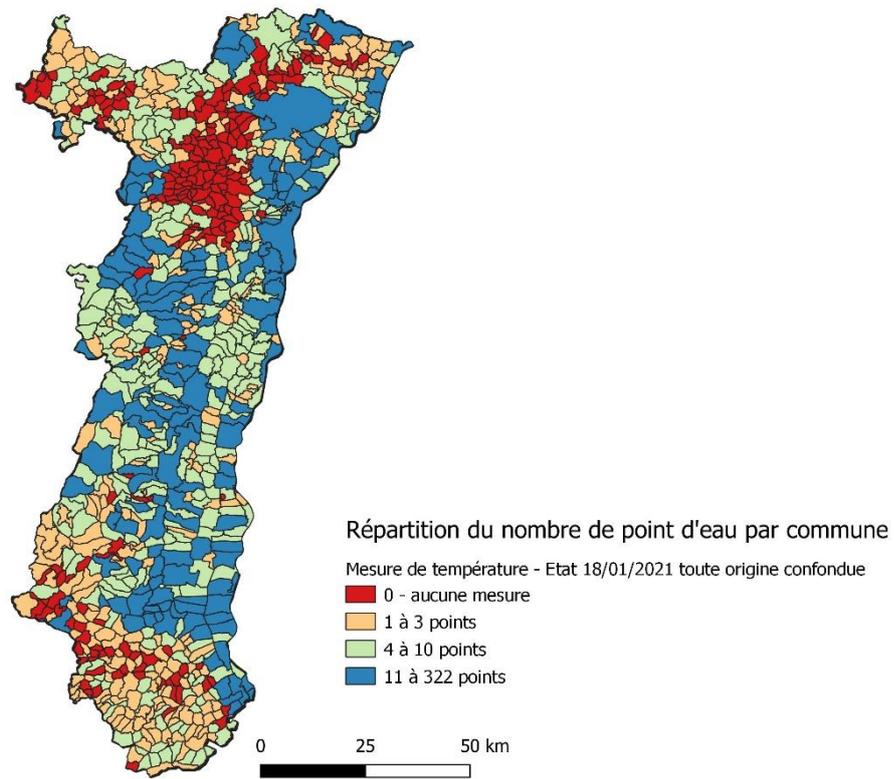


Figure 53 : Carte dressant le bilan de la répartition des points de mesure de la température par communes du territoire alsacien

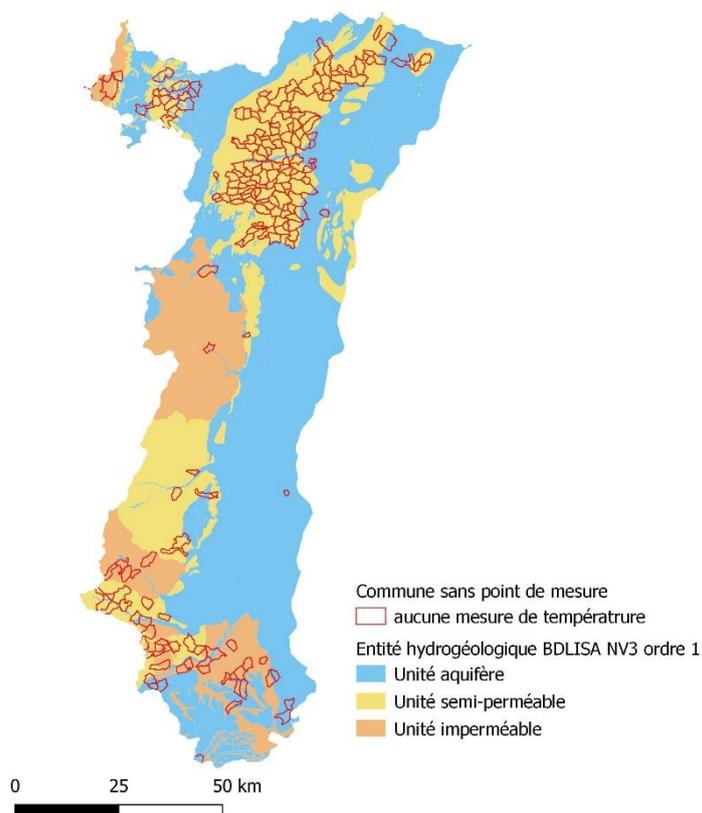


Figure 54 : Carte des communes identifiées comme étant « sans mesure de température » par rapport aux entités hydrogéologique BDLISA d'ordre 1 classées par « nature » (entités affleurantes)

Répartition des données exploitables par nappe ou aquifère

L'analyse statistique des données de température a été précédée d'un traitement des données brutes afin d'éliminer les analyses clairement aberrantes et de ne conserver que les mesures exploitables ; ainsi, les données relatives aux eaux superficielles et aux plans d'eau ont été écartées.

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 mesure N ont été calculés pour chaque point d'eau considéré.

Les 5580 points d'eau disposant de mesures exploitables sont rattachés à une entité BDLISA et une nappe telle que définis au chapitre 3.4. On constate que la majorité des points de mesures (66%) concerne les formations de la nappe d'Alsace et du Socle (Figure 55).

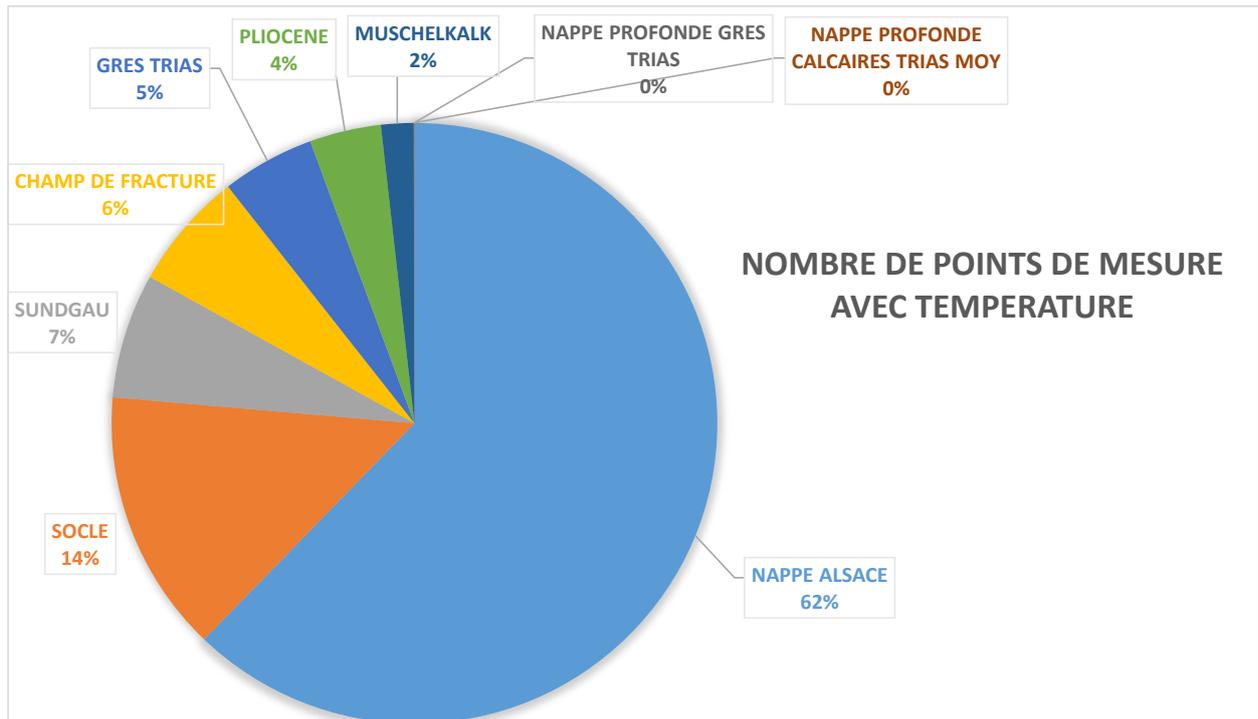


Figure 55 : Graphique de répartition des ouvrages avec des mesures exploitables de température par nappe

Pour la plupart des nappes, les températures sont dans la gamme 10 à 15°C (Figure 56 et Figure 57), à l'exception des nappes profondes du fossé rhénan (2 points avec des températures voisines de 40°C), et présentent généralement une distribution de type normal, laissant supposer l'existence d'une structure spatiale (Figure 58).

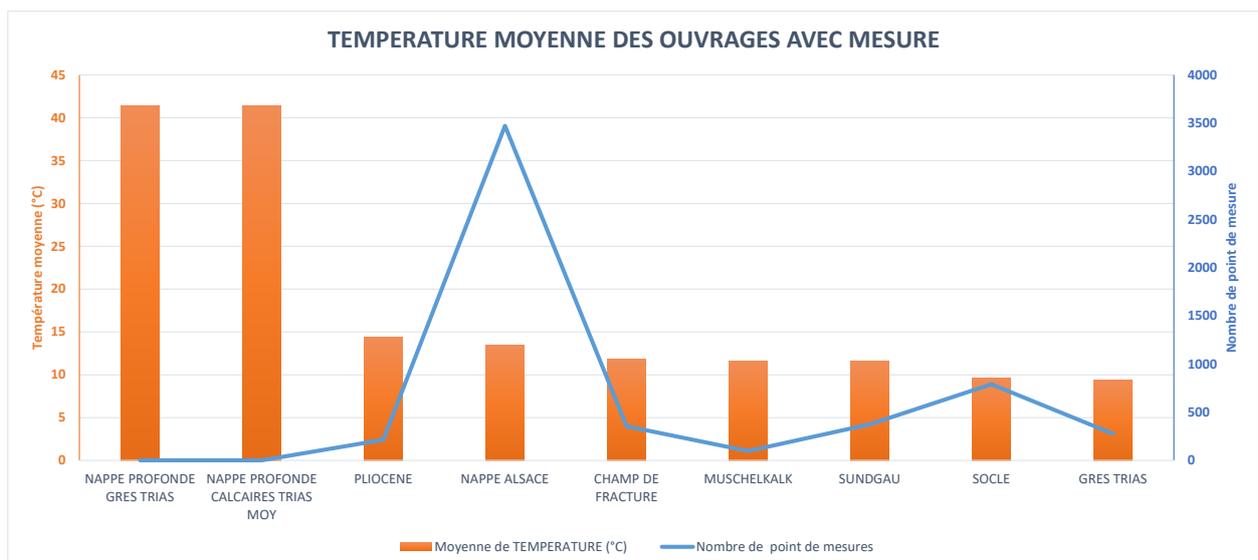


Figure 56 : Histogramme des mesures moyennes de température par nappe

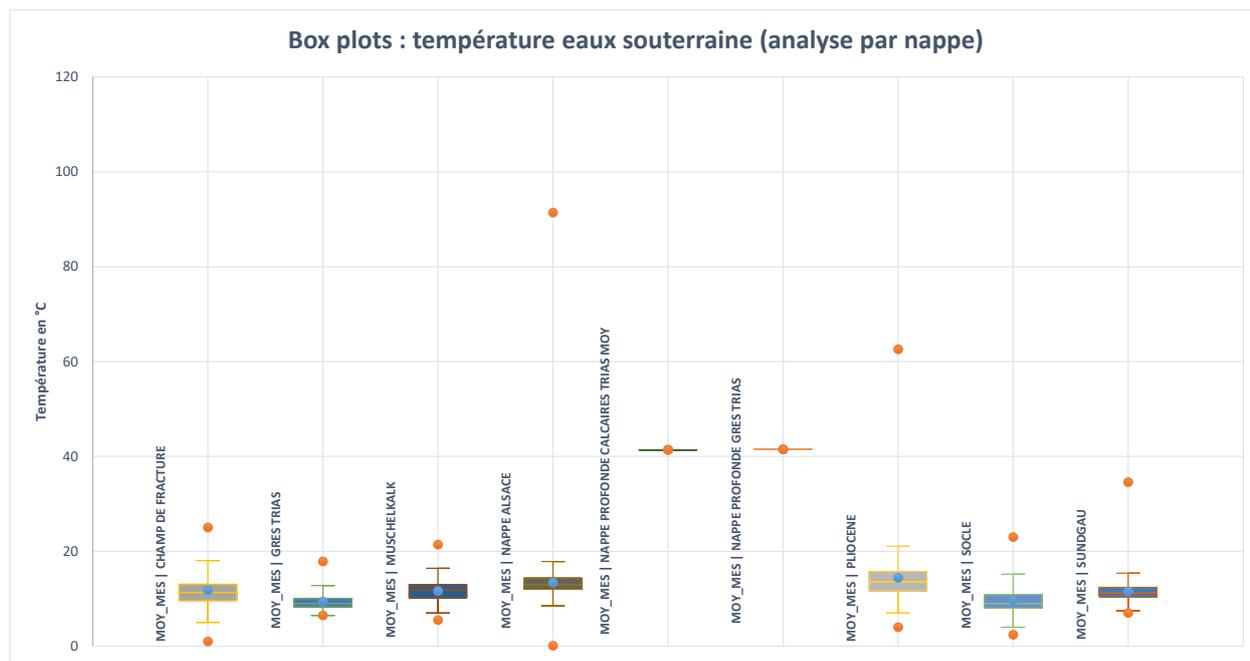


Figure 57 : Graphique Boxplots présentant l'analyse statistique pour les températures par nappe

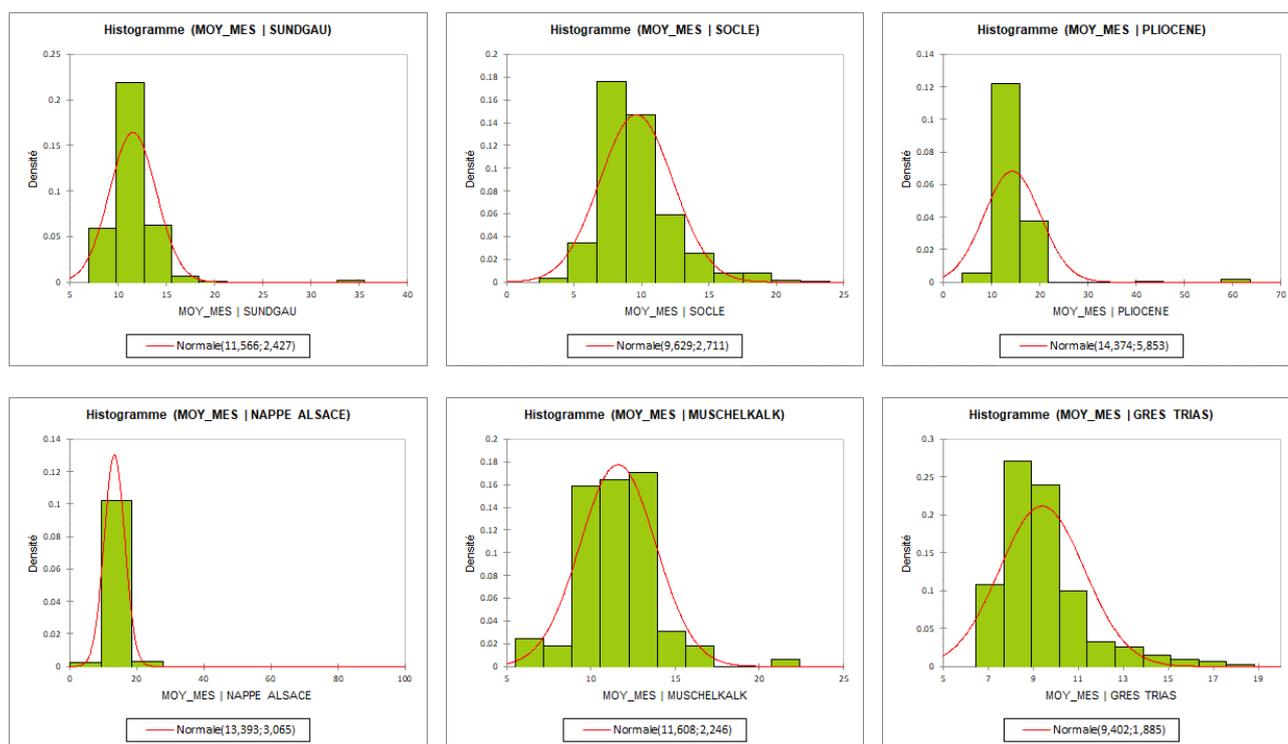


Figure 58 : Histogrammes présentant l'analyse statistique pour les températures par nappe

La répartition géographique des points de mesure à l'échelle des différentes nappes considérées est assez homogène avec néanmoins une forte concentration des points en plaine d'Alsace et l'absence de données au nord-ouest de Strasbourg, région du Kochersberg (Figure 59).

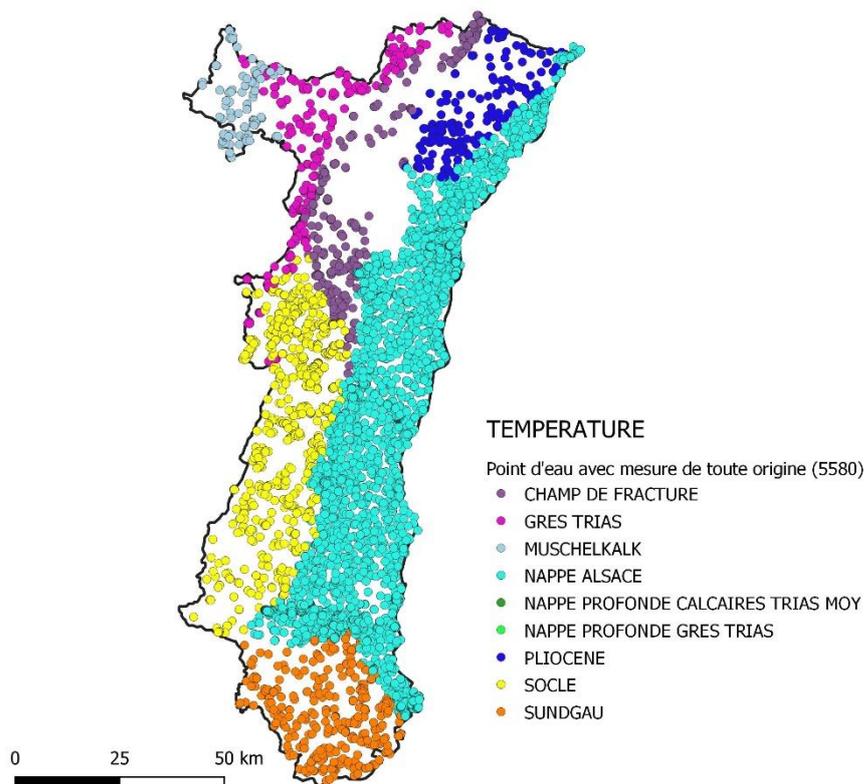


Figure 59 : Carte de répartition des données ponctuelles pour le critère « température de l'eau souterraine »

Répartition spatiale des données exploitables par classe de valeur

La Figure 60 présente la répartition des valeurs moyennes de température observées pour les 5580 points d'eau (forages, puits ou sources) disposant de valeurs exploitables selon les 3 classes recommandées dans la méthodologie nationale. Les points d'eau sont implantés majoritairement en plaine d'Alsace et sur le socle (collecte de l'étude spécifique). La majorité des points d'eau ont une température moyenne comprise entre 10 et 15°C (67 %), notamment en plaine d'Alsace. Les sources constituant la majorité des points d'eau en zone de relief tel que le socle, l'Alsace Bossue ou le Jura Alsacien ont des températures moyennes plus basses, en lien avec les conditions climatiques et topographiques.

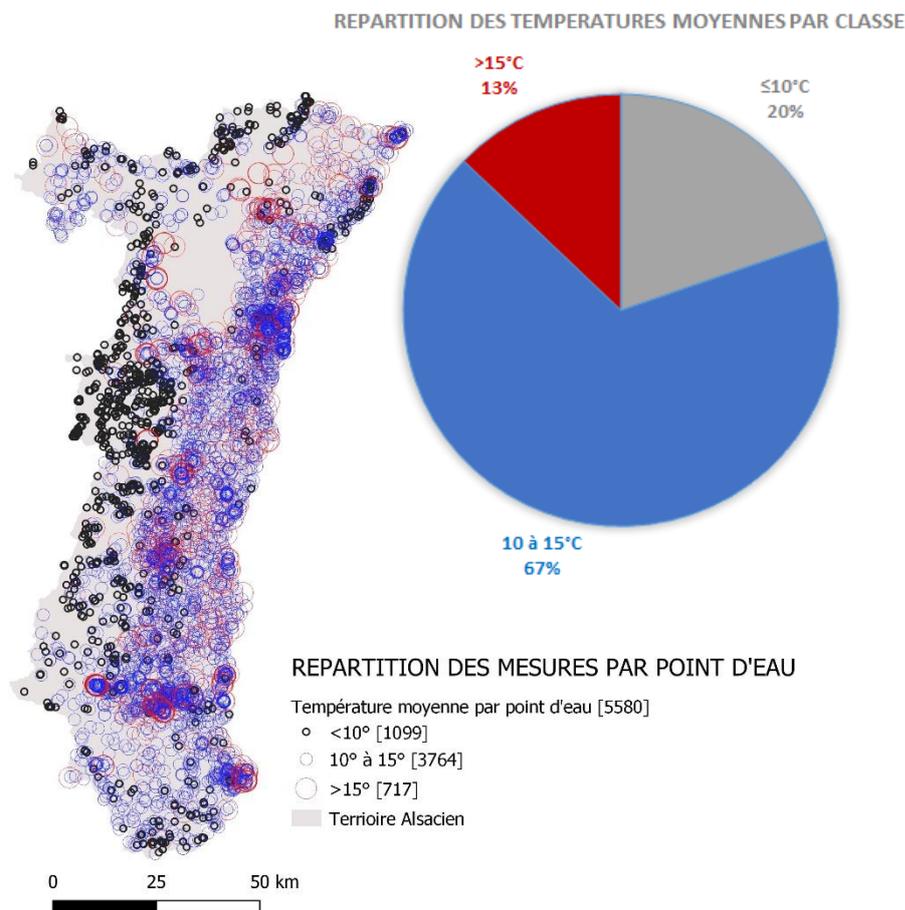


Figure 60 : Carte de répartition des mesures moyennes de température par classe

Classification retenue

La classification retenue pour le critère température (Tableau 4), basée sur l'évolution du degré d'efficacité d'une PAC utilisée en mode chauffage en fonction de la température de la ressource, est conforme à la méthodologie nationale.

Classe de température		Commentaire
1	Température ≤ 10°C	Diminution des performances pour le fonctionnement d'une PAC en mode chauffage.
2	10°C < Température ≤ 15°C	Très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage et climatisation et au free-cooling.
3	T > 15°C	Diminution des performances pour le fonctionnement d'une PAC en mode climatisation.

Tableau 4 : Classes de température de l'eau souterraine prises en compte

Spatialisation des données

Pour chaque nappe considérée, l'interpolation a été menée avec l'outil IDW de GRASS QGIS à partir des mesures ponctuelles de température collectées (date variable). Comme précédemment, on a affecté à la maille 500 x 500 la moyenne des valeurs interpolées.

Cartographie du critère spatialisé par classe de valeur

La cartographie unicritère pour la « température de la nappe » tient compte de l'analyse statistique et de l'interpolation des mesures ponctuelles mais également de l'approche naturaliste (modification à la marge à dire d'expert).

Chaque valeur moyenne de température a été associée à une classe entre 1 et 3 (Tableau 4), afin de dresser les cartographies du critère « température » spatialisé par classes de valeur (1 carte pour chaque nappe considérée - annexe 4).

La Figure 61 présente l'agrégation des 7 cartographies à l'échelle du territoire alsacien. Pour rappel, l'Alsace bossue se caractérise par la superposition du Muschelkalk (à l'affleurement) et des grès du Trias inférieur (pour partie sous-recouvrement) ; il conviendra dans la cartographie finale de sélectionner sur ce secteur particulier le potentiel du meilleur aquifère.

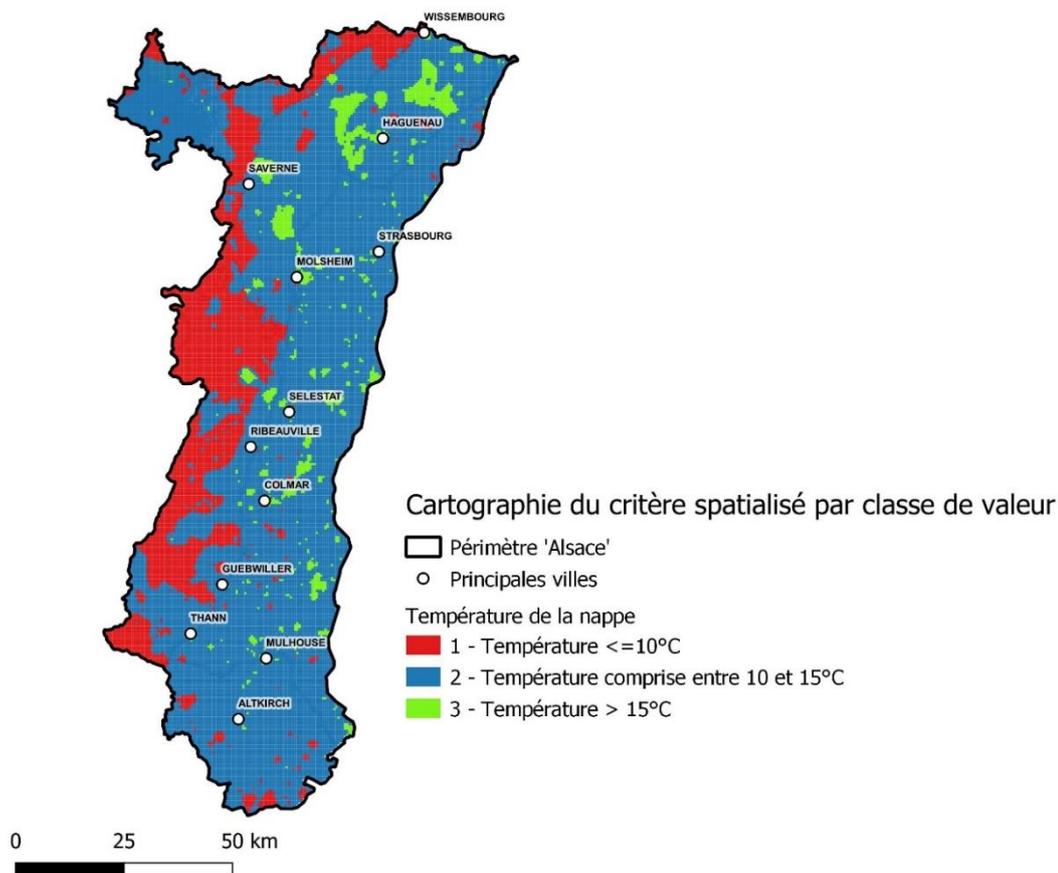


Figure 61 : Carte du critère « température de la nappe » spatialisé par classe de valeur

4.4. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE MULTICRITERE

4.4.1. Introduction méthodologique

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.

Cartographie multicritères par aquifère

La carte multicritère de chaque aquifère est obtenue par combinaison pondérée des cartes unicritères. Un indice de potentialité géothermique est calculé par addition pondérée des indices de potentialité unicritère, attribués dans chaque maille de la grille cartographique (Figure 62). Une carte de répartition des indices de potentialité est alors établie ; elle correspond à la carte du potentiel géothermique de l'aquifère.

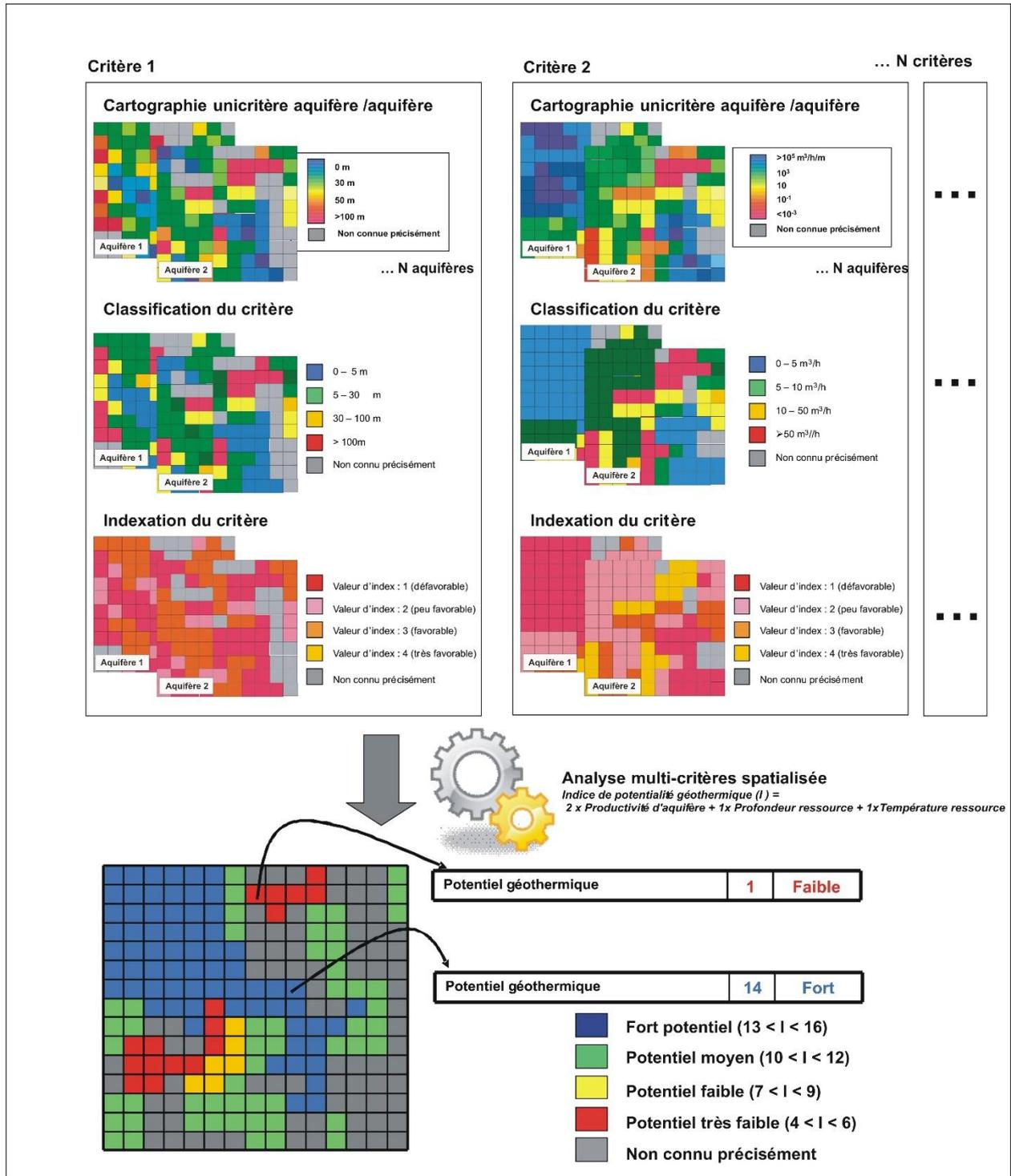


Figure 62 : Principe de la cartographie multicritères

4.4.2. Bilan de la classification et de l'indexation des critères en Alsace

La classification retenue pour les différents critères de potentialité géothermique ainsi que leur indexation sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 5) :

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

Tableau 5 : Classification et indexation des critères de potentialité géothermique

Après avoir procédé au recueil des données de base et réalisé des cartes spatialisées unicritères (profondeur, productivité, température), il a été procédé à une analyse simultanée par le biais d'un calcul automatisé multicritères, mené sous SIG afin d'aboutir 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. Le code de calcul multicritères pris en compte est le suivant :

<p>Potentiel géothermique =</p> <p>2x (Productivité de l'aquifère) + 1 x (Température) +1x (Profondeur d'accès)</p>

4.4.3. Cartographies multicritères par aquifère

La cartographie multicritères a permis de définir pour chaque nappe le potentiel aquifère (annexe 5), compris entre une note minimale de 5 et une note maximale de 16 (Tableau 6).

On retiendra que le territoire alsacien est concerné à 46 % (pourcentage de maille concernées) par des nappes à potentiel fort, notamment dans une large mesure la nappe d'Alsace (91 % des mailles), le champ de fracture (76 %) et le pliocène (58 %). Les formations du Muschelkalk, des grès du Trias et du Sundgau présentent plutôt un potentiel moyen (53 à 92 % des mailles). Le socle, en dehors des zones de vallées alluviales ou fluvio-glaciaires, restant majoritairement associé à un potentiel faible (58 % des mailles).

NAPPE		POTENTIEL GTH TBE [%]			
NOM	CODE	TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT
		notes 5 et 6	notes 7 à 9	notes 10 à 12	notes 13 à 16
MUSCHELKALK	MUSC	0%	8%	92%	0%
GRES DU TRIAS INFERIEUR	GTRI	2%	42%	53%	3%
CHAMP DE FRACTURE	CFRA	0%	4%	20%	76%
NAPPE D'ALSACE	NALS	0%	1%	9%	91%
PLIOCENE	PLIO	2%	16%	25%	58%
SOCLE	SOCL	2%	58%	33%	7%
SUNDGAU	SUND	0%	30%	65%	5%
		1%	22%	32%	46%

Tableau 6 : Statistiques concernant le potentiel géothermique selon la nappe et les classes de valeur

4.5. ETAPE 4 : CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUR NAPPE EN ALSACE

L'analyse multicritères a conduit à l'élaboration d'une carte du potentiel géothermique sur nappe indiquant les secteurs favorables à l'implantation de pompes à chaleur en Alsace (Figure 63).

Cette cartographie résulte de l'assemblage des différentes cartographies et de la sélection, pour chaque maille de la grille cartographique, des meilleurs indices de potentialité géothermique parmi ceux calculés pour chaque aquifère superposé (secteur alsace bossue).

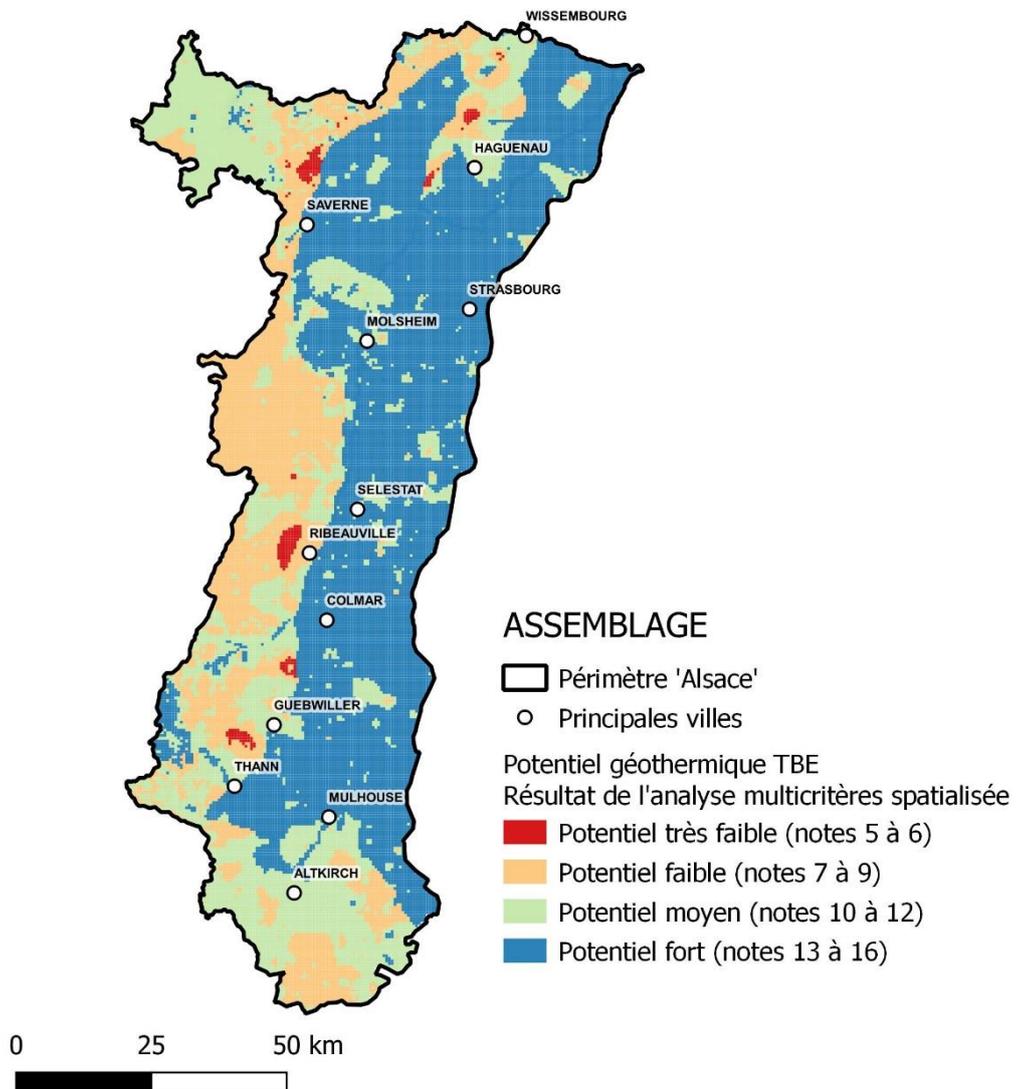


Figure 63 : Carte finale du potentiel aquifère sur le territoire alsacien

5. Compléments sur la qualité de la ressource

5.1. INTRODUCTION

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 matériels 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 souterraines](#)¹² : 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 (Figure 64, Figure 65, Tableau 7, Tableau 8, Tableau 9).

Classe	Aptitude pour satisfaire l'usage	
Bleu		Très bonne
Vert		Bonne
Jaune		Passable
Orange		Mauvaise
Rouge		Inapte à satisfaire l'usage

Figure 64 – Classes d'aptitude de l'eau pour l'usage « énergie ». D'après SEQ-Eaux souterraines, 2003.

Classe	Climatisation / pompes à chaleur	Corrosion	Formation de dépôts
Bleu 	favorable à l'usage énergétique considéré	absence de corrosion	pas de risques de dépôts importants
Vert 	permet l'usage énergétique considéré	corrosion faible	peu de risques de dépôts
Jaune 	usage délicat pour raisons techniques ou économiques	corrosion modérée	risques de dépôts
Orange 	(1)	corrosion moyenne	(1)
Rouge 	(1)	corrosion forte	dépôts très importants

Figure 65 – Lien entre classes d'aptitude de l'usage « énergie » et classes de qualité des trois types altérations considérées (température, corrosion, formation de dépôts). D'après SEQ-Eaux souterraines, 2003.

¹² SEQ-Eaux souterraines établie dans le cadre d'une étude inter-agences de l'eau et en collaboration entre Agences de l'Eau, Ministère et BRGM en 2003.

Altération Température - Usage Climatisation

Les valeurs seuils des différents états dépendent des objectifs poursuivis en matière de climatisation. Les valeurs seuils proposées le sont sur la base d'une climatisation de locaux à usage d'habitation.

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 8 et <= 12	> 12 et <= 15	<= 8 ou > 15

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

Altération Température - Usage Pompes à chaleur

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 15 et <= 60	> 8 et <= 15	<= 8 ou > 60

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

Tableau 7 : Valeurs seuils pour l'altération « température. D'après SEQ-Eaux souterraines, 2003

Altération Corrosion

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.

Le motif  indique dans les tableaux ci-après que le paramètre ne décrit pas la (ou les) classe(s) d'aptitude à l'usage

Tableau 8 : Valeurs seuils pour l'altération « corrosion ». D'après SEQ-Eaux souterraines, 2003

Altération Formation de dépôts						
Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
pH		5.00				
Eh - selon la valeur du pH ⁽¹⁾						
pH ≤ 3.5		1500				
3.5 < pH ≤ 9.6	mV	(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

Le motif  indique dans les tableaux ci-après que le paramètre ne décrit pas la (ou les) classe(s) d'aptitude à l'usage

Tableau 9 : Valeurs seuils pour l'altération « formation de dépôts ».
D'après SEQ-Eaux souterraines, 2003

Afin de disposer d'éléments sur la qualité de la ressource à l'échelle du territoire alsacien et complémentaires à la cartographie du potentiel géothermique TBE dressée dans le cadre de l'étude, une analyse a été réalisée à partir des données de la base de donnée [ADES](#).

Ainsi, plusieurs paramètres ont été retenus dans le cahier des charges : potentiel hydrogène (pH), dureté totale, titre alcalimétrique (TA), titre alcalimétrique complet (TAC), conductivité, teneur en fer et teneur en manganèse.

Les 7 paramètres retenus concernent 12 codes SANDRE :

- [1302] Potentiel en Hydrogène (pH)
- [6569] pH après marbre
- [6488] pH d'équilibre
- [1345] Dureté totale
- [1346] Titre alcalimétrique (T.A.)
- [1347] Titre alcalimétrique complet (T.A.C.)
- [6544] Titre Alcalimétrique Complet (TAC) après marbre
- [1303] Conductivité à 25°C
- [1304] Conductivité à 20°C
- [1798] Conductivité électrique de l'eau non ramenée à une température conventionnelle
- [1393] Fer
- [1394] Manganèse

Le traitement a été réalisé avec l'outil de valorisation des données de qualité des eaux souterraines [QUALISTAT 3](#) développé par le BRGM pour l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

Les résultats sont communiqués à titre indicatif et ne sont pas pris en compte dans l'évaluation du potentiel géothermique. Aucune prescription ou préconisation n'est envisageable à ce stade. Il incombera au maître d'œuvre et/ou maître d'ouvrage en charge d'un projet d'exploitation de la ressource à usage géothermique de vérifier la compatibilité du projet et des équipements prévus avec la qualité de la ressource (analyses chimiques et suivi des paramètres caractéristiques).

Les teneurs moyennes réparties par classe de valeur seront mises à disposition à l'échelle de chaque maille 500 x 500 et pour chaque nappe considérée dans l'atlas en ligne sur le site geothermie.fr / espace régional.

5.2. POTENTIEL HYDROGENE

Le potentiel hydrogène indique la concentration en ions hydrogène (H⁺) présents dans l'eau ; il renseigne sur le caractère neutre (pH = 7), acide (pH <7) ou basique/alcalin (pH >7) d'une eau.

Le potentiel hydrogène traduit la tendance agressive ou entartrante de l'eau souterraine captée pour un usage tel que la géothermie TBE. Ainsi une baisse du pH favorisera le caractère agressif et une augmentation le caractère entartrant ou incrustant.

Le SEQ Eaux souterraine propose pour le pH une gamme de valeurs seuils adaptées à l'usage énergétique et qui permet de rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage et du risque de corrosion et de formation de dépôts.

La seule mesure du pH ne suffit pas à conclure sur l'aptitude de l'eau souterraine pour satisfaire l'usage énergétique par la prise en compte des risques de corrosion et de formations de dépôts. Il faut également connaître la valeur du titre alcalimétrique, la dureté, la minéralisation et la teneur en certains paramètres chimiques plus spécifiques du contexte local.

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (8 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (liée au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (77 % des mailles avec valeur) rendent compte d'une « aptitude bonne » sur ce paramètre. Les secteurs concernés sont globalement la nappe d'Alsace, l'Alsace bossue (hors grès du Trias), le Sundgau et les 2/3 sud du socle.

Paramètre	potentiel hydrogène		
Unité	-		
Nombre de points avec analyse Valeur retenue = quantile 0.9 par point	4699		
Nombre de mailles avec valeur valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2643		
Pourcentage de mailles avec valeur	8%		
Gamme de valeur retenue pour la cartographie	<6	63	2%
	6 à 7	534	20%
	7 à 9.8	2045	77%
	>9.8	1	0%
	<i>total</i>	2643	100%

Tableau 10 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de pH en Alsace

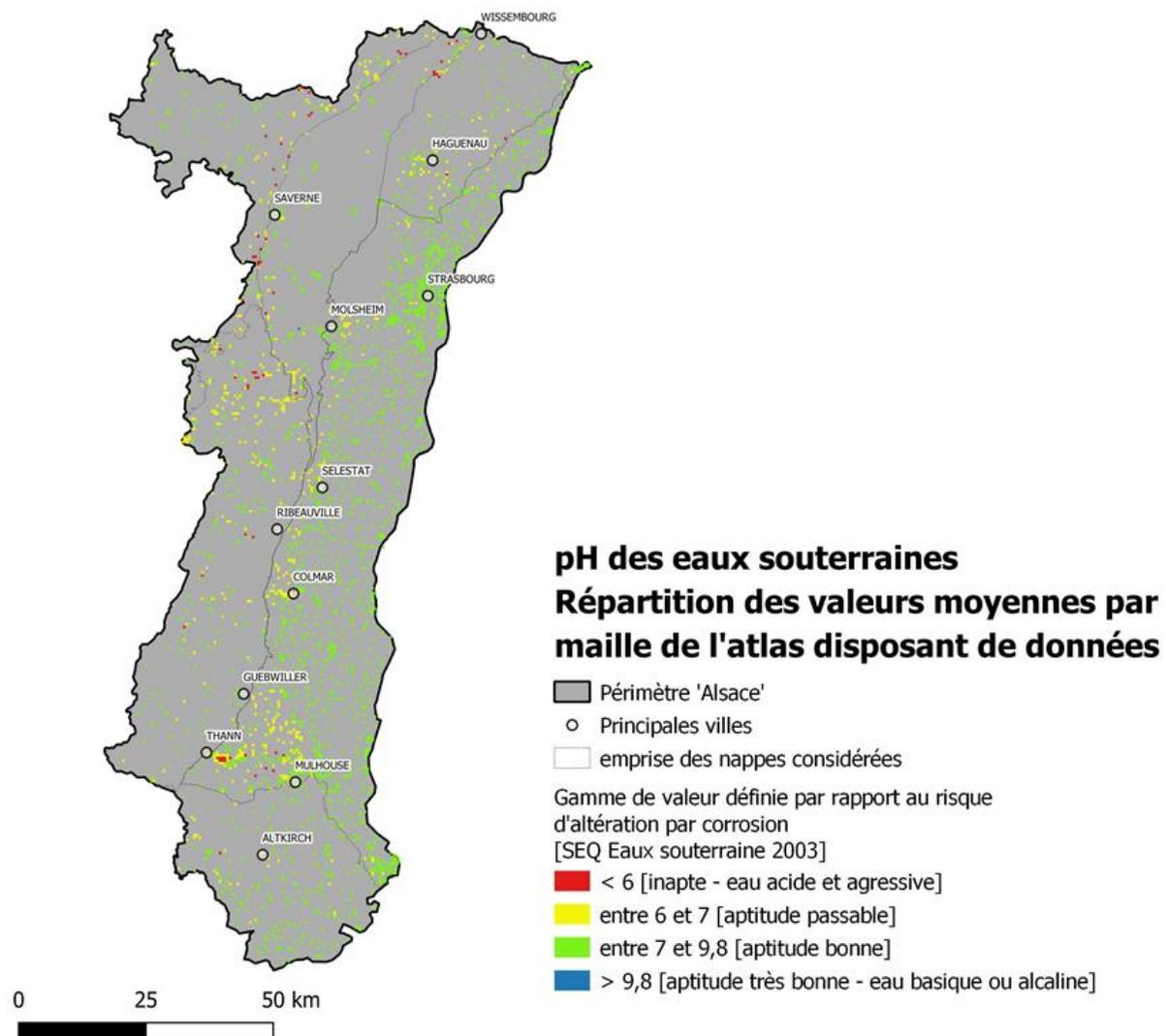


Figure 66 - Carte du paramètre « potentiel hydrogène » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

5.3. CONDUCTIVITE

Les eaux souterraines, au contact des sols et des roches, se chargent en sels minéraux et oligo-éléments d'origine naturelle qui constituent sa charge minérale ou minéralisation. En cas de pollution des sols ou des eaux, d'échanges avec d'autres nappes ou de modifications des conditions d'oxydo-réduction au sein de la nappe ou du forage, cette minéralisation est amenée à évoluer.

La minéralisation d'une eau peut se mesurer en déterminant le « résidu sec »¹³ ou en estimant sa conductivité électrique en micro-Siemens/cm (ou à l'inverse sa résistivité en ohm mètre). La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de sels minéraux (ions) dissous dans l'eau.

Ainsi, plus la concentration en minéraux et en oligo-éléments dissous est importante, plus la conductivité sera élevée. Il existe également une relation avec la dureté de l'eau : une eau douce affiche normalement une conductivité basse, et une eau dure une conductivité élevée.

Le SEQ Eaux souterraine propose pour la conductivité des valeurs seuils adaptées à l'usage énergétique et qui permettent de rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage et du risque de corrosion et de formation de dépôts.

La seule mesure de la conductivité ne suffit pas à conclure sur l'aptitude de l'eau souterraine pour satisfaire l'usage énergétique par la prise en compte des risques de corrosion et de formations de dépôts. Il faut également connaître la valeur du titre alcalimétrique, la dureté, du pH et la teneur en certains paramètres chimiques plus spécifiques du contexte local.

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (8 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (lié au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (76 % des mailles avec valeur) rendent compte d'une « aptitude bonne » sur ce paramètre. Les secteurs concernés sont globalement la nappe d'Alsace, le pliocène, l'Alsace bossue (hors grès du Trias) et le Sundgau.

¹³ Cet indicateur permet de déterminer le taux de minéraux recueillis après évaporation d'1 litre d'eau soumis à 180°C. En d'autres termes, on apprécie la quantité de minéraux solides qui s'est formée après avoir fait chauffer 1 litre d'eau à 180°C. Plus une eau est minérale, plus son résidu sec est élevé.

Paramètre	conductivité		
Unité	μS/cm		
<u>Nombre de points avec analyse</u> Valeur retenue = quantile 0.9 par point	5336		
<u>Nombre de mailles avec valeur</u> valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2583		
<u>Pourcentage de mailles avec valeur</u>	8%		
<u>Gamme de valeur retenue pour la cartographie</u>	<180	435	17%
	180 à 1300	1962	76%
	1300 à 3000	119	5%
	3000 à 6000	23	1%
	>6000	44	2%
	<i>total</i>	2583	100%

Tableau 11 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de conductivité en Alsace

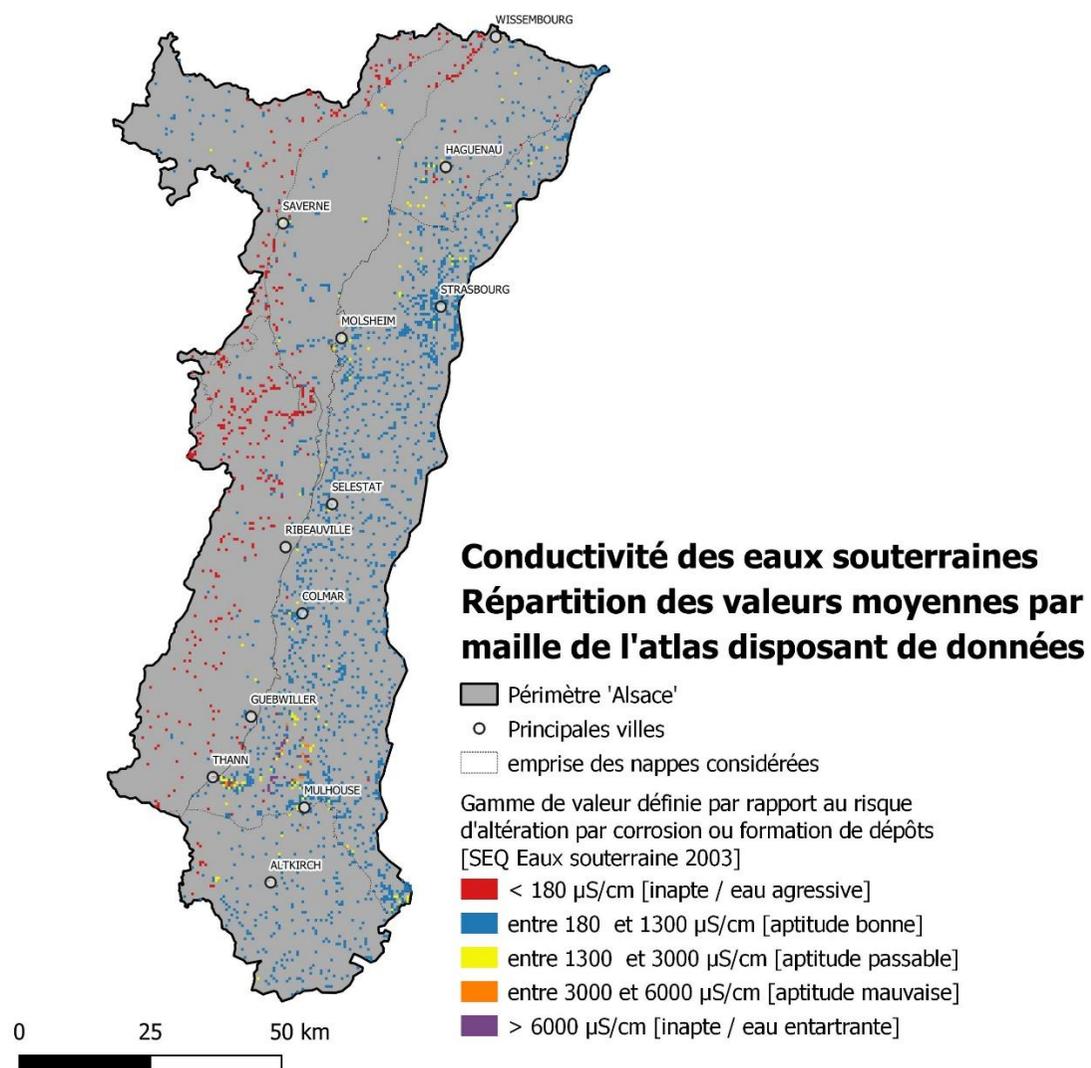


Figure 67 - Carte du paramètre « conductivité » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

5.4. TITRE ALCALIMETRIQUE ET TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET

Le titre alcalimétrique (TA) exprime en degré français (°f) la teneur en carbonates. Le titre alcalimétrique complet (TAC) exprime quant à lui la teneur en carbonates et bicarbonates.

Le SEQ Eaux souterraine ne propose pas, pour les paramètres TA ou TAC, de valeurs seuils pour rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage énergétique et du risque de corrosion et de formation de dépôts. Les seuils sont donc tirés de la bibliographie.

Comme pour les autres paramètres la seule mesure du titre alcalimétrique ne suffit pas à conclure sur l'aptitude de l'eau souterraine à satisfaire l'usage énergétique. Il est nécessaire d'étudier également d'autres paramètres, tels que conductivité, pH, dureté...

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (6 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (lié au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (57 % des mailles avec valeur) rendent compte d'une eau moyenne (ni agressive ni entartrante). Les secteurs concernés sont globalement la nappe d'Alsace et le Jura Alsacien.

Paramètre	titre alcalimétrique		
Unité	°f		
<u>Nombre de points avec analyse</u> Valeur retenue = quantile 0.9 par point	3764		
<u>Nombre de mailles avec valeur</u> valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2154		
<u>Pourcentage de mailles avec valeur</u>	6%		
<u>Gamme de valeur retenue pour la cartographie</u>	<10	674	31%
	10 à 30	1224	57%
	>30	256	12%
	total	2154	100%

Tableau 12 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de TA et TAC en Alsace

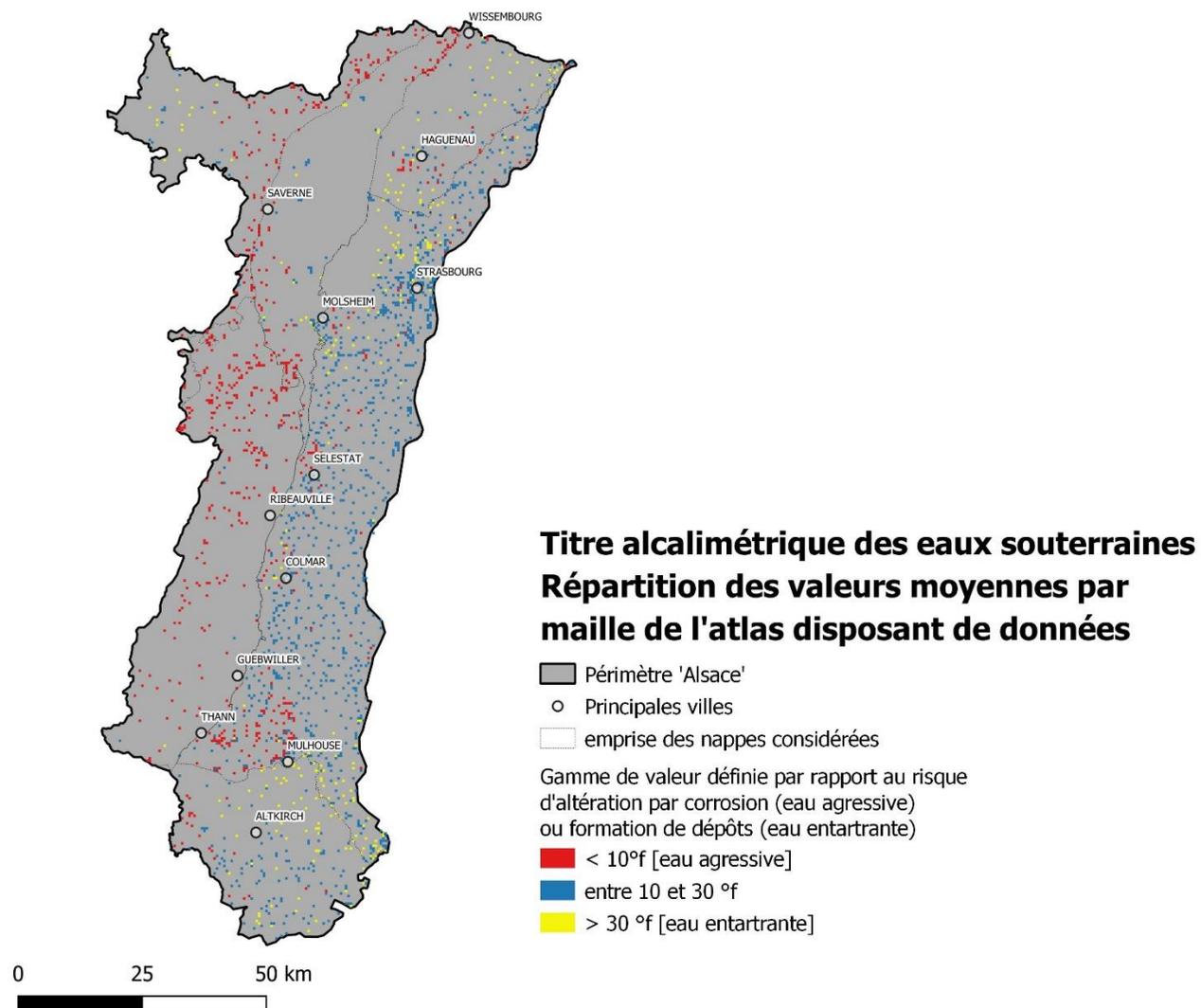


Figure 68 - Carte du paramètre « titre alcalimétrique » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

5.5. DURETE TOTALE OU TITRE HYDROTIMETRIQUE

La dureté ou titre hydrotimétrique (en degré français) traduit la teneur en sels de calcium et de magnésium dans les eaux naturelles.

Comme précédemment, le SEQ Eaux souterraine ne propose pas, pour le paramètre dureté, de valeurs seuils pour rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage énergétique et du risque de corrosion et de formation de dépôts. Les seuils sont donc tirés de la bibliographie.

Comme pour les autres paramètres la seule mesure de la dureté ne suffit pas à conclure sur l'aptitude de l'eau souterraine à satisfaire l'usage énergétique. Il est nécessaire d'étudier également les autres paramètres.

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (6 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (lié au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (59 % des mailles avec valeur) rendent compte d'une eau dure voir très dure (entartrante). Les secteurs concernés sont globalement la nappe d'Alsace et le Sundgau.

Paramètre	dureté		
Unité	°f		
<u>Nombre de points avec analyse</u> Valeur retenue = quantile 0.9 par point	3035		
<u>Nombre de mailles avec valeur</u> valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2135		
<u>Pourcentage de mailles avec valeur</u>	6%		
<u>Gamme de valeur retenue pour la cartographie</u>	<8	399	19%
	8 à 15	144	7%
	15 à 25	317	15%
	25 à 35	625	29%
	>35	650	30%
	total	2135	100%

Tableau 13 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les valeurs de dureté en Alsace

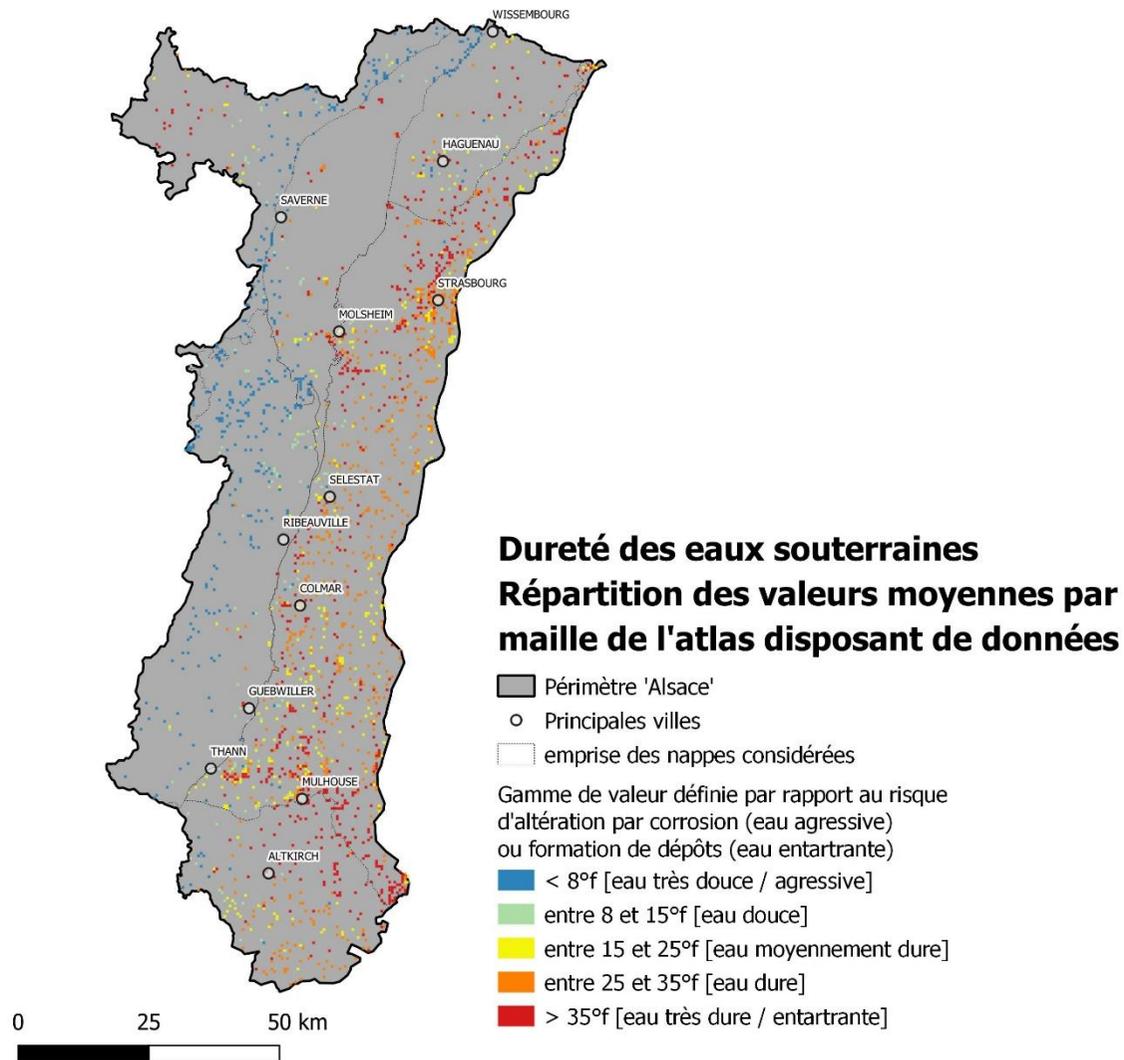


Figure 69 - Carte du paramètre « dureté » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

5.6. TENEUR EN FER

La présence de fer à des teneurs significatives induit un risque accru d'altération par corrosion au même titre que le manganèse ou le chlore (agressivité de l'eau).

Le SEQ Eaux souterraine ne propose pas, pour le paramètre fer, de valeurs seuils pour rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage énergétique et du risque de corrosion et de formation de dépôts.

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (7 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (lié au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (73 % des mailles avec valeur) rend compte d'une teneur inférieure à 200 µg/L (valeur limite en France et concentration maximale admissible CEE). L'intégralité de la zone d'étude montre ainsi une aptitude plutôt favorable (eau peu agressive) à l'exception de zones localisées (piedmont des Vosges et zones urbaines).

Paramètre	fer		
Unité	µg/L		
Nombre de points avec analyse Valeur retenue = quantile 0.9 par point	3352		
Nombre de mailles avec valeur valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2356		
Pourcentage de mailles avec valeur	7%		
Gamme de valeur retenue pour la cartographie	<50	1146	49%
	50 à 200	559	24%
	200 à 2000	405	17%
	>2000	246	10%
	<i>total</i>	2356	100%

Tableau 14 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les teneurs en fer en Alsace

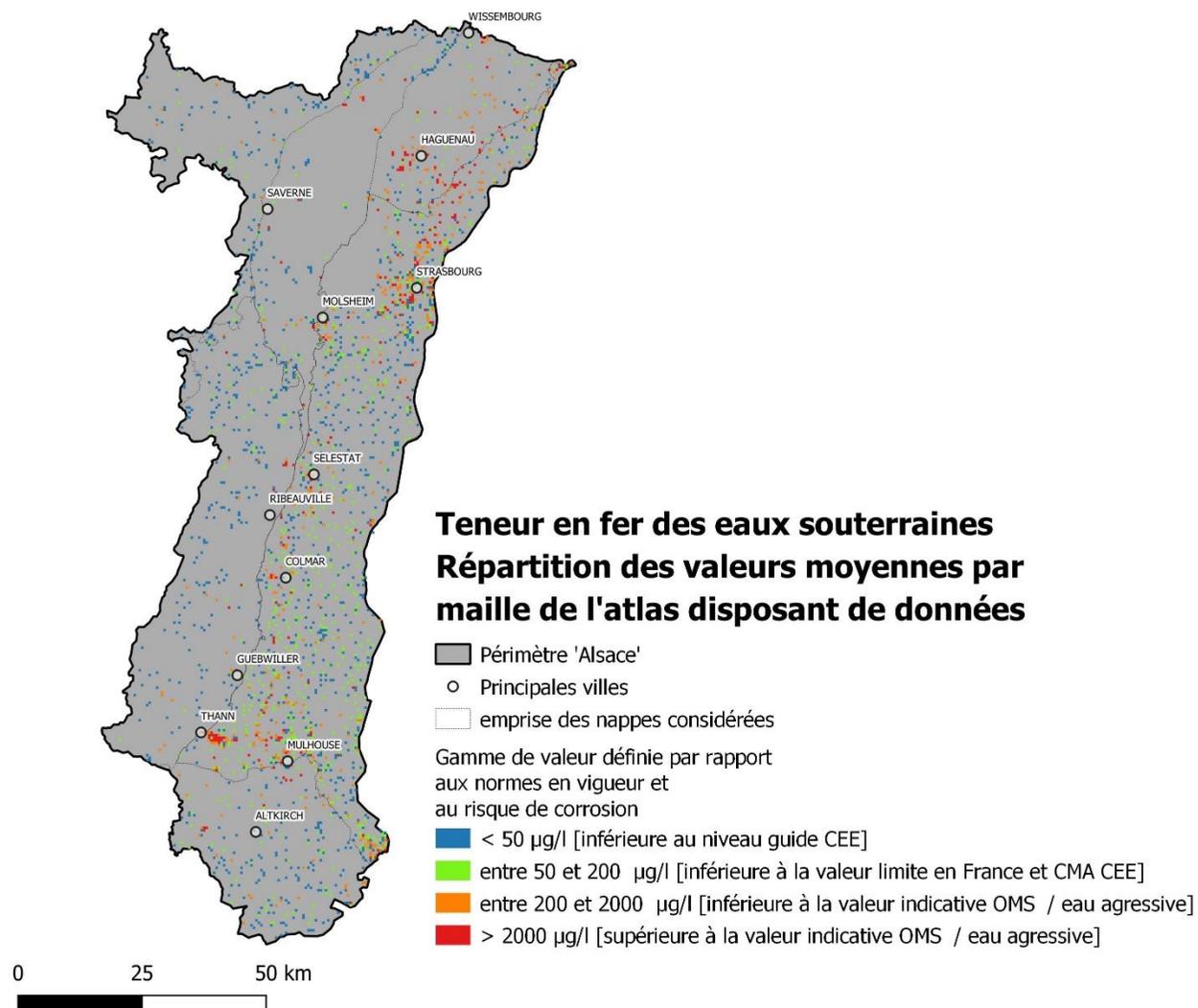


Figure 70 - Carte du paramètre « fer » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

5.7. TENEUR EN MANGANESE

La présence de manganèse à des teneurs significatives induit un risque accru d'altération par corrosion au même titre que le fer ou le chlore (agressivité de l'eau).

Le SEQ Eaux souterraine ne propose pas, pour le paramètre manganèse, de valeurs seuils pour rendre compte de l'aptitude à satisfaire l'usage énergétique et du risque de corrosion et de formation de dépôts.

La figure suivante rend compte de la spatialisation des mesures du paramètre sur les seules mailles disposant de points de mesure (6 % des 34297 mailles composant le territoire 'Alsace'). Il n'a pas été jugé pertinent de recourir à la spatialisation par interpolation à l'échelle de chaque nappe, étant donné la représentativité très ponctuelle de ce type de mesure (lié au milieu, à l'anthropisation, aux méthodes de prélèvement et d'analyse ou à l'ouvrage lui-même).

On remarque qu'une majorité de mailles (71 % des mailles avec valeur) rend compte d'une teneur inférieure à 50 µg/L (norme française, norme européenne, valeur indicative OMS). Comme pour le fer, l'intégralité de la zone d'étude montre ainsi une aptitude plutôt favorable (eau peu agressive) à l'exception de zones localisées (piedmont des Vosges et zones urbaines).

Paramètre	manganèse		
Unité	µg/L		
Nombre de points avec analyse Valeur retenue = quantile 0.9 par point	2957		
Nombre de mailles avec valeur valeur retenue = moyennes des quantiles 0.9 par zone	2148		
Pourcentage de mailles avec valeur	6%		
Gamme de valeur retenue pour la cartographie	<50	1530	71%
	50 à 150	173	8%
	150 à 1000	285	13%
	>1000	160	7%
	total	2148	100%

Tableau 15 – Synthèse des résultats de la spatialisation pour les teneurs en manganèse en Alsace

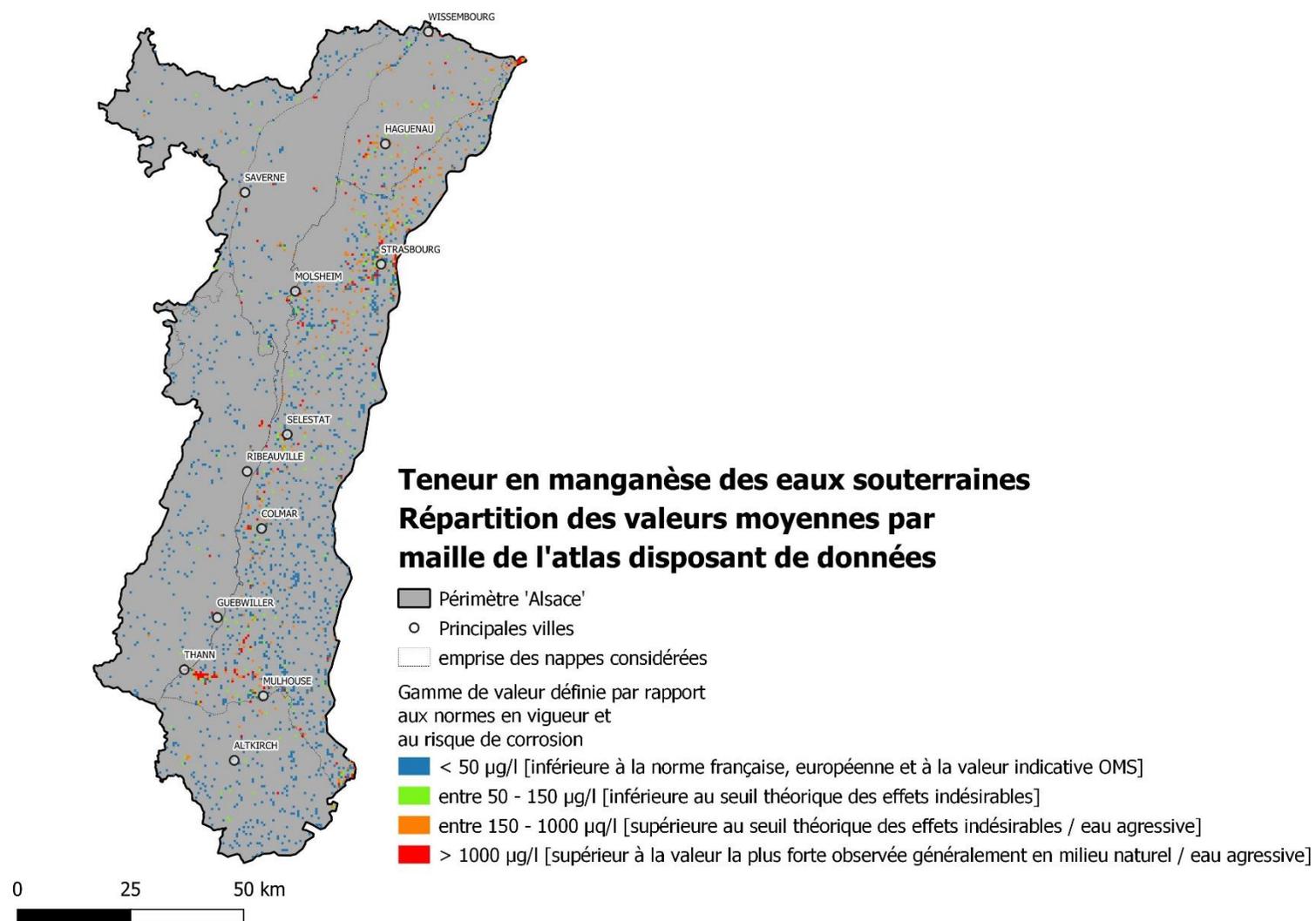


Figure 71 - Carte du paramètre « manganèse » spatialisé par classe de valeur (maillage 500x500)

6. Conclusions

La cartographie de la ressource géothermique très basse énergie sur nappe sur le territoire alsacien a été effectuée en cohérence avec la méthodologie nationale et dans la mesure du possible avec les 2 autres atlas régionaux établis précédemment sur la Lorraine (2007) et la Champagne-Ardenne (2009). Suite à la finalisation de l'atlas « alsacien », il conviendra d'envisager ultérieurement la mise en cohérence, l'harmonisation et l'actualisation des informations à l'échelle régionale.

L'atlas a été établi, avec, comme hypothèse de base le fait que les informations relatives à la géothermie en nappe seraient prépondérantes ; la géothermie hors nappe / sur sonde n'a pas été étudiée. Les zones moins perméables voire imperméables sont associées à une ressource géothermique sur nappe très faible et la solution d'une géothermie TBE sur sonde devra être recherchée en priorité.

A ce jour, il n'existe pas de cartographie du potentiel géothermique sur sonde en région Grand Est mais la méthodologie existe¹⁴ et son application pourrait être envisagée à l'échelle des territoires concernés. Pour information la cartographie du potentiel géothermique sur sonde existe sur le territoire bourguignon¹⁵ au sud de la zone d'étude.

La zone d'étude a été découpée en 7 nappes et selon un maillage de 500 mètres sur 500 mètres. Pour chaque maille, il a été renseigné le potentiel géothermique sur nappe classé de fort (en bleu pour traduire le caractère favorable) à très faible (en rouge pour traduire le caractère défavorable) calculé selon la méthodologie nationale à partir des critères préalablement définis et analysés à l'échelle de chaque nappe considérée : profondeur d'accès à la nappe, productivité (débits) et température.

Les données utilisées pour réaliser cet atlas sont généralement des mesures ponctuelles provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), d'études ponctuelles ou de travaux d'opérateurs tels que l'ARS ou l'APRONA. Pour tenir compte de l'hétérogénéité de la répartition de ces données, elles ont été traitées par interpolation et analyse statistique sectorisée (nappe ou entité hydrogéologique BDLISA), moyennées à l'échelle de chaque maille et corrigées le cas échéant dans le cadre d'une approche naturaliste (à dire d'expert).

Il faut préciser que seule la ressource sur nappe potentiellement utilisable à moins de 200 m de profondeur est concernée. L'atlas ne prend en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux, ni l'occupation du sol, ni la qualité de la ressource qui pourraient constituer des freins à l'utilisation de cette ressource pour des opérations de géothermie TBE.

Le résultat obtenu pour le potentiel géothermique sur aquifère exprimé en pourcentage de couverture des nappes du territoire alsacien est favorable à 46 % (toutes nappes confondues) et à 91 % en nappe d'Alsace.

Les données seront disponibles à court terme sur le site <https://www.geothermies.fr/>.

¹⁴ Rapport BRGM/RP-68858-FR – Maragna et al., 2019

¹⁵ Rapport BRGM/RP-66441-FR – Doney et al., 2017

Rappels sur les limites de l'atlas

La représentativité de l'information collectée et utilisée dans le cadre de l'étude n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire étudié et cela n'a pas permis de spatialiser les données de façon optimale à l'aide de la géostatistique conduisant à une utilisation complémentaire des méthodes statistiques, naturalistes ou encore par sectorisation (nappe et entités hydrogéologiques BDLISA).

La qualité des données utilisées s'est également avérée variable selon les paramètres pouvant ainsi engendrer quelques approximations. Le critère « productivité », faute de données suffisamment nombreuses dans certains secteurs, a été défini également à partir des valeurs de débit réglementaire d'exploitation des captages AEP (Alimentation en Eau Potable) communiqué par l'ARS. 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, il faut également mettre en avant que la méthode employée pour définir le potentiel géothermique très basse énergie, sur la base des trois critères (profondeur d'accès à la nappe, productivité, température) ne nécessite pas une précision importante de la donnée. Le processus est en effet établi selon un système d'index et 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 1/50 000. Malgré cela et du fait des 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.

En résumé, il convient de préciser que l'atlas constitue une première approche à destination des maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales ou particuliers afin qu'ils puissent examiner la possibilité d'utiliser ou pas la géothermie TBE sur nappe lors d'un choix énergétique.

Les informations constituant l'atlas ne peuvent et ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'étude compétents à l'échelle parcellaire.

7. Bibliographie

BAUDU. R. ; BERNARD. J. ; GEORGEL. J.M. ; GRIVEAU. P. ; RUGO. R. (1980) - APPLICATION DES METHODES DE PROSPECTION ELECTRIQUE DIPOLAIRES A L'ETUDE GEOTHERMIQUE DU FOSSE RHENAN SUPERIEUR. BRGM/80-SGN-586-GPH, 68 p. 8 cartes

BECCALETTO L. ; CAPAR L. ; CRUZ MERMERY D. ; DEZAYES C. ; ELSASS P. ; URBAN S. (2013) - Potentiel géologique profond du Fossé rhénan supérieur. Partie 1. Rapport final. BRGM/RP-61945-FR, 115 p.

BOURGINE B. ; FILHINE TRESSARIEU T. ; MONNOT P. ; NGUYEN-THE D. ; DENIS L. ; ROBELIN C. (2007) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains. Rapport final . BRGM/RP-54987-FR, 84 p., 1 CD

CHABART M. ; PINSON S. ; BERNON N. (2012) - Atlas du potentiel très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne. Rapport final. BRGM/RP-60024-FR, 116 p., 5 ann.

DAESSLE M. (1983) - Synthèse documentaire sur la grande oolithe dans le département du Haut-Rhin. BRGM/83-SGN-007-ALS, 28 p. 3 pht., 5 cartes

DEZAYES C. ; CAPAR L. ; BECCALETTO L. ; LEROUGE C. (2011) - Etude de la partie Trias - Permien - toit du socle dans le Fossé Rhénan pour des applications de géothermie profonde. Rapport final. BRGM/RP-60387-FR, 101 p., 4 ann.

DEZAYES C. ; THINON I. ; COURRIOUX G. ; TOURLIERE B. ; GENTER A. (2007) - Estimation du potentiel géothermique des réservoirs classiques du Trias dans le fossé rhénan. Rapport final.. BRGM/RP-55729-FR, 72 p

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.

DURST P., MIDOT D., HERBAUX M. (CEREMA), SCHOMBURGK S., FOURNIGUET G., BARRAS A.V. (2014) - Cartographie des risques liés à la géothermie de minime importance. Rapport final. BRGM/RP-63616-FR, 100 p., 55 fig., 10 tabl., 3 ann.

LE NINDRE Y.M. (1995) - Synthèse cartographique a 1/250 000 des réservoirs aquifères du bassin Rhin-Meuse. Rapport final. BRGM/RR-38618-FR, 36 p. 2 pht. Rapport BRGM RP59294

MARAGNA C. ; BAUDOIN V. ; HAMEAU S. ; BAYNAL E. (2019) - Projet REPRESS : Collecte, analyse et bancarisation de rapports de tests de réponse thermique et estimation du potentiel des sondes géothermiques verticales. Rapport final.. BRGM/RP-68858-FR, 50 p., 2 ann.

MUNCK F. ; WALGENWITZ F. ; MAGET P. (1979) - SYNTHESE GEOTHERMIQUE DU FOSSE RHENAN SUPERIEUR. GEOTHERMISCHE SYNTHESE DES OBERRHEINGRABENS. BRGM/RR-29320-FR, 85 p. 23 cartes

NGUYEN-THE D. ; OLLAGNIER S. ; PETRIGNETM. ; THONNON J. ; JOANNES O. (2010) - Carte piézométrique de la nappe des grès du Trias inférieur en 2010. BRGM/RP-59294-FR, 30 p., 2 ann.

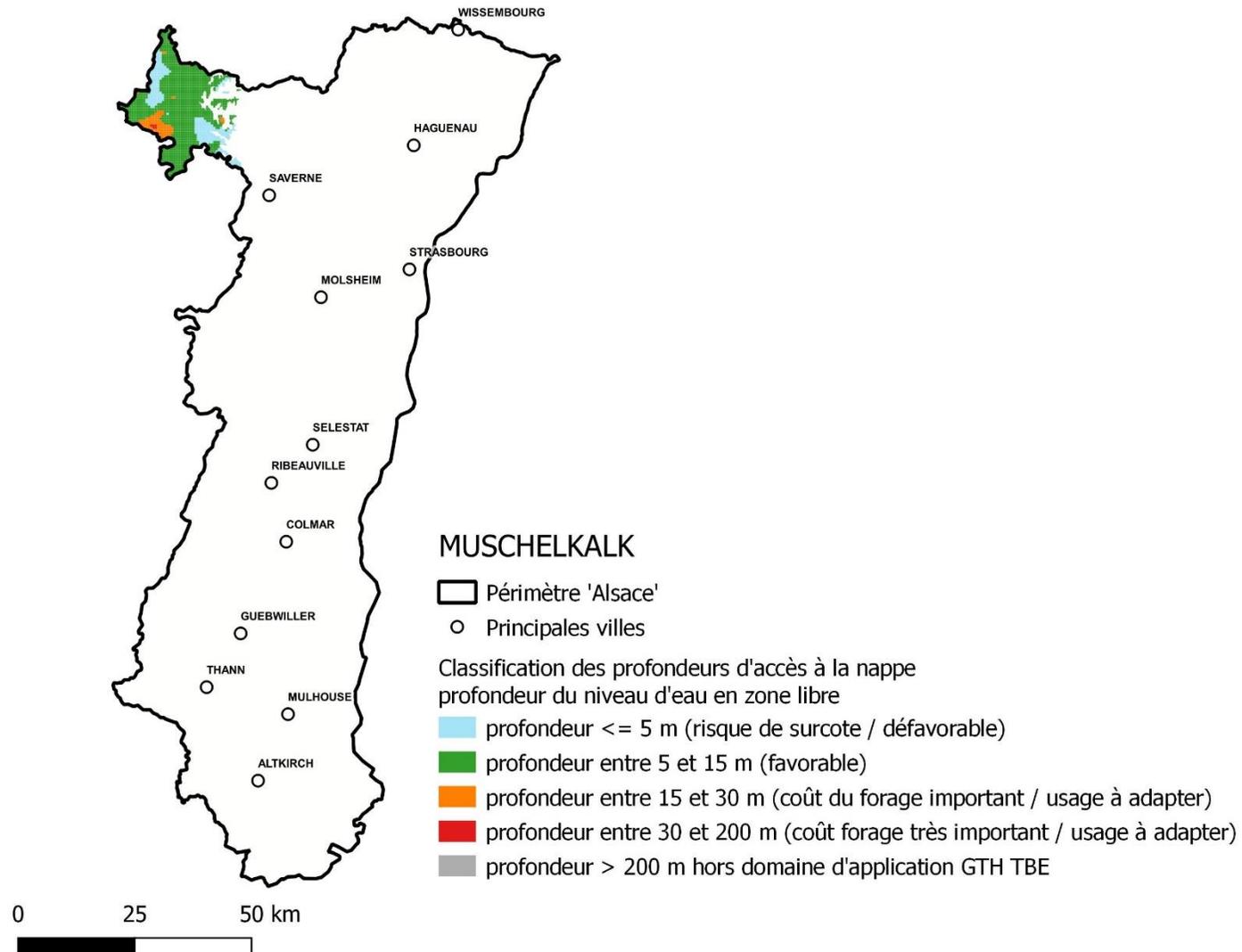
URBAN S., BOUCHER J. (2011) – Région Alsace. Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan – Programme 2008-2010. Rapport final BRGM/RP-59978-FR.

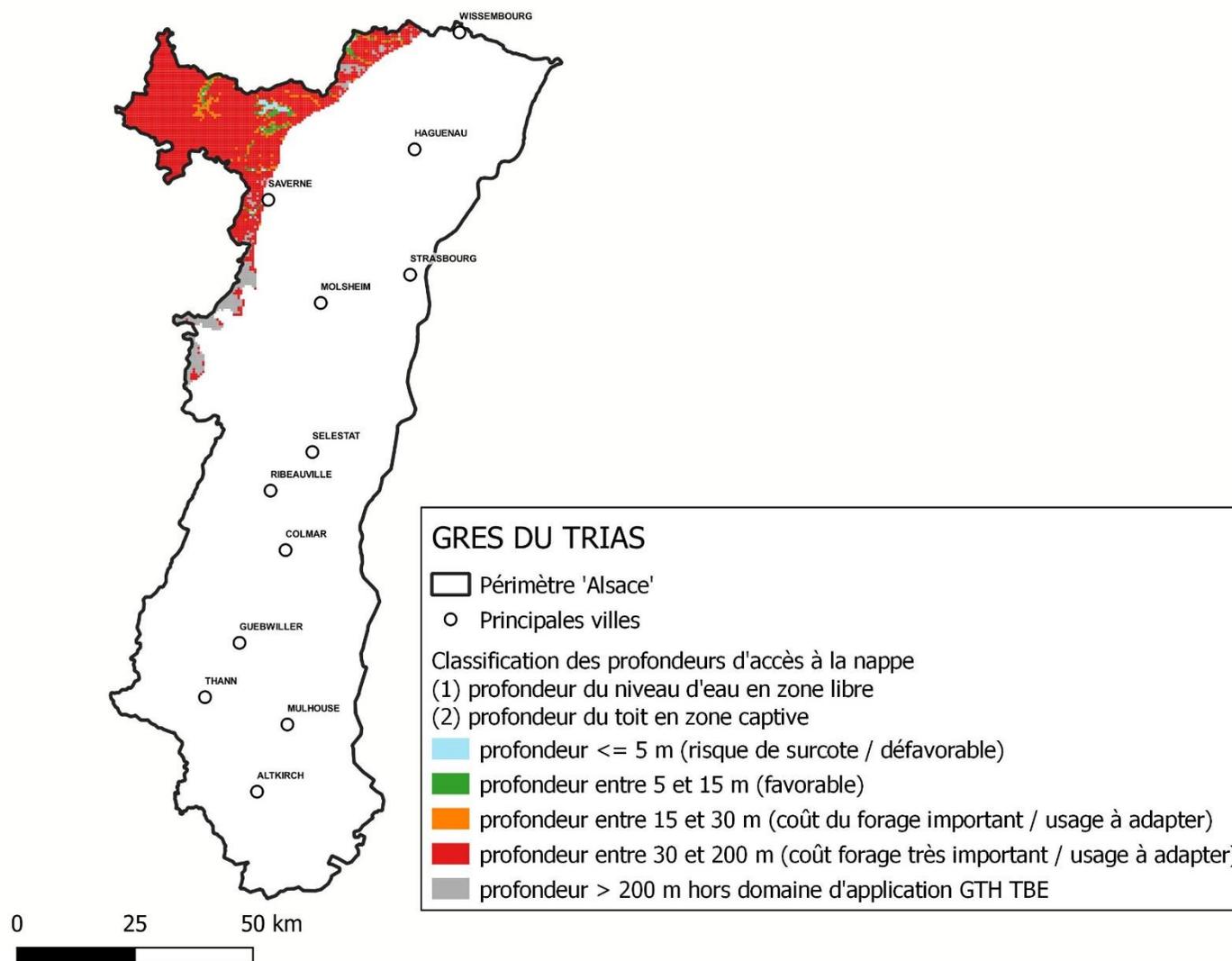
Annexe 1 :

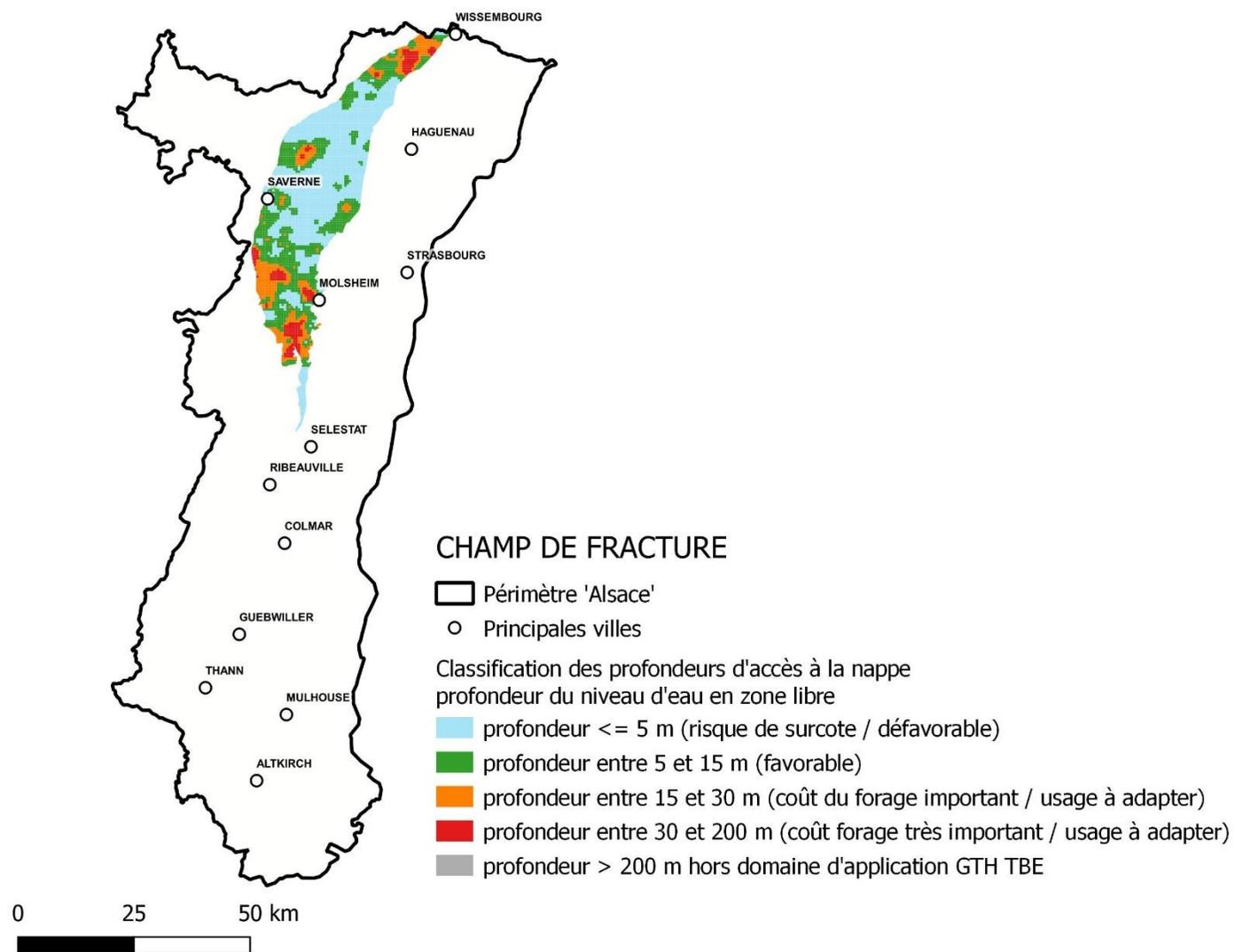
Définition des principales formations aquifères à partir des entités hydrogéologiques BDLISA niveau 3

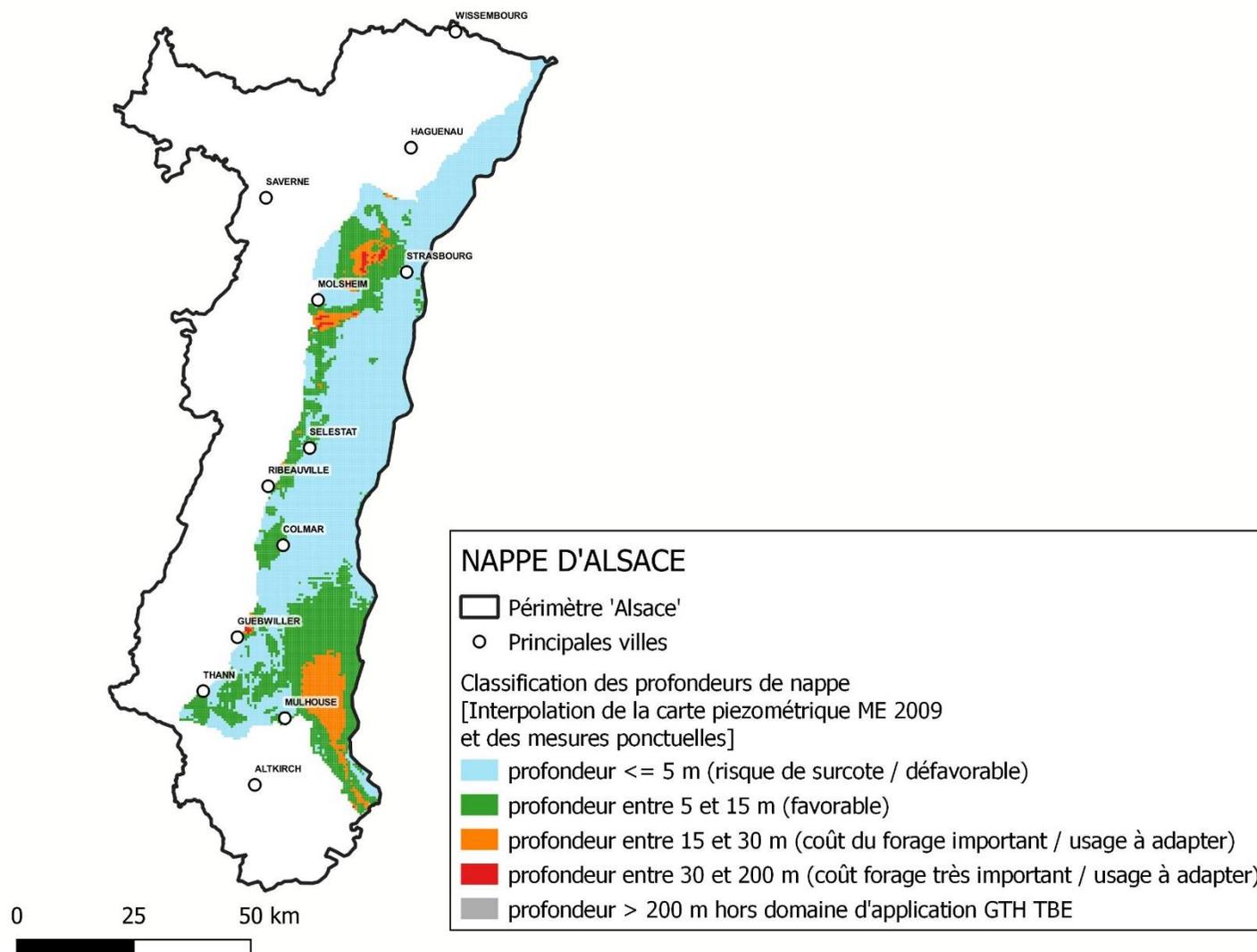
Annexe 2 :

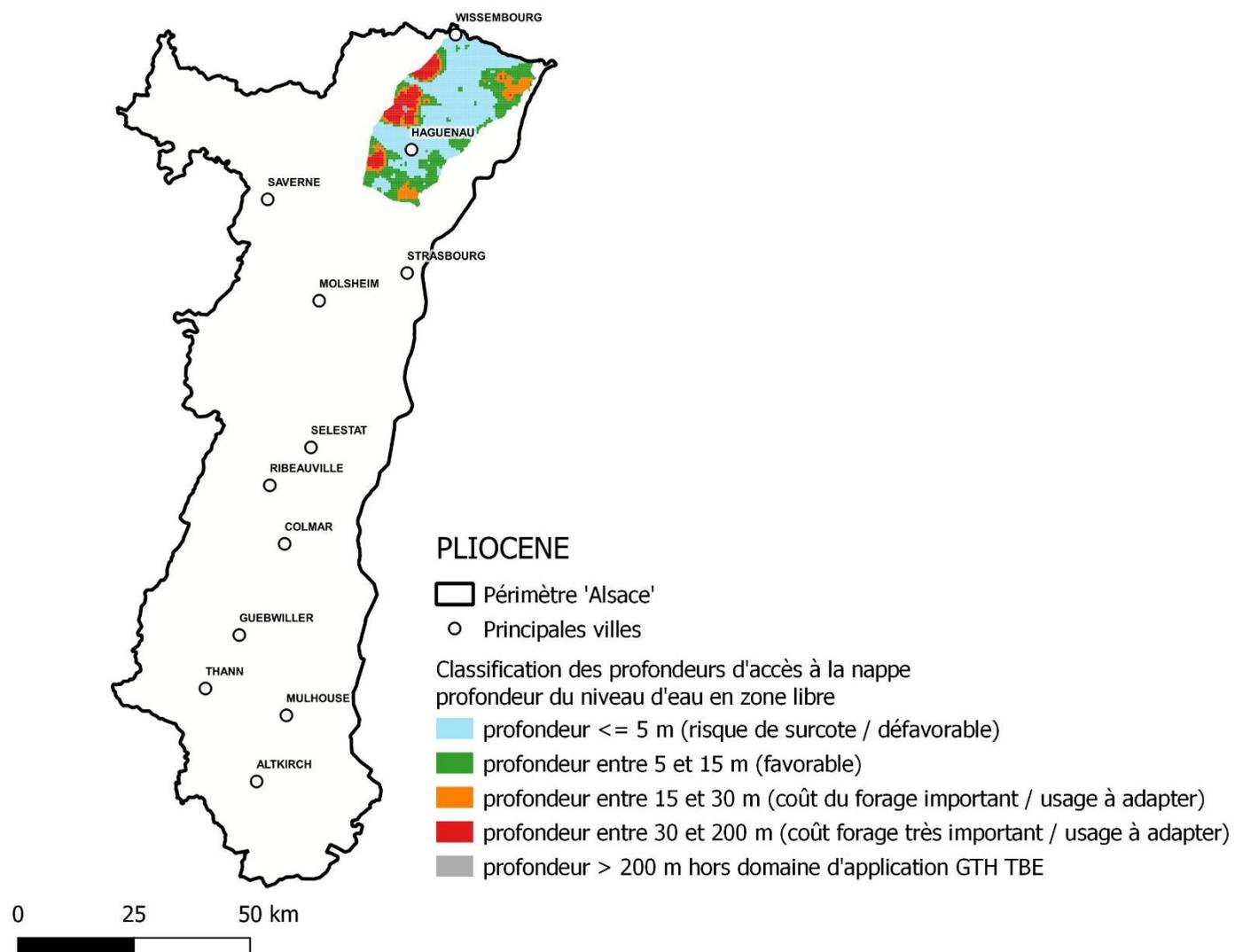
Cartes du critère spatialisé « profondeur d'accès à la nappe » par nappe et classe de valeur

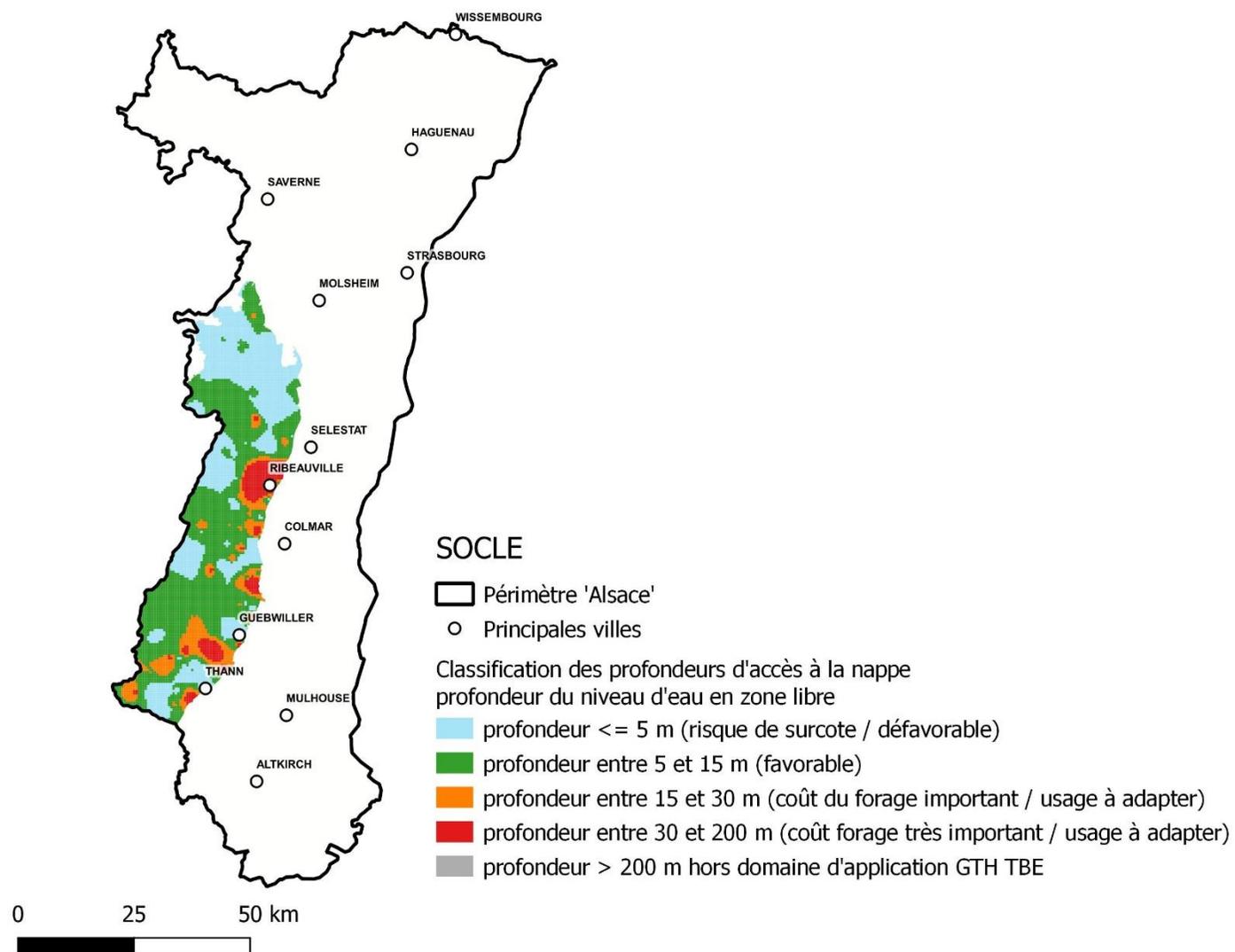


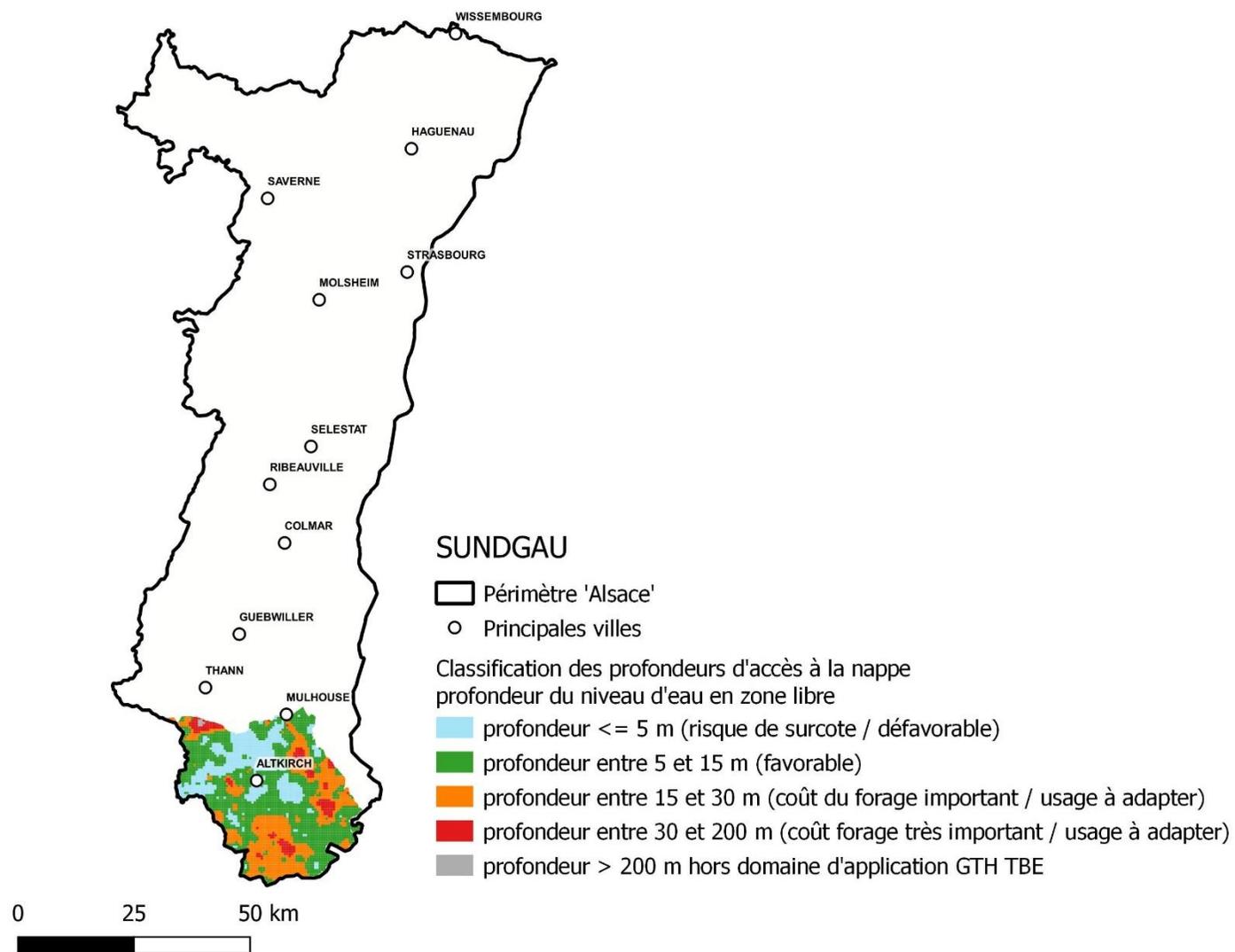






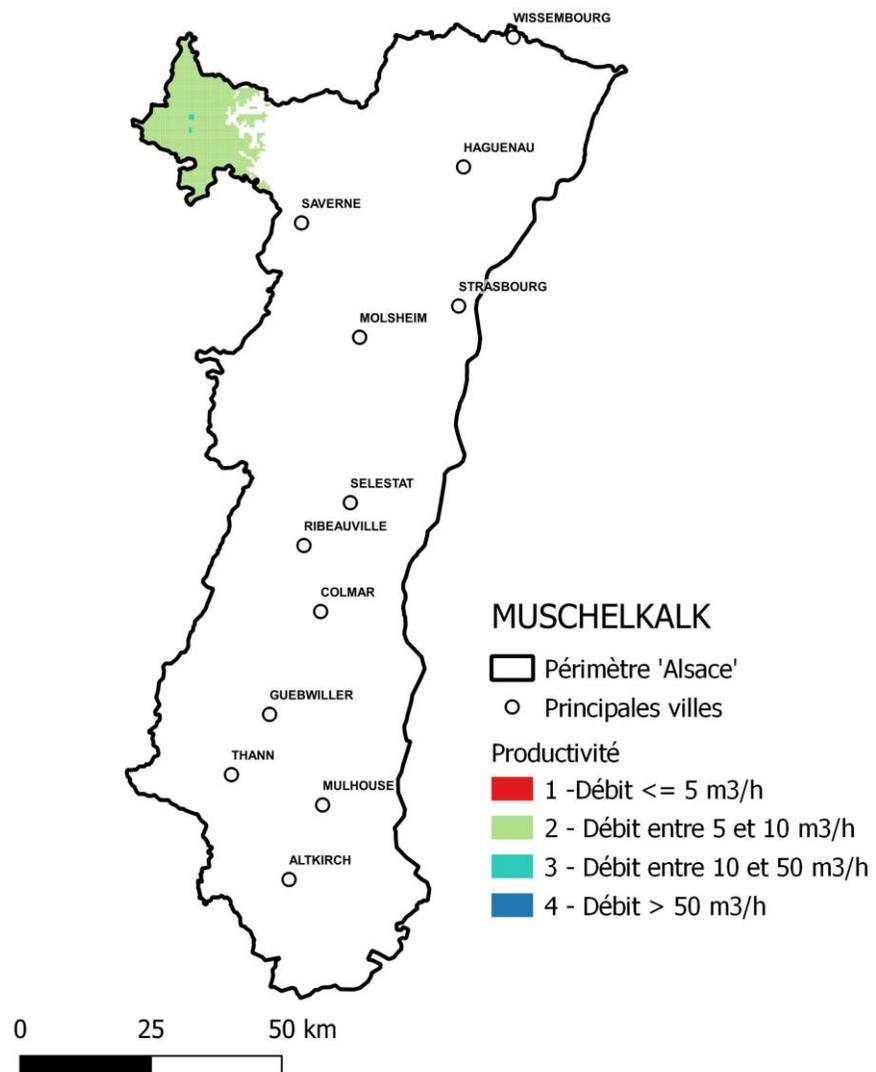


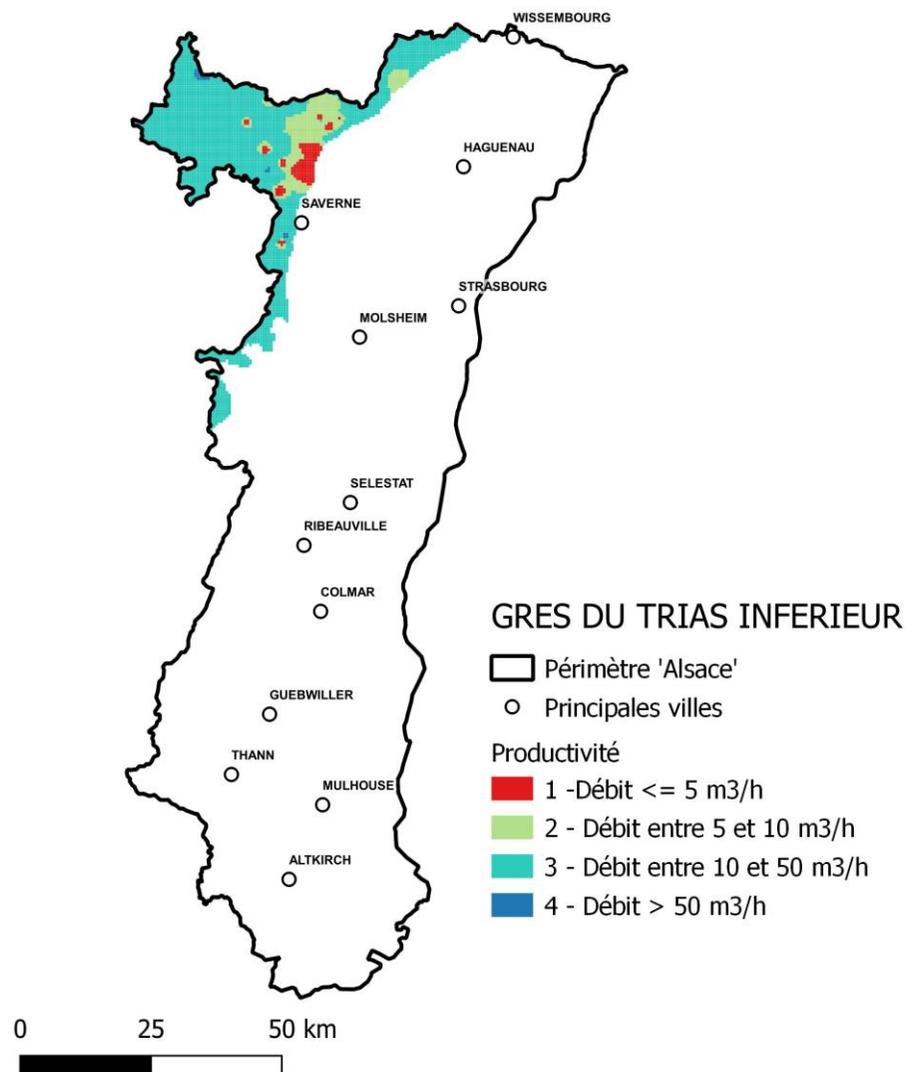


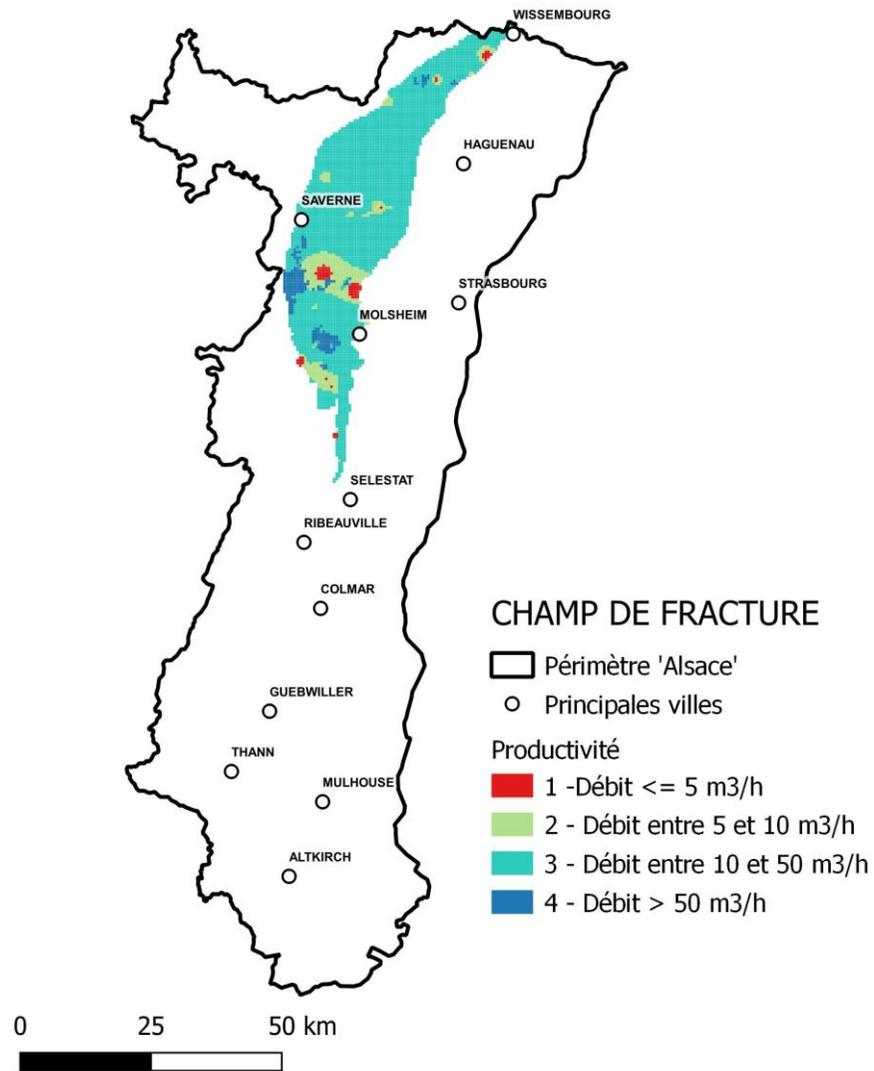


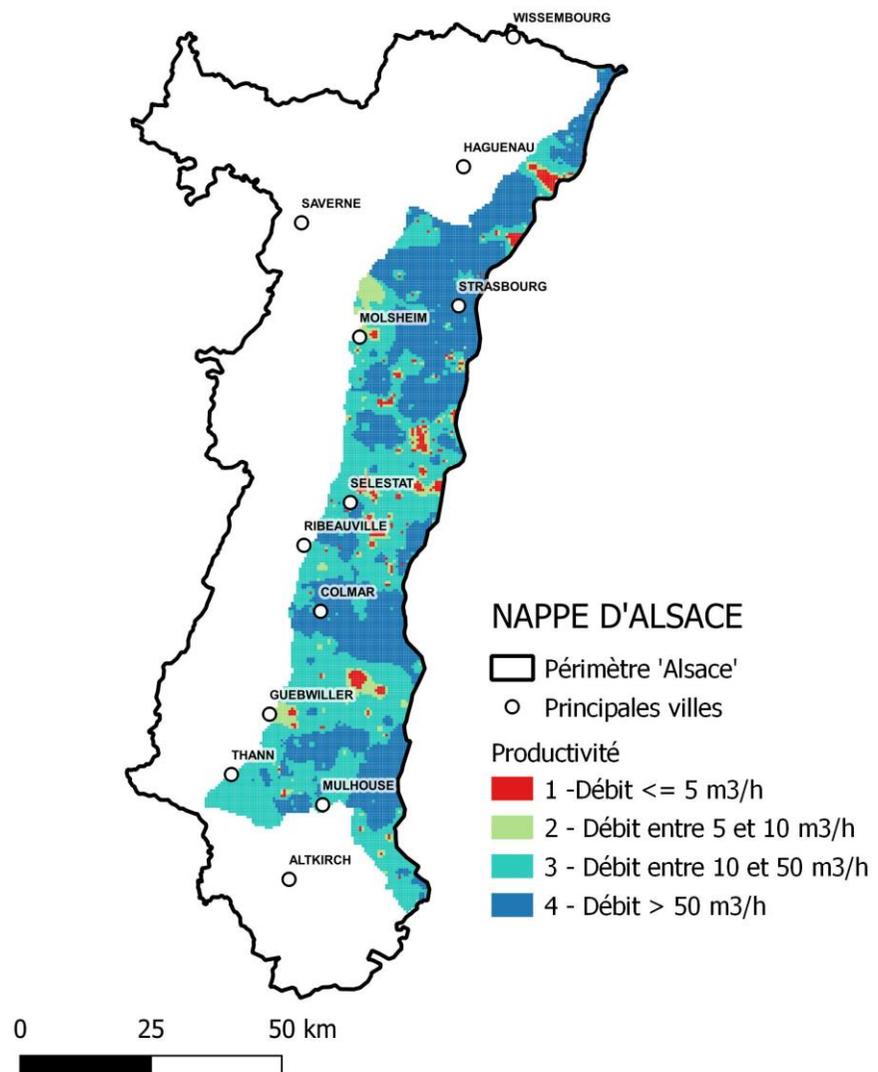
Annexe 3 :

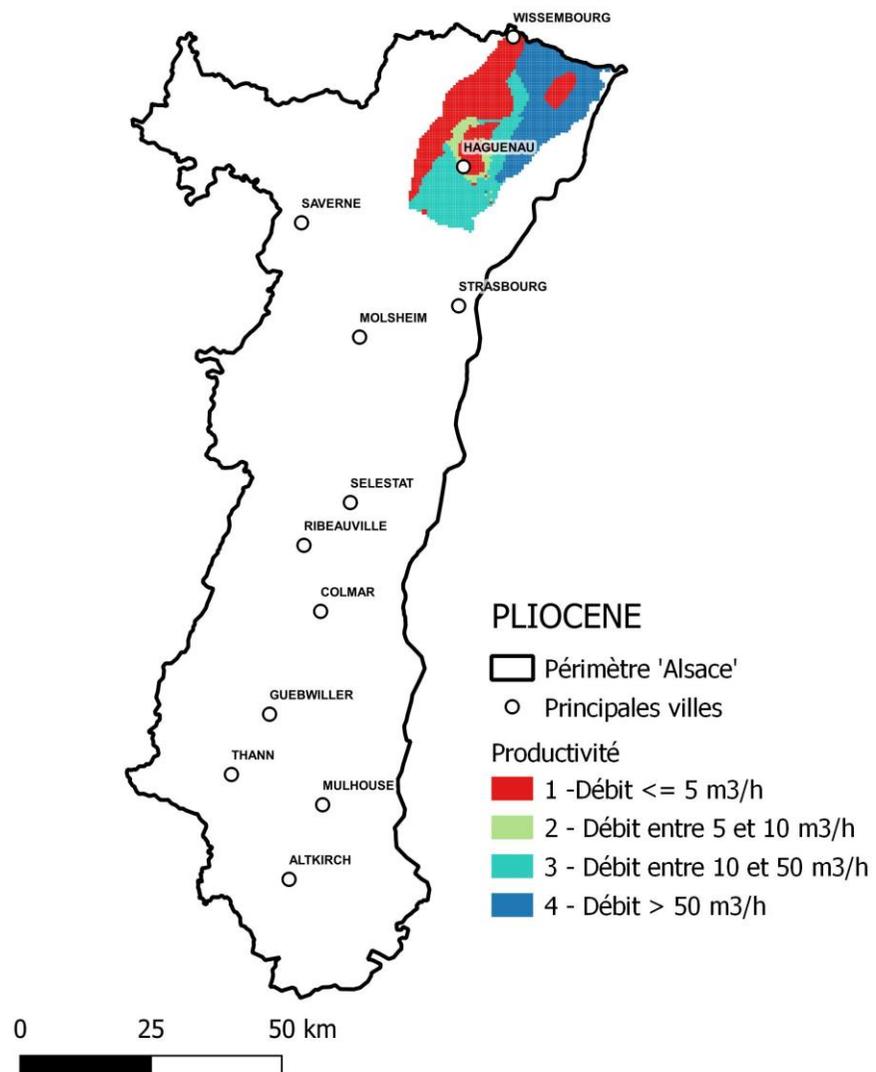
Cartes du critère spatialisé « productivité » par nappe et classe de valeur

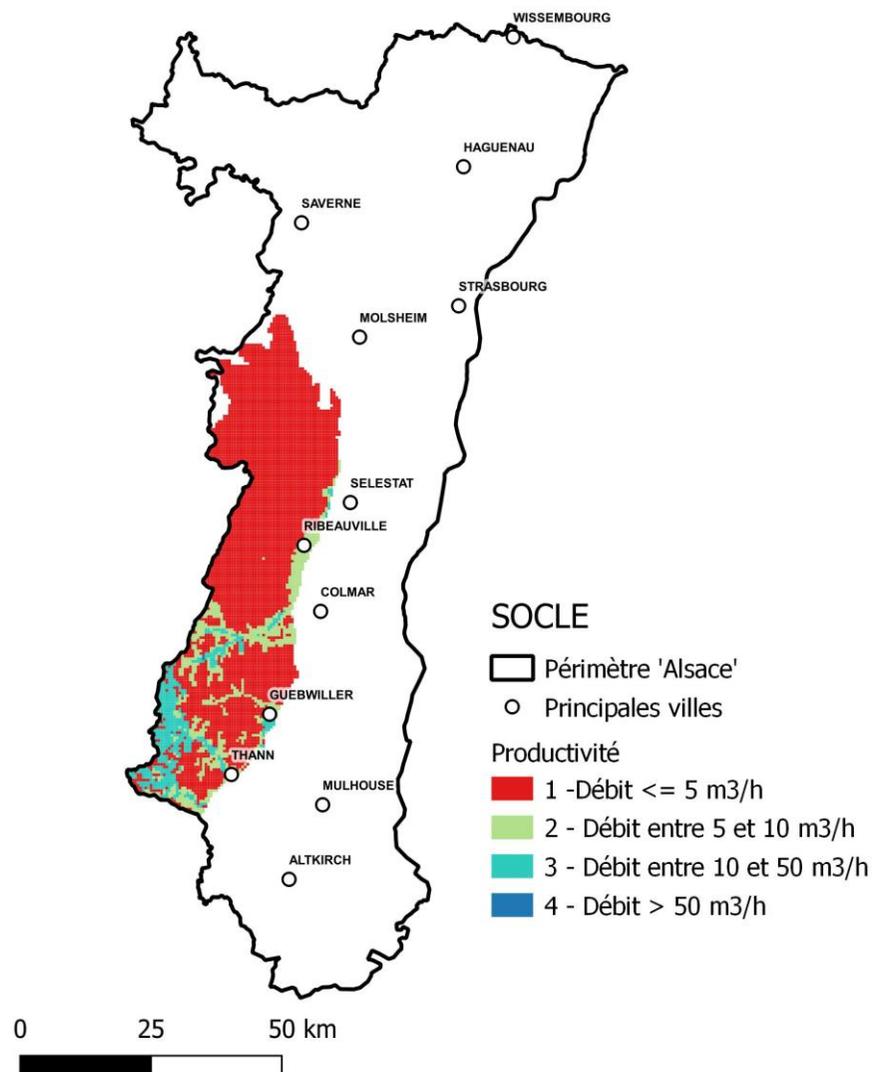


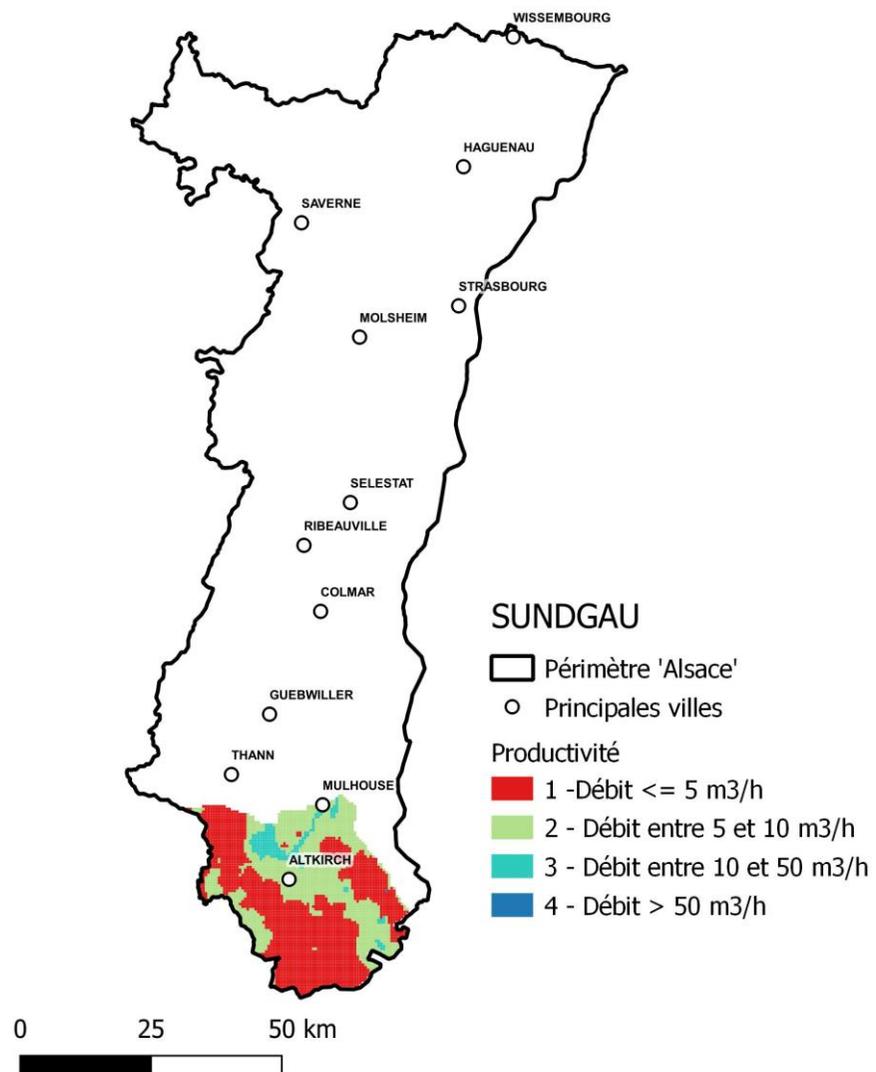






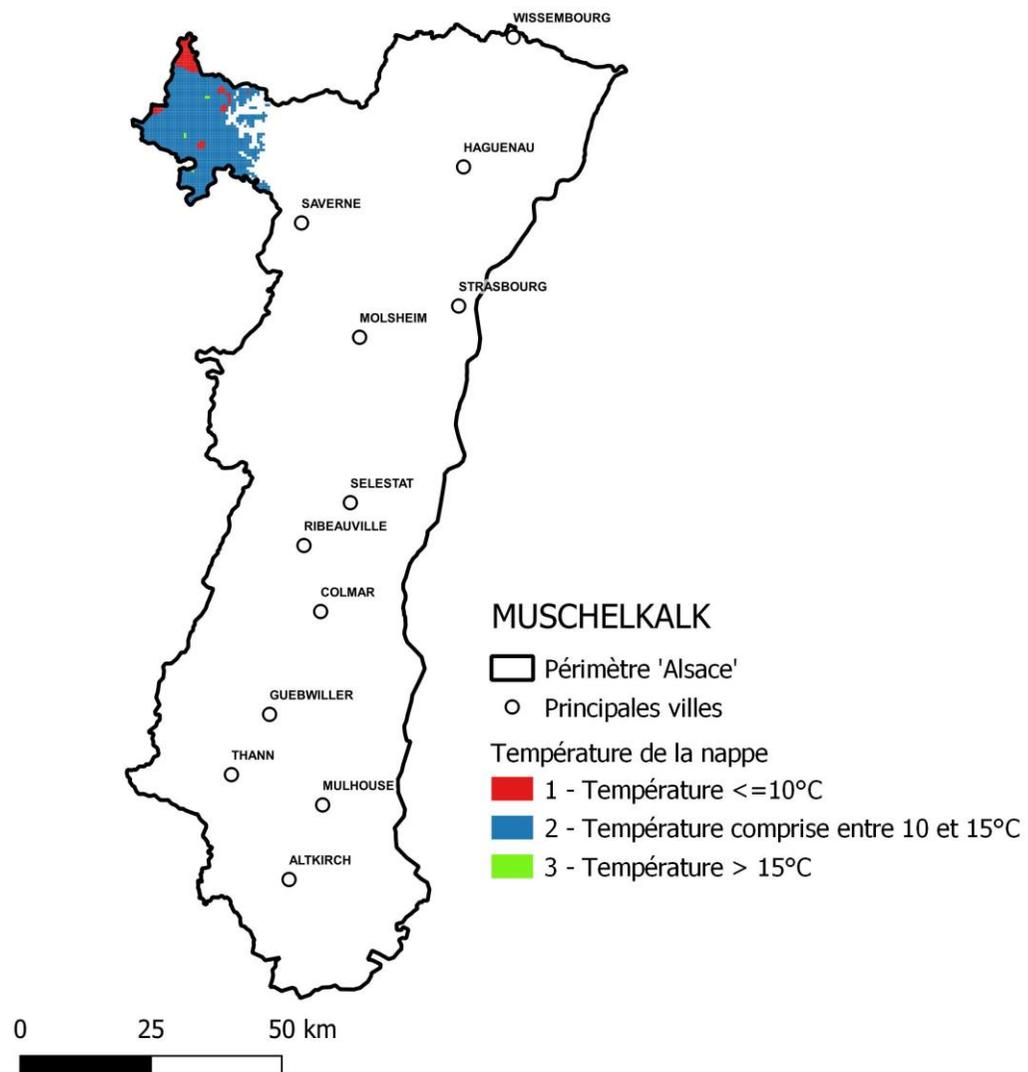


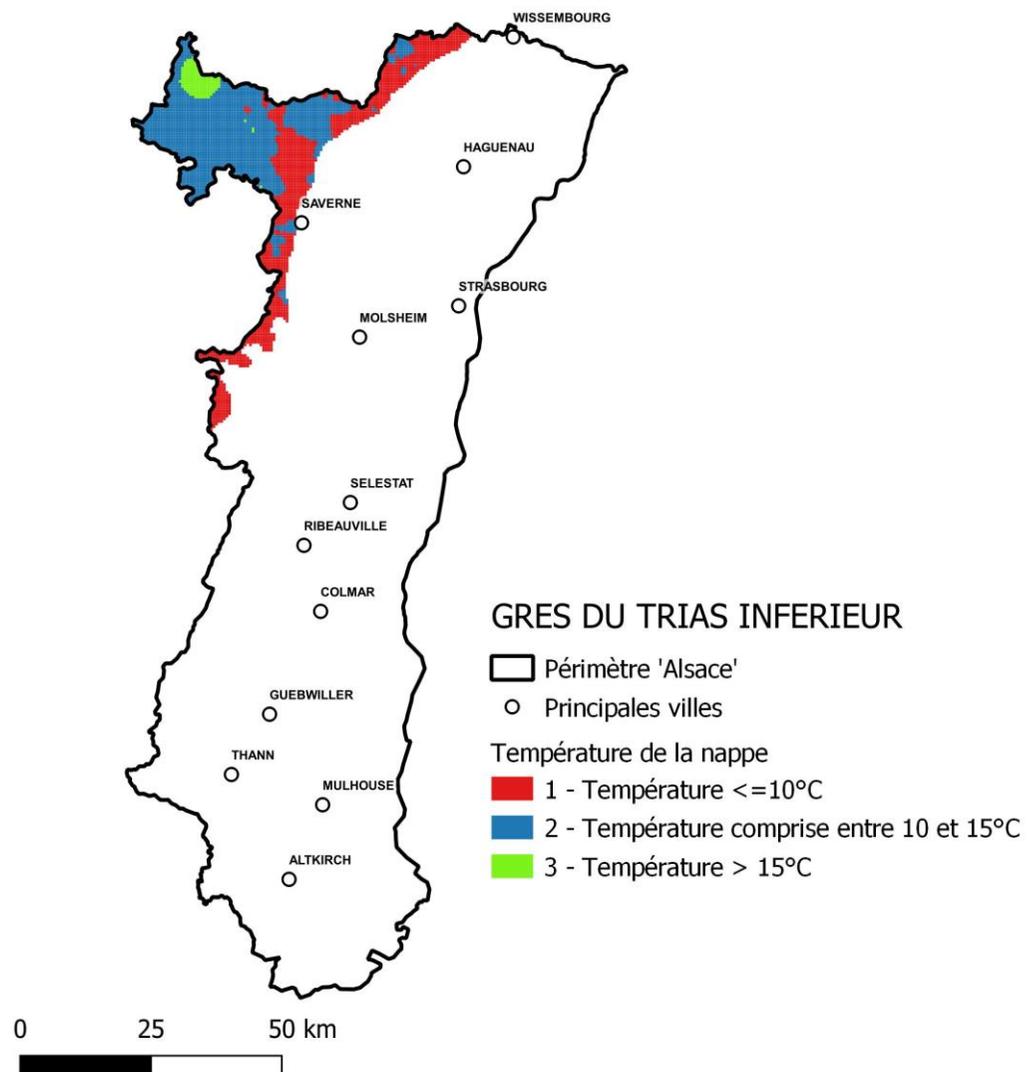


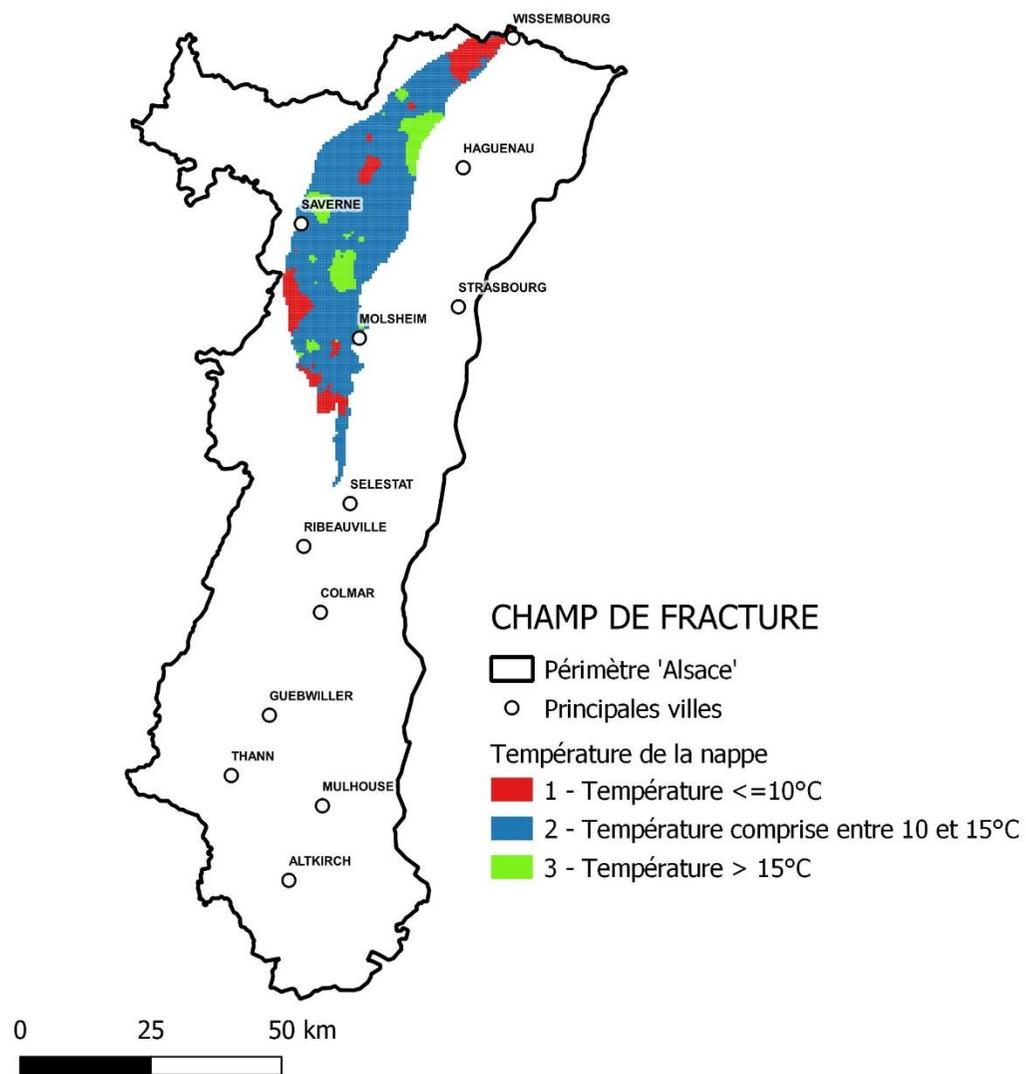


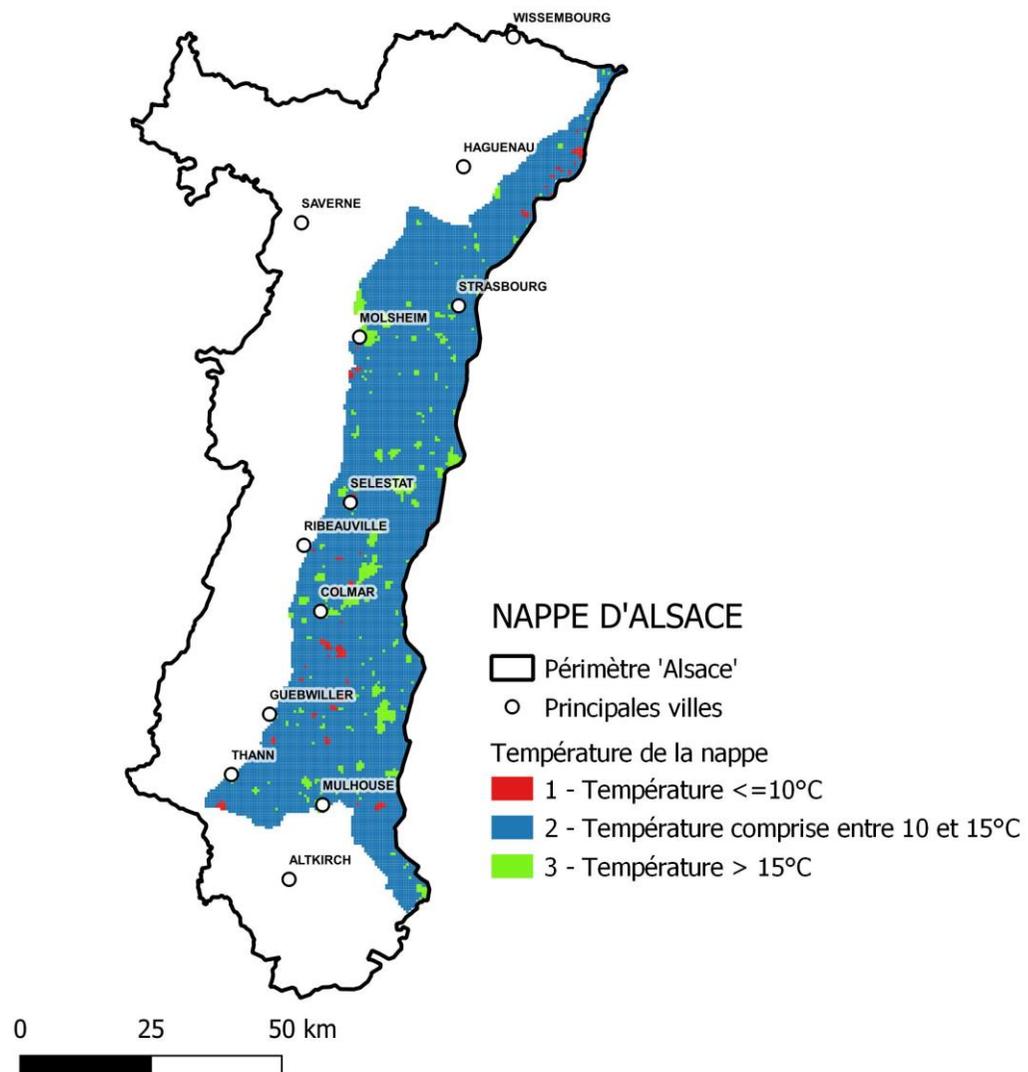
Annexe 4 :

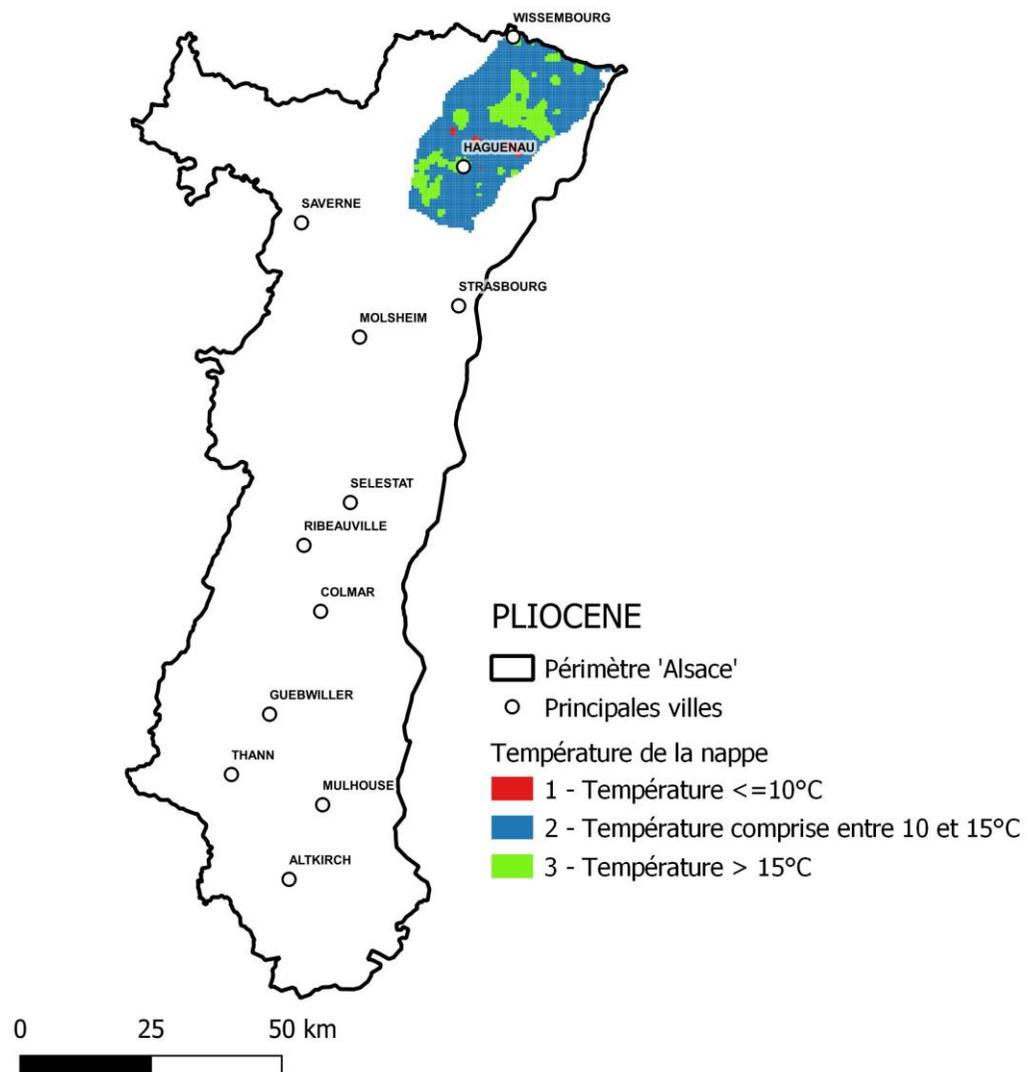
Cartes du critère spatialisé « température » par nappe et classe de valeur

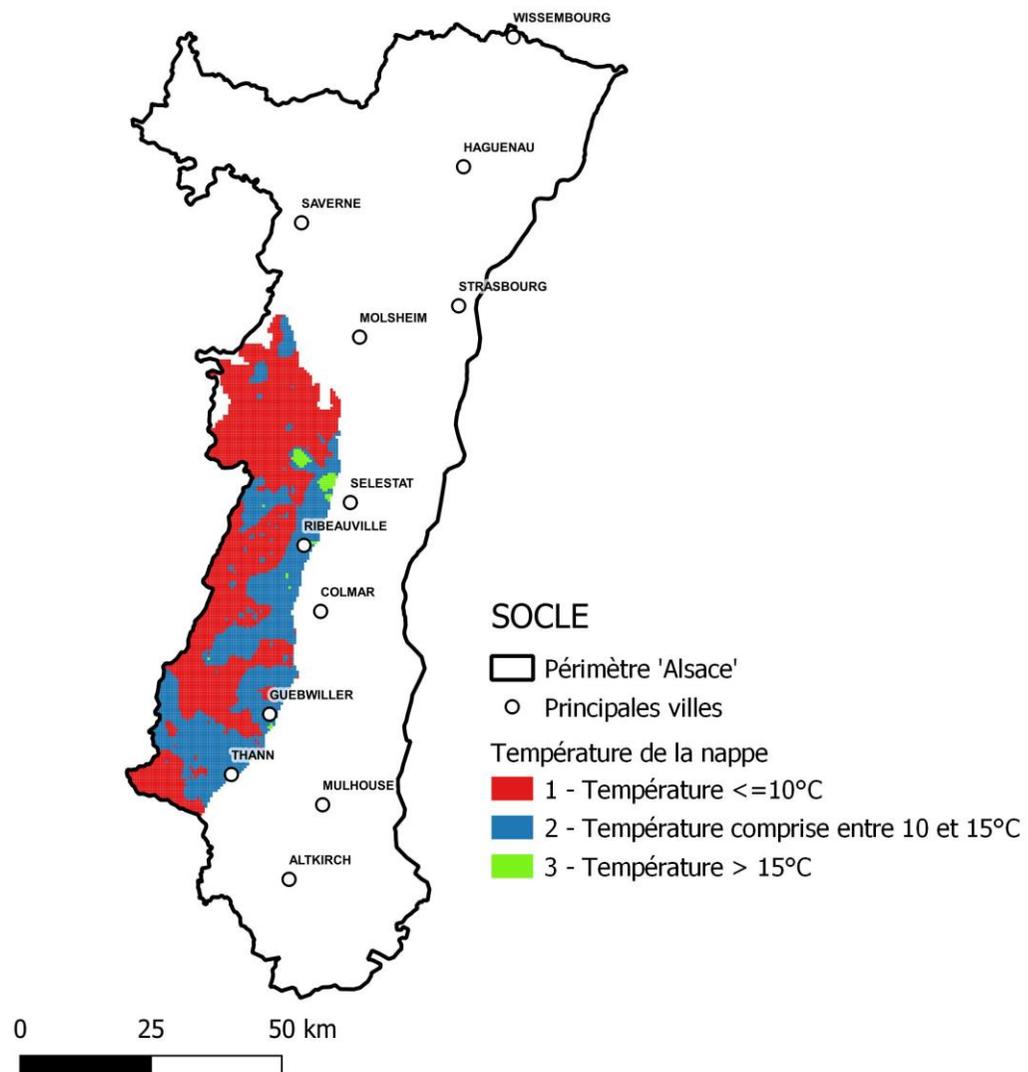


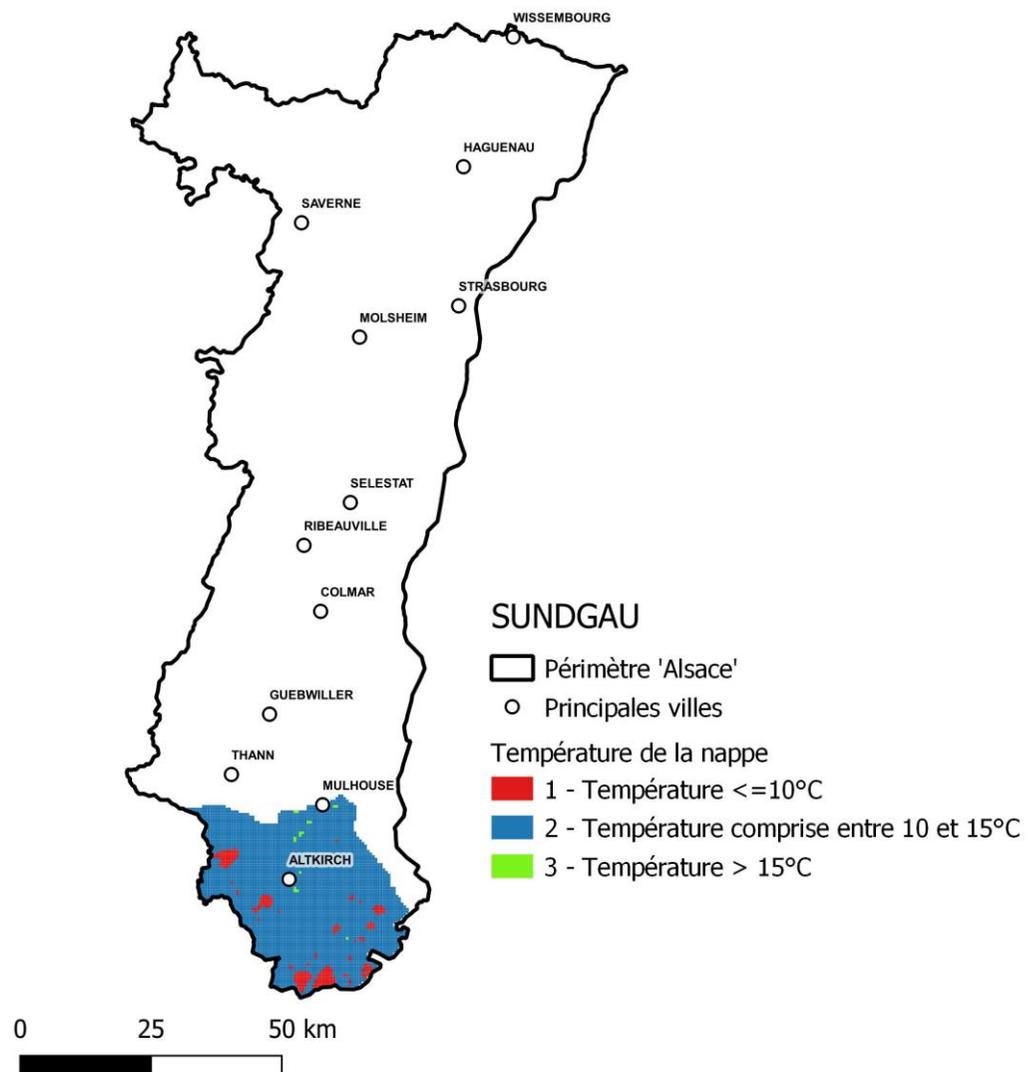






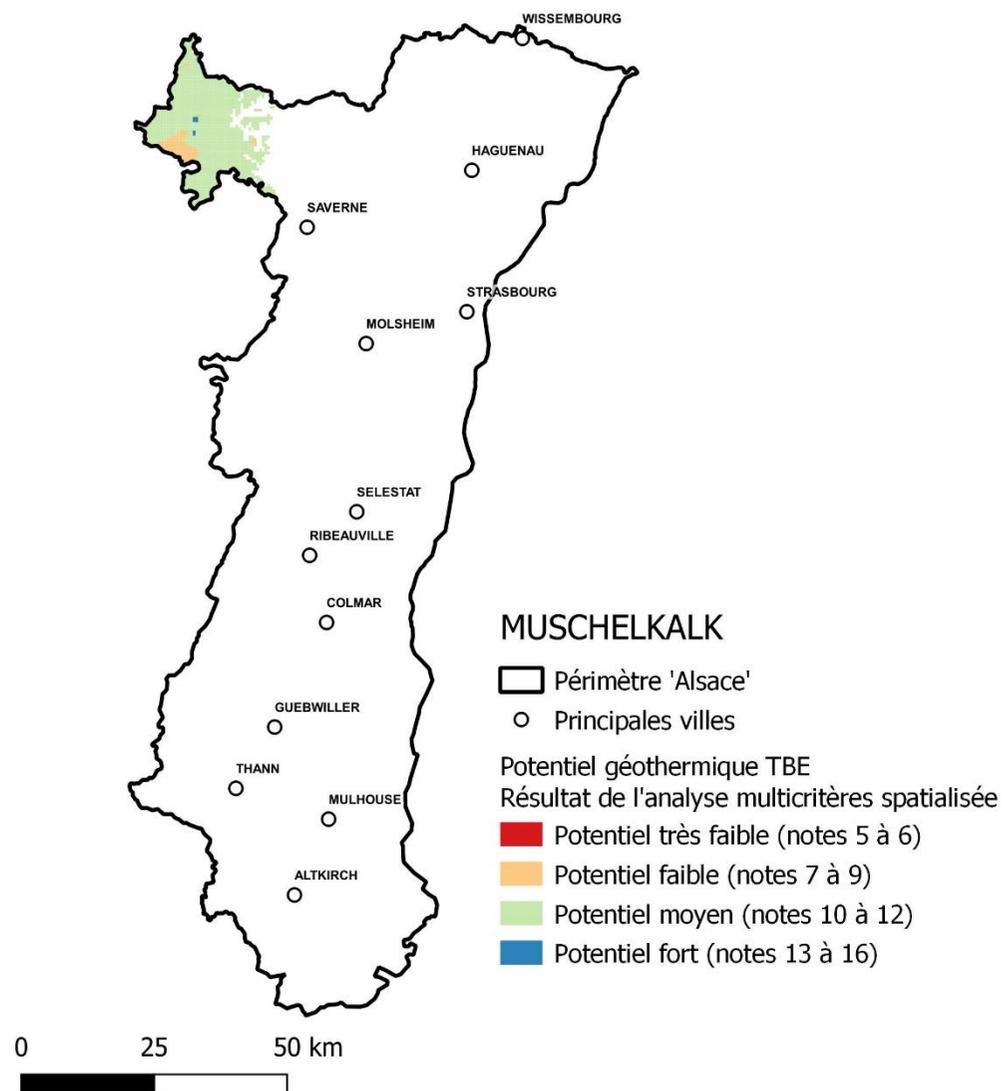


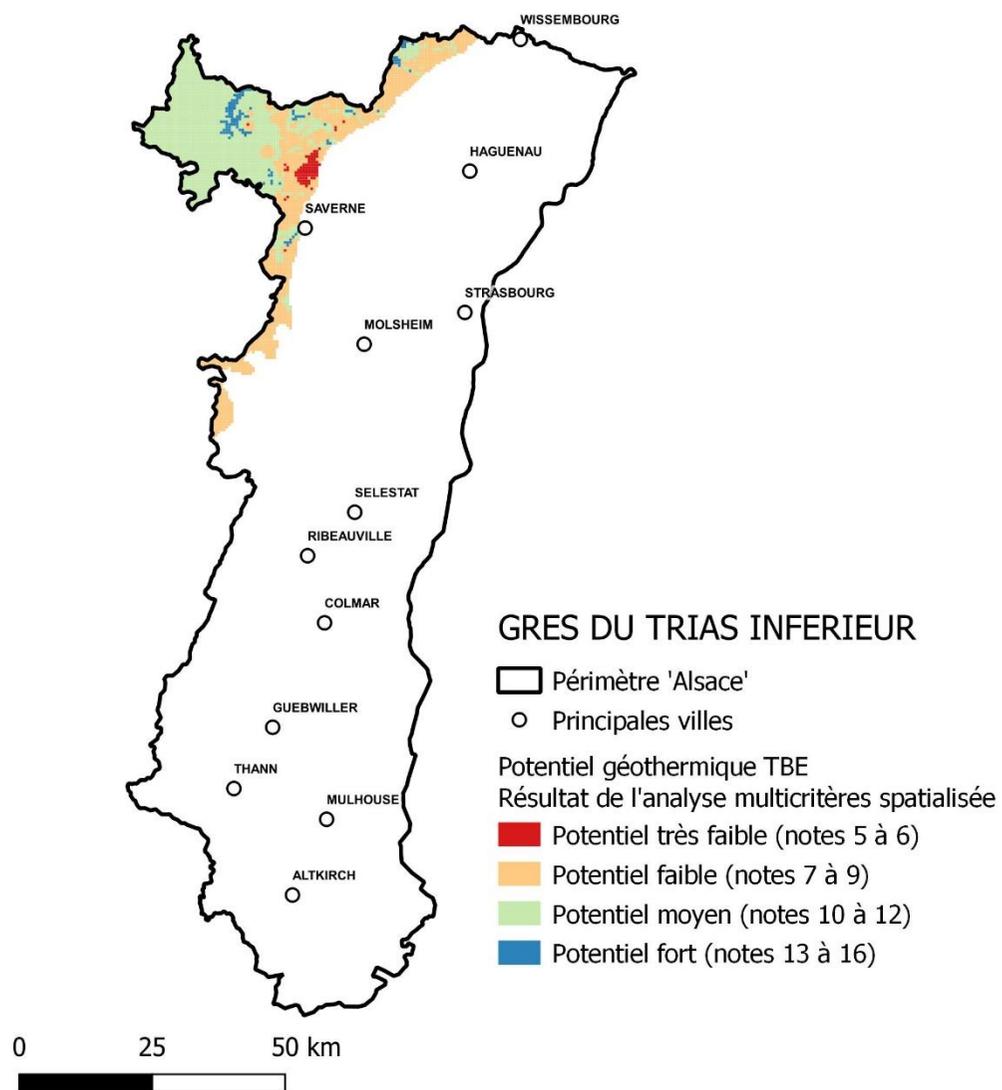


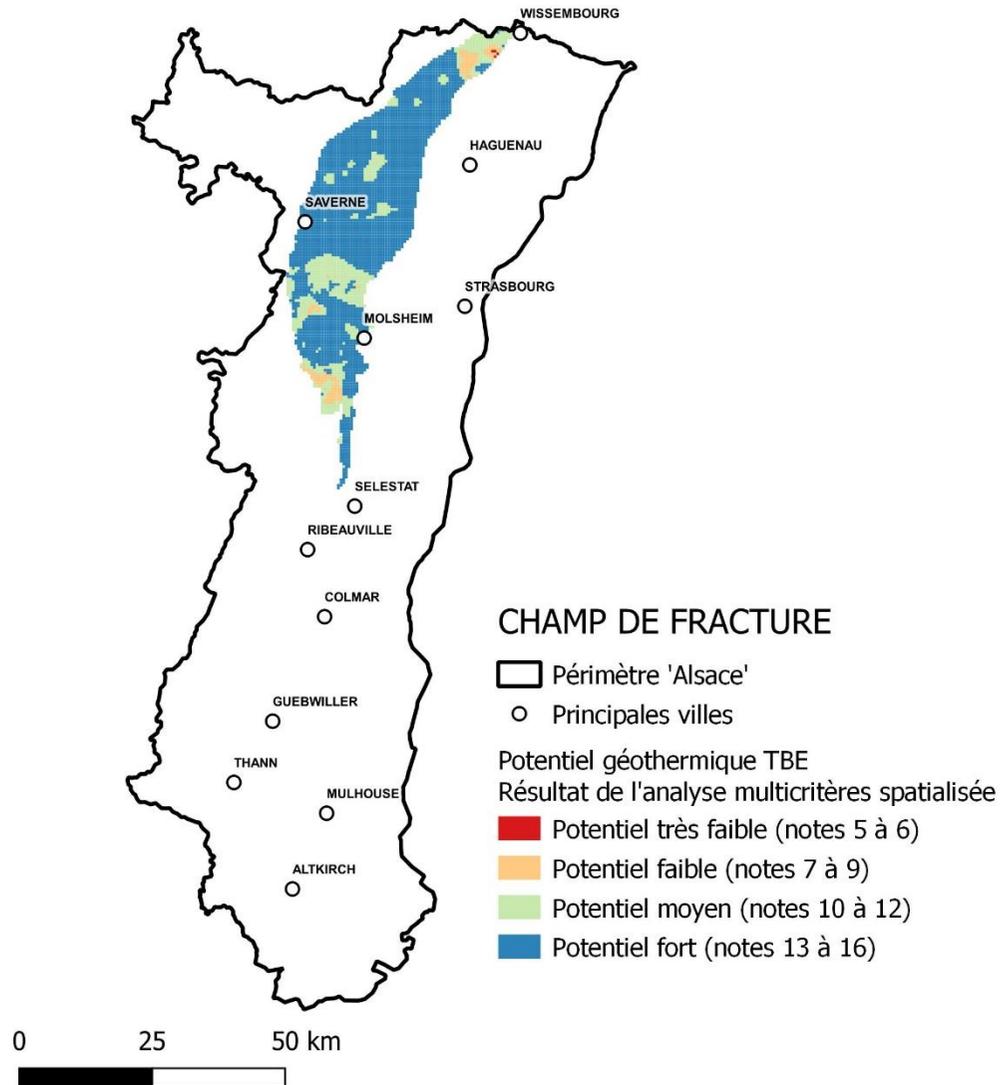


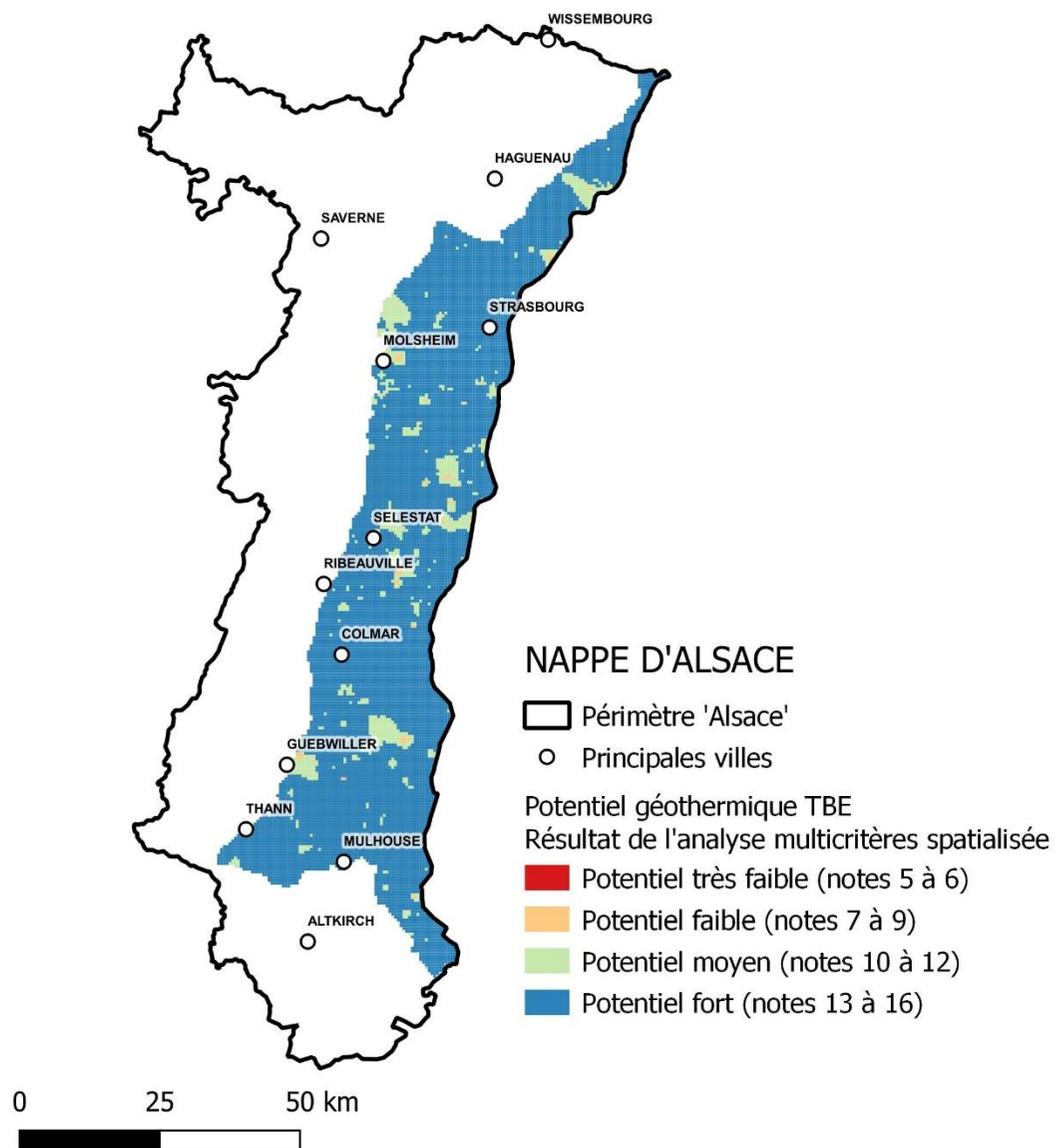
Annexe 5 :

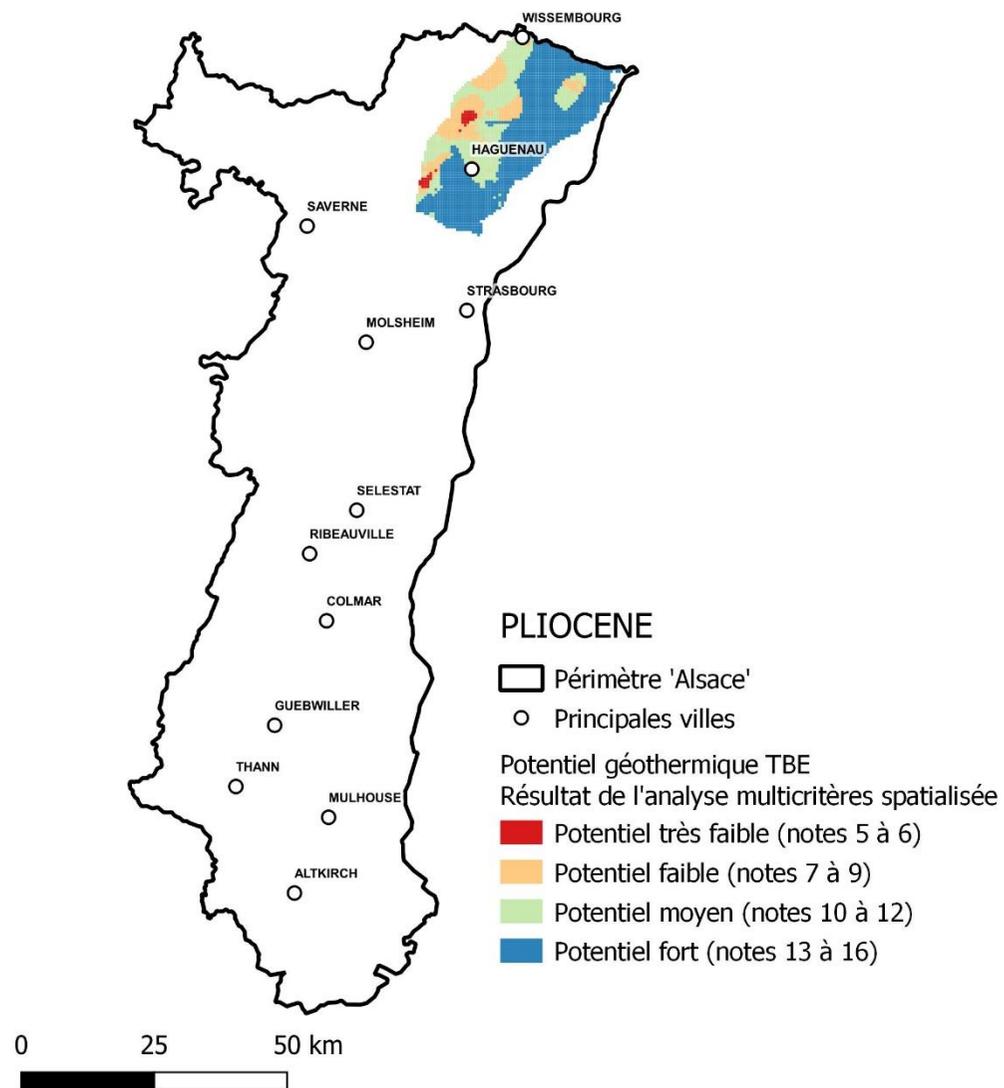
Cartes du potentiel géothermique de la ressource [résultat de l'analyse multicritères] par nappe

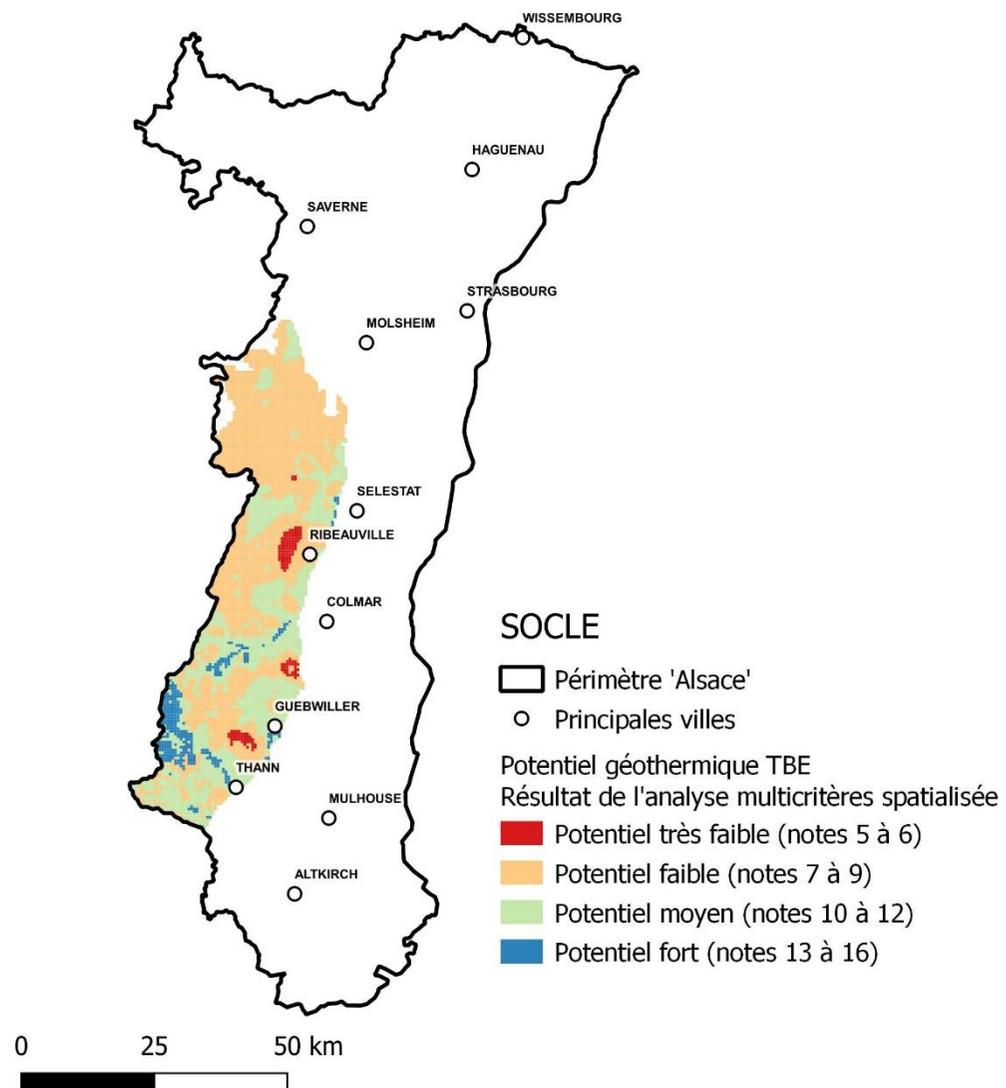


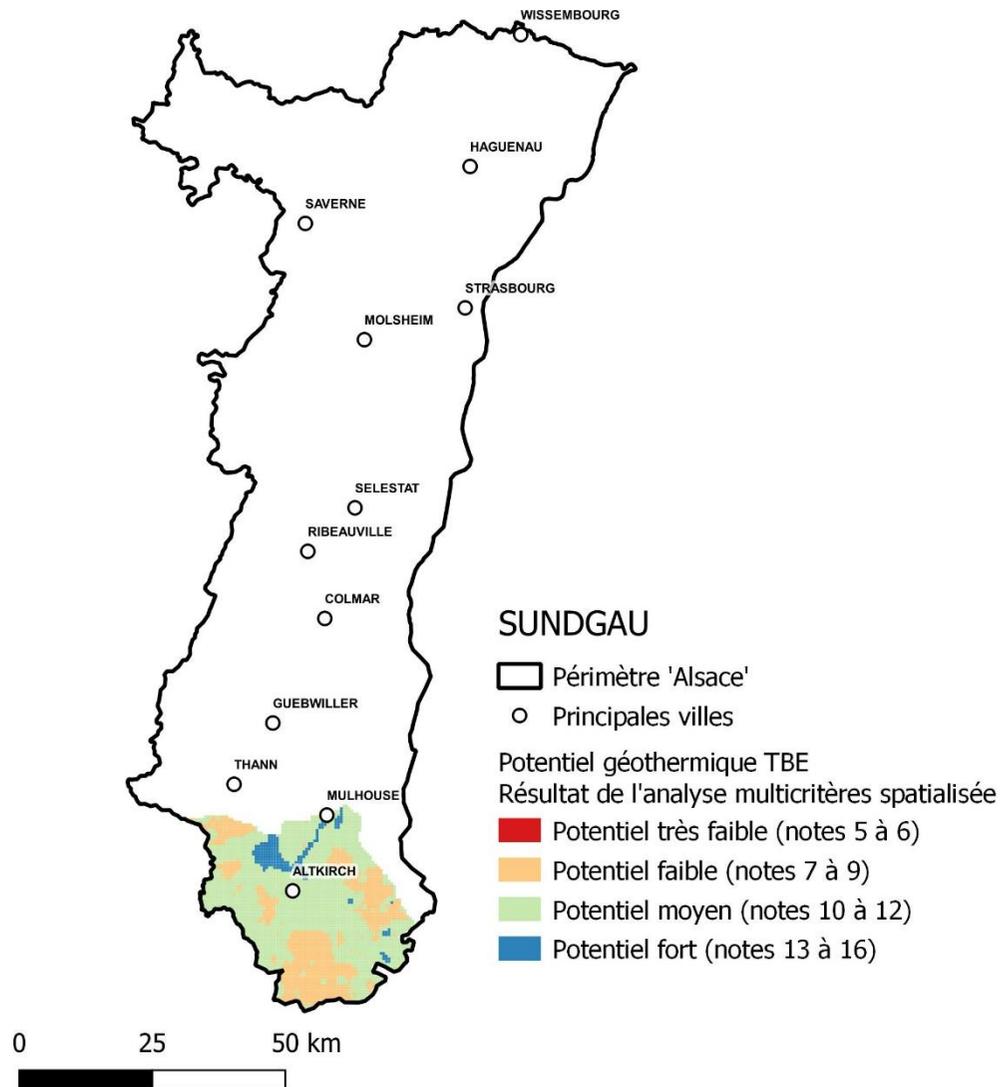














Géosciences pour une Terre durable

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 Grand Est

Délégation de Strasbourg

Parc d'Activité Porte Sud – Bât H1

Rue du Pont du Péage

67118 – Geispolsheim – France

Tél. : 03 88 77 48 90