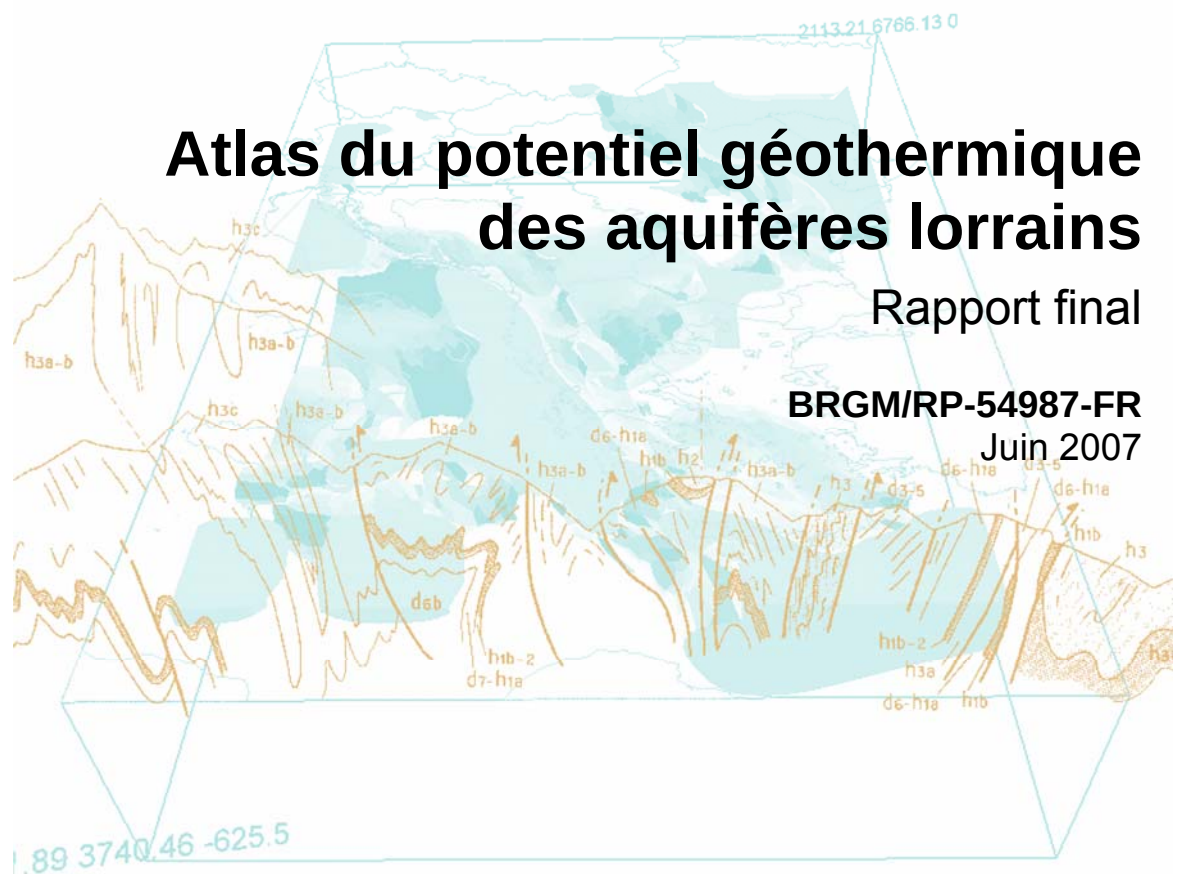




Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains

Rapport final

BRGM/RP-54987-FR

Juin 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 06ENEB06

**B. Bourguine, L. Denis, T. Filhine-Tresarrieu,
P. Monnot, D. Nguyen-Thé, C. Robelin**

Vérificateur :

Nom : A. Desplan

Date : 15/06/07

(Original signé)

Approbateur :

Nom : M. Aguilhaume

Date : 15/06/07

(Original signé)



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000



Mots clés : aquifère, calcaires du Tithonien, calcaires de l'Oxfordien, calcaires du Dogger, calcaires du Muschelkalk, grès du Trias inférieur, ressource énergétique, pompe à chaleur sur nappe, Lorraine.

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

B. Bourguine, L. Denis, T. Filhine-Tresarrieu, P. Monnot, D. Nguyen-Thé, C. Robelin (2007) – Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains. Rapport BRGM/RP-54987-FR, 83 p., 36 ill., 3 ann.

Synthèse

L'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, représentant l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, le Conseil Régional Lorraine, et Electricité de France, a passé une convention avec le BRGM pour qu'il réalise un atlas des ressources géothermales superficielles pour pompes à chaleur (PAC) sur les aquifères lorrains.

Une approche multicritère a été mise en oeuvre pour élaborer l'atlas des ressources énergétiques des principales nappes d'eau souterraines « accessibles » de la région Lorraine. Elle a été rendue possible par la mise en place d'un système d'informations géographiques pour caractériser les nappes des calcaires du Tithonien, des calcaires de l'Oxfordien, des calcaires du Dogger, des calcaires du Muschelkalk, et des grès du Trias inférieur.

Les paramètres qui ont été pris en compte sont variés. Ils reflètent les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères et les caractéristiques qualitatives des nappes qui leur sont associées. Pour certains paramètres, et en particulier pour les débits, l'insuffisance des données disponibles, n'a pas permis de faire un tri systématique de celles-ci, ce qui a parfois entraîné des difficultés pour leur traitement.

Un atlas étant par définition constitué de cartes, une attention particulière a été apportée à la réalisation de la cartographie des paramètres, en veillant à toujours suivre une démarche scientifique consistante. La variabilité spatiale des paramètres a donc été étudiée. Pour la majorité des nappes, des krigeages géostatistiques des paramètres ont été faits.

Toutefois, les résultats sur les débits apportés par l'étude ne sont qu'indicatifs. L'atlas est en effet un outil d'aide à la décision sur la géothermie très basse énergie, qui donne des orientations sur les potentialités d'exploitation des nappes. Les points suivants doivent notamment être pris en compte puisqu'ils peuvent limiter les précisions de l'analyse variographique et de la qualité des interpolations :

- les formations carbonatées sont hétérogènes (fissurées voire karstifiées), et les données de débit qui ont été collectées le sont aussi ;
- l'estimation des débits ne tient pas compte des interférences des pompages entre eux.

Ainsi, les résultats de l'interpolation des débits pourraient ne pas être représentatifs de la réalité. En tout état de cause, ces résultats ne sauraient constituer une étude de faisabilité d'un projet.

Par ailleurs, l'existence de zones de restriction d'exploitation ou de travaux (cas des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable par exemple), et la possibilité pour une nappe d'être en déséquilibre (cas de la nappe des grès du Trias inférieur qui est surexploitée), devront être prises en compte dans un projet.

Ces restrictions d'usage étant mentionnées, le travail effectué a permis d'aboutir à la réalisation d'une carte du potentiel d'exploitation par des pompes à chaleur, pour chacune des cinq nappes. Ces documents ont été normés par la même référence, et présentés selon une échelle de résultats unique, afin qu'ils puissent être comparés. L'atlas permet finalement, lorsque plusieurs nappes coexistent, d'orienter le lecteur vers la ressource en eau souterraine la plus intéressante.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Cadres géologique et hydrogéologique	11
2.1. LA GEOLOGIE LORRAINE	11
2.2. DELIMITATION DES PRINCIPALES FORMATIONS AQUIFERES AFFLEURANTES	12
2.3. MODELISATION GEOLOGIQUE	17
2.4. MODULATION DE LA GEOMETRIE PAR LA PIEZOMETRIE	22
2.5. RAPPEL SUR LES FORAGES D'EAU	23
3. Caractérisation des aquifères	25
3.1. ACQUISITION DES DONNEES	25
3.2. APPROCHE ADOPTEE POUR VALORISER LES DONNEES	26
3.3. EXEMPLES DE TRAITEMENT DES DONNEES	27
3.3.1.Exemple des débits du réservoir du Tithonien	27
3.3.2.Exemple de la température pour l'Oxfordien	33
3.3.3.Exemple du chlorure pour le Dogger	35
3.3.4.Exemple du sulfate pour le Muschelkalk	37
3.3.5.Exemple de la dureté pour le Buntsandstein	38
4. Potentiel d'exploitation	41
4.1. PRINCIPE DU CALCUL	41
4.2. EVALUATION DU POTENTIEL D'EXPLOITATION	42
5. Conclusion	51
6. Glossaire	53
7. Documents utilisés	55

Liste des illustrations

Illustration 1 : Extrait de la carte géologique de la France au millionième.	11
Illustration 2 : Table stratigraphique simplifiée de la Lorraine.	11
Illustration 3 : Coupe Ouest-Est de la bordure orientale du Bassin de Paris.	12
Illustration 4 : Exemples d'assemblage et de découpage des formations géologiques.	13
Illustration 5 : Délimitation du toit du réservoir du Tithonien.	14
Illustration 6 : Principaux affleurements des aquifères lorrains.	15
Illustration 7 : Coupe Ouest-Est des réservoirs aquifères.	16
Illustration 8 : Exemple d'analyse des corrélations entre sondages. Altitudes modélisées du toit du Dogger.	18
Illustration 9 : Altitudes modélisées des toits des réservoirs.	19
Illustration 10 : Incertitudes sur la délimitation du réservoir du Muschelkalk.	20
Illustration 11 : Exemple de variations latérales de faciès rencontrées en Lorraine.	21
Illustration 12 : Profondeurs ciblées selon les zones des réservoirs.	22
Illustration 13 : Forages d'eau en nappe libre.	23
Illustration 14 : Forage en nappe captive.	24
Illustration 15 : Paramètres hydrodynamiques collectées pour l'Oxfordien.	25
Illustration 16 : Histogramme des débits disponibles pour le Tithonien et variogramme expérimental obtenu.	28
Illustration 17 : Modèle de variogramme utilisé pour modéliser les débits du Tithonien.	28
Illustration 18 : Courbes caractéristiques d'une pompe.	29
Illustration 19 : Cavités souterraines inventoriées dans le Sud-Ouest du plateau du Barrois et affectant le Tithonien.	30
Illustration 20 : Blocs diagrammes conceptuels de la structure d'un milieu carbonaté.	31
Illustration 21 : Carte des débits du Tithonien.	32
Illustration 22 : Etude géostatistique de la température de l'eau dans la nappe de l'Oxfordien.	33
Illustration 23 : Résultats des températures interpolées pour l'Oxfordien.	34
Illustration 24 : Distribution des concentrations en chlorure et variogrammes pour le Dogger.	35
Illustration 25 : Carte du chlorure dans la nappe du Dogger.	36
Illustration 26 : Analyse géostatistique du sulfate en solution dans la nappe du Muschelkalk.	37
Illustration 27 : Analyse géostatistique de la dureté des eaux du Buntsandstein.	38
Illustration 28 : Cartographie de la dureté des eaux de la nappe des GTI.	39
Illustration 29 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Tithonien.	43

Illustration 30 : Potentiel d'exploitation de la nappe de l'Oxfordien.	44
Illustration 31 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Dogger.	45
Illustration 32 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Muschelkalk.	46
Illustration 33 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Buntsandstein.	47
Illustration 34 : Deuxième carte du potentiel d'exploitation de la nappe du Buntsandstein (nouvelle échelle de restitution des données).	48
Illustration 35 : Principales nappes alluviales en Lorraine.	49
Illustration 36 : Distribution des potentiels d'exploitation des nappes.	50

Liste des annexes

Annexe 1 : Limites inférieures et supérieures sectorisées des aquifères du Tithonien, de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschelkalk et du Trias inférieur.	59
Annexe 2 : Liste de toutes les formations géologiques à prendre en compte dans la modélisation géologique des aquifères par le logiciel Multilayer.	67
Annexe 3 : Etudes géostatistiques sur les débits Réservoirs de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschelkalk et du Buntsandstein.	79

1. Introduction

Dans le cadre d'une convention passée entre, d'une part, l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, représentant l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, le Conseil Régional Lorraine, et Electricité de France, et, d'autre part, le BRGM, ce dernier a entrepris la réalisation d'un atlas des ressources géothermales superficielles pour pompes à chaleur (PAC) sur les aquifères lorrains. Cet atlas du potentiel géothermique des nappes d'eau souterraines « accessibles » de la région a pour objectif de servir d'outil d'aide à la décision sur la géothermie très basse énergie.

Il présente les caractéristiques de cinq aquifères majeurs régionaux, en identifiant les secteurs favorables à l'implantation de projets géothermiques. Il permet d'aider à sélectionner la ressource géothermique la plus propice à être exploitée quand plusieurs coexistent, et ce, préalablement à la réalisation de l'étude de faisabilité que doit engager tout maître d'ouvrage avant l'exécution d'un projet de géothermie. La limite inférieure d'investigation a été fixée à l'altitude 0 m NGF (Nivellement Général de France), c'est-à-dire à la référence des topographes, pour la plupart des réservoirs aquifères traités.

Des exemples représentatifs des paramètres pris en compte pour caractériser chaque réservoir aquifère sont présentés. Ils sont abordés dans l'ordre des âges des aquifères des plus récents aux plus anciens, c'est-à-dire globalement des moins profonds aux plus profonds. En préalable, les données acquises et valorisées aux cours de l'étude sont présentées. Les méthodes employées pour évaluer les potentialités de production des aquifères de la Lorraine sont aussi explicitées.

Afin de faciliter la compréhension du texte, les termes techniques sont suivis d'un astérisque et définis dans le glossaire de la dernière partie du présent rapport.

2. Cadres géologique et hydrogéologique

2.1. LA GEOLOGIE LORRAINE

La Lorraine se situe sur la bordure orientale de la grande structure géologique du Bassin de Paris. Ce bassin sédimentaire s'est formé par subsidence* du fait de l'empilement des couches sédimentaires au cours de plusieurs centaines de millions d'années, les plus récentes reposant par essence sur les plus anciennes. Les affleurements* de cet ensemble géologique s'organisent en auréoles concentriques, comme il est possible de le voir sur la carte ci-dessous. Les âges en millions d'années des formations sédimentaires rencontrées en Lorraine sont présentés dans leurs grandes lignes sur l'illustration 2. Les formations les plus vieilles du bassin, correspondant à la base de celui-ci, s'appuient à l'Est sur le massif des Vosges, qui est constitué essentiellement par des terrains schisteux de l'ère Primaire et par le socle granitique.

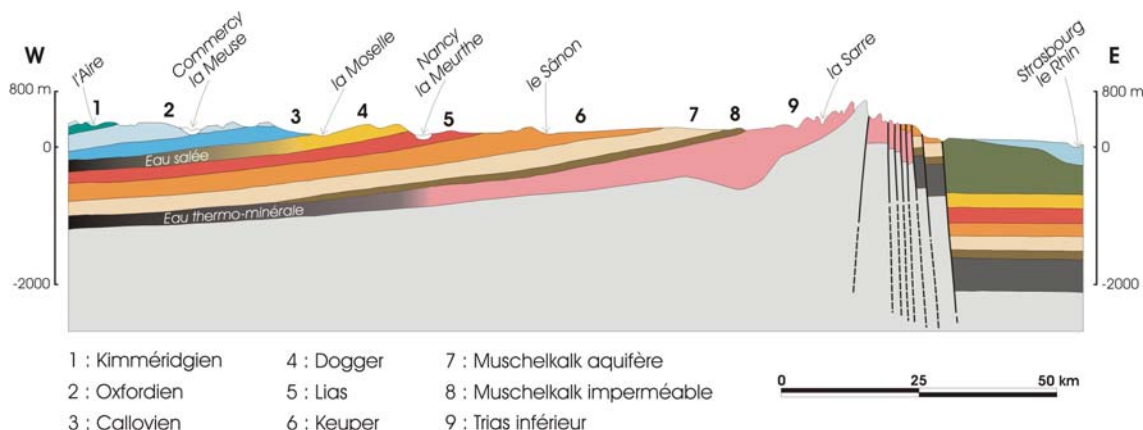


Illustration 1 : Extrait de la carte géologique de la France au millionième, centré sur le Bassin Parisien.

Ma	Période	Epoque		Étage / Sous-étage					
135	Jurassique	sup.	Malm	Tithonien	205	inf.	Lias	Toarcien	
				Kimméridgien				Pliensbachien	
				Oxfordien				Sinemurien	
154		moy.	Dogger	Callovien		Trias	sup.	Rhétien	
				Bathonien	Keuper				
				Bajocien	moy.		Lettenkohle		
				Aalénien			Muschelkalk		
180					240		Inf.	Buntsandstein	
					245				

Illustration 2 : Table stratigraphique simplifiée de la Lorraine.

La coupe Ouest-Est reportée sur l'illustration 3 précise l'agencement de la majeure partie des formations géologiques lorraines, et illustre la structure du bassin dite en « pile d'assiettes ». La succession à l'affleurement des roches de différentes natures, et par là même de duretés variées, fait que les plus tendres ont été érodées (cas du Kimméridgien marneux, du Callovien argileux et du Lias marneux), alors que d'autres ont au contraire résisté à l'érosion et sont devenues proéminentes (cas du Tithonien calcaire situé au-dessus du Kimméridgien, de l'Oxfordien calcaire et du Dogger calcaire). Cette caractéristique est à l'origine de la formation du célèbre relief de cuesta* de l'Est de la France, dont les meilleurs représentants sont les côtes de Meuse et de Moselle.



*Illustration 3 : Coupe Ouest-Est de la bordure orientale du Bassin de Paris
 (d'après Ramon et al., 1992).*

L'objectif de l'atlas est de réaliser une cartographie des possibilités d'utilisation de pompes à chaleur sur les principaux aquifères accessibles de la Lorraine. Par construction, la formation aquifère dite des grès d'Hettange-Luxembourg a été exclue de cet atlas, puisqu'elle n'est rencontrée à l'affleurement sur le territoire lorrain que sur une superficie très restreinte d'une quinzaine de kilomètres carrés. Les grandes nappes d'eau souterraine qui ont donc été sélectionnées dans le cahier des charges du projet sont celles des calcaires du Tithonien, des calcaires de l'Oxfordien, des calcaires du Dogger, des calcaires du Muschelkalk, et des grès du Trias inférieur (GTI).

2.2. DELIMITATION DES PRINCIPALES FORMATIONS AQUIFERES AFFLEURANTES

La définition de la géométrie des cinq aquifères pris en compte dans l'atlas a constitué la première étape du travail de cartographie qui a été mené. En premier lieu, il s'agissait de délimiter précisément les affleurements de ces formations aquifères. Le principe fondamental suivi était de réaliser une délimitation des réservoirs aquifères, indépendamment de l'âge des roches.

Les documents de base qui ont été utilisés sont les feuilles géologiques à l'échelle 1/50 000 de la région lorraine. Ces cartes, levées et éditées entre 1955 et 1998, ne reflètent pas nécessairement une homogénéité de la connaissance géologique, les objets et méthodes des géosciences ayant considérablement évolué au cours de cette période. Un travail d'harmonisation des feuilles a donc été entrepris sur l'ensemble de la région. D'un point de vue hydrogéologique, il s'agissait d'une mise en concordance des unes par rapport aux autres. Des regroupements de formations ont été faits pour assurer la cohérence des réservoirs aquifères. Les extensions des formations aquifères ont également été complétées dans certains secteurs, comme ceux des zones de recouvrement par des sédiments du Quaternaire, en suivant des critères géomorphologiques.

Des exemples d'interprétations qui ont ainsi été faites pour parvenir à réaliser la cartographie des principaux affleurements des aquifères lorrains sont présentés sur l'illustration 4.

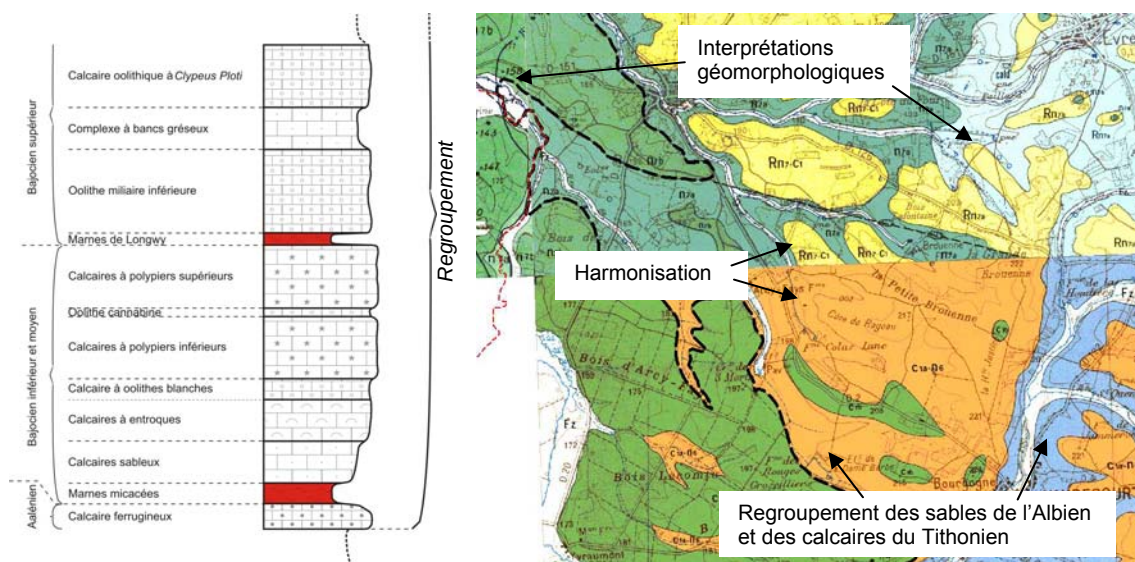


Illustration 4 : Exemples d'assemblage et de découpage des formations géologiques.

Sur le log géologique de la figure de gauche, les niveaux marneux imperméables d'épaisseur restreinte n'ont pas été considérés vis-à-vis de l'ensemble du réservoir aquifère calcaire du Dogger. Inversement, lorsque des formations intercalaires imperméables de forte puissance* ont été rencontrées, elles entraînaient le découpage du réservoir en plusieurs parties. C'est notamment le cas du secteur situé à la limite de la Woëvre et du Pays Haut-Lorrain, où les Marnes à Rhynchonelles séparent la Dalle d'Etain à l'Ouest, des calcaires du Bajocien à l'Est.

La carte de droite de l'illustration 4 présente pour les feuilles géologiques de Clermont-en-Argonne et de Vaubécourt les différents types d'interprétation qui ont été systématiquement mis en application pour lever la carte des aquifères : harmonisation de la limite entre deux feuilles ; regroupement des Sables Verts de l'Albien avec les calcaires du Tithonien, qui supportent une même nappe d'eau souterraine, les premiers reposant en discordance* sur les seconds (la terminologie finale de « nappe des calcaires du Tithonien » devenant quelque peu abusive) ; délimitation intermédiaire des Sables Verts masqués par un recouvrement de limons, grâce aux courbes topographiques ; délimitation vers l'Ouest de l'affleurement des Sables Verts, qui sont recouverts par les alluvions du ruisseau de Courbreuil, en considérant que la formation alluviale qui est en incision sur son substratum a érodé les argiles du Gault. L'illustration 5 résume la position de la limite supérieure du réservoir du Tithonien en fonction des secteurs géographiques, et en fonction des feuilles géologiques.

Ce travail d'interprétation a permis d'améliorer la délimitation usuelle des aquifères. L'amélioration apportée à la version originale – *la seule achevée et éditée jusqu'à présent* – de la Base de Données pour le Référentiel Hydrogéologique Français (BD RHF V1) est parfois considérable. L'affleurement du réservoir des calcaires oxfordiens a par exemple été agrandi et repoussé d'environ 8 kilomètres vers l'Ouest sur la zone d'âge kimméridgien.

La carte des affleurements a été vectorisée sous système d'informations géographiques (SIG) à l'aide du logiciel MapInfo Professional, ce qui a permis de lier les objets graphiques à une base de données interrogeable. La carte des principaux affleurements des aquifères lorrains est présentée sur l'illustration 6. La précision de celle-ci est de l'ordre de 10 mètres. Au total, ont été vectorisés 9 480 km de périmètre d'affleurement d'aquifères, soit 10 700 km² de surface affleurante d'aquifères. Les affleurements des cinq aquifères ont ainsi été délimités en digitalisant 147 000 nœuds. Un tableau indiquant les limites inférieures et supérieures des aquifères des grès du Trias inférieur, des calcaires du Muschelkalk, des calcaires du Dogger, des calcaires de l'Oxfordien et des calcaires du Tithonien est reporté en annexe 1.

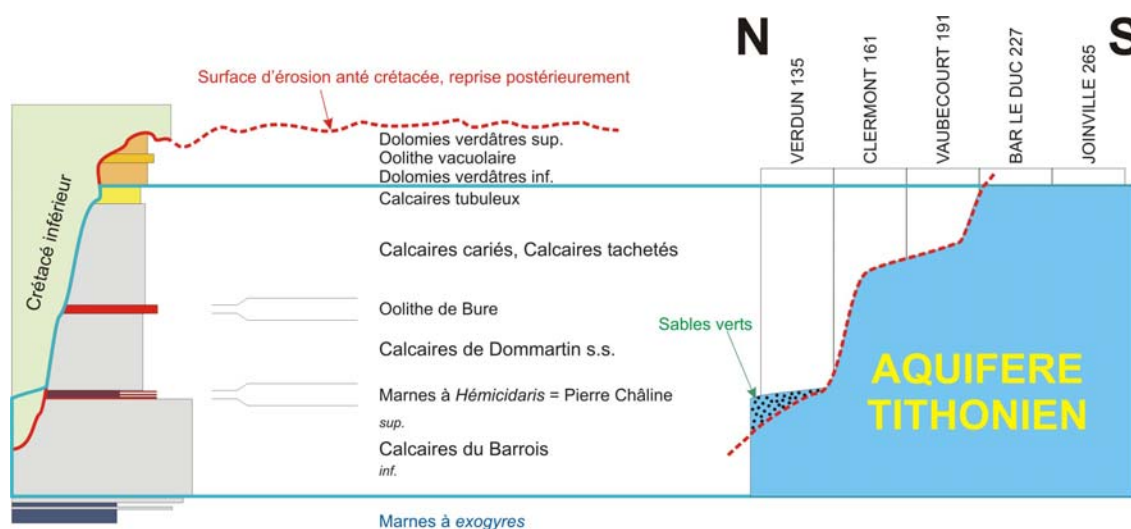


Illustration 5 : Délimitation du toit du réservoir du Tithonien.

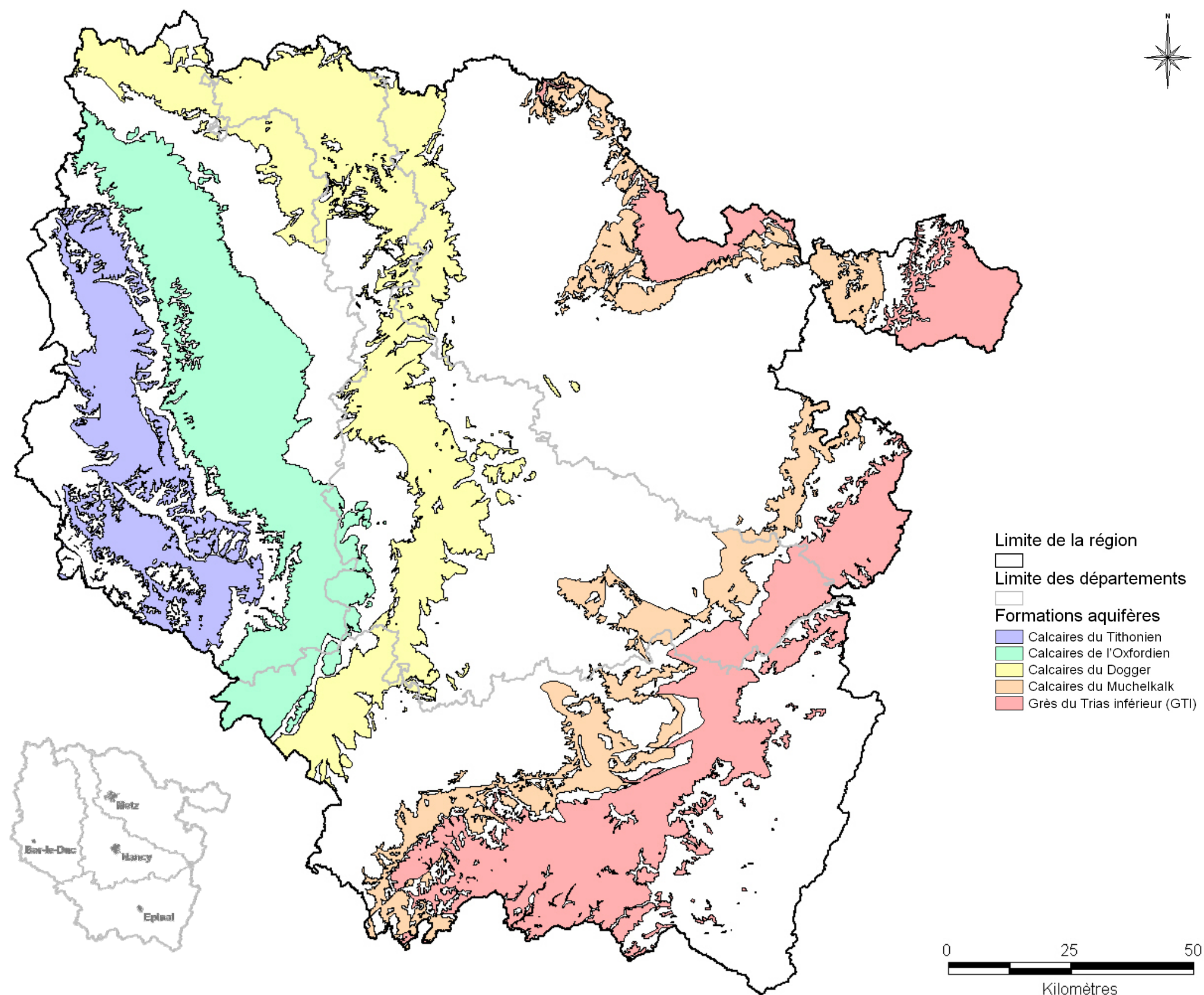


Illustration 6 : Principaux affleurements des aquifères lorrains.

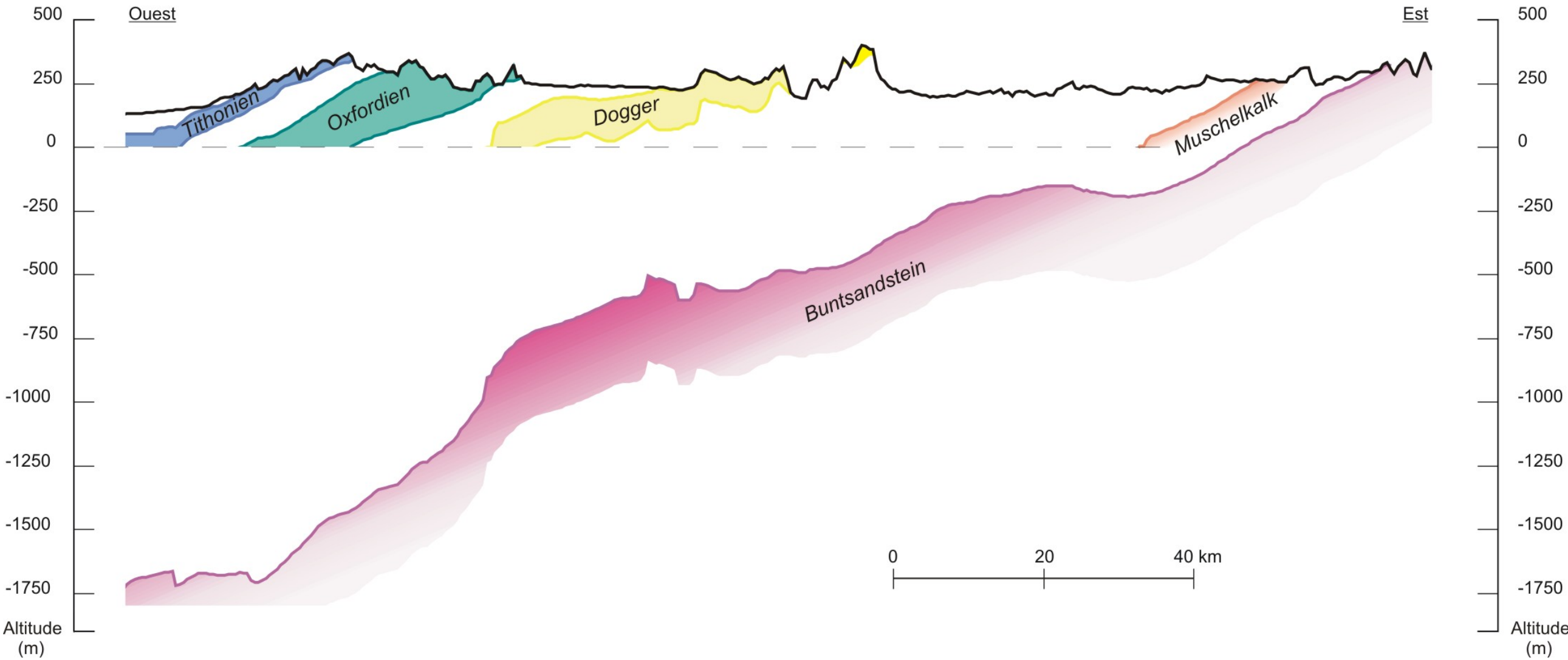


Illustration 7 : Coupe Ouest-Est des réservoirs aquifères.

2.3. MODELISATION GEOLOGIQUE

La seconde étape de la constitution géométrique de l'atlas correspondait à la délimitation du mur et du toit, c'est-à-dire des épontes inférieure et supérieure, de chaque réservoir aquifère. Lors du montage de l'opération, les données initialement prévues comme devant être récupérées à partir de l'atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse (édité par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse), se sont révélées ne pas être en adéquation avec la précision recherchée pour l'atlas du potentiel géothermique. Il s'agissait d'une synthèse cartographique de réservoirs aquifères, effectuées à partir de données de forages et de failles, et à partir de coupes et de cartes converties en grilles numériques lorsqu'elles étaient fiables (Le Nindre, 1995). Le contrôle des données avait été fait là aussi en s'appuyant sur les feuilles géologiques de la zone d'étude.

Ne pouvant reprendre en l'état ces résultats, de nouvelles cartes ont été réalisées pour prendre en compte la profondeur des cinq aquifères. Le logiciel de modélisation géologique MultiLayer, développé par le BRGM, a été utilisé pour ce faire. C'est une application complémentaire de GDM (Geological Data Management), spécialement dédiée à la réalisation de modèles multicouches (2,5D) et rendant typiquement compte de formations de bassin sédimentaire. Elle utilise le concept de pile stratigraphique et intègre de nombreux outils nécessaires à la vérification des données. Le modèle multidimensionnel peut être construit par interpolation géostatistique de façon à obtenir les incertitudes des estimations. A partir du modèle, on peut calculer des sondages prévisionnels ou déterminer les volumes/surfaces des formations géologiques modélisées.

Les cartes des épontes des aquifères ont été produites jusqu'à l'altitude 0 m NGF (approximativement le niveau de la mer à Marseille) pour les quatre aquifères carbonatés du Tithonien, de l'Oxfordien, du Dogger et du Muschelkalk. En effet, en règle générale, les formations calcaires sont affectées par une perméabilité* de fissure ou de fracture qui a tendance à se refermer avec la compression des terrains en profondeur. Il serait donc illusoire de vouloir représenter ces aquifères au-delà d'une certaine profondeur, étant donné qu'ils n'auraient vraisemblablement plus de propriétés hydrogéologiques intéressantes. En revanche pour les grès du Trias inférieur, la modélisation de la géométrie du réservoir a été faite à l'aplomb de pratiquement toute la région lorraine (illustration 7).

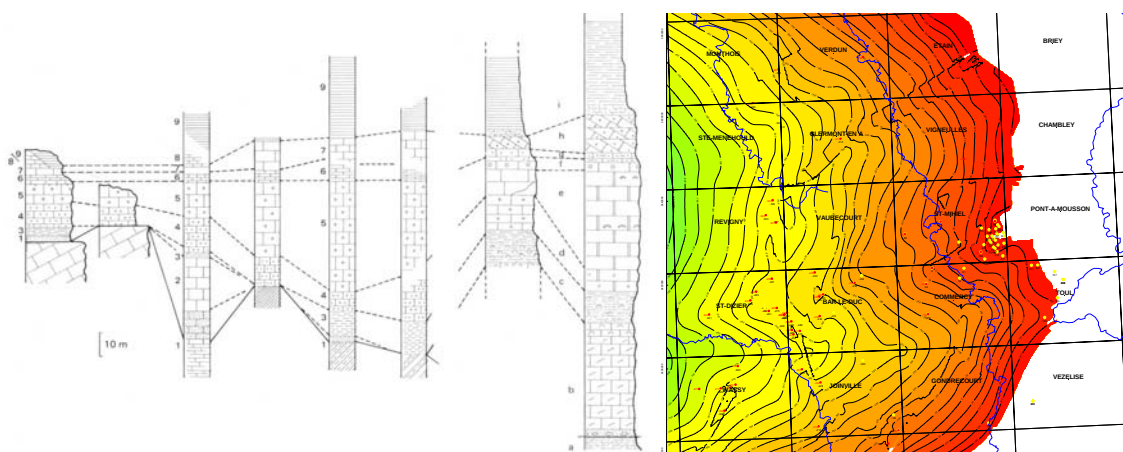
Pour la redéfinition de la géométrie des formations géologiques, l'existant a été pris en compte et affiné. Les données d'entrée injectées dans le modèle étaient des points, sondages, courbes, grilles 2D, et images. Ces données correspondent à des séquences de dépôt/érosion, des coupes ou des contours des cartes géologiques, des profils sismiques, ou encore des failles considérées comme verticales. La liste de toutes les formations géologiques prises en compte, en fonction des feuilles géologiques, est précisée dans l'annexe 2. Les données de sondage ont ainsi été actualisées et compilées par rapport à celles utilisées antérieurement pour produire le travail de 1995.

La cohérence des données entre elles, et avec la carte des affleurements des cinq aquifères (présentée sur l'illustration 5), et les corrélations entre sondages géologiques (voir l'illustration 8 de gauche par exemple) ont aussi été contrôlées. Sur l'illustration 8 de droite, les cassures et courbures qui affectent les isohypses* du toit du Dogger mettent en évidence la structure chahutée de la formation géologique du Jurassique moyen. C'est la prise en compte d'un réseau de failles pour réaliser la modélisation de la géométrie de cette formation qui a en particulier permis d'obtenir ce résultat très précis.

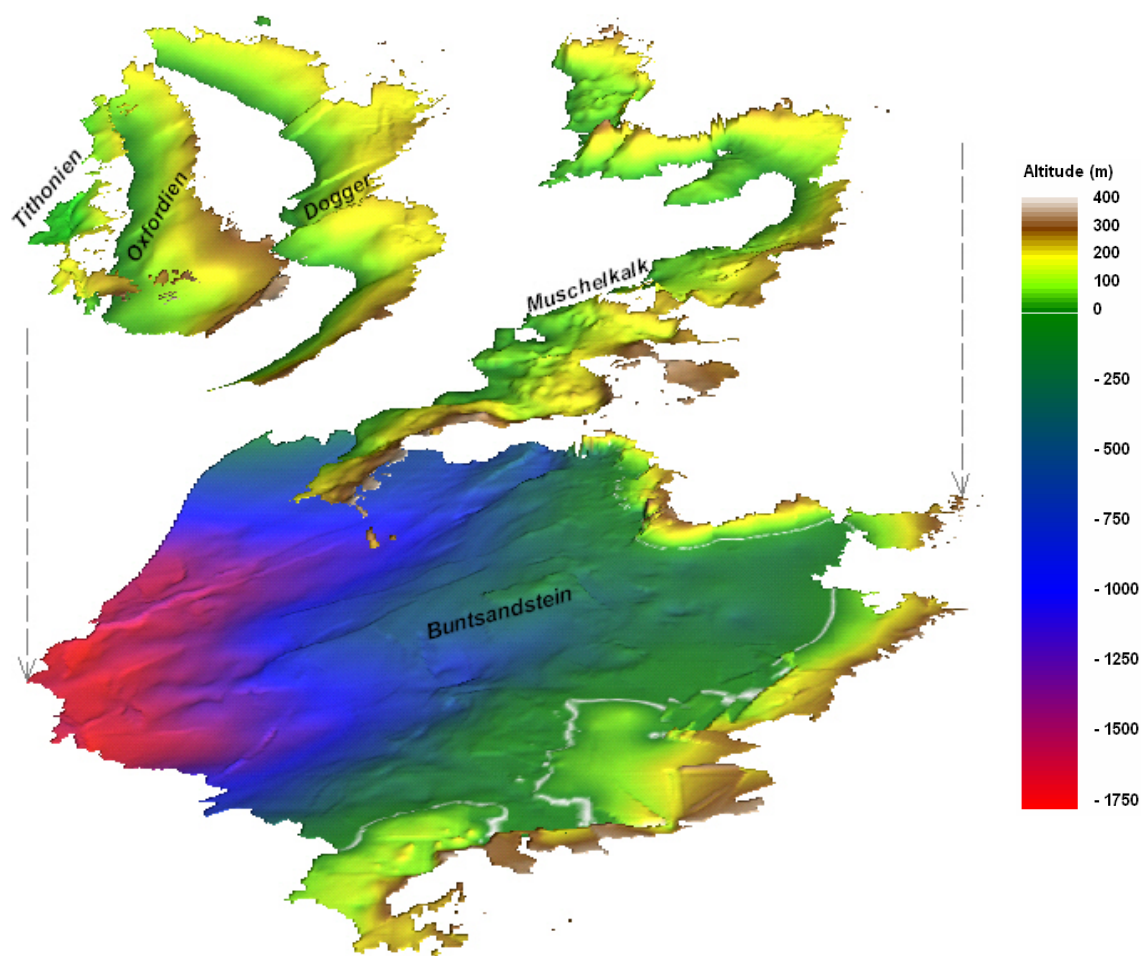
Les résultats finaux de la modélisation géologique, obtenus pour les toits des cinq réservoirs aquifères, sont présentés en perspective sur l'illustration 9 afin de compléter leur visualisation.

Toutefois, le strict respect de la délimitation des épontes des réservoirs aquifères identifiées dans la phase du projet précédent n'a pas pu être garanti systématiquement, puisqu'il dépendait des informations géologiques disponibles. Par exemple, pour le toit du réservoir du Muschelkalk, dans l'emprise des cartes géologiques de Parroy, Bayon et de Lunéville, la Dolomie inférieure de la Lettenkohle n'est pas individualisée. L'aquifère englobe les argiles de la Lettenkohle. Dans ces secteurs, l'altitude du toit de l'aquifère est donc surestimée de 20 mètres environ. Pour le mur du réservoir aquifère du Muschelkalk, dans l'emprise des feuilles géologiques de Cirey-sur-Vezouze, Vittel, Epinal et Monthureux-sur-Saône, les Couches blanches sont intégrées à l'aquifère. Là, l'altitude du mur du réservoir est donc sous-estimée d'environ 5 mètres (illustration 10).

La procédure suivie pour modéliser le toit de l'aquifère de l'Oxfordien rend compte, de même, des entorses qui ont parfois étaient faites aux règles que nous nous étions prédéfinies à l'origine. C'est un niveau repère pétrolier (repère K) correspondant au toit du Séquanien, c'est-à-dire au toit des Calcaires à Astartes, qui a en fait permis d'identifier la limite supérieure du réservoir aquifère.



*Illustration 8 : A gauche, exemple d'analyse des corrélations entre sondages (BRGM, 1980).
A droite, altitudes modélisées du toit du Dogger (échelle ~ 1/1 800 000).*



*Illustration 9 : Altitudes modélisées des toits des réservoirs
(échelle ~ 1/1 400 000 ; pour plus de lisibilité, le Buntsandstein a été décalé vers le bas).*

Dans l'emprise des cartes des zones nord (Stenay) et sud (Bar-le-Duc, Commercy, Joinville et Gondrecourt-le-Château), le repère K marque bien le sommet de l'aquifère qui coïncide effectivement avec le toit des Calcaires à Astartes. Au contraire, dans la zone couverte par les cartes centrales (Monthois, Verdun, Clermont-en-Argonne, Vigneulles-lès-Hattonchâtel, Vaubécourt et Saint-Mihiel), le toit de l'aquifère correspond au toit des calcaires rocaillieux à Ptérocères, recouvrant les Calcaires à Astartes. Le repère K (toit des Calcaires à Astartes) n'y représente qu'approximativement le sommet de l'aquifère, situé 10 à 20 mètres plus haut selon les lieux.

Pour le mur de l'aquifère oxfordien, la méthodologie adoptée était de considérer que le mur de l'aquifère correspondait à la base du Terrain à Chailles sur toute l'étendue de la Lorraine. C'est en effet une formation de transition entre les Argiles de la Woëvre et les faciès à polypiers du complexe récifal des côtes de Meuse. Le Terrain à Chailles

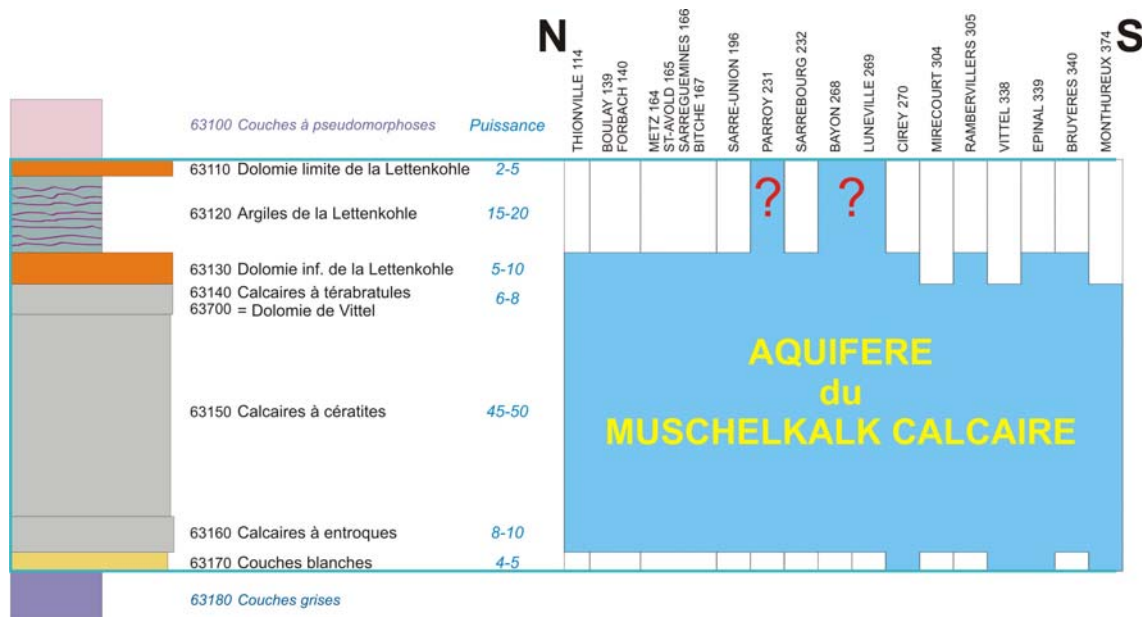


Illustration 10 : Incertitudes sur la délimitation du réservoir du Muschelkalk.

correspond à une alternance de bancs calcaires et d'interbancs marneux ou d'argilite calcaire, ces derniers diminuant d'épaisseur de la base au sommet en même temps que s'épaississent les bancs calcaires. Sur le plan cartographique, le caractère progressif du passage des Argiles de la Woëvre au Terrain à Chailles, et la localisation du passage dans le pied de la cuesta oxfordienne des côtes de Meuse, rendent difficile le dessin précis du contour géologique, et induisent donc une relative imprécision quant à la cote du mur de l'aquifère à l'affleurement ; les forages ayant atteint la base du Terrain à Chailles étant trop peu nombreux pour permettre une interpolation fiable de la base de l'aquifère. La complexification de la problématique a finalement alourdi la méthode employée pour modéliser le mur de l'aquifère :

- sélection de tous les forages ayant reconnu le mur de l'aquifère (à savoir le mur du Terrain à Chailles) ;
- sélection de tous les forages ayant reconnu le toit du Terrain à Chailles mais n'en n'ayant pas atteint le mur. Nouveau calcul de la cote du mur en soustrayant 40 mètres de terrain (épaisseur moyenne de cette formation d'après les notices des cartes géologiques à 1/50 000) ;
- calcul de l'épaisseur de l'aquifère par la différence entre la cote de son toit (cote du repère K) et celle de son mur (reconnue ou calculée) ;
- établissement d'une carte d'épaisseur de l'aquifère, uniquement dans l'enveloppe d'extension du toit de l'aquifère. Digitalisation des isovaleurs après vérification, correction des anomalies et lissage éventuel. Nouveau calcul de la cote du mur au droit des points digitalisés, par différence avec la cote du repère K. Obtention d'une base de points avec la cote du mur de l'aquifère ;

- à cette base de points, ont ensuite été ajoutées les cotes du mur de l'aquifère fournies par les forages situés dans la zone d'affleurement, et l'ensemble des points d'affleurement du mur de l'aquifère ;
- interpolation de la base complète pour réaliser la carte finale du mur de l'aquifère.

Ainsi des choix techniques ont dû être faits pour parvenir à modéliser correctement et le plus précisément possible la géométrie du système de réservoirs aquifères, notamment à cause des nombreuses variations latérales de faciès* que l'on retrouve sur les séries sédimentaires lorraines, comme l'illustre la figure suivante.

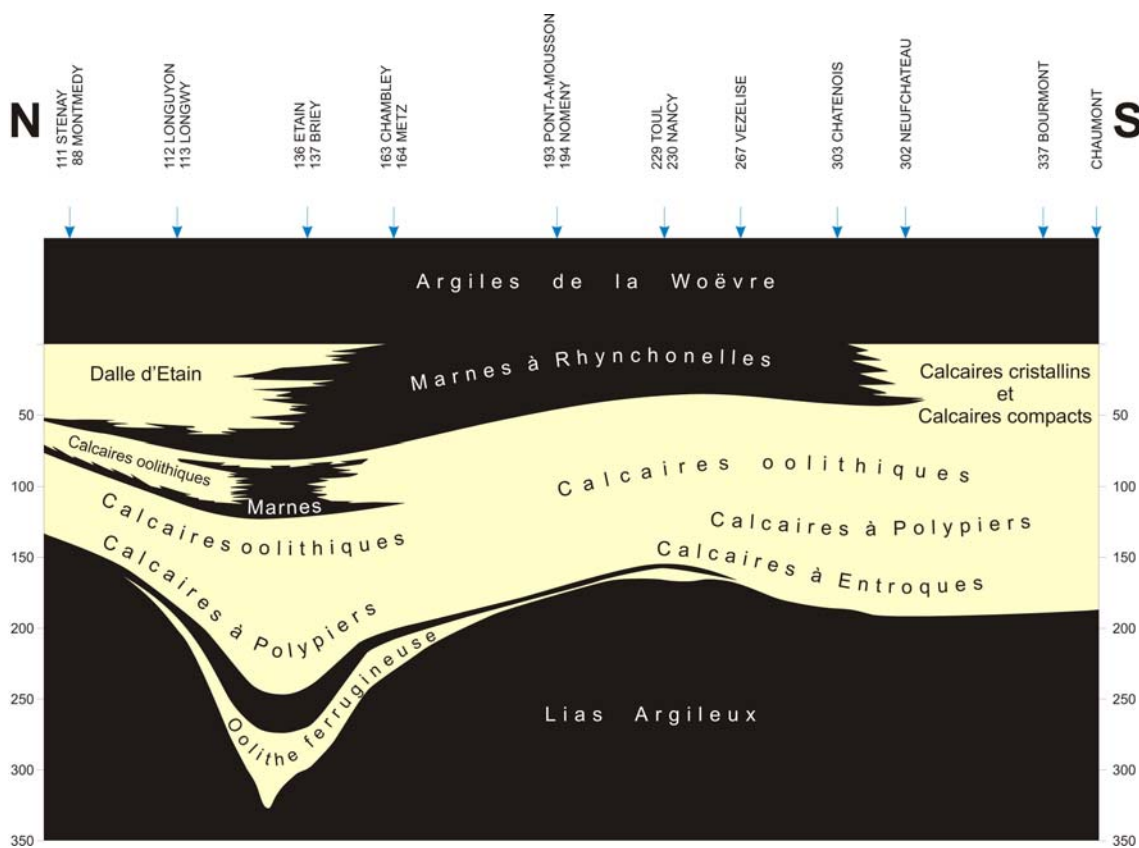


Illustration 11 : Exemple de variations latérales de faciès rencontrées en Lorraine.

2.4. MODULATION DE LA GEOMETRIE PAR LA PIEZOMETRIE

La modélisation géologique mise en œuvre a permis de déterminer de manière synthétique les altitudes des épontes des cinq réservoirs aquifères, en particulier du point de vue de leur précision. Dans les zones affleurantes des réservoirs, les interfaces modélisées ont été substituées par la piézométrie des nappes. En effet, ce n'est pas l'altitude du sol, qui correspond à l'éponte supérieure du réservoir (et de profondeur nulle), qui est à prendre en compte mais la profondeur à laquelle est effectivement rencontrée la nappe d'eau souterraine.

La figure schématique suivante illustre pour les cinq aquifères étudiés, le besoin de connaître la profondeur du toit du réservoir aquifère en zone sous couverture d'une part, et la profondeur de la nappe d'eau souterraine en zone d'affleurement d'autre part. En toute rigueur, il peut également exister une zone intermédiaire au droit de laquelle la nappe est située plus bas que le toit du réservoir, c'est-à-dire dans les secteurs où le réservoir est sous couverture et la nappe est libre. Cependant, il est difficile de délimiter ce dernier type de zone, dont l'extension est probablement faible.

Il s'agit, dans tous les cas, de profondeurs minimales à atteindre, car à la différence d'un piézomètre qui en principe n'est ouvert que sur une hauteur ponctuelle, le forage d'eau destiné à capter une nappe est crépiné sur une hauteur qui peut faire plusieurs dizaines de mètres.

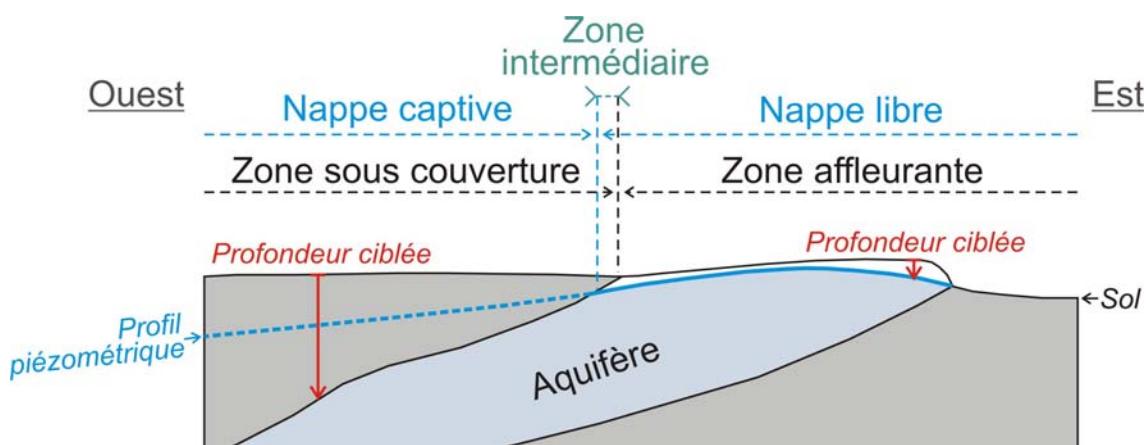


Illustration 12 : Profondeurs ciblées selon les zones des réservoirs.

2.5. RAPPEL SUR LES FORAGES D'EAU

L'illustration précédente met en évidence la différence fondamentale existant entre une nappe libre et une nappe captive : la surface piézométrique de cette dernière est supérieure au toit de l'aquifère, celui-ci étant recouvert par une formation géologique moins perméable que lui-même. Lorsque la surface piézométrique devient supérieure au sol, on dit que la nappe est artésienne. En complément, rappelons que pour capter une nappe captive, même si son niveau piézométrique est proche du sol, il faut cependant forer en profondeur jusqu'à atteindre le réservoir aquifère qui contient la nappe.

Ainsi, selon qu'une nappe est libre ou captive, le type de forage et d'équipement diffère. Les coupes techniques suivantes rappellent les grands principes et les règles de l'art de réalisation des forages d'eau.

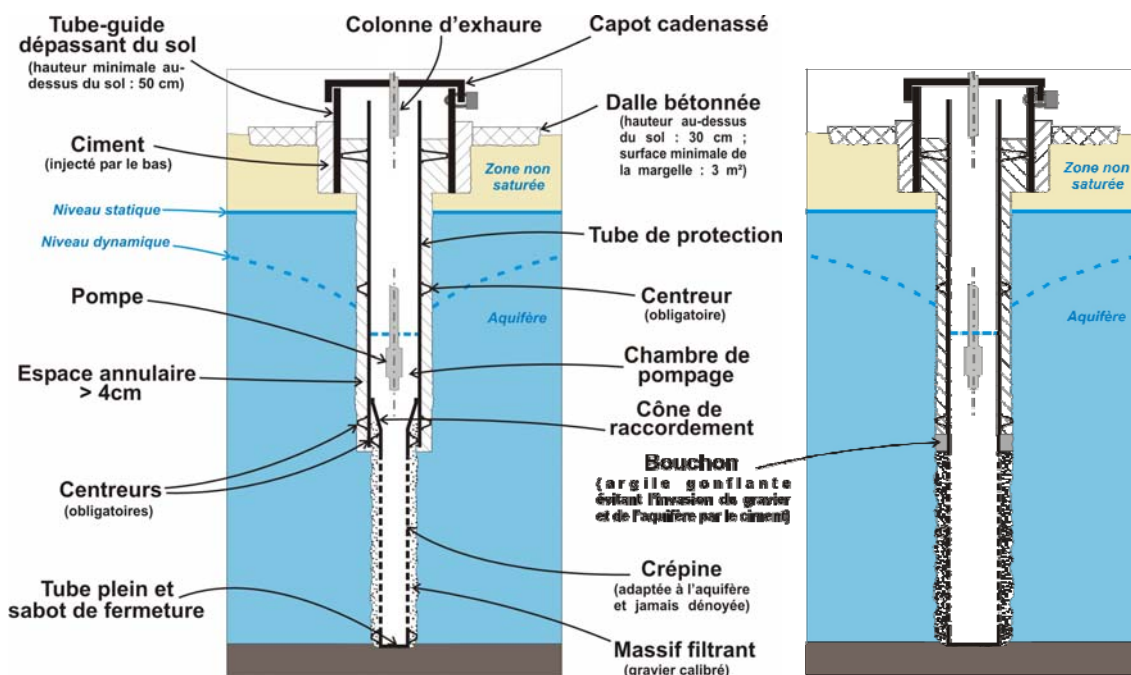


Illustration 13 : Forages d'eau en nappe libre.

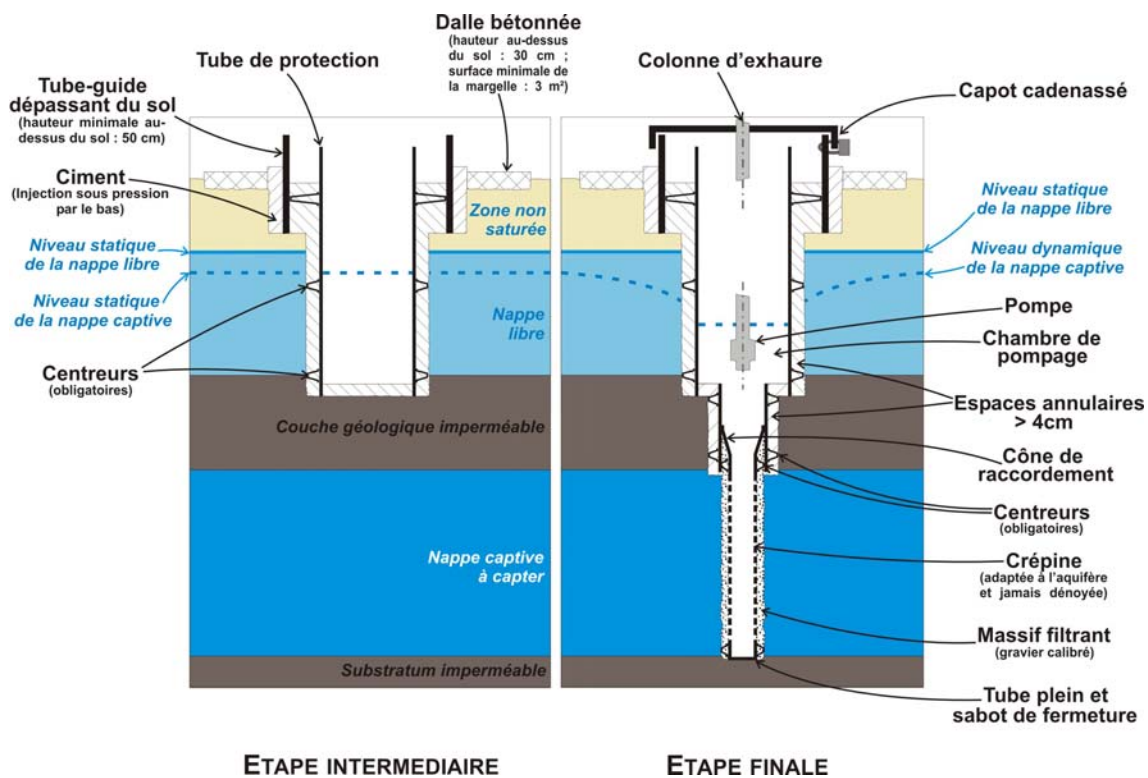


Illustration 14 : Forage en nappe captive (ouvrage télescopé réalisé en plusieurs étapes).

3. Caractérisation des aquifères

3.1. ACQUISITION DES DONNEES

Pour décrire les cinq aquifères étudiés ainsi que leurs nappes d'eau souterraines, nous avons entrepris de collecter, le plus largement possible, des données quantitatives et qualitatives. Les sources d'informations étaient la banque d'Accès aux Données des Eaux Souterraines (ADES), la Banque des données du Sous-Sol (BSS), l'« Inventaire Lorraine » 2003 de la qualité des eaux souterraines, le Réseau de Bassin des Eaux Souterraines (RBES) et les archives du BRGM. Plusieurs dizaines de milliers de données ont ainsi été récupérées, suivant les paramètres étudiés.

Le point de vue adopté pour caractériser les aquifères était de partir des informations brutes disponibles comme base de travail. Ainsi, pour les paramètres hydrogéologiques, plutôt que de compiler les résultats fournis dans la littérature par les différentes synthèses hydrogéologiques faites sur les départements, les régions, ou les bassins versants – *ce qui aurait eu pour conséquence de biaiser les statistiques et de créer une distorsion des informations* – il a été choisi de synthétiser des données ponctuelles existant pour chaque commune. Ces données ont par exemple été collectées dans des études de faisabilité ou d'aménagement de captages communaux d'alimentation en eau potable. Les informations qui ont ainsi été récupérées sont pour la plupart des données factuelles.

A titre d'exemple, plusieurs centaines de valeurs de paramètres hydrodynamiques ont été engrangées pour le réservoir aquifère de l'Oxfordien à l'issue de la première phase de sélection des données (illustration 15). Pour les cinq réservoirs, ce sont généralement les données de débits qui ont été collectées en plus grands nombres.

	Débits (m ³ /h)	Rabatement (m)	Débits spécifiques (m ³ /h/m)	Transmissivité (m ² /s)
Nombre de valeurs	405	159	101	47
Valeur minimum	9,2E-03	7,0E-02	1,6E-02	1,3E-04
Valeur maximum	501	71,6	848	0,5
Moyenne	51,3	4,5	59,5	9,5E-02
Ecart-type	85,4	8,6	126,5	1,2E-01
Coefficient de variation	1,67	1,89	2,13	1,23
Médiane	18,4	1,7	7,9	7,0E-02
1e quartile	6,0	0,8	2,8	1,0E-03
3e quartile	52,0	4,6	57,2	1,4E-01
Ecart interquartile	46	3,8	54,5	1,4E-01

Illustration 15 : Paramètres hydrodynamiques collectées pour l'Oxfordien.

Les couches du SIG, représentant les cinq aquifères lorrains traités dans le projet, ont ainsi pu être affectées d'attributs correspondant en particulier aux critères hydrogéologiques des réservoirs aquifères et aux caractéristiques hydrochimiques des nappes. Il s'agit d'informations numériques stockées dans une base de données. La retranscription des valeurs de ces attributs a pu être faite sous la forme de cartes présentées dans l'atlas, après un certain nombre de traitements des données.

3.2. APPROCHE ADOPTÉE POUR VALORISER LES DONNÉES

Afin d'illustrer le travail qui a été réalisé pour exploiter les données collectées, nous porterons notre attention sur les débits pompés dans les cinq nappes d'eau souterraines prises en compte dans l'atlas, puisqu'ils correspondent aux informations hydrodynamiques disponibles qui étaient les plus nombreuses. L'idée initiale de l'approche entreprise était que « *le facteur prépondérant pour initier un projet de PAC sur nappe est l'importance du débit qu'on peut soutirer à celle-ci* ». Ainsi, l'aide à la décision que peut apporter l'atlas des ressources énergétiques des principaux aquifères lorrains est une orientation sur la valeur du débit potentiel d'un prélèvement qui pourrait être fait dans une nappe d'eau souterraine donnée.

Pour parvenir à estimer de manière cartographique et continue les débits de pompage sur nappe, il est possible d'adopter une approche directe ou une approche indirecte. La première consiste à étudier directement les statistiques des données de débit et leur répartition spatiale. La seconde est d'estimer les débits de pompage en faisant appel à des formules de calcul comme celles de Dupuit ou de Jacob (voir ci-dessous), qui revêtent un formalisme relativement simple. Connaissant la répartition des valeurs de perméabilité ou de transmissivité, et considérant un rabattement donné, on peut parvenir à cartographier les débits de pompage. Cependant, ce type d'approche indirecte est fortement contraint par la précision des différents paramètres intervenant dans l'estimation. La précision des résultats étant donnée par un calcul différentiel des erreurs de ces paramètres, elle est en fin de compte plus élevée que celle qui pourrait être obtenue par une approche directe. Remarquons toutefois que l'approche cartographique indirecte peut être réalisée avec succès dans le cadre de la mise en place de modèles hydrodynamiques de calculs. Mais la mise en œuvre de tels modèles correspondrait à une approche très lourde qui dépasserait largement le cadre de la réalisation de l'atlas géothermique.

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \cdot \log \frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$

(Formule de Jacob)

avec : s, le rabattement à la distance r de l'axe du forage
Q, le débit de pompage
T, la transmissivité de la nappe
t, la durée de pompage
r, la distance au forage du point considéré
S, le coefficient d'emménagement de la nappe

Par le passé, la cartographie des débits de pompage sur les nappes d'eau souterraine a aussi été faite en réalisant des zonages manuels autour des données recueillies. Les outils théoriques et les développements numériques permettent maintenant de réaliser des cartographies plus élaborées et plus objectives.

Il est donc souvent préférable d'entreprendre une étude statistique des données, en privilégiant le plus possible les interpolations des valeurs disponibles par krigeage*. Cela permet d'appréhender la dualité de l'aspect aléatoire et structurée du phénomène étudié. L'approche géostatistique a par ailleurs l'avantage de permettre de quantifier l'erreur de l'estimation du débit. La répartition spatiale des données, appelée structure, est étudiée en analysant la corrélation des données entre elles, selon leur éloignement les unes des autres ou interdistance (h). Celle-ci est faite à partir de l'analyse du variogramme expérimental $\gamma(h)$, calculé selon la formule présentée ci-dessous.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{N(h)}$$

(Variogramme expérimental)

$\gamma(h)$, variogramme à la distance h
 $Z(x_i)$, valeur mesurée au point x_i
 avec : $Z(x_i + h)$, valeur mesurée au point $x_i + h$
 h distance entre x_i et $x_i + h$
 $N(h)$, nombre de couples de points distants de h

Des exemples de traitement des données collectées sont présentés ci-après. Ils correspondent, pour chacun des cinq réservoirs aquifères, à des paramètres différents permettant d'illustrer la variété des informations qui ont été étudiées.

3.3. EXEMPLES DE TRAITEMENT DES DONNEES

3.3.1. Exemple des débits du réservoir du Tithonien

Lors de la collecte des données de débit pour le réservoir du Tithonien, comme pour tous les autres aquifères, un premier type de sélection des données a été fait. Il s'agissait de sélectionner les données rattachables à un ouvrage géoréférencé et déclaré en BSS, et pour lequel l'aquifère capté était bien identifié. La nature des données disponibles étant très variée, il n'a pas été possible de différencier les débits, sauf à risquer de ne disposer que de populations réduites pour tel ou tel type de débit. Les données rassemblées étaient ainsi des débits d'exploitation, des débits maximums, des débits minimums, des débits d'étiage, des débits moyens, des débits potentiels, des débits d'essais par pompage, des débits de sources, des débits de forages, des débits sans indication, des débits majoritairement non synchrones, etc.

Une analyse critique de ces données a été menée afin d'écarter celles aberrantes ou de les corriger (vérification de leurs coordonnées géographiques, nouvelle vérification de l'aquifère sollicité, de la valeur du débit, ...). La distribution des débits du Tithonien selon des classes est précisée sur la partie gauche de l'illustration 16. Le variogramme expérimental de toutes les données, présenté sur la partie droite de l'illustration 16, est omnidirectionnel* étant donné le peu de couples de points utilisables pour les calculs.

Afin de limiter le caractère erratique du variogramme expérimental, celui-ci a par la suite été calculé avec les données de débits inférieures à $35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (illustration 17). Son comportement erratique est cependant resté bien marqué. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un débit est, par nature, une variable qui se prête mal à la cartographie. En effet, un débit de pompage n'est pas une propriété totalement intrinsèque à un aquifère : elle reflète à la fois les propriétés physiques de l'aquifère (caractéristiques hydrodynamiques), mais aussi des critères techniques (méthode de foration, géométrie et développement de l'ouvrage d'eau, savoir faire en matière de réalisation de forage), voire des facteurs socio-économiques (densité de population, coûts, conjoncture économique).

Un modèle de variogramme a été ajusté sur le variogramme expérimental calculé à partir des données de débits inférieures à $35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. L'ajustement convenable des paramètres retenu pour estimer les débits de pompage dans le réservoir du Tithonien est présenté sur l'illustration 17 (courbe rouge).

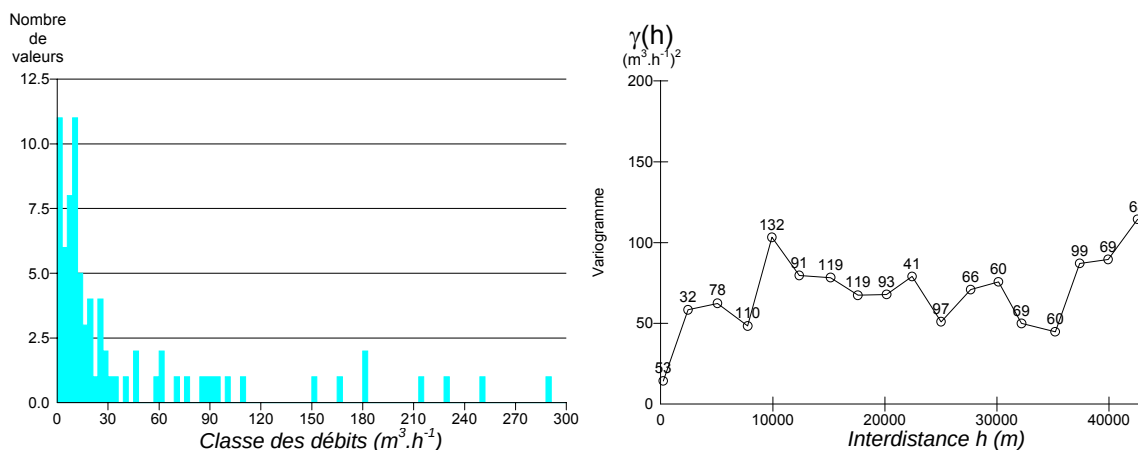


Illustration 16 : Histogramme des débits disponibles pour le Tithonien et variogramme expérimental obtenu.

Effet de pépite : 10

1^{er} modèle sphérique
(palier : 25 ; portée : 3 000)

2^{ème} modèle gaussien
(palier : 35 ; portée : 6 000)

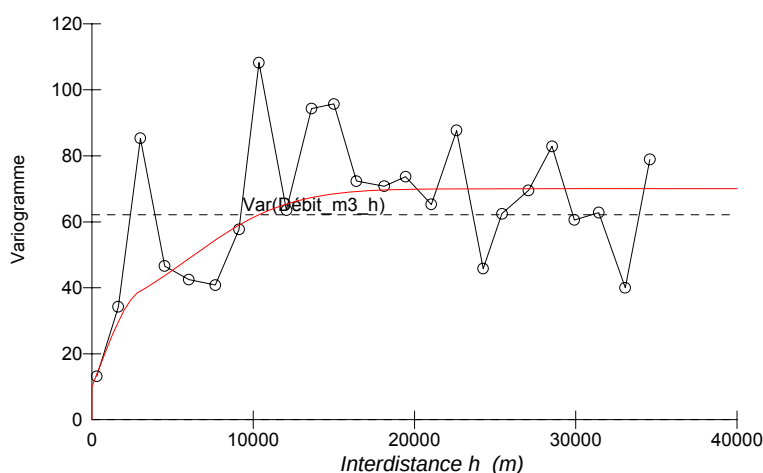


Illustration 17 : Modèle de variogramme utilisé pour modéliser les débits du Tithonien.

L'utilisation d'un effet de pépite de $10 \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1})^2$ dans le modèle de variogramme peut largement se justifier. Il correspond effectivement à une erreur de mesure de débit égale à la racine carrée de cette valeur, soit à environ $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Une telle erreur, et même davantage, se retrouve sur une courbe caractéristique de pompe. Pour l'exemple de l'illustration 18, on constate que les meilleurs rendements de la pompe sont en regard d'une importante plage de variation de débit et de hauteur manométrique. En d'autres termes, cela signifie qu'au cours d'un cycle de pompage dans un forage d'eau, le débit de pompage peut évoluer significativement et entraîner une erreur de mesure supérieure à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

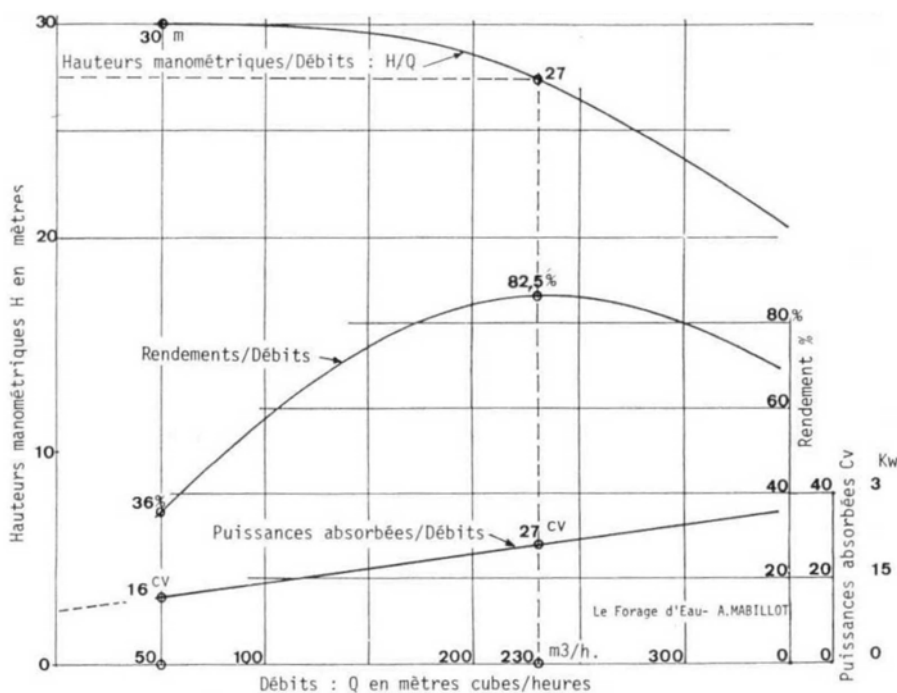


Illustration 18 : Courbes caractéristiques d'une pompe (d'après Mabillot, 1971).

L'estimation des débits avec ce modèle théorique à deux structures (sphérique et gaussienne) a été faite sur la population des débits inférieurs à $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. En effet, le réservoir du Tithonien correspond à une formation carbonatée dotée d'une fissuration, mais qui est également karstifiée* comme en rendent compte les débits importants de plusieurs centaines de $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ qui peuvent y être prélevés. La délimitation des zones karstiques des calcaires est difficile à appréhender dans la mesure où la karstification est par nature discontinue : le milieu karstique est hétérogène quelle que soit l'échelle. La notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour caractériser en moyenne un aquifère devient de ce fait inadaptée ; le VER d'un aquifère karstique étant de dimension extrêmement importante, allant jusqu'à correspondre à la formation aquifère en entier.

La localisation ponctuelle d'indices karstiques (dolines, avens, conduits karstiques, ...) peut toutefois être reportée, comme sur l'illustration 19 où les cavités naturelles recensées dans le secteur sud-ouest du plateau du Barrois sont représentées par des

étoiles jaunes. L'étude des processus de karstification (Jaillet, 1999) a aussi permis de dresser, pour le département de la Meuse, une carte de la sensibilité à la karstification des calcaires du Tithonien. Il s'agit de la délimitation des zones à forte karstification potentielle (Vaute *et al.*, 2005 ; voir par la suite l'illustration 21). Elles ont été déterminées en considérant qu'elles s'étendaient jusqu'à une distance de 10 kilomètres (vers l'Est), au-delà du contact lithostratigraphique qui existe entre les calcaires du Tithonien et les terrains plus récents qui les recouvrent. Elles englobent l'ensemble des indices karstiques inventoriés dans ces calcaires.

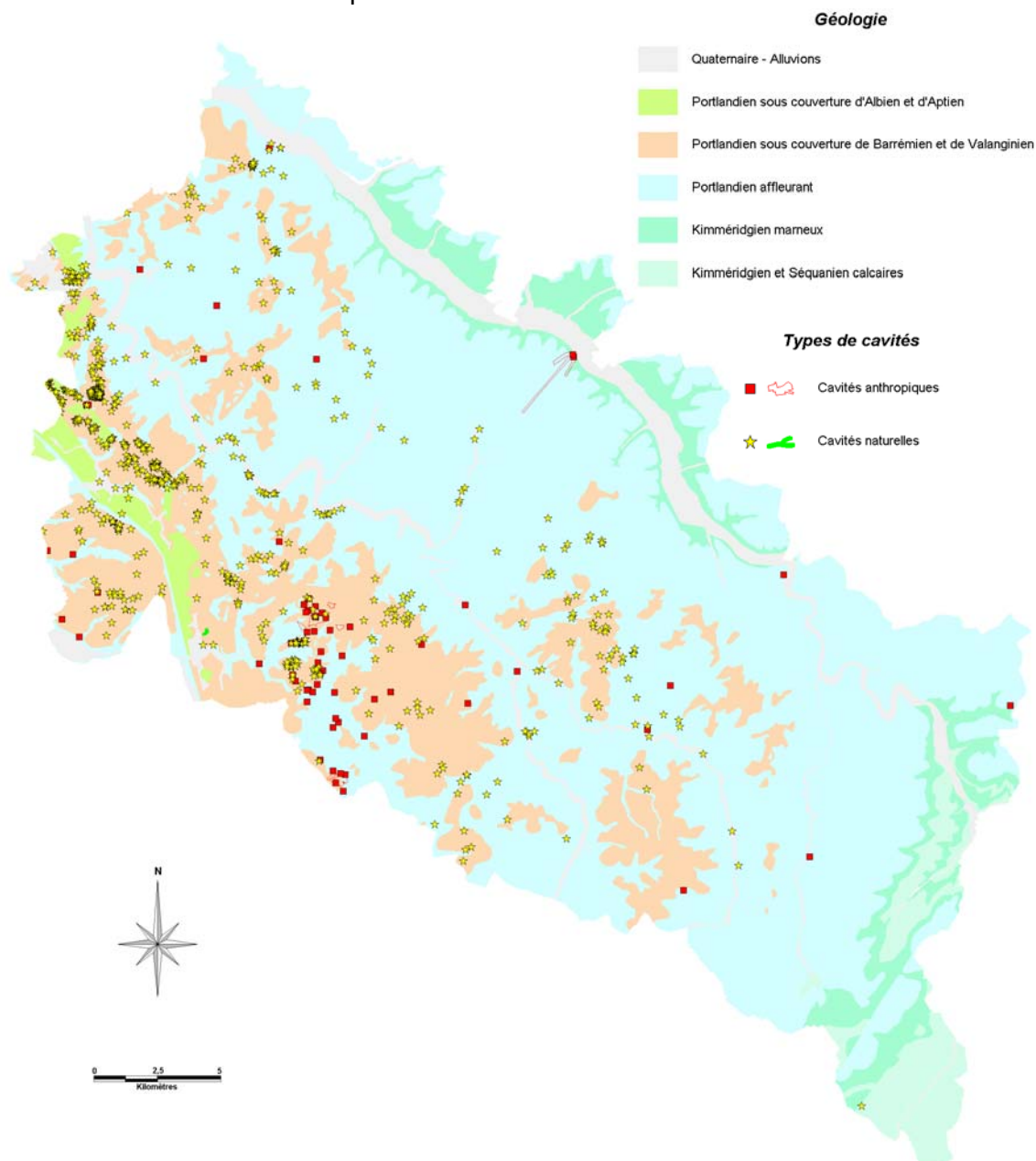


Illustration 19 : Cavités souterraines inventoriées dans le Sud-Ouest du plateau du Barrois et affectant le Tithonien (Fischer *et al.*, 2005).

Les aquifères carbonatés sont classiquement définis comme des milieux à double porosité et double perméabilité. A une échelle très fine, il est possible de visualiser les pores au travers desquels l'eau peut circuler, par exemple entre les grains d'un calcaire oolithique (illustration 20 de gauche). La perméabilité de matrice du milieu correspondant est généralement faible à médiocre. A une échelle plus large (illustration 20 du centre), interviennent les fissures de la formation géologique, dont les perméabilités directionnelles sont beaucoup plus importantes que la perméabilité de matrice.

Dans l'étude du comportement hydrodynamique d'un aquifère karstique on retrouve ces deux échelles d'observation, avec la porosité inter-granulaire et l'ouverture des fissures dans lesquelles l'eau peut circuler. A plus vaste échelle (illustration 20 de droite), il est possible d'observer des conduits karstiques. La notion de perméabilité n'intervient plus pour ces conduits, puisqu'ils peuvent être le siège d'écoulements turbulents.

Tous ces vides ou ouvertures observables à différentes échelles dans la roche sont en relation les uns avec les autres de manière hiérarchique. L'eau de la porosité matricielle contribue à alimenter la fissuration, qui elle-même alimente le réseau karstique. Mais c'est probablement la fissuration qui permet d'obtenir le plus fréquemment des débits de prélèvement significatifs. Ce sont manifestement ces débits induits par la fissuration qui peuvent être cartographiés de la manière la plus régulière. Ils pourraient atteindre environ une centaine de $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. De fait, tous les essais d'estimation cartographique des débits du Tithonien, à partir des données factuelles dont les valeurs étaient supérieures à $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, n'ont pas abouti.

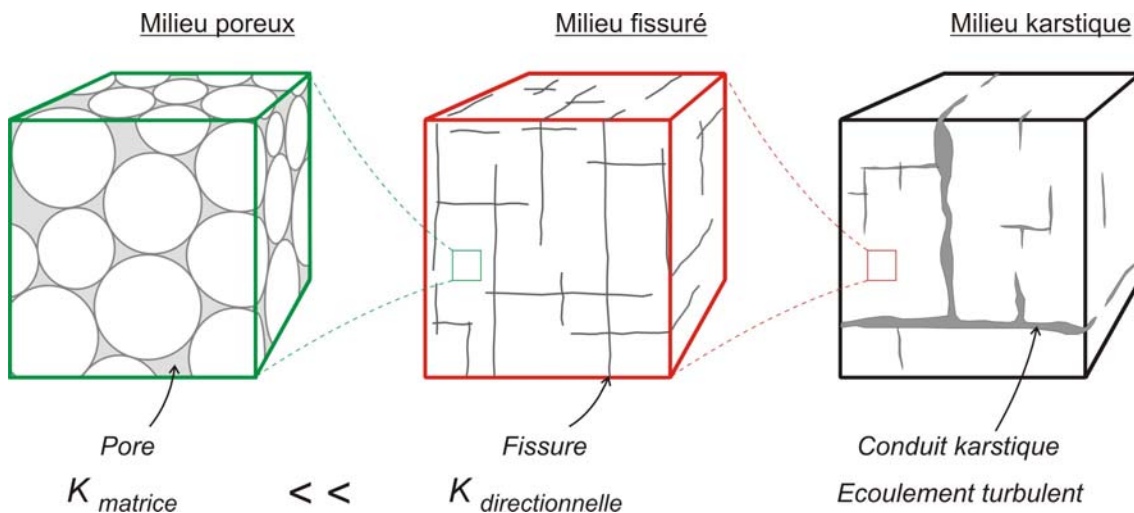


Illustration 20 : Blocs diagrammes conceptuels de la structure d'un milieu carbonaté.

La méthode d'interpolation et les choix et hypothèses qu'elle a nécessités ayant été précisés, il est finalement possible de présenter la carte de l'estimation des débits du Tithonien, calculée pour les données inférieures à $110 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ (illustration 21). La délimitation des zones à forte karstification potentielle dans les calcaires du Tithonien n'est que partiellement intéressante étant donné que celles-ci recouvrent la majorité de l'aquifère. On constate que les quelques données de débits supérieures $110 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ inventoriées (points roses) sont bien situées dans les zones à forte karstification potentielle. Les résultats obtenus pour les quatre autres réservoirs sont présentés dans l'annexe 3.

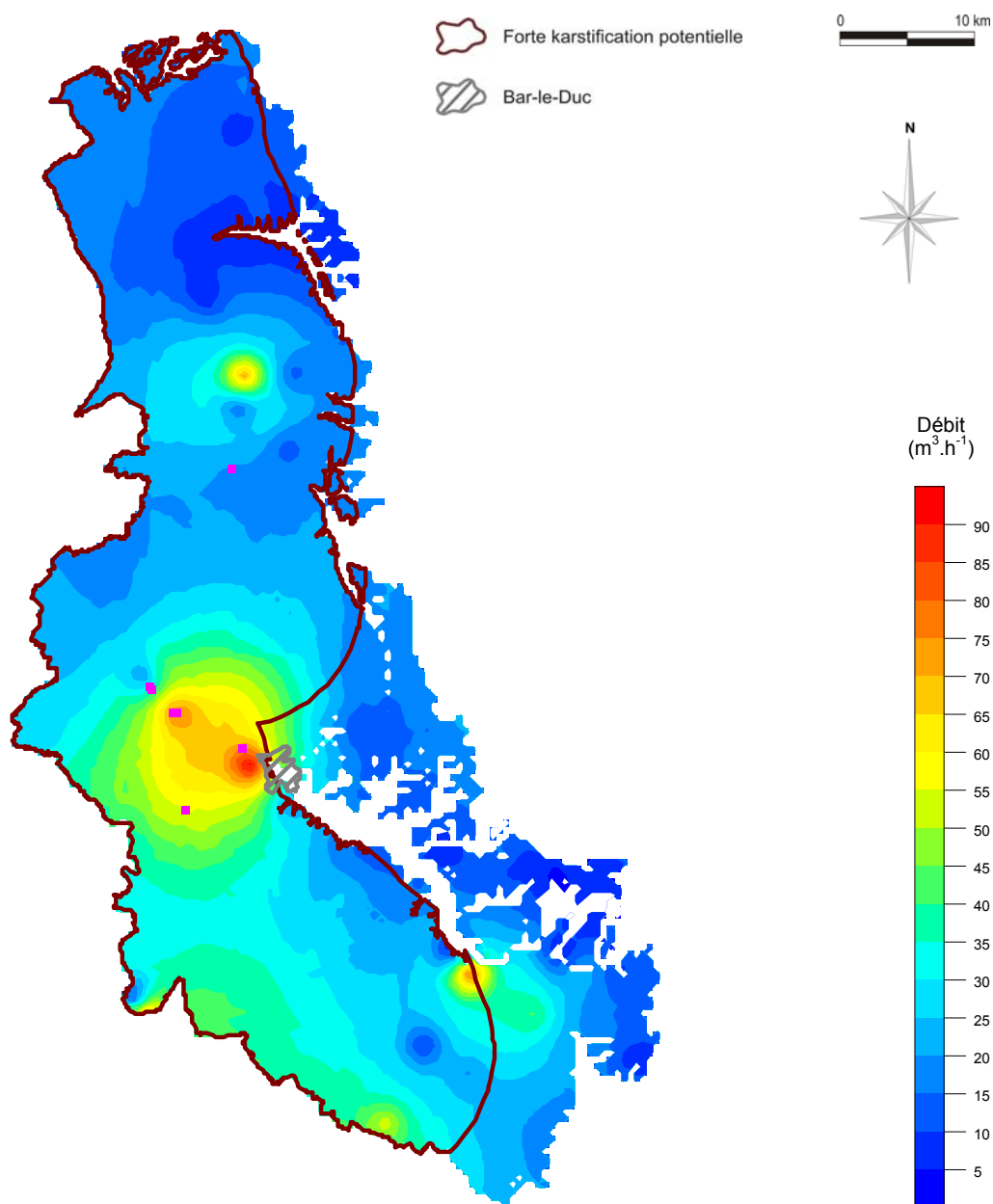


Illustration 21 : Carte des débits du Tithonien.

3.3.2. Exemple de la température pour l'Oxfordien

Parmi les critères à prendre en compte dans le cadre d'un projet de réalisation de PAC sur nappe, la température de l'eau est à étudier. Son élévation est un facteur favorable à l'entreprise d'un projet. Une approche géostatistique a donc également été mise en œuvre afin d'interpoler les données de température disponibles.

La distribution des températures de l'eau dans la nappe de l'Oxfordien est présentée selon des classes sur l'histogramme de l'illustration 22 de gauche. La distribution des températures est globalement de type normal, laissant supposer l'existence d'une structure spatiale plus nette que celles observées pour les variables des débits.

Le graphique de la fonction variogramme calculée pour les températures dans la nappe oxfordienne est présenté sur l'illustration 22 de droite. Il apparaît que le variogramme expérimental est bien structuré. Une structure relativement triviale a été ajustée à ce variogramme expérimental. Il s'agit d'un modèle sphérique, avec un palier de $1,0\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$ et une portée de 4 000 mètres. Un effet de pépite $0,45\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$ a été pris en compte.

Les résultats de l'estimation par krigeage des températures sont présentés sur l'illustration 19. L'allure de la carte des températures estimées est correcte, même s'il existe quelques artéfacts d'interpolation qui sont visibles dans les secteurs où il y a peu de données. Ces artéfacts visuels, fréquemment rencontrés lors d'interpolations, n'ont pu être éliminés quels que soient les méthodes utilisées et les voisinages d'interpolation employés. Les températures obtenues vont de $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec un écart-type de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

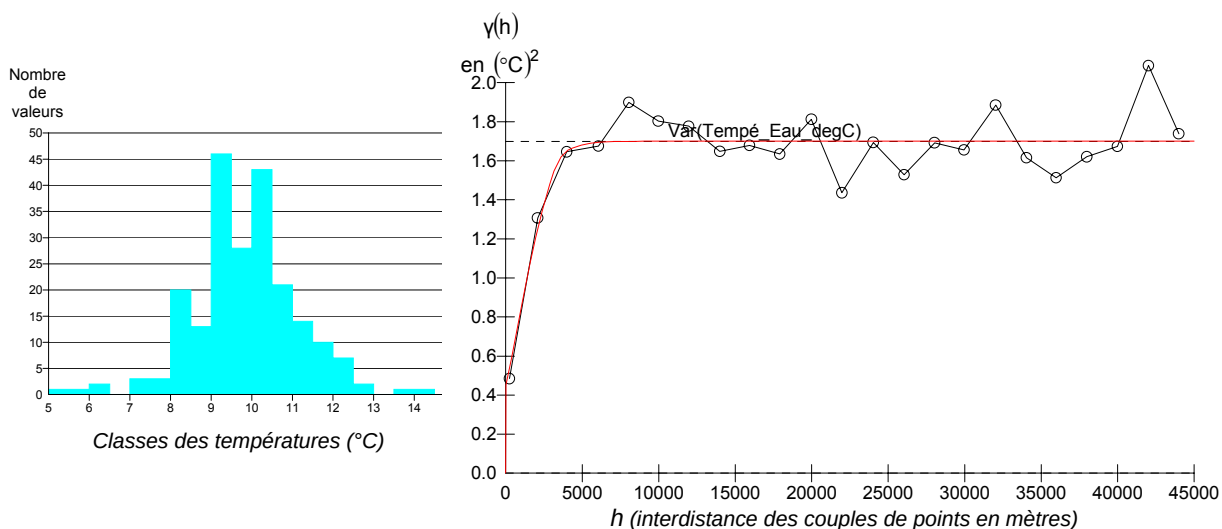


Illustration 22 : Étude géostatistique de la température de l'eau dans la nappe de l'Oxfordien.

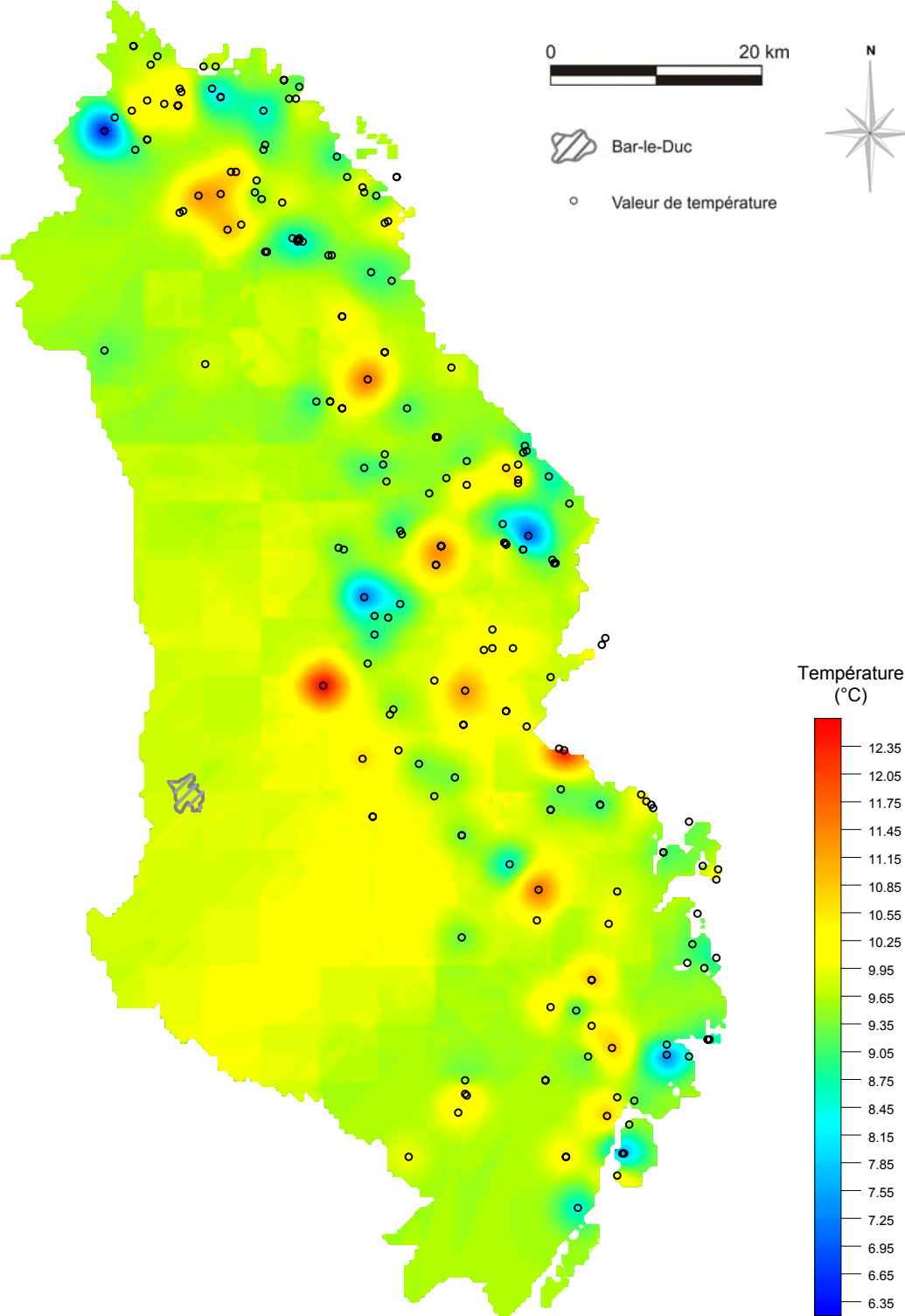


Illustration 23 : Résultats des températures interpolées pour l'Oxfordien.

3.3.3. Exemple du chlorure pour le Dogger

A contrario des deux paramètres précédents de l'aquifère du Tithonien et de la nappe de l'Oxfordien, dont les importances sont favorables à l'entreprise d'un projet de pompe à chaleur sur nappe, les autres caractéristiques des eaux souterraines qui sont aussi à prendre en compte ont des influences défavorables. Le premier cas présenté pour la nappe du Dogger concerne le chlorure. L'augmentation des concentrations en chlorure tend à rendre les eaux souterraines corrosives, pouvant générer un surcoût d'investissement et d'exploitation.

La distribution des concentrations en chlorure dans la nappe du Dogger est plurimodale (voir l'histogramme de l'illustration 24 en bas à gauche). La majorité des valeurs de concentration sont inférieures à 50 mg.L^{-1} . Les cinq valeurs supérieures à ce seuil de concentration ont pour incidence de déstructurer spatialement l'ensemble des données, comme en témoigne l'analyse variographique. En effet, le variogramme expérimental calculé avec toutes les données disponibles est erratique (illustration 24 en haut à gauche). Il en est de même en omettant les valeurs relatives aux bassins ferrifères lorrains et qui pourraient caractériser des épiphénomènes (illustration 24 en haut à droite). Pour les populations de données dont les valeurs sont inférieures au seuil de 50 mg.L^{-1} , il est possible d'ajuster au variogramme expérimental un modèle (courbe rouge sur l'illustration 24 en bas à droite). Il s'agit d'une structure gaussienne, avec un palier de $50 (\text{mg.L}^{-1})^2$ et une portée de 10 000 mètres. Un effet de pépité de $45 (\text{mg.L}^{-1})^2$ a été pris en compte.

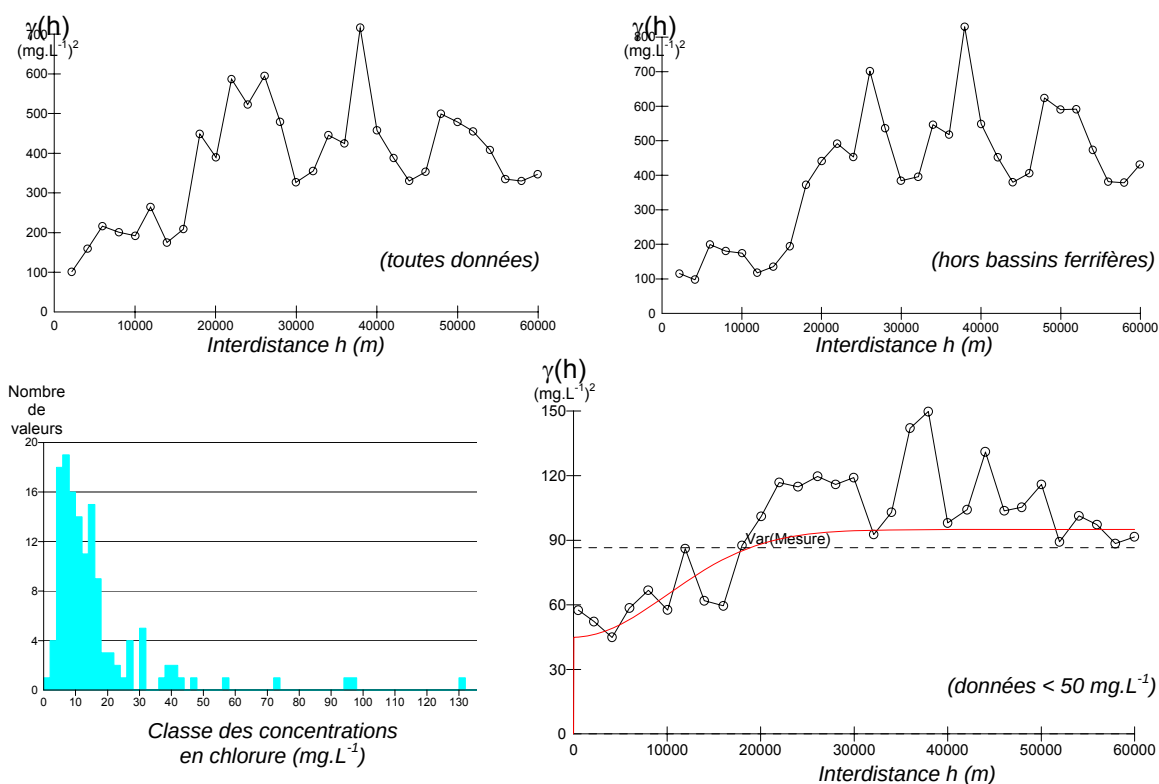


Illustration 24 : Distribution des concentrations en chlorure et variogrammes pour le Dogger.

La variabilité spatiale des concentrations en chlorure calculées dans la nappe du Dogger est présentée sur l'illustration 25 ci-dessous. Le krigeage a été fait sur les données inférieures à 50 mg.L^{-1} . Les quelques valeurs de concentration supérieures à ce seuil entraînent effectivement un biais en surestimant l'estimation. Les cinq données de concentrations supérieures à 50 mg.L^{-1} sont néanmoins repérées sur la carte des estimations afin de relativiser l'interpolation. Là aussi, quelques artéfacts visuels existent parfois dans les zones pauvres en données.

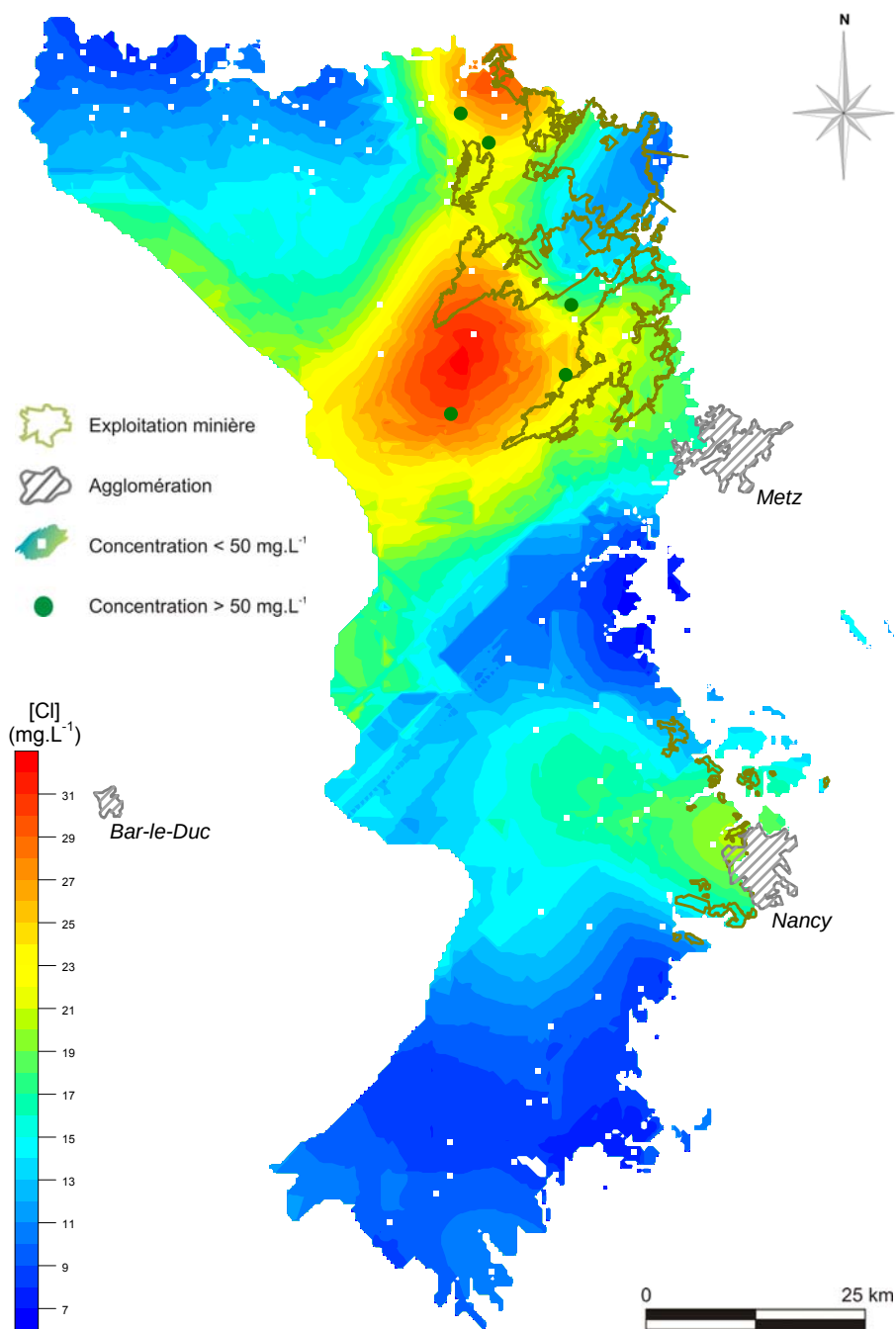


Illustration 25 : Carte du chlorure dans la nappe du Dogger.

3.3.4. Exemple du sulfate pour le Muschelkalk

Le sulfate est un paramètre à considérer du fait qu'en concentration importante dans les eaux souterraines, il peut être à l'origine du développement de bactéries qui vont dégrader les équipements et les garnitures des forages d'eau.

La distribution des concentrations en sulfate dans la nappe d'eau souterraine du Muschelkalk est précisée sur l'histogramme de l'illustration 26 de gauche. L'étude géostatistique des données montre que la concentration en sulfate dans les eaux de l'aquifère du Muschelkalk n'est pas une variable régionalisée, comme d'ailleurs tous les autres paramètres pris en compte pour cet aquifère. Les variogrammes expérimentaux calculés présentent un effet de pépite pur, quelles que soient les populations de concentration étudiées. L'illustration 26 de droite indique les résultats des calculs obtenus avec l'ensemble des données de concentration disponibles. Avec des populations correspondant à des concentrations inférieures à un certain seuil, les résultats sont similaires. Quant à la focalisation de l'étude sur certaines zones géographiques uniquement, l'analyse variographique souffre d'un nombre de données trop restreint et n'est pas probante.

La particularité du Muschelkalk est due à la répartition géographique des données, qui sont disposées selon une zone étroite et étirée en forme de croissant. Toutes les données disponibles pour l'aquifère du Muschelkalk et sa nappe ne correspondent qu'à la partie affleurante de l'aquifère. Ainsi il n'apparaît aucune structure exploitable pour réaliser l'interpolation. Seule une approche statistique classique est envisageable pour caractériser le réservoir du Muschelkalk.

Ainsi, pour la nappe du Muschelkalk, la concentration moyenne en sulfate est de $69,4 \text{ mg.L}^{-1}$, avec un écart-type de $97,0 \text{ mg.L}^{-1}$. Les valeurs des concentrations sont comprises entre $4,9$ et 380 mg.L^{-1} .

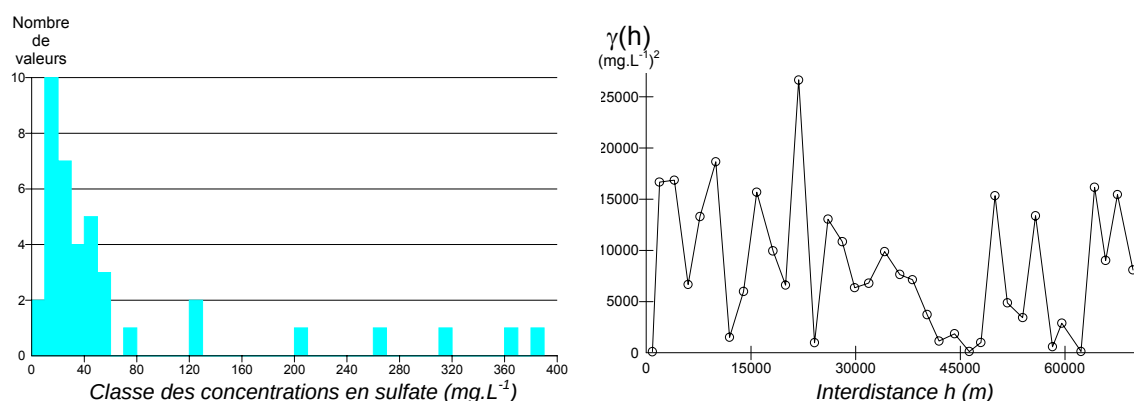


Illustration 26 : Analyse géostatistique du sulfate en solution dans la nappe du Muschelkalk.

3.3.5. Exemple de la dureté pour le Buntsandstein

Le dernier paramètre présenté, comme exemple d'information traitée pour caractériser les nappes et les réservoirs aquifères, est la dureté de l'eau de la nappe du Buntsandstein. La dureté rend compte de l'importance des concentrations en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Son importance peut occasionner un entartrage du forage et de l'installation géothermique.

La distribution des données de dureté disponibles est présentée sur l'illustration 27 de gauche. L'histogramme est plurimodal. Néanmoins, il est possible d'appréhender simultanément la variabilité spatiale des données de toutes les populations, avec un résultat satisfaisant. Le variogramme expérimental calculé à partir de toutes les données est reporté sur l'illustration 27 de droite.

Deux structures ont été ajustées au variogramme expérimental. Il s'agit d'un modèle cubique avec un palier de $33 (\text{°F})^2$ et une portée de 6 000 mètres, et d'un modèle gaussien avec un palier de $28 (\text{°F})^2$ et une portée de 10 000 mètres. Une dérive d'ordre 1 et un effet de pépite de $2 (\text{°F})^2$ sont pris en compte.

L'illustration 28 présente la cartographie de la dureté des eaux de l'aquifère du Buntsandstein, calculée par krigeage à partir de ce modèle théorique de variogramme. L'estimation de la dureté a été automatiquement limitée dans la partie nord-ouest de la Lorraine à cause de l'absence de données factuelles sur la dureté des eaux souterraines. Cela étant, cette zone correspond à un secteur où le réservoir aquifère des grès du Trias inférieur (GTI) est rencontré le plus souvent à plus de 600 mètres de profondeur, ce qui réduit son accessibilité. Dans les zones pauvres en données, on retrouve les artéfacts habituels sur la carte des estimations. En limite sud-est de la carte, en dehors de la région lorraine, les données de dureté sont en revanche nombreuses. Elles correspondent à la partie affleurante de la nappe. Elles ont été utilisées dans l'analyse géostatistique puisqu'elles apportaient un surcroît d'informations sur la répartition spatiale des données de dureté dans la nappe des GTI.

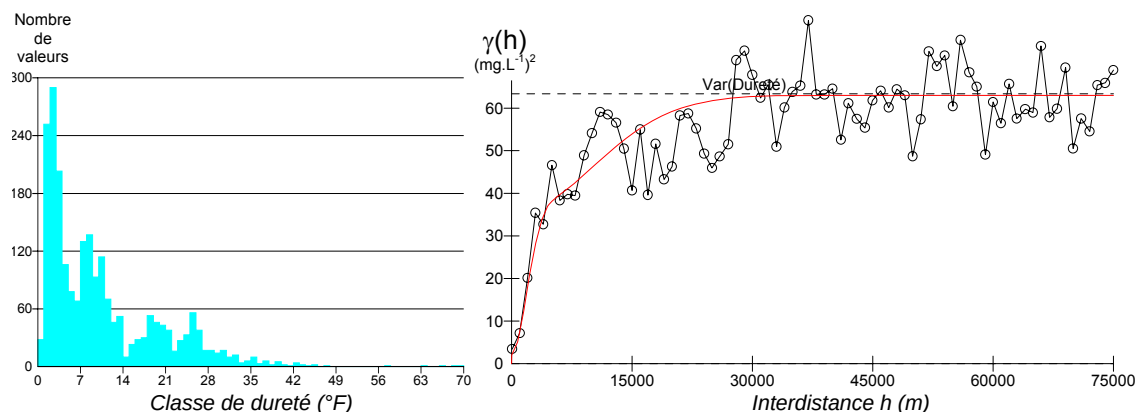


Illustration 27 : Analyse géostatistique de la dureté des eaux du Buntsandstein.

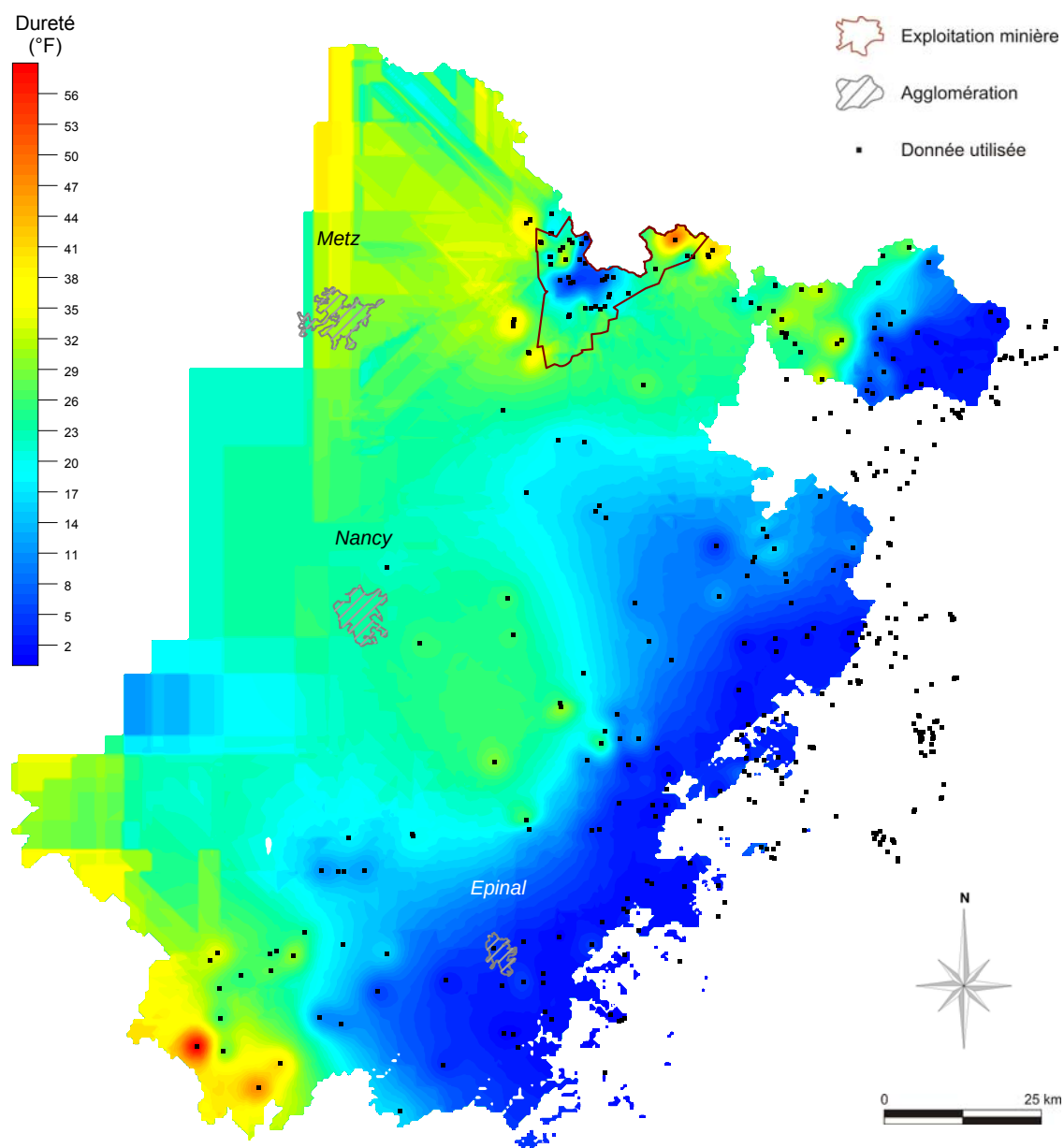


Illustration 28 : Cartographie de la dureté des eaux de la nappe des GTI.

4. Potentiel d'exploitation

4.1. PRINCIPE DU CALCUL

Les différents exemples présentés illustrent la variété des paramètres permettant de caractériser les aquifères et leurs nappes d'eau souterraine. Le potentiel d'exploitation par pompe à chaleur sur chacune des cinq nappes peut être évalué en combinant tous les paramètres qui sont relatifs à la nappe. Ce type d'évaluation cartographique, effectuée par l'intermédiaire d'un système d'informations géographiques, est désigné usuellement par les termes d'analyse multicritère. Dans cette approche, les critères sont pondérés, puis combinés selon une loi additive.

L'idée déjà entrevue est que certains de ces paramètres sont favorables à la réalisation d'un projet de PAC sur nappe. Ils peuvent être vus comme des « bénéfiques ». C'est avant tout le débit soutirable à la nappe d'eau souterraine. La température de l'eau de la nappe joue également un rôle intéressant dans un projet vis-à-vis du coefficient de performance de la pompe à chaleur (COP PAC). Toutefois, en géothermie très basse énergie, la température de l'eau reste un paramètre moins influant que les débits de prélèvement dans la nappe. Les températures des eaux souterraines sont en effet relativement faibles, n'atteignant 30 °C qu'en profondeur dans la nappe des grès du Trias inférieur.

Inversement, les autres paramètres peuvent être défavorables à la réalisation d'un projet de PAC sur nappe. Ils sont rangés du côté des « déficits ». Celui le plus influant est l'accessibilité à la ressource en eau, c'est-à-dire à la proximité de la ressource par rapport au sol. C'est en fait la profondeur de l'aquifère ou de la nappe d'eau souterraine, selon que le projet est situé en zone de recouvrement ou affleurante de l'aquifère. Cette distance se traduit directement en coût d'investissement. La qualité des eaux souterraines intervient secondairement. Sa dégradation peut entraîner un encroûtement ou un entartrage du forage d'eau. Une minéralisation excessive des eaux souterraines peut aussi nécessiter un traitement de l'eau pour préserver l'installation géothermique.

Le principe de base qui a été retenu dans l'approche multicritère était de pouvoir comparer les résultats d'exploitabilité des réservoirs aquifères entre eux, afin de fournir une orientation sur les potentialités d'exploitation valable à l'échelle de toute la Lorraine. Une première normalisation a été effectuée pour chaque paramètre étudié, en divisant le champ de ses valeurs interpolées par la valeur maximale estimée de ce paramètre pour tous les aquifères confondus. Cela permettait de comparer très facilement les paramètres acquis entre différentes nappes, et aussi de rendre les paramètres adimensionnels. Par exemple, pour le Dogger, dont les débits estimés sont les plus importants, les débits normés atteignaient la valeur de 1, tandis que pour le Muschelkalk, dont les débits estimés sont les plus faibles, les débits normés avaient au plus la valeur de 0,066. Une exception a été prise pour la profondeur de la ressource.

La normalisation a été faite par la profondeur maximale du Muschelkalk, qui représente environ le quart de la profondeur maximale de la ressource du Buntsandstein. Cette dernière étant effectivement supérieure à 2 000 mètres, son utilisation aurait eu pour effet d'écraser les profondeurs des autres aquifères, en particulier celle du Tithonien qui est très réduite (ressource subaffleurante).

La pondération a été faite en affectant aux paramètres normés des facteurs d'influence ou poids différents en fonction de leur nature. Pour les paramètres qui correspondent à un bénéfice, le poids était positif ; pour les paramètres qui correspondent à un déficit, le poids était négatif. Par ailleurs, selon que les paramètres ont une petite ou une grande influence sur la faisabilité d'un projet, nous leur avons affecté un poids dans un rapport de un à quatre (20/80 % d'influence). Les paramètres normés et pondérés ont été additionnés, en séparant les positifs, des négatifs. Ceci a permis d'obtenir pour chaque nappe, d'une part un critère d'exploitabilité positif, et d'autre part un critère d'exploitabilité négatif.

Ces critères ont à leur tour été normés par les valeurs maximales obtenues pour chacun des signes, et en les multipliant tous par cinq (multiplication des valeurs pour améliorer la lisibilité des résultats). De ce fait, dans les cas extrêmes, le critère de bénéfice a atteint la valeur de + 5, et à l'inverse le critère de déficit a atteint la valeur la plus basse de - 5 (sauf pour le Buntsandstein, pour lequel le critère de déficit a atteint la valeur de - 20). Enfin, les deux critères d'exploitabilité de signes opposés ont été additionnés. De sorte que le résultat final du potentiel d'exploitation des nappes lorraines par des pompes à chaleur s'est étalé sur une échelle théorique de dix unités, centrée sur la valeur zéro.

En résumé, le principe qui a été adopté pour pondérer et combiner les paramètres caractérisant les aquifères et leurs nappes a été le suivant :

Bénéfice (+) ➤ Débit : poids global de + 40 %

➤ Température de l'eau : poids global de + 10 %

Déficit (-) ➤ Profondeur de la ressource : poids global de - 40 %

➤ Hydrochimie (eau corrosive, incrustante, ...) : poids global de - 10 %

4.2. EVALUATION DU POTENTIEL D'EXPLOITATION

Les résultats de l'évaluation du potentiel d'exploitation sont présentés pour chacune des cinq nappes étudiées sur la région lorraine, sur les illustrations 29 à 34. Pour la nappe du Buntsandstein, pour laquelle la profondeur importante de la ressource peut diminuer considérablement le potentiel d'exploitation, les résultats sont présentés deux fois. Sur l'illustration 33, la palette de couleurs de l'échelle des valeurs est identique à celles des quatre illustrations qui la précèdent et qui concernent les quatre autres nappes. Pour l'illustration 34, un autre nuancier de couleur a été utilisé pour permettre de distinguer les résultats du potentiel d'exploitation les plus faibles, à l'Ouest de la nappe.

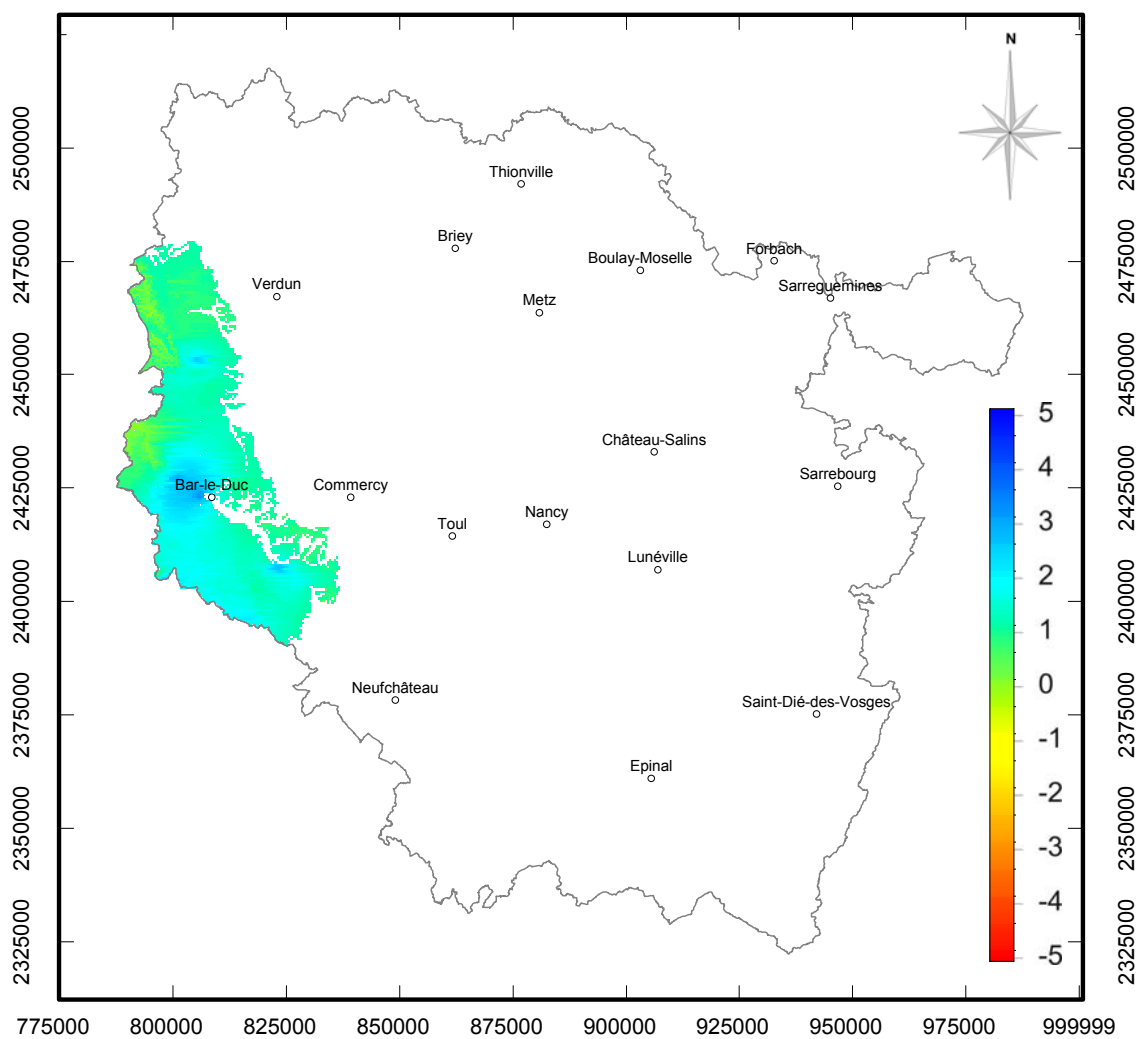


Illustration 29 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Tithonien.

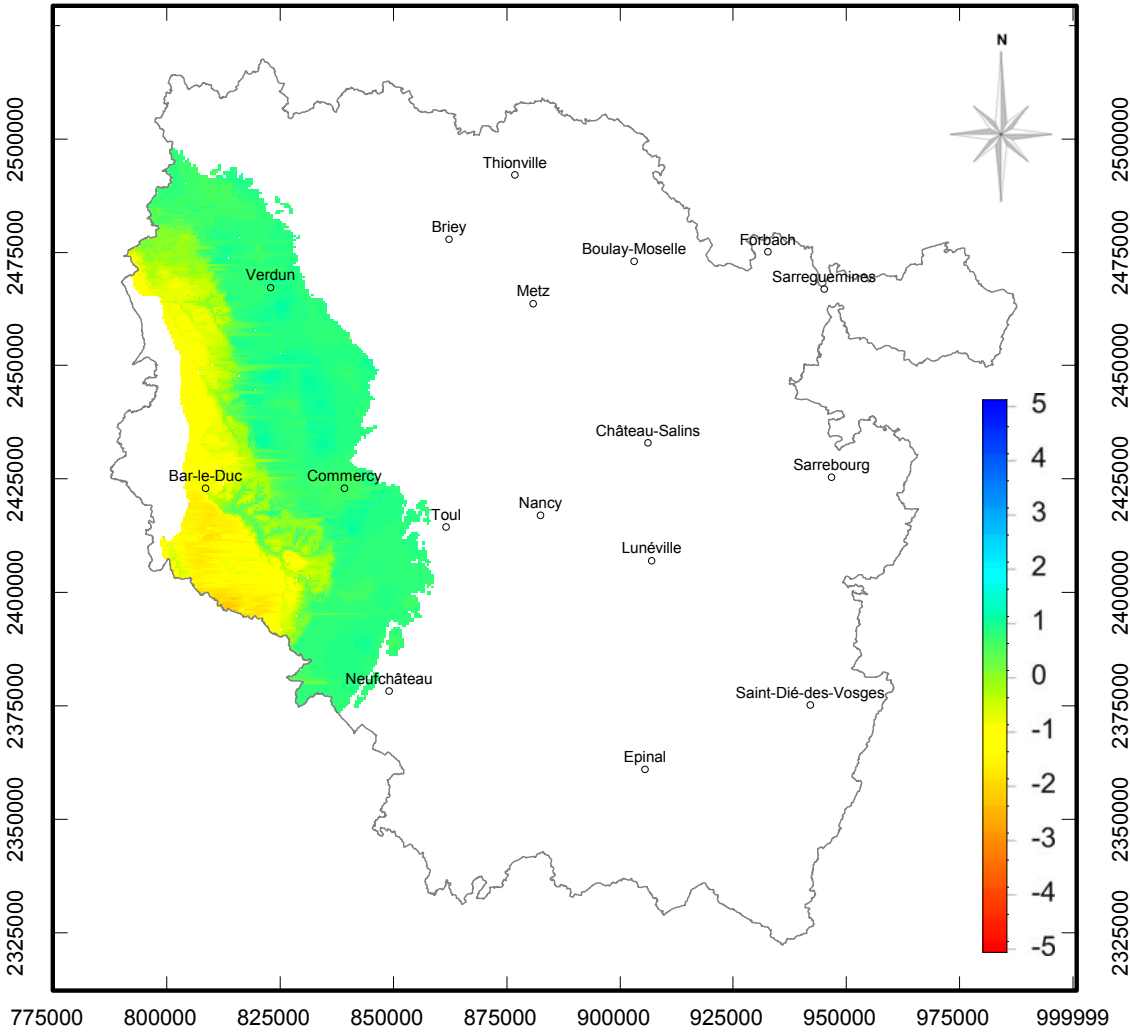


Illustration 30 : Potentiel d'exploitation de la nappe de l'Oxfordien.

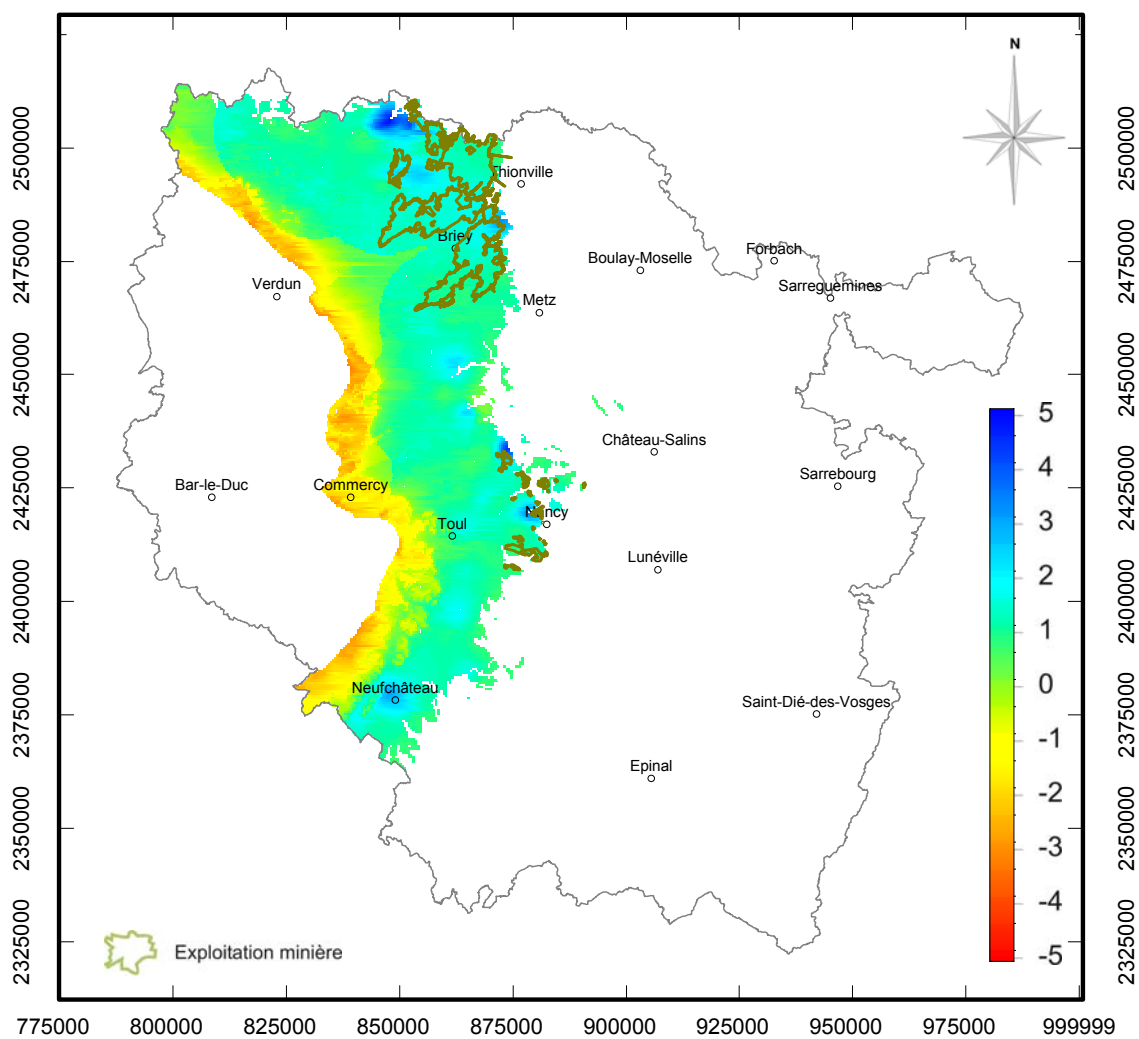


Illustration 31 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Dogger.

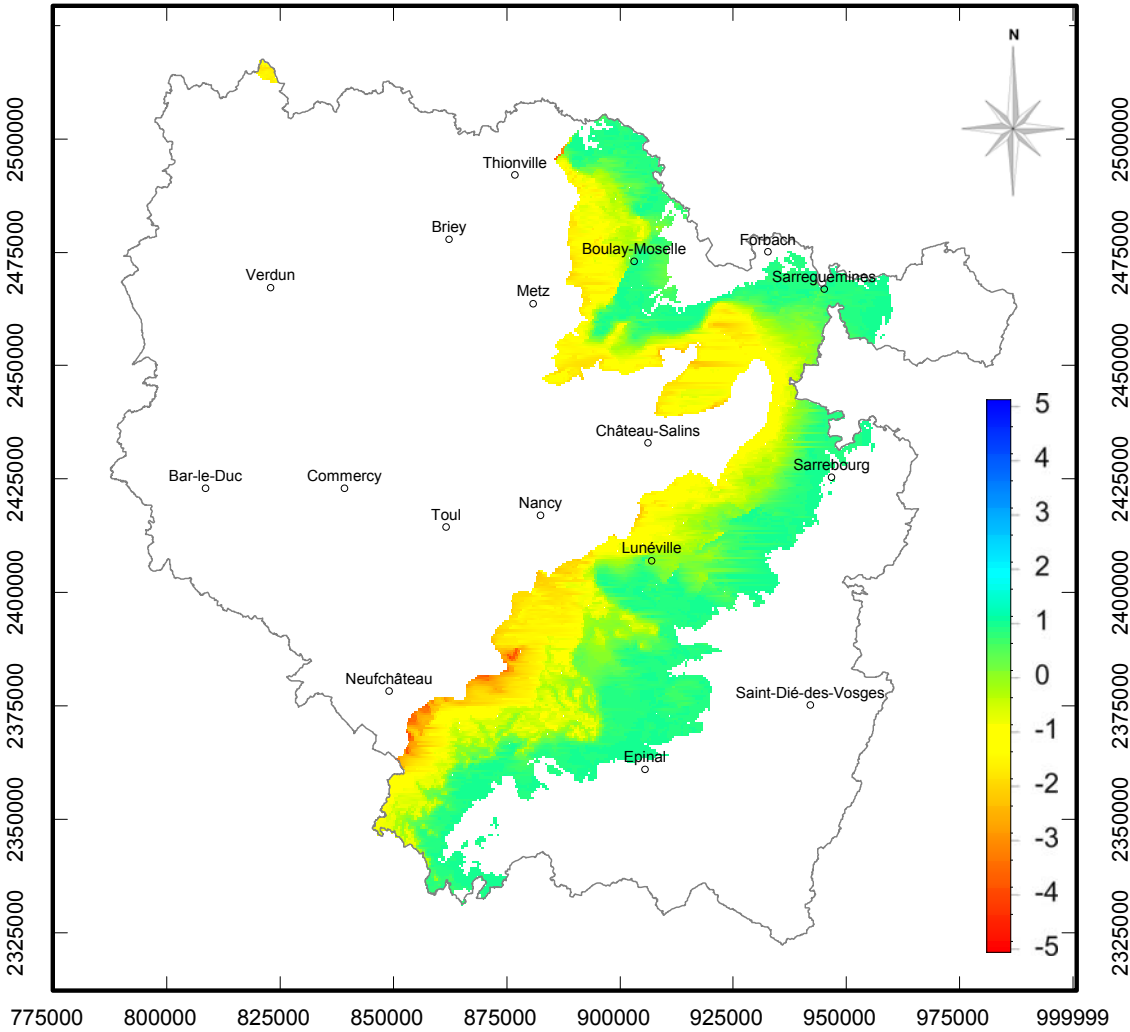


Illustration 32 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Muschelkalk.

Pour la nappe du Buntsandstein, la profondeur importante de la ressource pouvant diminuer considérablement le potentiel d'exploitation, les résultats sont présentés deux fois. Sur l'illustration ci-dessous, la palette de couleurs de l'échelle des valeurs est identique à celles des quatre illustrations précédentes concernant les quatre autres nappes.

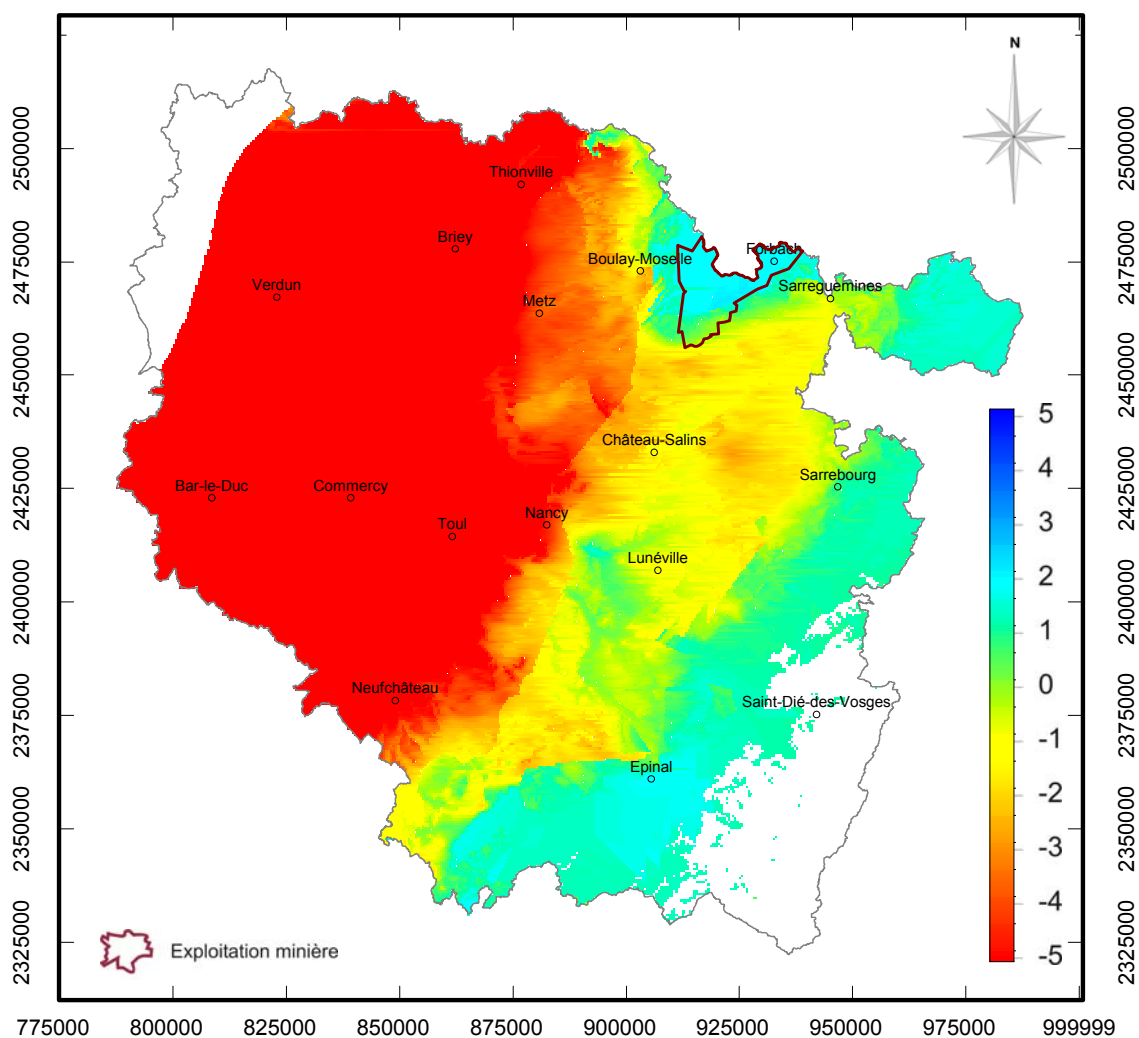


Illustration 33 : Potentiel d'exploitation de la nappe du Buntsandstein.

Sur l'illustration suivante, un autre nuancier de couleur a été utilisé pour permettre de distinguer les résultats du potentiel d'exploitation les plus faibles, à l'Ouest de la nappe du Buntsandstein.

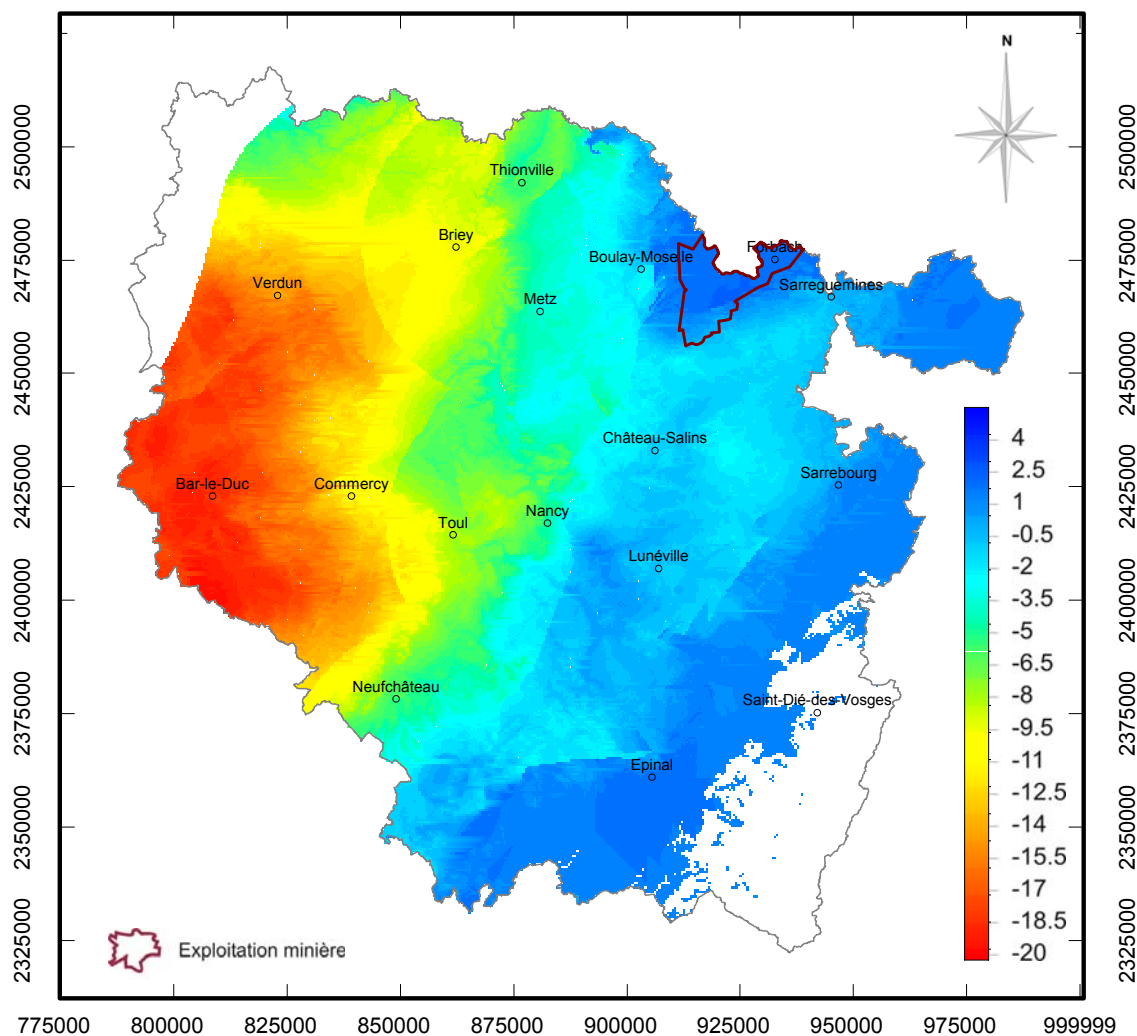


Illustration 34 : Deuxième carte du potentiel d'exploitation de la nappe du Buntsandstein (nouvelle échelle de restitution des données).

Les principaux aquifères alluviaux de la Lorraine sont reportés sur l'illustration 35. Leur délimitation est issue de la BD RHF V1. Ces aquifères sont présentés à part, dans la mesure où ils constituent des réservoirs d'épaisseurs extrêmement fines à l'échelle de la région. Leur géométrie peut évoluer puisqu'ils sont exploités pour leurs matériaux. La qualité des eaux des nappes alluviales peut également varier considérablement au cours d'une saison hydrologique.

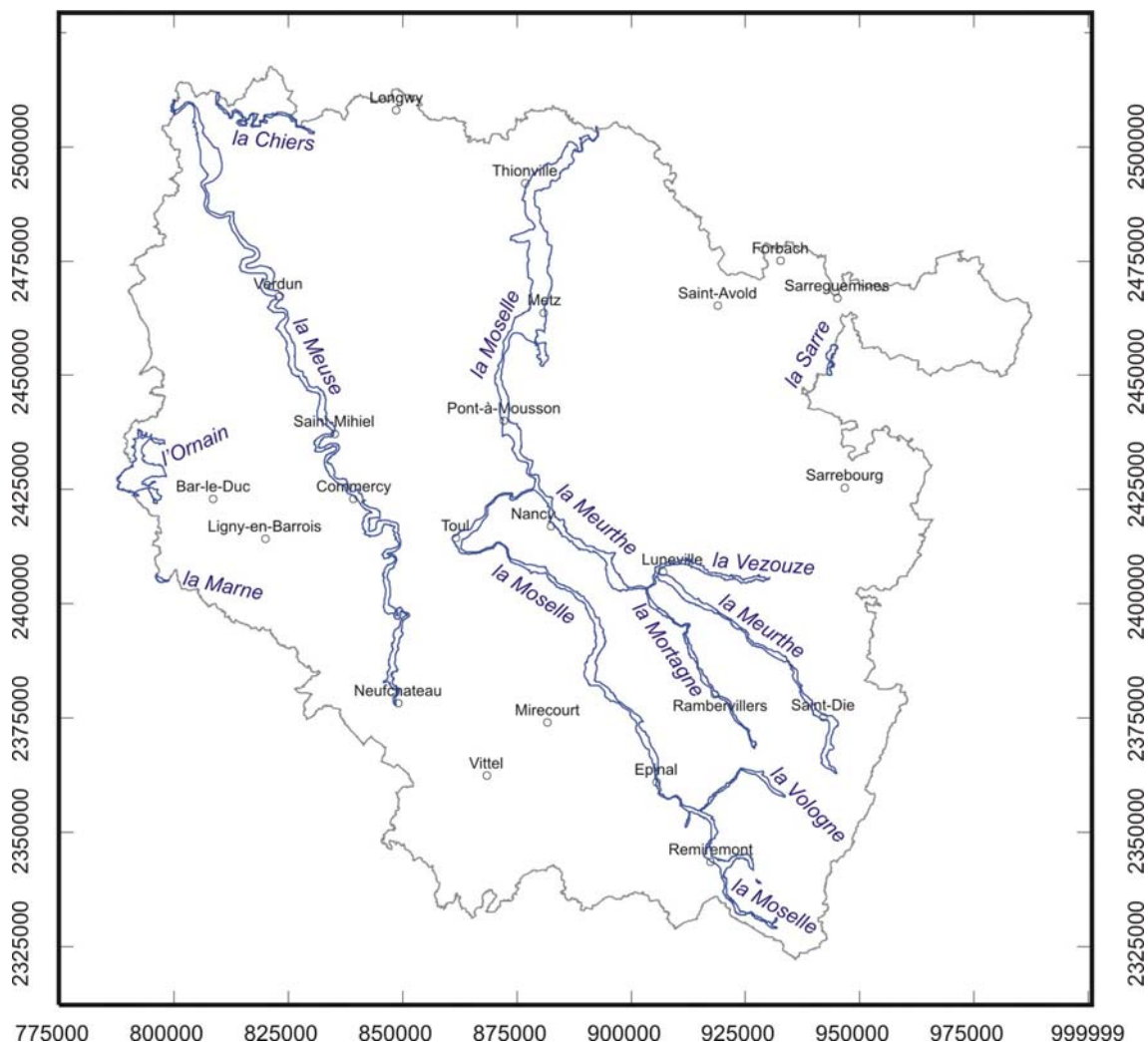


Illustration 35 : Principales nappes alluviales en Lorraine.

L'illustration 35 ci-dessous permet de comparer entre elles les distributions des résultats de l'estimation du potentiel d'exploitation des nappes du Tithonien, de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschelkalk et du Buntsandstein. C'est la nappe du Tithonien qui a le meilleur potentiel, puisque ses résultats sont peu dispersés et que la médiane de ceux-ci est d'environ 1,2. A l'opposé, les résultats pour le Buntsandstein sont très dispersés et leur médiane n'est que de - 0,6. Cette valeur médiocre est due à la part importante du réservoir qui est sous couverture et à des profondeurs considérables (comme le montre le second histogramme de l'aquifère du Buntsandstein, reporté en bas à droite de l'illustration).

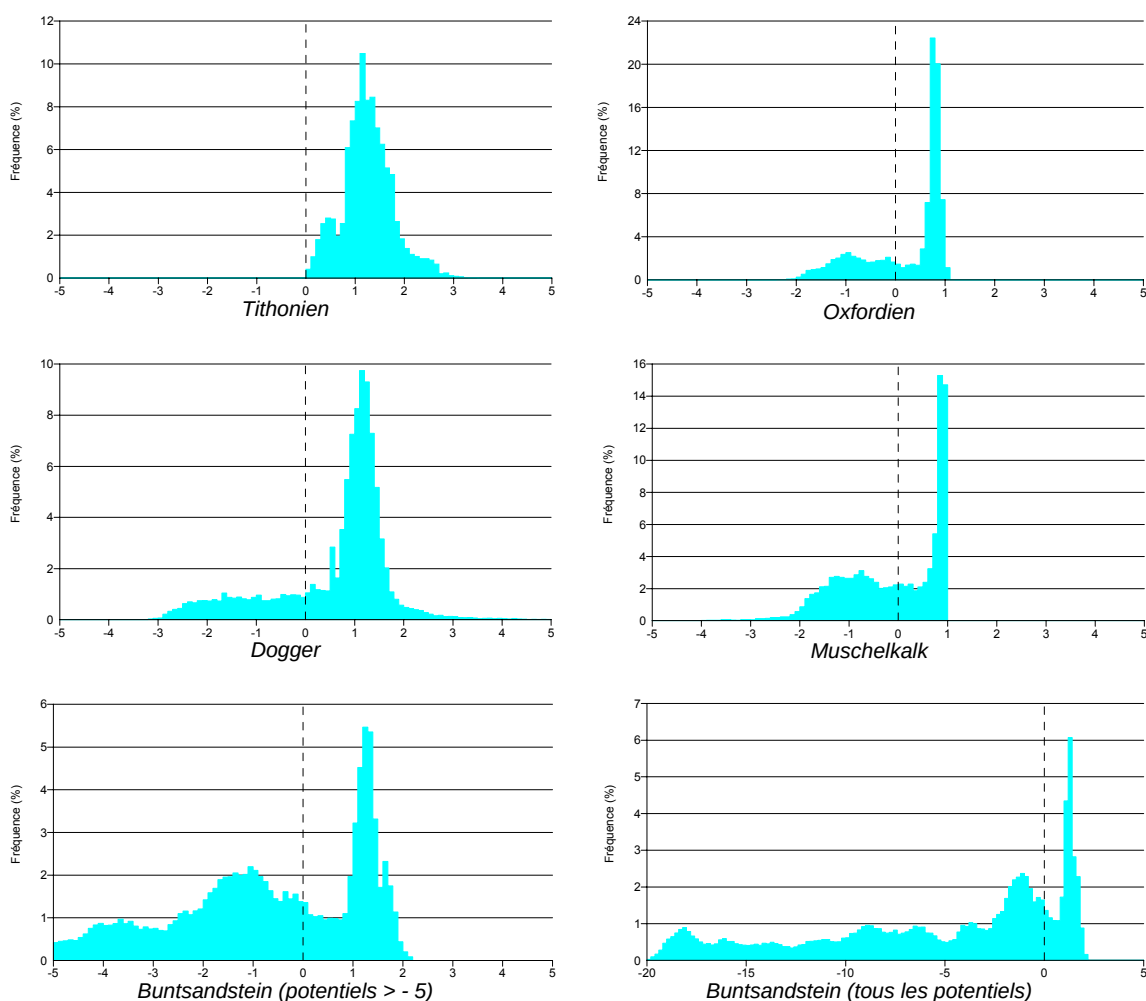


Illustration 36 : Distribution des potentiels d'exploitation des nappes.

5. Conclusion

La méthodologie adoptée pour élaborer l'atlas des ressources énergétiques de très basse énergie des principaux aquifères lorrains a été présentée dans les parties précédentes. Il s'agit d'une approche multicritère rendue possible par la mise en place d'un système d'informations géographiques pour caractériser les nappes des calcaires du Tithonien, des calcaires de l'Oxfordien, des calcaires du Dogger, des calcaires du Muschelkalk, et des grès du Trias inférieur.

Les paramètres qui ont été pris en compte sont variés. Ils reflètent les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères et les caractéristiques qualitatives des nappes qui leur sont associées. Pour certains paramètres, et en particulier pour les débits, l'insuffisance des données disponibles, n'a pas permis de faire un tri systématique de celles-ci, ce qui a parfois entraîné des difficultés pour leur traitement.

Un atlas étant par définition constitué de cartes, une attention particulière a été apportée à la réalisation de la cartographie des paramètres, en veillant à toujours suivre une démarche scientifique consistante. La variabilité spatiale des paramètres a donc été étudiée. Pour la majorité des nappes, des krigeages géostatistiques des paramètres ont été faits.

Toutefois, les résultats sur les débits apportés par l'étude ne sont qu'indicatifs. L'atlas est en effet un outil d'aide à la décision qui donne des orientations sur les potentialités d'exploitation des nappes. Les points suivants doivent notamment être pris en compte puisqu'ils peuvent limiter les précisions de l'analyse variographique et de la qualité des interpolations :

- les formations carbonatées sont hétérogènes (fissurées voire karstifiées), et les données de débit qui ont été collectées le sont aussi ;
- l'estimation des débits ne tient pas compte des interférences des pompages entre eux.

Ainsi, les résultats de l'interpolation des débits pourraient ne pas être représentatifs de la réalité. En tout état de cause, ces résultats ne sauraient constituer une étude de faisabilité d'un projet.

Par ailleurs, l'existence de zones de restriction d'exploitation ou de travaux (cas des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable par exemple), et la possibilité pour une nappe d'être en déséquilibre (cas de la nappe des grès du Trias inférieur qui est surexploitée), devront être prises en compte dans un projet.

Ces restrictions d'usage étant mentionnées, le travail effectué a permis d'aboutir à la réalisation d'une carte du potentiel d'exploitation par des pompes à chaleur, pour chacune des cinq nappes. Ces documents ont été normés par la même référence, et présentés selon une échelle de résultats unique, afin qu'ils puissent être comparés. L'atlas permet finalement, lorsque plusieurs nappes coexistent, d'orienter le lecteur vers la ressource en eau souterraine la plus intéressante.

6. Glossaire

Anisotropie n. m. Variation des propriétés d'un minéral, d'une roche, ou d'une formation géologique suivant les directions de l'espace.

Affleurer v. Fait d'être visible à la surface de la Terre pour un terrain ou une formation géologique. n. m. *affleurement*.

Cuesta n. f. Relief dû à l'érosion d'une couche dure à pendage modéré, présentant une forte pente là où celle-ci a été tranchée par l'érosion. syn. *côte*.

Débit spécifique n. m. Débit pompé dans un puits rapporté à la hauteur de rabattement dans le puits. symb. Q_s . $[L^2T^{-1}]$.

Discordance n. f. Dépôt sédimentaire sur une formation géologique en partie érodée.

Essai par pompage n. m. Pompage opéré dans un puits avec contrôle de l'évolution du débit pompé et des rabattements pour évaluer les paramètres de l'aquifère sollicité.

Gradient géothermal n. m. Variation de la température des terrains avec leur profondeur. Près de la surface terrestre, il est en moyenne de 3 °C/100 m.

Isohypse n. f. Courbe d'égale altitude.

Karst n. m. Plateau calcaire affecté d'un relief et de cavités souterraines générés par la fracturation, la dissolution et les écoulements souterrains.

Krigeage géostatistique n. m. Méthode d'interpolation basée sur la reproduction de la structure spatiale de la variable régionalisée étudiée.

Omnidirectionnel adj. Ce dit d'un variogramme expérimental calculé selon une direction unique.

Perméabilité n. f. Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel. symb. K . $[LT^{-1}]$.

Porosité n. f. Propriété d'un milieu à comporter des vides. Elle est exprimée quantitativement par le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu. symb. ω . $[]$.

Puissance n. f. Epaisseur d'une couche géologique mesurée perpendiculairement à la stratification.

Rabattement n. m. Diminution de charge hydraulique sous l'effet d'un prélèvement d'eau. symb. s . $[L]$.

Subsidence n. f. Enfoncement progressif, régulier ou saccadé, pendant une assez longue période d'un fond d'un bassin sédimentaire, suite à un amincissement crustal d'origine tectonique.

Transmissivité n. f. Paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère et par unité de gradient hydraulique. symb. T . $[L^2T^{-1}]$

Variation latérale de faciès exp. Modification géographique des dépôts sédimentaires d'un même âge avec la modification des conditions de sédimentation.

Variogramme n. m. Outil géostatistique fondamental de l'étude de la structure d'un phénomène régionalisé.

7. Documents utilisés

Bresson G., Maiaux C., de Mautort J., Guillaume M. (1969) – Feuille géologique n°135 à 1/50 000^e de Verdun.

Castany G., Margat J. (1977) – Dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM, 249 p., 11 fig.

Chrétien J.C., Verbecq F., Meyer R., Jurain G. (1974) – Feuille géologique n°305 à 1/50 000^e de Rambervillers.

Demassieux L. (1969) – Feuille géologique n°191 à 1/50 000^e de Vaubécourt.

Desplan A., Lejeune J.M. Maiaux C. (1981) – Les possibilités de réalisations géothermiques en Meuse, Etude de faisabilité du projet géothermique de Maizey. Rapport BRGM 81 SGN 372 LOR, 46 p., 4 ann.

Desprez N., Durand M., Jurain G., Minoux G. (1971) – Feuille géologique n°375 à 1/50 000^e de Plombières-les-Bains.

Dormois R., Maubeuge P.L., Minoux G., Goguel J. (1967) – Feuille géologique n°303 à 1/50 000^e de Châtenois.

Droque C. (1982) – L'aquifère karstique : un domaine perméable original. Le courrier du CNRS, 44, 14, 18-23.

Durand M., Vincent P.-L., Allemmoz M., Guillaume Ch., Vogt J. (1988) – Feuille géologique n°339 à 1/50 000^e d'Epinal.

Fischer C., Nguyen-Thé D. (2005) – Mise à jour de l'inventaire des cavités souterraines du département de la Meuse, Secteur sud-ouest du plateau du Barrois. Rapport BRGM/RP-53628-FR, 25 p., 6 fig., 5 tab.

Flageollet J.C., Le Roux J., Vincent P.L. (1985) – Feuille géologique n°229 à 1/50 000^e de Toul.

Foucault A., Raoult J-F. (2000) – Dictionnaire de géologie. Masson Sciences/Dunod, 5^e édition, 379 p.

Guillaume L. (1959) – Feuille géologique n°196 à 1/50 000^e de Sarre-Union.

Guillaume L. (1960) – Feuille géologique n°165 à 1/50 000^e de Saint-Avold.

Guillaume L., Guillaume M., Limasset J-Cl. (1968) – Feuille géologique n°232 à 1/50 000^e de Sarrebourg.

Hameurt J., Hollinger J., Durand M., Vincent P.L., Flageollet J-C. (1979) – Feuille géologique n°376 à 1/50 000^e de Remiremont.

Hilly J., Allouc J., Marchal Cl., Avias J., Laugier R., Vaucel G., Wild G., Castaing J., Geisler D., Denis J-P., Eschenbrenner V., Minoux G. (1977) – Feuille géologique n°268 à 1/50 000^e de Bayon.

Jaillet S. (1999) – Recul de couverture et karstification dans un karst couvert de bas plateaux : Le Barrois (Lorraine / Champagne – France). Actes du colloque Karst-99.

Laugier R. (1966) – Feuille géologique n°269 à 1/50 000^e de Lunéville.

Laurain M. (1998) – Feuille géologique n°134 à 1/50 000^e de Monthois.

Le Nindre Y.M. (1995) – Synthèse cartographique à 1/250 000^e des réservoirs aquifères du bassin Rhin-Meuse, Rapport final. Rapport BRGM/RR-38618-FR, 36 p., 2 pht.

Le Roux J., Bellorini J.P., Pironon B., Steiner P. (1959) – Feuille géologique n°137 à 1/50 000^e de Briey.

Mabillot A. (1971) – Le Forage d'Eau, Guide pratique. Editions Lavoisier, Paris.

Maiaux C. (1975) – Feuille géologique n°161 à 1/50 000^e de Clermont-en-Argonne.

Marchal Cl., Maréchal B. (1972) – Feuille géologique n°231 à 1/50 000^e de Parroy.

Maubeuge P.L. (1958) – Feuille géologique n°136 à 1/50 000^e d'Etain.

Maubeuge P.L. (1959) – Feuille géologique n°113 à 1/50 000^e de Longwy-Audun-le-Roman.

Maubeuge P.L. (1959) – Feuille géologique n°193 à 1/50 000^e de Pont-à-Mousson.

Maubeuge P. L. (1962) – Feuille géologique n°192 à 1/50 000^e de Saint-Mihiel.

Maubeuge P. L. (1963) – Feuille géologique n°267 à 1/50 000^e de Vézelize.

Maubeuge P. L. (1964) – Feuille géologique n°163 à 1/50 000^e de Chambley.

Maubeuge P.L. (1969) – Feuille géologique n°112 à 1/50 000^e de Longuyon-Gorcy.

Maubeuge P.L. (1969) – Feuille géologique n°162 à 1/50 000^e de Vigneulles-lès-Hattonchâtel.

Maubeuge P.L. (1970) – Feuille géologique n°266 à 1/50 000^e de Gondrecourt-le-Château.

Maubeuge P.L. (1972) – Feuille géologique n°164 à 1/50 000^e de Metz.

- Maubeuge P.L.** (1973) – Feuille géologique n°194 à 1/50 000^e de Nomeny.
- Maubeuge P.L.** (1974) – Feuille géologique n°302 à 1/50 000^e de Neufchâteau.
- Maubeuge P.L.** (1976) – Feuille géologique n°111 à 1/50 000^e de Stenay.
- Maubeuge P.L.** (1976) – Feuille géologique n°337 à 1/50 000^e de Bourmont.
- Maubeuge P.L.** (1982) – Feuille géologique n°88 à 1/50 000^e de Montmedy-Francheval.
- Maubeuge P.L., Clermonté J., Goguel J.** (1965) – Feuille géologique n°228 à 1/50 000^e de Commercy.
- Ménillet F.** (1979) – Feuille géologique n°233 à 1/50 000^e de Saverne.
- Ménillet F., Benecke E.W., Schumacher E., van Werveke L., Geissert F., Leppla A., Thürach H., Konrad H.J., Illies H., Rinck G., Schwoerer P.** (1989) – Feuille géologique n°168 à 1/50 000^e de Lembach.
- Ménillet F., Durand M., Maïaux C., Loughnon J.** (1978) – Feuille géologique n°270 à 1/50 000^e de Cirey-sur-Vezouze.
- Ménillet F., Fluck P., Flageollet J.C., Maïaux C.** (1978) – Feuille géologique n°341 à 1/50 000^e de Gérardmer.
- Minoux G.** (1964) – Feuille géologique n°338 à 1/50 000^e de Vittel.
- Minoux G.** (1978) – Feuille géologique n°304 à 1/50 000^e de Mirecourt.
- Minoux G., Théobald N.** (1974) – Feuille géologique n°374 à 1/50 000^e de Monthureux-sur-Saône.
- Noël Y.** (1997) – Modèle de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine, Phase 1, Acquisition des données. Rapport BRGM/RR-39228-FR, 62 p., 27 fig., 7 tab., 12 ann.
- Ramon S., Zumstein J.F.** (1992) – Carte hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse à 1/500 000^e et Coupe hydrogéologique schématique à 1/600 000^e. Agence de l'eau Rhin-Meuse, 1000 ex.
- Schumacher E., van Werveke L., Haug E., Bücking H., Vogt H., Gross J.J., Schirardin J., Reichelt R., Thévenin A., Pétry F., Ménillet F.** (1979) – Feuille géologique n°197 à 1/50 000^e de Bouxwiller.
- Stchépinsky V.** (1962) – Feuille géologique n°227 à 1/50 000^e de Bar-le-Duc.
- Stchépinsky V.** (1962) – Feuille géologique n°265 à 1/50 000^e de Joinville.

Stchépinsky V., Lemoine M., Goguel J. (1959) – Feuille géologique n°226 à 1/50 000^e de Saint-Dizier.

Talbot A., Babot Y., Garadi., Masquelier Q. (2002) – Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse. AERM, document ANTEA/SIROM, 128 p.

Théobald N. (1955) – Feuille géologique n°139 à 1/50 000^e de Boulay.

Théobald N. (1967) – Feuille géologique n°167 à 1/50 000^e de Bitche-Walschbronn.

Théobald N., Heintz E., Hillard F. (1959) – Feuille géologique n°138 à 1/50 000^e d'Uckange

Théobald N., Lemoine M., Goguel J. (1959) – Feuille géologique n°91-114 de Thionville-Waldwisse.

Théobald N., Schöner R., Britz K., Manderscheid G. (1955) – Feuille géologique n°140 à 1/50 000^e de Forbach.

Thomas A., Rucquoi D., Le Roux J., Dabonville J.P., Gury M., Florentin L., Nys Cl., Thiebaut J.P., Flageollet J.-C., Billoret R., Guillaume Ch., Vincent P. L. (1978) – Feuille géologique n°230 à 1/50 000^e de Nancy.

van Vervecke L., Guillaume L., Meyer G., Schumacher E., Klinkhammer B.F., Heizmann G., Théobald N., Legagneur G., Blanalt J.G., Goguel J. (1967) – Feuille géologique n°166 à 1/50 000^e de Sarreguemines.

Vaute L., Durendeau B. (2005) – Synthèse cartographique du fonctionnement des aquifères karstiques dans le département de la Meuse (hors bassin Rhin-Meuse). Note BRGM LOR05N305, 26 p, 8 fig.

Vincent P.L., Flageollet J.C., Vincent P.L., Durand M., Allemoz M., Vogt J., Delaunay J., Guillaume C., Timbal J. (1985) – Feuille géologique n°340 à 1/50 000^e de Bruyères.

Von Eller J.P., Ménillet F., Hollinger J., Guillaume Ch., Billoret R., Fluck P., Maïaux C. (1975) – Feuille géologique n°306 à 1/50 000^e de Saint-Dié.

Annexe 1

Limites inférieures et supérieures sectorisées des aquifères du Tithonien, de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschelkalk et du Trias inférieur

Département	N° de feuille	Tithonien		Remarques
		Couche inférieure	Couche supérieure	
55 Meuse	88			
	111			
	112			
	134	j6b Calcaires du Barrois (Kimméridgien terminal)	n6Sv Sables Verts (Albien inf.)	Les sables verts de l'Albien sont au contact du Tithonien ils peuvent être regroupés dans un même aquifère
	135	j9 Calcaires du Barrois	C1a Sables verts	Les sables verts de l'Albien sont au contact du Tithonien ils peuvent être regroupés dans un même aquifère
	136			
	161	j9a Calcaires cryptocristallins	n7a Sables Verts	Les sables verts de l'Albien sont au contact du Tithonien ils peuvent être regroupés dans un même aquifère
	162			
	163			
	191	j9a Calcaires marneux et lithographiques	j9b Calcaires à débris, Marnes et lumachelles	La nappe du Tithonien n'existe que dans la partie inférieure, on ne prend pas en compte sa partie supérieure (j9c et j9d)
	192			
	226	j9a Portlandien inf. Bononien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Pachyceras)	j9a Portlandien inf. Bononien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Pachyceras)	La nappe du Tithonien n'existe que dans la partie inférieure, on ne prend pas en compte sa partie supérieure
	227	j9a Portlandien inf. Bononien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Pachyceras)	j9a Portlandien inf. Bononien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Pachyceras)	La nappe du Tithonien n'existe que dans la partie inférieure, on ne prend pas en compte sa partie supérieure
	228	j9a Calcaires du Barrois	j9c Calcaires tachetés et calcaires cariés	Les sables verts ne sont pas au contact de l'aquifère du Tithonien, on ne les prend pas en compte
	265	j9a Portlandien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Gravesia)	j9a Portlandien inf. (zone à Cyprina brongniarti et à Gravesia)	La nappe du Tithonien n'existe que dans la partie inférieure, on ne prend pas en compte sa partie supérieure
	266	j9a Calcaires inf. du Barrois (calcaires lithographiques)	j9c Calcaires tachetés et calcaires cariés	
54 Meurthe-et-Moselle	112			
	113			
	137			
	163			
	193			
	194			
	229			
	230			
	231			
	267			
	268			
	269			
57 Moselle	113			
	114			
	137			
	138			
	139			
	140			
	163			
	164			
	165			
	166			
	167			
	168			
	194			
	196			
88 Vosges	197			
	231			
	232			
	233			
	270			
	266			
	267			
	269			
	270			
	302			
	303			
	304			
	305			
	306			
	337			
	338			
	339			
	340			
	341			
	374			
	375			
	376			

Département	N° de feuille	Oxfordien		Remarques
		Couche inférieure	Couche supérieure	
55 Meuse	88			
	111	j5a Terrain à Chailles	j6b calcaires à Astartes	Les calcaires rocailloux ne sont pas aquifères sur cette carte
	112	j4c Terrain à chailles Oxfordien inf.	j5 Calcaire corallien Oxfordien moyen	
	134			
	135	j4b Argiles à Chailles	j8a Calcaires rocailloux	
	136	j4 Oxfordien	j7 Séquanien	
	161	j6a Calcaires supérieurs et calcaires "plaquettes"	j7a Calcaires rocailloux à Ptérocères	Il existe un niveau imperméable : j6d Argiles et calcaires argileux à lumachelles (40 m)
	162	j4b Oxfordien Inf. terrain à chailles	j7 Oxfordien moyen Calcaires à Astartes	
	163			
	191	j7a Séquanien inf. Marno-calcaires	j8a Kimméridgien inf. Calcaires	Il peut exister un niveau imperméable en dessous mais il n'affleure pas
	192	j4b Oxfordien Chailles	j7 Séquanien	L'ensemble de l'aquifère peut être discontinu
	226			
	227			
	228	j4b Terrain à Chailles	j7 Calcaire à Astartes	Les calcaires rocailloux ne sont pas aquifères sur cette carte
	265			
	266	j4b Terrain à Chailles	j7c Calcaires à Astartes sup.	Les calcaires rocailloux ne sont pas aquifères sur cette carte
54 Meurthe-et-Moselle	112			
	113			
	137			
	163			
	193			
	194			
	229	j4b Chailles oxfordiennes	j5-6 Rauracien-Argovien	
	230			
	231			
	267	j4b Chailles oxfordiennes	j5-6 Rauracien-Argovien	
	268			
	269			
57 Moselle	270			
	113			
	114			
	137			
	138			
	139			
	140			
	163			
	164			
	165			
	166			
	167			
88 Vosges	168			
	194			
	196			
	197			
	231			
	232			
	233			
	270			
	266	j4b Terrain à Chailles	j7c Calcaires à Astartes sup.	Les calcaires rocailloux ne sont pas aquifères sur cette carte
	267			
	269			
	270			
	302	j4b Oxfordien Terrain à Chailles	j7c Calcaire à Astartes sup.	
	303			
	304			
	305			
	306			
	337			
	338			
	339			
	340			
	341			
	374			
	375			
	376			

Département	N° de feuille	Dogger		Remarques
		Couche inférieure	Couche supérieure	
55 Meuse	88	i8 Minéral de fer oolithique	j2b Dalle d'Etain	
	111	j1a Calcaires à polypiers sup.	j2b Dalle d'Etain et Marnes à Rhynchonelles	
	112	i6 Minéral de fer oolithiqueToarcien sup.	j2c-b2 Dalle d'Etain	
	134			
	135			
	136	j1 Bajocien sup.	j2c Bathonien sup. Dalle d'Etain	
	161			
	162			
	163	i6 Aalénien	j2a Bathonien inf. Caillasses à Anabacia et marnes à Terebratula globata	
	191			
	192			
	226			
	227			
	228			
	265			
	266			
54 Meurthe-et-Moselle	112	i6 Minéral de fer oolithiqueToarcien sup.	j2c-b2 Dalle d'Etain	
	113	i6 Aalénien	j1c2 Bajocien sup. Marnes de Jarnisy, Oolithe de Doncourt, Marnes de Gravelotte	
	137	i9 Formation ferrugineuse indifférenciée	j2aC Caillasses à Anabacia	Ne pas prendre j2aM Marnes à Terebratula globata (couche imperméable)
	163	i6 Aalénien	j1c3 Bajocien sup. Oolithes miliare sup.	
	193	i9 Toarcien formation ferrugineuse ("Minette")	j2a Caillasses à Anabacia	
	194	i8 Toarcien sup. Minéral de fer oolithique	j1c2 Bajocien sup. Calcaires à Clypeus ploti	
	229	i6 Aalénien	j2a Bathonien inf. Caillasses à Anabacia	
	230	i9 Aalénien Minéral de fer "Minette"	j1d Bajocien "oolithe difforme à Clypeus ploti"	
	231			
	267	i6 Aalénien	j2c-b(2) Calcaires oolithiques	Ne pas prendre j2c-b(1) marnes à Rhynchonelloidella (imperméable), variation latérale de faciès
	268			
	269			
	270			
57 Moselle	113	i6 Aalénien	j1c2 Bajocien sup. Marnes de Jarnisy, Oolithe de Doncourt, Marnes de Gravelotte	
	114			
	137	i9 Aalénien formation ferrugineuse	j2aC Caillasses à Anabacia	Ne pas prendre j2aM Marnes à Terebratula globata (couche imperméable)
	138	i6 Aalénien	i6 Aalénien	Les autres couches du Dogger n'affleurent pas sur cette carte
	139			
	140			
	163	i6 Aalénien	j1c3 Bajocien sup. Oolithes miliars sup.	
	164	i6 Toarcien sup.	j1b-a Bajocien moyen et inférieur	Les autres couches n'affleurent pas sur la carte
	165			
	166			
	167			
	168			
	194	i8 Toarcien sup. Minéral de fer oolithique	j1c2Bajocien sup. Calcaires à Clypeus ploti	
	196			
	197			
88 Vosges	231			
	232			
	233			
	270			
	266	j2b-c Calcaire oolithique	j2b-c Calcaire oolithique	Les autres couches du Dogger n'affleurent pas sur cette carte
	267	i6 Aalénien	j2c-b(2) Calcaires oolithiques	Ne pas prendre j2c-b(1) marnes à Rhynchonelloidella (imperméable), variation latérale de faciès
	269			
	270			
	302	j1a-b1 Bajocien inf.: calcaires à Polypiers inf.	j3b Marno-calcaire à oolithes ferrugineuses	
	303	i6 Aalénien	j2c-b Bathonien sup. et moyen	
	304			
	305			
	306			
	337	j1a Bajocien inf.	j2c-b Bathonien moyen et sup.	
	338			
	339			
	340			
	341			
	374			
	375			
	376			

Département	N° de feuille	Muschelkalk		Remarques
		Couche inférieure	Couche supérieure	
55 Meuse	88			
	111			
	112			
	134			
	135			
	136			
	161			
	162			
	163			
	191			
	192			
	226			
	227			
	228			
	265			
	266			
54 Meurthe-et-Moselle	112			
	113			
	137			
	163			
	193			
	194			
	229			
	230			
	231	t5b Muschelkalk sup. Calcaire à Térébratules Calcaire à Cératites et marnes	t6 Lettenkohle Dolomies et marnes	Regrouper les formations calcaires et dolomitiques du Musch. Sup. et de la Lettenkohle
	267			
	268	t5b Muschelkalk sup. Calcaire à Térébratules Calcaire et Marnes à Cératites	t6 Lettenkohle Dolomies et marnes	Prendre la Lettenkohle en entier car pas de distinction entre les couches sur la carte
57 Moselle	269	t5 Muschelkalk sup.	t6 Lettenkohle	Prendre la Lettenkohle en entier car pas de distinction entre les couches sur la carte
	270	t4c Couches Blanches	t5b Calcaires à Ceratite	La Lettenkohle n'auffleure pas
	113			
	114	t5a Couches à entroques	t6a Dolomie inf.	
	137			
	138	t6a Dolomie inférieure	t6a Dolomie inf.	Les autres couches de la Lettenkohle n'auffleurent pas sur cette carte
	139	t5a Couches à entroques	t6a Dolomie inf.	
	140	t5a Calcaire à entroques	t6a Calcaire et dolomie	
	163			
	164	t5a Calcaire à entroques	t6a Dolomie inf.	
	165	t5a Calcaire à entroques	t6a Dolomie inférieure	
88 Vosges	166	t5a Calcaires à entroques	t6a Dolomie inférieure	
	167	t5a Calcaires à entroques	t6a Calcaire et dolomie	
	168			
	194			
	196	t5a Calcaires à entroques	t6a Dolomie inférieure	
	197			
	231	t5b Muschelkalk sup. Calcaire à Térébratules Calcaire à Cératites et marnes	t6 Lettenkohle Dolomie et marnes	Regrouper les formations calcaires et dolomitiques du Musch. Sup. et de la Lettenkohle
	232	t5a Calcaires à entroques	t6a Dolomie inférieure	
	233			
	270			
	266			
	267			
	269			
	270			
	302			
	303	t5c Muschelkalk sup. Dolomie de Vittel	t5c Muschelkalk sup. Dolomie de Vittel	
	304	t5 Muschelkalk sup.	t5 Muschelkalk sup.	La dolomie inf. est confondue avec le toit du Muschelkalk
	305	t5 Calcaires à Cératites, calcaires à entroques	t6a Calcaire dolomitique inférieur	
	306			
	337			
	338	t4bD Couches Blanches	t5c Dolomie blanc crème (Dolomie de Vittel)	
	339	t4c Couches Blanches	t6a Lettenkohle inf. (Dolomie de Vittel)	
	340	t5 Muschelkalk sup. Calcaires	t6a Lettenkohle inf. (dolomitique)	
	341			
	374	t4c Couches Blanches	t5b Calcaires à Ceratite	Pas de distinction pour la Lettenkohle
	375	t4D Couches blanches	t6a Calcaires dolomitiques inf.	
	376			

Département	N° de feuille	Grès du Trias inférieur		Remarques
		Couche inférieure	Couche supérieure	
55 Meuse	88			
	111			
	112			
	134			
	135			
	136			
	161			
	162			
	163			
	191			
	192			
	226			
	227			
	228			
	265			
	266			
54 Meurthe-et-Moselle	112			
	113			
	137			
	163			
	193			
	194			
	229			
	230			
	231			
	267			
	268			
	269	t1a Grès Vosgien	t2-3 Grès coquillier et grès à voltzia	
	270	t1b Grès Vosgien s.s.	t3 Muschelkalk inf. Grès coquillier	Ne pas prendre les couches de Senones (t1a) qui sont imperméables
57 Moselle	113			
	114	t1 Grès vosgien principal	t3 Grès coquillier	
	137			
	138			
	139	t1b Grès vosgien principal	t3a Grès coquillier	
	140	t1a Grès d'Anweiler	t3a Grès coquillier	
	163			
	164			
	165	t1c Grès vosgien	t3a Grès coquillier	
	166	t1c Grès vosgien	t3a Grès coquillier	
	167	t1b Grès vosgien inférieur	t2b Grès à Voltzia	Ne pas prendre le grès coquillier car l'argile limite fait un écran imperméable
	168	t1a Grès d'Anweiler	t2b Grès à Voltzia	Toutes les couches n'affleurent pas sur la carte
	194			
	196			
	197	t1b Grès vosgien	t2b Grès à Voltzia	Toutes les couches n'affleurent pas sur la carte
88 Vosges	231			
	232	t1b Grès vosgien inf.	t3a Grès coquillier	Pas d'argile limite en dessous des grès coquilliers
	233	t1b Grès vosgien	t2b Grès à Voltzia	Ne pas prendre les couches de Senones (t1a) qui sont imperméables
	270	t1b Grès Vosgien s.s.	t3 Muschelkalk inf. Grès coquillier	Ne pas prendre les couches de Senones (t1a) qui sont imperméables
	266			
	267			
	269	t1a Grès Vosgien	t2-3 Grès coquillier et grès à voltzia	
	270	t1b Grès Vosgien s.s.	t3 Muschelkalk inf. Grès coquillier	Ne pas prendre les couches de Senones (t1a) qui sont imperméables
	302			
	303			
	304			
	305	t1 Grès vosgien	t2c-3a Grès coquillier, grès à Voltzia	
	306	t1b Grès vosgien sup.	t2b Couches intermédiaires (grès)	Pas d'affleurement du toit
	337			
	338	t1 Grès vosgien	t3 Grès et argiles rouges	
	339	t1b Grès vosgien	t3 Grès coquillier	t3 regroupé avec le Grès à Voltzia dans t2b-3
	340	t1b Grès vosgien	t2b-3 Grès à Voltzia, grès coquillier	Grès coquillier regroupé avec le Grès à Voltzia
	341	t1b Grès vosgien	t2a Grès bigaré inf., couches intermédiaires	Pas d'affleurement du toit
	374	t1 Grès vosgien	t3 Muschelkalk inf. (grès coquillier)	
	375	t1 Grès vosgien	t2b-3 Grès à Voltzia	
	376	t1b Grès vosgien	t2b Grès à Voltzia	

Annexe 2

Liste de toutes les formations géologiques à prendre en compte dans la modélisation géologique des aquifères par le logiciel Multilayer

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
88	MONTMEDY-FRANCHEVAL	Dogger	Dalle d'Etain	j2b	Bathonien moyen à supérieur
			Caillasses à <i>Anabacia</i>	j2a	Bathonien inférieur
			Oolithe de Doncourt-les-Longuyon	j1b-c	Bajocien supérieur
			marno-calcaires à <i>Clypeus ploti</i>	j1b-c	Bajocien supérieur
			Oolithe de Jaumont	j1b-c	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy	j1b-c	Bajocien supérieur
			Calcaires à polypiers/Pierre de Dom-le-Mesnil	j1a	Bajocien moyen
			équivalent des Calcaires à entroques	j1a	Bajocien inférieur à moyen?
111	STENAY	Oxfordien	Minerai de fer oolithique	l8	Toarcien supérieur
			Calcaire à astartes	j6b	Oxfordien supérieur
			Calcaires argovo-rauraciens	j6a	Oxfordien supérieur
		Dogger	Calcaire marneux d'Ornes/Oolithe ferrugineuse	j5bM/j5bO	Oxfordien moyen
			Terrain à chailles	j5a	Oxfordien moyen
			Dalle d'Etain	j2b	Bathonien moyen et supérieur
			Marnes à rhynchonelles	j2a	Bathonien inférieur
			Caillasse à <i>anabacia</i>	j1c	Bajocien supérieur
			Oolithe de Doncourt	j1b	Bajocien supérieur
			Oolithe de Jaumont	j1a	Bajocien moyen
112	LONGUYON-GORCY	Oxfordien	Calcaire corallien	j5	Oxfordien moyen
			Terrain à chailles	j4c-b	Oxfordien inférieur
		Dogger	Dalle d'Etain	j2c-b2	Bathonien moyen et supérieur
			Marnes à <i>Rhynchonelloidella</i>	j2c-b1	
			Caillasses à <i>Anabacia</i>	j2a	Bathonien inférieur
			Marnes à <i>Terebratula globata</i>	j1c2	Bajocien supérieur
			Oolithe de Doncourt passant latéralement aux Marnes de Jarnisy	j1c1	Bajocien supérieur
			Niveau des Clapes	j1ba	Bajocien inférieur et moyen
			Oolithe de Jaumont		
			Marnes de Longwy		
			Calcaire à polypiers		
			Calcaire de Haut-Pont	l6	Toarcien supérieur
			Calcaire d'Ottange		
			Marnes micacées	j1c	Bajocien supérieur
			Minerai de fer oolithique		
113	LONGWY-AUDUN-LE-ROMAN	Dogger	Oolithe de Doncourt	j1b-a	Bajocien moyen et inférieur
			Niveau des Clapes		
			Oolithe de Jaumont		
			Marnes de Longwy		
			Calcaires à polypiers supérieurs	l4	Aalénien
			Calcaires à polypiers inférieurs		
			Marnes micacées		
			Minerai de fer oolithique		
114-115	THIONVILLE-WALDWISSE	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle
			Couches à cératites	t5b	Muschelkalk
			Couches à entroques	t5a	Muschelkalk
		GTI	Grès coquillier	t3a	Muschelkalk
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Buntsandstein
			Grès intermédiaires	t2a	Buntsandstein
			Grès vosgien principal	t1	Buntsandstein
			Sables verts	c1a	Albien
135	VERDUN	Tithonien	Calcaires du Barrois	j9	Tithonien inférieur et moyen
			Calcaire rocailloux	j7b	Oxfordien supérieur (Séquanien)
		Oxfordien	Calcaires supérieurs à astartes	j7a	Oxfordien supérieur (Séquanien)
			Argiles et calcaires moyens et inférieurs	j6-5	Argovien-Rauracien
			Calcaire sableux à trigonies		
			Calcaires en plaquettes		
			Calcaire récifal à polypiers		
			Faciès glypticien		
			Argiles à chailles et oolite ferrugineuse	j4b	Oxfordien s.s.

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte		
136	ETAIN	Oxfordien	?	j7	Séquanien		
			?	j6	Rauracien		
			?	j5	Argovien		
			Chailles	j4	Oxfordien		
		Dogger	Dalle d'Etain	j2c-b	Bathonien supérieur et moyen		
			Marnes à <i>Rhynchonelloidella</i>				
			Caillasses à <i>Anabacia</i>	j2a	Bathonien inférieur		
			Marnes à <i>Terebratula globata</i>				
			Calcaire oolithique			j1	Bajocien supérieur
			Oolithe de Jaumont				
137	BRIEY	Dogger	Calcaire siliceux	j2aC	Bathonien		
			Caillasse à <i>Anabacia</i>				
			Marnes du Jamisy	j1d2	Bajocien		
			Oolithe de Vionville (équivalent de l'Oolithe de Doncourt-Les-Conflans ou Calcaires cannabins de Gravelotte)				
			Oolite de Norroy (équivalent de l'Oolite de Doncourt-Les-Longuyon)	j1d1	Bajocien		
			Marnes de Gravelotte, Calcaires à points ocreux de Vernéville)				
			Oolite de Jaumont	j1c	Bajocien		
			Marnes de Longwy				
			Calcaires siliceux de l'Orne (équivalent des Calcaires de la Fentsch)	j1b-c	Bajocien		
			Calcaire à polyptères	j1b	Bajocien		
			Calcaire de Haut-Pont	j1a	Bajocien		
			Calcaire d' Ottange				
			Marnes de Charennes				
			Formation ferrugineuse			i9	Toarcien supérieur - Aalénien
			138	UCKANGE	Dogger		i6
Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a			Lettenkhole		
139	BOULAY	Muschelkalk	Dolomies inférieures	t6a	Trias moyen		
			Couches à cératites	t5b	Trias moyen		
			Couches à entroques	t5a	Trias moyen		
			Grès coquillier	t3a	Trias moyen		
		GTI	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Trias inférieur		
			Grès intermédiaires et conglomérat à cornaline	t2a	Trias inférieur		
			Conglomérat principal	t2P	Trias inférieur		
			Grès vosgien principal	t1c	Trias inférieur		
			Grès vosgien principal	t1b	Trias inférieur		
			Calcaire et dolomie	t6a	Muschelkak (Lettenkhole)		
140	FORBACH	Muschelkalk	Calcaire à cératites	t5b	Muschelkak		
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkak		
			Grès coquillier	t3a	Buntsandstein supérieur		
		GTI	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Buntsandstein supérieur		
			Argiles et grès lie-de-vin	t2a	Buntsandstein supérieur		
			Conglomérat à cornaline	t2C	Buntsandstein supérieur		
			Conglomérat principal (équivalent du Poudingue de Saint-Odile)	t2P	Buntsandstein supérieur		
			Grès vosgien supérieur	t1c	Buntsandstein moyen		
			Grès vosgien inférieur	t1b	Buntsandstein moyen		
			Grès d'Annweiler	t1a	Buntsandstein inférieur		
161	CLERMONT-EN-ARGONNE	Tithonien	Sables verts	n7a	Albien		
			Calcaires à débris	j9b2	Portlandien		
			Pierre châline	j9b1	Portlandien		
			Calcaires cryptocristallins	j9a	Portlandien		
		Oxfordien	Calcaires rocailloux à ptérocères	j7a	Kimmeridgien inférieur		
			Calcaires supérieurs à astartes	j6e	Séquanien (partie supérieure)		
			Calcaires inférieurs à polyptères	j6c	Séquanien (partie inférieure)		
			Argiles à <i>Ostrea</i>	j6b	Séquanien (partie inférieure)		
			Calcaires à trigonies	j6a	Oxfordien (Rauracien)		
			Calcaires en plaquettes				
Calcaire récifal à polyptères ou corallien							
équivalent de la Pierre d' Euville-Lérouville							
162	VIGNEULLES-LES-HATTONCHÂTEL	Oxfordien	Calcaire à astartes	j7	Oxfordien moyen (Séquanien)		
			Calcaire corallien, Calcaire de la Creüe, Pierre d'Euville-Lérouville	j6-5	Oxfordien moyen (Argovien-Rauracien)		
			Marne blanche des Eparges	j5a	Oxfordien moyen		
			Oolithe ferrugineuse	j4c	Oxfordien inférieur		
			Terrain à chailles	j4b	Oxfordien inférieur		

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
163	CHAMBLEY	Dogger	Caillasses à <i>Anabacia</i>	j2a	Bathonien inférieur
			Marnes à <i>Terebratula globata</i>		
			Oolithe de Vionville (équivalent de l'Oolithe miliaire supérieure)	j1c1	Bajocien supérieur
			Marnes de Gravelotte		
			Oolithe de Jaumont		
			Marnes de Longwy	j1b-a	Bajocien moyen et inférieur
			Calcaires à polypiers		
			Calcaires de Haut-Pont		
			Calcaires d'Ottange		
			Marnes de Charennes		
Minerai de fer oolithique	l6	Aalénien			
164	METZ	Dogger	Calcaires à polypiers	j1b-a	Bajocien moyen et inférieur
			Calcaires de Haut-Pont		
			Calcaires d' Ottange		
			Toarcien supérieur ferrugineux		
		Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkhole
			Calcaire à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
165	SAINT-AVOLD	Muschelkalk	Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
			Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle
			Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
		GTI	Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
			Marnes à myacites et Grès coquillier	t3a	Muschelkalk inférieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Trias inférieur
			Couches intermédiaires	t2a	Trias inférieur
			Conglomérat principal	t2P	Trias inférieur
			Grès vosgien	t1c	Trias inférieur
			166	SARREGUEMINES	Muschelkalk
Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur			
Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle			
GTI	Grès coquillier	t3a			Muschelkalk inférieur
	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b			
	Couches intermédiaires	t2a			
167	BITCHE-WALSCHBRONN	Muschelkalk	Calcaires et dolomies	t6a	Lettenkohle
			Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
		GTI	Grès à <i>Voltzia</i> : Grès argileux Grès à <i>Voltzia</i> : Grès à meules	t2b	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires : Le banc de brèche dolomitique supérieure	t2a	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires : Couches intermédiaires supérieures	t2a	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires : la zone violette supérieure	t2a	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires : Couches intermédiaires inférieures	t2a	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat à cornaline	t2c	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat principal	t2P	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien supérieur	t1c	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien inférieur	t1b	Buntsandstein moyen
191	VAUBECOURT	Tithonien	Calcaires à débris (équivalent des Calcaires de Domartin)	j9b	Bononien inférieur
			Calcaires lithographiques	j9a	Bononien inférieur
		Oxfordien	Calcaires	j8a	Kimméridgien inférieur
			Calcaires lithographiques et graveleux	j7c	Séquanien supérieur
			Calcaires oolitiques et lithographiques	j7b	Séquanien moyen
			Marno-calcaires	j7a	Séquanien inférieur
192	SAINT MIHIEL	Oxfordien	Calcaire à astartes	j7	Séquanien
			Oolithe de la Mothe		
				j6	Rauracien
				j5	Argovien
			Oolithe ferrugineuse	j4c	Oxfordien supérieur
Chailles	j4b				

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
193	PONT-A-MOUSSON	Dogger	Oolithe miliaire supérieure (équivalent de l'Oolithe de Royaumeix)	j1c3	Bajocien supérieur
			Oolithe terreuse à <i>Clypeus ploti</i> et <i>Parkinsonia parkinsoni</i>	j1c2	Bajocien supérieur
			Oolithe miliaire inférieure (équivalent de l'Oolithe de Jaumont)	j1c1	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy	j1b-a	Bajocien moyen et inférieur
			Calcaires à polypiers		
			Calcaire à entroques (Roche rouge)		
			Calcaire sableux de Haye		
			Marnes micacées	i6	Aalénien
			Minéral de fer oolithique		
194	NOMENY	Dogger	Calcaire à <i>Clypeus ploti</i>	j1c2	Bajocien supérieur
			Oolithe miliaire inférieure (équivalent de l'Oolithe de Maxéville et du Bâlin inférieur)	j1c1	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy	j1b2	Bajocien moyen
			Calcaires à polypiers supérieurs		
			Oolithe cannabine		
			Calcaires à polypiers inférieurs	lj1-j1b1	Bajocien moyen Aalénien supérieur-Bajocien inférieur
			Roche rouge		
			Calcaire d'Ottange (équivalent du Calcaire sableux de Haye)		
			Marnes micacées		
			Minéral de fer oolithique	i8	Toarcien supérieur
196	SARRE-UNION	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle
			Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
227	BAR-LE-DUC	Tithonien	Portlandien inférieur, Bononien inférieur	j9a	Tithonien inférieur
228	COMMERCEY	Tithonien	Calcaires cariés (=calcaires tachetés de Lorraine)	j9c	Portlandien (= Volgien)
			Oolithe de Bure	j9b	Portlandien (= Volgien)
			Calcaires lithographiques (= partie inférieure des Calcaires du Barrois)	j9a	Portlandien (= Volgien)
			Calcaires lithographiques (= partie inférieure des Calcaires du Barrois)		Portlandien (= Volgien)
			Calcaires lithographiques (= partie inférieure des Calcaires du Barrois)		Portlandien (= Volgien)
			Calcaires lithographiques (= partie inférieure des Calcaires du Barrois)		Portlandien (= Volgien)
			Calcaires lithographiques (= partie inférieure des Calcaires du Barrois)		Portlandien (= Volgien)
		Oxfordien	Calcaire à Astartes (supérieurs)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			Calcaire à Astartes (supérieurs)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			Calcaire à Astartes (supérieurs)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			Oolithe de la Mothe (=récurrence de l'Oolithe à Diceras)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			Calcaire à Astartes (inférieurs)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			calcaire à Astartes (inférieurs)	j7	Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur
			Calcaire à Chaux grasse sidérurgique	j5-6	Oxfordien
			Equivalent de l'Oolithe à <i>Diceras</i> de St. Mihiel		
			Oolithe ferrugineuse		
			Terrain à Chaillies (Zone à <i>Arisphinctes plicatilis</i> et <i>Cardioceras cordatum</i>)	j4c	
				j4b	

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
229	TOUL	Oxfordien	Zone supérieure à polypiers	j5c	Oxfordien moyen
			Oolithe moyenne	j5b	Oxfordien moyen
			Zone inférieure à polypiers	j5a	Oxfordien moyen
			Terrains à chailles (Zone à <i>Mariae</i> à Zone à <i>Plicatilis</i>)	j4	Oxfordien inférieur et moyen
		Dogger	Caillasses à Anabacia (Zone à Zig-Zag) (10-15m)	j2a	Bathonien inférieur
			Oolithe à <i>Clypeus ploti</i> , oolithe miliaire supérieure, Polypiers de Husson oolithe de Royaumeix	j1d1-2	Bajocien supérieur
			Complexe à bancs gréseux Marnes de Gravelotte	j1d1-2	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy, Bâlin (ou oolithe miliaire inférieure, ou oolithe de Maxéville) oolithe de Jaumont (Zones à <i>Subfurcatum</i> ?; <i>Garantiana</i>)	j1c	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy, Bâlin (ou oolithe miliaire inférieure, ou oolithe de Maxéville) oolithe de Jaumont (Zones à <i>Subfurcatum</i> ?; <i>Garantiana</i>)	j1c	Bajocien supérieur
					Bajocien moyen
			Calcaires à polypiers supérieurs (Zone à <i>Humphriesianum</i>)	j1b2	Bajocien moyen
			Oolithe cannabine		Bajocien moyen
			Calcaires à polypiers inférieurs (Zone à <i>Humphriesianum</i>)	j1b1	Bajocien moyen
			oolithe blanche à <i>Clypeus angustiporus</i>	j1a	Bajocien inférieur
			calcaire à entroques (roche rouge)	j1a	Bajocien inférieur
			calcaires sableux de Haye (calcaires d'Ottange)	j1a	Bajocien inférieur
			Marnes micacées	j1a	Bajocien inférieur
			Conglomérat du sommet de la formation ferrugineuse		Aalénien s.s.
230	NANCY	Dogger	Oolithe difforme à <i>Clypeus ploti</i>	j1d	Bajocien supérieur
			Zone à <i>Subfurcatum</i> ? et à <i>Garantiana</i> Bâlin ou Oolithe miliaire inférieure (Oolithe de Maxéville) Marnes de Longwy	j1c	Bajocien supérieur
			Calcaires à Polypiers	j1b1	Bajocien moyen
			Oolithe cannabine	j1b2	Bajocien moyen
			Oolithe blanche (Oolithe à <i>Clypeus angustiporus</i>)	J1a	Bajocien inférieur
			Calcaire à entroques (Roche rouge)	J1a	Bajocien inférieur
			Calcaires sableux de HAYE	J1a	Bajocien inférieur
			Marnes micacées	J1a	Bajocien inférieur
			Minéral de fer ou Minette	I9	Toarcien supérieur, Aalénien
			de la zone à <i>Pseudoradiosa</i> à la zone à <i>Concavum</i>		
231	PARROY	Muschelkalk	Dolomie limite	t6	Lettenkohle
			Marnes à plantes		
			dolomie inférieure		
			Calcaire à térébratules, Couches à cératites et marnes	t5b	Muschelkalk supérieur
232	SARREBOURG	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle
			Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
		GTI	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Trias inférieur: Grès bigarés (Buntsandstein)
			Couches intermédiaires	t2a	Trias inférieur
			Conglomérat principal	t2P	Trias inférieur
			Grès vosgien supérieur	t1c	Trias inférieur
233	SAVERNE	GTI	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2a	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat principal (équivalent du Poudingue de Saint-Odile)	t1c	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien	t1b	Buntsandstein moyen
265	JOINVILLE	Tithonien	Calcaires tubuleux, calcaires tachetés, calcaires cariés, oolithe de Bure	j9a	Portlandien inférieur

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
266	GONDRE COURT-LE-CHÂTEAU	Tithonien	Calcaires cariés	j9c	Portlandien (Volgien)
			Oolithe de Bure	j9b	Portlandien (Volgien)
			Calcaires inférieurs du Barrois	j9a	Portlandien (Volgien)
		Oxfordien	Calcaire à astartes supérieur	j7c	Oxfordien
			Oolithe de la Mothe	j7b	Oxfordien
			Calcaire à astartes inférieur	j7a	Oxfordien
			Calcaires à chaux grasse sidérurgique	j5-6	Oxfordien
			Terrain à chailles	j4b	Oxfordien
		Dogger	Calcaire oolithique	j2b-c	Bathonien moyen et supérieur
267	VEZELISE	Oxfordien		j6	Rauracien
		Dogger	Chailles oxfordiennes	j4b	
			Marnes à <i>Rhynchonelloidella</i>	j2c-b	Bathonien supérieur et moyen
			Caillasses à <i>Anabacia</i>	j2a	Bathonien inférieur
			Oolithe miliaire supérieure (équivalent de l'Oolithe de Royaumeix)	j1c3	Bajocien supérieur
			Oolithe terreuse à <i>Clypeus ploti</i>	j1c2	Bajocien supérieur
			Oolithe miliaire inférieure	j1c1	Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy	j1b-a	Bajocien moyen et inférieur
			Calcaire à polypiers		
			Oolithe à <i>Clypeus angustiporus</i>		
			Roche rouge		
			Calcaire sableux de Haye		
			Marnes micacées		
			Minéral de fer oolithique	j6	Aalénien
			Dolomie et marnes	t6	Lettenkohle
268	BAYON	Muschelkalk	Calcaire à Térébratules, Calcaire et Marnes à Cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
269	LUNEVILLE	Muschelkalk	Calcaire magnésien (Dolomie limite)	t6	Lettenkohle
			Marnes à plantes		
			Dolomie inférieure		
			Zone à <i>Ceratites semipartitus</i>	t5	Muschelkalk supérieur
			Zone à <i>Ceratites nodosus</i>		
			Sous-zone à <i>Encrinurus liliiformis</i>		
		GTI	Grès coquillier	t3	Muschelkalk inférieur
			Argile limite	t2-1	Buntsandstein supérieur
			Grès argileux		
			Grès à <i>Voltzia</i>		
			Couches intermédiaires		
270	CIREY-SUR-VEZOUZE	Muschelkalk	Conglomérat principal	t1b	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien	t1a	Buntsandstein moyen
		GTI	Calcaire à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
			Couches blanches	t4c	Muschelkalk moyen
			Grès coquillier s.l.	t3	Muschelkalk inférieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2a	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat principal (équivalent du Poudingue de Saint-Odile)	t1c	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien	t1b	Buntsandstein moyen

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
302	NEUFCHATEAU	Oxfordien	calcaires à <i>Astartes</i> supérieur	j7c	Oxfordien-Kimméridgien
			Oolithe de la Mothe	j7b	Oxfordien-Kimméridgien
			calcaires à <i>Astartes</i> inférieur	j7a	Oxfordien-Kimméridgien
			Pierre de Dainville	j5-6	Oxfordien moyen
			faciès de l'Oolithe à <i>Diceras</i> et de l'ex Rauracien		
			Calcaires "Argovo-Rauracien" (calcaires coralliens) Zone à <i>Gregoryceras transversarium</i>		
		Dogger	Terrain à Chailles	j4b	Oxfordien
			Marnes à <i>Peltoceras athleta</i>	j3b	Callovien supérieur
			Oolithe ferrugineuse	j3b	Callovien moyen
			Minerai à <i>Reineckeia anceps</i>	j3a	Callovien
			Dalle nacrée	j2b-c	Bathonien moyen et supérieur
			Dalle oolithique (lave)	j1c3	Bathonien inférieur
			Calcaire à <i>Rhynchonella decorata</i>		Bajocien supérieur
			Caillasses à <i>Anabacia</i> ??	j1c3	Bajocien supérieur
			Calcaires à <i>Anabacia</i>	j1c2	Bajocien supérieur
			Oolithe miliaire supérieure	j1c1	Bajocien supérieur
			marno calcaires de la zone à <i>Parkinsonia parkinsoni</i>	j1c1	Bajocien supérieur
			Oolithe miliaire inférieure (Bâlin)	j1b2	Bajocien moyen
			Calcaires à Polypiers supérieurs	j1a-b1	Bajocien inférieur
			Calcaires à Polypiers inférieurs	j2c	Bathonien supérieur et moyen
			"lave"	j2b	Bathonien supérieur et moyen
			Marnes à <i>Rhynchonelloidella</i> Marnes à <i>Rh. varians</i> Caillasses à <i>Anabacia</i> (au Nord) Calcaires à <i>Rhynchonella decorata</i> (au SW)	j2a	Bathonien inférieur
303	CHATENOIS	Dogger	Oolithe miliaire supérieure =Oolithe de Royaumeix (Zone à <i>Parkinsonia schloenbachii</i>) Oolithe terreuse à <i>Clypeus ploti</i> Oolithe miliaire inférieure (Bâlin) Zone à <i>Garantia garanti</i> ? "Marnes de Longwy" = Marnes à <i>Ostrea acuminata</i>	j1c3	Bajocien supérieur
				j1c2	Bajocien supérieur
				j1c1	Bajocien supérieur
				j1c1	Bajocien supérieur
			Calcaires à Polypiers	j1b	Bajocien moyen
			Oolithe cannabine	j1b	Bajocien moyen
			"masse inférieure des Polypiers"	j1b	Bajocien moyen
			Calcaires à Polypiers	j1a	Bajocien inférieur
			Oolithe à <i>Clypeus angustiporus</i>	j1a	Bajocien inférieur
			"Roche rouge"	j1a	Bajocien inférieur
			Calcaire sableux	j1a	Bajocien inférieur
			Zone à <i>L. concava</i>	l6	Aalénien
		Muschelkalk		t5c	Lettenkhole Muschelkalk supérieur
304	MIRECOURT	Muschelkalk	Dolomie de Vittel	t5	Muschelkalk supérieur
			Couches à ceratites et térébratules		
			Couches à entroques		
305	RAMBERVILLERS	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle inférieure
			Calcaire à térébratules	t5	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à cératites		
			Calcaire à entroques		
		GTI	Grès coquillier	t3a	Muschelkalk inférieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2c	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2b	Buntsandstein supérieur
			Zone limite violette	t2a	Buntsandstein inférieur et moyen
306	SAINT-DIE	GTI	Conglomérat principal	t1	Buntsandstein inférieur et moyen
			Grès vosgien	t2b	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2a	Buntsandstein moyen
			Conglomérat principal	t1b	Buntsandstein moyen

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
337	BOURMONT	Dogger	Calcaire à Rhynchonella decorata	j2b-c	Bathonien moyen et supérieur
			Dalle oolithique Oolithe miliaire supérieure	j1c3	Bajocien supérieur
			Calcaire compact sublithographique Marno calcaires de la zone à Parkinsonia parkinsoni	j1c2	Bajocien supérieur
			Calcaires sub-oolithiques plus ou moins marneux Horizon à <i>Clypeus ploti</i> Oolithe miliaire inférieure (Bâlin)		Bajocien supérieur
			Marnes de Longwy	j1b	Bajocien moyen
			Calcaires à Polypiers supérieurs	j1b	Bajocien moyen
			Oolithe cannabine	j1b	Bajocien moyen
			Calcaires à Polypiers inférieurs	j1a	Bajocien inférieur
338	VITTEL	Muschelkalk	Calcaires spathiques		
			Dolomie de Vittel, équivalente du Calcaire à térébratules	t5c	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
		GTI	Couches grises et Couches blanches	t4b	Muschelkalk moyen
			Grès coquillier (?)	t3	Muschelkalk inférieur
			Couches intermédiaires et Grès à <i>Voltzia</i>	t2a-b	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat principal et Grès vosgien	t1	Buntsandstein moyen
339	EPINAL	Muschelkalk	Dolomie inférieure (équivalent de la Dolomie de Vittel)	t6a	Keuper inférieur-Lettenkohle
			Calcaire à térébratules		
			Calcaire à cératites	t5	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t4c	Muschelkalk moyen
		GTI	Couches blanches	t3	Muschelkalk inférieur
			Grès coquillier	t2b	Buntsandstein supérieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2a	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t1c	Buntsandstein moyen
			Zone limite violette	t1b	Buntsandstein moyen
			Conglomérat principal	t1b	Buntsandstein moyen
340	BRUYERES	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Keuper inférieur-Lettenkohle
			Calcaire à térébratules		
			Calcaire à cératites	t5	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques	t3	Muschelkalk inférieur
		GTI	Grès coquillier	t2b	Buntsandstein supérieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2a	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t1c	Buntsandstein moyen
			Zone limite violette	t1b	Buntsandstein moyen
			Conglomérat principal	t2a	Buntsandstein supérieur
			Grès vosgien	t1b	Buntsandstein moyen
341	GERARDMER	GTI	Couches intermédiaires, grès bigarré	t2a	Buntsandstein supérieur
			Conglomérat principal	t1c	Buntsandstein moyen
			Grès vosgien	t1b	Buntsandstein moyen
374	MONTHUREUX-SUR-SAONE	Muschelkalk	Couches à cératites	t5b	Muschelkalk supérieur
			Couches à entroques	t5a	Muschelkalk supérieur
			Couches blanches	t4c	Muschelkalk moyen
		GTI	Grès coquillier	t3	Muschelkalk inférieur
			Grès à <i>Voltzia</i>	t2b	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2a	Buntsandstein supérieur
			Zone limite violette	t1	Buntsandstein moyen
			Conglomérat du grès vosgien		

N° de la feuille	Nom de la feuille	Aquifère	Unité Lithostratigraphique	Notation carte	Age porté sur la carte
375	PLOMBIERES-LES-BAINS	Muschelkalk	Dolomie inférieure	t6a	Lettenkohle inférieure
			Calcaire à cératites	t5	Muschelkalk supérieur
			Calcaire à entroques		
			Couches blanches	t4D	Muschelkalk moyen
		GTI	Grès à <i>Voltzia</i>	t2b-3	Buntsandstein supérieur
			Couches intermédiaires	t2a	Buntsandstein supérieur
			Zone limite viloette	t1	Buntsandstein moyen
			Conglomérat principal		
			Grès vosgien		

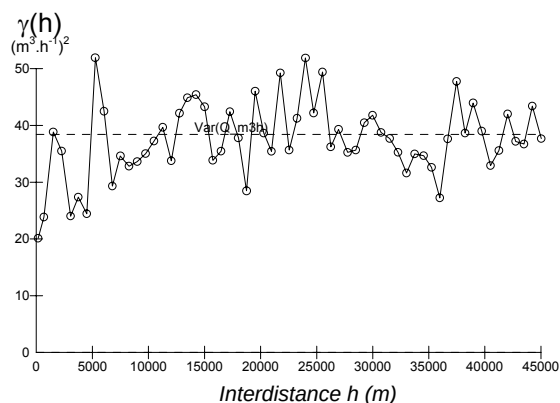
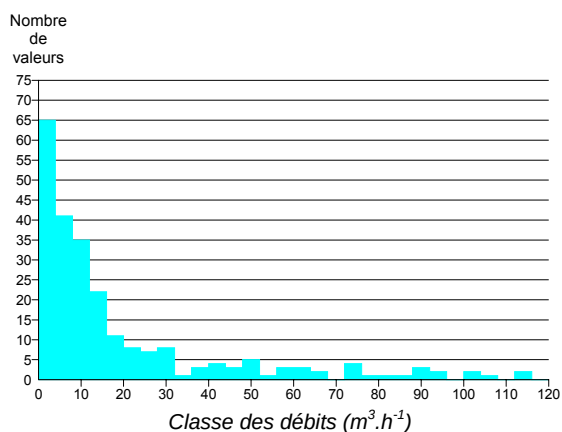
Annexe 3

Etudes géostatistiques sur les débits Réservoirs de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschlelkalk et du Buntsandstein

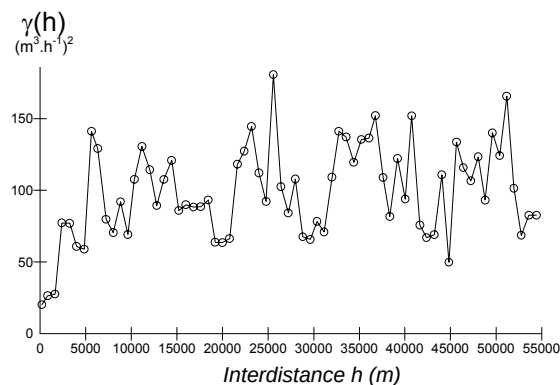
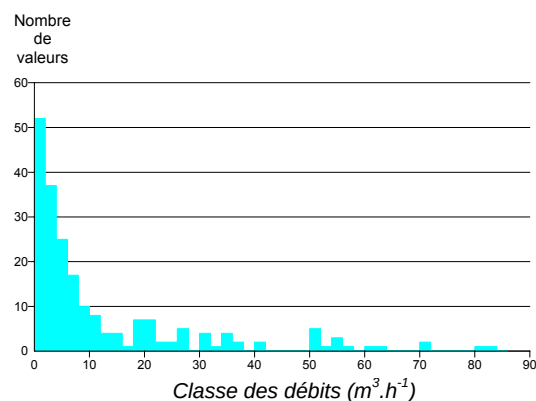
Le débit étant un des deux paramètres fondamentaux pour réaliser l'atlas des ressources énergétiques des principaux aquifères lorrains, les graphiques se rapportant aux études géostatistiques des quatre réservoirs aquifères de l'Oxfordien, du Dogger, du Muschelkalk et du Buntsandstein sont présentés dans la présente annexe.

Les variogrammes expérimentaux obtenus ont tous un aspect erratique. Pour les réservoirs du Dogger et du Buntsandstein, les débits correspondants à des zones minières ou au contraire à des zones non minières ont été étudiés séparément. Pour le Muschelkalk, aucune structuration des données de débits n'est apparue.

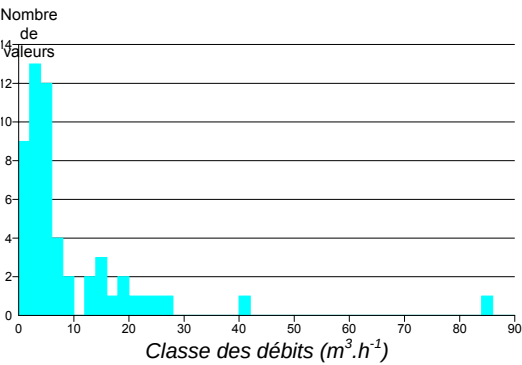
De manière générale, aucune anisotropie* n'a été appréhendée dans ces études (il y a relativement peu de données de débit qui ont été collectées, et leur nature est très disparate).



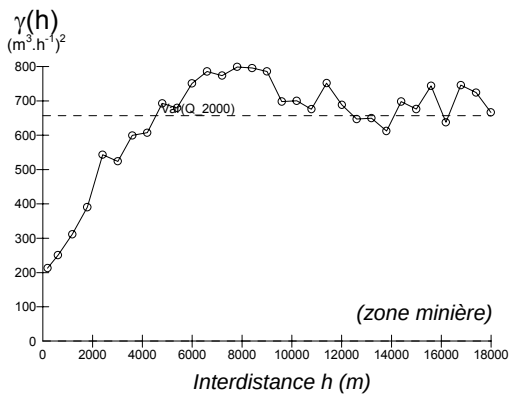
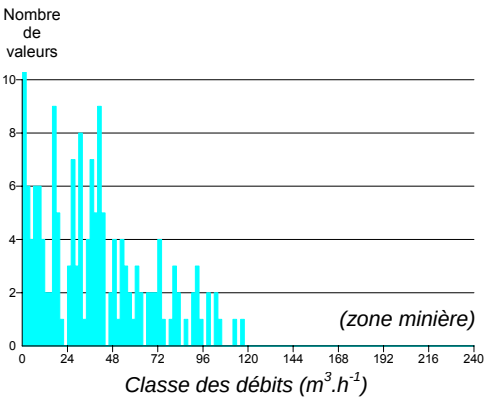
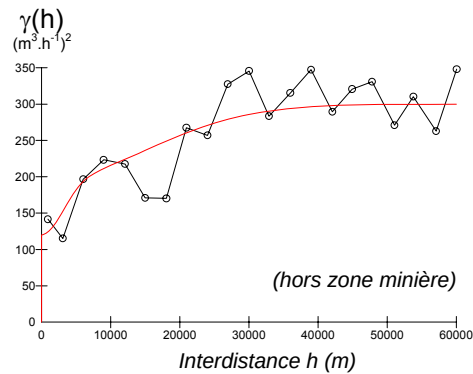
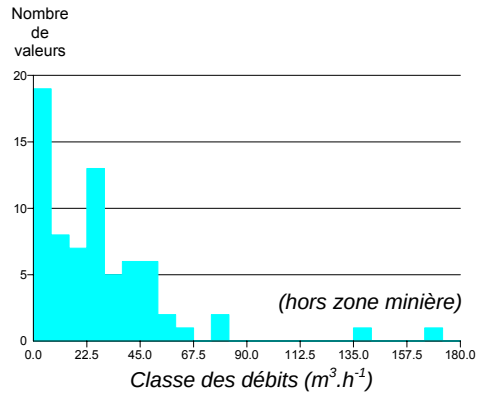
Etude géostatistique des débits de l'Oxfordien.



Etude géostatistique des débits du Dogger.



Etude géostatistique des débits du Muschelkalk.



Etude géostatistique des débits du Buntsandstein.

Rappel sur les modèles de variogramme les plus courants :

Modèle sphérique :

Si $h \leq a$, $\gamma(h) = C \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right)$; si $h \geq a$, $\gamma(h) = C$; où C est le palier et a est la portée

Modèle cubique :

Si $h \leq a$, $\gamma(h) = C \cdot \left(7 \cdot \frac{h^2}{a^2} - \frac{35}{4} \cdot \frac{h^3}{a^3} + \frac{7}{2} \cdot \frac{h^5}{a^5} - \frac{3}{4} \cdot \frac{h^5}{a^5} \right)$; si $h \geq a$, $\gamma(h) = C$; où C est le palier et a est la portée

Modèle gaussien :

$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \text{Exp}\left(-\frac{h^2}{2 \cdot a^2}\right) \right)$; où C est le palier et a est le paramètre d'échelle



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Lorraine
1, avenue du Parc de Brabois
54700 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03 83 44 81 49