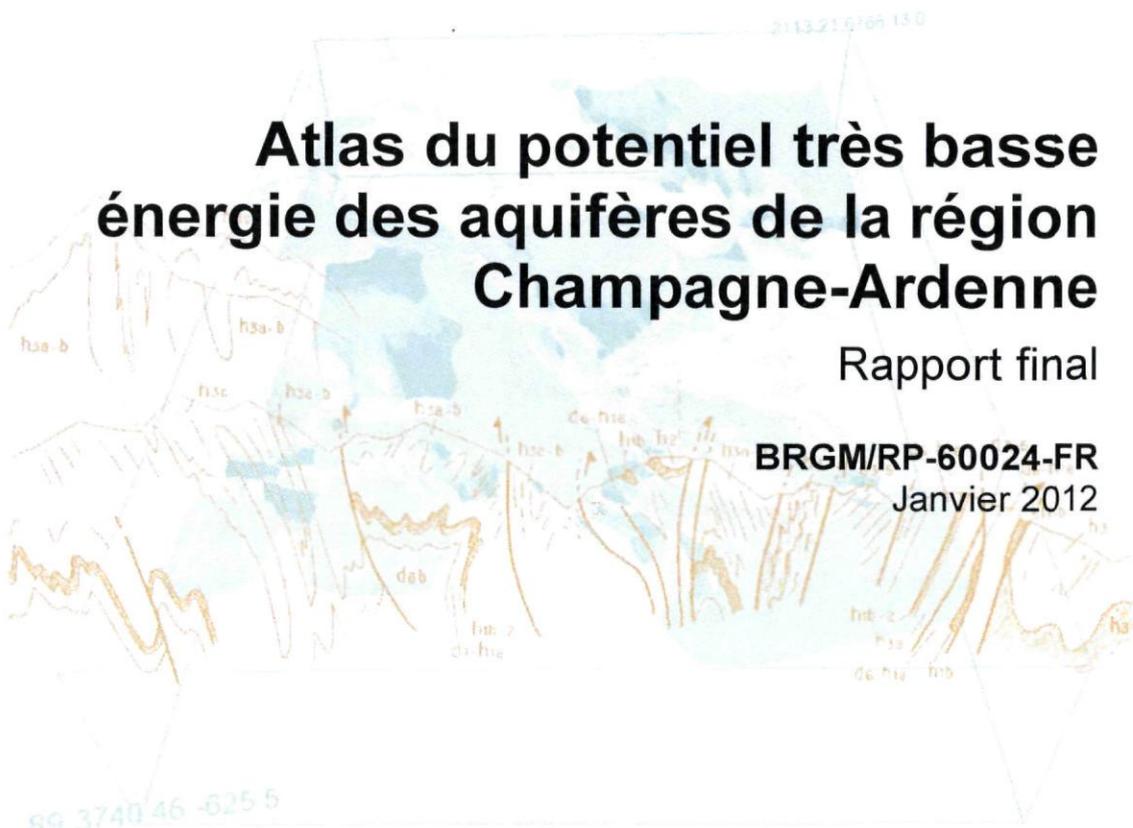


Document public



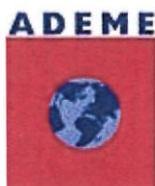
60024



Atlas du potentiel très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne

Rapport final

BRGM/RP-60024-FR
Janvier 2012



15002

Document public

Atlas du potentiel très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne

Rapport final

BRGM/RP-60024-FR

Janvier 2012

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

M. Chabart, S. Pinson, N. Bernon

Avec la collaboration de

P. Herniot, S. Legendre, A. Pierre, M. Viossanges, N. Ruppert, J. Leroy



Vérificateur :

Nom : J.C. MARTIN

Date : 23/02/2012

Signature :

Handwritten signature of J.C. Martin in black ink.

Approbateur :

Nom : N. ZORNETTE

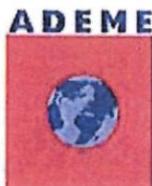
Date : 24/02/2012

Signature :

Handwritten signature of N. Zornette in black ink.

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : atlas, débit, eaux souterraines, Champagne-Ardenne, géologie, géothermie, interpolation, piézométrie, potentiel, pompe à chaleur, sonde géothermique, très basse énergie.

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

M. Chabart, S. Pinson, N. Bernon, P. Herniot, S. Legendre, A. Pierre, M. Viossanges, N. Ruppert (2012) – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne. Rapport final. BRGM RP-60024-FR, 116 p., 42 figures, 10 tableaux, 5 annexes.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'étude relative à la réalisation d'un atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Champagne-Ardenne s'inscrit dans le cadre du FREC et de la convention REGION-ADEME 2009 (convention n° E201002795 signée le 2 juin 2010 entre la Région et le BRGM) et bénéficie d'une aide dans le cadre des Fonds Européens de Développement Régional PO « compétitivité régionale et emploi » (2007-2013), axe 3, mesure 1, action 2 (convention n°E201007662 FEDER signée le 5 juillet 2010 entre le Conseil Régional de Champagne-Ardenne et le BRGM). Cette étude s'inscrit également dans le cadre des activités de service public du BRGM (Comité National d'Orientation) et bénéficie à ce titre d'un financement sur dotation BRGM.

Les résultats du potentiel géothermique concerne exclusivement les aquifères superficiels et permet à l'utilisateur de disposer d'une information sur des mailles de 500 mètres de côté, couvrant le territoire régional. Lorsque plusieurs aquifères coexistent, l'outil permet d'orienter l'utilisateur vers la ressource en eau souterraine la plus intéressante.

L'outil est mis à disposition du public sur l'espace régional du site internet ADEME-BRGM dédié à la géothermie <http://www.geothermie-perspectives.fr>. Son objectif est d'apprécier en première approche l'intérêt de mettre en place un projet de géothermie très basse énergie sur nappe, mais n'a pas vocation à se substituer aux études de faisabilité à réaliser à la parcelle, préalablement à tout projet.

Après un point sur la géothermie en région Champagne-Ardenne, le présent rapport détaille la méthodologie mise en œuvre pour la réalisation des cartes de potentiel de géothermie très basse énergie, intégrés dans une grille de données unique. Il détaille enfin le contenu des résultats mis en ligne, ainsi que leurs limites d'utilisation.

Les paramètres pris en compte pour l'analyse multicritères sur les aquifères superficiels concernent la **profondeur d'accès à la ressource**, la **productivité (ou débit exploitable)** et la **température** de l'aquifère. En raison du nombre restreint de données de base et de leur forte variabilité, l'approche statistique a quasi-systématiquement été privilégiée. Les résultats obtenus pour le potentiel géothermique du meilleur aquifère, exprimés en pourcentage de couverture de la région Champagne-Ardenne, sont les suivants :

- Fort potentiel : 29,6 % du territoire
- Potentiel moyen : 8,2 % du territoire
- Faible potentiel : 6,5 % du territoire
- Potentiel aléatoire : 18,0 % du territoire
- Potentiel non connu précisément : 24,8 % du territoire
- Potentiel a priori nul : 12,9 % du territoire

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

Sommaire

1. Introduction	11
2. La géothermie en Champagne-Ardenne	13
2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE.....	13
2.2. DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE	13
2.2.1. Géothermie moyenne et haute énergie	13
2.2.2. Géothermie basse énergie	14
2.2.3. Géothermie très basse énergie	16
2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE	16
2.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	18
2.4.1. Les alluvions quaternaires sur les formations crayeuses ou calcaires	20
2.4.2. Les alluvions quaternaires sur les formations imperméables	20
2.4.3. Les calcaires de Champigny de l'Eocène supérieur.....	20
2.4.4. Les sables du Cuisien (Eocène inférieur) et du Thanétien (Paléocène supérieur)	20
2.4.5. La craie du Sénonien et du Turonien	20
2.4.6. Les sables et gaize du Cénomaniens et de l'Albien supérieur.....	21
2.4.7. Les sables de l'Albien et Aptien.....	21
2.4.8. Les sables, grès et calcaires du Néocomien	22
2.4.9. Les calcaires du Jurassique supérieur et moyen (Portandien au Bathonien)	22
2.4.10. Les calcaires et grès du Lias (Jurassique inférieur)	22
2.4.11. Les grès du Rhétien (Trias)	22
2.4.12. Le Massif primaire Ardennais	23
2.5. OPERATIONS DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE CONNUES EN CHAMPAGNE-ARDENNE	26
2.6. BILAN DES DECLARATIONS DE FORAGES GEOTHERMIQUES.....	28
3. Méthodologie générale de conception de l'atlas du potentiel géothermique ...31	
3.1. METHODOLOGIE GENERALE	31
3.2. CRITERES DE POTENTIALITE GEOTHERMIQUE.....	31
3.3. ETAPE 1 : RECUEIL DE DONNEES	34

3.4. ETAPE 2 : CARTOGRAPHIE UNICRITERE	34
3.4.1. Classification des données	34
3.4.2. Spatialisation des données	34
3.4.3. Indexation des classes	39
3.4.4. Cartographie de chaque critère	40
3.5. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE MULTICRITERE	41
3.5.1. Pondération des critères	41
3.5.2. Cartographie du potentiel géothermique par aquifère	41
3.6. ETAPE 4 : CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE REGIONAL	41
4. Bilan sur la cartographie en Champagne-Ardenne	43
4.1. COLLECTE DES DONNEES	43
4.1.1. Collecte « externe » au BRGM	43
4.1.2. Collecte « interne » au BRGM	43
4.2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES DONNEES DE BASE	44
4.3. PROFONDEUR D'ACCES A LA RESSOURCE	46
4.3.1. Définition	46
4.3.2. Sources de données	46
4.3.3. Données disponibles	47
4.3.4. Classification	49
4.3.5. Méthode de spatialisation des données	49
4.3.6. Carte des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère	50
4.4. PRODUCTIVITE OU DEBIT EXPLOITABLE DES AQUIFERES	51
4.4.1. Définition	51
4.4.2. Sources de données	51
4.4.3. Estimation des débits exploitables	52
4.4.4. Données disponibles	52
4.4.5. Classification	55
4.4.6. Méthodes de spatialisation des données	56
4.4.7. Carte de productivité de la ressource du meilleur aquifère	57
4.5. TEMPERATURE DE LA RESSOURCE	57
4.5.1. Définition	57
4.5.2. Sources de données	57
4.5.3. Données disponibles	60
4.5.4. Classification	63

4.5.5. Méthode de spatialisation des données	64
4.5.6. Carte des températures de la ressource du meilleur aquifère.....	64
4.6. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	65
4.6.1. Rappel des étapes précédentes et pondération des critères	65
4.6.2. Carte du potentiel géothermique des aquifères.....	66
5. Diffusion de la cartographie sur internet.....	69
5.1. MISE A DISPOSITION DE LA CARTOGRAPHIE REGIONALE SOUS FORME D'UNE GRILLE	69
5.2. MISE EN LIGNE DE L'ATLAS SUR LE SITE « GEOTHERMIE PERSPECTIVES »	73
5.2.1. Rubriques générales sur l'espace régional de Champagne-Ardenne	74
5.2.2. Outil de consultation de l'Atlas régional.....	78
5.3. LIMITES D'UTILISATION DES DONNEES, AVERTISSEMENTS	87
6. Conclusions	89
7. Bibliographie.....	91

Liste des Figures

Figure 1 - Récapitulatif des résultats de l'étude sur le potentiel géothermique du Bassin parisien (d'après HOUSSE B. et MAGET Ph., 1976)	15
Figure 2 - Coupe géologique SW-NE de la région Champagne-Ardenne (Source : BRGM et DATAR, 1970 - modifiée par J. LEROY).....	16
Figure 3 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 du BRGM.....	17
Figure 4 - Cartographie des entités alluviales de Champagne-Ardenne.....	24
Figure 5 - Carte des principaux aquifères de la région Champagne-Ardenne pris en compte dans l'atlas du potentiel géothermique (hors alluvions).....	25
Figure 6 – Répartition des installations en Champagne-Ardenne (données ADEME, sept-2011)	26
Figure 7 – Carte de localisation des installations de géothermie recensées en Champagne-Ardenne (données ADEME, sept-2011)	27
Figure 8 - Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS concernant des projets de géothermie entre 2000 et 2011 pour la France entière (état au 09/12/2011).....	28
Figure 9 - Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS concernant des projets de géothermie entre 2002 et 2011 pour la Champagne-Ardenne (état au 09/12/2011)	29

Figure 10 – Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS entre 2000 et 2011 pour la Champagne-Ardenne (état au 09/12/2011)	29
Figure 11 - Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional.....	33
Figure 12 - Principe de la spatialisation des données (source ArcGis Desktop).....	35
Figure 13 – Principe de l'interpolation mathématique par polygones de Thiessen.....	35
Figure 14 - Exemple d'interpolation – Cas de la productivité des alluvions du bassin versant de l'Aube (250A).....	36
Figure 15 - Exemple d'attribution d'une valeur moyenne – Cas de la profondeur d'accès à la ressource des alluvions du bassin versant de l'Aisne (248C).....	37
Figure 16 - Exemple de sectorisation au sein d'un même aquifère – Cas des profondeurs des Argiles, sables et marnes de l'Aptien-Barrémien.....	38
Figure 17 - Exemple de critère non renseigné pour faute de données disponibles – Cas de la productivité de la Craie marneuse du Turonien au Cénomanién (121E).....	39
Figure 18 - Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation).....	40
Figure 19 - Principe de la cartographie multicritère	42
Figure 20 - Répartition des points ayant pu faire l'objet d'une correspondance avec une entité hydrogéologique BD-LISA.....	45
Figure 21 - Schéma explicitant les différents régimes de nappe (source BRGM).....	46
Figure 22 - Carte des données ponctuelles de profondeur d'accès à la ressource	48
Figure 23 – Distribution du nombre de données "profondeur d'accès à la ressource".....	50
Figure 24 - Carte des données ponctuelles de débit spécifique.....	54
Figure 25 – Distribution des données de débit exploitable collectées au sein des classes de productivité.....	56
Figure 26 – Corrélation entre les températures des eaux souterraines et les profondeurs des ouvrages	59
Figure 27 – Corrélation entre les températures des eaux souterraines et les profondeurs des niveaux piézométriques (ou niveau d'eau dans les ouvrages).....	60
Figure 28 - Carte des données ponctuelles de température	62
Figure 29 - Nombre de données par classes de température	63
Figure 30 - Transcription maillée des entités aquifères spatialisées et de leurs attributs associés sur le critère de surface	70
Figure 31 - Maillage de l'information – cas de deux aquifères superposés.....	71
Figure 32 - Carte de superposition des aquifères à l'échelle du territoire Champagne-Ardenne.....	72
Figure 33 - Page d'accueil du site geothermie-perspectives	73
Figure 34 - Page d'accueil de l'espace régional sur le site geothermie-perspectives	74
Figure 35 – Présentation de la page 1 « Le développement de la géothermie en région »	77

Figure 36 - Fenêtre d'interrogation du potentiel du meilleur aquifère via la carte régionale.....	80
Figure 37 - Fenêtre d'interrogation complémentaire de la productivité des aquifères de 1987	81
Figure 38 - Fenêtre de recherche par commune	82
Figure 39 - Fenêtre cartographique à l'échelle communale	83
Figure 40 - Fiche de renseignements fournie pour une maille contenant un aquifère	84
Figure 41 - Fiche de renseignements fournie pour une maille contenant deux aquifères.....	85
Figure 42 - Fiche de renseignements complémentaires obtenue lors de l'interrogation de la couche productivité 1987.	86

Liste des Tableaux

Tableau 1 – Liste des entités régionales (NV2) de BDLISA en Champagne-Ardenne (en bleu les systèmes aquifères et en vert les domaines hydrogéologiques)	19
Tableau 2 - Nombre de données de profondeur d'accès à la ressource disponibles, par aquifère	47
Tableau 3 - Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte	49
Tableau 4 - Nombre de données de débit exploitable par aquifère.....	53
Tableau 5 - Classes de productivité prises en compte	55
Tableau 6 - Nombre de données de température par aquifère	61
Tableau 7 - Classes de température d'aquifère prises en compte	63
Tableau 8 - Classification et indexation des critères de potentialité géothermique.....	65
Tableau 9 - Pourcentage du territoire concerné, en fonction du potentiel géothermique attribué	66
Tableau 10 - Proportions du territoire concerné par une superposition des entités aquifères définies dans cette étude	67

Liste des Annexes

Annexe 1 Tableau récapitulatif des données disponibles et des traitements effectués par aquifère (analyse multicritère)	93
Annexe 2 Carte régionale des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère	101
Annexe 3 Carte régionale des productivités de la ressource du meilleur aquifère.....	105
Annexe 4 Carte régionale des températures de la ressource du meilleur aquifère	109
Annexe 5 Carte du potentiel géothermique régional du meilleur aquifère.....	113

1. Introduction

L'objet de la présente étude menée par le BRGM est d'évaluer les potentialités que représentent les ressources en eau souterraine superficielles, c'est-à-dire situées à une profondeur inférieure à 100 m. On parle alors de géothermie très basse énergie.

Ce projet s'inscrit dans le cadre du FREC et de la convention REGION-ADEME 2009 (convention n° E201002795 signée le 2 juin 2010 entre la Région et le BRGM) et bénéficie d'une aide dans le cadre des Fonds Européens de Développement Régional PO « compétitivité régionale et emploi » (2007-2013) axe 3 mesure 1 action 2 (convention n°E201007662 FEDER signée le 5 juillet 2010 entre le Conseil Régional de Champagne-Ardenne et le BRGM). Cette étude s'inscrit également dans le cadre des activités de service public du BRGM (Comité National d'Orientation) et bénéficie à ce titre d'un financement sur dotation BRGM.

L'atlas comprend un système d'information géographique (SIG) mis en ligne sur l'espace régional du site Internet de l'ADEME et du BRGM dédié à la géothermie <http://www.geothermie-perspectives.fr>.

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

Le présent rapport fait état de la géothermie en région Champagne-Ardenne (les principes généraux, les différents types de géothermie, le contexte géologique et hydrogéologique, les opérations de géothermie en Champagne-Ardenne, le bilan des déclarations), détaille la méthodologie employée pour élaborer cet atlas et présente les aspects de mise à disposition de la cartographie sur internet.



2. La géothermie en Champagne-Ardenne

2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE

La géothermie se définit comme l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre et ayant pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et surtout la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes¹. L'énergie géothermique est présente partout à la surface du globe ; elle se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de 3,3°C par 100 m. Des variations locales de gradient géothermiques peuvent néanmoins être observées ; elles sont reliées à l'âge, la structure, la géométrie et la nature des formations géologiques rencontrées.

L'énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation, ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies. La possibilité de mettre en œuvre chacune de ces technologies dépend du contexte géologique et hydrogéologique. Ainsi, la production de chaleur d'origine géothermique peut provenir de différents types de ressources en fonction de la profondeur et de la température exploitée.

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

La présente étude s'intéresse à la **géothermie sur nappe**.

2.2. DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE

On distingue généralement 4 types de géothermie en fonction des critères de profondeur et de température : la géothermie haute énergie, moyenne énergie, basse énergie et très basse énergie.

2.2.1. Géothermie moyenne et haute énergie

La géothermie moyenne et haute énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques (eau et vapeur) dont la **température est comprise entre 90 et 150°C** (moyenne énergie) ou **supérieure à 150°C** (haute énergie). Ces ressources sont

¹ Varet J., 1982 – Géothermie basse énergie : usage direct de la chaleur. Masson.

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

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

2.2.2. Géothermie basse énergie

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

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

Sur la Champagne-Ardenne, les premières études ont été réalisées dès 1976, sur cinq aquifères identifiés dans le Bassin parisien comme potentiellement exploitables pour la géothermie basse énergie (HOUSSE B. et MAGET Ph., 1976 ; MAGET Ph. et RAMBAUD D., 1979) :

- les sables du Crétacé inférieur ;
- les calcaires du Lusitanien ;
- les calcaires du Dogger ;
- les grès du Rhétien ;
- les grès du Trias.

Les cartes de synthèse montrent que les zones les plus favorables du point de vue de la ressource sont localisées approximativement au droit de la Marne à l'aval de Châlons-en-Champagne et à l'amont de Saint-Dizier. Chaque aquifère a fait l'objet d'une description géologique et hydrogéologique précise accompagnée de tableaux et de cartes présentant les principales caractéristiques (Figure 1).

AQUIFÈRE ÉTUDIÉ	Température (°C) dans la zone à forte transmissivité	Zone la plus favorable	Remarques	
ALBIEN	35 - 40	Est de Paris	Exploitation réglementée	
LUSITANIEN	55 - 65	Région de Meaux	Eau à faible salinité	
DOGGER	55 - 65	Région centrale du bassin : zone très étendue	Très bon réservoir. Eau chlorurée sodique (10 à 30 g/l)	
LIAS INFÉRIEUR	50 - 60	Région de Beauvais	Épaisseur réduite. Trans- missivité faible	
RHÉTIEN	60	Est de Reims	Épaisseur réduite	
TRIAS + PERMIEN	Trias supérieur et moyen + Permien	30 - > 100	Sud de la Loire (surtout région du Cher)	- Réservoir permotriasi- que très épais - zone à gradient géo- thermique élevé
	Trias inférieur	30 - 60	De la Meuse aux affleurements vers l'Est	- transmissivité très im- portante et eau douce lorsque le réservoir est peu profond.
DÉVONIEN	90 ?	Région de Cambrai	- Tectonique complexe	

Figure 1 - Récapitulatif des résultats de l'étude sur le potentiel géothermique du Bassin parisien (d'après HOUSSE B. et MAGET Ph., 1976)

En 1980, le comité Géothermie siégeant auprès du Ministère de l'Industrie, représenté par la Direction Interdépartementale de l'Industrie et la Direction Régionale de l'Équipement de Champagne-Ardenne, ont décidé d'un commun accord d'entreprendre un inventaire portant sur les ressources en géothermie et leurs possibilités d'application régionales (GEOCHALEUR, 1980). Cinq sites, parmi les zones les plus favorables, sont retenus pour une pré-étude de faisabilité géologique et thermique :

- Reims (Orgeval) ;
- Reims (Murigny) ;
- Châlons-sur-Marne (Verbeau – Saint Memmie) ;
- Saint-Dizier (Le vert bois) ;
- Epernay (Bernon).

Au final deux opérations de forages géothermiques profonds ont été réalisés, à Reims (Murigny) en 1981² et à Epernay (Mont Bernon) en 1982³, sans obtenir les résultats

² 01325X0033/GMUR1 : 1542 m de profondeur / niveaux productifs entre 997 et 1001 m et entre 1026 et 1030 m pour les zones perforées / épaisseur productive 8 m / température stabilisée à 960 m au débit de 17.3 m³/h de 40,8 °C / productivité faible sur le Lusitanien et quasi nulle sur le Dogger (rapport BRGM 82SGN282GTH de MARTIN et al., 1982).

³ 01585X0059/GEPE1 et 01585X0060/GEPE2 : profondeurs de respectivement 1865 et 2140 m (rapport BRGM 84SGN874GTH de MARTIN et al., 1982).

escomptés (faible productivité, difficultés techniques...) conduisant de fait à des échecs de mise en œuvre de l'exploitation géothermie basse énergie en Champagne-Ardenne.

2.2.3. Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la **température est inférieure à 30°C**. A cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée par un usage direct avec 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 ou 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 (0-100 m), objet de la présente étude.

2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La région Champagne-Ardenne se situe sur la partie Est du bassin de Paris, bassin sédimentaire de forme subcirculaire et centré sur la ville de Paris. Cette structure, dite en « pile d'assiettes », englobe la région Champagne-Ardenne dans sa quasi intégralité, à l'exception du nord du département des Ardennes, constitué de terrains plus anciens formant un socle antétriasique (âge primaire) composé de roches métamorphiques et de sédiments paléozoïques (Figure 2).

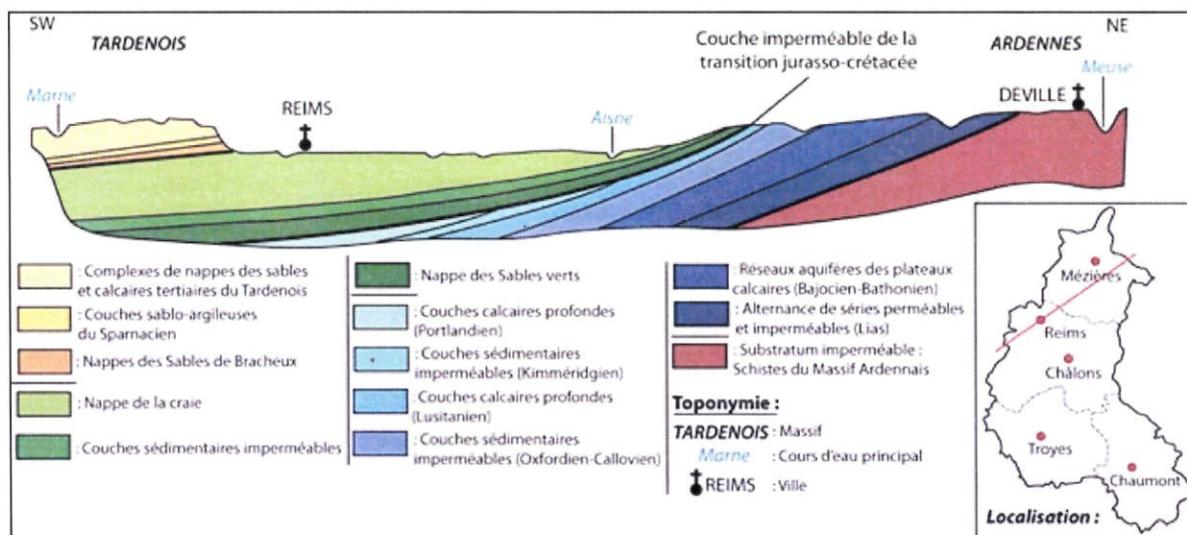


Figure 2 - Coupe géologique SW-NE de la région Champagne-Ardenne (Source : BRGM et DATAR, 1970 - modifiée par J. LEROY)

A l'affleurement les terrains qui prédominent correspondent à la craie du séno-turonien (formations du Crétacé) recouvert à l'ouest par les formations du Tertiaire et en vallée par les formations alluviales du Quaternaire (Figure 3).

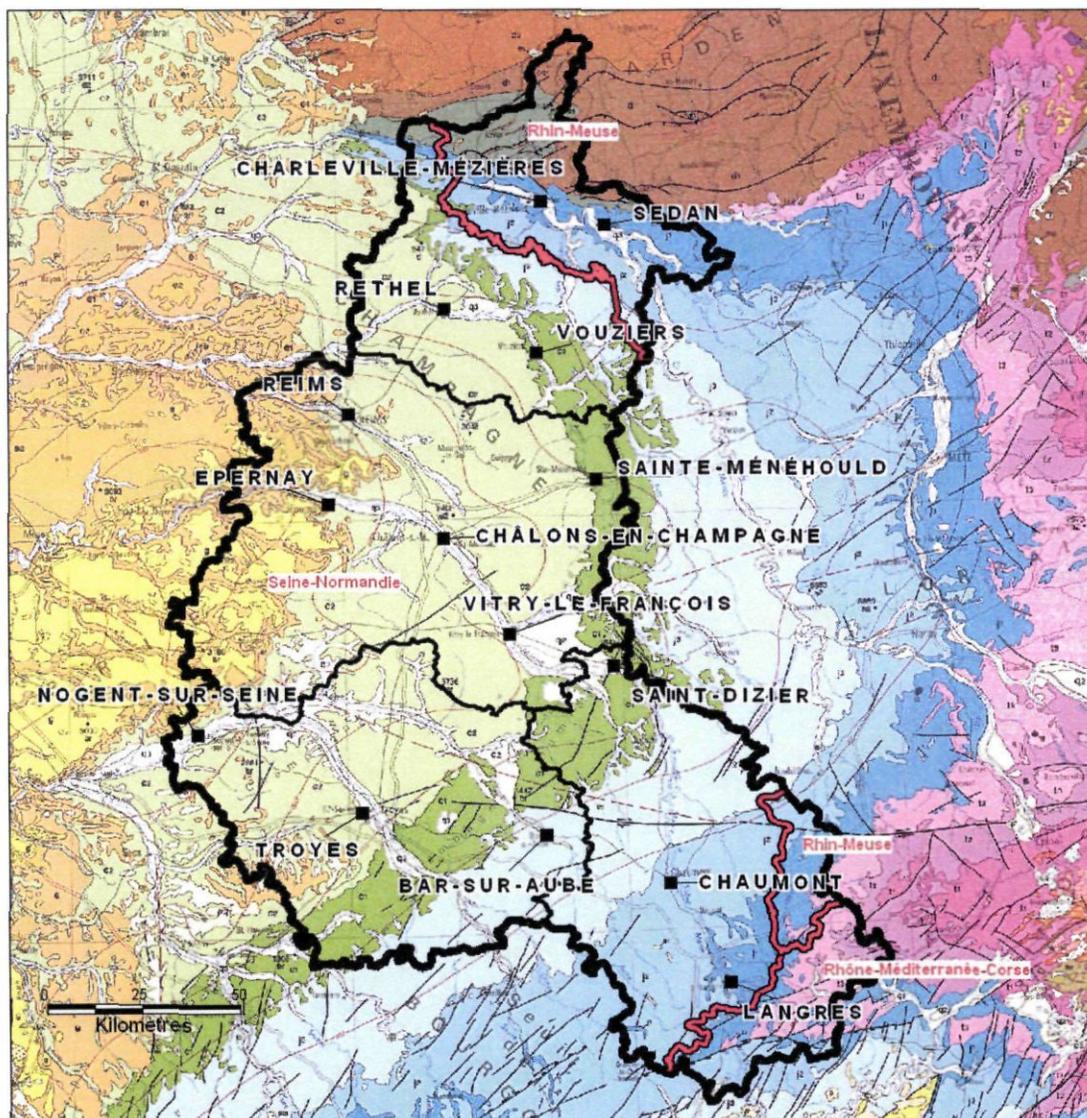


Figure 3 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 du BRGM
(En noir les limites administratives et en rouge les limites de bassin)

2.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'objectif de l'atlas est de présenter le potentiel géothermique des principaux aquifères accessibles dans la tranche 0-100 m de la Champagne-Ardenne. Les données cartographiques de base correspondent aux contours des aquifères de la Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères dite « BDLISA » (WARIN et al., 2010).

On distingue au niveau régional (Tableau 1), dit « niveau 2 » ou « NV2 » :

Le système aquifère

Un système aquifère est une **entité hydrogéologique aquifère** issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand système aquifère ou d'un grand domaine hydrogéologique. La subdivision s'effectue sur l'un au moins des critères suivants : lithologique, structural, stratigraphique, piézométrique, géochimique, hydraulique.

Le domaine hydrogéologique

Un domaine hydrogéologique est une **entité hydrogéologique peu aquifère** issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand domaine hydrogéologique ou d'un grand système. La subdivision s'effectue sur l'un au moins des critères suivants : lithologique, structural, stratigraphique, piézométrique, géochimique, hydraulique.

Les principaux aquifères de la région Champagne-Ardenne (du plus récent au plus ancien) pris en compte dans l'atlas du potentiel géothermique, sont décrits dans les paragraphes suivants (Figure 5).

Code BD LISA	Libellé BD LISA
107C	Sables de Fontainebleau
107G	Calcaires de Brie
110A	Marnes vertes et Marnes supragypseuses de l'Oligocène inf. (Stampien) à l'Eocène sup. (Ludien)
113A	Calcaire de Champigny
113K	Sables et Calcaires du Bartonien
113P	Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur
113R	Calcaires grossiers du Lutétien et Sables de l'Yprésien
116B	Argiles de l'Yprésien inf. (Sparnacien)
119B	Sables du Thanétien (Paléocène)
121A	Craie du Turonien sup. au Campanien (Séno-Turonien)
121E	Craie marneuse du Turonien au Cénomanién
122E	Marnes et Gaize du Cénomanién inf.
125A	Argiles du Gault et Marnes de l'Albien
128A	Sables et Gaize de l'Albien
128C	Argiles, Sables et Marnes de l'Aptien-Barrémien
128B	Argiles et Calcaires de l'Hauterivién (Neocomien)
128E	Sables et Grès du Valanginién (Neocomien)
131A	Calcaires du Tithonién
134A	Marnes du Kimmeridgién
137A	Calcaires du Kimméridgién inférieur à l'Oxfordién moyen
140A	Marnes du Callovo-Oxfordién
143A	Calcaires du Bathonién- Callovién (Dogger)
143B	Marnes du Bajocién
143C	Calcaires de l'Aalénién Bajocién
146A	Marnes du Toarcién (Lias sup.)
146C	Calcaires et Grès du Plienbaschién (Domérién)
146G	Calcaires argileux et Grès du Sinémurién-Hettangién (Lias inf.)
149A	Grès du Rhétién
149C	Dolomies et Marnes du Keuper
149E	Dolomies et Argiles du Lettenkohle
149G	Calcaires du Muschelkalk supérieur
149I	Marnes et Argiles du Muschelkalk moyen et inférieur
149K	Grès du Muschelkalk Inf. et Buntsandstein
151I	Socle des Ardennes
165A	Alluvions de la Meuse
165B	Alluvions de la Chiers
165C	Alluvions de la Bar
243A	Alluvions Saône amont et Lanterne
248A	Alluvions du bassin versant de la Vesle
248B	Alluvions du bassin versant de la Suippe
248C	Alluvions du bassin versant de l'Aisne
249A	Alluvions du Perthois
249B	Alluvions du bassin versant de la Marne en Champagne pouilleuse
249C	Alluvions du bassin versant de la Marne
250A	Alluvions du bassin versant de l'Aube
250B	Alluvions de la Bassée
250C	Alluvions de la Seine en amont de la Bassée
251A	Alluvions du bassin versant de la Vanne
251B	Alluvions du bassin versant de l'Armançon

Tableau 1 – Liste des entités régionales (NV2) de BDLISA en Champagne-Ardenne (en bleu les systèmes aquifères et en vert les domaines hydrogéologiques)

2.4.1. Les alluvions quaternaires sur les formations crayeuses ou calcaires

Les alluvions sont constituées principalement de sable et de graviers non consolidés sur une épaisseur souvent inférieure à 10 m. Les alluvions reposant sur de la craie sont en continuité hydraulique et forment un seul et même aquifère dont le comportement hydrodynamique est indissociable. Localement, la nappe de la craie peut néanmoins être captive sous des niveaux d'alluvions argileuses ou tourbeuses. Les perméabilités sont très élevées et les ressources très importantes. Les ouvrages de captage peuvent fournir de forts débits, très souvent supérieurs à 200 m³/h, comme dans les vallées importantes de la Meuse, l'Aisne, la Marne, l'Aube et la Seine, ainsi que dans celles de leurs affluents.

2.4.2. Les alluvions quaternaires sur les formations imperméables

Seule la nappe alluviale peut faire l'objet de prélèvement. Il n'y a pas de contribution des formations sous-jacentes. Il importe alors de réaliser des ouvrages susceptibles d'exploiter de manière optimale ces aquifères de faible épaisseur.

2.4.3. Les calcaires de Champigny de l'Eocène supérieur

En Tardenois et Brie Champenoise, cet ensemble constitue un réservoir important, et donne naissance à d'importantes circulations d'eau, qui se manifestent par de belles sources à débit faible mais relativement constant. La nappe des calcaires de Champigny constitue un niveau aquifère intéressant à exploiter ; il alimente en effet la plupart des forages publics du secteur. Un certain nombre de forages et de puits ont fourni des débits intéressants. Néanmoins la productivité est extrêmement variable notamment du fait des phénomènes de karstification qui affectent ces formations.

2.4.4. Les sables du Cuisien (Eocène inférieur) et du Thanétien (Paléocène supérieur)

A l'Ouest du département de la Marne (Tardenois et Brie Champenoise), les niveaux sableux du Cuisien et du Thanétien renferment des nappes d'importance plutôt réduite. Localement l'exploitation se fait par puits et forages mais on observe plus généralement de nombreuses sources de déversement émergeant de ces niveaux qui ont un débit compris entre 0,5 et 5 l/s.

2.4.5. La craie du Sénonien et du Turonien

La craie constitue le réservoir aquifère principal de la région Champagne-Ardenne, qui s'étend de la vallée de l'Aisne au Nord à celle de l'Aube au Sud. Il contient une nappe libre majoritairement alimentée par les pluies efficaces et intensément exploitée pour l'alimentation en eau potable, l'industrie et l'irrigation. C'est la « Champagne sèche » (par opposition avec la « Champagne Humide ») également dénommée champagne crayeuse ou autrefois « champagne pouilleuse ».

L'épaisseur de la formation crayeuse approche les 300 mètres à l'Ouest de la région mais le réservoir efficace correspond à une épaisseur moyenne (sous le niveau du sol) beaucoup plus faible de 30 mètres sous les plateaux à 40 mètres sous les vallées à cours d'eau pérenne.

La craie est affectée par différents types de fissuration résultant soit d'efforts tectoniques soit de phénomènes géomorphologiques (érosion, zones de décompression dans les vallées). Une fois ouvertes les fissures ont pu s'agrandir et s'élargir sous l'action chimique (dissolution des carbonates) ou mécanique des eaux souterraines. Cette évolution peut atteindre localement un stade ultime qui correspond au développement d'un réseau karstique.

Les écoulements souterrains se font essentiellement au gré des réseaux de failles et de fissures qui affectent la matrice crayeuse, principalement dans celles qui ont pu être élargies par dissolution.

Dans les vallées, où la craie est particulièrement fissurée ou fracturée, les circulations préférentielles permettent des débits d'exploitation considérables (100 à 300 m³/h) ce qui est loin d'être le cas sous les plateaux où la craie, restée compacte, ne fournit que des débits faibles (de l'ordre de 5 à 10 m³/h).

La profondeur du niveau d'eau par rapport au terrain naturel ou « niveau piézométrique » varie de façon saisonnière et interannuelle. Les amplitudes des variations piézométriques sont également très variables de quelques mètres dans les vallées à cours d'eau pérenne à une vingtaine de mètres sous les plateaux crayeux.

2.4.6. Les sables et gaize du Cénomaniens et de l'Albien supérieur

La Gaize d'Argonne est un aquifère peu étendu et peu épais qui offre néanmoins de réelles possibilités d'exploitation entre Vouziers au Nord et Saint-Dizier au Sud. Au-delà en Champagne humide, la Gaize passe latéralement vers le Sud au faciès des Marnes de Brienne imperméables. Les débits sont variables (en moyenne de 10 à 40 m³/h) en fonction de l'épaisseur des sables du Cénomaniens, du degré de fissuration de la gaize déterminant des axes préférentiels de circulation et des variations latérales de faciès des sables et de la gaize (passage à des formations plus ou moins argileuses).

2.4.7. Les sables de l'Albien et Aptien

Aux confins des trois départements de la Marne, de la Haute-Marne et de l'Aube, dans un triangle Vitry-le-François, Saint-Dizier et Brienne-le-Château, se trouve un réservoir aquifère argilo-sableux (Albien inférieur et Aptien supérieur) qui est exploité pour l'alimentation en eau potable. On distingue les zones où les formations affleurent à la surface du sol des zones où la formation est recouverte de couches géologiques imperméables (argiles du Gault) qui en assurent la protection et la « captivité ». La nappe est d'ailleurs principalement exploitée dans la zone captive (puits artésiens). La productivité peut atteindre 80 m³/h.

Dans le département des Ardennes, la nappe des sables verts et celle des calcaires du Jurassique supérieur ne forment qu'un seul et même niveau aquifère malgré des perméabilités différentes (perméabilité d'interstices dans les sables et perméabilité de fissures allant jusqu'au karst dans les calcaires).

2.4.8. Les sables, grès et calcaires du Néocomien

Dans le Nord de la Haute-Marne et une partie de l'Aube, les horizons du Barrémien supérieur (sables et grès), de l'Hauterivien (calcaires) et du Valanginien (grès et sables) constituent des niveaux aquifères peu importants, se manifestant surtout par des sources, dont certaines sont captées pour l'alimentation en eau potable.

2.4.9. Les calcaires du Jurassique supérieur et moyen (Portandien au Bathonien)

Les calcaires du Jurassique supérieur et moyen constituent un ensemble de réservoirs aquifères relativement épais et souvent karstiques, qui affleurent au nord de la région dans les Ardennes (entre les cotes d'Argonne au Sud et la Vallée de la Meuse au nord) et au Sud-Est de la région (au Sud de la cote des Bars dans l'Aube et en Haute-Marne - plateau du Barrois, secteur de Chaumont, plateau de Langres).

Il existe de nombreuses sources à débit souvent important qui émergent au contact de niveaux imperméables. L'exploitabilité de la ressource est complexe du fait de la karstification et directement liée à la fracturation de la roche. Les forages exécutés sur les plateaux sont généralement improductifs ; l'exploitation donnant plus de résultats à proximité des vallées.

2.4.10. Les calcaires et grès du Lias (Jurassique inférieur)

Au Nord des Ardennes (axe Charleville-Mézières - Sedan) et dans la région du Bassigny en Haute-Marne des formations sédimentaires constituées d'une alternance complexe de couches perméables (calcaires et grès) et imperméables (marnes) constituent des aquifères localisés et discontinus sans grande ressource (débits exploitables faibles). Il s'agit notamment des « calcaires de Romery » du Sinémurien supérieur et des « calcaires à Gryphées » de l'Hettangien.

2.4.11. Les grès du Rhétien (Trias)

Les grès infraliasiques ou grès du Rhétien sont reconnus à l'affleurement comme aquifères et exploités à faible profondeur au Sud-Est du département de la Haute-Marne (pays d'Amance). De nombreux puits ont été creusés dans ce niveau, pour alimenter des communes rurales, leur débit restant généralement très limité.

2.4.12. Le Massif primaire Ardennais

Le Massif Ardennais ou Socle des Ardennes, à l'extrémité Nord du département des Ardennes, est constitué en majorité de formations du primaire (Dévonien au Cambrien) de faciès très variés : schistes, grès, calcaires-schisteux, quartzites, calcaires-gréseux). La perméabilité d'interstices est négligeable du fait des contraintes tectoniques importantes subies par les sédiments et seule la fracturation et la fissuration peuvent conduire à des circulations d'eau intéressante pour l'exploitation de la ressource en eau. Néanmoins il faut tenir compte du fait que les fractures sont généralement colmatées par des produits d'altération et rarement ouvertes pour permettre la circulation de l'eau. Les fractures ouvertes sont inexistantes dans les schistes mais ont plus de chances de le rester dans les calcaires, les grès ou les quartzites (formations plus favorables à la recherche d'eau).

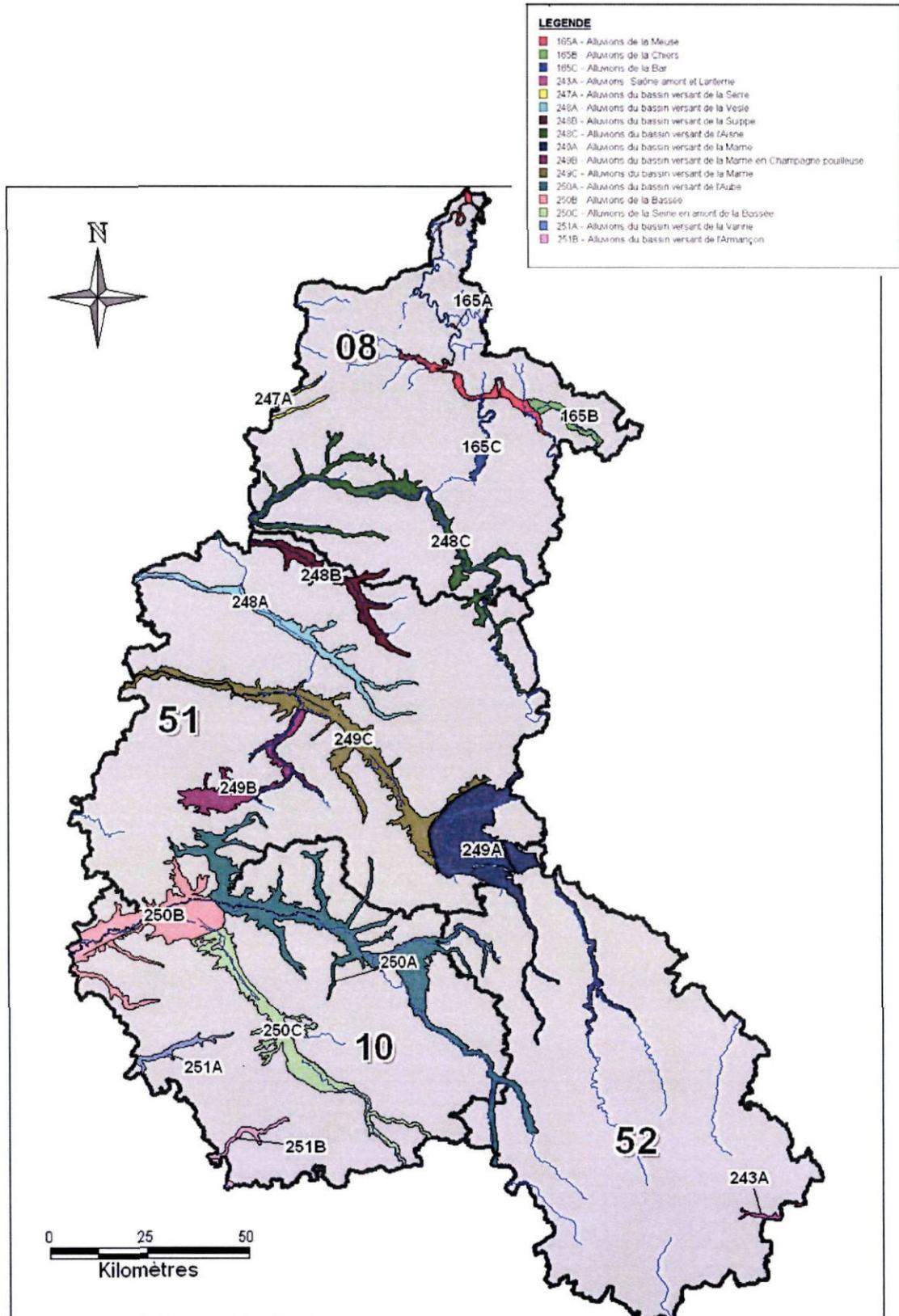


Figure 4 - Cartographie des entités alluviales de Champagne-Ardenne

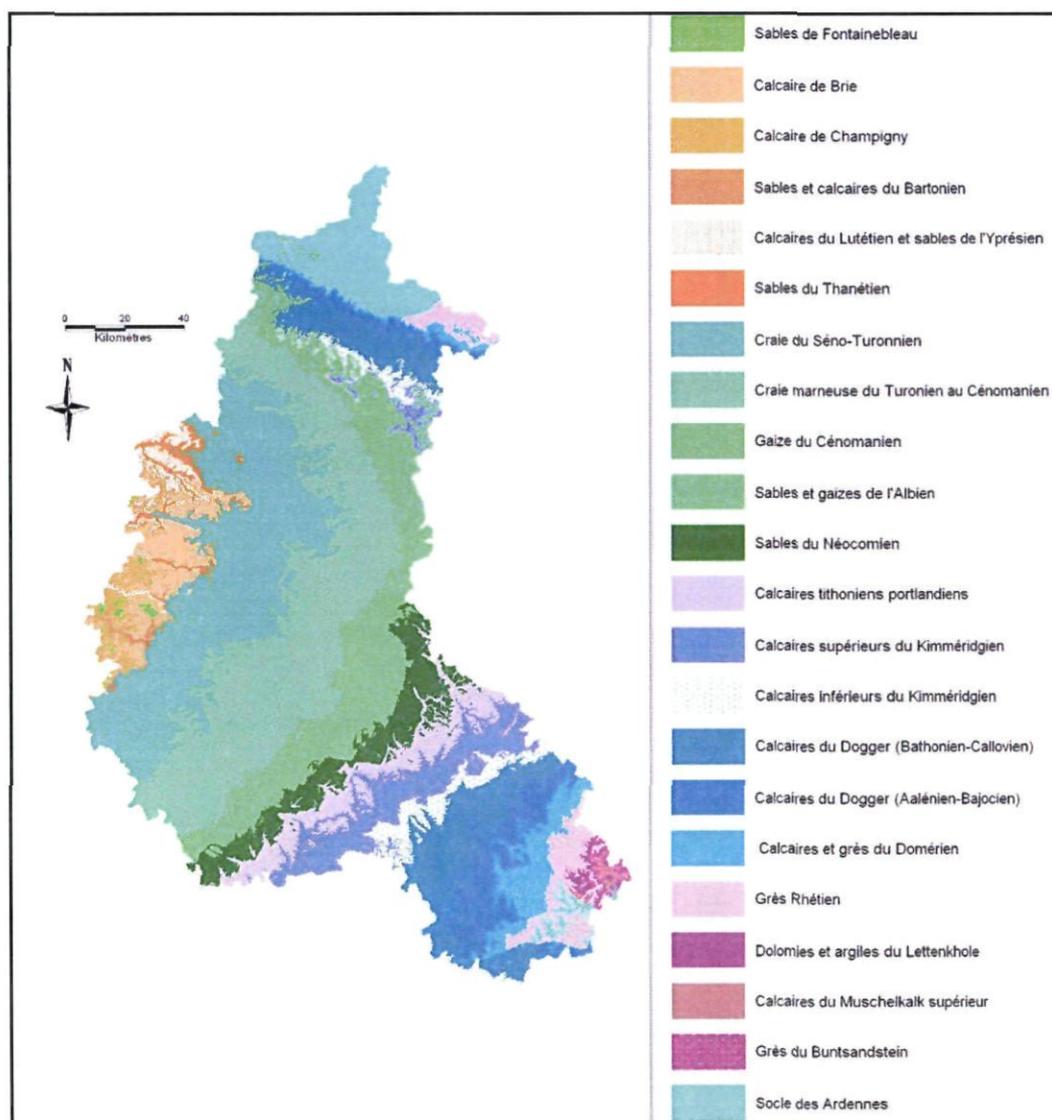


Figure 5 - Carte des principaux aquifères de la région Champagne-Ardenne pris en compte dans l'atlas du potentiel géothermique (hors alluvions)

2.5. OPERATIONS DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE CONNUES EN CHAMPAGNE-ARDENNE

Selon une enquête récente de l'ADEME (ADEME, travail de J.KERVOT J., 2011), on recense près de 91 installations de géothermie très basse énergie en région Champagne-Ardenne (hors particulier). Il s'agit soit d'installation en services soit de projet en cours. Les installations de géothermie sur eau de nappe sont majoritaires (69%) sur l'ensemble de la région et plus particulièrement dans l'Aube et dans la Marne (Figure 6 et Figure 7). Les projets ayant recours aux sondes géothermiques verticales se développent rapidement ces dernières années, notamment sur le département des Ardennes et de la Haute-Marne.

Cette répartition s'explique notamment par la prédominance d'une ressource en eau souterraine plus facilement exploitable sur les départements de la Marne et de l'Aube (nappe de la craie). Cf. paragraphe précédent.

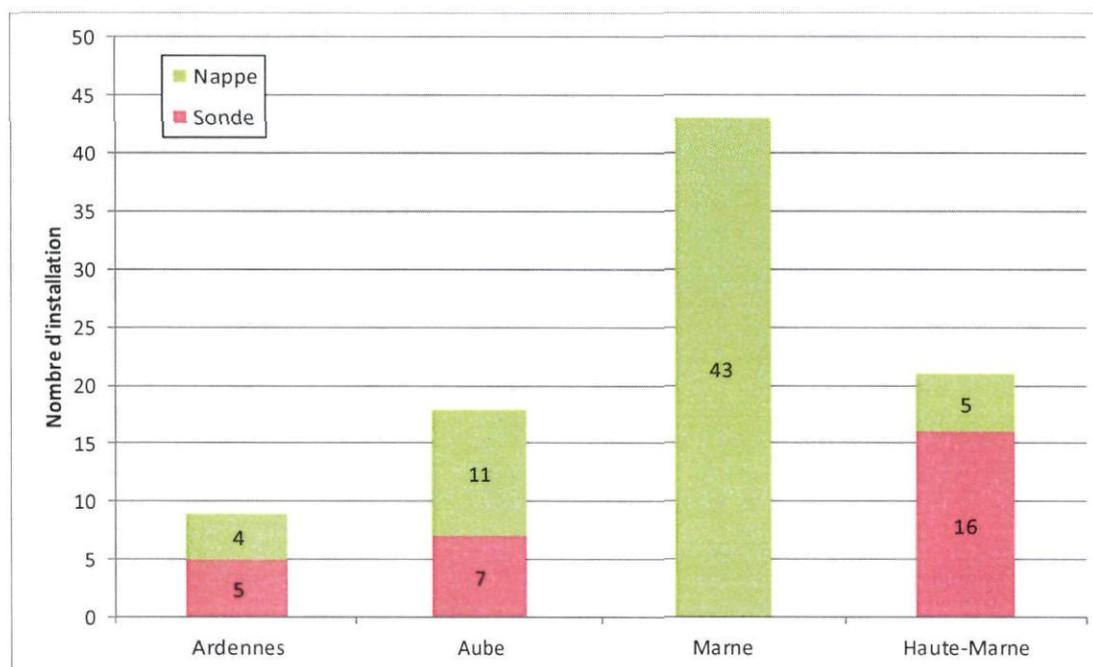


Figure 6 – Répartition des installations en Champagne-Ardenne (données ADEME, sept-2011)

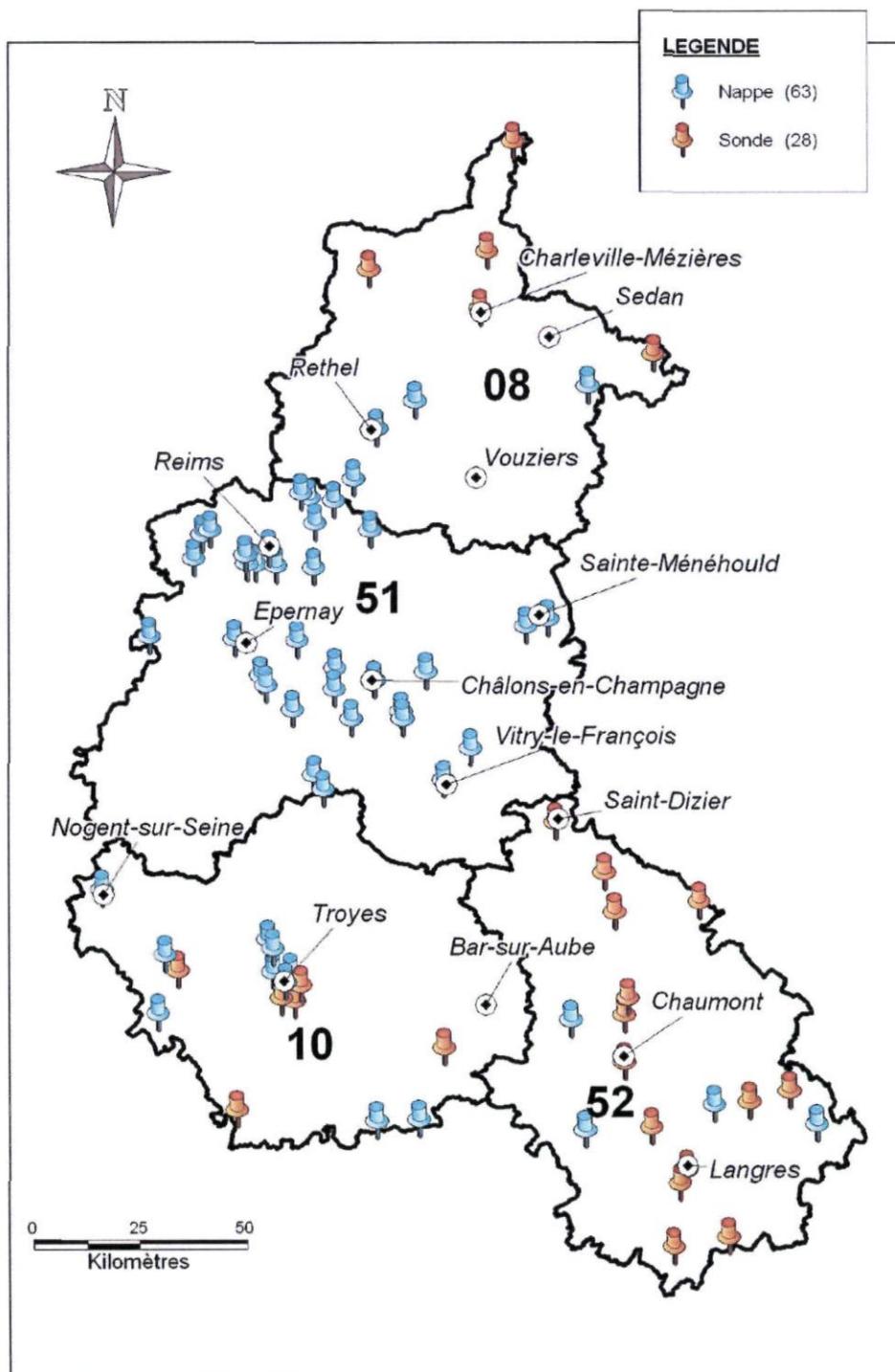


Figure 7 – Carte de localisation des installations de géothermie recensées en Champagne-Ardenne (données ADEME, sept-2011)

2.6. BILAN DES DECLARATIONS DE FORAGES GEOTHERMIQUES

La géothermie a connu un essor notable en France lors des dernières années. L'évolution du nombre d'ouvrages ou de forages de géothermie créés en BSS par le BRGM depuis 2000 pour la France entière (Figure 8) est en augmentation assez régulière jusqu'en 2009, suivi par une baisse en 2010. Pour 2011, toutes les déclarations n'ayant pas été enregistrées en BSS les résultats sont incomplets et non représentatifs pour cette année particulière.

La situation est certainement sous-évaluée, la totalité des ouvrages géothermiques effectivement réalisés n'étant pas systématiquement déclarés au préalable à la DREAL et au BRGM. Pour rappel, les ouvrages déclarés à la DREAL sont créés en BSS dans la mesure où les éléments techniques ont été communiqués au BRGM, c'est-à-dire au minimum les coupes géologique et technique et le plan de localisation.

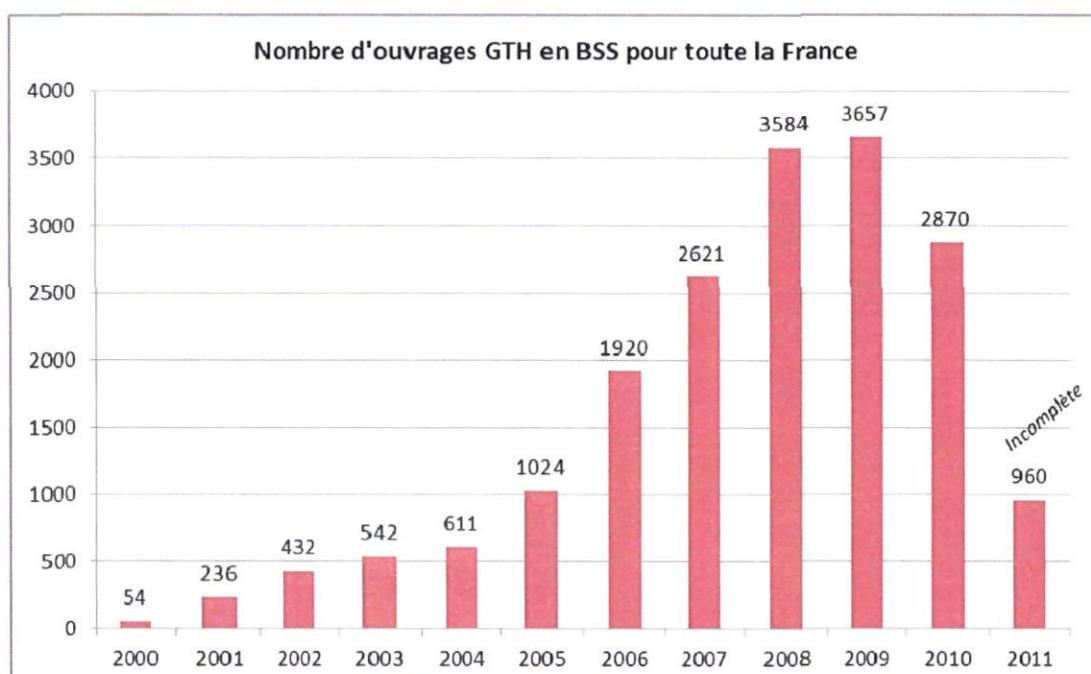


Figure 8 - Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS concernant des projets de géothermie entre 2000 et 2011 pour la France entière (état au 09/12/2011)

En Champagne-Ardenne, l'évolution du nombre de forages de géothermie créés en BSS par le BRGM depuis 2002 (Figure 9) suit la même tendance qu'à l'échelle nationale jusqu'en 2008. En 2009, on note un net recul avec seulement 24 ouvrages déclarés au lieu d'une cinquantaine habituellement (2008/2010/2011). Pour 2011, toutes les déclarations faites au BRGM SGR/CHA n'ayant pas encore été traitées et enregistrées en BSS les résultats sont incomplets. Le nombre d'ouvrages de géothermie en région Champagne-Ardenne représente au maximum 24% du total des ouvrages déclarés en BSS en 2007 et au minimum seulement 3% en 2009 (Figure 10).

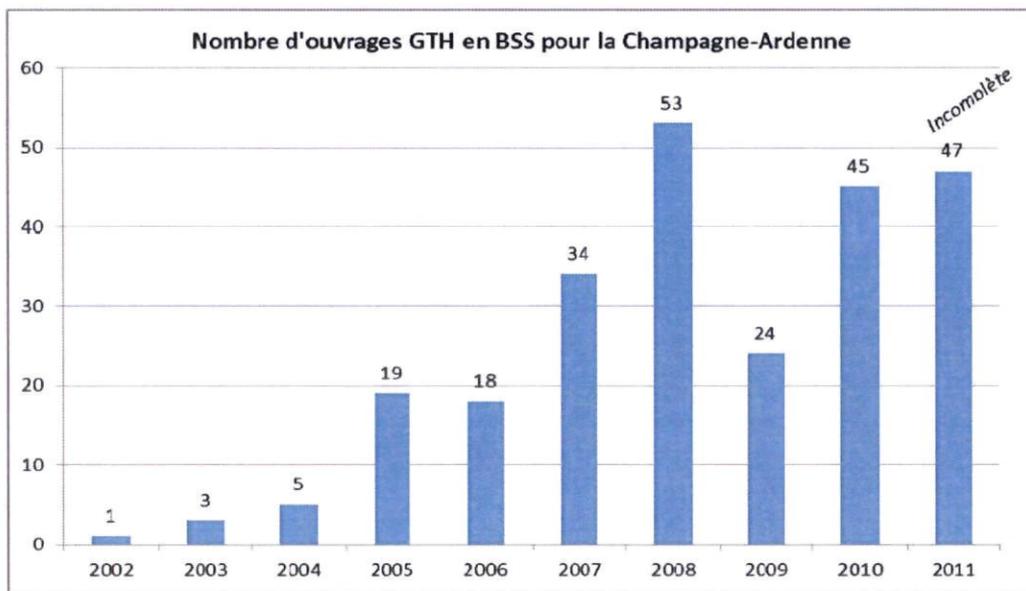


Figure 9 - Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS concernant des projets de géothermie entre 2002 et 2011 pour la Champagne-Ardenne (état au 09/12/2011)

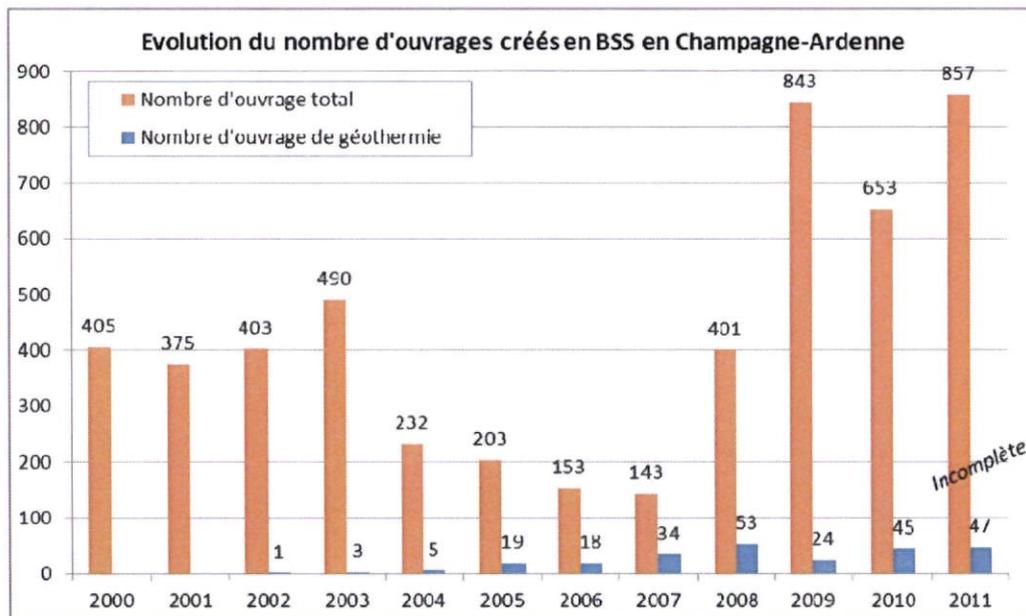


Figure 10 – Evolution du nombre d'ouvrages créés en BSS entre 2000 et 2011 pour la Champagne-Ardenne (état au 09/12/2011)



3. Méthodologie générale de conception de l'atlas du potentiel géothermique

3.1. METHODOLOGIE GENERALE

Le principe général de conception de l'atlas repose sur une méthode de cartographie à index avec pondération de critères. Cette méthode est basée sur la combinaison pondérée de cartes de paramètres (dites cartes unicritères) intervenant dans l'évaluation d'une propriété régionale (ici, le potentiel géothermique des aquifères).

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

L'atlas du potentiel géothermique est constitué de l'ensemble des cartes unicritères de chaque aquifère, d'une carte multicritères ou carte du potentiel géothermique par aquifère superficiel d'intérêt régional et une carte de synthèse générale, dite carte du potentiel géothermique régional, qui correspond à la compilation des meilleures potentialités par aquifère.

La cartographie et la combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement cartographique (SIG) ; les données sont traitées sous forme de polygones correspondant au contour des aquifères BD Lisa, puis intégrées dans une grille avec des mailles de 500 m de côté. Toutes les cartes produites sont géo-référencées.

Sa réalisation repose sur quatre étapes principales : le recueil de données, la cartographie par critère, l'analyse multicritère et l'élaboration de la carte finale de potentiel

La Figure 11 synthétise la méthodologie de cartographie du potentiel géothermique régional proposée.

3.2. CRITERES DE POTENTIALITE GEOTHERMIQUE

Pour rendre compte du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères superficiels sur la tranche 0-100 mètres, trois critères sont pris en compte :

- « **Productivité de l'aquifère** » ou débit exploitable ;
- « **Température de la ressource** » ;
- « **Profondeur d'accès à la ressource** » ou profondeur du niveau d'eau.

Les deux premiers sont représentatifs du rendement de l'exploitation de l'aquifère pour un usage géothermique ; le troisième est dit « économique » car il impacte directement le coût d'investissement et le coût d'exploitation d'un projet. Leur analyse simultanée permet de rendre compte de l'intérêt d'une opération de géothermie.

Dans le cadre de l'évaluation du potentiel géothermique, le critère « **qualité de la ressource** » peut également 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, dissolution) et font intervenir une gamme importante de paramètres du milieu qui ne sont pas toujours disponibles pour tous les aquifères (une forte hétérogénéité existe d'un aquifère à l'autre). Le nombre de données qualitatives de la ressource étant insuffisant, ce paramètre n'a pas été pris en compte dans le calcul du potentiel géothermique des aquifères.

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 souterraines⁴ (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).

⁴ SEQ-Eaux souterraines : grille d'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à différents usages et fonctions établie dans le cadre d'une étude inter-agences de l'eau et en collaboration entre Agences de l'Eau, MATE et BRGM en 2001.

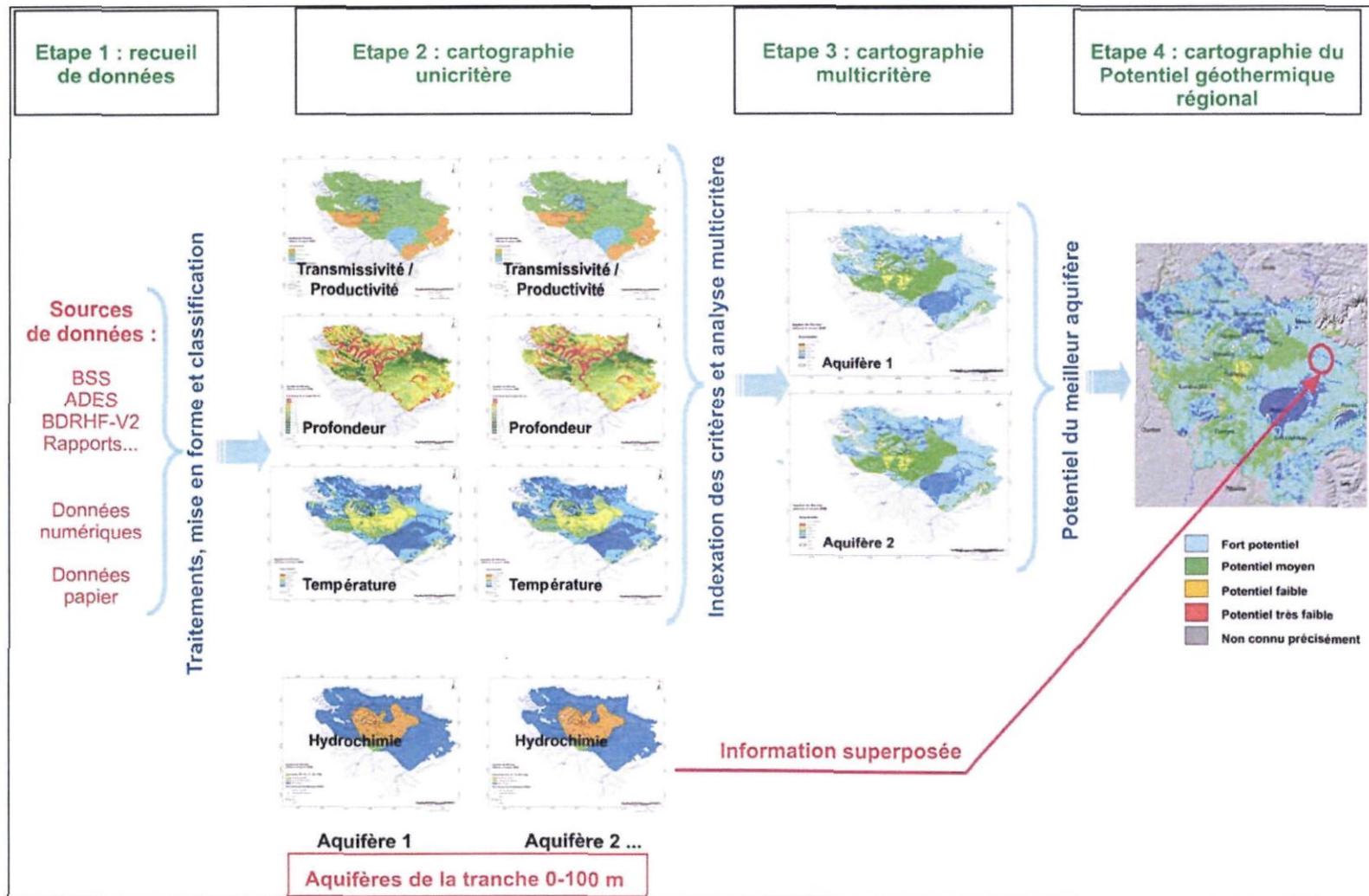


Figure 11 - Principe de l'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional

3.3. ETAPE 1 : RECUEIL DE DONNEES

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

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

Les sources de données utilisées sont :

- BSS : la Banque de données du Sous-Sol apporte des données sur la géométrie et la nature des formations géologiques, sur la piézométrie et la productivité des aquifères ;
- ADES : la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines qui apporte des informations sur la température et la qualité physico-chimiques des eaux souterraines ainsi que sur les profondeurs de niveaux d'eau complémentaires à BSS ;
- BD-LISA : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères fournissant les contours des entités hydrogéologiques françaises à 3 échelles de précision (N1 : nationale, N2 : régionale et N3 : locale) ;
- Cartes géologiques BRGM au 1/50 000 ;
- Base bibliographique du BRGM et données complémentaires fournies par les bureaux d'études, les hydrogéologues agréés.

3.4. ETAPE 2 : CARTOGRAPHIE UNICRITERE

3.4.1. Classification des données

Pour rendre lisibles les cartes de chaque critère, les données utilisées pour leur élaboration sont triées par classes.

3.4.2. 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 de chaque aquifère. La Figure 12 illustre le principe de spatialisation des données.

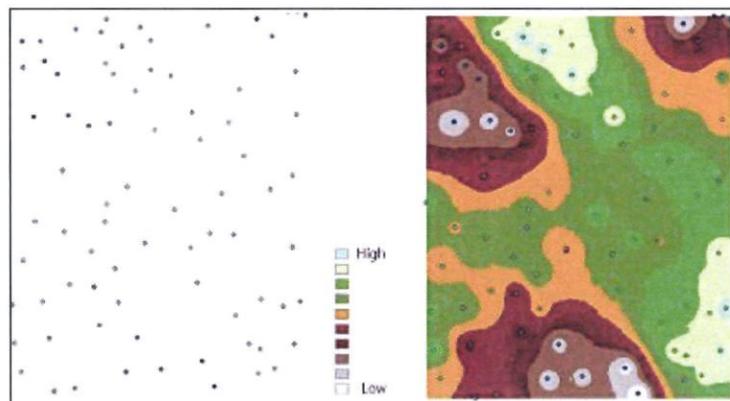


Figure 12 - Principe de la spatialisation des données (source ArcGis Desktop)

En d'autres termes, cela revient à estimer des valeurs de surface en des points non échantillonnés, sur la base d'une formule mathématique utilisant des valeurs de surface connues des points environnants. Plusieurs approches existent, chaque approche utilisant une formule mathématique différente.

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

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

Interpolation mathématique par polygones de Thiessen

Une fonction d'interpolation locale est la **méthode des plus proches voisins**, c'est-à-dire les polygones de Thiessen. Créer des polygones de Thiessen (ou polygones proximaux) revient à découper l'entité autour des points, de telle manière que chacun des polygones créés comprend toutes les positions possibles pour lesquelles il est le plus proche d'un point d'échantillonnage (Figure 13). Ensuite, on considère les polygones de Thiessen comme relativement homogènes et on leur attribue la valeur du point autour duquel ils sont construits.

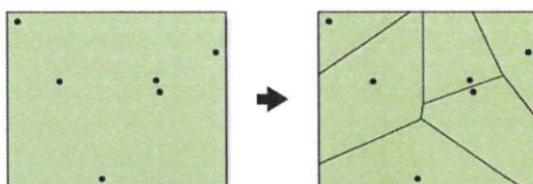


Figure 13 – Principe de l'interpolation mathématique par polygones de Thiessen

Cette méthode d'interpolation a l'inconvénient d'entretenir l'illusion de phénomènes inchangés entre les limites des polygones et qui changent de manière brusque à la frontière. Pour adoucir l'effet des changements abrupts aux limites des polygones, on peut utiliser la méthode d'abord telle quelle puis en attribuant à chaque point une classe de valeurs et non la valeur elle-même (Figure 14).

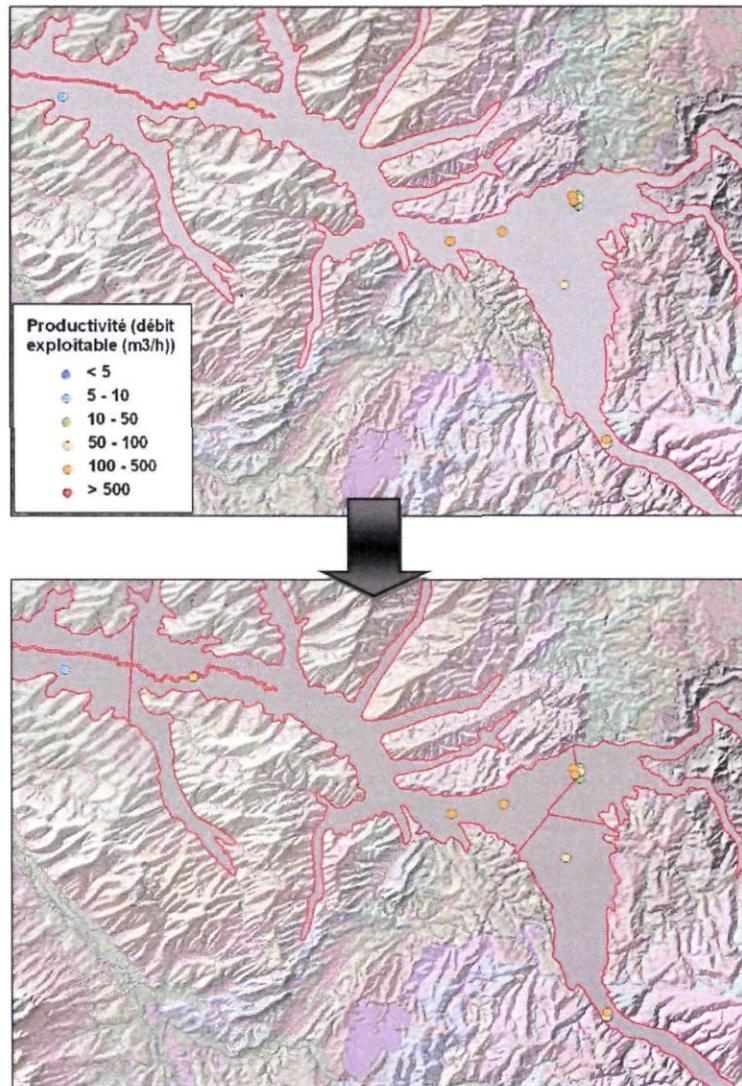


Figure 14 - Exemple d'interpolation – Cas de la productivité des alluvions du bassin versant de l'Aube (250A)

Approche statistique

Dans les cas où une interpolation mathématique n'est pas envisageable par manque de données, une analyse statistique peut être réalisée. Lorsque les données disponibles ne présentent pas une variabilité trop grande, la valeur moyenne est attribuée au critère, pour l'ensemble de l'aquifère considéré (Figure 15).

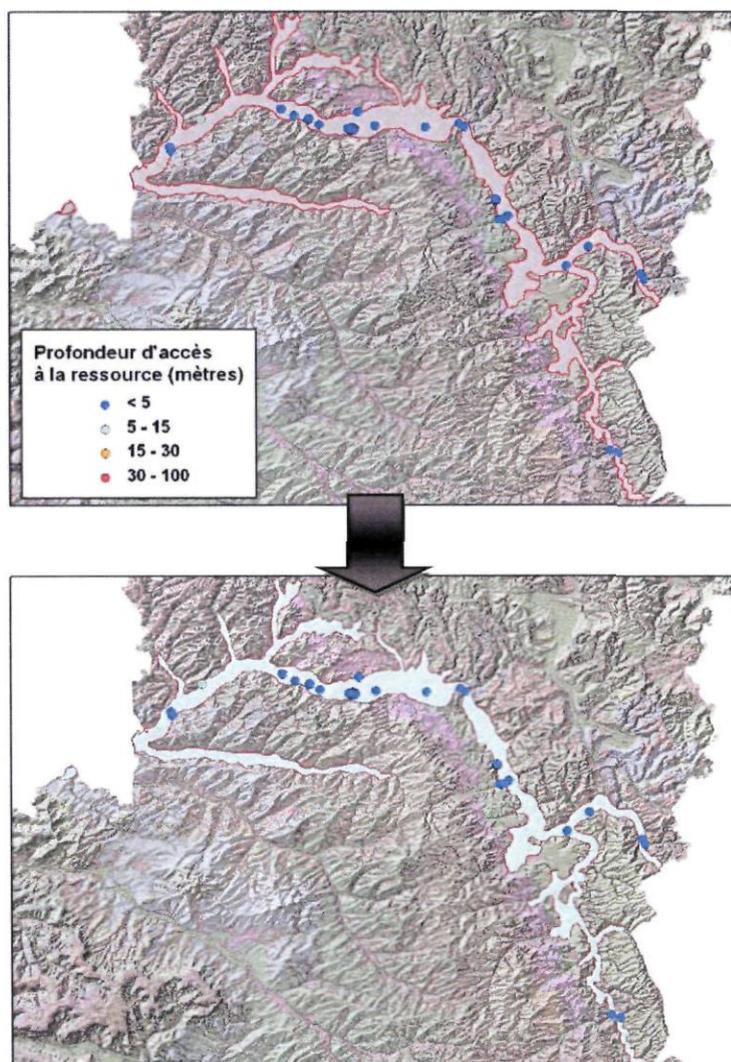


Figure 15 - Exemple d'attribution d'une valeur moyenne – Cas de la profondeur d'accès à la ressource des alluvions du bassin versant de l'Aisne (248C)

Sectorisation du critère au sein d'un même aquifère

Lorsque les données ponctuelles pour un critère et un aquifère donné présentent une forte variabilité selon la position géographique, une sectorisation de l'aquifère est réalisée, à l'aide des contours (hydro)géologiques, des isopièzes existantes, etc... L'interpolation mathématique ou l'approche statistique est ensuite réalisée pour chacun des secteurs définis au sein de l'aquifère (Figure 16).

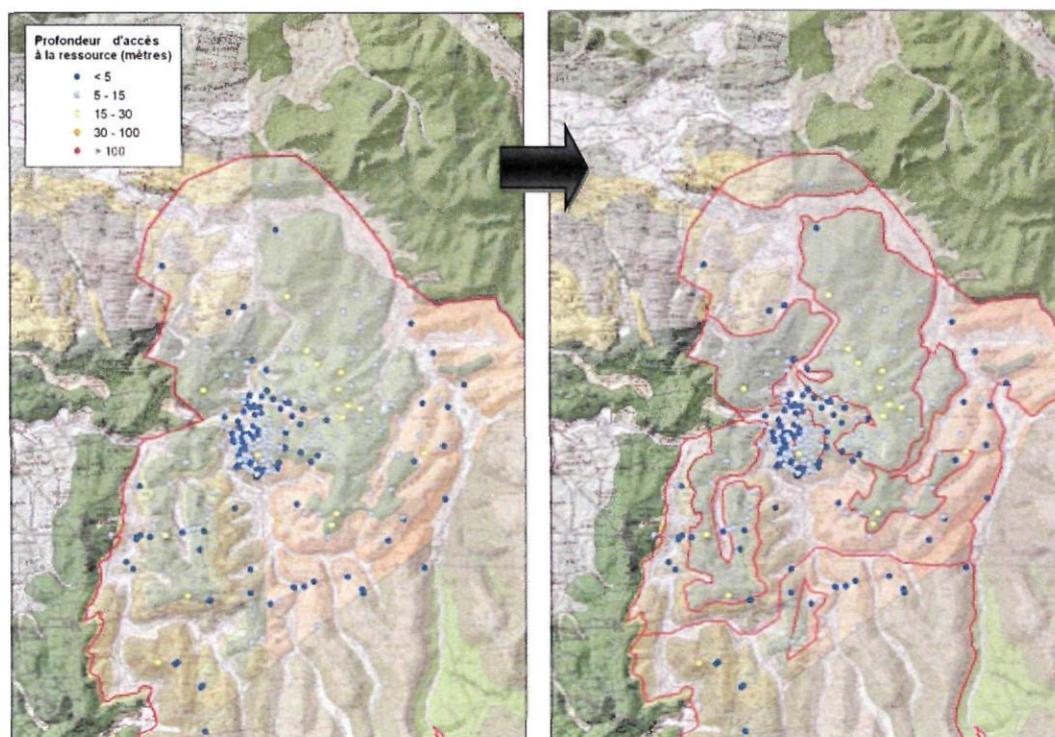


Figure 16 - Exemple de sectorisation au sein d'un même aquifère – Cas des profondeurs des Argiles, sables et marnes de l'Aptien-Barrémien

Autre cas : Trop peu de données disponibles

A l'échelle d'un aquifère (ou d'un secteur d'aquifère) et d'un critère considéré, lorsque trop peu de données ponctuelles sont disponibles pour réaliser une spatialisation satisfaisante, il a été affecté à ce critère la valeur « **non connu précisément** », sur tout ou partie de la surface de l'aquifère (Figure 17).

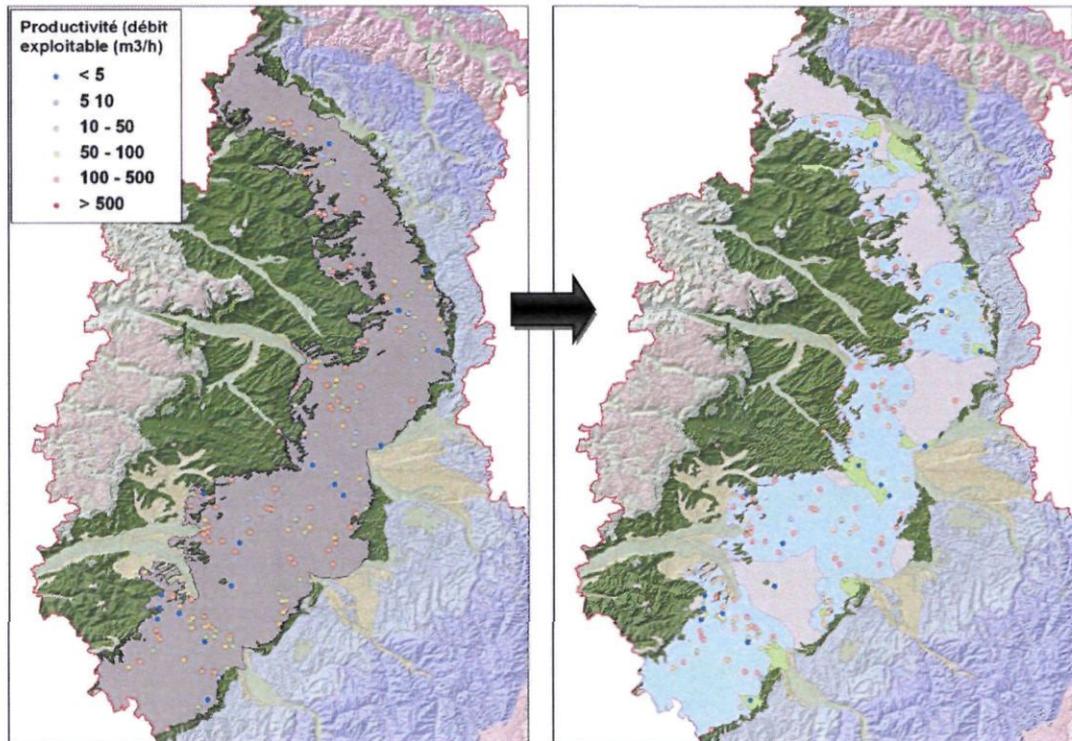


Figure 17 - Exemple de critère non renseigné pour faute de données disponibles – Cas de la productivité de la Craie marneuse du Turonien au Cénomaniien (121E)

3.4.3. Indexation des classes

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 sur nappe, à la situation la plus favorable (Figure 18).

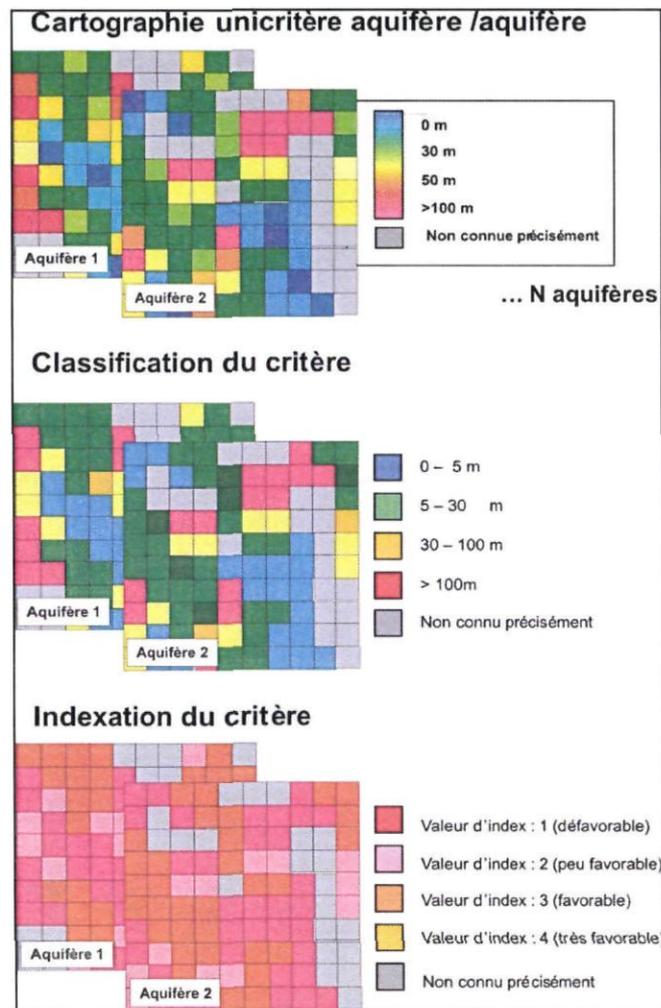


Figure 18 - Démarche de cartographie unicritère (classification et indexation)

3.4.4. Cartographie de chaque critère

Afin de rendre compte du potentiel de l'aquifère vis-à-vis de chaque critère, des cartes thématiques sont réalisées en tenant compte de la classification et de l'indexation des critères :

- Carte de profondeur d'accès à la ressource (profondeur du niveau d'eau souterraine) ;
- Carte de productivité de l'aquifère (carte des débits exploitables) ;
- Carte de température des eaux souterraines.

3.5. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE MULTICRITERE

3.5.1. 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.

3.5.2. Cartographie du potentiel géothermique par aquifère

La carte du potentiel géothermique de chaque aquifère est obtenue par combinaison pondérée des cartes unicritères (Figure 19). Un indice de potentialité géothermique est calculé par addition pondérée des index de potentialité unicritère, attribués dans chaque maille de la grille cartographique. Une carte de répartition des indices de potentialité est alors établie ; elle correspond à la carte du potentiel géothermique de l'aquifère.

3.6. ETAPE 4 : CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE REGIONAL

L'analyse multicritère conduit à l'élaboration d'une carte du potentiel géothermique par aquifère.

L'obtention d'une carte unique du potentiel géothermique régional, présentant les secteurs favorables à l'implantation de pompes à chaleur sur nappe passe par la sélection, pour chaque maille de la grille cartographique, des meilleurs indices de potentialité géothermique parmi ceux calculés pour chaque aquifère.

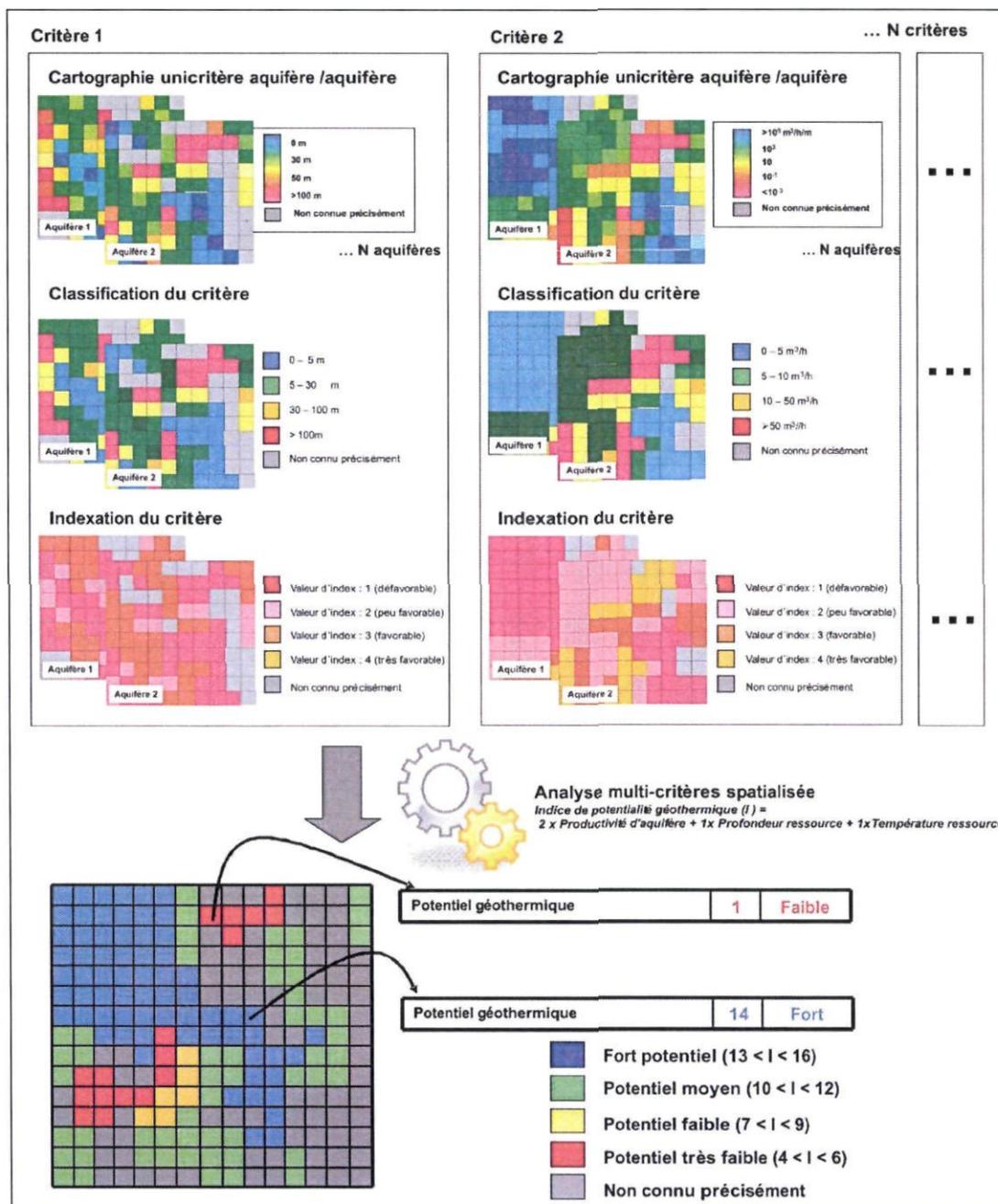


Figure 19 - Principe de la cartographie multicritère

4. Bilan sur la cartographie en Champagne-Ardenne

4.1. COLLECTE DES DONNEES

4.1.1. Collecte « externe » au BRGM

Un courrier de demande d'information a été envoyé à des interlocuteurs susceptibles de communiquer des informations récentes sur les caractéristiques des aquifères en Champagne-Ardenne. Les différents acteurs régionaux dans le domaine l'eau qui ont été ciblés, sont des administrations, des bureaux d'étude, des foreurs, des hydrogéologues agréés.

Les retours aux demandes fait aux professionnels privés (bureaux d'étude et hydrogéologues agréés) ont été non significatifs : des problèmes de mise à disposition de données pouvant être confidentielles est apparu être un frein très pénalisant pour une étude de ce type. Néanmoins quelques données récentes sur des projets de géothermie ont pu être collectées auprès des maîtres d'ouvrages notamment grâce au travail effectué par l'ADEME.

Les données « foreurs » collectées régulièrement par le BRGM dans le cadre de la mise à jour de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) ont pu être utilisées (niveaux d'eau essentiellement) mais ne sont généralement pas exploitables dans le cadre de cette étude qui nécessite non pas des données brutes mais des résultats « interprétés » de pompage d'essai.

Une tentative de collecte (en particulier dossiers de déclarations de forage et de prélèvement agricoles) a été réalisée auprès du service chargé de la Police de l'eau à la Direction Départementale du Territoire de la Marne (DDT51). Il s'agit du département de Champagne-Ardenne où il y a le plus de forages référencés en BSS, donc le plus de chance d'obtenir des données complémentaires sur les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

La rentabilité d'une telle opération (temps passé à collecter par rapport au nombre de données réellement exploitables dans le cadre de l'étude) ne s'est pas avérée intéressante. L'expérience a conduit à ne pas poursuivre la collecte dans les autres services départementaux lors de cette première phase d'investigation.

4.1.2. Collecte « interne » au BRGM

Les données de base utilisées pour la cartographie ont essentiellement été extraites de la Banque de Données du Sous-Sol, des archives documentaires du BRGM (qui intègre également les archives « hydrogéologiques » de la DIREN (actuelle DREAL). Ainsi c'est sur les points issus de la BSS et contenant des données concernant les propriétés des aquifères que s'est focalisée l'étude.

La base de données initiale contient **5217 points** avec au moins une valeur pour un des paramètres suivants : débit de production, débit spécifique, perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement.

Sur ces 5217 points, **89 points ont été écartés** car non exploitables (valeurs aberrantes ou impossibilité de rattachement à une entité hydrogéologique spécifique). Leur répartition géographique ainsi que la représentativité des aquifères captés étant assez bien répartie, ceci réduit l'incidence de leur non-utilisation (Figure 20).

Au final, 5128 points seront finalement utilisés pour l'Atlas Régional de Champagne-Ardenne.

4.2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES DONNEES DE BASE

Pour chaque point disposant d'une donnée exploitable, il a fallu déterminer l'entité hydrogéologique (BD-LISA) captée. Etant donnée la quantité importante de données à traiter, le processus a été automatisé en établissant dans un système d'information géographique (SIG) sous ARCGIS une relation d'intersection⁵ entre les points BSS disposant de données exploitables et la cartographie des entités hydrogéologiques BD-LISA.

La vérification des liens a ensuite été réalisée en comparant les profondeurs captées, la description litho-stratigraphique des points (informations collectées dans la base de données initiale) et les entités hydrogéologique BD-LISA interceptée. En cas de non-correspondance, l'attribution des codes entités hydrogéologiques ont été corrigés au cas par cas.

Dans certains cas, cette correspondance s'est avérée difficile, voire impossible, soit par manque d'informations suffisante en BSS, soit dans le cas de descriptions lithographiques ambiguës.

Dans les cas des ouvrages captant les alluvions et une autre formation sous-jacente, une étude statistique a été réalisée sur quelques points et généralisée ensuite à l'ensemble des ouvrages concernés. Il ressort du test effectué que les ouvrages dont la profondeur est inférieure à 10 m peuvent être rattachés à la couche alluviale et que les ouvrages dont la profondeur est supérieure à 10 m peuvent être rattachés à l'entité sous-jacente (craie, calcaire...).

L'annexe 1 donne une information plus détaillée sur les données disponibles et le traitement par analyse multicritère de chaque entité traitée.

⁵ Module additionnel sous ARCGIS : Hawth's Tools (<http://www.spatial ecology.com/htools/tool desc.php>)

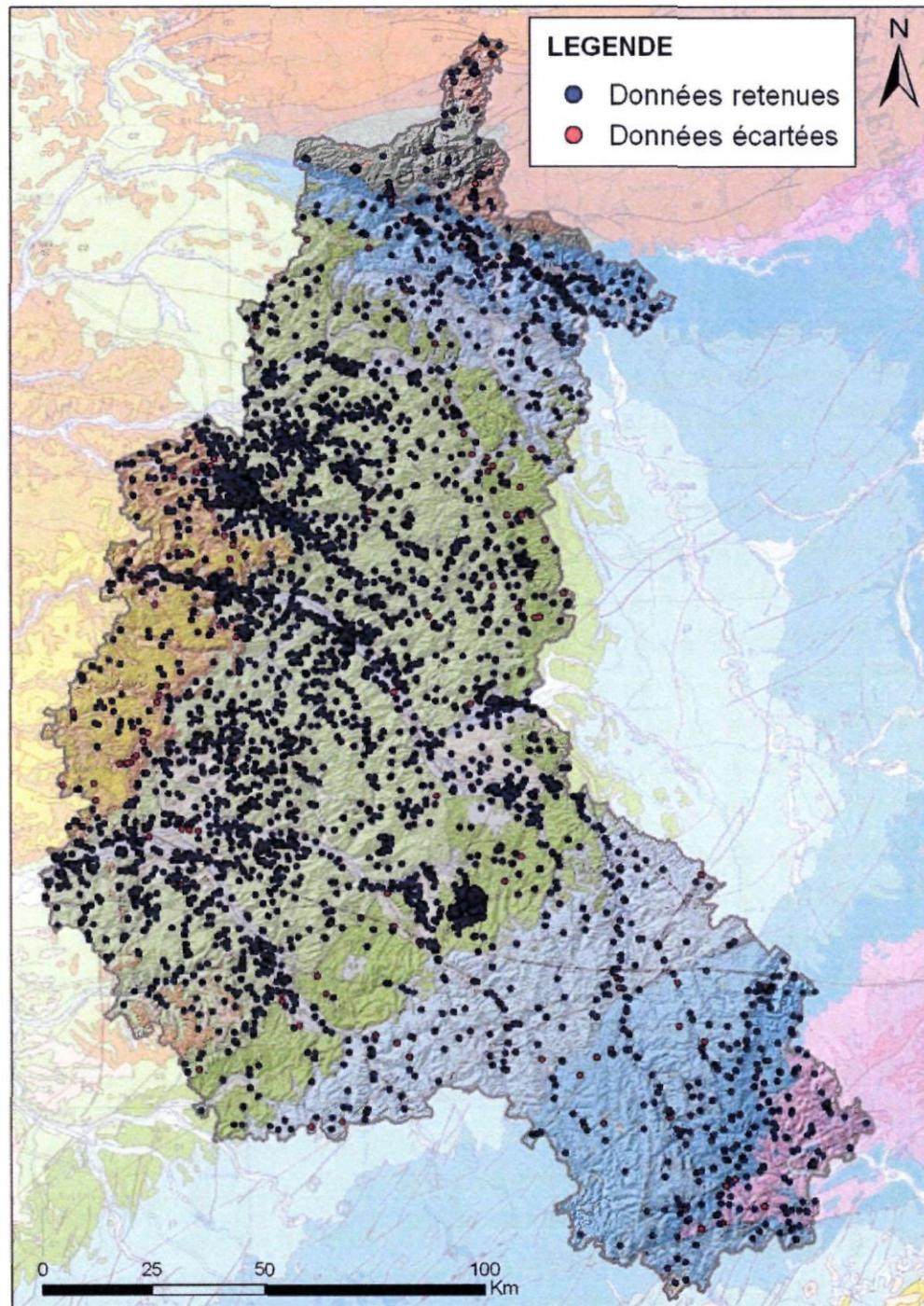


Figure 20 - Répartition des points ayant pu faire l'objet d'une correspondance avec une entité hydrogéologique BD-LISA

4.3. PROFONDEUR D'ACCES A LA RESSOURCE

4.3.1. Définition

La profondeur d'accès à la ressource dans le cas d'un aquifère libre correspond à la piézométrie de la nappe. Dans le cas d'un aquifère captif, elle correspond à la profondeur du toit de l'aquifère considéré (Figure 21).

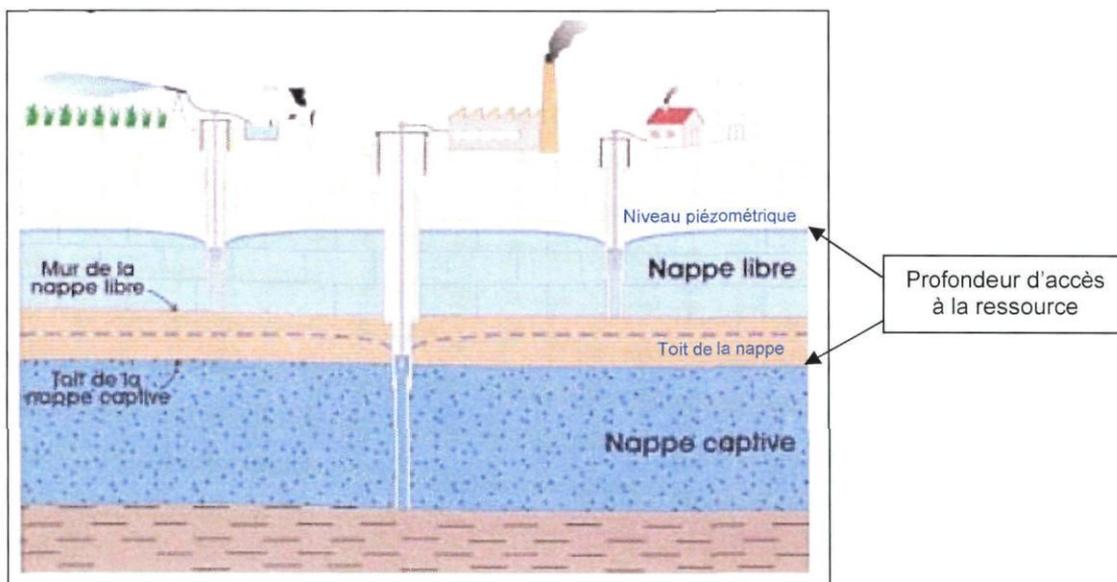


Figure 21 - Schéma explicatif des différents régimes de nappe (source BRGM)

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

- Le coût de l'opération : coûts de foration (directement lié 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 surcôte piézométrique provoquée par l'injection, dans le même aquifère, de l'eau prélevée, soit défavorable au projet.

4.3.2. Sources de données

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

- Les valeurs ponctuelles de piézométrie disponibles en BSS, dans ADES, et dans divers rapports ;
- La carte piézométrique de la craie datant de 2002 (ROUXEL et al., 2003).

4.3.3. Données disponibles

Au total, 4733 valeurs de profondeur d'accès à la ressource ont été utilisées. Le nombre de données disponibles par aquifère est variable. Pour mener une analyse comparative de cette information, il faut s'intéresser à la densité de points utilisés pour chaque entité BD-LISA aquifère (Tableau 2).

Code BDLISA de l'aquifère	Libellé de l'entité BDLISA de l'aquifère	Nombre de valeurs "profondeur d'accès à la ressource" utilisées	Surface de l'entité aquifère (km ²)	Densité de points pour 100 km ² d'aquifère
107G	Calcaires de Brie	25	562,64	4,443
113A	Calcaires de Champigny	23	329,02	6,990
113R	Calcaires grossiers du Lutétien et Sables de	30	70,43	42,598
119B	Sables du Thanétien (Paleocene)	50	291,71	17,140
121A	Craie du Turonien sup. au Campanien (Sénonien)	1835	4500,73	40,771
121E	Craie marneuse du Turonien au Cénomanién	882	4975,09	17,728
122E	Craie marneuse et Gaize du Cénomanién	68	598,01	11,371
128A	Sables de l'Albien	103	2423,29	4,250
128C	Argiles, Sables et Marnes de l'Aptien-Barrémien	319	1164,85	27,386
131A	Calcaires du Tithonien	96	1110,35	8,646
137A	Calcaires du Kimméridgien inf. (Séquanien)	116	1821,20	6,369
143A	Calcaires du Bathonien- Callovien (Dogger)	74	1582,93	4,675
143C	Calcaires de l'Aalénien-Bajocien	44	709,20	6,204
146A	Marnes du Toarcien (Lias sup.)	18	163,98	10,977
146C	Calcaires et Grès du Pliensbachien (Domérién)	74	645,95	11,456
146G	Calcaires argileux et Grès du Sinémurien-Hettangien (Lias inf.)	62	638,98	9,703
149A	Grès du Rhétien	79	583,28	13,544
149C	Dolomies et Marnes du Keuper	10	220,74	4,530
149G	Calcaires du Muschelkalk supérieur	17	66,35	25,623
151I	Socle des Ardennes	38	961,07	3,954
165A	Alluvions de la Meuse	262	112,89	232,082
165B	Alluvions de la Chiers	21	41,76	50,291
248A	Alluvions du bassin versant de la Vesle	15	168,62	8,896
248C	Alluvions du bassin versant de l'Aisne	41	364,44	11,250
249A	Alluvions du bassin versant de la Marne	177	508,90	34,781
249C	Alluvions du bassin versant de la Marne	58	408,04	14,214
250A	Alluvions du bassin versant de l'Aube	116	693,09	16,737
250B	Alluvions de la Bassée	30	360,27	8,327
250C	Alluvions de la Seine en amont de la Bassée	50	290,11	17,235
Total général	29 aquifères	4733	26367,91	

Tableau 2 - Nombre de données de profondeur d'accès à la ressource disponibles, par aquifère

Cette densité est calculée en ramenant le nombre de points utilisés pour 100 km² d'entité aquifère traité. D'une manière générale, les aquifères les plus étendus à l'affleurement et les plus sollicités sont les mieux renseignés pour ce critère (Figure 22). Les nappes alluviales et les aquifères de la craie et du Lutétien présentent des densités de points élevées. A l'inverse, les aquifères qui possèdent un intérêt hydrogéologique plus limité (contrainte d'exploitation, ressource limitée...) constituent les aquifères les moins renseignés pour ce critère « profondeur d'accès à la ressource ».

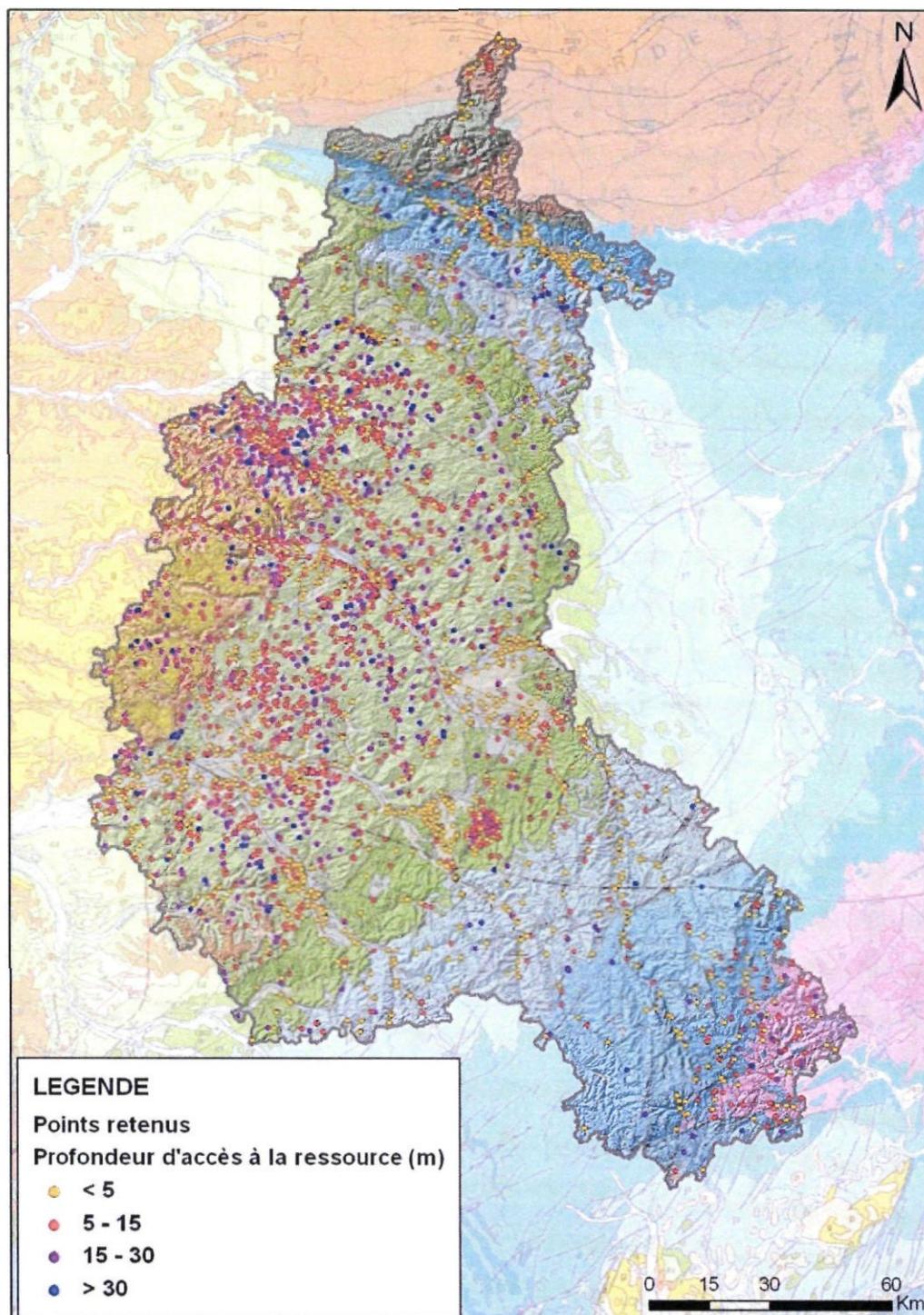


Figure 22 - Carte des données ponctuelles de profondeur d'accès à la ressource

4.3.4. Classification

En fonction des données disponibles à l'échelle de la région Champagne-Ardenne, la classification retenue pour le critère d'accès à la ressource est la suivante (Tableau 3) :

Classe de la profondeur d'accès à la ressource	Commentaire
Profondeur < 5 m	forage de moindre coût mais le risque de surcote piézométrique provoquée par l'injection dans le même aquifère de l'eau prélevée, est défavorable au projet.
5 m ≤ Profondeur < 15 m	forage de moindre coût permettant la réalisation économique d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon.
15 m ≤ Profondeur < 30 m	le coût du forage pèse fortement sur l'économie d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon
30 m ≤ Profondeur < 100 m	le coût du forage ne peut être amorti que par une forte consommation en surface (petit collectif ou ensemble de plusieurs pavillons)

Tableau 3 - Classes de profondeur d'accès à la ressource prises en compte

4.3.5. Méthode de spatialisation des données

Les données disponibles de profondeur d'accès à la ressource par aquifère présentent une faible variabilité en regard des classes définies pour ce critère (Figure 23).

82,5 % des données se répartissent au sein des deux premières classes, soit une profondeur d'accès à la ressource inférieure à 15 mètres. Il faut noter que plus de la moitié de ces valeurs sont inférieures à 5 mètres (48,6 %), renvoyant à une classe défavorable pour l'installation d'une PAC pour ce critère. Les autres données se situent dans les classes « 15 à 30 m » et « 30 à 100 m », respectivement à hauteur de 14,7 % et 2,8 %.

Pour la majeure partie des aquifères alluviaux, la profondeur d'accès à la ressource est homogène. L'approche statistique y a ainsi été privilégiée, avec attribution d'une classe unique à ces entités. Pour les autres entités du domaine sédimentaire, les différentes profondeurs observées via les données ponctuelles ont été comparées avec la géologie et le modèle numérique de terrain pour distinguer les différents secteurs

homogènes. Dans certains cas, les méthodes d'interpolation géostatistique ont été mises en œuvre.

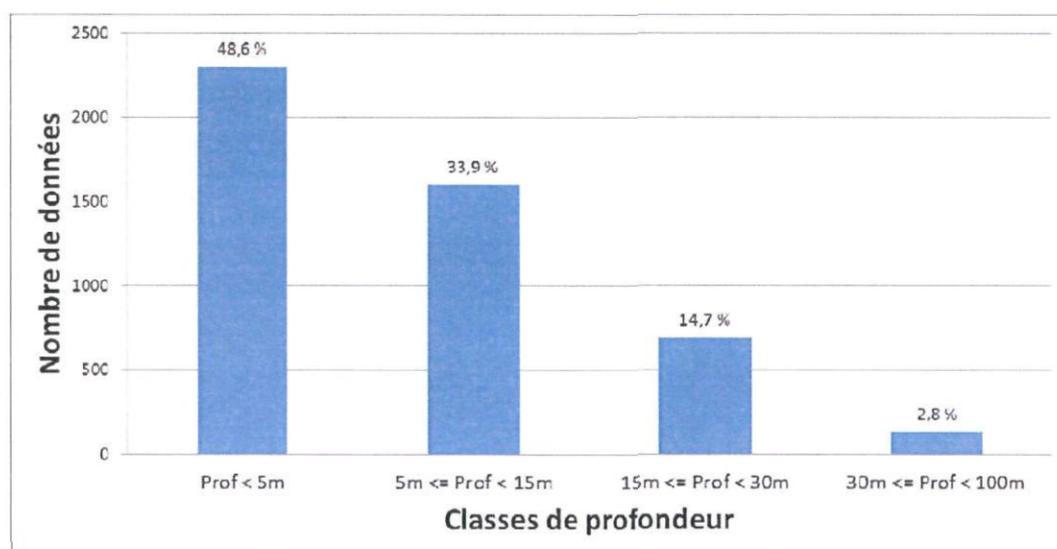


Figure 23 – Distribution du nombre de données "profondeur d'accès à la ressource"

4.3.6. Carte des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère

La carte régionale des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère figure en annexe (Annexe 2). Elle a été réalisée à partir de la carte régionale "maillée" (cf. §5.1).

Cette carte a été établie, dans la limite des données disponibles, en tenant compte :

- dans le cas de la présence d'un seul aquifère : de la profondeur d'accès à la ressource pour cet aquifère ;
- dans le cas de la présence de plusieurs aquifères superposés :
 - de la profondeur d'accès à la ressource associée à l'aquifère pour lequel le potentiel géothermique est le plus favorable ;
 - de la profondeur d'accès à la ressource la plus favorable lorsqu'aucun potentiel géothermique n'a pu être déterminé.

4.4. PRODUCTIVITE OU DEBIT EXPLOITABLE DES AQUIFERES

4.4.1. Définition

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

- Transmissivité (notée T) et Perméabilité (notée k) : paramètres intrinsèques à l'aquifère (représentant sa capacité de production), très représentatifs de la ressource.

Les données de perméabilité doivent être couplées aux données d'épaisseur mouillée d'aquifère (notée e) pour reconstituer les données de transmissivité ($T = k \times e$).

- L'épaisseur mouillée de l'aquifère (e), correspond à la différence entre la profondeur de la base de l'aquifère et la profondeur du niveau piézométrique observé au droit de l'ouvrage.

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

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

Ce paramètre est représentatif des propriétés de l'aquifère, mais également des propriétés techniques des ouvrages de captage. Il est donc moins représentatif de la ressource que la transmissivité, mais les données qui permettent de le cartographier sont plus nombreuses.

Les données de base sont l'ensemble des mesures ponctuelles de débits/rabattement disponibles en BSS et pas forcément associées à des pompages d'essais complets.

- Débits de production de forage : ce paramètre correspond à des débits exploitables, mais est surtout représentatif des propriétés techniques des ouvrages de captage et des besoins associés aux usages de la ressource. Il est peu représentatif de la capacité de production de la ressource proprement dite.

4.4.2. Sources de données

Les données prises en compte pour la cartographie de ce critère sont issues de la BSS et des différents rapports archivés au BRGM. Il a été choisi de ne retenir que les valeurs de débits spécifiques. En effet la relation liant le débit spécifique à la transmissivité a montré une trop grande dispersion et est difficilement applicable. Les débits de production sont quant à eux trop tributaires des caractéristiques du forage pour décrire convenablement l'aquifère capté.

La définition du débit exploitable à partir du débit spécifique nécessite de déterminer le rabattement acceptable tel que

$$Q_{\text{exploitable}} = Q_{\text{spécifique}} \times S_{\text{acceptable}}$$

$$\text{Avec } S_{\text{acceptable}} = (1/3) \times e_{\text{mouillée}}$$

L'épaisseur mouillée étant la plupart du temps inconnue, il a été décidé :

- Pour les ouvrages captant des entités alluviales, l'épaisseur moyenne des alluvions ayant été estimée à 10 m, on aura :

$$S_{\text{acceptable}} = (1/3) \times 10 = 3,33 \text{ m}$$

- Pour les ouvrages captant les autres formations aquifères, le rabattement acceptable a été fixé à 5 m.

4.4.3. Estimation des débits exploitables

La productivité de l'aquifère est exprimée à l'aide du **débit exploitable**. L'obtention de ce paramètre nécessite le traitement des données de productivité (débit spécifique et épaisseur mouillée d'aquifère) et leur interprétation. L'approche prise en compte est la suivante, à partir des données de débit spécifique (Q_s) et selon le rabattement (s) :

$$Q_{\text{exploitable}} = Q_s \times S_{\text{acceptable pour l'aquifère}}$$

Afin d'éviter les disparités entre les différents atlas régionaux et afin de standardiser la méthode, l'expression du rabattement acceptable est définie nationalement.

Le rabattement acceptable est limité à un tiers de l'épaisseur mouillée de l'aquifère (noté e), avec un maximum de 5 m.

Ainsi, la relation permettant d'exprimer le débit exploitable est la suivante :

$Q_{\text{exploitable}} = Q_s \times \frac{1}{3} \times e \quad \text{où } \frac{1}{3} \times e \leq 5 \text{ m}$

Cette méthode se base sur des données qui ne sont pas toujours très représentatives des caractéristiques de l'aquifère, mais où les approximations introduites pour l'évaluation des débits exploitables sont limitées.

4.4.4. Données disponibles

Le Tableau 4 présente les données ponctuelles de **débit exploitable** disponibles pour chaque aquifère. Un total de 1142 données ponctuelles a été recueilli.

Au regard des variations de la densité de données disponibles pour chaque aquifère concernant ce critère, le constat est semblable à celui du critère profondeur. Ainsi, les aquifères les plus sollicités sont les mieux caractérisés (craie, Lutétien, certaines entités alluviales) par rapport à ceux présentant un intérêt hydrogéologique plus restreint (Dogger, Trias). En opposition toutefois au critère « profondeur d'accès à la

ressource », la densité de points pour la majeure partie des alluvions ne se dénotent pas particulièrement des autres entités, hormis pour les alluvions de la Meuse.

Code BDLISA de l'aquifère	Libellé de l'entité BDLISA de l'aquifère	Nombre de valeurs de "débit exploitable" utilisées	Surface de l'entité aquifère (km ²)	Densité de points pour 100 km ² d'aquifère
107G	Calcaires de Brie	10	562,64	1,777
113A	Calcaires de Champigny	3	329,02	0,912
113R	Calcaires grossiers du Lutétien et Sables de l'Ypresien	9	70,43	12,779
119B	Sables du Thanétien (Paleocene)	20	291,71	6,856
121A	Craie du Turonien sup. au Campanien (Sénonien)	517	4500,73	11,487
121E	Craie marneuse du Turonien au Cénomanién	200	4975,09	4,020
122E	Craie marneuse et Gaize du Cénomanién	19	598,01	3,177
128A	Sables de l'Albien	61	2423,29	2,517
128C	Argiles, Sables et Marnes de l'Aptien-Barrémién	19	1164,85	1,631
131A	Calcaires du Tithonien	34	1110,35	3,062
137A	Calcaires du Kimméridgien inf. (Séquanién)	30	1821,20	1,647
143A	Calcaires du Bathonien- Callovién (Dogger)	5	1582,93	0,316
143C	Calcaires de l'Aalénién-Bajocién	3	709,20	0,423
146A	Marnes du Toarcién (Lias sup.)	5	163,98	3,049
146C	Calcaires et Grès du Pliensbachien (Domérién)	35	645,95	5,418
146G	Calcaires argileux et Grès du Sinémurién-Hettangien (Lias inf.)	11	638,98	1,722
149A	Grès du Rhétién	33	583,28	5,658
149C	Dolomies et Marnes du Keuper	2	220,74	0,906
149G	Calcaires du Muschelkalk supérieur	6	66,35	9,043
151I	Socle des Ardennes	8	961,07	0,832
165A	Alluvions de la Meuse	36	112,89	31,889
165B	Alluvions de la Chiers	2	41,76	4,790
248A	Alluvions du bassin versant de la Vesle	7	168,62	4,151
248C	Alluvions du bassin versant de l'Aisne	8	364,44	2,195
249A	Alluvions du bassin versant de la Marne	15	508,90	2,948
249C	Alluvions du bassin versant de la Marne	7	408,04	1,716
250A	Alluvions du bassin versant de l'Aube	17	693,09	2,453
250B	Alluvions de la Bassée	11	360,27	3,053
250C	Alluvions de la Seine en amont de la Bassée	9	290,11	3,102
Total général	29 aquifères	1142	26367,91	

Tableau 4 - Nombre de données de débit exploitable par aquifère

La Figure 24 illustre la distribution géographique des données de débit exploitable utilisées en Champagne-Ardenne.

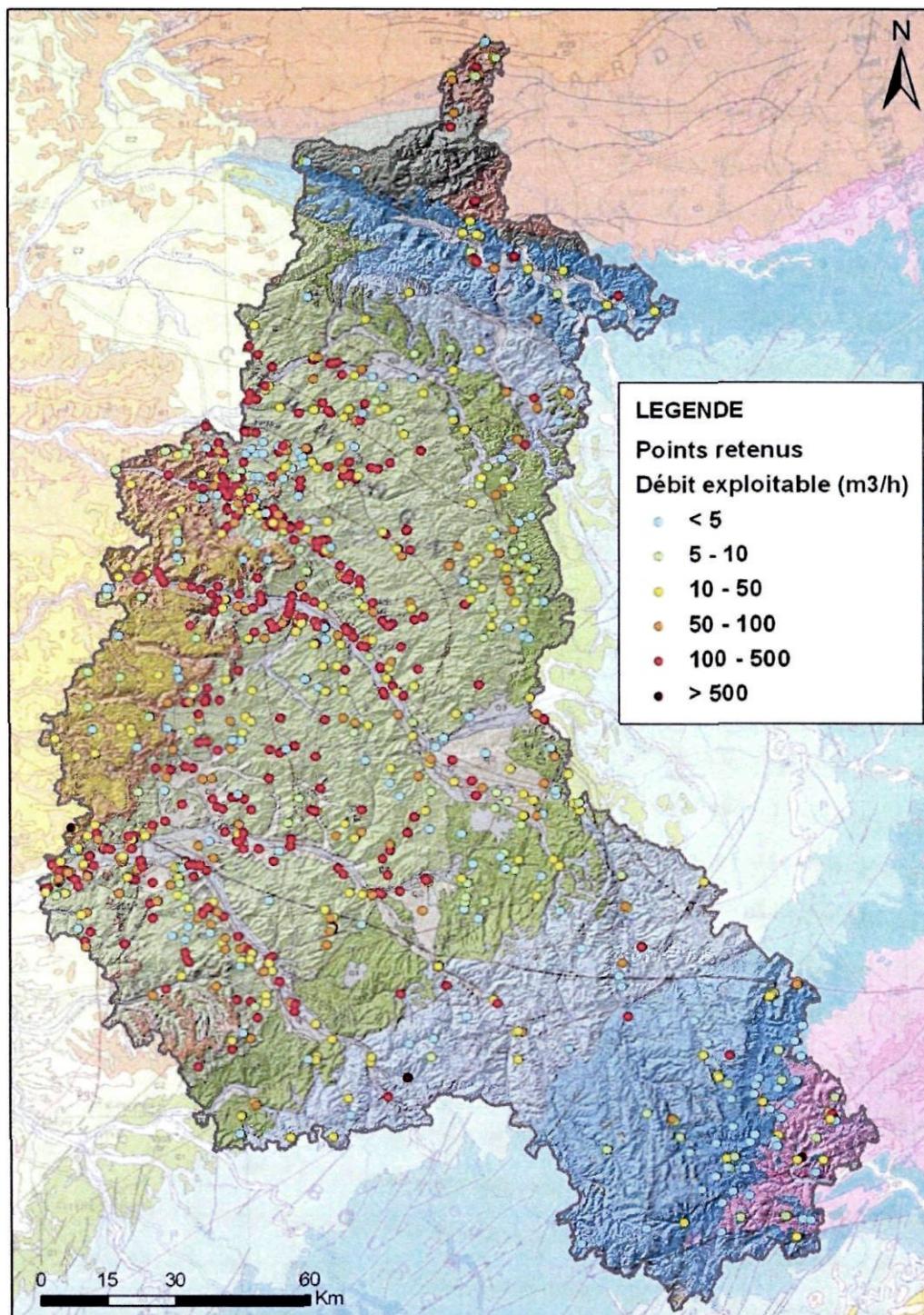


Figure 24 - Carte des données ponctuelles de débit spécifique

4.4.5. Classification

La classification retenue pour le critère « productivité de l'aquifère » est la suivante (Tableau 5) :

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

Tableau 5 - Classes de productivité prises en compte

La distribution des valeurs au sein des classes de productivité prises en compte est hétérogène.

16,9 % des valeurs de débits exploitables recueillis sont inférieures à 5 m³/h et 9,5 % se trouvent dans la gamme 5 à 10 m³/h.

Plus du quart des données collectées correspond à la classe de productivité 10 à 50 m³/h et près de la moitié des valeurs (48,2 %) sont supérieures à 50 m³/h (Figure 25).

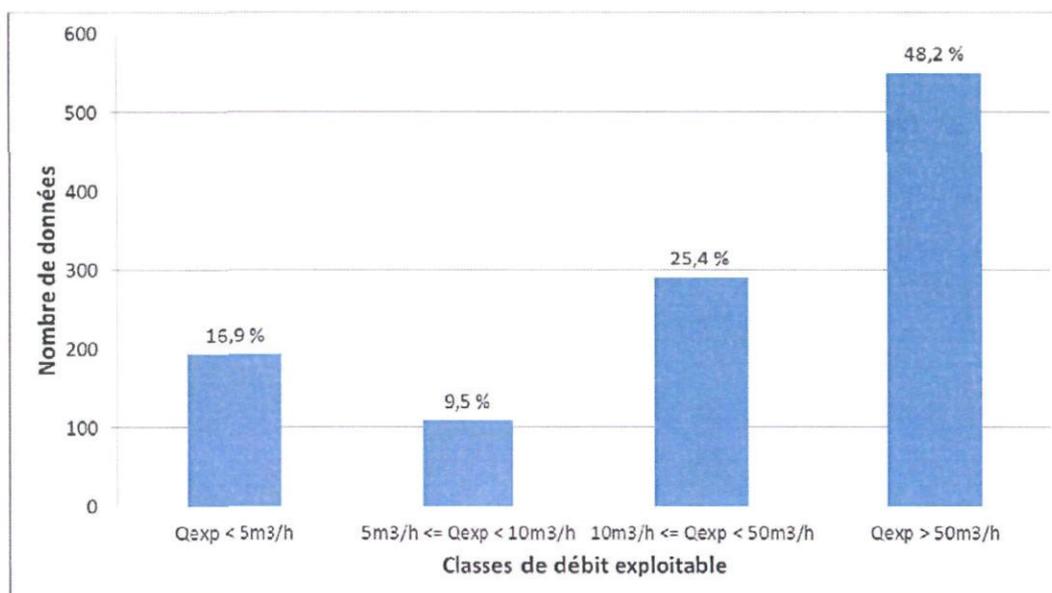


Figure 25 – Distribution des données de débit exploitable collectées au sein des classes de productivité

4.4.6. Méthodes de spatialisation des données

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

L'approche géologique a été privilégiée lorsqu'une influence se vérifiait sur les données ponctuelles. Cette méthode s'est révélée particulièrement pertinente dans le cas des aquifères multicouches. La distinction des zones libres et captives (présence d'un recouvrement) a parfois expliqué la distribution des valeurs de débits, et/ou a permis de discerner les zones renseignées de celles où l'information manquait (par exemple, les valeurs de débit exploitable utilisées sont plus abondantes dans les zones affleurantes).

Pour les entités du Séno-Turonien, les zones de vallées - où la craie est plus fracturée - sont globalement plus productives que les zones de plateaux. La topographie a été utilisée pour délimiter les vallées.

Lorsque les valeurs se révélaient homogènes, l'approche statistique a été appliquée, avec attribution d'une valeur de productivité unique par aquifère.

Enfin, dans le cas où les méthodes précédentes n'ont pas abouti à un zonage satisfaisant permettant d'expliquer la distribution des valeurs, les méthodes

d'interpolation géostatistique ou de sectorisation par les polygones de Thiessen ont été mises en œuvre.

4.4.7. Carte de productivité de la ressource du meilleur aquifère

La carte régionale de productivité de la ressource du meilleur aquifère figure en annexe (Annexe 3). Elle a été réalisée à partir de la carte régionale "maillée" (cf. §5.1).

Cette carte a été établie, dans la limite des données disponibles, en tenant compte :

- dans le cas de la présence d'un seul aquifère : de la productivité de la ressource pour cet aquifère ;
- dans le cas de la présence de plusieurs aquifères superposés :
 - de la productivité de la ressource associée à l'aquifère pour lequel le potentiel géothermique est le plus favorable ;
 - de la productivité de la ressource la plus favorable lorsqu'aucun potentiel géothermique n'a pu être déterminé.

4.5. TEMPERATURE DE LA RESSOURCE

4.5.1. Définition

Le critère « température de la ressource » est comme le critère « productivité de la ressource » représentatif du rendement de l'exploitation de l'aquifère pour un usage géothermique. En effet l'eau de la nappe est utilisée comme fluide caloporteur. L'énergie qu'elle contient sous forme de « chaleur sensible » (c'est-à-dire sans changement de phase, l'eau restant à l'état liquide) est exploitée pour un usage géothermique notamment pour les propriétés suivantes : forte capacité calorifique de l'eau (transfert rapide de la chaleur entre le réservoir et la surface) et température quasi constante au cours de l'année. Compte-tenu des basses températures des nappes superficielles (12 à 15°C), les calories destinées au chauffage sont extraites par pompe à chaleur (PAC) qui prélève l'énergie de la nappe aquifère pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage. Ce delta de température est directement proportionnel au rendement de l'installation.

4.5.2. Sources de données

Les données prises en compte pour la cartographie de ce critère sont les mesures ponctuelles en forage issues de la Banque de données ADES. Lors du dépouillement des données BSS, les valeurs de températures présentes ont également été recensées, et ont permis de compléter par la suite la banque de données existante.

Pour l'essentiel, il s'agit de captages AEP ou de qualitomètres de suivi des Installations Classées dont la qualité de l'eau (notamment paramètre température) est surveillée très régulièrement. Les données de températures ne sont exploitables que si elles sont rattachées à une entité hydrogéologique.

En région Champagne-Ardenne, la température de l'eau contenue dans les nappes superficielles ne varie que de quelques degrés au cours d'une année autour d'une valeur moyenne qui varie de 9 à 13°C, suivant les secteurs géographiques. Les faibles valeurs se situent dans les régions les plus élevées en altitude ; les fortes valeurs se rencontrent dans les zones urbaines.

La profondeur de la nappe captée intervient aussi sur la température de l'eau ; on compte en moyenne un accroissement de 1°C tous les 30 mètres.

Il faut noter également que la proximité de gravières et de rivières constitue un front froid susceptible d'être sollicité en cas de pompages intensifs dans la nappe alluviale, provoquant ainsi une baisse locale de la température de l'eau.

Les valeurs de température représentées dans les deux graphiques suivants montrent les corrélations entre la température de l'eau et la profondeur de l'ouvrage d'une part (Figure 26) et le niveau piézométrique d'autre part (Figure 27).

Les valeurs extrêmes devront être écartées en raison de doutes sur la qualité des mesures. Il s'agit de températures inférieures à 8 °C ou supérieures à 15 °C.

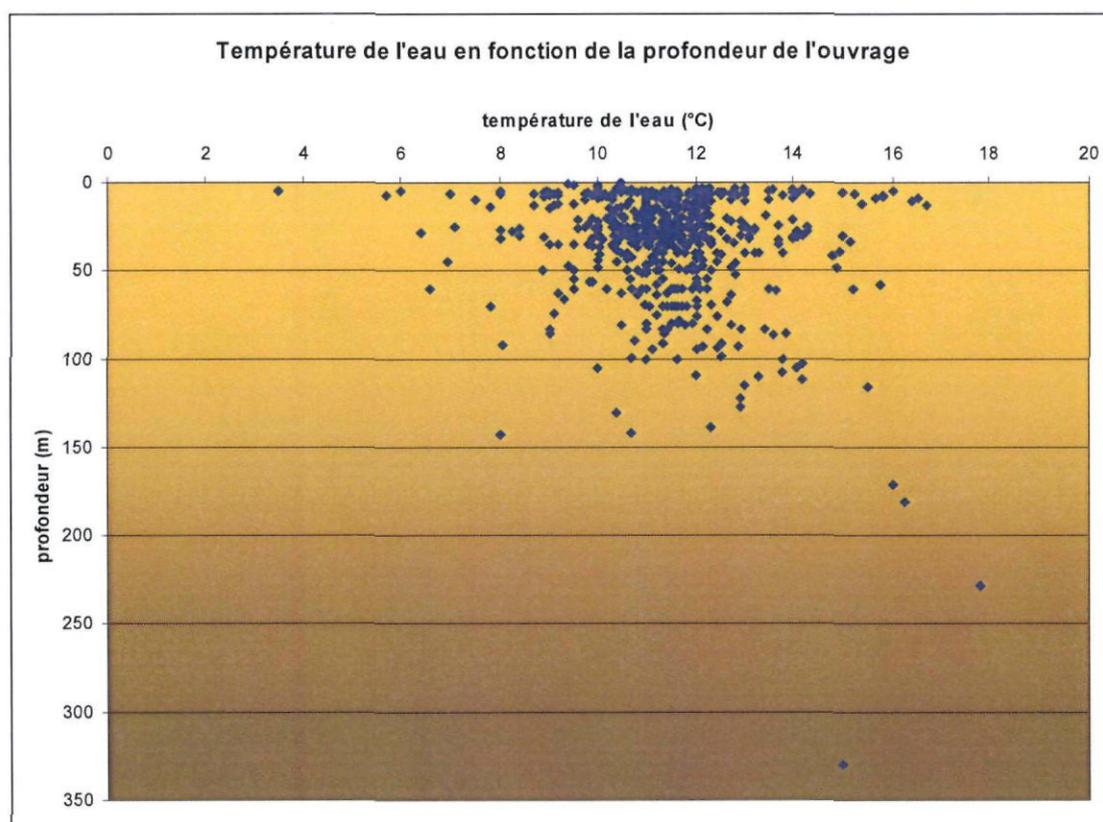


Figure 26 – Corrélation entre les températures des eaux souterraines et les profondeurs des ouvrages

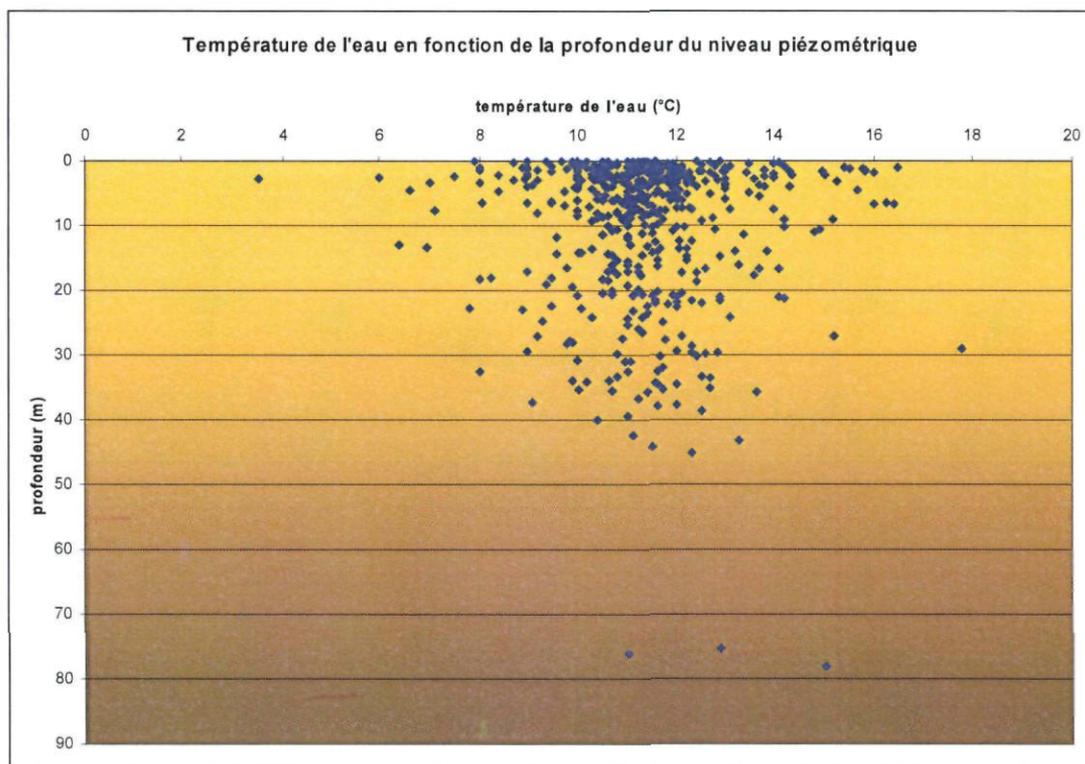


Figure 27 – Corrélation entre les températures des eaux souterraines et les profondeurs des niveaux piézométriques (ou niveau d'eau dans les ouvrages)

4.5.3. Données disponibles

784 valeurs de température ont permis la caractérisation de la ressource en Champagne-Ardenne pour ce critère (Tableau 6).

Les densités de points se révèlent très variables d'une entité aquifère à l'autre. La majorité des données de températures (33%) est disponible pour les entités crayeuses (121A et 121E). Deux entités n'ont pu être caractérisées pour ce critère « température de la ressource », faute de données disponibles : Il s'agit des Alluvions de la Chiers et des Alluvions du bassin versant de la Vesle.

Cependant, cette variabilité de la densité de points et le nombre de valeurs relativement restreint ne constitue pas une forte contrainte au regard de la faible dispersion des valeurs autour de la classe moyenne (cf. paragraphe 4.5.4).

La Figure 28 illustre la distribution géographique des données de « température de la ressource » utilisées en Champagne-Ardenne.

Code BDLISA de l'aquifère	Libellé de l'entité BDLISA de l'aquifère	Nombre de valeurs "température de la ressource" utilisées	Surface de l'entité aquifère (km²)	Densité de points pour 100 km² d'aquifère
107G	Calcaires de Brie	8	562,64	1,422
113A	Calcaires de Champigny	6	329,02	1,824
113R	Calcaires grossiers du Lutétien et Sables de l'Ypresien	24	70,43	34,078
119B	Sables du Thanétien (Paleocène)	5	291,71	1,714
121A	Craie du Turonien sup. au Campanien (Sénonien)	131	4500,73	2,911
121E	Craie marneuse du Turonien au Cénomanién	131	4975,09	2,633
122E	Craie marneuse et Gaize du Cénomanién	11	598,01	1,839
128A	Sables de l'Albien	13	2423,29	0,536
128C	Argiles, Sables et Marnes de l'Aptien-Barrémien	11	1164,85	0,944
131A	Calcaires du Tithonien	34	1110,35	3,062
137A	Calcaires du Kimméridgien inf. (Séquanien)	50	1821,20	2,745
143A	Calcaires du Bathonien- Callovien (Dogger)	32	1582,93	2,022
143C	Calcaires de l'Aalénien-Bajocien	50	709,20	7,050
146A	Marnes du Toarcien (Lias sup.)	25	163,98	15,246
146C	Calcaires et Grès du Pliensbachien (Domérien)	3	645,95	0,464
146G	Calcaires argileux et Grès du Sinémurien-Hettangien (Lias inf.)	30	638,98	4,695
149A	Grès du Rhétien	3	583,28	0,514
149C	Dolomies et Marnes du Keuper	3	220,74	1,359
149G	Calcaires du Muschelkalk supérieur	4	66,35	6,029
151I	Socle des Ardennes	16	961,07	1,665
165A	Alluvions de la Meuse	19	112,89	16,830
165B	Alluvions de la Chiers		41,76	
248A	Alluvions du bassin versant de la Vesle		168,62	
248C	Alluvions du bassin versant de l'Aisne	11	364,44	3,018
249A	Alluvions du bassin versant de la Marne	20	508,90	3,930
249C	Alluvions du bassin versant de la Marne	4	408,04	0,980
250A	Alluvions du bassin versant de l'Aube	133	693,09	19,189
250B	Alluvions de la Bassée	3	360,27	0,833
250C	Alluvions de la Seine en amont de la Bassée	4	290,11	1,379
Total général	29 aquifères	784	26367,91	

Tableau 6 - Nombre de données de température par aquifère

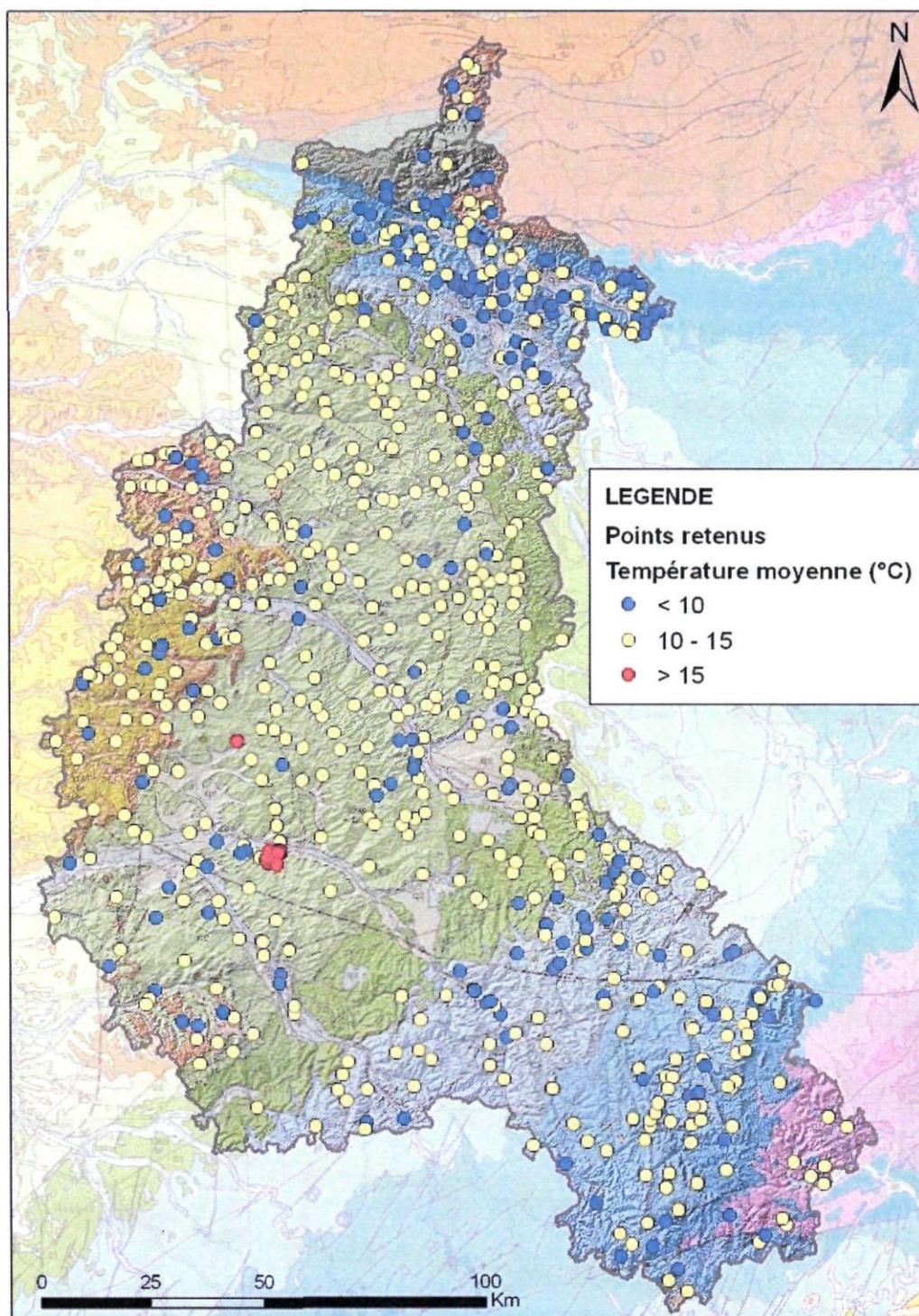


Figure 28 - Carte des données ponctuelles de température

4.5.4. Classification

La classification retenue pour le critère « température de la ressource » est basée sur l'évolution du degré d'efficacité d'une PAC utilisée en mode chauffage en fonction de la température de la ressource (Tableau 7).

Classe de température	Commentaire
Température < 10°C	Peu favorable car difficultés pour le fonctionnement d'une PAC en mode chauffage.
10°C ≤ Température < 15°C	Très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage et climatisation et au free-cooling.
T > 15°C	Favorable mais difficulté pour le fonctionnement d'une PAC en mode climatisation.

Tableau 7 - Classes de température d'aquifère prises en compte

Sur les 784 valeurs disponibles, la classe moyenne regroupe 74,3 % des valeurs : près des ¾ du total des températures sont comprises entre 10°C et 15°C.

20,7 % des données de l'échantillon sont inférieures à 10°C et 5,0 % sont supérieures à 15°C (Figure 29).

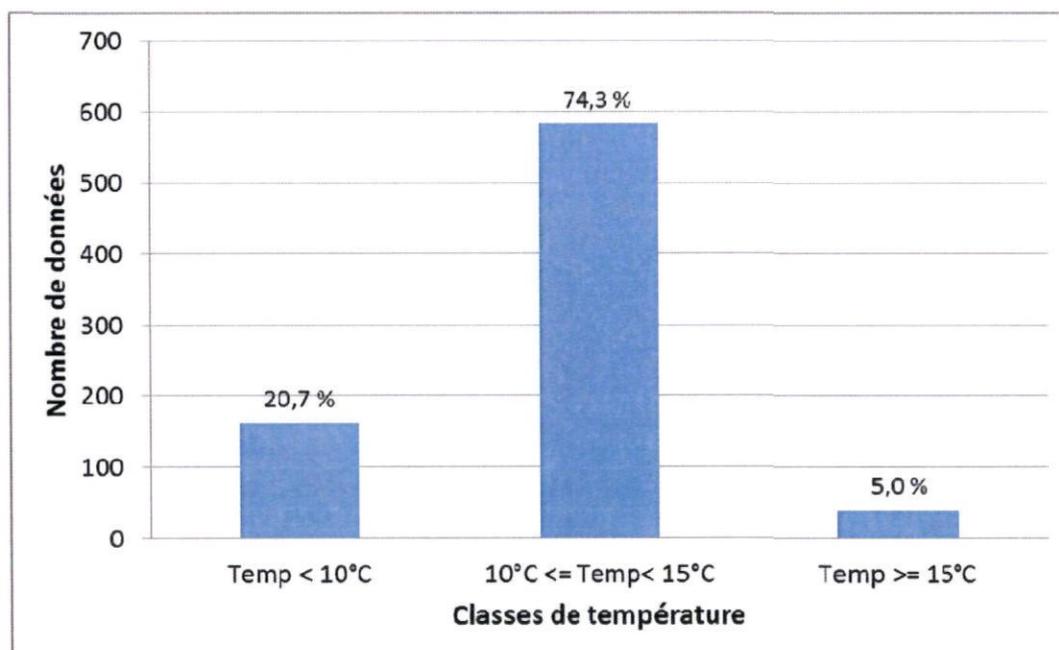


Figure 29 - Nombre de données par classes de température

4.5.5. Méthode de spatialisation des données

Les valeurs de températures disponibles par aquifère présentent une faible variabilité en regard des classes définies pour ce critère (Figure 29). L'approche statistique a été privilégiée, avec attribution d'une classe de température unique à l'ensemble de la surface de chaque aquifère.

4.5.6. Carte des températures de la ressource du meilleur aquifère

La carte régionale des températures de la ressource du meilleur aquifère figure en annexe (Annexe 4). Elle a été réalisée à partir de la carte régionale "maillée" (cf. §5.1).

Cette carte a été établie, dans la limite des données disponibles, en tenant compte :

- dans le cas de la présence d'un seul aquifère : de la température de la ressource pour cet aquifère ;
- dans le cas de la présence de plusieurs aquifères superposés :
 - de la température de la ressource associée à l'aquifère pour lequel le potentiel géothermique est le plus favorable ;
 - de la productivité de la ressource la plus favorable lorsqu'aucun potentiel géothermique n'a pu être déterminé.

4.6. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

4.6.1. Rappel des étapes précédentes et pondération des critères

Après avoir procédé au recueil des données de base, définit la classification et l'indexation des critères (Tableau 8), réalisé des cartes spatialisées par critère et par aquifère à partir des données de base ponctuelles, il a été procédé à une analyse simultanée de ces cartes par le biais d'un calcul automatisé multicritères, mené sous SIG. Ce calcul aboutit à une carte du potentiel géothermique pour chaque aquifère (Annexe 5).

Critère de potentialité géothermique	Classification de critères	Indexation des classes	Potentialité
Profondeur d'accès à la ressource	Prof < 5m	1	Défavorable
	5 m < Prof < 15 m	4	Très favorable
	15 m < Prof < 30 m	3	Favorable
	30 m < Prof < 100 m	2	Peu favorable
	Non connue précisément	- 9999	
Productivité de l'aquifère	Q < 5 m ³ /h	1	Défavorable
	5 m ³ /h < Q < 10 m ³ /h	2	Peu favorable
	10 m ³ /h < Q < 50 m ³ /h	3	Favorable
	Q > 50 m ³ /h	4	Très favorable
	Non connu précisément	- 9999	
Température de la ressource	T < 10°C	2	Peu favorable
	10°C ≤ T < 15°C	4	Très favorable
	T > 15°C	3	Favorable
	Non connu précisément	- 9999	

Tableau 8 - Classification et indexation des critères de potentialité géothermique

La méthode de calcul employée a été fixée nationalement, afin d'homogénéiser les rendus des atlas des différentes régions. Cette méthode revient à évaluer la potentialité géothermique uniquement sur la base des critères productivité, température et profondeur d'accès.

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

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

4.6.2. Carte du potentiel géothermique des aquifères

La proportion de territoire concerné par un potentiel géothermique fort, moyen ou faible est donnée dans le Tableau 9. Dans le cas d'une superposition d'aquifères, c'est le meilleur potentiel qui a été retenu. La surface de territoire où le potentiel géothermique n'a pas pu être estimé (potentiel non connu précisément) est évaluée à 24,8 %.

Potentiel géothermique du meilleur aquifère	% du territoire concerné
Fort	29,6 %
Moyen	8,2 %
Faible	6,5 %
Aléatoire ou incertain	18,0 %
Non connu précisément	24,8 %
A priori nul	12,9 %

Tableau 9 - Pourcentage du territoire concerné, en fonction du potentiel géothermique attribué

La carte régionale du potentiel géothermique du meilleur aquifère (Annexe 5) montre qu'environ 62,3 % de la superficie de la région Champagne-Ardenne dispose de données pour le calcul du potentiel.

12,9 % de la région n'est pas favorable à l'installation d'une PAC sur aquifère. Ces secteurs correspondent aux zones où les ressources en eau sont très limitées voire inexistantes (formations peu ou pas aquifères : socle, formations argileuses...).

Par ailleurs, la répartition du nombre d'aquifères en fonction du pourcentage de territoire concerné est présentée dans le Tableau 10.

Nombre d'aquifère(s)	% du territoire concerné
1 aquifère	73,8%
2 aquifères	13,2%
3 aquifères	0,1%
Pas d'aquifère	12,9%

Tableau 10 - Proportions du territoire concerné par une superposition des entités aquifères définies dans cette étude

A l'échelle de la région Champagne-Ardenne, 87,1 % du territoire possède dans son proche sous-sol des ressources en eau susceptibles d'être exploitées pour leurs potentiels géothermiques. 13,3 % de la superficie régionale est concernée par une superposition de 2 ou 3 aquifères, respectivement à hauteur de 13,2 % et 0,1 %. Pour près des ¾ de la région (73,8 %), 1 seul aquifère sous la surface présente un intérêt pour l'installation de PAC sur nappe (Figure 32).



5. Diffusion de la cartographie sur internet

5.1. MISE A DISPOSITION DE LA CARTOGRAPHIE REGIONALE SOUS FORME D'UNE GRILLE

La cartographie des critères de potentialité géothermique s'est faite dans un premier temps **par aquifère ou entité hydrogéologique**. Ce sont les unités d'observation dont on connaît les propriétés.

Ensuite, pour intégrer la superposition des aquifères et faciliter la diffusion des données via le site <http://www.geothermie-perspectives.fr/>, les résultats ont été attribués à des portions de territoire correspondant à des **mailles carrées de 500 m de côté**. Un maillage régulier couvrant l'ensemble de la région Champagne-Ardenne a été créé afin d'attribuer à chacune des mailles les données utiles (débits exploitables, profondeur d'accès à la nappe, température, potentiel géothermique...).

Ainsi l'échelle des cartes du potentiel géothermique correspond à une précision au 1/50 000. Malgré cela et du fait des différentes approximations réalisées (approximations liées au zonage des critères et aux calculs de productivité), 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.

La taille de la maille permet de refléter l'échelle d'information. Le passage d'une donnée par secteur à une donnée par maille permet aussi de gommer les contours, les lignes frontières, qui ne sont pas des représentations tout à fait conformes à la réalité.

Pour passer de l'information vectorisée (entité hydrogéologique) à une information rastérisée (maillage régulier), les règles suivantes ont été définies :

1. L'attribut de la maille correspond à celui du polygone dont la surface est majoritaire (Figure 30);
2. Si au droit d'une maille sont superposés deux aquifères (occupant la même superficie), la maille regroupera les informations des deux aquifères. On déterminera ensuite le potentiel du meilleur aquifère (Figure 31).

Les exemples décrits ci-après permettent de montrer comment ont été appliquées ces règles.

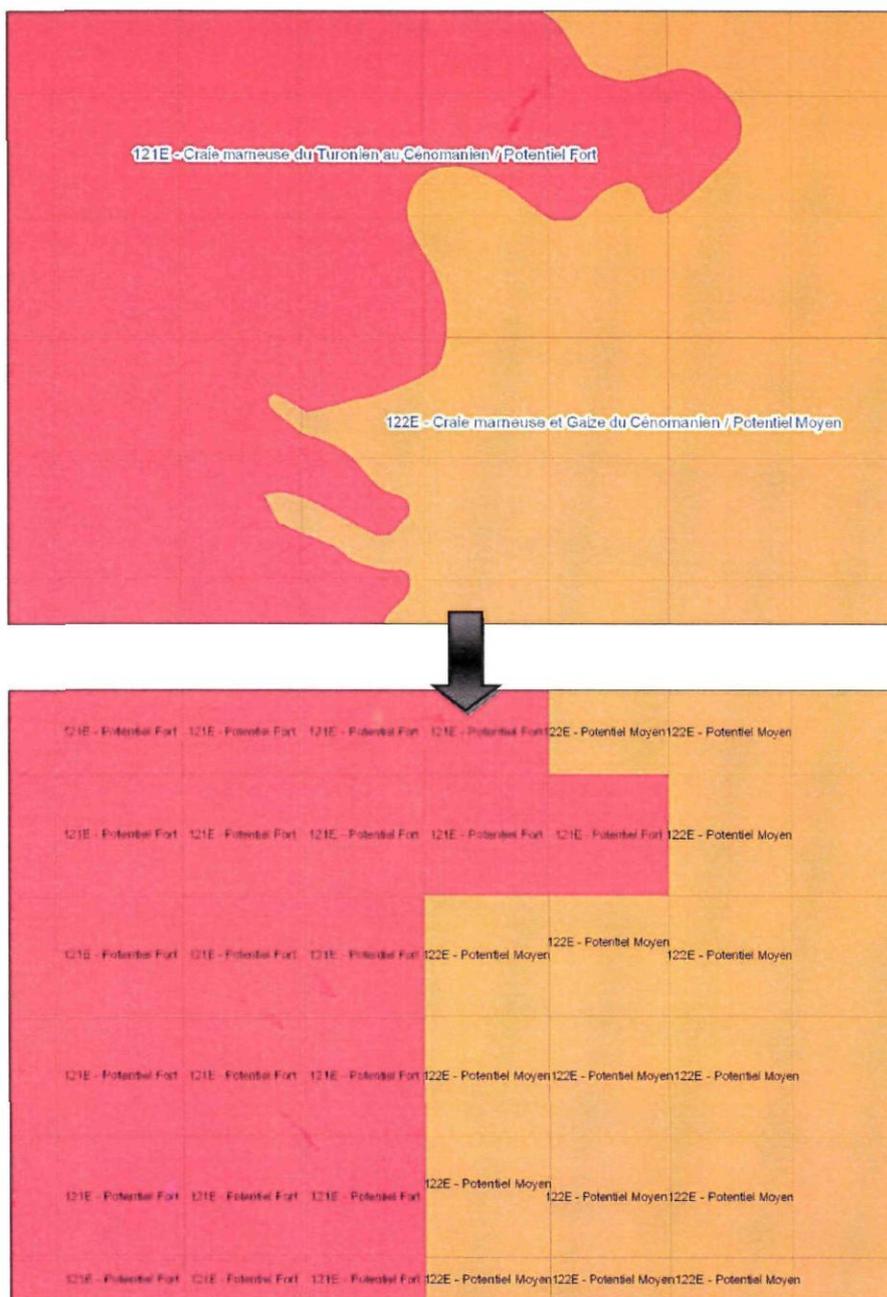


Figure 30 - Transcription maillée des entités aquifères spatialisées et de leurs attributs associés sur le critère de surface

Lors du passage de l'information spatialisée à une information maillée, seules les informations du polygone occupant la superficie majoritaire sont conservées.

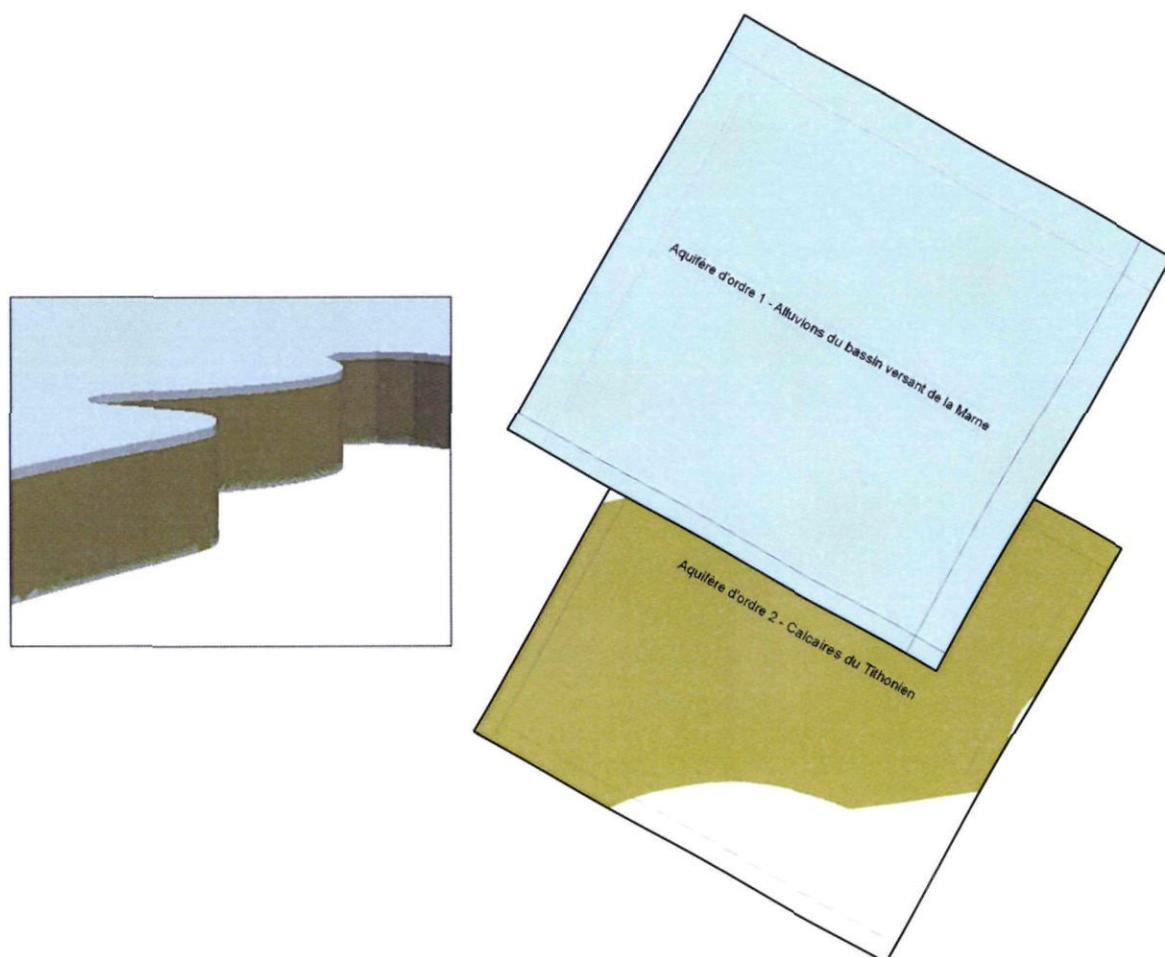


Figure 31 - Maillage de l'information – cas de deux aquifères superposés

Sur cette maille, deux aquifères sont superposés avec au-dessus, les alluvions du bassin versant de la Marne et plus profonds les calcaires du Tithonien. Dans les attributs de la maille, seront indiquées la présence de deux aquifères et toutes les informations relatives à chacun d'entre eux. Les superpositions peuvent atteindre 3 niveaux maximums.

La carte de la Figure 32 représente à l'échelle régionale les mailles pour lesquelles des aquifères et des superpositions d'aquifères existent. Les superpositions se situent principalement au niveau des systèmes alluviaux.

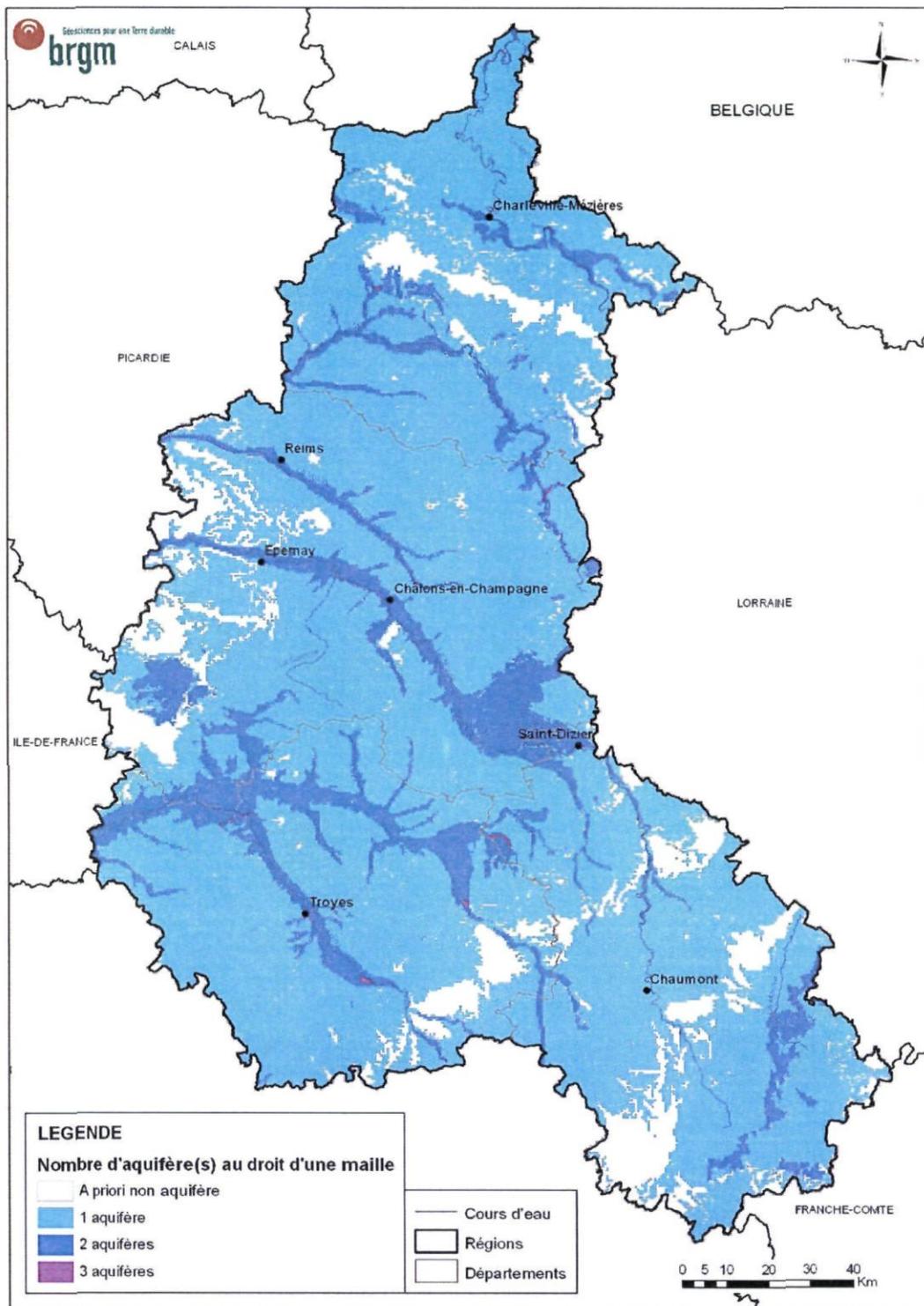


Figure 32 - Carte de superposition des aquifères à l'échelle du territoire Champagne-Ardenne

5.2. MISE EN LIGNE DE L'ATLAS SUR LE SITE « GEOTHERMIE PERSPECTIVES »

L'atlas réalisé est mis en ligne sur le site Géothermie Perspectives <http://www.geothermie-perspectives.fr/> (Figure 33) qui regroupe **différentes rubriques d'ordre général** qui présentent la géothermie (notamment les différents types de géothermie profonde, haute énergie, basse et très basse énergie), les atouts, les techniques d'exploitation de la ressources et de production de chaleur (notamment les pompes à chaleurs ou PAC), les contraintes et les enjeux de la géothermie en France.

Un « **espace régional** » (Figure 34) permet l'accès direct à l'Atlas régional pour les régions de France qui en dispose et à des informations complémentaires en termes de réglementation, d'acteurs locaux, de normes applicables aux opérations techniques, de démarches qualité garantissant les prestations, d'exemples d'opérations déjà réalisées.

The screenshot shows the homepage of the 'Géothermie perspectives' website. At the top, there is a header with the site logo and the tagline 'Toute l'information sur l'énergie de la Terre'. Below this is a navigation bar with links: 'Je chauffe ma maison', 'Chauffer des bâtiments', 'Les réseaux de chaleur', and 'Autres Utilisations'. The left sidebar contains a menu with categories: 'La géothermie', 'Comment ça marche?', 'La géothermie en France', 'Les enjeux', 'Recherche-Développement', 'Actualités/Presse', 'Médiathèque', 'FAQ/Glossaire', 'Les acteurs', and 'Liens'. The main content area is divided into several sections: 'Une information proche de chez vous' featuring a map of France; 'Formation et sensibilisation 2012' with dates for various events; 'Ouvrages' listing manuals for sale; and 'A la Une' with a list of news items. A red circle highlights the 'La géothermie en région' link in the left menu, and another red circle highlights the map of France in the main content area.

Figure 33 - Page d'accueil du site geothermie-perspectives

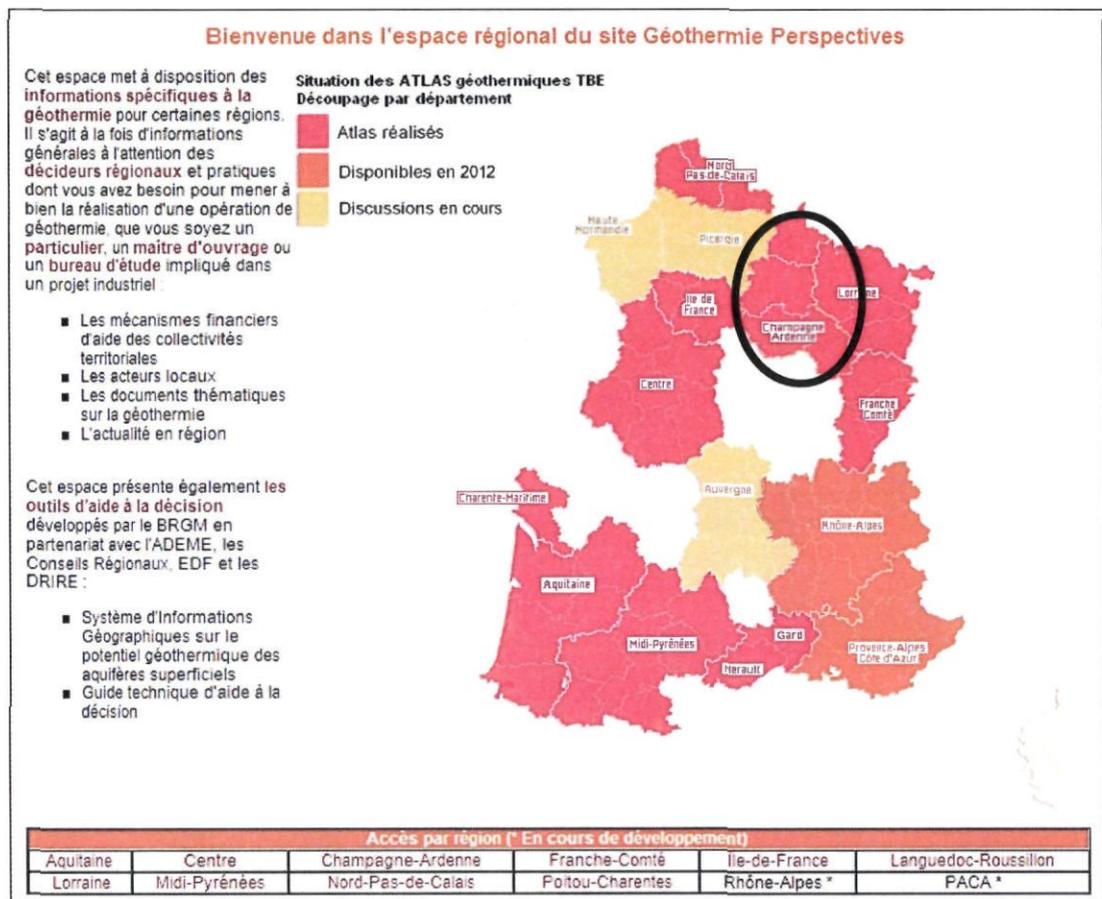


Figure 34 - Page d'accueil de l'espace régional sur le site geothermie-perspectives

5.2.1. Rubriques générales sur l'espace régional de Champagne-Ardenne

Dans le cadre de l'Atlas du potentiel géothermique très basse énergie en Champagne-Ardenne, les pages régionales ont été développées en collaboration entre le BRGM, le conseil Régional et l'ADEME sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr/>.

Ces pages ont été conçues sur le modèle des pages préexistantes sur les autres sites régionaux mais ont été adaptées au contexte local dans un souci de présenter les informations minimales et nécessaires au public intéressé par la géothermie très basse énergie sur nappe pour comprendre les enjeux régionaux, savoir à qui s'adresser dans chacun des 4 départements de Champagne-Ardenne, connaître la réglementation et les normes particulières à cette technique. Les pages sont toutes proposées en version imprimables et plusieurs documents sont proposés en téléchargement.

Page 1 : Le développement de la géothermie en région

Présentation du contexte local, des partenaires mobilisés en Champagne-Ardenne et de l'outil développé par le BRGM - ses objectifs et ses limites (Figure 35).

Page 2 : La réglementation

Présentation des principaux textes réglementaires qui s'appliquent à l'exploitation des eaux souterraines par forage et à l'exploitation des calories souterraines, donc aux opérations de géothermie.

Page 3 : Les caractéristiques des aquifères

Description simplifiée des principaux aquifères de la région Champagne-Ardenne, pris en compte dans l'atlas du potentiel géothermique.

Page 4 : Les acteurs locaux

Liste et coordonnées des principaux acteurs locaux susceptibles d'être contactés pour des informations techniques ou des informations sur la réglementation et les démarches administratives. Cette liste pourra être mise à jour régulièrement.

Page 5 : Quelques opérations en Champagne-Ardenne

Compilation des « fiches opération » (rédigées par l'ADEME) de quelques opérations de géothermie très basse énergie (aussi bien pompes à chaleur sur eau de nappe que pompe à chaleur sur champ de sonde) réalisées en Champagne-Ardenne. Cette liste non exhaustive est destinée à évoluer par ajout de cas supplémentaire au fur et à mesure de la rédaction de nouvelles « fiches opération ».

Page 6 : Les aides financières et la garantie AQUAPAC

Présentation des différents outils d'accompagnement financier selon la cible (« entreprises, les collectivités et les bailleurs sociaux » ou « particuliers ») et de la garantie AQUAPAC. AQUAPAC est une assurance qui couvre les risques géologiques liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général à moins de 100 m de profondeur, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Cette assurance s'applique aux installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique supérieure à 30 KW.

Ces dispositifs d'aides évoluant régulièrement, l'internaute est invité à vérifier auprès des professionnels que les informations soient à jour. Dans la mesure

du possible, les partenaires veilleront à mettre à jour le plus régulièrement possible le site régional.

Page 7 : Les prestataires engagés dans des démarches qualité

Plusieurs entreprises de forage sont implantées en Champagne-Ardenne et dans les régions limitrophes. Elles sont spécialisées dans la réalisation de sondes géothermiques verticales ou de forage d'eau.

Les partenaires ont choisi de vous présenter dans ces pages les démarches d'engagement qualité qui existe à ce jour. En effet un foreur engagé dans une démarche qualité est la garantie pour le maître d'ouvrage de bénéficier de prestations professionnelles de qualité. On distingue les foreurs adhérant à QualiFORAGE et les foreurs adhérant à la Charte Qualité des Puits et Forage d'Eau créée à l'initiative du Syndicat des Foreurs d'Eau (SFE).

Page 8 : Les normes

Présentation des normes applicables pour le secteur de la géothermie très basse énergie. Une norme permet d'avoir une référence qui garantit que le travail exécuté respecte les règles de l'art en vigueur. Son application n'est pas obligatoire, contrairement à la réglementation. Lors de la mise en œuvre d'un projet, un prestataire qui respectent les normes en vigueur est donc un plus.

Espace régional Champagne-Ardenne

Le développement de la géothermie en région

■ Le contexte local
 La région Champagne-Ardenne dispose d'un potentiel hydrogéologique favorable à la géothermie très basse énergie avec utilisation de pompe à chaleur. Les ressources géothermiques sont donc présentes. Les techniques permettant la production de chaleur géothermale sont éprouvées. La rentabilité économique des opérations géothermiques est chaque jour vérifiée. Pourtant la Champagne-Ardenne n'est pas à ce jour pilote en nombres d'installations géothermiques et ses ressources géothermiques restent sous-exploitées. Les principaux freins au développement de ce moyen de production d'énergie sont identifiés : un manque d'information des maîtres d'ouvrages potentiels et l'absence de véritable filière régionale de la géothermie, animée, structurée et formée.

■ Les partenaires locaux mobilisés
 Afin de favoriser le développement de la géothermie en Champagne-Ardenne, les partenaires locaux se mobilisent. La Région Champagne Ardenne, l'ADEME et le BRGM réalisent un **atlas des aquifères superficiels**. Cet atlas est un véritable outil d'aide à la décision. Il présente l'inventaire du potentiel géothermique des nappes superficielles de la région. Vous pourrez le consulter sur le site Internet www.geothermie-perspectives.fr en décembre 2011. Les partenaires régionaux accompagnent également le développement de la géothermie en soutenant techniquement voire financièrement les porteurs de projets ayant recours à cette solution renouvelable de production de chaleur.

■ L'atlas des aquifères superficiels
 L'atlas des aquifères superficiels (*) est un outil d'aide à la décision pour l'installation de pompe à chaleur sur nappe de 0 à 100 mètres de profondeur. Cet outil d'aide à la décision est destiné à tout porteur de projet, maître d'ouvrage potentiel s'interrogeant sur un choix énergétique : particuliers, bureaux d'études, collectivités territoriales, entreprises... L'outil est basé sur un Système d'Informations Géographiques (SIG). En fonction de votre situation géographique, vous pouvez donc évaluer l'intérêt de vous lancer dans un projet de production de chaleur par géothermie.

Attention, ce document est à caractère indicatif, il oriente votre choix mais il ne peut ni ne doit en aucun cas remplacer une étude de faisabilité réalisée par un bureau d'études compétent. En effet c'est une étude spécifique (étude de faisabilité sous-sol) qui détermine exactement les caractéristiques de la ressource et le potentiel du projet.

Réalisation : **BRGM**
 En partenariat avec : **ADEME, Région CHAMPAGNE-ARDENNE, EUROPE (fonds FEDER)**

(*) Le potentiel géothermique des aquifères superficiels dépend du débit espéré, de la profondeur et de la température de la nappe.

- Accès par la carte de la région Champagne-Ardenne
- Accès par département ou par commune

La géothermie en Champagne-Ardenne

- Le développement de la géothermie en région
- La réglementation
- Les caractéristiques des aquifères
- Les acteurs locaux
- Quelques opérations en Champagne-Ardenne
- Les aides financières et la garantie AQUAPAC
- Les prestataires engagés dans des démarches qualité
- Les normes

Figure 35 – Présentation de la page 1 « Le développement de la géothermie en région »

5.2.2. Outil de consultation de l'Atlas régional

Potentiel du meilleur aquifère (cartographie 2011)

La méthodologie développée au niveau national et utilisée pour caractériser le potentiel géothermique des aquifères de Champagne-Ardenne a permis de définir trois classes de potentiel : **faible, moyen et fort**.

La méthodologie n'a néanmoins pas pu être appliquée à l'ensemble du territoire faute d'une densité suffisante de données notamment concernant la productivité et les profondeurs de niveau de nappe. En effet pour obtenir un potentiel géothermique, il faut la connaissance simultanée des 3 paramètres "productivité", "profondeur des niveaux d'eau" et "température". Sur les zones où le potentiel n'a pas pu être calculé, trois nouvelles classes ont été créées :

- Potentiel « **non connu précisément** » : cela signifie qu'il manque la combinaison des 3 paramètres qui servent à définir le potentiel.
- Potentiel « **quasi nul** » : le manque d'information s'explique simplement par le fait que les terrains sont considérés comme non productifs ou quasi imperméables.
- Potentiel « **aléatoire ou incertain** » : il s'agit de zones présentant de grandes incertitudes sur la géologie et les données disponibles (cas des aquifères calcaires karstiques).

L'outil de consultation en ligne constitué à l'échelle de la Champagne-Ardenne permet d'obtenir des informations utiles à l'analyse de la faisabilité d'un projet de géothermie très basse énergie, notamment :

- Potentiel géothermique du meilleur aquifère (fort, moyen, faible, non connu précisément, quasi-nul, aléatoire) ;
- Données d'exploitabilité des aquifères en présence (profondeur d'accès à la ressource en eau souterraine, débit exploitable) et coupes hydrogéologiques types ;
- Données concernant la nature simplifiée des formations géologiques (aquifère).

Les informations fournies revêtent un caractère indicatif, qui doit permettre d'orienter un projet de pompe à chaleur, mais la détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessite une étude spécifique. En effet, les cartes, fournies à l'échelle du 1/50 000, sont construites à partir de la régionalisation de paramètres caractéristiques et leur degré de précision est acceptable à l'échelle régionale, mais pas à l'échelle d'un projet qui nécessite une analyse fine des potentialités locales des aquifères.

Carte des débits moyens potentiel (productivité 1987)

Afin d'apporter aux utilisateurs, à titre indicatif, une information complémentaire à la carte des potentiels géothermiques sur nappe réalisée en 2011, il a été décidé de mettre également en ligne la **carte des débits moyens potentiels** susceptibles d'être obtenus à partir des eaux souterraines, réalisée pour la Champagne-Ardenne en 1987.

Cette carte des débits, dressée à l'échelle du 1/250 000, doit être considérée comme un document d'orientation générale permettant d'apprécier succinctement la productivité que donnerait un forage captant le premier terrain aquifère. En aucune manière, cette carte ne peut offrir une garantie de débit en cas de réalisation de forages, ni être utilisée pour implanter ceux-ci : son rôle est strictement indicatif.

L'élément cartographié est le débit potentiel d'exploitation d'un forage, réalisé dans les règles de l'art, en un endroit donné. Ce forage capte l'eau de la première nappe rencontrée en cours de foration, ou - à défaut - la (ou les) nappe(s) suivante(s), à condition que le débit fourni par cette (ou ces) nappe(s) soit supérieur à la première et que la profondeur totale de l'ouvrage n'excède pas 100 m. Pour faciliter la cartographie, les débits potentiels ont été groupés en 4 classes dont les limites correspondent à des objectifs pour les pompes à chaleur :

- Débits supérieurs à 50 m³/h ($Q \geq 50 \text{ m}^3/\text{h}$) pour des installations géothermiques importantes
- Débits compris entre 20 et 50 m³/h ($20 \leq Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$) pour des installations géothermiques de type moyen collectif, tertiaire, industriel, serres, piscines...
- Débits compris entre 5 et 20 m³/h ($5 \leq Q < 20 \text{ m}^3/\text{h}$) pour des installations géothermiques de type petit collectif ou tertiaire
- Débits inférieurs à 5 m³/h ($1 \leq Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$) pour des installations géothermiques de type maisons individuelles

Deux classes complémentaires ont été ajoutées :

- Débits inférieurs à 1 m³/h ($0 \leq Q < 1 \text{ m}^3/\text{h}$) : cette classe correspond aux terrains considérés comme imperméables d'un point de vue hydrogéologique ; le débit que l'on peut éventuellement en sortir ne permet pas le fonctionnement des pompes à chaleur.
- Classe où la productivité des forages est très aléatoire : débits compris entre 0 et 5 m³/h. Cette classe a été instaurée pour représenter les cas où la réussite d'un forage productif va dépendre des conditions hydrogéologiques locales (cas des aquifères calcaires karstiques).

Accès aux données par une recherche cartographique

La recherche cartographique est accessible depuis la fenêtre d'accueil de l'espace régional Champagne-Ardenne (Figure 35).

La fenêtre cartographique permet de sélectionner ou désélectionner les couches d'informations disponibles. Par défaut la couche principale qui s'affiche est celle du **potentiel géothermique du meilleur aquifère** (cartographie réalisée dans le cadre de cette étude - Figure 36).

L'interrogation sur un secteur particulier se fait en zoomant et avec l'outil  qui en cliquant active l'ouverture d'une fiche de renseignement spécifique au secteur concerné (maille carrée de 500 m de côté - Figure 40 et Figure 41).

La carte des débits moyens potentiels susceptibles d'être obtenus à partir des eaux souterraines, réalisée pour la Champagne-Ardenne en 1987 peut également être affichée en cochant la case (Figure 37).

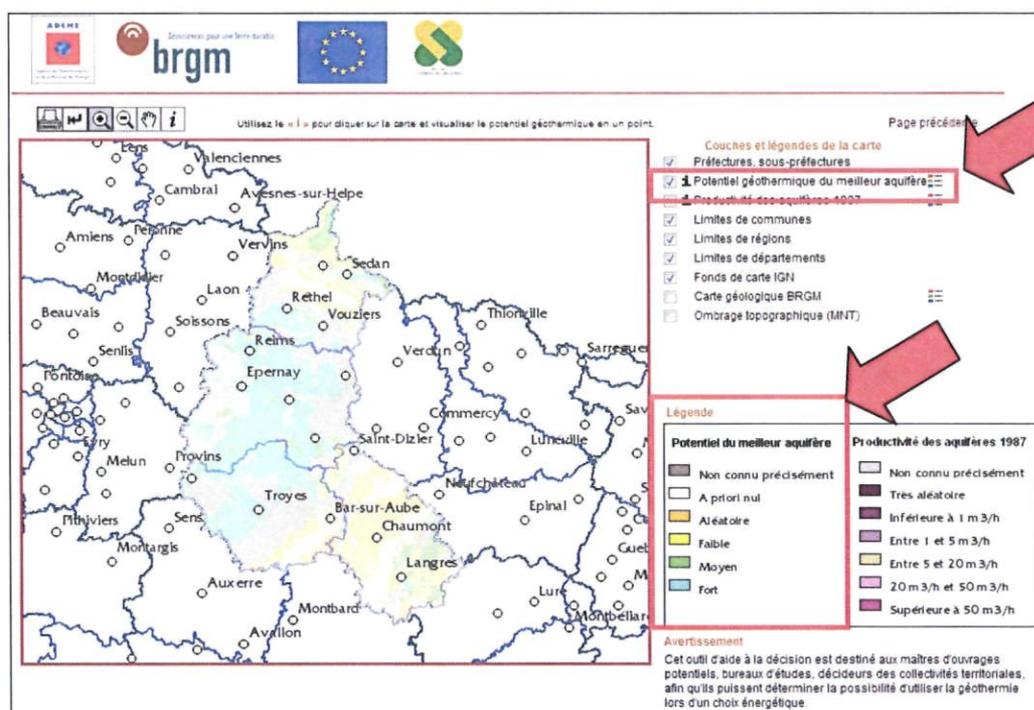


Figure 36 - Fenêtre d'interrogation du potentiel du meilleur aquifère via la carte régionale

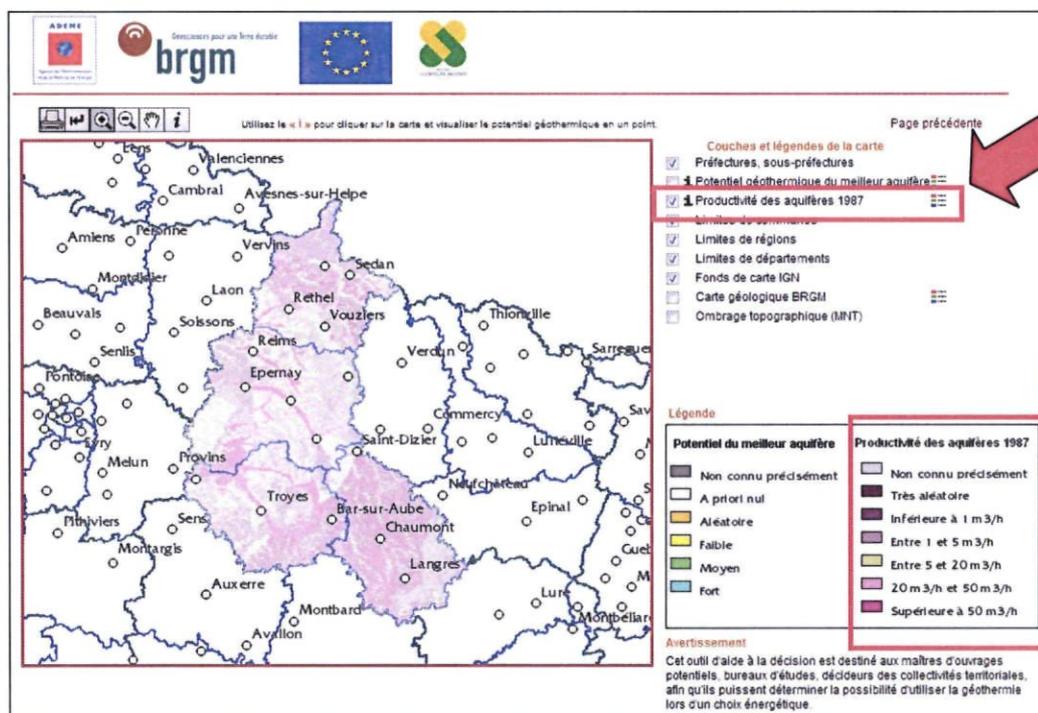


Figure 37 - Fenêtre d'interrogation complémentaire de la productivité des aquifères de 1987

Accès aux données via une recherche par commune

Depuis la page d'accueil du site régional Champagne-Ardenne, il est possible d'accéder aux données à l'aide d'une recherche par commune (Figure 35 et Figure 38).

The screenshot shows the 'Géothermie perspectives' website interface. At the top, there are logos for ADEME and BRGM, along with the text 'Toute l'information sur l'énergie de la Terre'. Below the header, there are navigation tabs: 'Je chauffe ma maison', 'Chauffer des bâtiments', 'Les réseaux de chaleur', and 'Autres utilisations'. The main content area is titled 'Centre la carte sur un département, une commune'. It includes instructions: 'Vous pouvez accéder aux données d'un département en sélectionnant le département dans la liste déroulante correspondante. La sélection d'une commune dans la liste déroulante des communes, ne peut se faire qu'après avoir choisi un département (la liste des communes est restreinte au département sélectionné)'. There are two dropdown menus: 'Départements : MARNE (51)' and 'Communes : Toutes les communes : MARNE'. The 'Communes' dropdown is open, showing a list of communes with their INSEE codes, such as ABLANCOURT (51001), AIGNY (51003), ALLEMANT (51005), etc. A 'Mise à jour de la carte' button is visible to the right of the list. The left sidebar contains various menu items like 'La géothermie', 'Actualités/Presse', 'Espace professionnel', and 'Accueil'. The footer includes 'ADEME-BRGM Qui sommes-nous?' and 'Informations légales'.

Figure 38 - Fenêtre de recherche par commune

Après sélection de la commune, une fenêtre cartographique affiche, à l'échelle communale, le potentiel du meilleur aquifère (Figure 39).

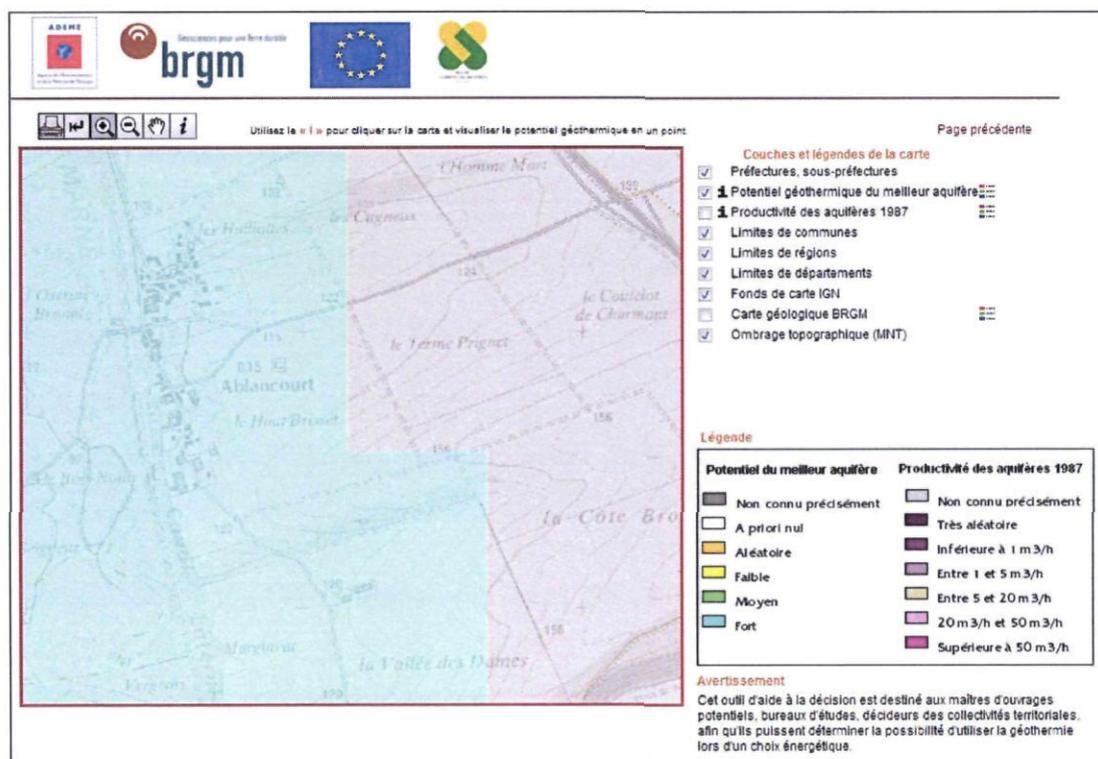


Figure 39 - Fenêtre cartographique à l'échelle communale

Une fois la fenêtre cartographique affichée, l'utilisateur peut cliquer sur une maille de son choix sur la carte, à l'aide du « i » de la barre d'outils située au-dessus de la carte. Chaque maille contient les informations d'un aquifère (Figure 40), de deux aquifères (Figure 41) ou de trois aquifères.

A tout moment il est possible d'obtenir une information complémentaire sur la productivité des aquifères d'après la cartographie réalisée en 1987, en cochant la couche correspondante en haut à droite de la fenêtre carte (Figure 42). Il est également possible de masquer les couches en décochant les différents critères.

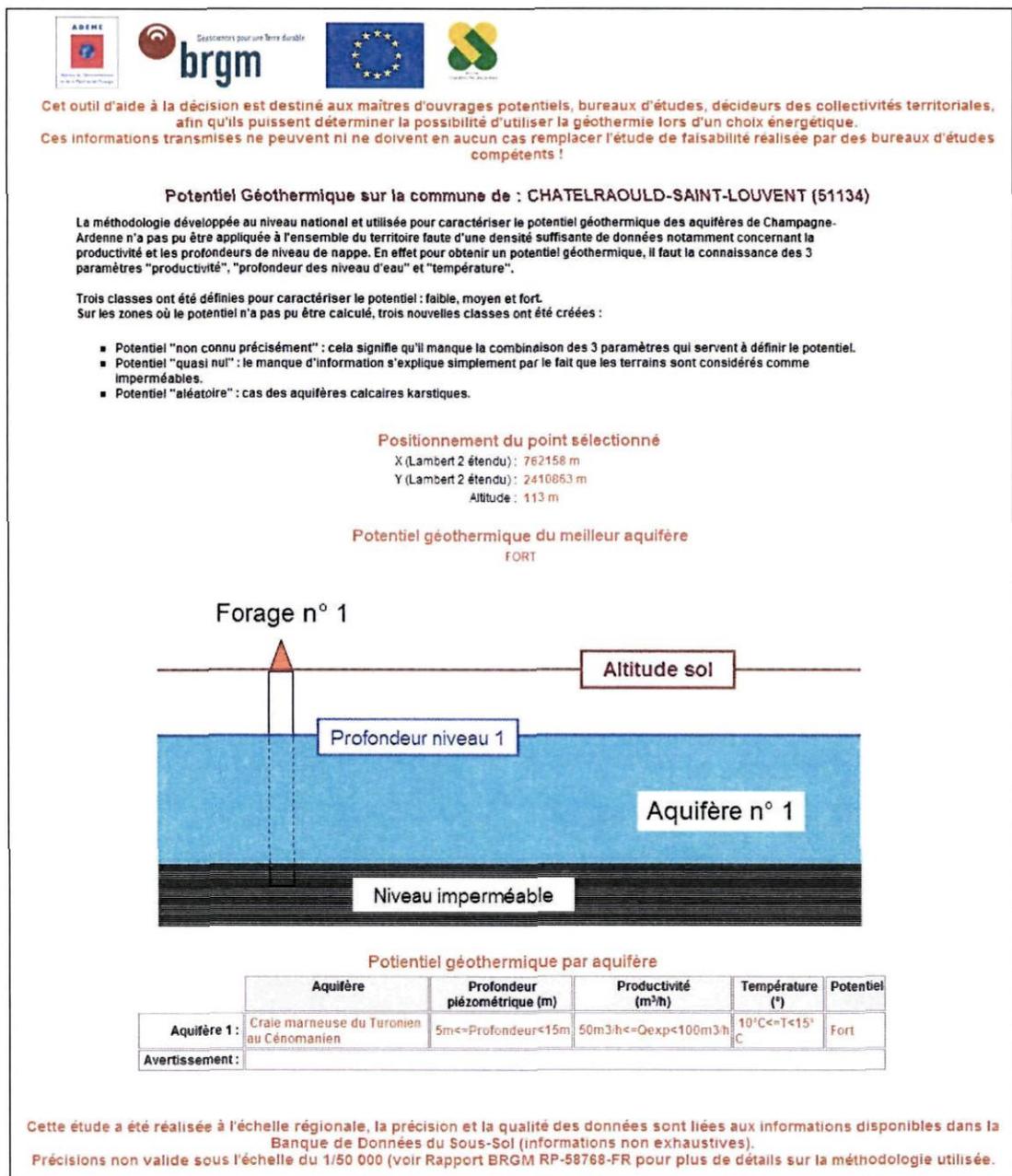


Figure 40 - Fiche de renseignements fournie pour une maille contenant un aquifère

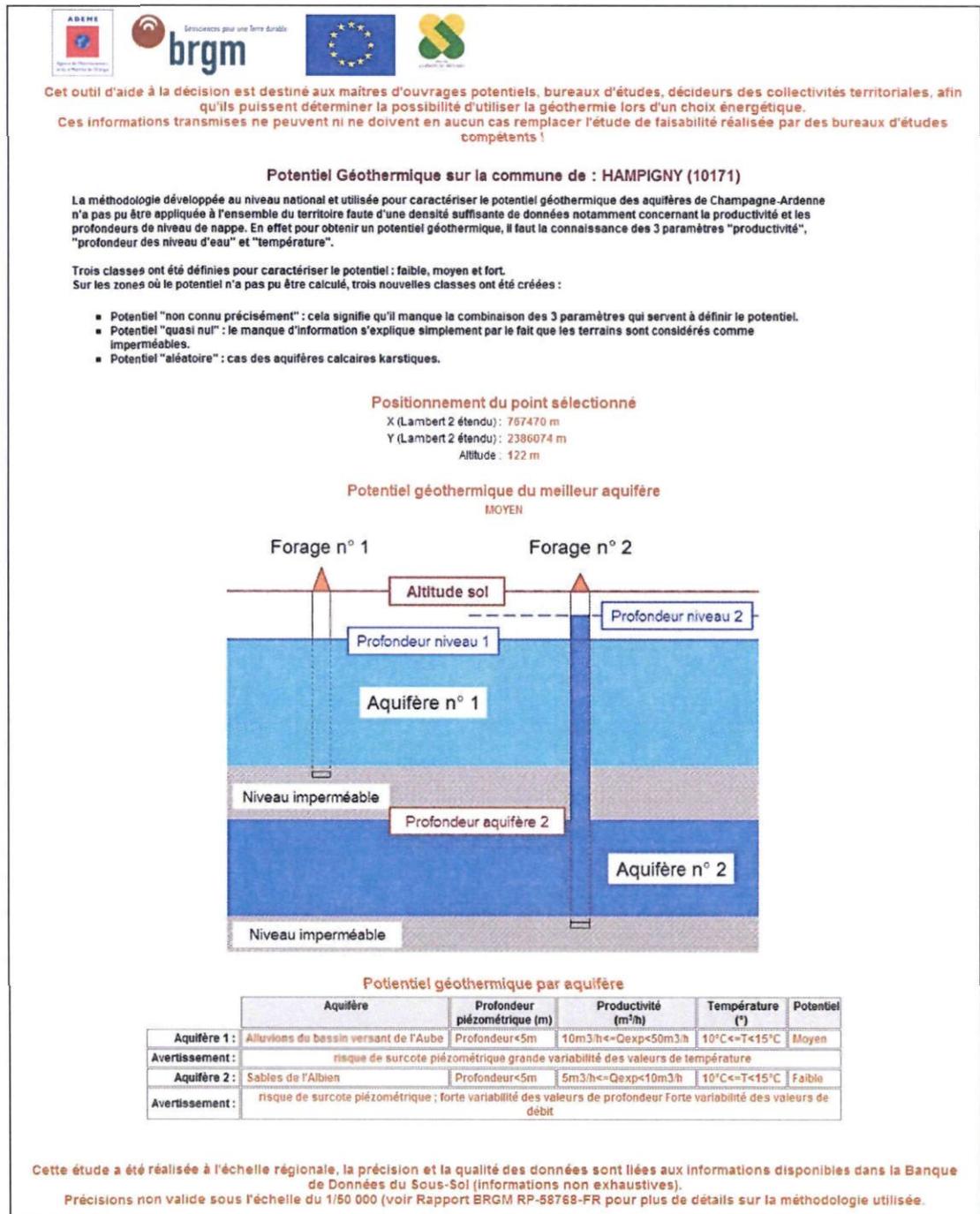


Figure 41 - Fiche de renseignements fournie pour une maille contenant deux aquifères



ADEME
Agence de l'Environnement
et de la Gestion de l'Energie



brgm
Bureaux de Recherches
Géothermiques





Cet outil d'aide à la décision est destiné aux maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Ces informations transmises ne peuvent ni ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'études compétents !

Carte de productivité 1987 sur la commune de : NORROIS (51406)

La carte des débits moyens potentiels susceptibles d'être obtenus à partir des eaux souterraines, réalisée pour la Champagne-Ardenne en 1987, a été mise en ligne afin d'apporter à titre indicatif une information complémentaire à la carte des potentiels géothermiques sur nappe réalisée en 2011. Lien vers le document PDF.

Cette carte des débits, dressée à l'échelle du 1/250 000, doit être considérée comme un document d'orientation générale permettant d'apprécier succinctement la productivité que donnerait un forage captant le premier terrain aquifère. En aucune manière, cette carte ne peut offrir une garantie de débit en cas de réalisation de forages, ni être utilisée pour implanter ceux-ci : son rôle est strictement indicatif.

L'élément cartographié est le débit potentiel d'exploitation d'un forage, réalisé dans les règles de l'art, en un endroit donné. Ce forage capte l'eau de la première nappe rencontrée en cours de foration, ou - à défaut - la (ou les) nappe(s) suivante(s), à condition que le débit fourni par cette (ou ces) nappe(s) soit supérieur à la première et que la profondeur totale de l'ouvrage n'excède pas 100 m. Pour faciliter la cartographie, les débits potentiels ont été groupés en 4 classes dont les limites correspondent à des objectifs pour les pompes à chaleur :

- Débits supérieurs à 50 m³/h (Q > 50 m³/h) pour des installations géothermiques importantes
- Débits compris entre 20 et 50 m³/h (20 = Q < 50 m³/h) pour des installations géothermiques de type moyen collectif, tertiaire, industriel, serres, piscines...
- Débits compris entre 5 et 20 m³/h (5 = Q < 20 m³/h) pour des installations géothermiques de type petit collectif ou tertiaire
- Débits inférieurs à 5 m³/h (1 = Q < 5 m³/h) pour des installations géothermiques de type maisons individuelles

Deux classes complémentaires ont été ajoutées :

- Débits inférieurs à 1 m³/h (0 = Q < 1 m³/h) : cette classe correspond aux terrains considérés comme imperméables d'un point de vue hydrogéologique ; le débit que l'on peut éventuellement en sortir ne permet pas le fonctionnement des pompes à chaleur.
- Classe où la productivité des forages est très aléatoire : débits compris entre 0 et 5 m³/h. Cette classe a été instaurée pour représenter les cas où la réussite d'un forage productif va dépendre des conditions hydrogéologiques locales (cas des aquifères calcaires karstiques).

Positionnement du point sélectionné

X (Lambert 2 étendu) : 768356 m
Y (Lambert 2 étendu) : 2410716 m
Altitude : 107 m

AQUIFERES A FORTE PRODUCTIVITE (Q > 50 m³ / h)

Figure 42 - Fiche de renseignements complémentaires obtenue lors de l'interrogation de la couche productivité 1987.

5.3. LIMITES D'UTILISATION DES DONNEES, AVERTISSEMENTS

Cet atlas ayant été constitué à l'échelle régionale, la précision et la qualité des données sont liées aux informations disponibles dans la Banque de données du Sous-Sol (informations non exhaustives).

L'échelle de cartographie du potentiel géothermique est de 500 m (ce qui correspond à une précision au 1/50 000).

Toutefois, plusieurs facteurs liés au traitement et à la nature des données engendrent des approximations, en particulier :

- la réalisation des cartes de productivités par aquifère à partir d'un calcul basé sur des hypothèses simplificatrices et d'après les données disponibles, peu nombreuses ;
- la spatialisation des différents critères entrant dans le calcul du potentiel géothermique (peu de données disponibles et présentant pour certains critères une grande variabilité) ;
- le passage d'une donnée par secteur à une donnée par maille (pour constituer la grille) ;
- l'intégration des données du potentiel des aquifères et du potentiel des formations traversées au sein d'une grille unique.

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

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

La profondeur d'accès à la ressource des nappes alluviales de Champagne-Ardenne est pour la grande majorité inférieure à 5 m (selon les données disponibles analysées). Dans le cas d'une PAC sur nappe, la faible profondeur du niveau de la nappe peut provoquer un risque de remontée d'eau jusqu'en surface (surcôte piézométrique), lors de l'injection de l'eau de la nappe dans le forage. Il conviendra aux maîtres d'ouvrage de s'assurer de l'absence de tel risque lors d'un projet de réalisation de PAC sur nappe, par le biais d'une étude de faisabilité adaptée.

Par ailleurs, l'existence de zones de restriction d'exploitation ou de travaux (périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable par exemple) devra être prise en compte au stade de l'étude de faisabilité du projet.

6. Conclusions

L'évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en Champagne-Ardenne a été réalisée sur la base de données existante, notamment celles issues de la Banque du Sous-Sol. Un important travail d'identification, de collecte et de traitement des données disponibles a été réalisé. Les données ont été rassemblées dans une base de données unique puis intégrées à un SIG pour permettre leur visualisation et leur traitement.

L'atlas permet d'afficher en tout point du territoire de la région Champagne-Ardenne (lorsque les données disponibles le permettent) le potentiel géothermique des aquifères. Il est accessible sur le site géothermie perspectives <http://www.geothermie-perspectives.fr/>.

Des informations complémentaires d'ordre hydrogéologique (aquifère concerné, gamme de débit exploitable, profondeur de l'aquifère) sont également fournies pour chaque maille d'interrogation (de taille 500 m x 500 m).

La recherche peut être initiée par département en fonction de la commune désirée, ou via un accès cartographique et la possibilité de zoomer sur un secteur géographique particulier.

L'atlas constitue ainsi une aide à la décision pour déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie très basse énergie sur aquifère superficiel lors d'un choix énergétique. Cependant, l'échelle de réalisation étant régionale, il ne peut et ne doit se substituer à une étude de faisabilité réalisée à l'échelle de la parcelle par des bureaux d'études compétents.

A l'échelle de la Champagne-Ardenne, le potentiel géothermique des aquifères est fort pour 29,6 % de la surface, moyen pour 8,2 %, faible pour 6,5 %, aléatoire pour 16,2 %, non renseigné pour 26,6 % (faute de données disponibles en nombre suffisant) et a priori inexistant pour 12,9 % du territoire régional.

Malgré l'important travail réalisé sur les données disponibles, une meilleure connaissance des paramètres l'hydrogéologique nécessaire à l'estimation du potentiel sur l'ensemble de la région (profondeur de la nappe, température et débit spécifique) permettrait sans doute à l'avenir d'améliorer les cartographies proposées notamment dans les secteurs « non connu précisément ».

En sus de l'atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région, de la description de la méthodologie mise en œuvre pour l'élaborer et d'informations concernant le développement de la géothermie en Champagne-Ardenne fournis dans ce rapport, le site internet <http://www.geothermie-perspectives.fr/> reprend des éléments concernant la réglementation, les caractéristiques des aquifères, les acteurs locaux, des exemples de quelques opérations réalisées en Champagne-Ardenne, les aides financières et la garantie AQUAPAC, les prestataires engagés dans les démarches

qualité et les normes. Ces informations, à l'exception des caractéristiques des aquifères, ne sont pas reprises dans le rapport étant donné la forte probabilité de faire évoluer ces informations dans les années à venir (mise à jour à prévoir en fonction de l'évolution de la réglementation, des mécanismes d'aide ou des exemples d'opération notamment).

7. Bibliographie

AUBERTIN G., FABRIS H., FOUCHER J.C., MAGET Ph. MARTIN G., RAMBAUD D., SCHERR P. (1982) - Ville d'Épernay. SEDMA. Opération géothermique d'Épernay. Avant-projet détaillé. 1^{er} forage. Rapport BRGM/RR-82SGN425GTH-FR de juin 1982.

AUBERTIN G., FABRIS H., FOUCHER J.C., MAGET Ph. MARTIN G., RAMBAUD D., SCHERR P. (1982) - Ville d'Épernay. SEDMA. Opération géothermique d'Épernay. Avant-projet détaillé. 2^{ème} forage. Rapport BRGM/RR-82SGN614GTH-FR d'août 1982.

BRGM et DATAR (1970) - Atlas des eaux souterraines de la France. Edition BRGM.

GEOCHALEUR (1980) - Région Champagne-Ardenne Géothermie. BRGM et bureau d'étude TETA pour la Direction Interdépartemental de l'Industrie et la Direction Régionale de l'Équipement de Champagne-Ardenne. Note de synthèse de mai 1980.

HOUSSE B. et MAGET Ph. (1976) – Potentiel géothermique du Bassin Parisien. Rapport BRGM – ELF-AQUITAINE. Compte-rendu de fin de contrat d'une étude financée par la délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique Comité ACC Géothermie Contrat n°74-7-0990.

MAGET Ph et RAMBAUD D. (1979) – Possibilités géothermiques de la région Champagne-Ardenne. Rapport BRGM/RR-79SGN739GTH/CHA-FR de décembre 1979.

MAGET Ph et RAMBAUD D. (1980) – Possibilités géothermiques de la région Champagne-Ardenne II. Etude hydrogéologique de sites. Rapport BRGM/RR-80SGN649GTH/CHA-FR de septembre 1980.

MARTIN G., FABRIS H., MENJOZ A., DESPLAN A. RAMBAUD D. (1982) – SEDMA. Forage géothermique de Reims. Rapport de fin de sondage du puits de production GMUR1. Rapport BRGM/RR-82SGN282GTH-FR d'avril 1982.

MARTIN G., SCHERR P. FABRIS H. (1982) – Ville d'Épernay. SEDMA. Dossier des ouvrages exécutés des forages géothermiques de production et d'injection d'Épernay (Marne) (GEPE1 et GEPE1). Rapport BRGM/RR-82SGN874GTH de novembre 1982.

MARTIN J.C., BACQUET I., TOURLIER B., GOMEZ E., GATEAU C. (2007) – Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Rapport final. BRGM/RP-55088-FR, 60 p., 25 fig., 9 tabl., 1 ann.

MARTIN J.C., BACQUET I., TOURLIERE B. (2006) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en Région Centre - Géométrie et niveaux piézométrique des principales formations aquifères – Rapport intermédiaire. BRGM/RP-54715-FR, 73p., 36 ill., 4 ann.

MARTIN J.C., PRINTEMPS J., REMAUD S. (2006) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en Région Centre – Etude cartographique et statistique des débits spécifiques des forages d'eau.– Rapport intermédiaire. BRGM/RP-54542-FR, 76p., 35 ill., 2 ann.

RAMBAUD D. COURTOT P. MORFAUX A. (1981) – Ville d'Eprenay. SEDMA. Etude d'impact des travaux de forage géothermique d'Eprenay-Mont Bernon. Rapport BRGM/RR-81SGN405CHA-FR de juin 1981.

RAMBAUD D., CAULIER P. (1980) - SEDMA. Etude d'impact des travaux de forage géothermique de Reims-Murigny II. Rapport BRGM/RR-80SGN667CHA-FR d'octobre 1980.

ROUXEL E., BATKOWSKI D., BAUDOUIN V., CORDONNIER G., CUBIZOLLES J., HERROUIN J.P., IZAC J.L., JEGOU J.P., KIEFFER C., MARDHEL V., PAYA H. (2003) - Cartographie de la piézométrie de la nappe de la craie en Champagne-Ardenne : Rapport BRGM/RP-52332-FR.

SCHOMBURGK S., GOYENECHÉ O. ET AL. (2004) - Guide d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Ile-de-France - Atlas hydrogéologique - BRGM/RP-53306-FR, 94 p., 10 fig., 28 cartes, 31 pl. h.t.

VARET J. (1982) – Géothermie basse énergie : usage direct de la chaleur. Masson.

WARIN J., CHABART M., GERON A., MARDHEL V., XU D. (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Bassin Seine-Normandie. Année 3. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveaux 1 et 2 en région Champagne-Ardenne. Rapport d'étape. BRGM/RP-57517-FR.

Sites Internet utiles

ADEME : <http://www.ademe.fr>

Association Française Pour les Pompes à Chaleur (AFPAC) : <http://www.afpac.org>

BRGM : <http://www.brgm.fr>

Géothermie Perspectives (site dédié à la géothermie mis en ligne par l'ADEME et le BRGM) : <http://www.geothermie-perspectives.fr>

Syndicat national des entrepreneurs de puits et forages d'eau (SFE) : <http://www.sfe-foragedeau.com>

Annexe 1

Tableau récapitulatif des données disponibles et des traitements effectués par aquifère (analyse multicritère)

CODE_bdlis	NOM_Entite_BDLISA	PROFONDEUR EAU			TEMPERATURE			DEBIT EXPLOITABLE			ANALYSE MULTICRITERE				
		nbre_pts_prof_ea	nbre_valeurs_conservée	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_temj	nbre_valeurs_conservées	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_debit_ex	nbre_valeurs_conservée	nb_polygones_apres_traitement	Modification entité BDLISA	Méthode spatialisation	Remarque	Estimation_potentiel	Commentaire_potentiel
107C	Sables de Fontainebleau	4			2			0						NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
107G	Calcaires de Brie	25			8			10					manque de données	OUI	POTENTIEL VARIABLE
110A	Marnes vertes et Marnes supragypseuses de l'Oligocène inf. (Stampien) à l'Eocène sup. (Ludien)	29	0		3			1						NON	POTENTIEL A PRIORI NUL
113A	Calcaire de Champigny	27			6			3					manque de données	OUI	POTENTIEL VARIABLE
113K	Sables et Calcaires du Bartonien	17			3			4					non traité car pas d'affleurement et pas de données d'ouvrages -> pas de carto	NON	
113P	Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur	12			21			1						NON	POTENTIEL A PRIORI NUL
113R	Calcaires grossiers du Lutétien et Sables de l'Yprésien	36	19		11	5		11			Découpage de l'entité 113R par 113P. Suppression des polygones dont la s² > 50000m²; élimination des polygones situés à plus de 10 km de données	Profondeur : problème car affleurements limités de l'entité valeurs souvent en dehors de l'entité et profondeurs d'eau très variables au sein d'un même polygone. sélection des valeurs situées à - de 200 mètres des affleurements, et attribution de la valeur moyenne aux polygones à - de 200 mètres de ces points.	sur les 59 données de forages / sources disponibles, seules 18 sont situées dans le Lutétien / Cuisien affleurant. Les affleurements sont limités car ils se trouvent le plus souvent au sein de cuestas ou de vallées. Parfois, des sources émergent donc au delà de la formation, au sein de formations colluvonnées plus bas dans les pentes. Caractérisation du potentiel sur quelques secteurs.	OUI	POTENTIEL VARIABLE
116B	Argiles de l'Yprésien inf. (Spamacien)	9	2		20	0		4	2 (dont une litigieuse)				Entité non traitée. Les données initialement attribuées à cette formation concernent pour la plupart des sources du Cuisien et du Lutétien sus-jacents.	NON	POTENTIEL A PRIORI NUL
119B	Sables du Thanétien (Paléocène)	59	50	18	8	8	1	29	20	1	Découpage selon entité 113R ; distinction des zones sous couverture des argiles du spamacien 116B de celles à l'affleurement	Prof : valeurs moyennes au sein des polygones se distribuent bien selon aquifère libre et aquifère sous couverture du spamacien, mais subsiste une grande variabilité des valeurs. Par endroits, le MNT a été utilisé pour isoler certaines données. Les données de débits sont peu nombreuses, mais leur valeurs pseudo-homogènes et leur distribution large conduit à calculer une valeur moyenne pour l'ensemble de l'entité. T* homogène -> moyenne	entité bien caractérisée	OUI	POTENTIEL VARIABLE
121A	Craie du Turonien sup. au Campanien (Séno-Turonien)	1866		395	133	131	1	584	517 (valeurs > 500m3/h éliminées)	227	Découpage selon l'entité sus-jacente 119B.	Distribution nette des valeurs de Q et de prof selon le tracé des alluvions -> spatialisation selon les alluvions, au sein desquels calcul des valeurs moyennes. Ailleurs, krigeage pour prof et Q zonée selon le MNT aux endroits où donnée existante. Température moyenne pour l'ensemble de la ressource	entité bien caractérisée	OUI	POTENTIEL VARIABLE
121E	Craie mameuse du Turonien au Cénomaniens	901	882	84	133	131	1	217	200	114 dont 43 sans valeur moyenne de Q	Découpage par l'entité sus-jacente 121A	Krigeage de la profondeur. Krigeage des Q, et prise en compte des alluvions dans le zonage où les débits sont plus élevés. Ne couvre pas toute l'entité pour ce paramètre. T* : moyenne car sur 131 valeurs, 19 seulement < 10°C, réparties selon 4-5 secteurs mais le krigeage n'aboutit pas à un zonage satisfaisant. D'après la carte géol, les T* < 10°C se trouvent pour la plupart dans des petites vallées....	certaines zones non caractérisées -> mq données Q et/ou prof	OUI	POTENTIEL VARIABLE
122E	Marnes et Gaize du Cénomaniens inf.	122	69		13	11		22	19		Des données sont situées au sein de l'entité sous-jacente 125A, et correspondent à la nappe de la Gaize de l'Albien sup. Les données de ces forages hors 122E sont uniquement des données de profondeur (+1 t*) ; ils n'ont pas été pris en compte. Découpage par l'entité sus-jacente 121E. quelques modifs pour intégrer certains points. Quelques points non intégrés ont tout de même été pris en compte dans l'analyse	PROF : découpé selon MNT et alluvions, et valeur moyenne au sein de chaque polygone. T* -> 11 valeurs homogènes (seule 2 sous 10°C) -> moyenne ; Débits -> valeurs moyennes au sein de chaque polygone selon découpage de la profondeur, + quelques ajustements.	distribution des données aléatoire	OUI	POTENTIEL VARIABLE
125A	Argiles du Gault et Marnes de l'Albien	44			18			0						NON	POTENTIEL A PRIORI NUL

CODE_bdlisa	NOM_Entite_BDLISA	PROFONDEUR EAU			TEMPERATURE			DEBIT EXPLOITABLE			ANALYSE MULTICRITERE				
		nbre_pts_prof_eau	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_temp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_debit_exp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Modification entité BDLISA	Méthode spatialisation	Remarque	Estimation_potentiel	Commentaire_potentiel
128A	Sables et Gaize de l'Albien	104			13			61				Profondeur et Q zonée à partir de : carte géol, MNT, (+ krigeage pour Q)	manque de données	OUI	POTENTIEL VARIABLE
128C	Argiles, Sables et Marnes de l'Aptien-Barrémien	321			11			20		Prolongement vers l'ouest de l'entité 128C découpée suivant 128A	Profondeur zonée en s'appuyant sur la carte géol (Corrélation nappe plus profonde dans l'aptien, plus faible (source?) dans le barrémien), puis moyenne au sein des polygones de contextes géologiques semblables. Pour les débits, moyennes de débits pour les polygones aux contextes géologiques semblables (bonne corrélation géol/débits). Température homogène -> moyenne attribuée à l'ensemble de l'entité	manque de données au sud	OUI	POTENTIEL VARIABLE	
128B	Argiles et Calcaires de l'Hauteriviens (Neocomien)	2			0			2				L'entité n'existe pas dans BDLISA harmonisation nationale, mais est regroupée avec 128E a priori	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT	
128E	Sables et Grès du Valanginien (Neocomien)	6			2			1				affleurements très limités, tous caractérisés par un potentiel non connu précisément (aucun paramètre n'a été caractérisé) ; intègre 128B	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT	
131A	Calcaires du Tithonien	101			34			38		Découpage de l'entité 131A par 128E, quelques modifications pour intégrer les données situées à l'ouest du polygone à l'aide du MNT	Bonne corrélation MNT / distribution des valeurs de profondeurs : spatialisation à l'aide du MNT. Les débits ont été moyennés au sein des polygones de profondeurs, parfois, des polygones représentatifs du même contexte ont été traités conjointement en rassemblant et moyennant les valeurs de débits qu'ils contenaient. Pour la température, seul un polygone rassemble des valeurs plutôt faibles de température, les autres valeurs ont été moyennées et affectées à l'ensemble de l'entité	Zones de vallées ont été caractérisées par un potentiel ; avertissement dû à la limite méthode (aquifère karstique). Manque de données de débit exploitable.	OUI	POTENTIEL VARIABLE Y COMPRIS ALEATOIRE (zones karstiques)	
134A	Marnes du Kimmeridgien	14			20			6		134A_Erase 131A / 2 polygones dont le principal au sud-est	Les données se répartissent sur les versants des vallées, l'entité a été spatialisée en distinguant "zones de vallées" (contenant les valeurs), et zones de plateau (non renseignées) / Prof homogène -> valeur moyenne ; Seulement 4 valeurs de débits dans le polygone au sud est : on observe les débits les plus élevés dans le fond de vallée -> connexion avec alluvions + calcaires fracturés probablement, débits les plus faibles en haut des versants -> régionalisation des débits autour des valeurs dispo sur cette base.		NON	POTENTIEL A PRIORI NUL	
137A	Calcaires du Kimmeridgien inférieur à l'Oxfordien moyen	121			51			34		137A Erase 134A - 2 zones : Haute Mame et Ardennes. Modification dans les Ardennes, redécoupage selon présence de données suivant le MNT	Haute Mame : Le MNT explique assez bien la distribution des valeurs de profondeur d'eau ; l'aquifère est puissant de plusieurs dizaines de mètres, voire multichouche : forte variabilité des valeurs de profondeur selon la partie captée de l'aquifère. Température difficile à zoner, les faibles valeurs semblent parfois excessives. Il a été retenu de faire la moyenne des températures en distinguant les secteurs Ardennes et Haute Mame	Retrogradage de la classe prof et avertissement karstique. Impact limité sur le potentiel final. Enregistré sous entité 137A_V3. Forte variabilité des valeurs Q prof	OUI	POTENTIEL VARIABLE Y COMPRIS ALEATOIRE (zones karstiques)	
140A	Marnes du Callovo-Oxfordien	17			8			1					NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT	
143A	Calcaires du Bathonien-Callovien (Dogger)	81	74	42	32	32	13	19	5 (après vérification valeurs aberrantes MC)	0	Découpage par rapport à l'entité 140A ; quelques modifications ont été apportées pour intégrer certaines données, notamment au nord. Au sud, c'est l'entité 137A qui a servi pour le découpage.	Ardennes : Prof : 2 splines selon le secteur + 1 moyenne dans un polygone. T* interpolée par krigeage. Haute-Mame : Krigeage + 1 moyenne dans polygone au sud. Certains polygones contiennent une valeur mais sont trop isolés pour extrapoler à l'ensemble du secteur T* homogènes -> moyenne des valeurs pour l'ensemble du polygone Haute Mame	Manque de données exploitables : 5 données de Q hétérogènes => paramètre non exploitable. On a des infos sur la prof et la température.	OUI	POTENTIEL VARIABLE Y COMPRIS ALEATOIRE (zones karstiques)

CODE_bdlisa	NOM_Entite_BDLISA	PROFONDEUR EAU			TEMPERATURE			DEBIT EXPLOITABLE			ANALYSE MULTICRITERE				
		nbre_pts_prof_eau	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_temp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_debit_exp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Modification entité BDLISA	Méthode spatialisation	Remarque	Estimation_potentiel	Commentaire_potentiel
143B	Marnes du Bajocien	5	3		28	28		4			Découpage de 143B par 143A. Elimination des polygones où pas de données. 2 zones : Ardennes et Haute Marne. Celui des Ardennes a été limité vers l'ouest, faute de données disponibles.	Pas de spatialisation possible faute de données pour Q et prof. Les températures sont homogènes et bien réparties au sein de l'entité affleurante → moyennes des valeurs attribuées à chaque polygone.	Pas de potentiel géothermique possible pour cette entité, faute de données Q et prof.	NON	POTENTIEL A PRIORI NUL
143C	Calcaires de l'Aalénien Bajocien	48			50			5	3		Découpage de l'entité 143C par la 143B. Deux polygones ont été ajoutés en complément, issus de 143B, mais où la ressource 143C peut être captée à faible profondeur. 2 secteurs : Ardennes et Haute Marne.	HAUTE MARNE : PROF : krigeage partiel au nord, moyenne ailleurs. T° 21 valeurs dont 3 < 10°C → moyenne pour l'ensemble. Moyenne des Q < 10m3/h pour les polygones où existe une valeur. ARDENNES : Polygone de Thiessen a été utilisé pour spatialiser la profondeur et la température car aucune organisation apparente des données, malgré un nombre important de données disponibles. Une seule valeur de débit, aberrante, dans ce secteur → pas de Q pour cette entité dans les Ardennes (de + karstique → limite méthode).	risque de surcote piézométrique, forte variabilité de la profondeur parfois. Manque de données Q.	OUI	POTENTIEL VARIABLE Y COMPRIS ALEATOIRE (zones karstiques)
146A	Marnes du Toarcien (Lias sup.)	12-18	6 ont été auparavant attribuées à l'entité 146C sous-jacente)	4 (dont 2 où pas d'info)	25	25	13	5	5	3 (dont 1 ou pas d'info)	Découpage de l'entité par la 143C → 2 polygones : un proche Ardennes, 1 au sud est. Celui au nord a été découpé vers l'ouest car manque d'info au-delà d'une certaine limite. Celui au sud a également été scindé au sud pour les mêmes raisons.	Polygone nord : moyennes des valeurs pour chaque paramètre car données peu nombreuses mais homogènes et bien réparties au sein du polygone. Seule la profondeur présente une très forte variabilité. Polygone sud : la moyenne a été attribuée pour l'ensemble concernant les profondeurs, sauf le polygone à l'extrémité sud où 0 donnée. Seulement 3 valeurs de débits, mais homogènes : moyenne pour l'ensemble. Température spatialisée (spline représente le mieux la disparité Est/Ouest), et valeur moyenne via zonal statistic pour chaque polygone issu de la spatialisation.	Polygone nord (Ardennes): forte variabilité des profondeurs, moyenne peu significative entité_146A_V3 → potentiel faible dans les Ardennes et pas de carto en Haute Marne (ressortira en non connu précisément dans ce secteur).	OUI	OK sur les Ardennes mais POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT => Haute-Marne
146C	Calcaires et Grès du Plienbaschien (Domérien)	84	73 (dont 6 éliminés captant le Toarcien sous-jacent, zone nord)	13	3	3	1	37	36 (valeur isolée au sud du polygone sud)	12	Deux zones au sein de l'entité, correspondant - pour la majeure partie des données disponibles - à la zone sous couverture des marnes du Toarcien, hors couverture des calcaires du Dogger (143C). Le polygone au nord a été limité à l'est faute de données disponibles.	Polygone au sud spatialisé selon profondeur et selon Q. Le zonage scinde le polygone initial en 24 entités. Toutefois pour chacun des paramètres Q et prof, la spatialisation propre à ces critères a été conservée pour le calcul des valeurs moyennes (deux polygones distincts peuvent donc avoir une valeur moyenne identique pour un paramètre). Les valeurs moyennes ont été calculées avec zonal statistics.	Le zonage des débits n'a pu aboutir au sud. Il a été décidé d'abandonner la valeur de débit disponible dans ce secteur : une seule valeur ne peut être représentative de toute la zone. Risque de surcote piézométrique. Donnée très limitée au nord → pas de potentiel géothermique calculé (0 débits, 0 t°). A noter qu'un potentiel a pu être défini pour une partie de l'entité.	OUI	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT => sauf pour une partie de l'entité dont le potentiel a pu être caractérisé
146G	Calcaires argileux et Grès du Sinémurien-Hettangien (Lias inf.)	65	62		30	30		11	11		Deux zones au sein de l'entité, correspondant - pour la majeure partie des données disponibles - aux parties affleurantes de l'aquifère. Le polygone au nord a été limité à l'est faute de données disponibles.	Polygone au nord spatialisé selon la profondeur (Krigage), au sud pas de régionalisation tous paramètres confondus. Moyenne des profondeurs définie pour ce secteur avec zonal statistics. Les débits moyen ont été calculés par la moyenne des points situés dans chaque polygone issus du découpage selon la profondeur (seulement 11 valeurs de débits → pas de spatialisation possible). Concernant la t°, les tentatives de spatialisation des 29 valeurs situées dans le polygone au nord n'ont pas abouti à un résultat satisfaisant. Les t° moyennes ont été calculées au sein de chaque polygone issus du découpage selon les prof.	Risque de surcote piezo. La température semble plus faible au nord et plus élevée au sud au regard de la répartition des valeurs. Mais aucune méthode de spatialisation n'a pu rendre compte de cet aspect (manque de données). Entité_146G_V3. A noter qu'un potentiel a pu être défini partiellement pour la zone Ardennes. En Haute-Marne, ressort en non connu précisément (donnée existante néanmoins : prof, t°)	OUI	OK sur les Ardennes mais POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT => Haute-Marne
149A	Grès du Rhétien	83	79	2	3	3	1	33	33	2	Les données se répartissent au SE de l'entité. La partie captive de l'aquifère a été distinguée des zones affleurantes → 2 polygones. Cette distinction se justifie par l'analyse des débits, légèrement plus élevés en zone libre.	L'analyse géostatistique sur les profondeurs n'a pas abouti à un zonage particulier. Les traitements sur les débits orientent l'analyse vers une possible relation captivité de l'aquifère/débit. Les moyennes des débits selon zone captive/zone libre indique des débits légèrement + élevés en zone libre (et saut d'une classe pour ce paramètre). Reste à discuter...	Risque de surcote piezo. Moyenne des 3 valeurs pour la température attribuée aux 2 polygones. A noter : le potentiel ressort "moyen" indifféremment du zonage captif/libre	OUI	POTENTIEL VARIABLE

CODE_bdlisa	NOM_Entite_BDLISA	PROFONDEUR EAU			TEMPERATURE			DEBIT EXPLOITABLE			ANALYSE MULTICRITERE				
		nbre_pts_prof_eau	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_temp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_debit_exp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Modification entité BDLISA	Méthode spatialisation	Remarque	Estimation_potentiel	Commentaire_potentiel
149C	Dolomies et Marnes du Keuper	10	7	1	3			2			Suppression des polygones où il n'y a pas d'information	PROF : valeur moyenne attribuée à toute l'entité. Assortie d'un fort écart-type, la classe a été retradagée en classe 1 au lieu de 4. Débit classe 2 attribué à dire d'expert. Température : moyenne des 3 valeurs dispo -> classe 4	Caractérisation appliquée (voir case "méthode spatialisation") -> ressort en potentiel faible	OUI	POTENTIEL VARIABLE
149E	Dolomies et Argiles du Lettenkohle	3			0			0					Pas d'information (prof, t°C et Qexp) -> ressort en non connu précisément	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
149G	Calcaires du Muschelkalk supérieur	18	17	2	4	4	2	6	6	2	1 polygone unique à l'origine, découpage selon BDLISA149E (formation sus-jacente), distinction de deux polygones où l'information existe. V3 -> contours redessinés à partir MNT où existait de la donnée	Le nombre de valeurs est jugé insuffisant pour permettre une spatialisation des paramètres : ce sont les valeurs moyennes pour chaque polygone qui ont permis de définir la classe. V3 -> valeurs de prof, t° et de Q moyennées au sein des polygones de l'entité	risque de surcote piezométrique en vallée ; valeurs de débits très variables. Les zones de vallées sont les plus productives, mais aussi là où la profondeur de l'eau est la plus faible. Il serait intéressant de régionaliser autour des vallées. Entité_149G_V3 -> utilisation du MNT : ressort en non connu précisément hors zones vallées.	OUI	OK mais POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT hors zones de vallées
149I	Marnes et Argiles du Muschelkalk moyen et inférieur	7			0			2						NON	POTENTIEL A PRIORI NUL
149K	Grès du Muschelkalk Inf. et Buntsandstein	0			0			0					Cette entité n'affleure pas en CHA et se retrouve rapidement à plusieurs mètres de profondeur -> pas de carto. Ressortira en non connu précisément.	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
151I	Socle des Ardennes	38			16			8						OUI	POTENTIEL VARIABLE
165A	Alluvions de la Meuse	276			20			36			aucune	profondeur : seule une zone ressort plus profonde au nord de l'entité, sinon moyenne attribuée à toute l'entité. Découpage selon les valeurs de débits appuyée sur Thiessen et observations ouvrages dans la BSS. Idem pour la température		OUI	POTENTIEL VARIABLE
165B	Alluvions de la Chiers	25			0			2			aucune	profondeur homogène et bien distribuée au sein de l'entité -> valeur moyenne pour toute l'entité ; Q seuls 2 points, buffer de 2km et valeur pour chaque zone ainsi délimitée	profondeur et Q caractérisés	OUI	POTENTIEL VARIABLE
165C	Alluvions de la Bar	1			0			0					pas d'info -> pas de carto -> ressortira en non connu précisément	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
243A	Alluvions Saône amont et Lanterne	2			1			0					pas d'info -> pas de carto -> ressortira en non connu précisément	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
248A	Alluvions du bassin versant de la Vesle	23			0			15			aucune	Profondeur homogène -> moyenne attribuée à la zone où données disponibles ; zonage autour des points, appuyés sur interpolation et buffer 2km. Pas de t°	prof et Q caractérisés => pas de potentiel faute de t°. -> ressortira en non connu précisément (craie sous jacente caractérisée)	OUI	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
248B	Alluvions du bassin versant de la Suippe	2			3			1					pas d'info -> pas de carto -> ressortira en non connu précisément (craie sous jacente caractérisée)	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
248C	Alluvions du bassin versant de l'Aisne	43			12			8			aucune	entité restreinte pour la profondeur à la distribution des valeurs, par ailleurs homogène -> moyennes. Pour les Q, application d'un buffer de 2 km autour des points, les valeurs étant hétérogènes et ne présentant une distribution géographique explicable		OUI	POTENTIEL VARIABLE
249A	Alluvions du bassin versant de la Marne	211			19			16			aucune	profondeur homogène et bien répartie -> pas de spatialisation, seule une zone sans info a été délimitée -> moyenne attribuée à toute l'entité ; idem pour température ; Pour les débits, des zonages ont été opérés autour des valeurs disponibles	le polygone situé à l'est présente une très forte variabilité des valeurs de débits, et ressort en potentialité forte	OUI	POTENTIEL VARIABLE
249B	Alluvions du bassin versant de la Marne en Champagne pouilleuse	1			0			0					pas d'info -> pas de carto -> ressortira en NC (craie sous jacente caractérisée)	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
249C	Alluvions du bassin versant de la Marne	32			5			8			aucune	profondeur homogène et bien répartie -> pas de spatialisation -> moyenne attribuée à toute l'entité ; t° : homogène mais seulement 4 valeurs ; comme paramètre variant peu -> moyenne attribuée à toute l'entité.		OUI	POTENTIEL VARIABLE
250A	Alluvions du bassin versant de l'Aube	145	116	116	133	133		17	17	1	ras	PROF : homogène à l'échelle de l'entité -> moyenne attribuée à toute l'entité ; Q zonée par polygone de Thiessen. TEMP : données ajoutées (TEMP_250A_ICSP) -> moyenne attribuée à toute l'entité malgré un fort écart-type	potentiel défini pour une partie de l'entité	OUI	POTENTIEL VARIABLE défini pour une partie de l'entité

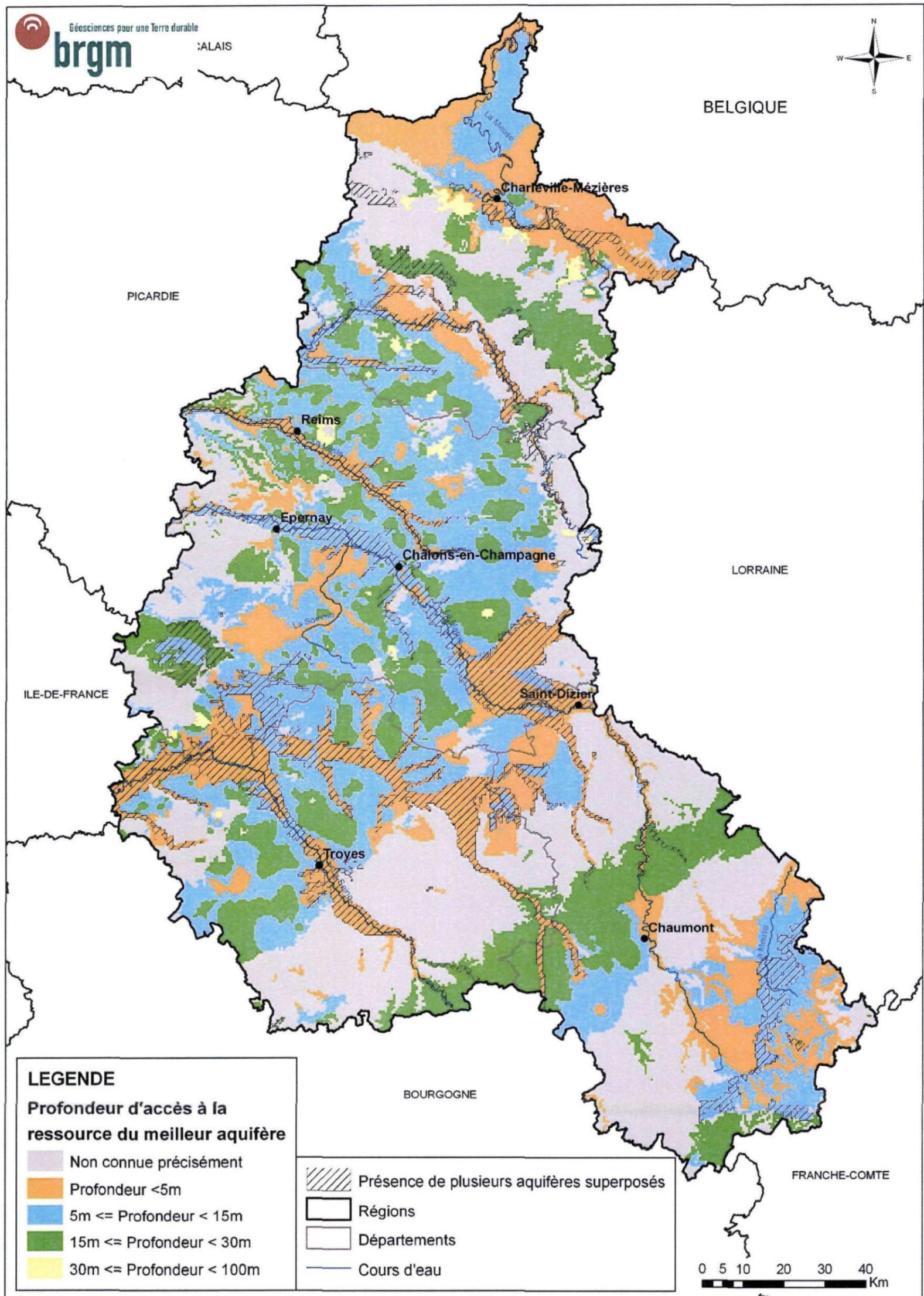
CODE_bdlisa	NOM_Entité_BDLISA	PROFONDEUR EAU			TEMPERATURE			DEBIT EXPLOITABLE			ANALYSE MULTICRITERE				
		nbre_pts_prof_eau	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_temp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Nbre_pts_debit_exp	nbre_valeurs_conservees	nb_polygones_apres_traitement	Modification entité BDLISA	Méthode spatialisation	Remarque	Estimation_potentiel	Commentaire_potentiel
250B	Alluvions de la Bassée	26			3			11			aucune	Découpage de l'entité selon la localisation des valeurs. Profondeur moyenne au sein des polygones ainsi définis. Idem pour les débits. Température, seulement 3 valeurs, attribuées au polygones concernés.	Valeurs des prof et Q globalement homogènes. Entite_250C_V2 : temp moyenne affectée à toute l'entité, prof moyenne et Q moyen ont été affectés à toute l'entité -> ressort en potentiel fort.	OUI	POTENTIEL FORT
250C	Alluvions de la Seine en amont de la Bassée	63	50		4	4		9			aucune	Profondeur homogène -> moyenne attribuée à toute l'entité ; Q zonée selon thiessen, délimitation par groupe de valeur similaires ; t* : zonage autour des valeurs disponibles		OUI	POTENTIEL VARIABLE
251A	Alluvions du bassin versant de la Vanne	1			0			0			4 polygones dont 3 minuscules ont été éliminés		pas d'info -> pas de carto -> ressortira en NC (craie sous jacente caractérisée)	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT
251B	Alluvions du bassin versant de l'Amançon	4			0			0			2 polygones distincts		pas d'info -> pas de carto -> ressortira en NC (craie sous jacente caractérisée)	NON	POTENTIEL NON CONNU PRECISEMENT

Entité hydrogéologique aquifère (système aquifère)	Relativement peu de données => Interprétation délicate
Entité hydrogéologique peu ou pas aquifère (domaine hydrogéologique)	Pas de données => traitement impossible



Annexe 2

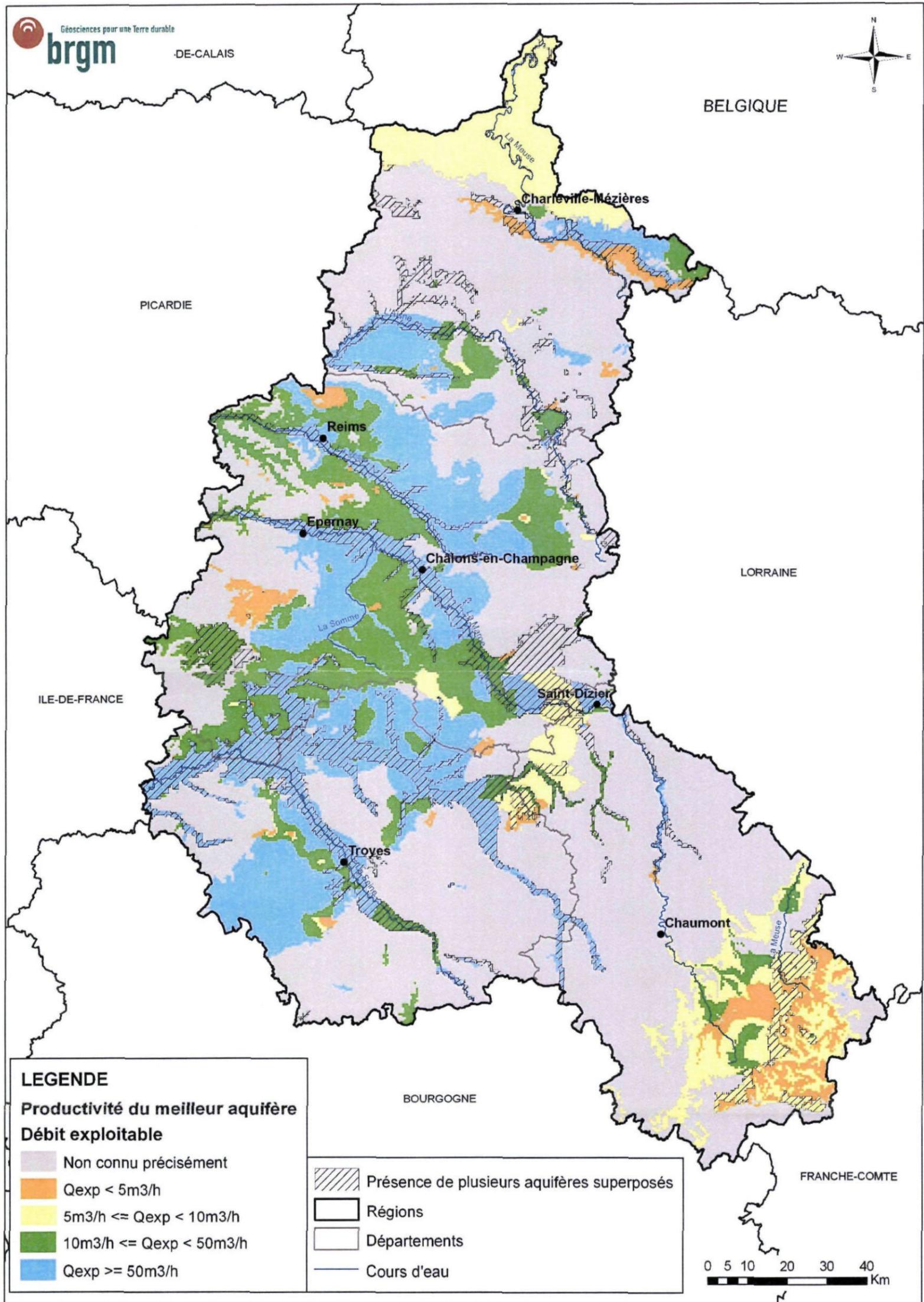
Carte régionale des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère



Carte régionale des profondeurs d'accès à la ressource du meilleur aquifère

Annexe 3

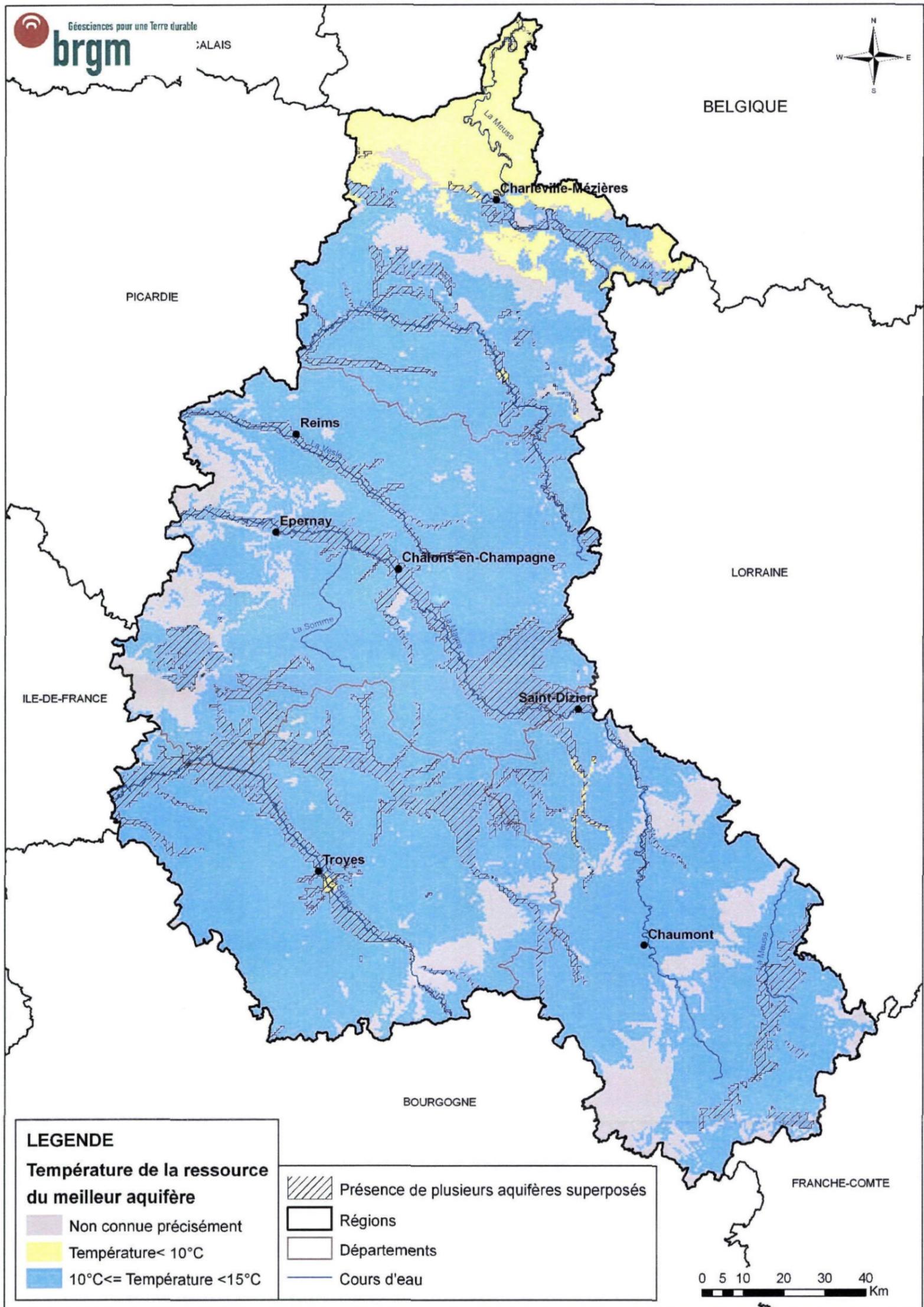
Carte régionale des productivités de la ressource du meilleur aquifère



Carte régionale des productivités de la ressource du meilleur aquifère

Annexe 4

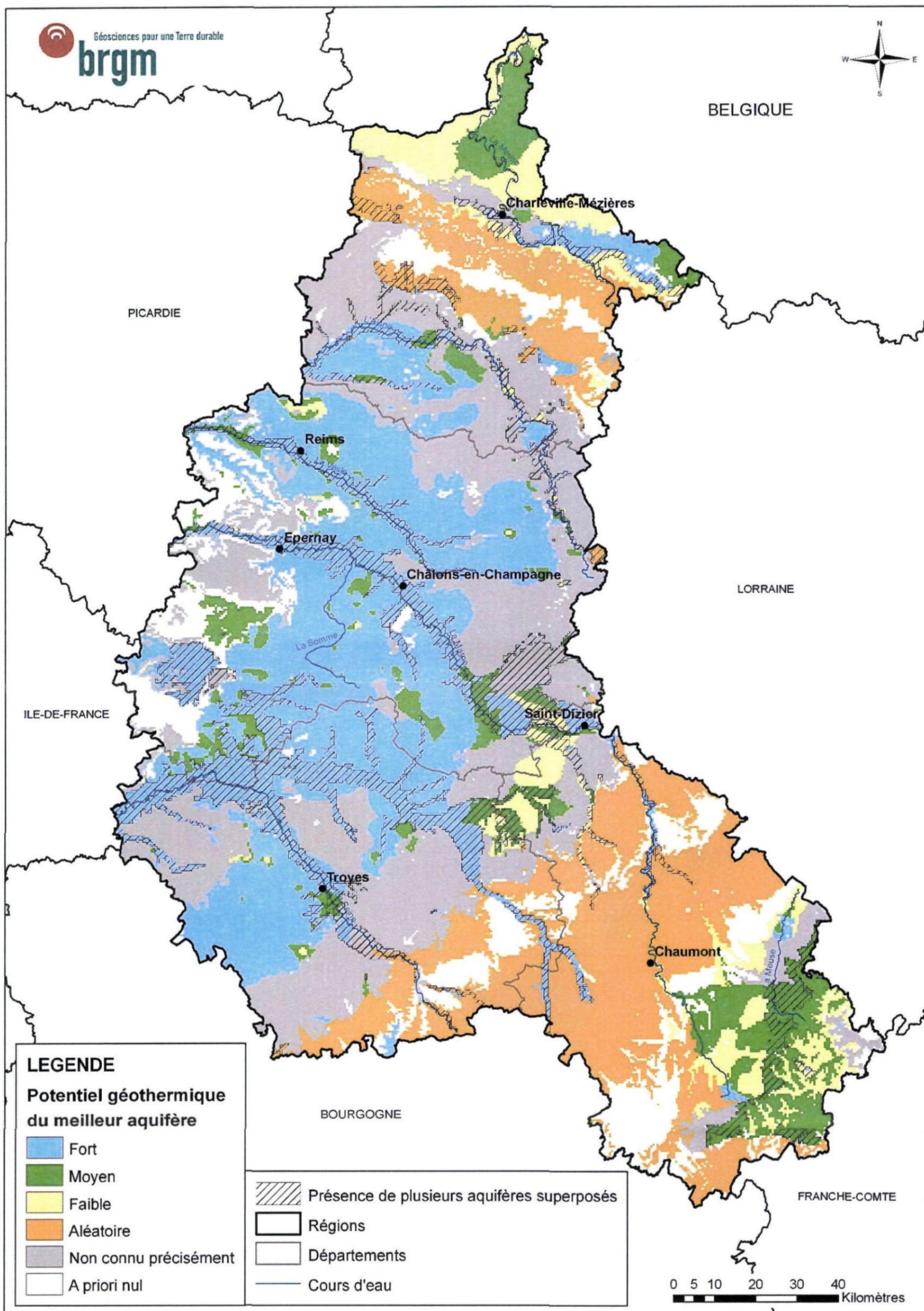
Carte régionale des températures de la ressource du meilleur aquifère



Carte régionale des températures de la ressource du meilleur aquifère

Annexe 5

Carte du potentiel géothermique régional du meilleur aquifère



Carte régionale du potentiel géothermique du meilleur aquifère



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

Service géologique régional Champagne-Ardenne
12, rue Clément Ader
BP137
51685 – Reims Cedex 2 - France
Tél. : 03 26 84 47 70