



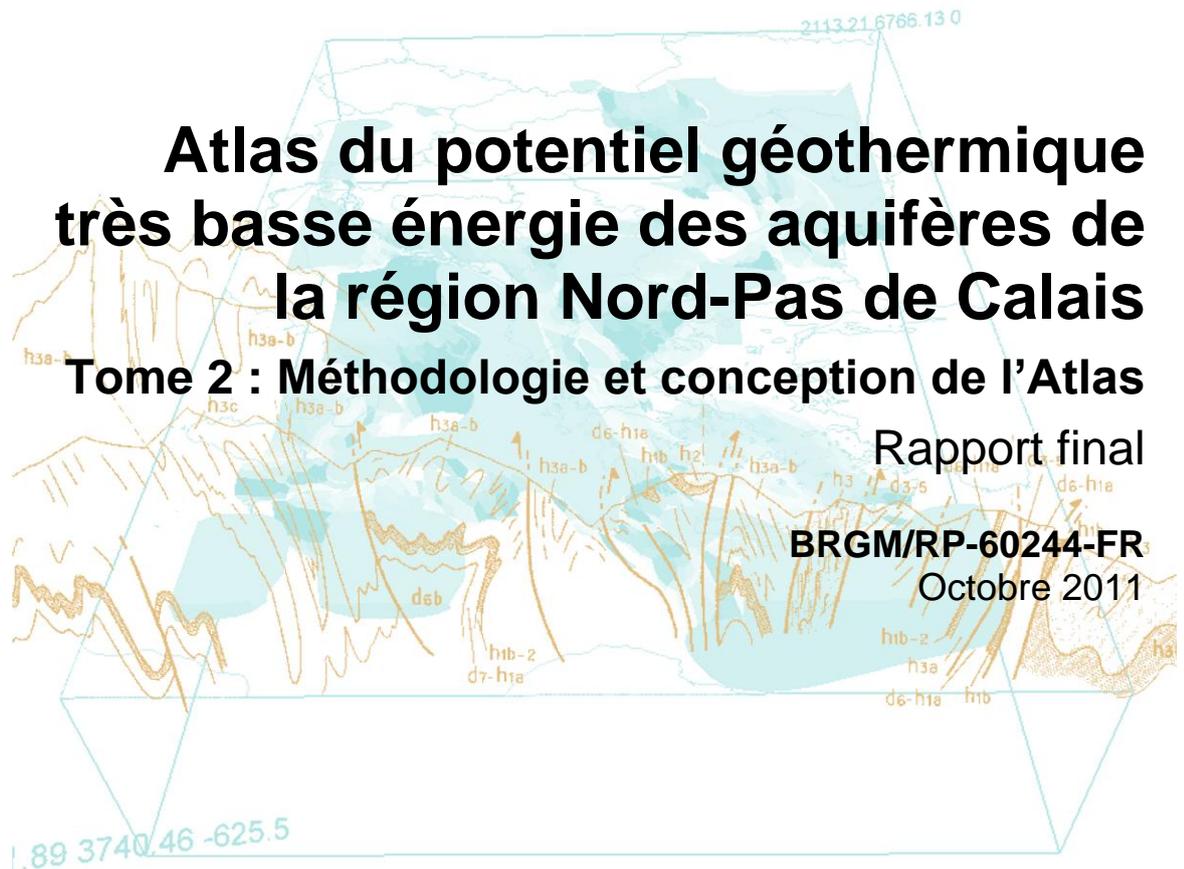
Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais

Tome 2 : Méthodologie et conception de l'Atlas

Rapport final

BRGM/RP-60244-FR

Octobre 2011



Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais

Tome 2 : Méthodologie et conception de l'Atlas

Rapport final

BRGM/RP-60244-FR

Octobre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 09GTHB08

J. PICOT et K. PIRA

Avec la collaboration de

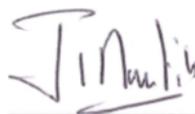
B. BOURGINE et P. HERNIOT

Vérificateur :

Nom : J.-C. MARTIN

Date : 19/09/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : J.-R. MOSSMANN

Date : 06/10/2011

Signature :



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

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

Mots clés : atlas, aide décision, géothermie, pompe à chaleur, géothermie basse énergie, piézométrie, température, débit, géologie régionale, aquifère, Nord-Pas de Calais, réglementation, financement.

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

J. Picot et K. Pira (2011) – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais. Rapport final. BRGM/RP-60244-FR, 2 tomes, 274 p., 90 fig., 19 tabl., 10 annexes.

Synthèse

Le Conseil régional Nord-Pas de Calais, l'ADEME et le BRGM ont établi une convention visant à la création d'un outil prospectif innovant d'aide à la décision en matière de développement de la géothermie. Cet outil, mis en place sous la forme d'un site internet, désigné « Atlas géothermique très basse énergie », concerne la géothermie très basse énergie (TBE) sur aquifère. Il est destiné au grand public, aux maîtres d'œuvres (bureaux d'études, architectes) et aux maîtres d'ouvrages qui envisagent l'installation d'une pompe à chaleur sur aquifère lors du choix d'approvisionnement énergétique d'une construction dans la région Nord-Pas de Calais.

Cet outil a pour objectif de fournir les paramètres nécessaires pour apprécier, en première approche, l'intérêt de mettre en place un projet de géothermie très basse énergie, mais n'a pas vocation à se substituer aux études de faisabilité à réaliser à la parcelle, préalablement à tout projet.

Le tome 1 du présent rapport expose les principes généraux de la géothermie, les principaux mécanismes d'aides et procédures incitatives ainsi que le contexte réglementaire de la géothermie. La méthodologie du projet et les résultats de l'atlas sont traités dans le tome 2.

Les paramètres, appelés « critères », pris en compte pour déterminer le potentiel géothermique des aquifères sont la profondeur d'accès à la ressource en eau, le débit d'exploitation par forage et la température de la nappe. Différentes approches statistiques ont été utilisées selon le nombre de données et d'études disponibles sur les aquifères pour dessiner les cartes critères. Les résultats obtenus pour le potentiel géothermique du meilleur aquifère sont les suivants, exprimés en pourcentages de couverture de la région Nord-Pas de Calais :

- 26% du territoire dispose d'un potentiel géothermique fort ;
- 34% du territoire dispose d'un potentiel géothermique moyen ;
- 7% du territoire dispose d'un potentiel géothermique faible ;
- 28% du territoire dispose d'un potentiel géothermique indéterminé par manque de données indispensables ;
- 5% du territoire ne renferme pas de nappe régionale dans la tranche des 100 premiers mètres de profondeur.

Le potentiel géothermique a été évalué pour des mailles de 500 m de côté et de 100 m de profondeur. Ces mailles ont été intégrées sur un système d'information géographique (SIG), ce qui permet à l'utilisateur d'avoir accès aux informations des différents aquifères par une interrogation cartographique, et de choisir la solution la plus adaptée à la réalisation d'une installation géothermique. L'application ainsi réalisée est en accès libre via le portail régional du site internet ADEME-BRGM : <http://www.geothermie-perspectives.fr>.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte régional du Nord-Pas de Calais	13
2.1. DONNÉES PAYSAGÈRES ET RÉGIONS NATURELLES.....	13
2.2. TOPOGRAPHIE	15
2.3. NATURE, GÉOMÉTRIE ET STRUCTURE DES AQUIFÈRES.....	17
2.3.1. Les calcaires paléozoïques	20
2.3.2. Le Jurassique du Boulonnais	21
2.3.3. La Craie du Crétacé	21
2.3.4. Les Sables landéniens	22
2.3.5. Les Aquifères quaternaires.....	22
2.3.6. Structure	23
3. Méthodologie de conception de l’atlas Nord-Pas de Calais	25
3.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	25
3.1.1. Principe de l’élaboration des cartes du potentiel	25
3.1.2. Inventaire des données utilisées pour le projet	31
3.2. MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DU CRITÈRE « PROFONDEUR D’ACCÈS À LA RESSOURCE EN EAU »	34
3.2.1. Création d’un modèle géologique.....	34
3.2.2. Définition du critère « profondeur d’accès à la ressource en eau ».....	38
3.3. MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES CRITÈRES « DÉBIT D’EXPLOITATION PAR FORAGE » ET « TEMPÉRATURE ».....	39
3.3.1. Analyse de la distribution des valeurs	39
3.3.2. Analyse géostatistique.....	41
3.3.3. Précision sur le calcul des débits d’exploitation par forage	41
3.4. MÉTHODOLOGIE D’ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX	42
3.4.1. Paramètres de caractérisation du pouvoir corrosif des eaux souterraines.....	43
3.4.2. Paramètre de caractérisation du pouvoir encroûtant ou colmatant des eaux souterraines : le titre hydrométrique (TH)	44
4. Potentiel géothermique des aquifères du Nord-Pas de Calais	45
4.1. AVERTISSEMENT	45

4.3. AQUIFÈRE DES SABLES PISSARDS	47
4.3.1. Limite d'extension retenue	47
4.3.2. Définition du critère profondeur	47
4.3.3. Définition du critère débit d'exploitation par forage	51
4.3.4. Définition du critère température	52
4.3.5. Qualité de l'eau	54
4.4. AQUIFÈRE DES SABLES LANDÉNIENS.....	55
4.4.1. Limite d'extension retenue	55
4.4.2. Définition du critère profondeur	55
4.4.3. Définition du critère « débit d'exploitation par forage »	61
4.4.4. Définition du critère température	63
4.4.5. Qualité de l'eau	64
4.5. AQUIFÈRE DE LA CRAIE.....	66
4.5.1. Limite d'extension retenue	66
4.5.2. Définition du critère profondeur	66
4.5.3. Définition du critère débit d'exploitation par forage	75
4.5.4. Définition du critère température	78
4.5.5. Qualité de l'eau	83
4.6. AQUIFÈRE DES CALCAIRES CARBONIFÈRES DE LA RÉGION LILLOISE ET DE L'AVESNOIS	85
4.6.1. Extension retenue	85
4.6.2. Définition du critère profondeur	86
4.6.3. Définition du critère « débit d'exploitation par forage »	89
4.6.4. Définition du critère température	93
4.6.5. Qualité de l'eau	97
4.7. AUTRES AQUIFÈRES	101
4.7.1. L'aquifère des Sables Verts aptien-albiens.....	101
4.7.2. Les aquifères jurassiques	101
4.7.3. L'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais	107
4.7.4. Les aquifères du Dévonien moyen et supérieur.....	108
4.7.5. Conclusion sur le potentiel géothermique de ces aquifères.....	109
4.9. SYNTHÈSE DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DES AQUIFÈRES DU NORD- PAS DE CALAIS	111
4.10. DIFFUSION DES RÉSULTATS	112
4.10.1. Données générales du site	112
4.10.2. Outil de consultation à l'échelle du Nord-Pas de Calais.....	113

5. Conclusion	119
6. Glossaire	121
7. Bibliographie	123
8. Annexes	127

Liste des illustrations

Figure 1 : Localisation des pays du Nord-Pas de Calais	14
Figure 2 : Relief et cours d'eau du Nord-Pas de Calais.....	16
Figure 3 : Coupes géologiques régionales (J Beckelynck, 1981).....	17
Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Nord-Pas de Calais	18
Figure 5 : Domaines et systèmes aquifères de la région Nord-Pas de Calais	20
Figure 6 : Evolution de la note du critère du débit d'exploitation du forage.....	27
Figure 7 : Evolution de la note du critère température de l'eau de l'aquifère	28
Figure 8 : Evolution de la note du critère profondeur d'accès à l'eau.....	29
Figure 9 : Vue 3D du toit des Sables landéniens (dilatation en Z égale à 70).....	36
Figure 10 : Profondeur du toit des Sables landéniens.....	37
Figure 11 : Secteur retenu pour l'étude de l'aquifère des Sables landéniens	38
Figure 12 : Exemple de boîte à moustache de Tukey	40
Figure 13 : Limite retenue pour l'étude de l'aquifère des Sables Pissards.....	47
Figure 14 : Isohypses du mur des Sables Pissards (en mètre NGF)	48
Figure 15 : Epaisseur des Sables Pissards	49
Figure 16 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans la Plaine Maritime.....	50
Figure 17 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans les Bas-Champs.....	50
Figure 18 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables Pissards ($m^3/h/m$).....	51
Figure 19 : Histogramme des débits spécifiques ($m^3/h/m$) recensés dans les Sables Pissards de la Plaine Maritime.....	52
Figure 20 : Histogramme des températures de la nappe des Sables Pissards.....	53
Figure 21 : Représentation du pH de la nappe des Sables Pissards par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey	54
Figure 22 : Les extensions des Sables du Landénien supérieur	55
Figure 23 : Isohypses du toit des Sables landéniens (en mètre NGF)	57

Figure 24 : Epaisseur des Sables landéniens (en mètre)	58
Figure 25 : Carte piézométrique des Sables landéniens.....	60
Figure 26 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables landéniens	62
Figure 27 : Histogramme des débits spécifiques (m ³ /h/m) recensés dans les Sables landéniens	62
Figure 28 : Histogramme des températures de la nappe des Sables landéniens	63
Figure 29 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe des Sables landéniens	64
Figure 30 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des Sables landéniens par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey	65
Figure 31 : Extension retenue pour l'aquifère de la Craie	66
Figure 32 : Isohypses du toit de la Craie crétacée (en mètre NGF).....	68
Figure 33 : Epaisseur de la Craie crétacée (en mètre)	69
Figure 34 : Zones libre, captive et artésienne de la nappe de la Craie.....	70
Figure 35 : Carte piézométrique de la nappe de la Craie – Basses Eaux 2009 (CARDIN et al., 2011).....	73
Figure 36 : Carte des valeurs initiales de perméabilité de la Craie séno-turonienne (BUSCARLET et al, 2011).....	76
Figure 37 : Histogramme des températures de la nappe de la Craie	79
Figure 38 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe de la Craie	79
Figure 39 : Température de l'eau de l'aquifère de la Craie en fonction de la profondeur.....	80
Figure 40 : Valeur moyenne mensuelle de la température de la nappe (en degré Celsius).....	81
Figure 41 : Interpolation de la température de la nappe de la craie à partir des données hivernales.	82
Figure 42 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe de la Craie par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey	84
Figure 43 : Isohypses du toit du Paléozoïque dans la région lilloise (en mètre NGF)	85
Figure 44 : Carte piézométrique d'octobre 2010 des Calcaires carbonifères de la région lilloise et de Belgique (CRASTES DE PAULET et al., 2010)	87
Figure 45 : Carte piézométrique d'octobre 1967 des Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant – Ferrière-la-Petite (DASSONVILLE G. et PLAT R., 1968)	88
Figure 46 : Carte des transmissivités de la nappe des Calcaires carbonifères issu de la modélisation de 1981 (image provenant de P. COMBES 1991 « modélisation mathématique de la nappe du calcaire carbonifère », modifié BRGM).....	89
Figure 47 : Carte des débits d'exploitations par forages obtenus à partir des données de transmissivités de la modélisation de 1981	90
Figure 48 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant - Ferrière.....	91

Figure 49 : Histogramme des débits d'exploitation par forage, calculés à partir des débits spécifiques avec un rabattement de 5 m.....	92
Figure 50 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Marbaix – Avesnes-sur-Helpe.....	92
Figure 51 : Isolignes des températures de la nappe des Calcaires carbonifères lillois.....	94
Figure 52 : Répartition des points de mesure de la température de la nappe des Calcaires carbonifères de l'Avesnois.....	96
Figure 53 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères lillois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.....	98
Figure 54 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères de l'Avesnois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.....	100
Figure 55 : Colonne lithostratigraphique des terrains jurassiques présents dans le Boulonnais.....	102
Figure 56 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Grès de Châtillon (ADES et BSS).....	103
Figure 57 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires de Breckerecque (ADES et BSS).....	105
Figure 58 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère de l'Oolithe de Marquise (ADES et BSS).....	106
Figure 59 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais (ADES et BSS).....	107
Figure 60 : Histogrammes des caractéristiques hydrodynamiques et des températures des aquifères dévoniens recensés dans la BSS et ADES.....	109
Figure 61 : Page d'accueil du site Géothermie Perspectives.....	113
Figure 62 : Fenêtre d'accueil de l'espace régional Nord-Pas de Calais.....	114
Figure 63 : Fenêtre d'interrogation de l'outil via la carte régionale.....	115
Figure 64 : Fenêtre de recherche par commune.....	115
Figure 65 : Fenêtre cartographique à l'échelle communale.....	116
Figure 66 : Exemple de fiche de renseignement au droit de la commune de Cysoing.....	117

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux réservoirs aquifères de la région Nord-Pas de Calais.....	19
Tableau 2 : Nombre de points BSS ayant des données utiles au projet classés par aquifère.....	32
Tableau 3 : Choix des analyses pour les critères « débit d'exploitation » et « température ».....	39
Tableau 4 : Distribution des valeurs de débits spécifiques des Sables Pissards dans la Plaine Maritime.....	51

Tableau 5 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Sables Pissards.....	53
Tableau 6 : Distribution des valeurs de débits spécifiques de la nappe des Sables landéniens	61
Tableau 7 : Synthèse des données recueillies sur la température de la nappe des Sables landéniens	63
Tableau 8 : Synthèse des données recueillies sur la température de la nappe de la Craie	78
Tableau 9 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Calcaires carbonifères lillois.	93
Tableau 10 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Calcaires carbonifères de l'Avesnois.....	95
Tableau 11 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Grès de Châtillon	103
Tableau 12 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Calcaires de Brecquerecque	104
Tableau 13 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère de l'Oolithe de Marquise	106
Tableau 14 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais	107
Tableau 15 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour les aquifères du Dévonien moyen et supérieur.....	108
Tableau 16 : Statistiques sur le potentiel géothermique de chaque aquifère étudié	111

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes des critères par aquifère : profondeur d'accès à la ressource, débit d'exploitation par forage, température de la nappe et potentiel géothermique	129
Annexe 2 Carte du potentiel géothermique régional	147
Annexe 3 Carte des aquifères n'ayant pas un potentiel géothermique défini	151

1. Introduction

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

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

L'objet du présent projet est d'évaluer les potentialités que représentent les ressources géothermiques superficielles, situées à une profondeur inférieure à 100 m, ce qui correspond à la géothermie très basse énergie. Ce projet fait l'objet d'une convention entre le Conseil Régional Nord-Pas de Calais, l'ADEME et le BRGM.

Il s'agit ainsi de caractériser les possibilités en géothermie très basse énergie sur le territoire du Nord-Pas de Calais. Cette caractérisation porte sur l'énergie contenue dans les aquifères, en d'autres termes le « potentiel géothermique des aquifères ».

L'atlas comprend un système d'information géographique (SIG) mis en ligne via le site Internet de l'ADEME et du BRGM spécifique à la géothermie : www.geothermie-perspectives.fr.

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

Le présent rapport s'articule en 2 tomes. **Le premier tome** est consacré aux principes généraux de la géothermie, aux principaux mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives liés à la géothermie, et au contexte réglementaire. **Le second tome** traite, quant à lui, du contexte régional du Nord-Pas de Calais, de la méthodologie employée pour créer cet atlas, des résultats obtenus par aquifères et enfin de la diffusion des résultats sur le site géothermie-perspectives.

2. Contexte régional du Nord-Pas de Calais

2.1. DONNÉES PAYSAGÈRES ET RÉGIONS NATURELLES

Le territoire concerné comprend les départements du Nord (5800 km², 447 hab/km²) et du Pas-de-Calais (6700 km², 218 hab/km²). L'ensemble est frontalier avec la Belgique et possède une façade maritime (Mer du Nord et Manche).

La région peut être décrite comme un assemblage de petites régions caractérisées par leur relief et leur pédologie. 6 zones géomorphologiques sont distinguables (Figure 1) :

- LE BOULONNAIS,
- L'ARTOIS
- LA PLAINE D'ARRAS,
- L'AVESNOIS,
- LES FLANDRES,
- LA RÉGION LILLOISE.

Le Boulonnais est le prolongement nord-ouest de l'Artois. Mais l'érosion s'est effectuée au fur et à mesure de la formation de l'anticlinal de l'Artois et a mis à nu les terrains du Jurassique, voire du Paléozoïque à Ferques, donnant un relief parfois encaissé.

Cette zone nous montre 2 paysages différents :

- le Bas Boulonnais, qui représente une dépression où se trouvent les affleurements de terrains primaires,
- le Haut Boulonnais, qui constitue la périphérie de la boutonnière boulonnaise. Son altitude diminue à la fois vers les plaines flamandes au Nord, devant la Picardie et à l'est en rejoignant l'Artois.

L'Artois correspond à un bombement anticlinal limitant naturellement le plateau picard au sud et les plaines flamandes du nord. Ce relèvement s'y achève par une faille de regard nord, dominant la Flandre d'une cinquantaine de mètres. Le dôme de l'Artois s'étend du nord-ouest au sud-est, depuis le Boulonnais jusqu'au Cambrésis.

La plaine d'Arras se situe au niveau d'une incurvation importante de l'anticlinal artésien vers l'est et constitue un plateau crayeux d'altitude moyenne de 100 mètres limité à l'est par le Cambrésis.

La **plaine de la Scarpe** est bordée au nord par les **collines de la Pévèle**. Au sud, **l'Ostrevent** s'étale de Douai à l'ouest, jusqu'à Raismes à l'est et offre un relief moins monotone avec des altitudes comprises entre 15 et 90 m.

L'Avesnois est le prolongement de l'Ardenne vers l'ouest. En effet, sous les limons fertiles (favorables à la culture du blé et de la betterave) et la craie (de faible épaisseur si elle n'est pas absente) se retrouvent les structures paléozoïques plissées de cette région d'aspect verdoyant.

La Flandre est le commencement de la grande plaine de l'Europe du Nord se continuant en Belgique, dans les Pays-Bas et en Allemagne. Son altitude est faible (30 m) sauf pour les buttes témoins tertiaires que sont les Monts des Flandres (140 m). À l'ouest, se trouve la plaine maritime façonnée par l'influence anthropique.

La région lilloise est actuellement une immense zone urbaine (Lille-Roubaix-Tourcoing-Armentières) implantée sur l'anticlinal du Mélandois faisant affleurer des terrains crétacés.

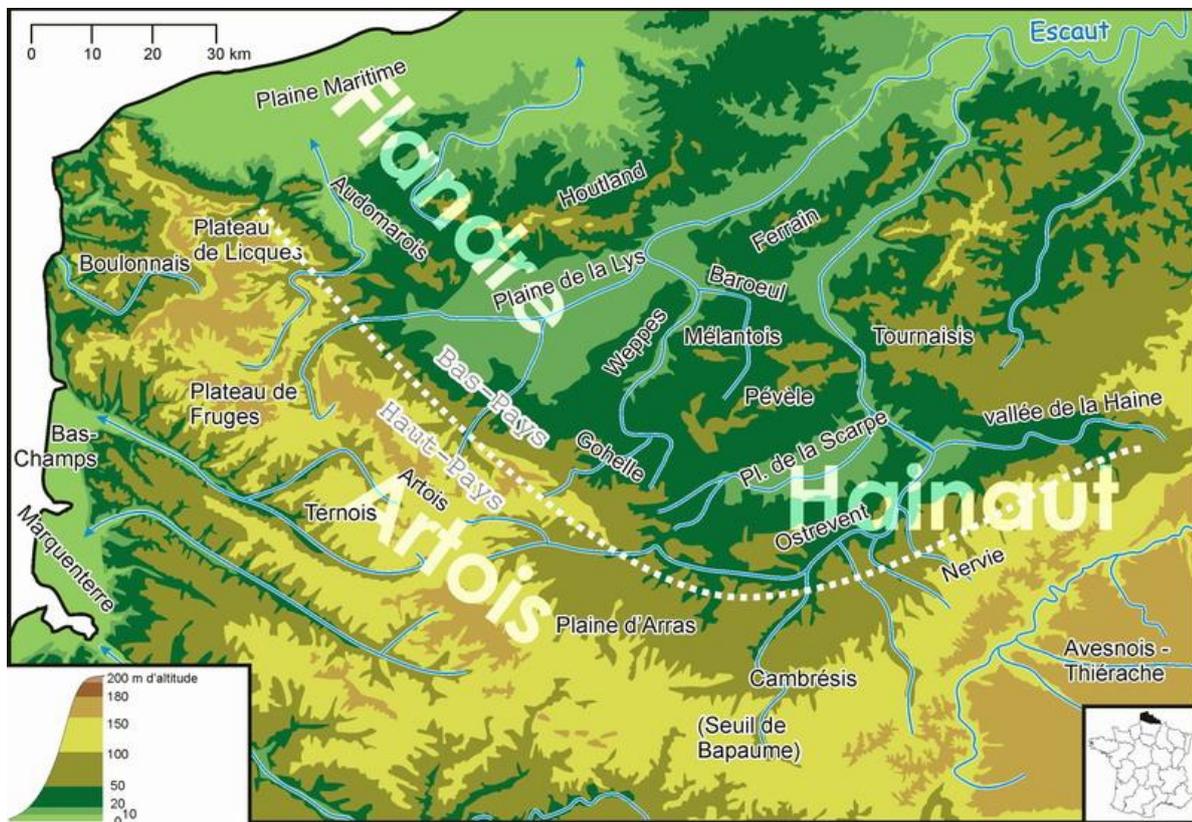


Figure 1 : Localisation des pays du Nord-Pas de Calais

2.2. TOPOGRAPHIE

Le relief est peu prononcé dans son ensemble (Figure 2) : au nord, s'étendent les plaines des Flandres (localement sous le niveau de la mer) et de la Lys, puis des plateaux crayeux d'altitude modeste (60 à 120 m). À l'est, l'altitude augmente à l'approche de l'Avesnois et du massif ardennais (377 m au sud de Revin). La partie méridionale de la région est marquée par un relèvement qui court du Boulonnais à l'Ardenne et dont la partie occidentale, nord-ouest/sud-est, constitue les collines de l'Artois dont l'altitude décroît du Haut Boulonnais (211 m) jusqu'à Arras (70 m).

La principale **caractéristique hydrographique** du Nord-Pas de Calais est l'absence de grands fleuves et de reliefs importants. Les cours d'eau, constitués de rivières et de petits fleuves côtiers, se caractérisent par la faiblesse de leur débit et de leur pente. Le total des débits moyens interannuels dans le Nord - Pas-de-Calais ($75 \text{ m}^3/\text{s}$) est 5 fois plus faible que le celui de la Seine et 10 fois moindre que celui de la Loire - le module le plus important est celui de la Lys : $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ à son entrée en Belgique, à Wervicq.

La région a une forte tradition d'aménagements hydrauliques : lutte contre les intrusions salées, assainissement des zones humides, évacuation des eaux de ruissellement, canaux, moulins... Avec 650 km de cours d'eau et canaux, elle a un réseau de voies navigables sans équivalent en France. Les faibles pentes ont incité l'homme à canaliser les cours d'eau et à tisser un réseau maillé de canaux entre les différents bassins. Seules l'Authie, la Canche, la Liane, la Slack et le Wimereux sont hydrauliquement indépendantes. Des canaux de liaison permettent à l'eau de s'écouler de bassin à bassin, et parfois même, grâce à des stations de pompages, d'inverser le cours de l'eau.

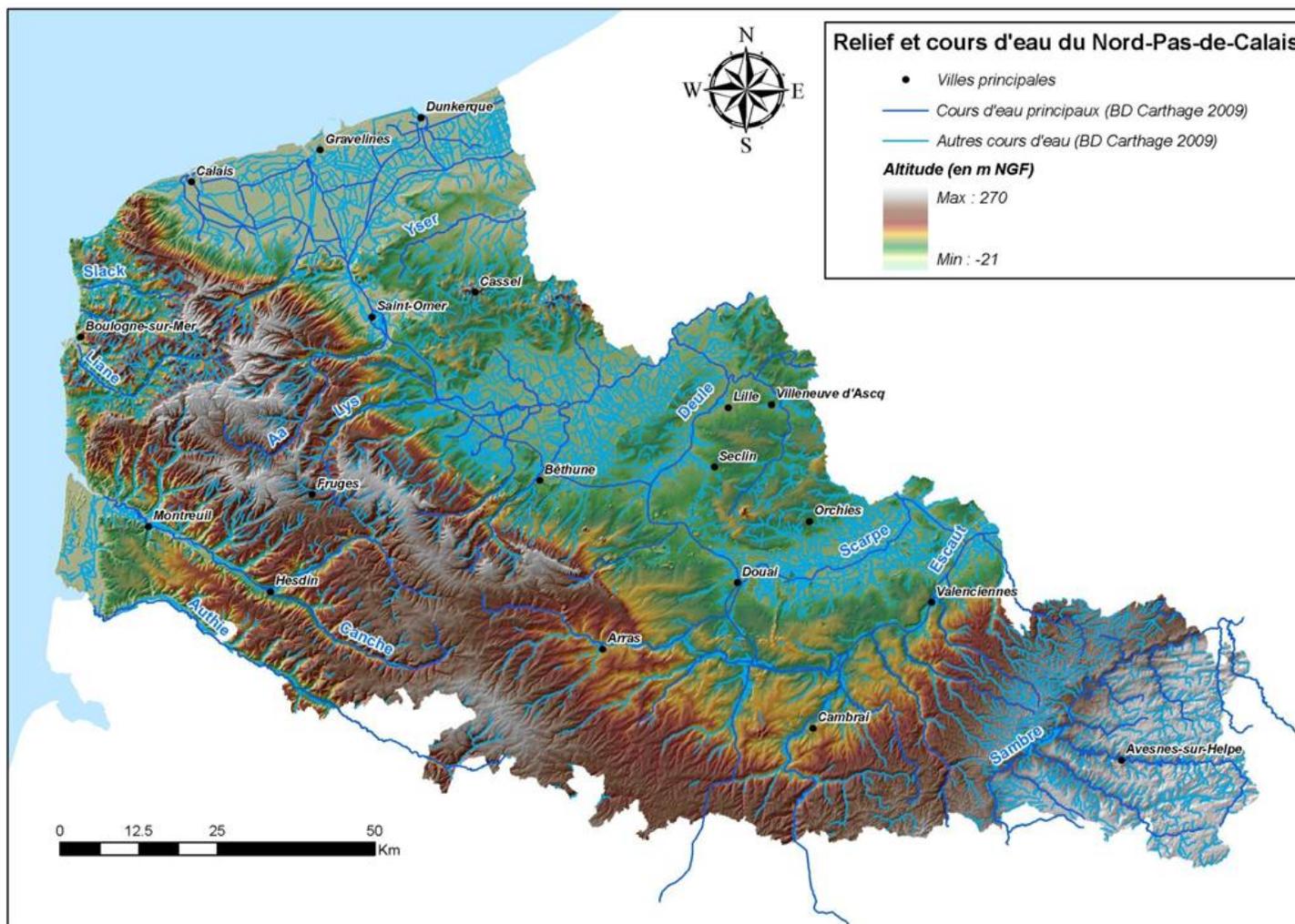


Figure 2 : Relief et cours d'eau du Nord-Pas de Calais

2.3. NATURE, GÉOMÉTRIE ET STRUCTURE DES AQUIFÈRES

La région Nord - Pas-de-Calais appartient aux parties nord du Bassin de Paris et sud du Bassin de Bruxelles, séparées par l'anticlinal faillé de l'Artois, d'axe nord-ouest/sud-est. Le Crétacé supérieur, discordant sur des structures paléozoïques complexes, affleure sur 60 % du territoire et les formations cénozoïques sur 30 % (Figure 4). Les formations crétacées, largement recouvertes par des limons, s'appuient à l'est sur le massif paléozoïque ardennais (l'Avesnois) alors qu'elles s'ennoient au nord sous le Tertiaire des bassins des Flandres et d'Orchies, séparés par l'anticlinal du Mélantois. Au nord-ouest, l'anticlinal de l'Artois s'ouvre sur les terrains jurassiques et paléozoïques de la « boutonnière » du Boulonnais, terminaison orientale de l'anticlinal du Weald (cf. coupes de la Figure 3).

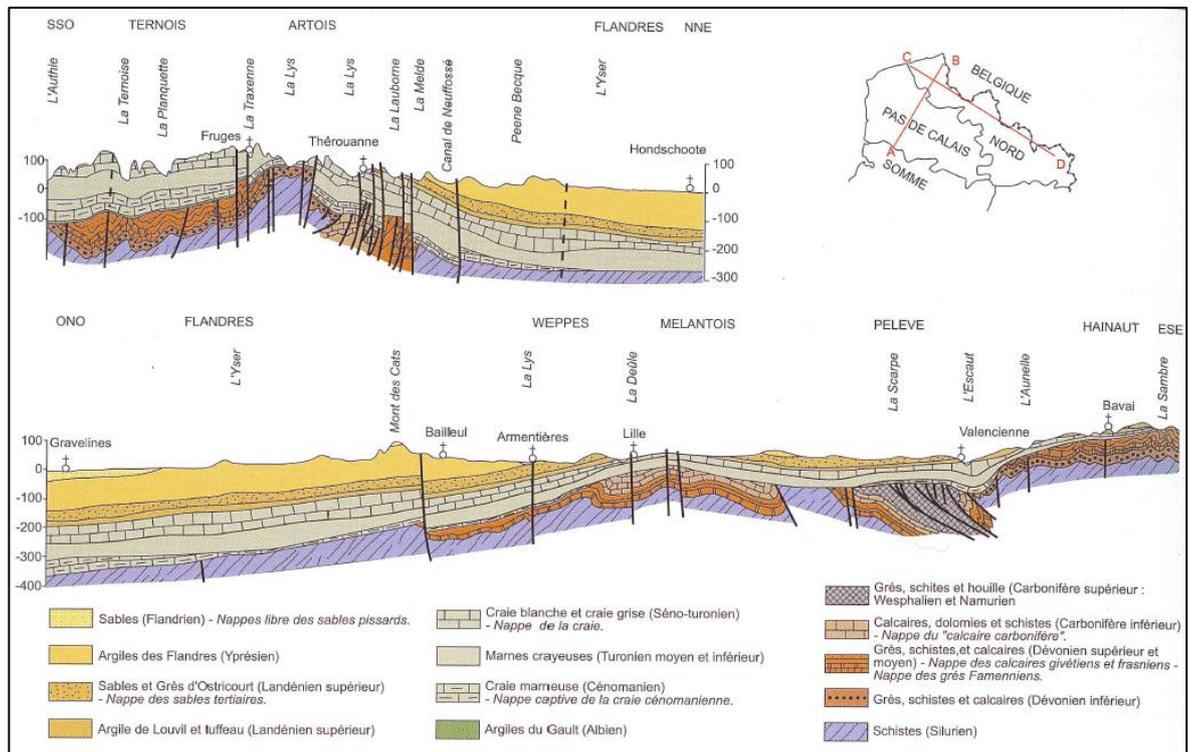


Figure 3 : Coupes géologiques régionales (J Beckelynck, 1981)

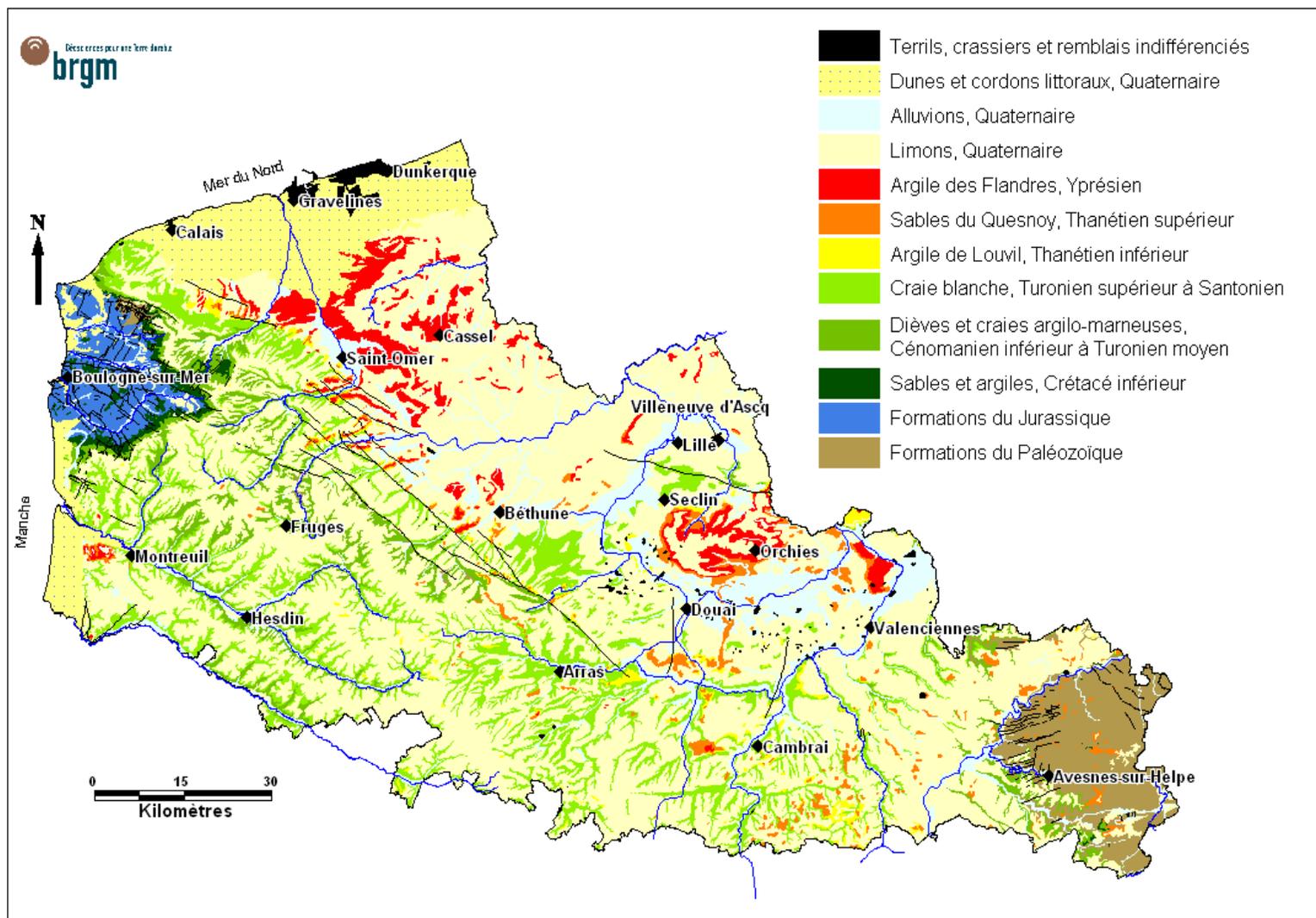


Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Nord-Pas de Calais

La succession lithologique des terrains permet de différencier plusieurs réservoirs aquifères, séparés par des couches imperméables, dont la disposition est synthétisée dans le tableau suivant (Tableau 1).

QUATERNAIRE	Alluvions anciennes et modernes du Quaternaire	Aquifère ¹
	Sables Pissards	Aquifère
	Limons des plateaux du Quaternaire	Aquiclude ²
TERTIAIRE	Argiles des Flandres (Argiles d'Orchies et de Roubaix) de l'Yprésien	Aquiclude
	Sables d'Ostricourt, du Quesnoy, de Grandglise et de Bracheux du Landénien supérieur (ou Thanétien supérieur)	Aquifère
	Argile de Louvil du Landénien inférieur (ou Thanétien inférieur)	Aquiclude
CRÉTACÉ SUPÉRIEUR	Craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien	Aquifère
	Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen	Aquiclude et parfois aquifère
	Craies et marnes du Cénomanién	Aquiclude et parfois aquifère
CRÉTACÉ INFÉRIEUR	Argiles du Gault de l'Albien	Aquiclude
	Sables verts aptien-albiens	Aquifère
	Sables et argiles wealdiens	Aquifère et aquiclude
JURASSIQUE	Ensembles de formations calcaires, grès, argiles et sables jurassiques du Boulonnais	Aquifère et aquiclude
PALÉOZOÏQUE	Ensembles de formations du Paléozoïque	Aquifère et aquiclude

Tableau 1 : Principaux réservoirs aquifères de la région Nord-Pas de Calais

¹ Aquifère : niveau géologique perméable potentiellement producteur d'eau.

² Aquiclude : niveau géologique imperméable potentiellement non producteur d'eau

D'une manière plus précise et à partir des systèmes aquifères prédéfinis (Figure 5), il est possible de distinguer, du plus profond au plus superficiel, les réservoirs suivants :

- LE CALCAIRE CARBONIFÈRE DE LA RÉGION DE LILLE
- LES FORMATIONS PALÉOZOÏQUES DES ARDENNES,
- LES FORMATIONS PALÉOZOÏQUES ET JURASSIQUES DU BOULONNAIS,
- LA CRAIE DU SÉNO-TURONNIENNE, ET LOCALEMENT DU TURONNIEN INFÉRIEUR ET MOYEN ET DU CÉNOMANIEN,
- LES SABLES TERTIAIRES DES FLANDRES,
- LES SABLES TERTIAIRES DU BASSIN D'ORCHIES,
- LES SABLES PISSARDS QUATERNAIRES DE LA PLAINE MARITIME ET DES BAS-CHAMPS.

À ces réservoirs s'ajoutent différents aquifères alluviaux en grande partie subordonnés aux cours d'eau.

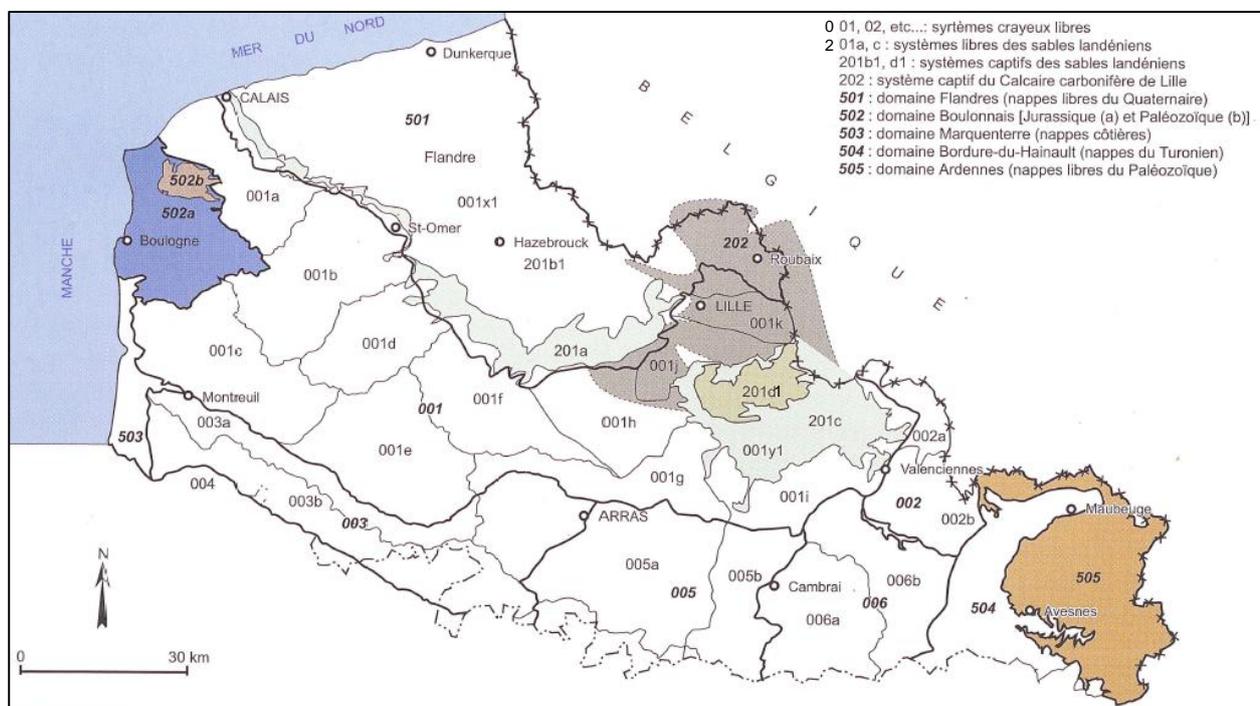


Figure 5 : Domaines et systèmes aquifères de la région Nord-Pas de Calais

2.3.1. Les calcaires paléozoïques

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Ils sont sollicités en tant qu'aquifères dans trois secteurs distincts de la région Nord-Pas de Calais :

- **l'Avesnois** (extrémité est du département du Nord) : calcaires et dolomies du Dévonien (Givétien-Frasnien) et du Mississipien (ex-Dinantien), fortement

plissés et faillés : nappes, majoritairement libres, de fractures localement karstifiées. Seule ressource pour cette région ;

- **la région lilloise** (Roubaix-Tourcoing et Belgique) : calcaires mississippiens discordants à faible profondeur, sous une couverture réduite de Crétacé supérieur. La nappe, captive en France et libre dans le Tournaisis, est fortement surexploitée en France comme en Belgique ;
- **le Boulonnais** (massif de Ferques dans le Nord de la « boutonnière ») : structure complexe, faillée et chevauchante où seuls les calcaires viséens présentent un intérêt hydrogéologique local.

Remarque : Dans la partie française du Paléozoïque ardennais, ce sont surtout les calcaires du Givétien-Couvinien et les grès et quartzites du Cambrien qui sont aquifères. Parmi les assises transgressives du Lias au Crétacé, certaines sont aquifères : calcaires du Sinémurien supérieur, calcaires du Dogger, gaize de l'Oxfordien inférieur, calcaires de l'Oxfordien supérieur et sables verts albiens. Le principal aquifère régional reste néanmoins les alluvions de la Meuse.

2.3.2. Le Jurassique du Boulonnais

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Les aquifères du Jurassique du Boulonnais (Bajocien à Tithonien) sont multiples (calcaires bathoniens, calcaires oxfordiens, grès à différents niveaux du Jurassique supérieur) et discordants sur le Paléozoïque et sous le Crétacé moyen, ces aquifères ont une extension qui ne dépasse guère celle de la « boutonnière » du Boulonnais où ils contribuent pour moitié à l'alimentation en eau du District de Boulogne-sur-Mer.

2.3.3. La Craie du Crétacé

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Les formations crayeuses sont présentes dans la majeure partie (90 %) de la région Nord Pas de Calais. Elles ne sont absentes qu'aux deux extrémités ouest et est (Bas Boulonnais et Avesnois) où affleurent les terrains sous-jacents.

La craie n'affleure cependant que sur un peu plus de la moitié de la surface des deux départements du Nord et du Pas-de-Calais, puisqu'elle s'enfonce vers le nord-nord-est sous de puissants dépôts cénozoïques (Flandres et bassin d'Orchies) depuis la mer du Nord jusqu'au Bassin du Hainaut en passant par le Valenciennais.

En raison des variations de faciès du Crétacé supérieur et de la structure régionale, le réservoir crayeux n'est pas partout le même et n'est pas non plus unique.

En périphérie de la « boutonnière » du Boulonnais, l'aquifère est épais et continu du Cénomaniens moyen à supérieur au Sénonien, malgré la présence d'intercalations marneuses, mais la nappe est principalement contenue dans la craie cénomaniens,

en raison du relèvement anticlinal. La continuité hydraulique entre les assises du Turonien (supérieur et moyen) et celles du Cénomaniens est prouvée par traçages.

Plus au sud-est (secteur de Fruges), le Cénomaniens supérieur encore crayeux et aquifère contient une nappe captive ou semi-captive sous couverture devenue peu perméable du Turonien inférieur, tandis que la craie du Turonien supérieur commence à se gorger d'une nappe libre. Plus à l'est, le Cénomaniens devenu plus marneux ne renferme pratiquement plus de nappe exploitable.

La craie du Turonien supérieur-Sénonien contient une nappe libre quasi continue dans la plaine d'Arras, le Béthunois, la région de Lens à Lille, le Douaisis et le Cambrésis jusqu'au Valenciennois.

Sous couverture, au cœur du bassin des Flandres, la craie n'est pratiquement plus aquifère. Par contre, bien que captive, la nappe de la craie reste encore bien productive dans le bassin d'Orchies, même sous plus de 50 m de couverture.

À l'échelle du Nord-Pas de Calais, la nappe de la Craie est habituellement considérée, notamment pour sa représentation piézométrique, comme une nappe unique, quel que soit le réservoir crayeux concerné (Cénomaniens, Turonien moyen, Turonien supérieur-Sénonien).

2.3.4. Les Sables landéniens

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Ce sont des sables glauconieux marins, des tuffeaux ou des sables blancs continentaux, reposant généralement sur des formations plus argileuses. Partie méridionale du vaste bassin éocène franco-belge, cet aquifère s'étend sur environ 3 000 km² en Flandre et dans le Bassin d'Orchies, contenant une nappe libre dans les affleurements périphériques méridionaux, puis captive sous les argiles yprésiennes. Malgré leur réserve considérable, ces sables n'offrent qu'une faible productivité, mise surtout à profit pour l'agriculture et l'élevage.

2.3.5. Les Aquifères quaternaires

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Alluvions récentes, dunes littorales, sables « pissards » sont des aquifères généralement peu productifs et d'intérêt très local. Les alluvions peuvent toutefois présenter une forte productivité sectorielle et avoir un impact (contamination) important sur l'aquifère crayeux sous-jacent.

La présente étude concerne les aquifères des calcaires paléozoïques, du Jurassique du Boulonnais, de la Craie du Crétacé, des Sables landéniens et des Sables Pissards. Les aquifères des Sables verts aptien-albiens, des Sables wealdiens et alluvionnaires ne sont pas traités dans l'Atlas car il n'existe pas assez de données les concernant.

2.3.6. Structure

Le trait structural majeur du Nord - Pas-de-Calais est le **bombement anticlinal de l'Artois** dont l'axe, globalement nord-ouest/sud-est, s'abaisse vers le sud-est et s'estompe à l'approche d'Arras, tandis qu'il s'ouvre à l'ouest sur les formations jurassiques et paléozoïques du Bas Boulonnais. Dissymétrique, à flanc sud doux et flanc nord plus incliné, cet anticlinal est affecté de failles longitudinales (N 100° à 120°) dues au rejeu en sens inverse de failles tardi-hercyniennes. Il en résulte un découpage du flanc nord en compartiments de plus en plus abaissés dans cette direction. Le socle paléozoïque, discordant sous la couverture Crétacé supérieur, affleure localement dans l'axe de l'anticlinal (au Nord de Fruges) et sur le flanc nord, le long de la faille de Pernes. Les rejets post-crétacés de ces failles longitudinales peuvent atteindre une soixantaine de mètres pour la faille de Ruitz et une centaine de mètres pour celles de Pernes et de Marqueffles.

Séparant les bassins tertiaires des Flandres et d'Orchies, l'**anticlinal du Mélantois** (faillé sud-sud-ouest/nord-nord-est dans sa partie sud) fait réapparaître les terrains crétacés transgressifs et relativement peu épais, où la craie du Turonien supérieur et du Sénonien peut aussi quasiment disparaître par érosion.

Plus à l'est, Valenciennes et l'Escaut sont situés sur un axe structural majeur, actuellement sous forme de **horst** avec relèvement brutal des couches, séparant le bassin d'Orchies, à l'ouest, de la fosse de la Haine (début du bassin de Mons) à l'est.

3. Méthodologie de conception de l'atlas Nord-Pas de Calais

3.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

3.1.1. Principe de l'élaboration des cartes du potentiel

La conception de l'atlas du potentiel géothermique des aquifères du Nord-Pas de Calais repose sur une méthode de combinaison pondérée de cartes de paramètres, dites cartes unicritères.

L'évaluation de ce potentiel géothermique est basé sur trois paramètres, appelés par la suite critères : **le débit d'exploitation par forage, la température de la nappe et la profondeur d'accès à la nappe.**

La cartographie et la combinaison des cartes ont été faites au moyen de logiciels de traitement cartographique (SIG). Les données sont traitées sous forme de grilles avec des mailles de 500 m de côté. Toutes les cartes produites sont géo-référencées.

a) La grille de données

La région Nord-Pas de Calais a été découpée en mailles carrés de 500 m de côté afin de constituer une grille de travail permettant à la fois de réaliser les cartes de l'atlas et l'outil informatique consultable sur internet. Chaque maille de la grille a été renseignée :

- Un identifiant constitué de la lettre associée à sa colonne, suivi du numéro de ligne ;
- Le nom de la commune et son numéro INSEE, en considérant la position du centre de la maille par rapport à la cartographie des communes ;
- L'altitude moyenne, minimale et maximale du sol en mètre NGF extraite du Modèle Numérique de Terrain régional (MNT) du secteur de la maille ;
- Les coordonnées X et Y en Lambert 2 étendu du centroïde de la maille ;
- Le potentiel géothermique du meilleur aquifère ;
- Puis pour chaque aquifère présent au droit de la maille :
 - Les profondeurs du toit et du mur de l'aquifère
 - Les profondeurs minimale et maximale recensées du niveau piézométrique
 - La profondeur d'accès à la ressource en eau
 - La température moyenne de la nappe

- Le paramètre hydrodynamique utilisé pour calculer le critère « débit d'exploitation pas forage » (Cf. paragraphe 3.4)
- Le débit d'exploitation par forage calculé
- Le potentiel géothermique de l'aquifère
- Les remarques éventuelles (artésianisme, niveau piézométrique proche du sol)

La grille totalise 49 970 lignes, soit 49 970 mailles (1 ligne par maille) et couvre une superficie de 12 492,5 km² au sol.

b) Choix et notation des critères entrant dans le potentiel géothermique

Pour chaque aquifère, trois cartes unicritères sont réalisées représentant :

- le critère « débit d'exploitation par forage » exprimé en m³/h ;
- le critère « température de la nappe » exprimé en degré Celsius ;
- le critère « profondeur d'accès à la ressource en eau » exprimé en mètre.

Dans un second temps, chaque critère est noté selon une échelle prédéfinie (entre 0 et 1) qui reflète le potentiel géothermique associé : note faible pour le potentiel le moins bon, note élevée pour le meilleur potentiel.

La méthode de notation est basée sur une méthodologie nationale adaptée à la région.

• Critère « débit d'exploitation par forage »

La puissance thermique et donc la rentabilité géothermique sont directement déduites du débit d'exploitation par forage.

Ce débit d'exploitation par forage permet de définir la superficie qui va être chauffée ou climatisée grâce à la PAC. En effet, le volume d'eau qui transit dans la PAC est proportionnelle à la quantité de chaleur ou de froid produit par cette même PAC.

Plus le débit de production du forage est élevé, plus la zone est favorable à la géothermie sur nappe.

La notation de ce critère évolue de manière logarithmique (Figure 6). Les débits inférieurs à 5 m³/h ne peuvent pas couvrir les besoins de chauffage supérieurs à 30kW et ont une note faible (inférieure à 0.4). Au-delà de 50 m³/h, les débits sont très favorables et ont une note élevée.

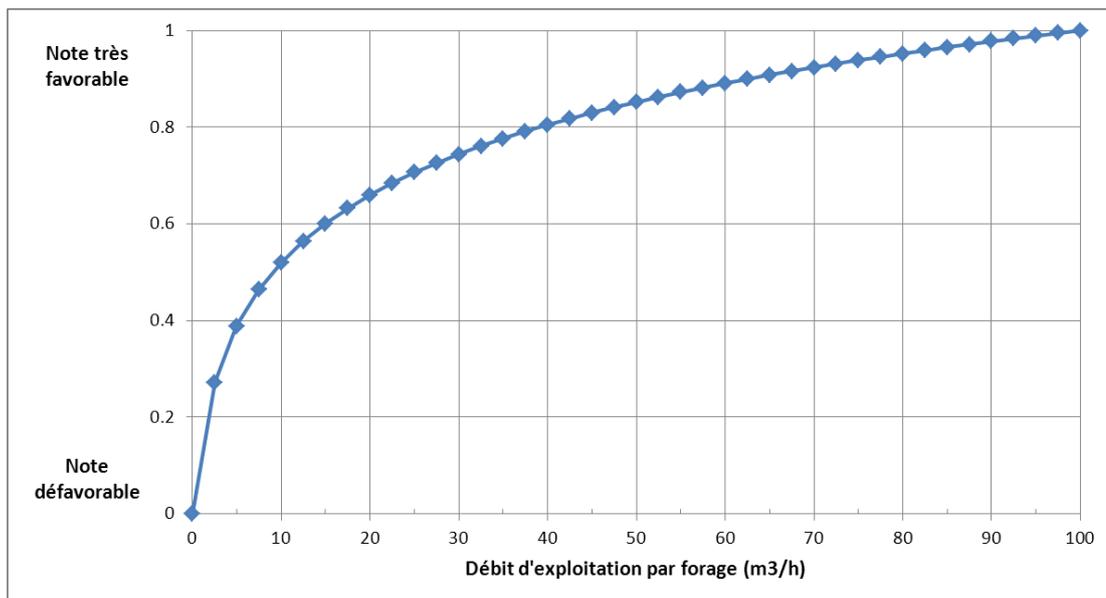


Figure 6 : Evolution de la note du critère du débit d'exploitation du forage

• Critère « température de la nappe »

La température de la nappe est également un critère représentatif du rendement d'un projet géothermique de PAC sur nappe. L'efficacité de la pompe à chaleur est en effet variable selon la température de la nappe et selon le type d'utilisation :

- En dessous de 10°C, une PAC présente rendements plus faibles ;
- Entre 10 et 15°C, les températures sont très favorables au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage, en climatisation et au free-cooling ;
- Les températures supérieures à 15°C sont défavorables au fonctionnement d'une PAC en mode climatisation.

Dans la région Nord-Pas de Calais, l'utilisation d'une pompe à chaleur pour la climatisation est moins fréquente que pour le chauffage, c'est pourquoi le mode climatisation n'a pas été retenu dans le système de notation. Les températures supérieures à 15°C ont été considérée comme très favorables au chauffage.

La notation du critère température est la suivante (Figure 7) : en dessous de 10°C la note est peu favorable et au-dessus de 10°C la note est favorable.

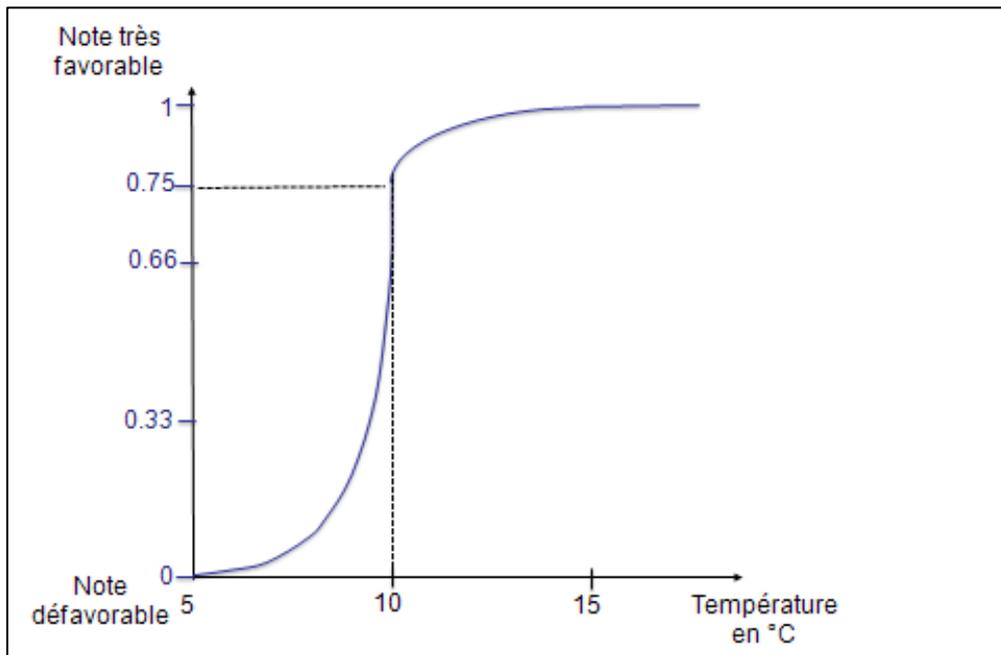


Figure 7 : Evolution de la note du critère température de l'eau de l'aquifère

• Critère « profondeur d'accès à la ressource en eau »

La profondeur d'accès à la ressource en eau correspond à la profondeur minimale du forage d'eau pour atteindre la ressource. La profondeur réelle du forage doit tenir compte du fait que le forage doit pénétrer d'environ 5 m l'aquifère au moins (cas d'une nappe captive), ou être 10 m sous le niveau de l'eau au repos pour tenir compte du rabattement induit par le pompage (5 m), l'encombrement de la pompe et une marge de sécurité (environ 5 m).

Connaître la profondeur d'accès à la ressource en eau est très utile pour un projet d'installation de géothermie basse énergie car elle rend compte du coût d'investissement.

Quand la nappe est libre, la profondeur d'accès à la ressource est la profondeur de la surface libre de la nappe (en d'autre terme le niveau piézométrique).

Quand la nappe est captive et sous pression, la profondeur d'accès à la ressource est le toit de l'aquifère, tandis que lorsqu'elle est captive mais pas sous pression, c'est le niveau piézométrique qui est retenu.

En règle générale, plus la ressource en eau est profonde, plus le coût d'investissement est important. Cette règle comporte toutefois deux exceptions : là où la ressource en eau est à moins de 5 mètres de profondeur et là où la nappe est artésienne car dans ces deux cas la réinjection peut être difficile, voire impossible.

La notation retenue pour le critère « profondeur d'accès à la ressource en eau » est la suivante (Figure 8) :

- De 0 à 5 m de profondeur, la note est peu favorable car la surélévation piézométrique liée à l'injection risque d'être dommageable au projet.
- De 5 à 15 m de profondeur, le forage sera peu coûteux permettant la réalisation économique d'un projet de PAC sur nappe pour un pavillon. La note est égale à 1, c'est-à-dire très favorable.
- De 15 à 30 m de profondeur, le forage commence à peser financièrement sur le projet de PAC sur nappe pour un pavillon. La note est égale à 0.66, c'est-à-dire moyennement favorable.
- De 30 à 100 m de profondeur : le coût du forage ne peut être amorti que par une forte consommation en surface (petit collectif ou ensemble de plusieurs pavillons). La note est défavorable à très défavorable (décroissance continue de 0.33 à 0).
- Les profondeurs au-delà de 100 m dépassent le cadre de cet atlas.

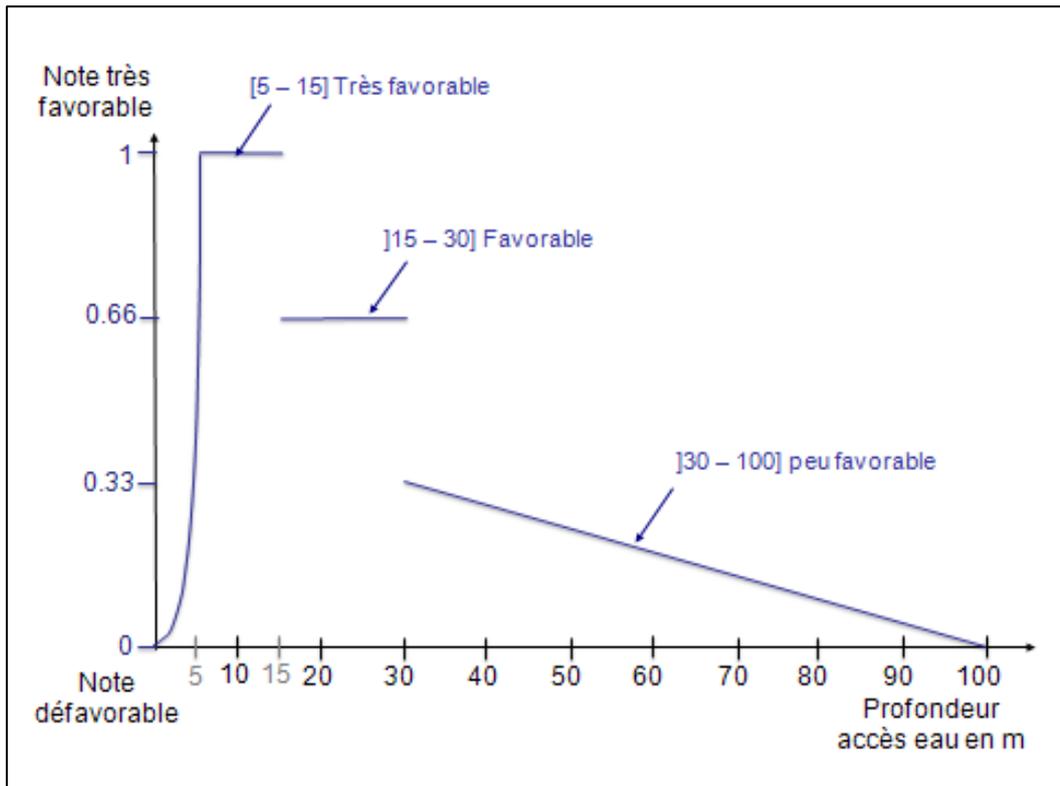


Figure 8 : Evolution de la note du critère profondeur d'accès à l'eau

• **Critère « qualité des eaux souterraines »**

La géochimie des eaux souterraines n'est pas prise en compte dans le calcul du potentiel aquifère ni dans la fiche finale, mais peut avoir une incidence sur la faisabilité du projet, sur la durée de vie des installations et de leur entretien.

Par exemple, une eau à dureté élevée entartrera l'installation, tandis qu'une eau corrosive dégradera l'installation et en diminuera sa durée de vie.

Le critère qualité de la ressource en eau donne une information sur le caractère corrosif, encroûtant ou colmatant et est défini à partir des paramètres listes au paragraphe 3.4.

Ces paramètres chimiques sont traités et fournis à **titre informatif** dans le chapitre 4, mais ne sont pas intégrés au calcul multicritère car ils ne sont pas disponibles à l'échelle régionale ni pour l'ensemble des aquifères.

c) Construction des cartes du potentiel géothermique

Les cartes multicritères sont les résultats de l'atlas du potentiel géothermique de l'aquifère. Elles résultent d'un assemblage pondéré des cartes unicritères de chaque aquifère. La pondération permet de rendre compte du poids de chacun des critères sur la faisabilité d'une installation géothermique PAC sur nappe.

Afin d'évaluer le potentiel géothermique global de l'aquifère au droit d'une maille, les trois critères retenus vont être additionnés. Tous les critères n'ont pas la même importance vis-à-vis du potentiel géothermique c'est pourquoi ils sont pondérés :

<p>2 x note du critère débit d'exploitation par forage</p> <p style="text-align: center;">+</p> <p>1 x note du critère température de la nappe</p> <p style="text-align: center;">+</p> <p>1 x note du critère profondeur d'accès à la nappe</p> <p style="text-align: center;">=</p> <p>POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE L'AQUIFÈRE</p>

4 classes de potentiel ressortent de ce calcul :

	Potentiel Fort	$2,67 < \text{note finale} < 4$
	Potentiel Moyen	$1,33 < \text{note finale} < 2,67$

	Potentiel Faible	0 < note finale < 1,33
	Potentiel non connu précisément	Au moins un des 3 critères est manquant

Le potentiel géothermique de chaque aquifère est présenté en annexe 1.

La dernière étape du travail consiste à compiler toutes les cartes d'aquifères et de sélectionner la meilleure note au droit d'une maille (annexe 2). Par exemple au droit d'une maille s'il existe 2 aquifères et que l'aquifère superficiel a une note faible et l'aquifère profond a une note forte, alors c'est la note forte qui est retenue pour la maille.

3.1.2. Inventaire des données utilisées pour le projet

a) *Les données utiles au projet*

Un grand nombre de données a été collecté afin de pouvoir définir le potentiel géothermique de chaque aquifère au droit d'un maximum de mailles, telles que :

- des valeurs de paramètres hydrodynamiques (débits spécifiques, transmissivités, perméabilités, débits maximum et moyens) ;
- des valeurs de paramètres physico-chimiques (température de l'eau, pH, conductivité, titre hydrométrique, etc...) ;
- des données sur la géométrie de l'aquifère (altitude du toit et du mur) ;
- des données sur les caractéristiques de l'aquifère (épaisseur saturée, captivité, artésianisme...)

Le nombre de sondage possédant des données intéressantes par aquifère est présenté dans le Tableau 2. Au total, 2679 sondages ont des valeurs utiles au projet.

En ce qui concerne les aquifères étudiés pour l'Atlas, la majorité des sondages captent l'aquifère de la craie séno-turonienne, ce qui est assez logique en regard de sa productivité et de sa superficie dans la région. Ensuite viennent les Calcaires carbonifères, les Sables landéniens, les Calcaires dévoniens et les Sables Pissards.

Classification BD-LISA	Aquifère capté par le sondage	Nombre de sondages ayant des données					
		Débit spécifique	Transmissivité	Perméabilité	Débit d'exploitation	Température	Total par aquifère
001A01	Sables Pissards	13	3	1	16	7	18
007A01	Sables landéniens	56	8	3	58	19	65
007C01	Craie	1 970	1 157	476	1 960	627	2 314
013A01	Sables verts aptien-albiens	0	0	0	0	0	0
015A01	Grès, Calcaires, Sables et Argiles de la "Pointe aux Oies" - Tithonien supérieur	0	0	0	0	0	0
015A03	Grès de la "Crèche" - Tithonien supérieur	0	0	0	0	0	0
019A01	Grès de Châtillon, Calcaire du Moulin Vibert, Grès de Connincthun, Argile du Moulin Vibert - Kimmeridgien	4	1	0	4	2	4
019A02	Calcaire de Brecquerecque, Caillasses d'Hesdigneul, Oolithe d'Hesdin-l'Abbé, Grès de Brunembert - Kimmeridgien	6	1	0	6	4	6
021A02	Calcaire du Mont des Boucards - Callovo-Oxfordien	1	0	0	1	0	1
023C01	Oolithe de Marquise, Calcaire de Rinxent, Marnes et Sables d'Hydrequent du Bajocien-Bathonien	7	5	2	7	2	9
030B01	Calcaires carbonifères de la région lilloise	119	70	10	120	13	131
030B01	Calcaires carbonifères du Boulonnais	2	2	0	2	0	2
030B03	Calcaires carbonifères de l'Avesnois	77	25	0	77	37	97
030D01 030D04	Calcaires du Dévonien moyen et supérieur	29	13	2	29	13	32
NOMBRE TOTAL		2 284	1 285	494	2 280	724	2 679

Tableau 2 : Nombre de points BSS ayant des données utiles au projet classés par aquifère

N. B. : La classification BD-LISA est une base de données des contours géologiques (en affleurement et sous couverture) des formations géologiques codifiée à l'échelle de la France.

b) Les sources de données

La BSS, ou banque de données du sous-sol. Elle rassemble un très grand nombre d'informations issues de données de forage (<http://infoterre.brgm.fr/>).

La BDES, ou banque de données des eaux souterraines. C'est une base de données complémentaires à la BSS, qui rassemble des informations permettant de définir les caractéristiques des aquifères, comme par exemple les paramètres hydrodynamiques (<http://infoterre.brgm.fr/>).

La BD-LISA est une base de données des contours géologiques (en affleurement et sous couverture) des formations géologiques codifiée à l'échelle de la France. Rapports consultables sur <http://www.brgm.fr/publication.jsp> (DUFRENOY et *al.*, 2010).

ADES, ce portail d'accès aux données sur les eaux souterraines donne un accès libre aux données sur les eaux souterraines via le site internet <http://www.ades.eaufrance.fr/>

Les rapports publics et publications BRGM sont consultables via le site <http://www.brgm.fr/publication.jsp>.

Les données de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie. Le site internet <http://donnees.eau-artois-picardie.fr/> permet d'accéder à de nombreuses données réparties dans les trois catégories suivantes :

- l'état du milieu qui caractérise le milieu physique ou la ressource (qualité des cours d'eau et des eaux souterraines, débit des cours d'eau, hauteur des nappes souterraines, qualité des eaux littorales) ;
- les pressions exercées par l'ensemble des activités humaines sur la ressource en eau (rejets, prélèvements d'eau dans les cours d'eau et dans les nappes souterraines) ;
- les réponses apportées pour corriger l'état de la ressource en eau (périmètre de protection des captages d'eau potable, épuration, réglementation).

3.2. MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DU CRITÈRE « PROFONDEUR D'ACCÈS À LA RESSOURCE EN EAU »

Les données essentielles à la détermination de ce critère sont : la profondeur du toit de la formation géologique, la profondeur du niveau piézométrique, la localisation des zones où la nappe est libre ou captive.

Un modèle géologique a été réalisé afin de connaître la profondeur du toit de chaque formation géologique aquifère. La méthodologie est détaillée dans le paragraphe suivant.

3.2.1. Création d'un modèle géologique

a) Objectif

La construction d'un modèle géologique en 3 dimensions permet d'obtenir en tous points les altitudes ou les profondeurs des surfaces (toit et mur) et les épaisseurs des couches géologiques.

Ces informations sont essentielles à notre étude car la profondeur du toit de chaque aquifère est nécessaire dans le calcul du potentiel géothermique et l'épaisseur des aquifères est utilisée dans les calculs des paramètres hydrodynamiques.

D'autre part, cette modélisation géologique permet de définir la limite d'étude des 100 premiers mètres de profondeur pour chaque aquifère.

b) Concept

Les logiciels GDM (Geological Data Management) et MultiLayer, développés par le BRGM, ont été utilisés pour réaliser cette modélisation. Ces logiciels permettent de gérer des données de plusieurs type (sondages, profils, contours géologiques, topographie, échantillon ponctuels, etc...), de produire des graphiques (log de sondage, cartes, sections et vues 3D) et de modéliser des données en 3 dimensions.

La modélisation consiste à créer un modèle multicouche qui rend typiquement compte de formations de bassin sédimentaire. Elle utilise le concept de pile stratigraphique : empilement des couches géologiques plus jeunes sur les couches géologiques plus anciennes.

Les aquifères qui ont été modélisés par cette technique sont :

- les Sables Pissards,
- les Sables landéniens (ou Thanétien supérieur),
- la Craie crétacée,
- le toit du Paléozoïque (notamment le toit des Calcaires carbonifères de la région lilloise).

c) Données utilisées

Les données utilisées pour la réalisation du modèle sont :

- des logs de sondages provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS). 2058 sondages recoupant au moins un aquifère ont été sélectionnés afin d'avoir une bonne représentativité. Ces sondages ont été projetés sur le MNT ;
- un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 50 m ;
- la carte géologique harmonisée au 1/50 000 de la région Nord-Pas de Calais (BRGM) ;
- les failles de la carte géologique harmonisée. Toutes les failles n'ont pas été sélectionnées, notamment celles présentes dans le Boulonnais et l'Avesnois car difficilement modélisables au vu de l'échelle régionale de modélisation, de plus, ce sont des zones moins intéressantes pour l'étude ;
- les extensions des formations géologiques provenant de la BDLisa.

Le modèle a été calculé sur toute la région Nord-Pas de Calais. Les mailles sont carrées de 500 m de côté, calées sur les mêmes coordonnées que la grille SIG.

La modélisation utilise les données ponctuelles listées précédemment pour réaliser une interpolation géostatistique. Chaque maille géoréférencée est alimentée par les résultats de calculs c'est-à-dire par l'altitude du toit et du mur de chaque formation géologique et de leur épaisseur. En d'autres termes, on obtient pour chaque maille un log géologique « interpolé » du secteur.

Ce log géologique interpolé représente plus ou moins la réalité car il dépend du nombre de données présente dans le secteur, du contexte géologique et des variations topographiques.

Ex : dans une maille où la topographie est plane et où le contexte géologique est tabulaire monoclinale, le log géologique interpolé est très représentatif de la réalité en tous points de la maille.

Ex : dans une maille où la topographie fluctue (flanc de coteau), le log géologique interpolé présentera des écarts avec la réalité proportionnels aux variations topographiques.

Ainsi, une attention particulière devra être portée aux mailles situées dans des contextes particuliers où il existera un écart entre la réalité et le log géologique interpolé :

- variation importante de relief,
- au droit des failles,
- et dans les zones à fort pendage.

La modélisation sur GDM et MultiLayer comporte cependant quelques limites :

- les failles sont modélisées uniquement verticalement ;
- les bordures du modèle (aux limites régionales) peuvent comporter des imprécisions dues aux manques de données.

Il est rappelé que l'interpolation est une représentation de la réalité à partir de données ponctuelle et qu'une étude de sol et la réalisation de forage n'est pas substituable.

d) Exemple de résultats : les Sables landéniens

Une fois la modélisation terminée, les résultats sont visualisables sous plusieurs formats : grille de données, carte isohypse et isopaque, profils et documents en 3D.

La visualisation 3D de GDM permet de comprendre la morphologie des couches géologiques. La Figure 9 représente en 3 dimensions le toit des Sables landéniens. Le dégradé de couleur correspond à l'altitude du toit en mètre NGF.

Le toit des Sables landéniens forme un dôme à Orchies. Dans la plaine des Flandres, le toit plonge vers le nord. Il passe d'une altitude de 25 m au nord de Lille à une altitude de -125 m à Gravelines, illustré par un passage progressif du bleu au rouge.

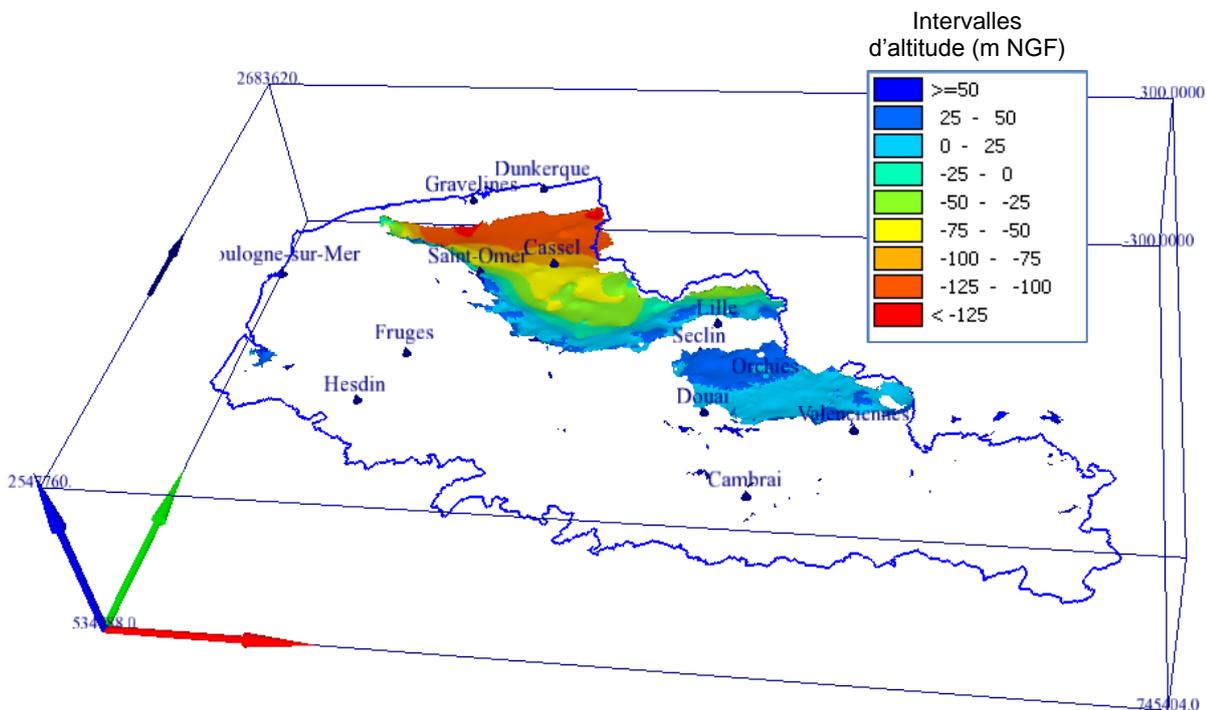


Figure 9 : Vue 3D du toit des Sables landéniens (dilatation en Z égale à 70)

L'Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais est limité à 100 m de profondeur. Afin de définir cette limite des cartes représentant la profondeur de chaque aquifère ont été tracée sur GDM. La Figure 10 présente l'exemple du toit des Sables landéniens. La limite des 100 m de profondeur se situe entre le bleu turquoise et le vert (surligné par un trait vert). Toute la zone colorisée du bleu foncé au bleu clair sera gardée pour l'étude.

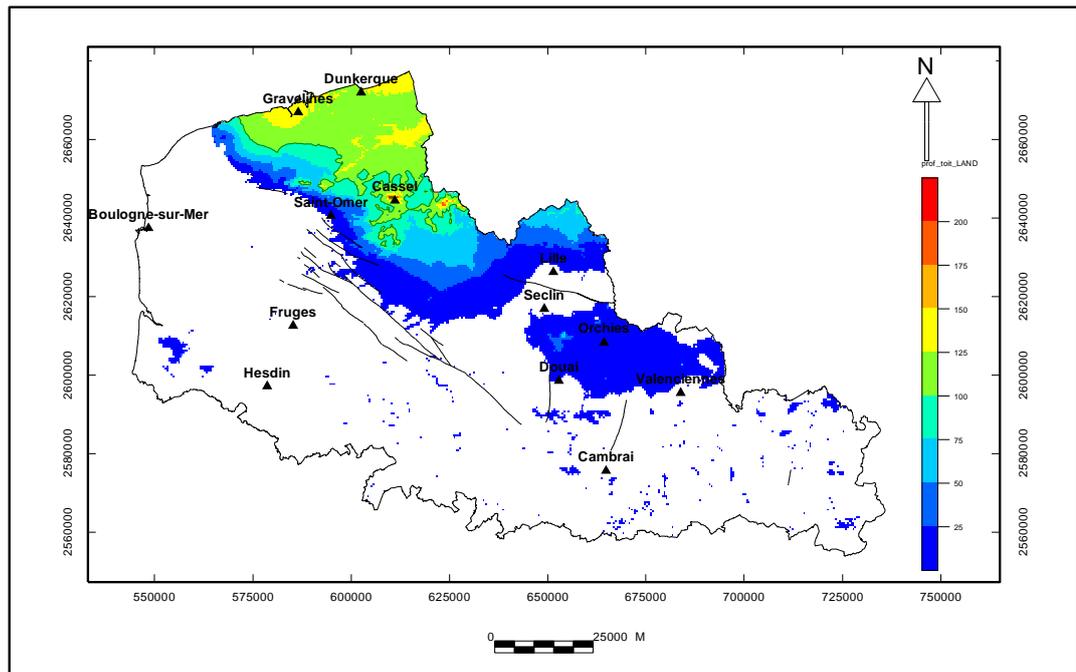


Figure 10 : Profondeur du toit des Sables landéniens

Dans un second temps, les zones où les épaisseurs sont inférieures à 3 m sont exclues car considérée comme non aquifère. Puis pour des formations comme les Sables landéniens, les buttes témoins sont exclues car les données y sont insuffisantes voire inexistantes pour pouvoir dire si elles renferment une nappe locale. Toute cette phase de traitement permet d'obtenir un secteur d'étude pour l'aquifère (Figure 11).

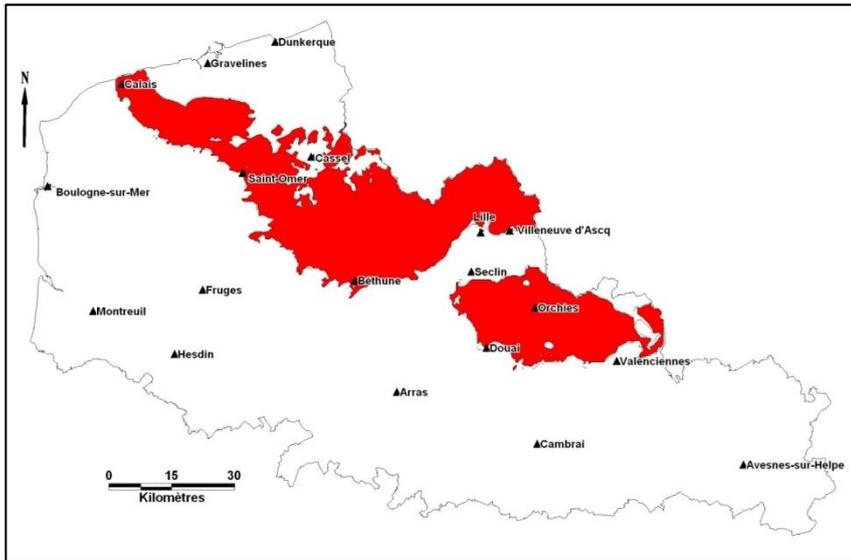


Figure 11 : Secteur retenu pour l'étude de l'aquifère des Sables landéniens

3.2.2. Définition du critère « profondeur d'accès à la ressource en eau »

Les données essentielles à la détermination de ce critère sont :

- la profondeur du toit de la formation géologique provenant du modèle géologique explicité ci-avant ;
- la profondeur du niveau piézométrique provenant de la bibliographie ;
- et la captivité de la nappe provenant de données bibliographiques.

Lorsque la nappe est libre, c'est la profondeur du niveau piézométrique qui est retenue pour la définition du critère. Lorsque la nappe est captive (nappe sous pression), la profondeur d'accès à la ressource en eau correspond à la profondeur du toit de la formation géologique.

3.3. MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES CRITÈRES « DÉBIT D'EXPLOITATION PAR FORAGE » ET « TEMPÉRATURE »

Un nombre relativement important de données ont été collectées pour la région Nord-Pas de Calais. Cependant, ces données sont réparties de façon hétérogènes en fonction des aquifères (Tableau 2). Le traitement des données est donc différent pour chaque aquifère et chaque paramètre :

- Lorsque que les données sont insuffisantes ou que leur distribution spatiale est mauvaise, une simple **analyse de la distribution des valeurs** est réalisée (paragraphe 3.3.1). Dans ce cas l'aquifère sera considéré par défaut comme homogène.
- Lorsque les données sont nombreuses et bien réparties, une **analyse géostatistique** sera effectuée ou récupérée d'une modélisation hydrodynamique récente (paragraphe 3.3.2 en page 41).

	Analyse statistique	Données provenant d'une modélisation	Analyse géostatistique
Sables Pissards	Débit spécifique & température		
Sables landéniens	Débit spécifique & température		
La Craie		Perméabilité	Température
Calcaires carbonifères de la région lilloise		Transmissivité & Température	
Calcaires carbonifères de l'Avesnois	Débit spécifique & température		

Tableau 3 : Choix des analyses pour les critères « débit d'exploitation » et « température »

Les résultats de ces analyses pour chacun des aquifères sont présentés dans le chapitre 4 : *Potentiel géothermique des aquifères du Nord-Pas de Calais*.

3.3.1. Analyse de la distribution des valeurs

a) Histogramme

L'histogramme permet de repérer les gammes de valeurs pour lesquelles la fréquence de données est maximale (logiciel XLStat).

b) Boîte à moustache de Tukey

La boîte à moustaches, une traduction de Box& Whiskers Plot, est une invention de Tukey (1977) pour représenter schématiquement la distribution d'une variable (Le Guen, 2001). Cette représentation schématique permet de définir les grandes tendances de l'échantillon de mesure et permet également de repérer assez facilement les valeurs extrêmes, qui peuvent être potentiellement fausses (mauvaise mesure, mauvaise unité, erreur de saisie, etc...).

La boîte à moustache, (Figure 12), schématise des informations sur :

- La tendance centrale : avec **la médiane** représentée par un trait vertical au centre de la boîte (la valeur de l'échantillon qui sépare en deux sous-échantillons de nombres d'observations identiques) et avec **la moyenne** représentée par une croix rouge (somme des valeurs de l'échantillon divisé par le nombre d'observations).
- La mesure de position : avec les quartiles qui donnent un aperçu de la position d'une donnée par rapport aux autres données (les quartiles divisent l'échantillon en quatre parties égales en nombres d'observations). Le **1^{er} quartile** (25% des effectifs) et le **3^{ème} quartile** (75% des effectifs) sont représentés par les traits verticaux délimitant la boîte.
- La tendance de dispersion : avec **l'intervalle interquartile** (intervalle qui contient la moitié des observations les plus au centre de la distribution), représenté par le rectangle de la boîte.
- Les valeurs dites adjacentes correspondant aux limites à partir desquelles on considère qu'une donnée est potentiellement anormale. **La valeur adjacente inférieure** est égale au 1^{er} quartile moins 1,5 fois la valeur de l'écart interquartile ; **la valeur adjacente supérieure** est égale au 3^{ème} quartile plus 1,5 fois la valeur de l'écart interquartile. Elles sont représentées par les moustaches de la boîte de Tukey.
- **Les valeurs atypiques ou extrêmes**, représentées par des points, sont situées au-delà des moustaches et sont de ce fait statistiquement anormales.

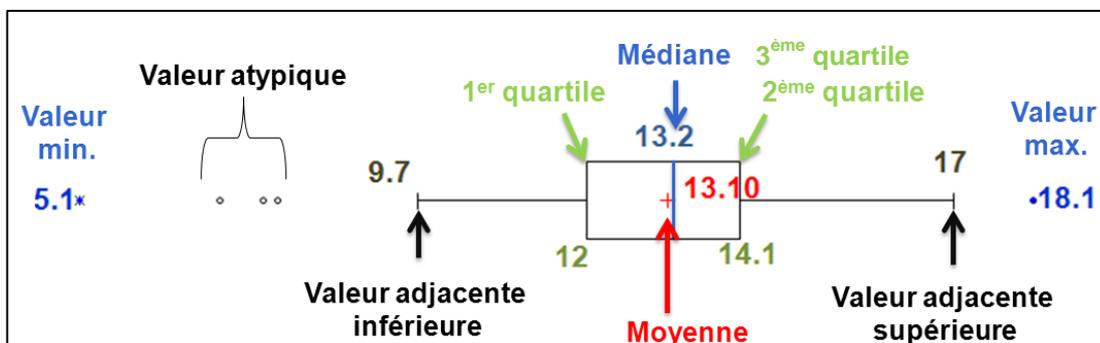


Figure 12 : Exemple de boîte à moustache de Tukey

Le principal avantage de la boîte à moustache est de pouvoir comparer la moyenne à la médiane ce qui permet de savoir si la moyenne est influencée par les valeurs extrêmes.

Le second avantage, qui a aussi toute son importance, est de pouvoir identifier toutes les valeurs atypiques ou extrêmes de l'échantillon. Ces valeurs qui se situent au-delà des moustaches de la boîte à moustache de Tukey sont potentiellement fausses :

- mesure non réalisée dans le respect des normes en vigueur ;
- la valeur renseignée est erronée dans la base de données (saisie dans une mauvaise unité, faute de frappe, etc...) ;
- aquifère mal renseigné.

Ces valeurs viennent perturber une partie des analyses statistiques et ont été vérifiées au cas par cas afin de les corriger ou de les écarter.

3.3.2. Analyse géostatistique

L'analyse géostatistique permet d'étudier la variabilité spatiale des données et de réaliser des interpolations.

Une analyse géostatistique a été réalisée pour le critère température de la nappe de la craie car des données sont nombreuses et assez bien réparties (logiciel Geostat2D de GDM, du BRGM).

3.3.3. Précision sur le calcul des débits d'exploitation par forage

Dans le calcul du critère « débit d'exploitation par forage », c'est le débit d'exploitation qui est noté. Or les statistiques ou les modèles utilisés portent sur des transmissivités, des débits spécifiques ou des perméabilités. Pour passer d'un paramètre à l'autre la méthode suivante a été retenue :

- Passage d'un débit spécifique (Q_s) à un débit d'exploitation (Q_{exploit}) en prenant un rabattement acceptable théorique ($S_{\text{acceptable pour l'aquifère}}$) de $1/3$ de l'épaisseur productive de l'aquifère avec un maximum de 5 m (cas des Sables Pissards et des Sables landéniens).

$$Q_{\text{exploit}} = Q_s * S_{\text{acceptable pour l'aquifère}}$$

- Passage d'une transmissivité (T) à un débit d'exploitation en traduisant la transmissivité en débit spécifique (Q_s) puis en prenant un rabattement acceptable théorique de $1/3$ de l'épaisseur saturée de l'aquifère avec un maximum de 5 m (cas des Calcaires Carbonifères).

$$Q_s = \alpha * T$$

$$\text{puis } Q_{\text{exploit}} = Q_s * S_{\text{acceptable pour l'aquifère}}$$

- Passage d'une perméabilité (K) à un débit d'exploitation en utilisant l'épaisseur productive de l'aquifère (cas de l'aquifère de la craie) :

$$T = K * e_{\text{productive}}$$

$$\text{puis } Q_{\text{exploit}} = \alpha * Q_s * S_{\text{acceptable pour l'aquifère}}$$

où α est estimé égal à 1 pour la craie et les calcaires carbonifères.

3.4. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX

Dans le cadre de l'évaluation du potentiel géothermique, le critère qualité de la ressource rend compte du caractère corrosif, encroûtant ou colmatant d'une eau souterraine. Il joue un rôle sur l'évaluation économique d'un projet car la typologie des matériaux utilisés doit être adaptée à la chimie des eaux.

Les phénomènes mis en jeu sont complexes (réactions chimiques de précipitation, dissolution) et font intervenir une gamme importante de paramètres du milieu qui ne sont pas toujours disponibles pour tous les aquifères (une forte hétérogénéité existe d'un aquifère à l'autre et d'un secteur à l'autre quant à la disponibilité des données).

Les données utilisées sont les données d'analyses des eaux souterraines disponibles en BSS et dans ADES.

Une gamme de paramètres d'évaluation des contraintes d'exploitation liées à la qualité des eaux ainsi que leur classification est définie dans le SEQ Eaux souterraines³ (les seuils proposés proviennent d'avis d'experts basés sur la thermodynamique des équilibres électrochimiques et/ou la bibliographie jugée comme faisant référence en ce domaine). Les paramètres retenus pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans le cadre de la géothermie sur nappe très basse énergie sont présentés dans les paragraphes suivants. Quant aux résultats, ils sont exposés pour chaque aquifère (selon les données disponibles) dans le chapitre 4 « Potentiel géothermique des aquifères du Nord-Pas de Calais ». Les valeurs présentées dans ce chapitre restent indicatives, seule une analyse complète et locale permettra de caractériser avec précision l'impact de la nappe sur les installations de forage et de pompage.

³ SEQ-Eaux souterraines : grille d'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à différents usages et fonctions établie dans le cadre d'une étude inter-agences de l'eau et en collaboration entre Agences de l'Eau, MATE et BRGM en 2001.

3.4.1. Paramètres de caractérisation du pouvoir corrosif des eaux souterraines

a) *CO₂ dissous*

- [CO₂ dissous] < 50 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- 50 mg/l < [CO₂ dissous] < 120 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- 120 mg/l < [CO₂ dissous] < 200 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- [CO₂ dissous] > 200 mg/l : eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

b) *Conductivité*

- C < 1300 µS/cm : aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- 1300 µS/cm < C ≤ 3000 µS/cm : aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- 3000 µS/cm < C ≤ 6000 µS/cm : aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- C > 6000 µS/cm : eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

c) *pH*

Le potentiel en hydrogène mesure l'activité de protons solvatés. On en déduit le caractère acide ou basique d'une solution. Le pH des eaux a une influence sur :

- les phénomènes de corrosion (corrosion plus raide à pH < 6,5)
- les phénomènes d'entartrage (carbonate de calcium moins solubles à pH élevé)

d) *Chlorures*

Les ions chlorures sont susceptibles de réagir avec l'eau en produisant de l'acide chlorhydrique. Il s'ensuit localement des zones à pH très faibles qui accélèrent la corrosion du métal. Ainsi, par exemple, l'eau en contact avec du cuivre dans un circuit de pompe à chaleur risque de provoquer des corrosions dès l'instant où la teneur en chlorures est supérieure à 150 mg/l (valeur guide à ne pas dépasser).

- [Cl⁻] < 150 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- 150 mg/l < [Cl⁻] < 400 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- 400 mg/l < [Cl⁻] < 1000 mg/l : aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- [Cl⁻] > 1000 mg/l : eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

e) Sulfates

- $[\text{SO}_4^-] < 250 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- $250 \text{ mg/l} < [\text{SO}_4^-] < 500 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- $500 \text{ mg/l} < [\text{SO}_4^-] \leq 1500 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- $[\text{SO}_4^-] > 1500 \text{ mg/l}$: eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

f) Sulfures

- $[\text{HS}^-] < 0.1 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- $0.1 \text{ mg/l} < [\text{HS}^-] < 8 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- $8 \text{ mg/l} < [\text{HS}^-] < 50 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- $[\text{HS}^-] > 50 \text{ mg/l}$: eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

3.4.2. Paramètre de caractérisation du pouvoir encroûtant ou colmatant des eaux souterraines : le titre hydrométrique (TH)

Le titre hydrométrique est le seul paramètre de caractérisation du pouvoir encroûtant ou colmatant des eaux souterraines disponible dans les bases de données ADES et BSS en quantité suffisante pour réaliser une analyse de la distribution des valeurs. Le titre hydrométrique (TH), ou dureté de l'eau, est une mesure de la concentration en ions alcalins terreux, calcium et magnésium essentiellement. Il traduit le pouvoir entartrant de l'eau. Ainsi 1°f (degré français) de TH correspond à une concentration de 10 mg/l de carbonate de calcium.

- $\text{TH} < 10^\circ\text{f}$: eau douce
- $10 < \text{TH} < 20^\circ\text{f}$: eau moyennement dure
- $20 < \text{TH} < 30^\circ\text{f}$: eau dure
- $\text{TH} > 30^\circ\text{f}$: eau très dure

4. Potentiel géothermique des aquifères du Nord-Pas de Calais

4.1. AVERTISSEMENT

Le travail de synthèse de ce projet a été réalisé à l'échelle régionale. Les cartes réalisées sont issues de moyennes et d'interpolations régionales.

La région a été découpée en maille de 500 m sur 500 m, et chaque maille a été renseignée d'une valeur moyenne ou interpolée. Les cartographies régionales en annexe et sur le site internet www.geothermie-perspectives.fr résultent de l'assemblage de tous ces pixels. **C'est pourquoi l'échelle de restitution des informations ne doit pas excéder le 1/100 000 et doit éventuellement se limiter à l'échelle de la commune.**

Malgré tous les efforts mis en œuvre pour apporter des résultats les plus proches de la réalité, la présence d'inexactitudes reste inévitable. Elles sont liées d'une part à l'utilisation de données ponctuelles moyennes sur des mailles de 500 m de côté et d'autre part à la méthodologie retenue et au mode d'acquisition des données sur le terrain. Par exemple, les données de terrain (ADES, BSS, etc...) représentent plus ou moins la réalité :

- les forages d'eau sont préférentiellement implantés dans les zones productives, ce qui crée une surreprésentation dans l'échantillon ;
- les forages peu ou pas productifs ne sont pas toujours recensés, impliquant une mauvaise connaissance des zones improductives ;
- certains forages sont acidifiés pour augmenter leur productivité mais cette information n'est pas toujours recensée dans les bases de données. L'échantillon est donc constitué, par défaut, de forages acidifiés et de forages non acidifiés ;
- les conditions expérimentales des mesures de température de la nappe *in situ* sont mal connues (température de l'air, purge du forage...).

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

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

Le pétitionnaire devra également s'assurer de la compatibilité de son projet avec la réglementation en vigueur (code Minier, code de l'Environnement, SDAGE...).

À l'échelle d'une maille de 500 m de côté, le sens d'écoulement n'est pas définissable à partir de données régionales car il peut exister des changements locaux de direction (fluctuations saisonnières, pompages situés à proximité, etc...). Le sens d'écoulement au niveau de l'installation devra donc être déduit d'une étude plus locale réalisée par un bureau d'études.

4.3. AQUIFÈRE DES SABLES PISSARDS

4.3.1. Limite d'extension retenue

La profondeur du toit de l'aquifère des Sables Pissards est inférieure à 100 m sur toute son extension. Afin d'obtenir la limite retenue pour l'étude, les zones où l'épaisseur de la formation est inférieure à 3 m ont été retirées car supposées comme peu aquifères (Figure 13). La surface retenue est de 754 km², soit 87% de la surface brute, ce qui représente 3145 mailles.

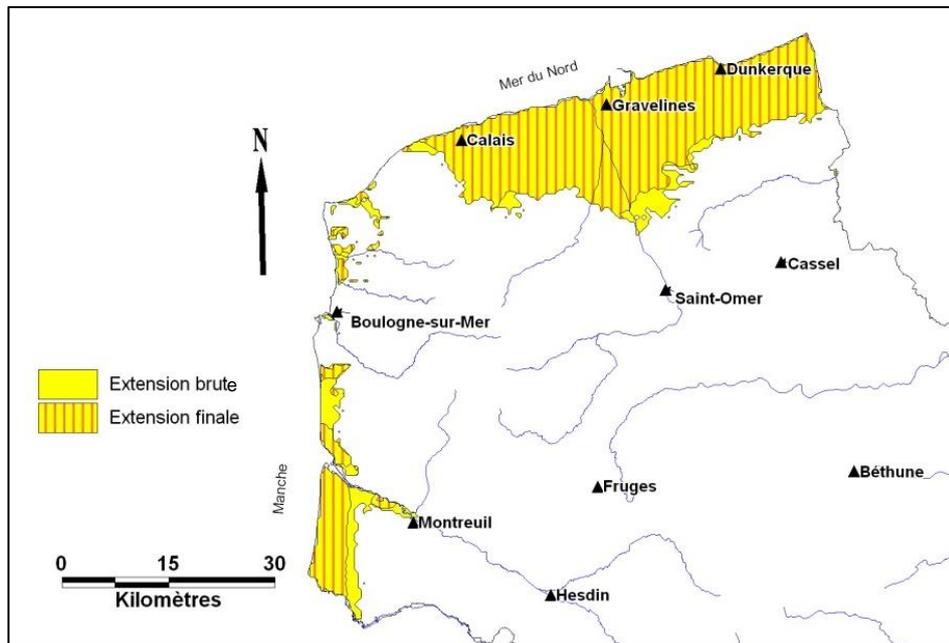


Figure 13 : Limite retenue pour l'étude de l'aquifère des Sables Pissards

4.3.2. Définition du critère profondeur

a) Géométrie de l'aquifère

Les Sables Pissards sont datés du Pléistocène et de l'Holocène. Ils sont toujours affleurants, leur toit correspond donc à la surface topographique (hormis quelques points locaux où ils ont fait l'objet d'un recouvrement de remblais).

La base de cette formation géologique s'abaisse en direction du nord-nord-ouest dans la Plaine Maritime et en direction de l'ouest dans la région des Bas-champs. Dans le Boulonnais, les dépôts sont localisés et situés à une altitude plus élevée, la modélisation géologique y est peu représentative car les données sont peu nombreuses (Figure 14).

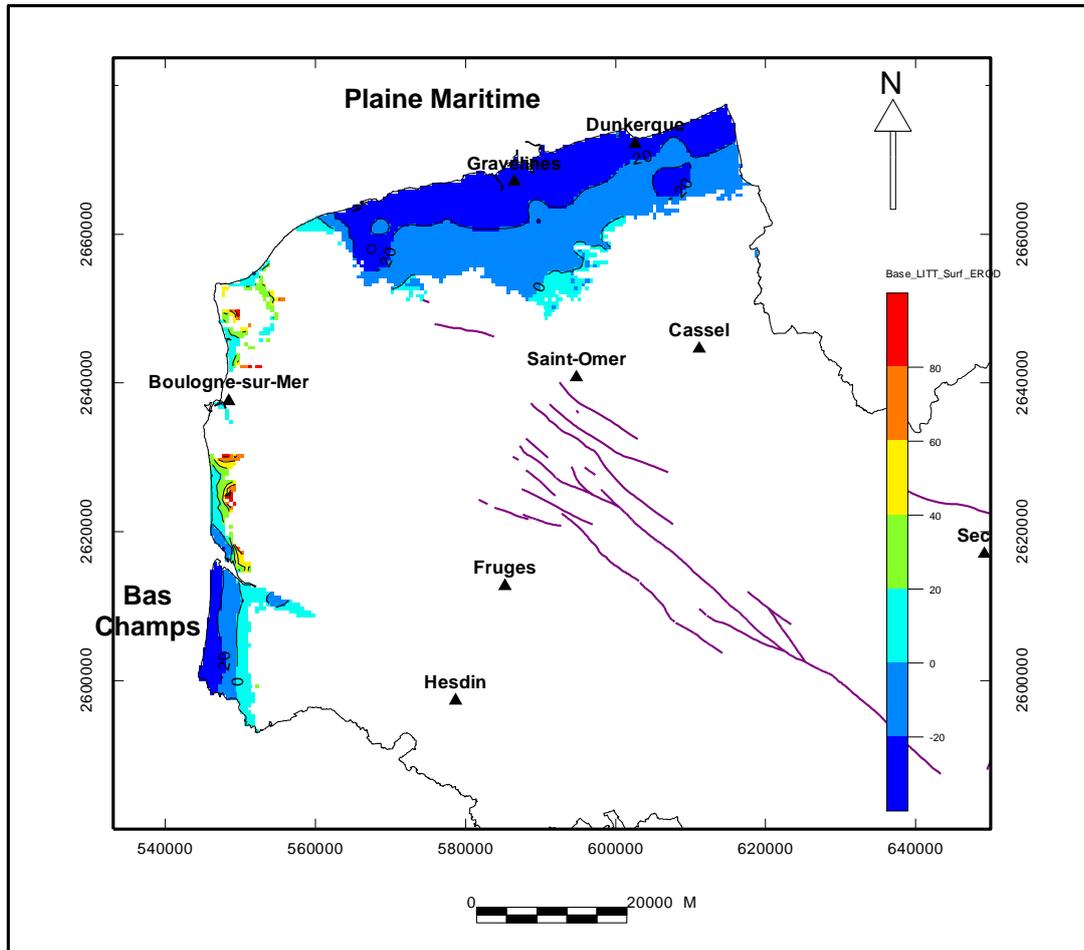


Figure 14 : Isohypses du mur des Sables Pissards (en mètre NGF)

L'épaisseur des Sables Pissards a une tendance à augmenter vers le nord-nord-ouest dans la Plaine maritime et vers l'ouest dans la région des Bas-Champs (Figure 15) et atteint une valeur maximale de 50 m à Berck, Le Touquet et Bray-Dunes.

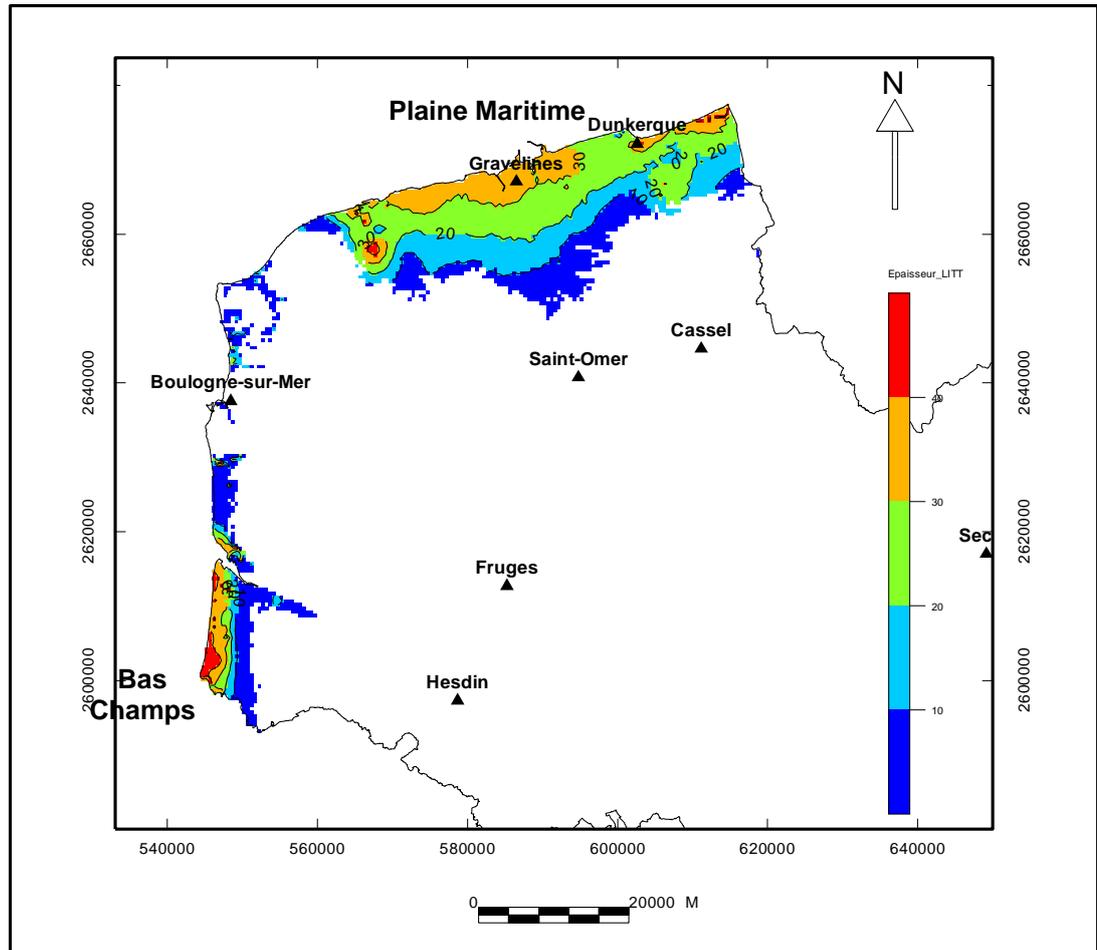


Figure 15 : Epaisseur des Sables Pissards

b) Piézométrie et captivité

La seule carte piézométrique ayant pu être mise à contribution pour la réalisation de l'Atlas date de 1969 et concerne la zone des wateringues (Bize *et al.*, 1969). L'extension de celle-ci est visible sur la Figure 16 et sur la Figure 17. La majorité des mesures piézométriques est comprise entre 0 et 5 m de profondeur, quelques rares points sont supérieurs à 5 m de profondeur.

Les données piézométriques ponctuelles sont asynchrones et malheureusement insuffisantes pour tracer une carte piézométriques pour l'ensemble de l'aquifère. D'autre part, près de la côte, cette nappe est influencée par la marée. Il est toutefois intéressant de noter que le toit de la nappe se situe principalement dans la tranche des 5 premiers mètres de profondeur.

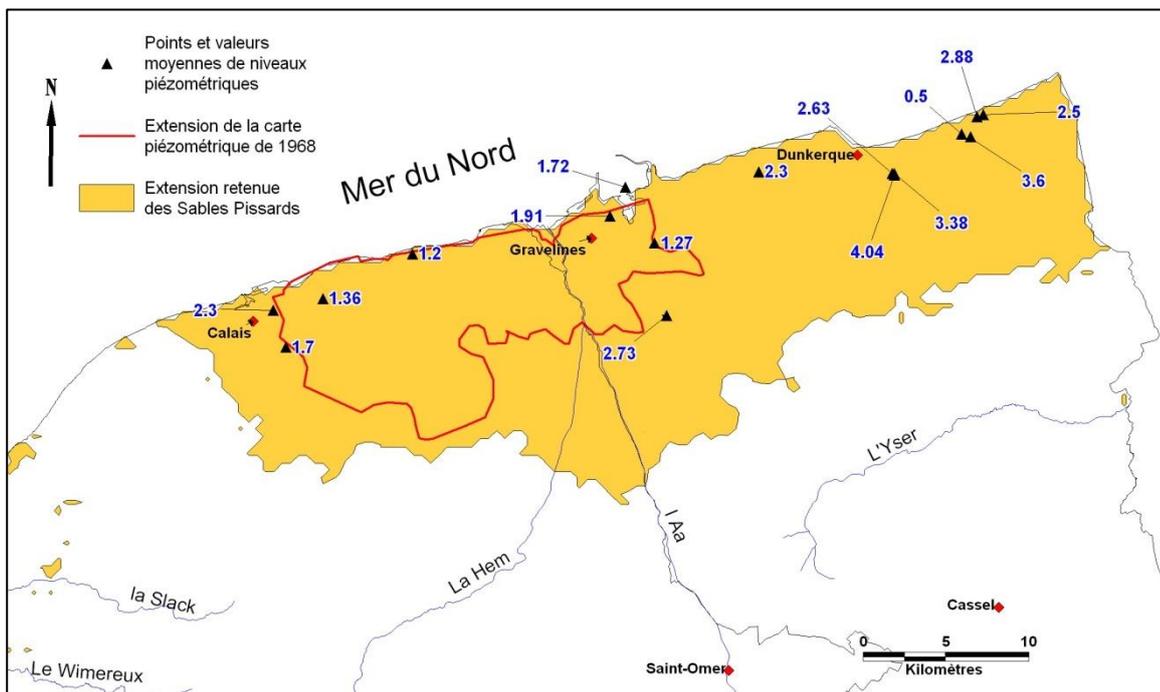


Figure 16 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans la Plaine Maritime

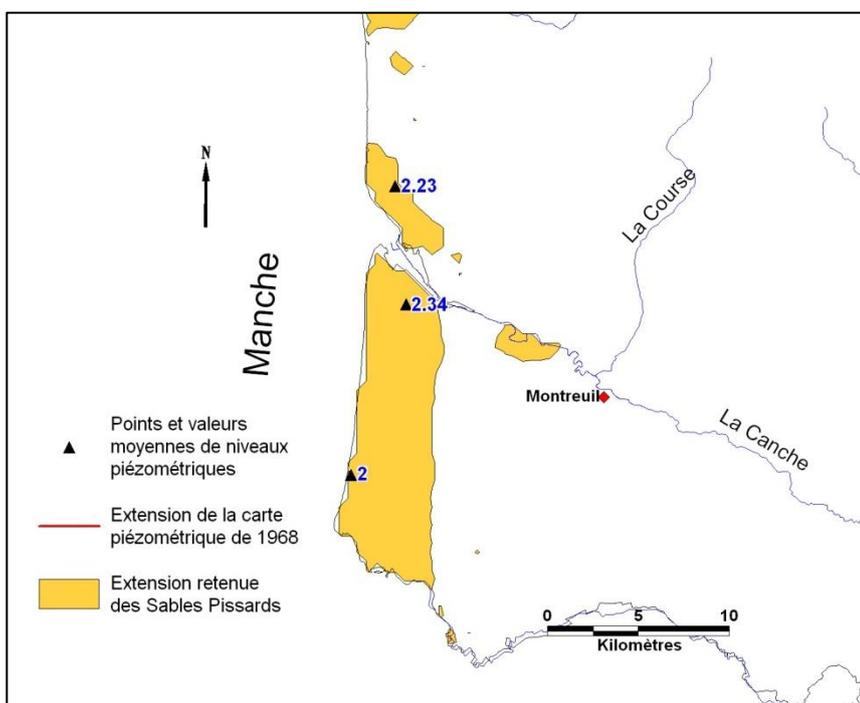


Figure 17 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans les Bas-Champs

En conclusion, l'aquifère des Sables Pissards est affleurant et libre sur toute sa superficie. De ce fait, le critère profondeur d'accès à la ressource en eau correspond à la profondeur de la nappe. **L'aquifère des Sables Pissards semble peu favorable à une exploitation par PAC car, le niveau de la nappe étant à moins de 5 m de profondeur, la réinjection en nappe sera difficilement réalisable** (Annexe 1, planche 1).

4.3.3. Définition du critère débit d'exploitation par forage

13 mesures de débits spécifiques sont recensées dans les bases BSS et ADES : 12 d'entre elles sont localisées dans la Plaine Maritime (Tableau 4). Dans la région des Bas-Champs, la seule mesure de débit spécifique recensée est égale à 3.53 m³/h/m.

Au vu du faible nombre de données récupérées pour l'aquifère des Sables Pissards dans la région de la Plaine Maritime, il est plus intéressant de réaliser une **analyse de la distribution des valeurs de débits spécifiques** (Figures 18 et 19) pour évaluer le critère « débit d'exploitation par forage » (paragraphe 3.3).

Statistiques	Débit spécifiques (m ³ /h/m)
Nb. d'observations	12
Valeur minimum	0.5
Valeur maximum	12.3
1er Quartile	1.1
Médiane	2.2
3ème Quartile	4.8
Moyenne	3.6

Tableau 4 : Distribution des valeurs de débits spécifiques des Sables Pissards dans la Plaine Maritime

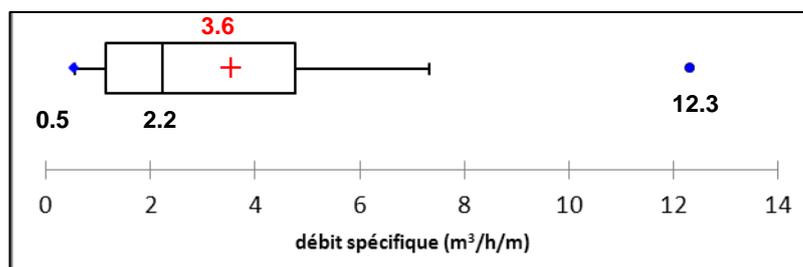


Figure 18 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables Pissards (m³/h/m)

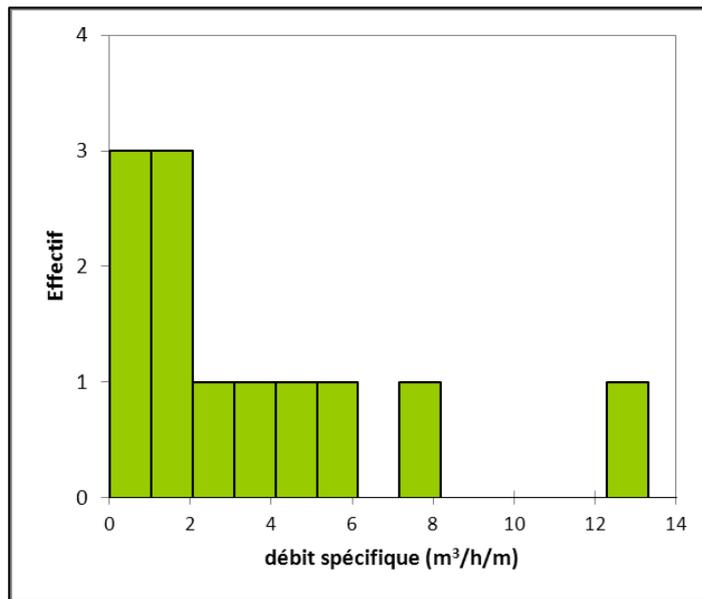


Figure 19 : Histogramme des débits spécifiques ($m^3/h/m$) recensés dans les Sables Pissards de la Plaine Maritime

Dans la Plaine Maritime, les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère des Sables Pissards sont hétérogènes, ainsi la valeur de débit spécifique retenue est la valeur de la médiane soit $2.2 m^3/h/m$ environ. Dans la région des Bas-Champs, aucune valeur n'est retenue par manque de données.

Conformément à la méthodologie prédéfinie, le débit d'exploitation est estimé à partir d'un rabattement acceptable de $1/3$ de l'épaisseur saturée avec un maximum de 5 m.

Les débits d'exploitation par forage obtenus varient entre 5 et $11 m^3/h$. **Près de 93% des mailles présentent un débit d'exploitation par forage favorable à la géothermie et seulement 7% présentent un débit peu favorable** (Annexe 1, planche 2).

4.3.4. Définition du critère température

Les données sur la température de l'eau de l'aquifère des Sables Pissards ont été récupérées sur ADES et sur la BSS. Une analyse de la distribution des valeurs récupérées a été réalisée et est présentée dans le Tableau 5.

Nombre de points mesurés	7
Nombre de mesures effectués in situ	64
Date du prélèvement le plus ancien	05/07/2001
Date du prélèvement le plus récent	30/10/2006
Température moyenne de l'eau (en°C)	13
Température minimale de l'eau (en°C)	10
Température maximale de l'eau (en°C)	18
1 ^{er} Quartile	11,8
Valeur médiane	12,3
3 ^{ème} Quartile	14
Coefficient de variation	0,16
Ecart-type (n)	2,11

Tableau 5 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Sables Pissards

Les 1^{er} et 3^{ème} quartiles sont relativement proches de la médiane et de la moyenne (Figure 20), la température de la nappe des Sables Pissards est relativement homogène. La température retenue pour le critère est de 13°C pour l'ensemble de l'aquifère, **c'est donc un critère favorable** (Annexe 1, planche 3).

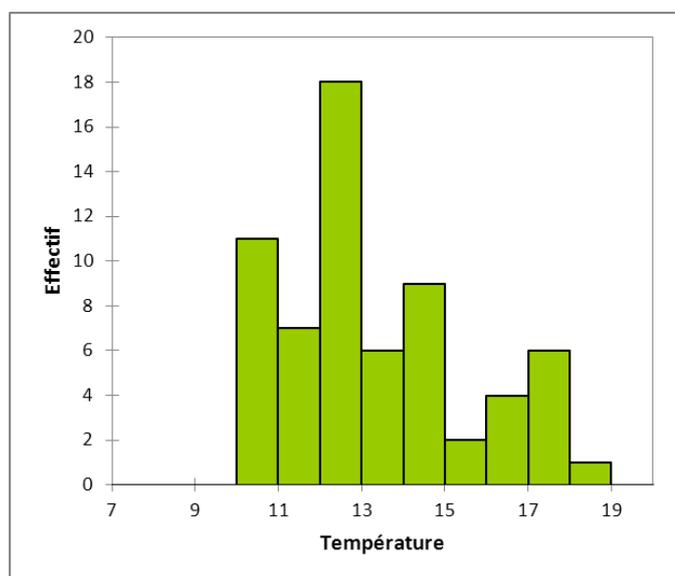


Figure 20 : Histogramme des températures de la nappe des Sables Pissards

4.3.5. Qualité de l'eau

D'après les données disponibles dans ADES et la BSS, les eaux de la nappe des Sables Pissards sont globalement peu corrosives :

- Le CO₂ dissous mesuré est toujours inférieur à 50 mg/l (analyses provenant de 3 forages ; les valeurs sont de 6 / 21 / 37 mg/l) ;
- Les pH mesurés sont proches de la neutralité et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations (analyses provenant de 9 forages, Figure 21) ;
- Les teneurs en chlorures sont toutes inférieures à 150 mg/l (analyses provenant de 3 forages ; les valeurs sont 50 / 52 / 77 mg/l) ;
- Les teneurs en sulfates sont toutes à 250 mg/l sauf une (analyses provenant de 4 forages ; les valeurs sont 64,5 / 82,5 / 85 / 941,4 mg/l) ;

Les eaux de la nappe des Sables Pissards semblent dures à très dures. En effet, les valeurs de dureté sont comprises entre 21,1 et 36,1°f (analyses provenant de 3 forages). Il y a un risque potentiel de colmatage des installations.

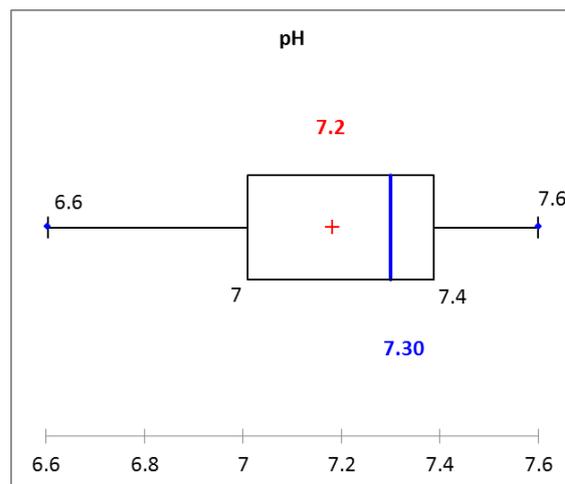


Figure 21 : Représentation du pH de la nappe des Sables Pissards par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

D'autre part, près des côtes, l'eau de mer pénètre dans les Sables Pissards (biseau salin). La nappe est alors plus chargée en sel et peut détériorer les installations de forage. Seule une analyse chimique détaillée permettra de préciser les impacts réels sur installation.

4.4. AQUIFÈRE DES SABLES LANDÉNIENS

4.4.1. Limite d'extension retenue

Les Sables du Landénien supérieur s'étendent sur 29% de la région (« *extension brute* » sur la Figure 22). La modélisation géologique (paragraphe 3.2.1) a permis de définir la profondeur du toit et l'épaisseur de cette formation géologique, de délimiter la zone d'étude comprise entre 0 et 100 m de profondeur et de supprimer les secteurs d'épaisseur inférieure à 3 m (zones peu aquifères). Faute de données suffisantes (voire inexistantes) sur l'existante d'une nappe locale, les buttes témoins ont également été désélectionnées (« *extension retenue* » sur la Figure 22).

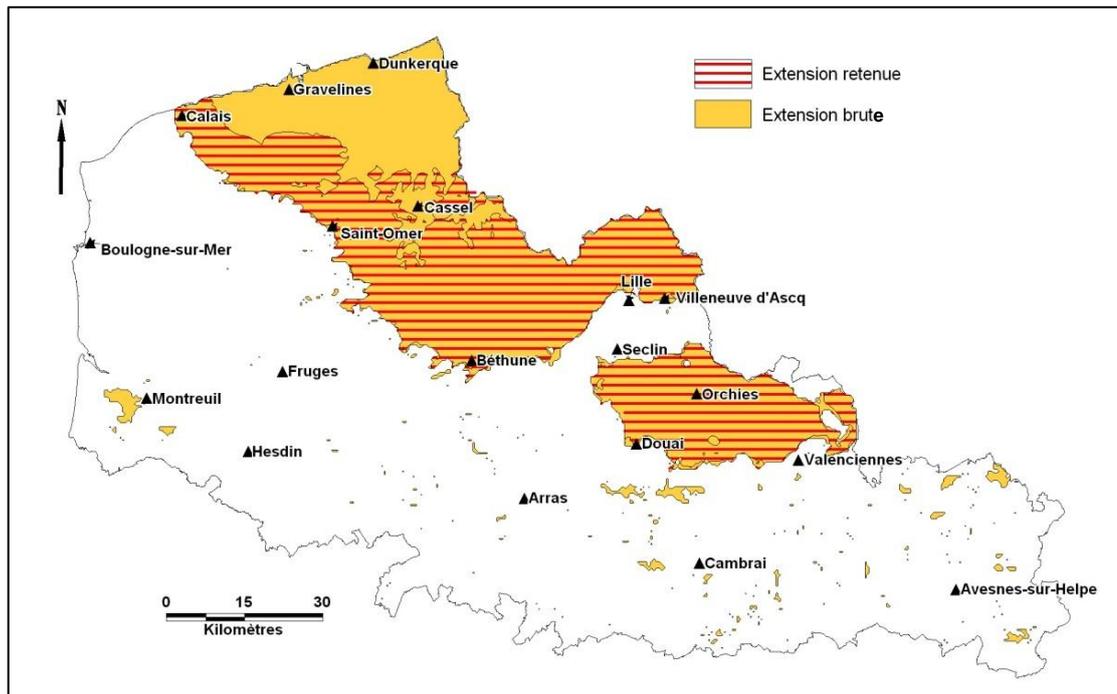


Figure 22 : Les extensions des Sables du Landénien supérieur

4.4.2. Définition du critère profondeur

a) Toit de l'aquifère

Les Sables landéniens sont présents dans la Plaine des Flandres, le Bassin d'Orchies et sous forme de buttes témoins dans le reste de la région.

L'altitude du toit de ces sables varie entre -129 m NGF sous les Flandres et + 247 m NGF en Avesnois (Figure 23).

En bordure sud de la Plaine des Flandres, les Sables landéniens sont affleurants ou sub-affleurants, le toit y est à une altitude d'environ 20 à 25 m NGF. Puis le toit s'approfondit rapidement vers le nord sous la plaine des Flandres, pour atteindre jusqu'à -129 m d'altitude.

Ces sables sont également affleurants ou sub-affleurants en bordure du Bassin d'Orchies (altitudes avoisinant les 20~25 m). Il existe un léger approfondissement du toit en direction du sud, vers Valenciennes.

Cette formation géologique est absente de l'Anticlinal du Mélantois (entre Lille et Seclin).

Les épaisseurs les plus faibles sont localisées en bordure de la Plaine des Flandres et du Bassin d'Orchies, où les sables affleurants apparaissent érodés (Figure 24). L'épaisseur de cette formation est relativement homogène dans la Plaine des Flandres. Dans le Bassin d'Orchies, elle est plus épaisse au centre (forme de cuvette).

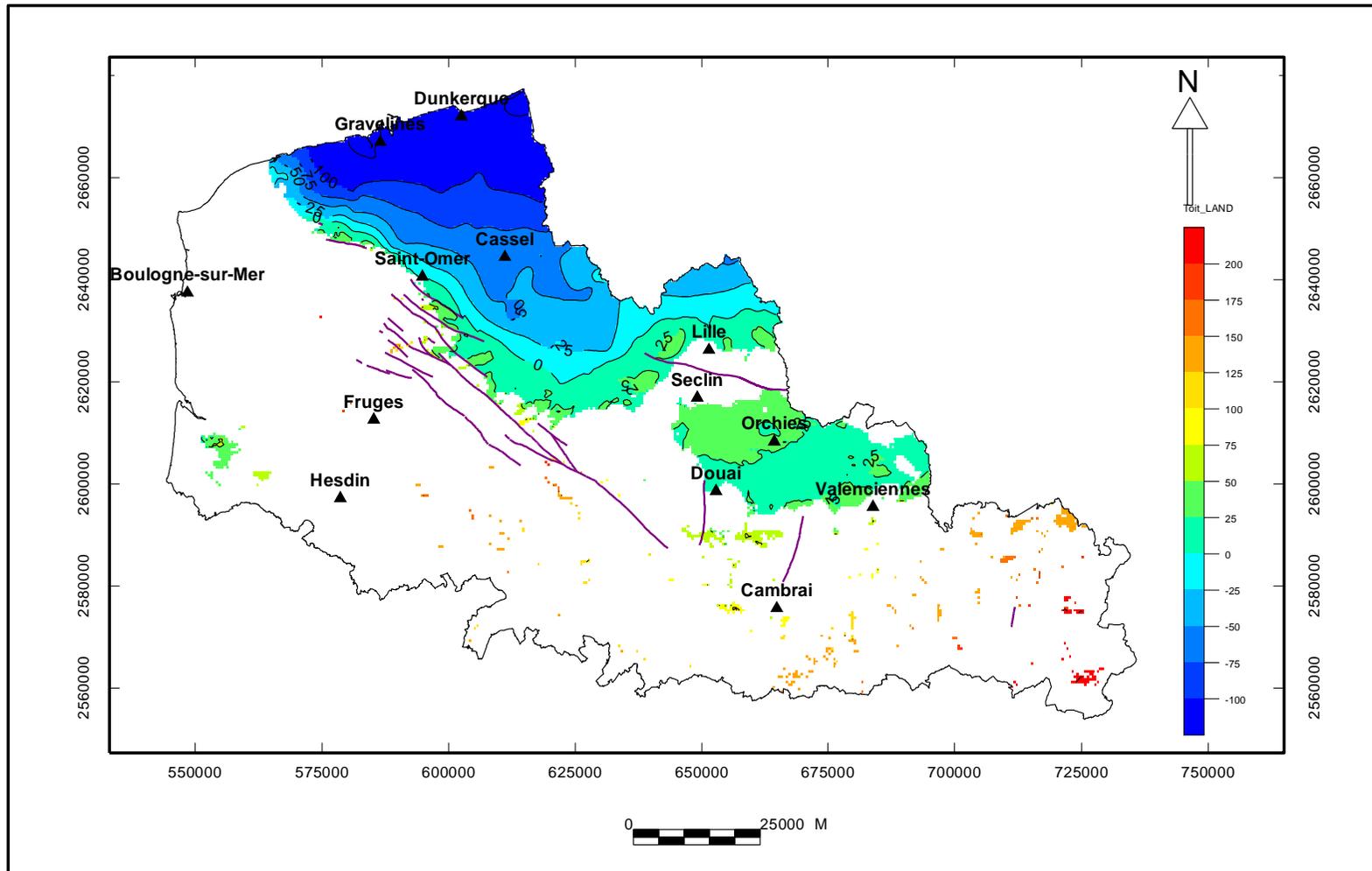


Figure 23 : Isohypses du toit des Sables landéniens (en mètre NGF)

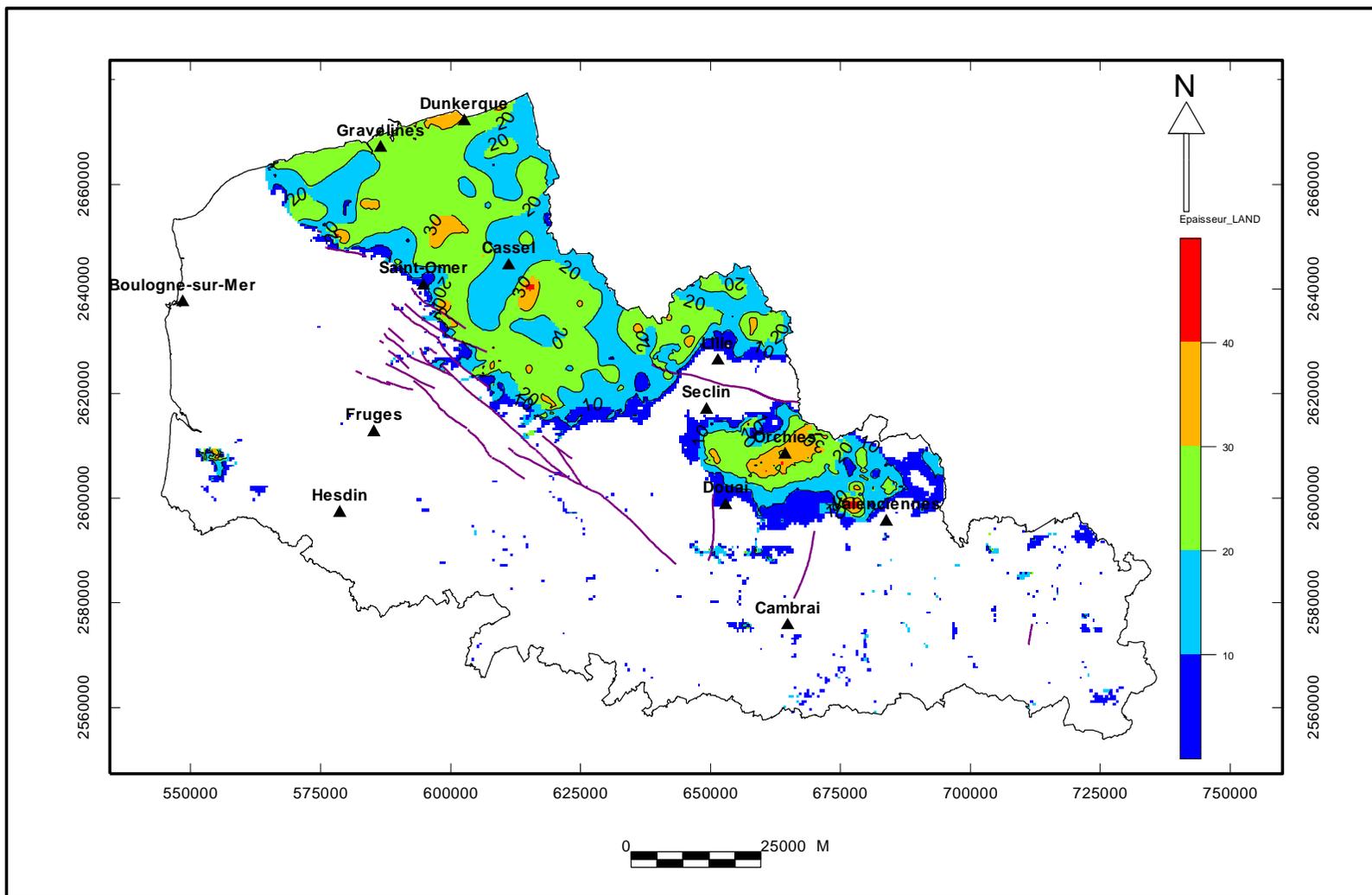


Figure 24 : Epaisseur des Sables landéniens (en mètre)

b) Piézométrie et captivité

Il existe deux cartes piézométriques pour l'aquifère des Sables landéniens :

- La première datant de 1971 tracée dans la Plaine des Flandres, le Bassin d'Orchies et la région lilloise (MANIA, 1971) ;
- la seconde, tracée en 1997 uniquement dans la Plaine des Flandres (CAOUS *et al.*, 1997).

Afin d'obtenir une valeur piézométrique par maille, une extrapolation a été réalisée pour chacune des cartes. Après comparaison des deux cartes extrapolées, la valeur piézométrique la plus profonde, c'est-à-dire la moins favorable pour l'exploitation, a été retenue.

Dans le formulaire visible sur le site internet, si plusieurs niveaux piézométriques recensés sont au droit d'une maille, ils sont indiqués dans les lignes « *profondeur minimale recensée de la nappe* » et « *profondeur maximale recensée de la nappe* » (attention à ne pas confondre ces niveaux avec des Basses-Eaux et Hautes-Eaux).

La nappe des Sables landéniens est majoritairement captive sous les Argiles des Flandres. Elle est libre en bordures sud du bassin des Flandres et du bassin d'Orchies (Figure 25).

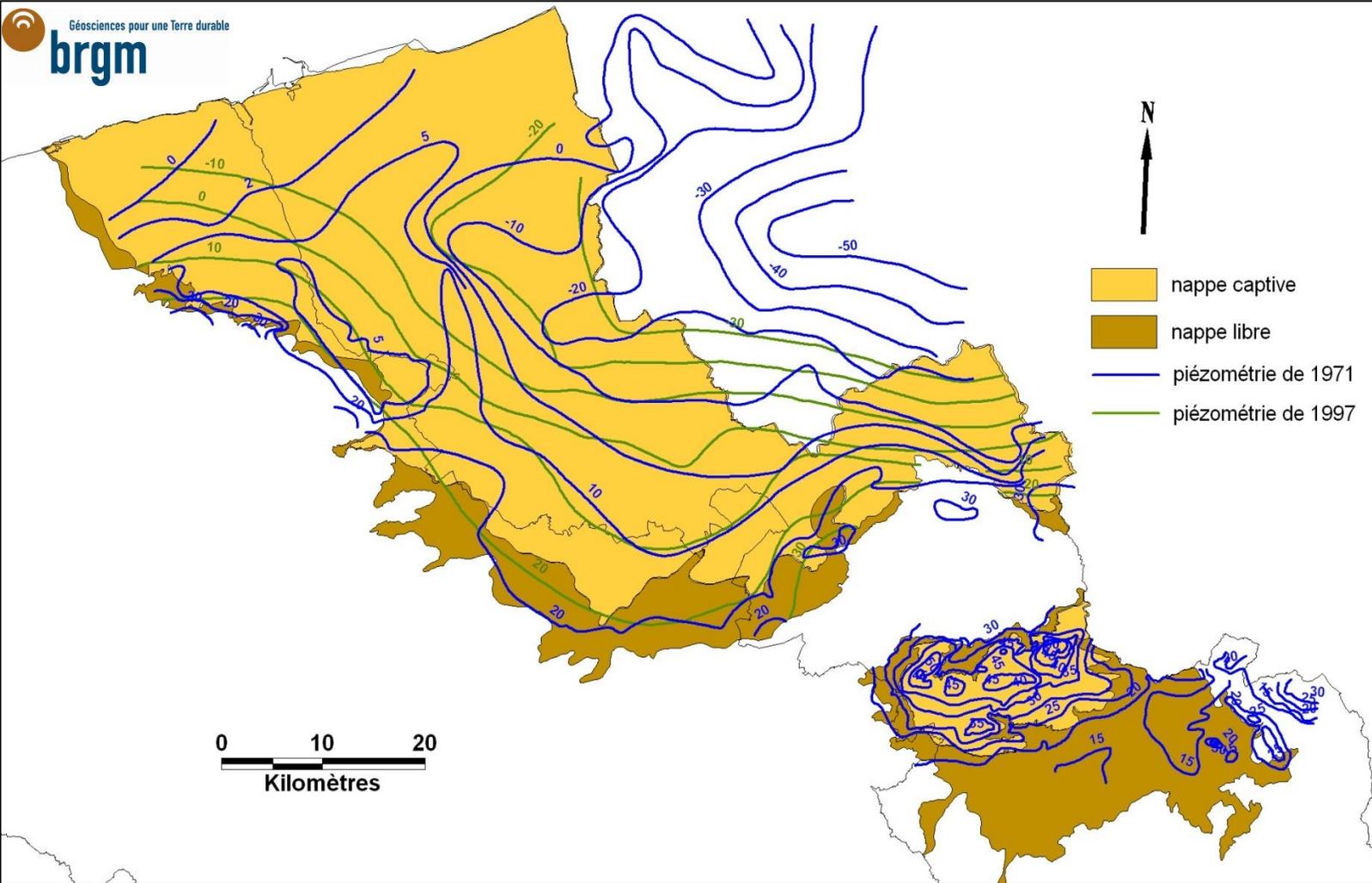


Figure 25 : Carte piézométrique des Sables landéniens

La carte « *profondeur d'accès à la ressource en eau* » (Annexe 1, planche 5) est calculée à partir du toit de l'aquifère, des cartes piézométriques et de la délimitation des zones captives et libres de la nappe (paragraphe 3.2).

En bordure de de la plaine des Flandres et du bassin d'Orchies (essentiellement là où la nappe est libre), il existe de nombreuses zones peu favorables à la géothermie où la nappe est peu profonde et la réinjection dans l'aquifère risque d'être difficile.

Dans la zone captive du bassin d'Orchies, le toit des sables est peu profond et **le critère est globalement très favorable à favorable**, à l'exception de Mons-en-Pévèle et Moncheaux, où le toit des sables dépasse les 30 mètres de profondeur (secteurs défavorables).

Dans la plaine des Flandres, en bordure de la zone captive, il existe une bande peu large où **la profondeur d'accès à la ressource est favorable, voire très favorable**, à la géothermie sur nappe. Cependant, les Sables landéniens s'approfondissent rapidement vers le nord-est impliquant rapidement un classement **plutôt défavorable**.

4.4.3. Définition du critère « débit d'exploitation par forage »

56 mesures de débits spécifiques sont recensées dans les bases BSS et ADES (Tableau 6). Au vu du nombre de données et de leur répartition géographique, une **analyse statistique sur valeurs de débits spécifiques** a été réalisée pour évaluer le critère productivité (Figures 26 et 27, et voir paragraphe 3.3).

Statistique	DÉBIT SPÉCIFIQUE (m ³ /h/m)
Nb. d'observations	56
Minimum	0.03
Maximum	3.60
1er Quartile	0.27
Médiane	0.63
3ème Quartile	0.94
Moyenne	0.76
Variance (n-1)	0.53
Ecart-type (n-1)	0.73

Tableau 6 : Distribution des valeurs de débits spécifiques de la nappe des Sables landéniens

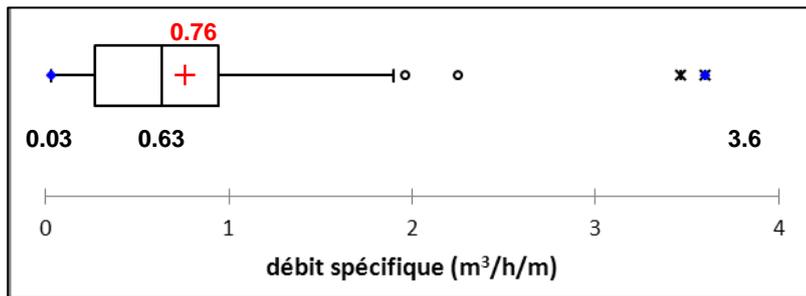


Figure 26 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables landéniens

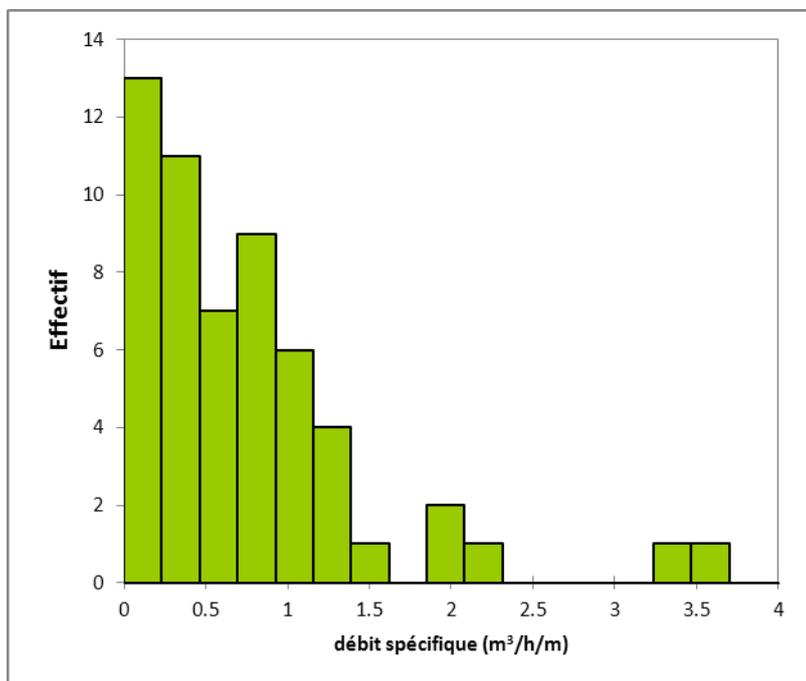


Figure 27 : Histogramme des débits spécifiques ($m^3/h/m$) recensés dans les Sables landéniens

La valeur de débit spécifique retenue pour l'ensemble de l'aquifère des sables landéniens est la valeur de la médiane soit $0,6 m^3/h/m$ environ.

Conformément à la méthodologie prédéfinie, le débit d'exploitation est estimé à partir d'un rabattement acceptable de $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur saturé de l'aquifère avec un maximum de 5 m.

Les débits d'exploitation par forage obtenus sont tous inférieurs à $5 m^3/h$ (la valeur maximale obtenue est de $3,16 m^3/h$), ainsi le **critère productivité est défavorable sur l'ensemble de l'aquifère** (Annexe 1, planche 6).

4.4.4. Définition du critère température

Les données sur la température de l'eau de la nappe des Sables landéniens ont été récupérées sur ADES et sur la BSS (Tableau 7).

Nombre de points mesurés	19
Nombre de mesures effectués in situ	173
Date du prélèvement le plus ancien	15/06/1994
Date du prélèvement le plus récent	09/12/2008
Température moyenne de l'eau (en°C)	13,1
Température minimale de l'eau (en°C)	5,1
Température maximale de l'eau (en°C)	18,1
1 ^{er} Quartile	12
Valeur médiane	13,2
3 ^{ème} Quartile	14,1
Coefficient de variation	0,15
Ecart-type (n)	1,9

Tableau 7 : Synthèse des données recueillies sur la température de la nappe des Sables landéniens

Une analyse de la distribution des valeurs récupérées a été réalisée (Figures 28 et 29). La distribution graphique des données sur l'histogramme en Figure 28 montre que près de 95% des valeurs mesurées ont une température entre 10 et 16,5°C. L'effectif maximum des mesures se situe entre 13 et 13,5°C.

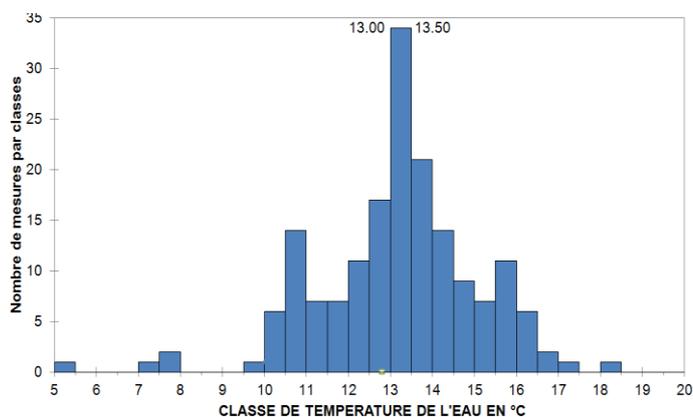


Figure 28 : Histogramme des températures de la nappe des Sables landéniens

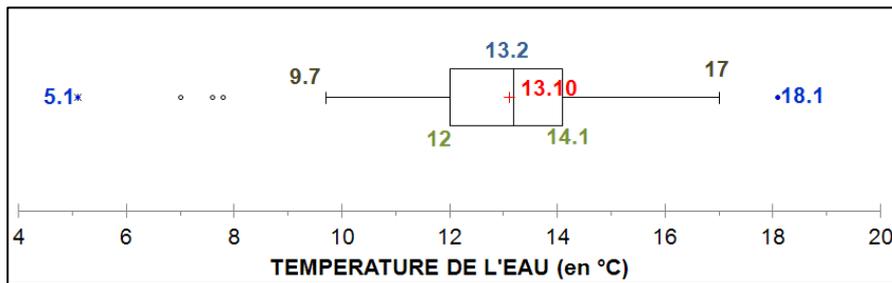


Figure 29 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe des Sables landéniens

Il est difficile d'effectuer une étude statistique plus poussée (interpolation) au vu du petit nombre de points mesurés (19), du faible taux de mesures sur chacun d'eux, de leur positionnement et de la variabilité temporelle trop importante des mesures.

Aucune tendance n'a pu être mise en évidence sur la variation de la température en fonction de la profondeur. Il est probable que la température de l'eau augmente parallèlement à l'approfondissement des Sables landéniens sous les argiles yprésiennes dans la Plaine des Flandres, mais la limite des 100 premiers mètres de profondeur de cette étude empêche probablement d'observer ce phénomène.

En conclusion, la température de la nappe des Sables landéniens est considérée comme relativement homogène. La température retenue pour le critère est de 13,1°C pour l'ensemble de l'aquifère, **c'est donc un critère favorable** à l'exploitation de cette nappe pour la géothermie TBE (Annexe 1, planche 7).

4.4.5. Qualité de l'eau

D'après les données disponibles dans ADES et la BSS, les eaux de la nappe des Sables landéniens sont globalement peu corrosives (Figure 30) :

- Le CO₂ dissous mesuré est toujours inférieur à 50 mg/l (analyses provenant de 8 forages) ;
- Les conductivités mesurées sont toutes inférieures à 1300 µS/cm (analyses provenant de 5 forages) ;
- Les pH mesurés sont proches de la neutralité et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations (analyses provenant de 71 forages) ;
- Les teneurs en chlorures sont à plus de 75% inférieures à 150 mg/l (analyses provenant de 65 forages) ;
- Les teneurs en sulfates sont à plus de 75 % inférieures à 250 mg/l (analyses provenant de 68 forages) ;

Les eaux de la nappe des Sables landéniens sont peu encroutantes. En effet, 50 % des valeurs de dureté sont inférieures à 4°f (analyses provenant de 53 forages, Figure 30). Quelques valeurs de dureté indiquent que la nappe est dure (TH > 20°f), notamment là où la nappe des Sables landéniens est affleurantes, ou proche de l’affleurement, dans les secteurs de continuité hydraulique avec la nappe de la craie.

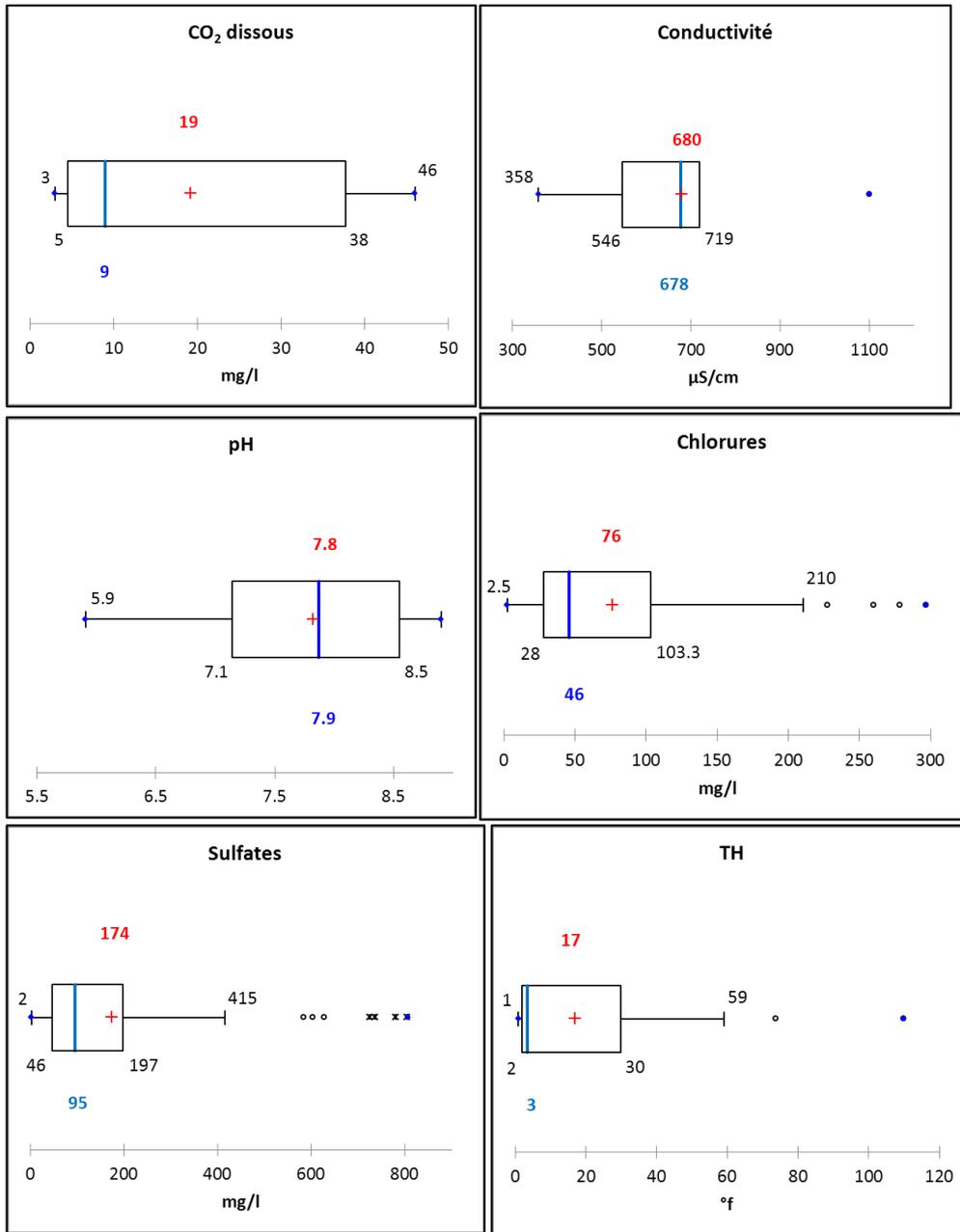


Figure 30 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des Sables landéniens par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

4.5. AQUIFÈRE DE LA CRAIE

4.5.1. Limite d'extension retenue

La Craie du Crétacé supérieur s'étend sur 90% de la région. La modélisation géologique (paragraphe 3.2.1) a permis de définir la profondeur du toit de la Craie crétacée et de délimiter la zone d'étude comprise entre 0 et 100 m de profondeur et dont l'épaisseur est supérieure à 3 m.

Cependant, toute la Craie n'est pas aquifère, particulièrement sous la Plaine des Flandres (DUFRENOY *et al.*, 2010). Le croisement entre la carte d'extension des zones aquifères de la BDLisa et de celle de l'extension de la Craie permet d'obtenir l'extension finale prise en compte pour la suite de l'étude (Figure 31).

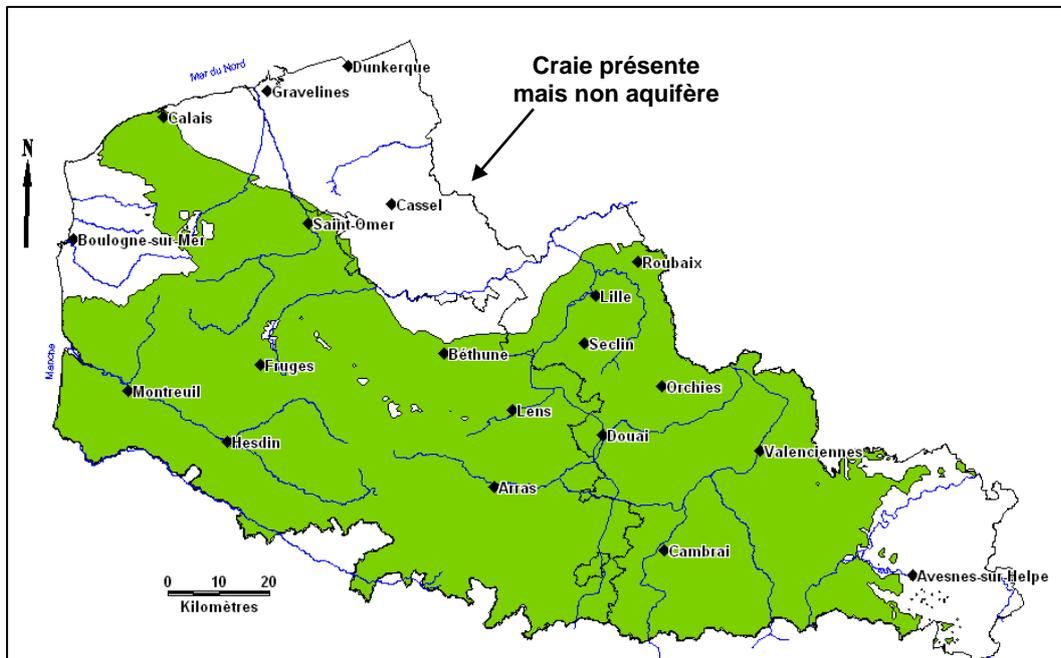


Figure 31 : Extension retenue pour l'aquifère de la Craie

4.5.2. Définition du critère profondeur

a) Géométrie de l'aquifère

Le toit de la Craie varie de -177 m à +200 m NGF et présente deux morphologies distinctes selon les régions (Figure 32) :

- Dans la Plaine des Flandres et le Bassin d'Orchies, les courbes isohypses du toit sont lisses. La Craie est ici recouverte par les terrains tertiaires et protégée

de l'érosion. L'altitude du toit varie entre 0 et -177 m NGF. Dans la Plaine des Flandres, la tendance générale est à l'approfondissement vers le nord. Le Bassin d'Orchies est caractérisé par un approfondissement vers son centre. Le dôme du Mélantois, situé entre la Plaine des Flandres et le Bassin d'Orchies, est bien visible ici : le toit remonte jusqu'à une altitude d'environ +50 m NGF.

- Dans le secteur des collines de l'Artois, du Cambrésis et de la bordure avesnoise, les courbes isohypses suivent la topographie. La Craie y est plus érodée car elle n'est pas recouverte par les terrain tertiaires. La géométrie du toit est donc calquée sur le relief. En bordure de l'Avesnois, le toit remonte progressivement. L'altitude du toit la plus haute (+200 m NGF) est observée dans l'Artois. Dans les Bas-Champs, la Craie s'enfoncé progressivement sous les Sables Pissards.

Dans l'Artois, les zones blanches correspondent aux secteurs où la Craie a été totalement érodée, ou à des secteurs où elle ne s'est jamais déposée. C'est le cas de certains fonds de vallées et du compartiment sud des failles de l'Artois où les terrains plus anciens sont remontés à la surface à la faveur de jeux de failles (Dennebroeucq, Audincthun, Matringhem ou encore Pernes, etc...).

L'épaisseur de la Craie peut atteindre environ 265 m (Figure 33). La tendance générale est à une réduction progressive de l'épaisseur vers l'est au fur et à mesure du rapprochement de la limite de dépôt sédimentaire. Au niveau de l'anticlinal de l'Artois et de la bordure de la Boutonnière du Boulonnais, les terrains plus anciens sont remontés et la Craie érodée y est moins épaisse.

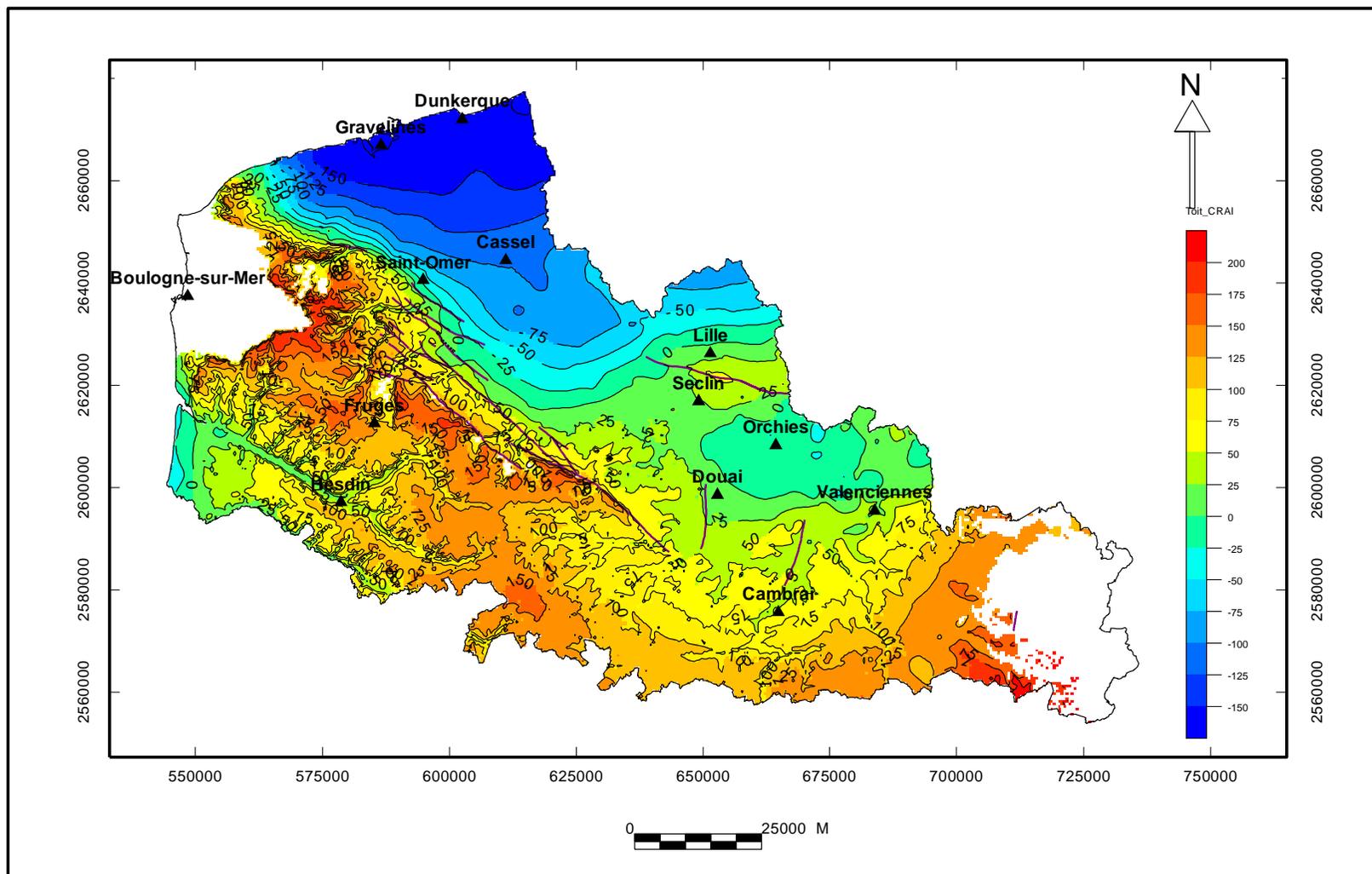


Figure 32 : Isohypes du toit de la Craie crétacée (en mètre NGF)

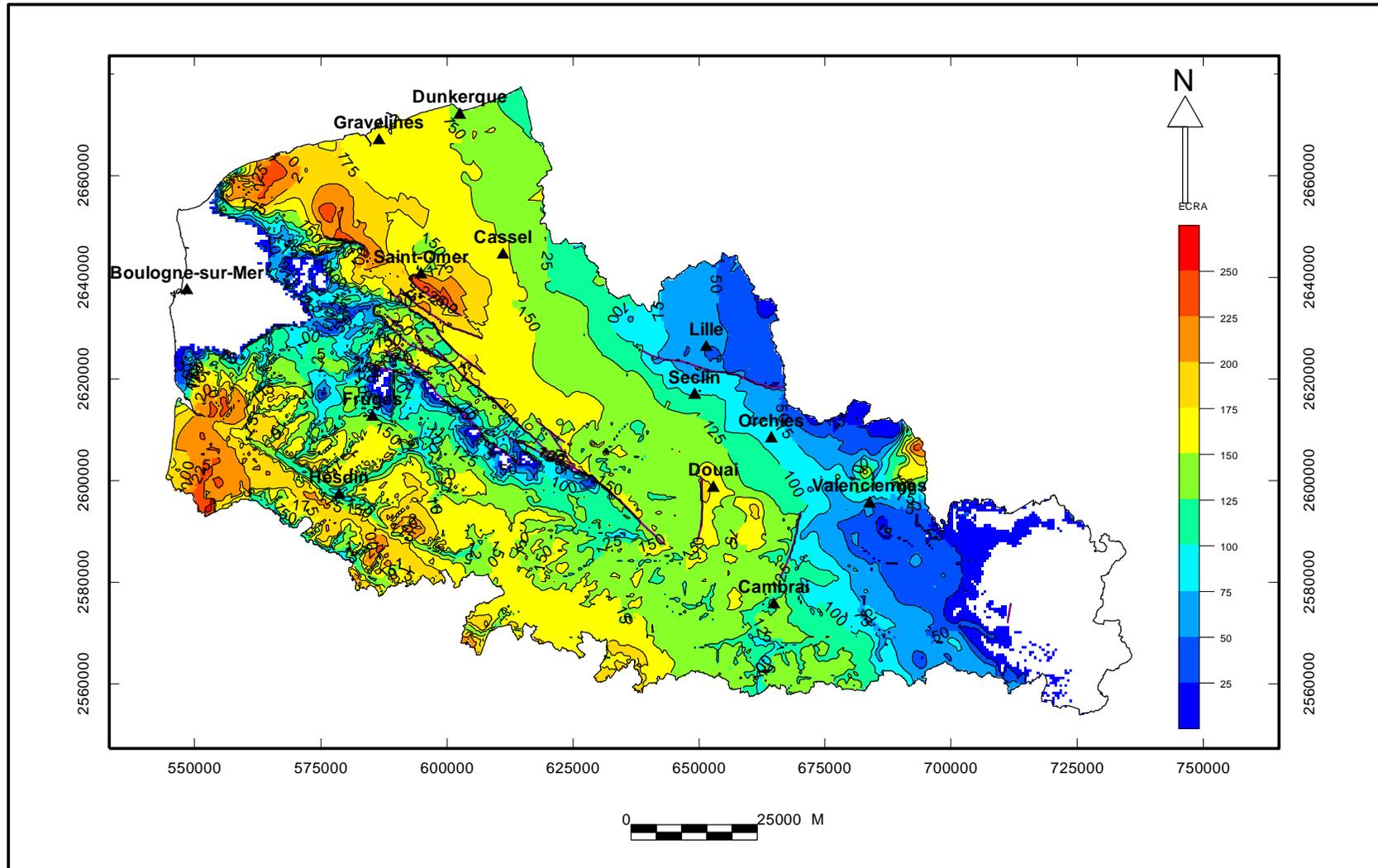


Figure 33 : Epaisseur de la Craie crétacée (en mètre)

b) Piézométrie et captivité

La nappe de la Craie est principalement libre sur toute la région Nord-Pas de Calais. Elle est captive dans le Bassin d'Orchies et la Plaine des Flandres, voire artésienne en bordure de la Plaine des Flandres (Figure 34).

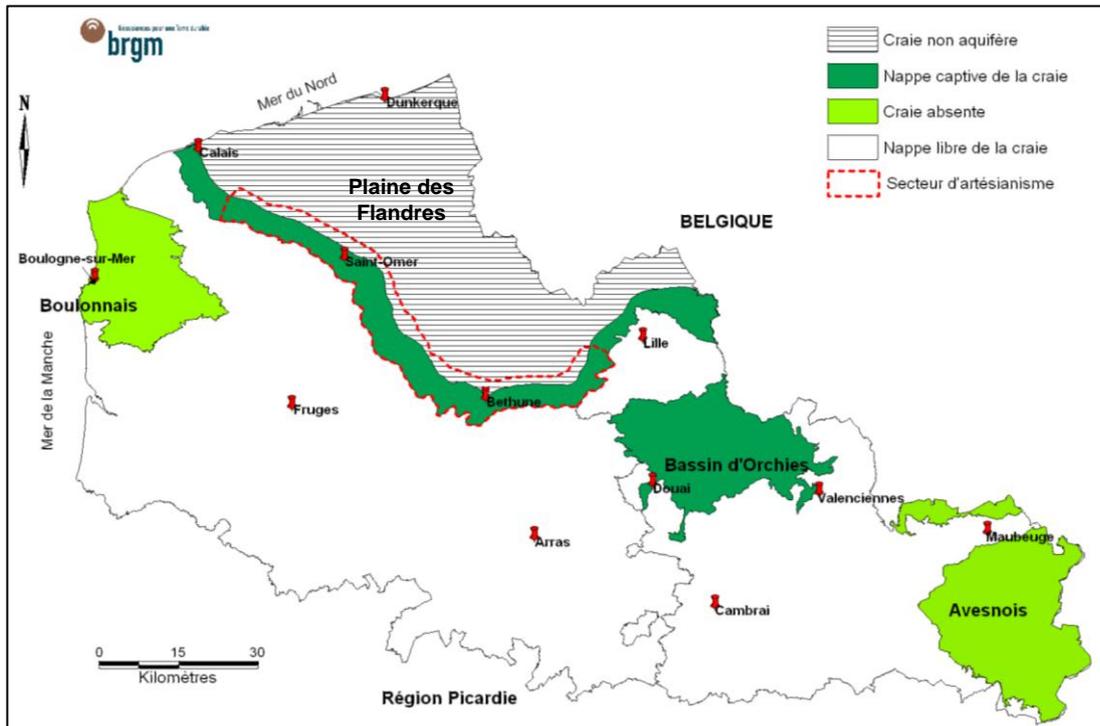


Figure 34 : Zones libre, captive et artésienne de la nappe de la Craie

Pour les calculs du potentiel géothermique, la carte piézométrique sélectionnée est celle réalisée à partir de relevés piézométriques d'octobre 2009 (Figure 35, CARDIN *et al.*, 2011).

D'autres cartes piézométriques ont été utilisées dans le projet afin d'obtenir des informations sur les niveaux piézométriques maximum et minimum recensés. Ces données sont visibles dans les formulaires des mailles sur www.géothermie-perspective.fr.

Les cartes piézométriques sont les suivantes :

- août 1969 (PHILIPPART, 1969)
- janvier 1971 et avril 1991 (CLEVENOT *et al.*, 1991)
- 1972
- mai 1975 (MANIA J. et PHILIPPART, 1976)
- 1989 (PERNEL F.)

- **1995**
- **octobre 1997**
- **octobre 2000**
- **mai 2001** (CAOUS *et al.*, 2001)
- **mai 2009** (CARDIN *et al.*, 2011)

La carte du critère « *profondeur d'accès à la ressource en eau* » de la nappe de la Craie (Annexe 1, planche 9) est calculée à partir du toit de l'aquifère, des cartes piézométriques et de la délimitation des zones captives et libres de la nappe (paragraphe 3.2).

De cette carte, des zones peu favorables à la géothermie sur nappe se dégagent dans les vallées où la nappe de la craie est sub-affleurante ou en connexion avec la nappe alluviale. Ce sont en effet des zones où les difficultés de réinjection risquent d'être défavorables au projet.

Dans l'Artois, la nappe est libre et s'approfondit sous les plateaux, le critère profondeur y est plutôt défavorable.

Entre Béthune et Douai et dans la région lilloise, la profondeur de la nappe libre est favorable à très favorable à la géothermie.

Enfin, dans les secteurs captifs (bassin d'Orchies et Plaine des Flandres), l'approfondissement du toit des craies est rapidement un frein au projet.

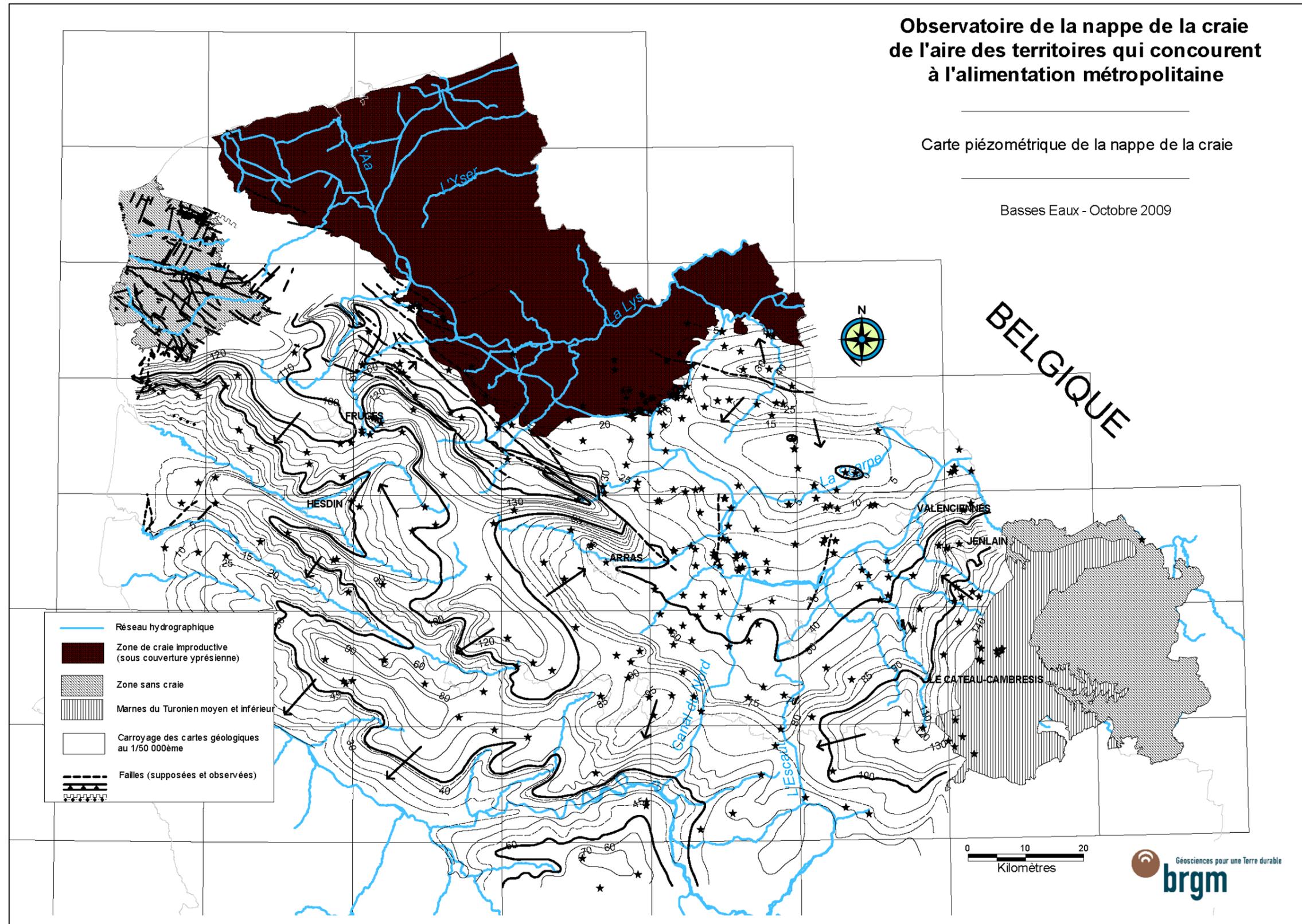


Figure 35 : Carte piézométrique de la nappe de la Craie – Basses Eaux 2009 (CARDIN et al., 2011)

4.5.3. Définition du critère débit d'exploitation par forage

La nappe de la craie du Nord-Pas de Calais a fait l'objet de plusieurs modélisations. La modélisation hydrodynamique réalisée en 2010 et 2011 (BUSCARLET et *al.*, 2011) dans le cadre de la mise en place d'un outil de gestion des ressources en eau de l'Aire d'Alimentation de la Métropole lilloise, a été utilisée pour déterminer le critère « *débit d'exploitation par forage* » de l'atlas géothermique. Ce modèle couvre les six masses d'eau de la nappe de la Craie sollicitées : la Vallée de la Deûle (1003), l'Artois et la Vallée de la Lys (1004), la Scarpe et la Sensée (1006), le Valenciennois (1007), le Cambrésis (1010) et la bordure du Hainaut (1017), et au-delà.

La carte des valeurs de perméabilité de la Craie issue de cette modélisation a été réutilisée dans l'atlas géothermique, car ce paramètre ainsi que l'épaisseur productive, sont nécessaires au calcul du critère « *débit d'exploitation par forage* »

a) Perméabilité de la craie

La perméabilité matricielle de la Craie, même la plus pure, reste faible (10^{-8} à 10^{-9} m/s). Plus aquiclude qu'aquifère, la Craie devient aquifère grâce au développement de la fissuration avec des ouvertures et une connectivité suffisantes pour permettre un écoulement gravitaire, mais aussi à la faveur de joints de stratification plus ou moins ouverts. Il en résulte une variabilité très importante de la perméabilité tant verticalement qu'horizontalement (selon des directions souvent combinées de la fracturation) : le milieu crayeux est en réalité hydrauliquement hétérogène.

La répartition horizontale des perméabilités est souvent corrélable avec les caractéristiques géomorphologiques de la région, les zones les plus perméables correspondant généralement aux axes de drainage, eux-mêmes souvent liés au développement directionnel de la fracturation (vallées sèches et vallées humides sous alluvions). Régionalement, la bordure du recouvrement tertiaire des Flandres reste la zone où les plus fortes perméabilités sont mises à profit pour l'exploitation de la nappe de la Craie (Figure 36).

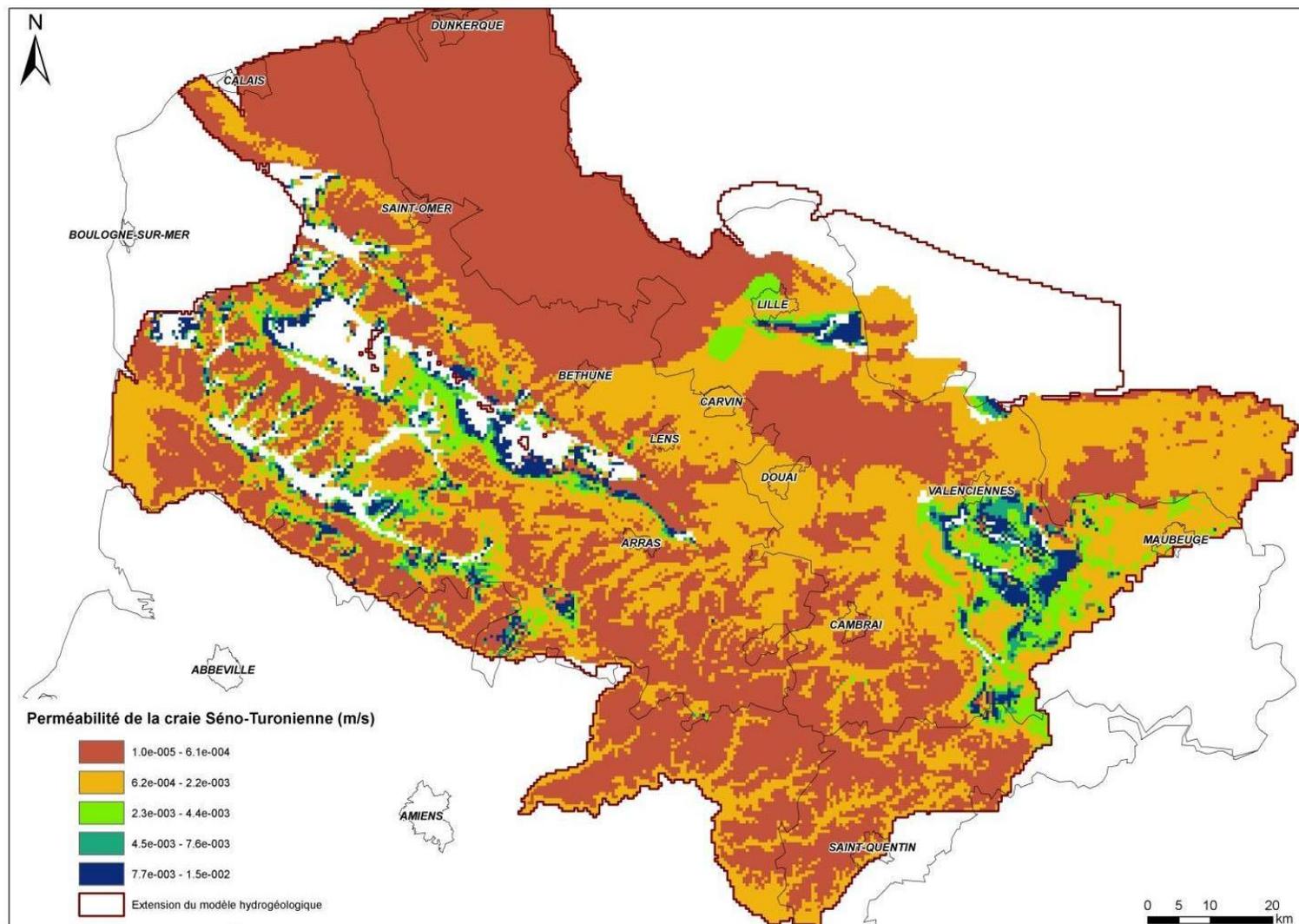


Figure 36 : Carte des valeurs initiales de perméabilité de la Craie séno-turonienne (BUSCARLET et al, 2011)

b) Épaisseur productive

La Craie doit son caractère aquifère par la présence de réseaux de fractures internes et de joints de stratification plus ou moins ouverts. Ceux-ci se ferment en profondeur, avec le poids des terrains sus-jacents, entraînant une diminution très sensible de la perméabilité de la Craie. D'autre part, du fait de l'importante variation spatiale de la densité de fractures, les propriétés hydrogéologiques intrinsèques de cet aquifère sont relativement hétérogènes. Parfois la Craie est productive sur toute sa hauteur, d'autres fois seulement sur quelques mètres. Elle est parfois productive en surface, et parfois en profondeur... Il n'existe aucune règle régissant sa productivité. Compte tenu de cette anisotropie, il est impossible d'interpoler l'épaisseur et la profondeur de la zone productive à partir de données ponctuelles mesurées dans les sondages (essais au micromoulinet).

Une épaisseur productive est toutefois nécessaire au calcul. Celle-ci sera estimée à partir d'un postulat utilisé dans de nombreuses études et notamment AMRAOUI *et al.*, 2002 stipulant que « *l'observation des différentes coupes inventoriées, et les différents avis d'experts recueillis, convergent vers une estimation de cette profondeur de l'ordre de 25 m. Cette valeur est cependant contrôlée par la proximité des faciès très peu perméables du Turonien inférieur et moyen (les « dièves ») qui localement peuvent réduire cette épaisseur* ».

L'épaisseur productive a été définie de la manière suivante :

- Pour une épaisseur de Craie aquifère supérieure à 25 m, l'épaisseur productive est de 25 m ;
- Pour une épaisseur de Craie aquifère inférieure à 25 m et dont la limite inférieure est constituée d'un horizon marneux (tels que les dièves du Turonien inférieur et moyen ou les marnes du Cénomanién), l'épaisseur productive est égale à l'épaisseur de la craie aquifère ;
- Il existe encore une dernière particularité : les zones captives de la Craie sous la Plaine des Flandres et sous le Bassin d'Orchies. Dans ces secteurs la Craie s'approfondit rapidement, les fractures se referment, et la Craie perd peu à peu son caractère aquifère. L'épaisseur productive a été volontairement réduite dans ces zones à moins de 25 m.

L'estimation de l'épaisseur productive de la Craie étant basée sur une approche naturaliste, un coefficient minorant de 0,6 a été appliqué afin de ne pas surestimer les débits d'exploitation par forage.

La méthode définie au paragraphe 3.3 permet d'obtenir la carte du critère « débit d'exploitation par forage » illustrée sur la planche 10 en annexe 1. Les débits d'exploitation par forage obtenus reflètent beaucoup la perméabilité de la Craie. L'Artois semble peu propice à la géothermie sur nappe pour les pavillons car les débits d'exploitations par forage sont souvent inférieurs à 5 m³/h. Dans les vallées les débits d'exploitations sont plus élevés et atteignent plus de 50 m³/h. Les régions du Béthunois jusqu'au Douaisis, le Pévèle, le Mélantois sont très propices et présentent également

des débits d'exploitations par forage supérieurs à 50 m³/h pour un rabattement limité à 1/3 de l'épaisseur productive, borné au maximum à 5 m. Pour finir, en bordure de la Plaine des Flandres, il existe un couloir très productif également très favorable à la géothermie.

4.5.4. Définition du critère température

a) Analyse de la distribution des données

Les données sur la température de l'eau de l'aquifère de la Craie ont été récupérées sur ADES et sur la BSS. Une analyse de la distribution de ces valeurs a été réalisée et est présentée dans le Tableau 8 et la Figure 37 :

Nombre de points mesurés	627
Nombre de mesures effectués in situ	8097
Nombre moyen de mesures par point	12,9
Date du prélèvement le plus ancien	02/06/1961
Date du prélèvement le plus récent	14/08/2009
Température moyenne de l'eau (en°C)	11,3
Température minimale de l'eau (en°C)	4,5
Température maximale de l'eau (en°C)	28
1 ^{er} Quartile	10,6
Valeur médiane	11,2
3 ^{ème} Quartile	11,9
Coefficient de variation	0,12
Ecart-type (n)	1,3

Tableau 8 : Synthèse des données recueillies sur la température de la nappe de la Craie

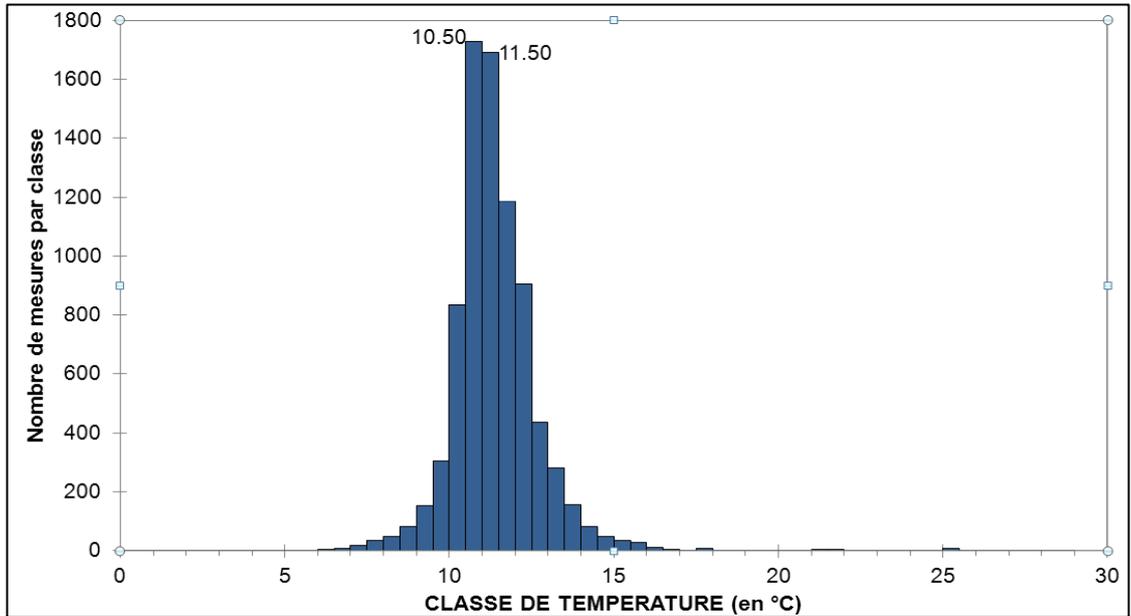


Figure 37 : Histogramme des températures de la nappe de la Craie

Plus de 95% des mesures de températures de la nappe sont comprises entre 9 et 14°C. L'effectif maximum des mesures se situe entre 10,5 et 11,5°C, avec 42,2% (3419 sur 8097) de valeurs mesurées dans cette tranche.

La boîte à moustache de Tukey (Figure 38) permet d'affiner la précision des statistiques. 95% des valeurs sont comprises entre les deux moustaches de la boîte, c'est-à-dire entre 8,7 et 13,8°C. La proximité de la médiane (11,2 °C) et de la moyenne (11,3°C) indique que la distribution des données est équilibrée.

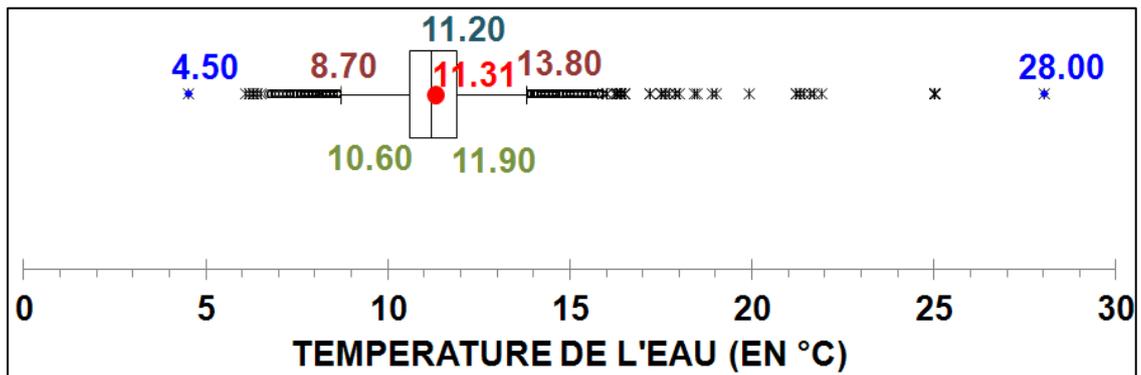


Figure 38 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe de la Craie

b) Variations de température avec la profondeur

Les données sur la température de l'eau de l'aquifère en fonction de la profondeur ont été analysées à partir de la méthode des « boîtes à moustaches de Tukey », qui permet une visualisation plus synthétique des données (Figure 39). Les valeurs extrêmes n'ont pas été représentées sur la figure.

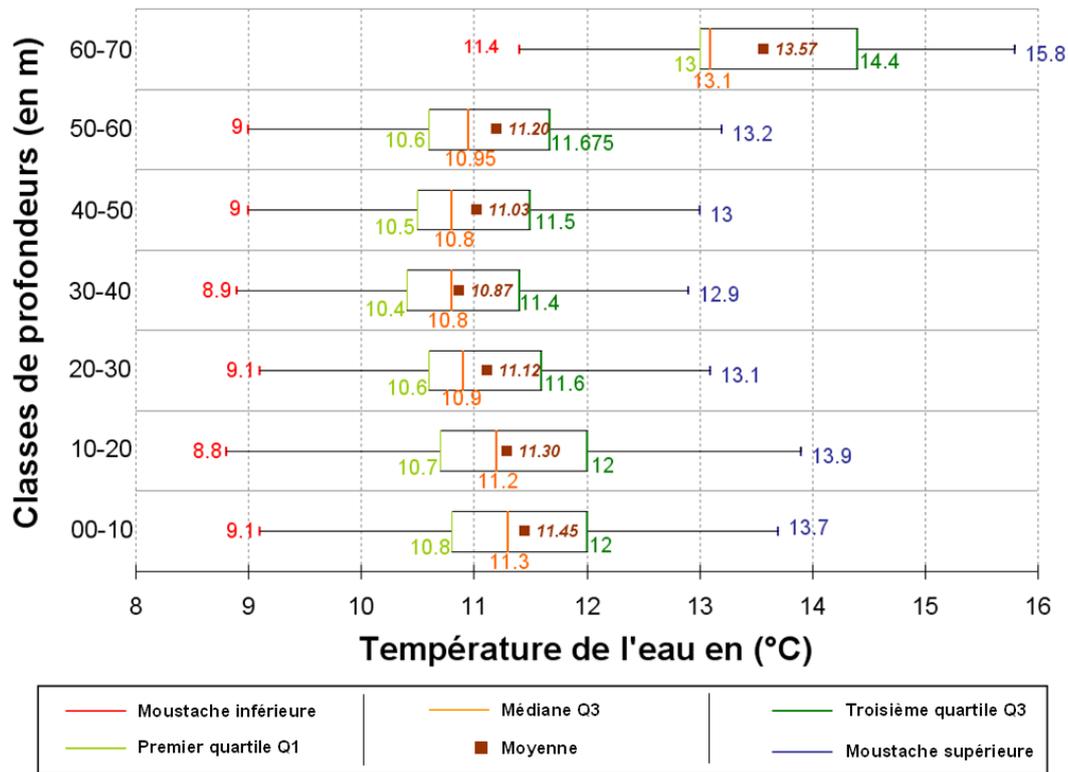


Figure 39 : Température de l'eau de l'aquifère de la Craie en fonction de la profondeur

La figure 39 présente la température de l'aquifère de la craie entre 0 et 70 m de profondeur.

La moyenne est toujours supérieure à la médiane, ce qui montre une part plus importante de mesures de températures hautes.

Entre 0 et 60 m de profondeur, les températures semblent globalement identiques, avec une majorité de valeurs comprise entre 10.4°C et 12°C. Les médianes, plus représentative que les moyennes car elles ne subissent pas l'influence de valeurs atypiques, sont comprises entre 10.8°C et 11.3°C.

À partir de 60 m de profondeur, l'influence du gradient géothermique se fait ressentir, avec une majorité de valeurs comprises entre 13°C et 14.4°C, avec cependant une médiane à 13.1°C. Cependant, les statistiques à cette profondeur ont été faites sur 326 valeurs, soit seulement 2,7% du total des données.

c) Variations mensuelles de la température de la nappe

Une analyse mensuelle des mesures de température de la nappe a été réalisée et a mis en évidence une variation calculée sur les saisons (Figure 40).

Cependant, il est difficile de savoir si il y a augmentation de la température globale de l'aquifère, ou simplement de la température locale du forage mesuré. En effet, la colonne d'air du forage en contact avec l'eau de l'aquifère se réchauffe en été, modifiant ainsi la température de l'eau. Si les valeurs de températures n'ont pas été prises correctement, c'est-à-dire sans recycler au minimum trois fois l'eau du forage, la mesure de température peut être biaisée. Malheureusement, nous ne disposons pas de toutes ces informations dans les bases de données pour écarter de telles valeurs.

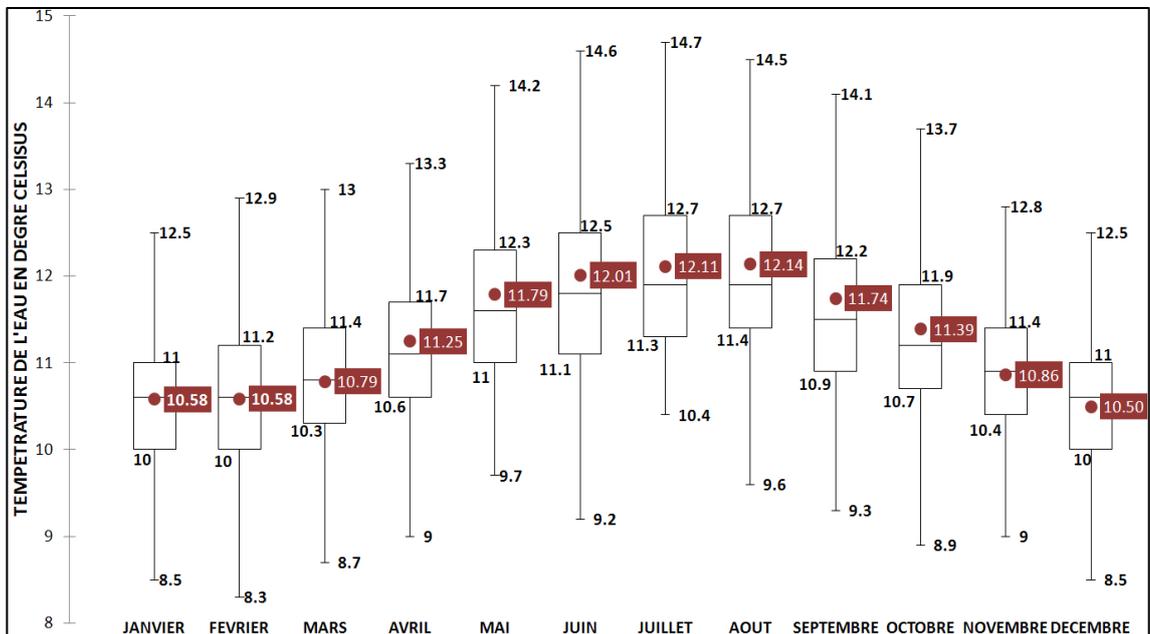


Figure 40 : Valeur moyenne mensuelle de la température de la nappe (en degré Celsius)

d) Répartition spatiales des valeurs de température

Une interpolation des températures les plus froides (mois d'hiver) a été réalisée à partir des 395 points disponibles pour les mois d'hiver (Figure 41). Elle met en évidence une zone plus froide dans l'Artois, à l'est d'Arras et dans le Cambrésis où les températures de la nappe tournent autour de 9 à 10°C. Dans la moitié nord de la région (Douaisis, Béthunois, Pévèle, Mélançois, Plateau de Licques), les températures avoisinent les 11 à 13°C.

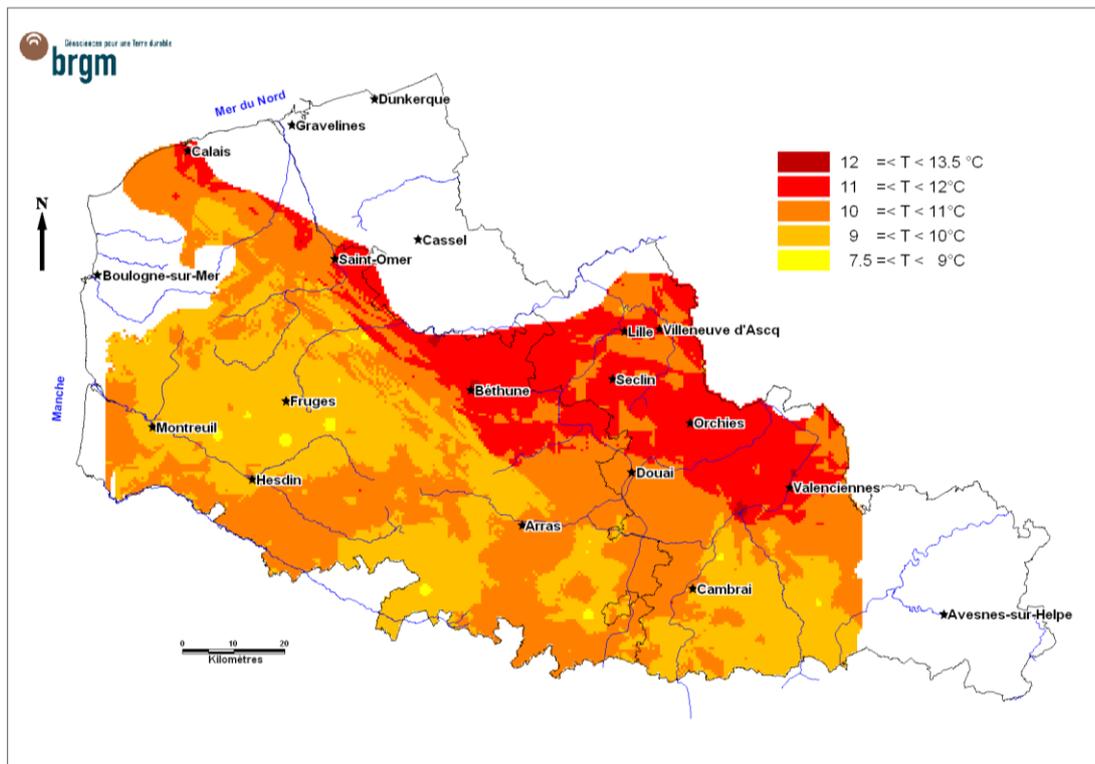


Figure 41 : Interpolation de la température de la nappe de la craie à partir des données hivernales.

Après analyse, la carte obtenue par interpolation des températures les plus froides a été utilisée pour définir le critère température de la nappe de la Craie (Annexe 1, planche 11). **Le potentiel est globalement favorable** sauf dans le secteur de Cambrai, Fruges, à l'est et à l'ouest d'Arras, où les températures sont *a priori* en dessous de 10°C en hiver.

4.5.5. Qualité de l'eau

Les quelques indicateurs de la chimie de l'eau disponibles dans ADES et la BSS indiquent que la nappe de la Craie est peu corrosive (Figure 42) :

- Le CO₂ dissous mesuré est globalement inférieur à 50 mg/l (analyses provenant de 646 forages) ;
- Les conductivités mesurées sont quasiment toutes inférieures à 1300 µS/cm (analyses provenant de 709 forages) ;
- Les pH mesurés sont proches de la neutralité et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations (analyses provenant de 1339 forages) ;
- Les teneurs en chlorures sont majoritairement inférieures à 150 mg/l (analyses provenant de 1322 forages). Seulement 35 forages présentent des teneurs supérieures à 150 mg/l ;
- Les teneurs en sulfates sont majoritairement inférieures à 250 mg/l (analyses provenant de 1360 forages) ;
- Les teneurs en sulfures sont globalement comprises entre 0,1 et 8 mg/l et indiquent une aptitude à satisfaire l'usage passable (analyses provenant de 12 forages) ;

D'autre part, la nappe de la Craie est généralement très dure, en effet 75% des valeurs de dureté sont supérieures à 30°f (analyses provenant de 1155 forages). Des problèmes d'entartrages des équipements de forages peuvent éventuellement survenir selon les conditions d'utilisation.

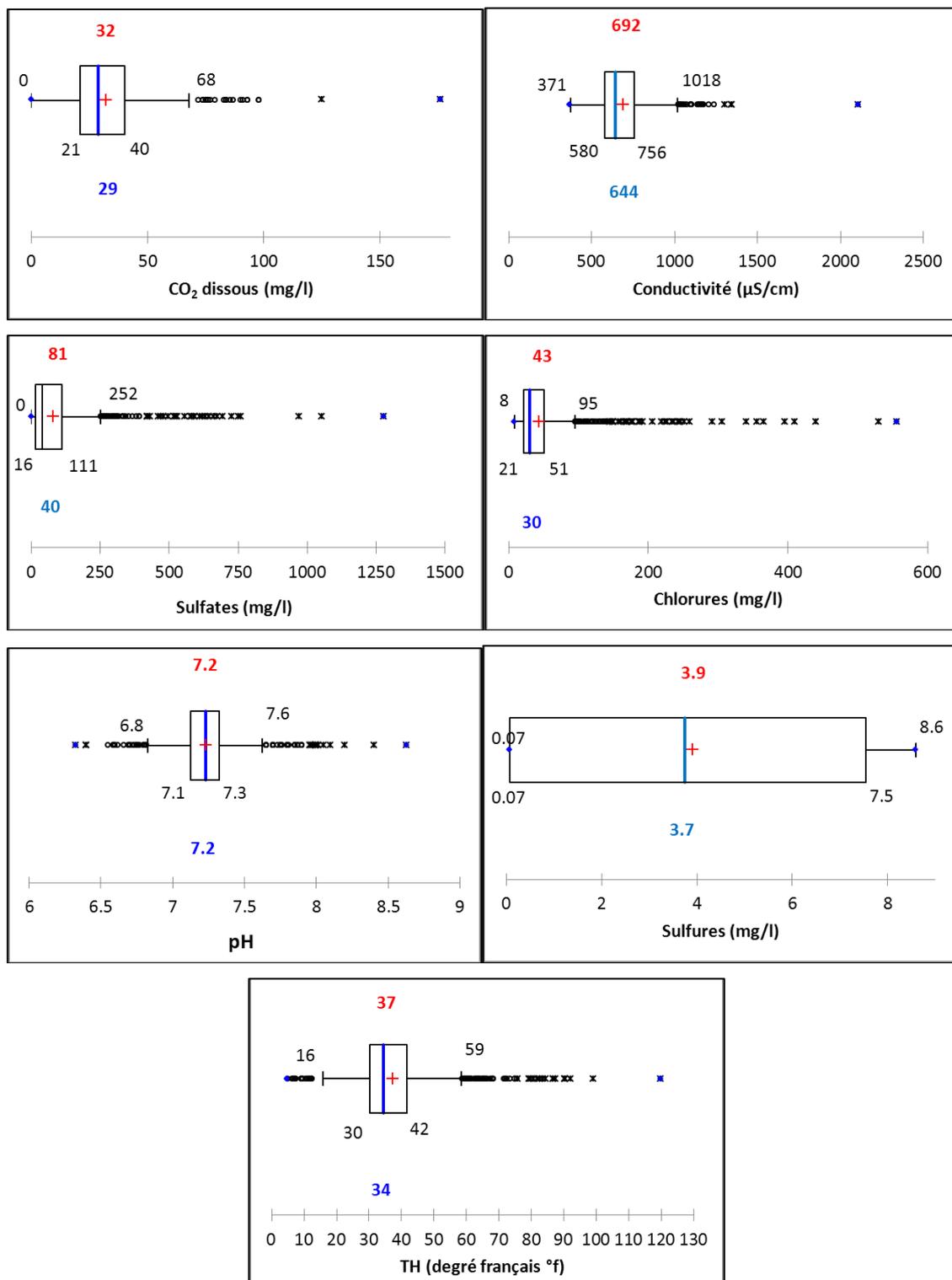


Figure 42 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe de la Craie par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

4.6. AQUIFÈRE DES CALCAIRES CARBONIFÈRES DE LA RÉGION LILLOISE ET DE L'AVESNOIS

4.6.1. Extension retenue

Les Calcaires carbonifères sont aquifères dans plusieurs secteurs : captifs dans la région lilloise sous les terrains crétacés ; libres et affleurants (ou sub-affleurants) dans l'Avesnois et le Boulonnais.

Dans la région lilloise, les Calcaires carbonifères aquifères s'approfondissent rapidement vers le nord jusqu'à -150 m NGF. Au niveau du dôme de Mélançois, le toit remonte jusqu'à une altitude de + 20 m (Figure 43). L'intégralité des Calcaires carbonifères aquifères lillois (contour rouge) n'est pas étudiée dans cet atlas, les zones au-delà de 100 m de profondeur ont été écartées. La limite retenue pour l'étude correspond au contour bleu sur la figure suivante.

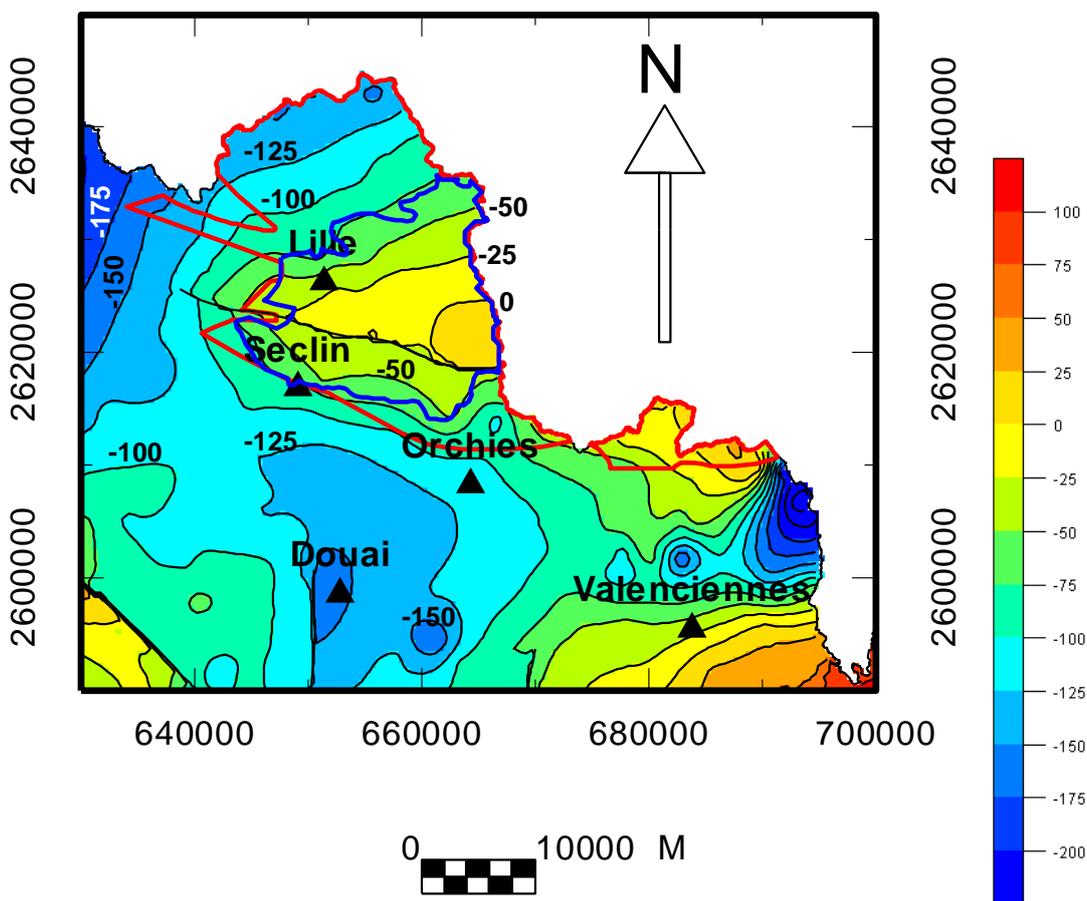


Figure 43 : Isohypsés du toit du Paléozoïque dans la région lilloise (en mètre NGF)

Légende : **contour rouge** = extension des Calcaires carbonifères aquifères
Contour bleu = extension des Calcaires carbonifères aquifères jusqu'à 100 m de profondeur

Dans l'Avesnois où la nappe est libre, toute la zone a été retenue car les données piézométriques dont nous disposons sont toutes comprises dans la tranche 0 – 100 m de profondeur.

Les calcaires carbonifères du Boulonnais (Massif de Ferques) sont traités au paragraphe 4.7.3.

Il existe une autre zone aquifère située dans **le secteur de Saint-Amand-les-Eaux** où la nappe des Calcaires carbonifères est un gisement thermo-minéral réputé pour ses eaux sulfatées calciques, moyennement chaudes (13 à 26°C) et artésiennes. (ROUX *et al.*, 2006, CAOUS 1998). Cependant, même si ce gisement est connu, son extension n'a jamais été réellement définie. Les données actuelles (extension, piézométrie, hydrodynamisme, etc...) sont insuffisantes pour étudier le potentiel géothermique de cette zone.

4.6.2. Définition du critère profondeur

La carte du critère « *profondeur d'accès à la ressource en eau* » de la nappe des Calcaires carbonifères (Annexe 1, planche 13) est calculée à partir du toit de l'aquifère modélisé, de la carte piézométrique d'octobre 2010 (Figure 44, CRASTES DE PAULET *et al.*, 2010), de la carte piézométrique d'octobre 1967 (Figure 45, DASSONVILLE G. et PLAT R. 1968) et de la délimitation des zones captives (paragraphe 3.2).

Dans la région lilloise, la profondeur des calcaires carbonifères est majoritairement défavorable à un projet de géothermie sur nappe (Annexe 1, planche 13). En effet, la nappe y est captive et le toit des calcaires se situe au-delà de 30 mètres de profondeur. Il existe quelques rares points où la profondeur du toit des calcaires est inférieure à 30 m, soit un critère favorable, et quelques points aux bordures de la limite retenue où la profondeur du toit des calcaires est supérieure à 100 m, soit un critère très défavorable. Il existe également des zones où le niveau piézométrique est proche de la surface et où la réinjection risque d'être problématique au projet de géothermie.

Dans l'anticlinal de Bachant – Ferrière-la-Petite, la nappe est libre et les calcaires sub-affleurants. La profondeur d'accès à la ressource correspond donc à la profondeur du niveau piézométrique. Celle-ci varie assez rapidement passant de très favorable à défavorable en quelques kilomètres (Annexe 1, planche 13).

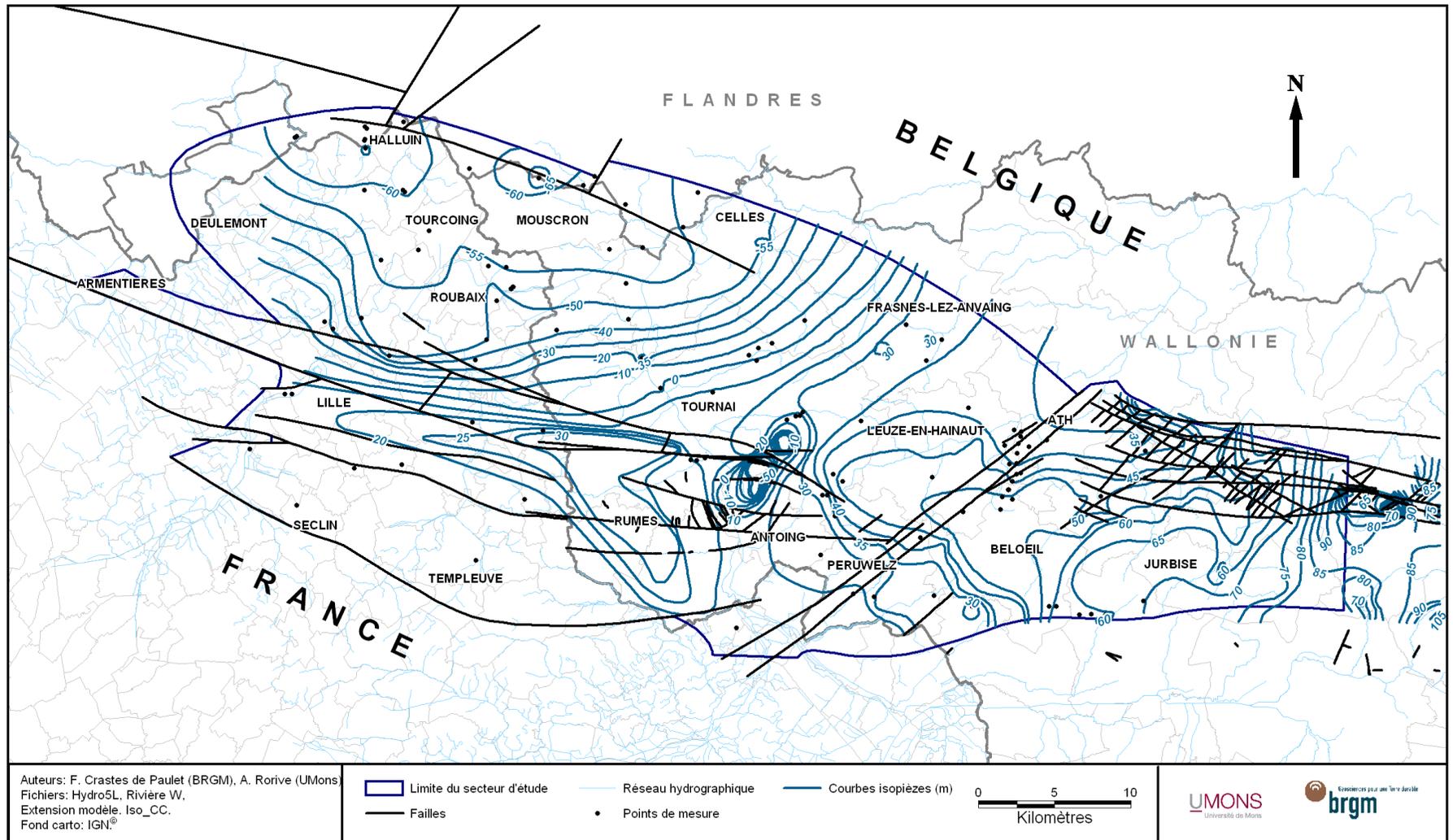


Figure 44 : Carte piézométrique d'octobre 2010 des Calcaires carbonifères de la région lilloise et de Belgique (CRASTES DE PAULET et al., 2010)

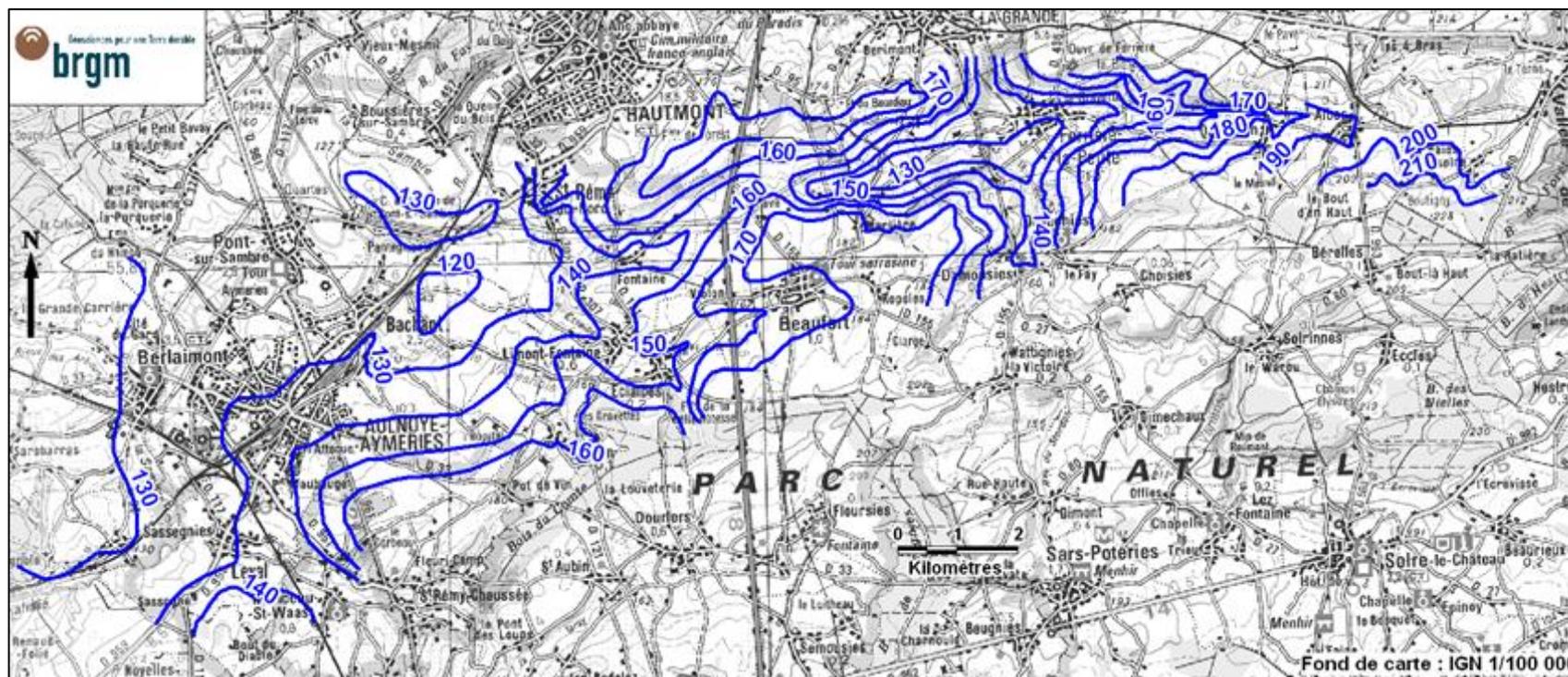


Figure 45 : Carte piézométrique d'octobre 1967 des Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant – Ferrière-la-Petite (DASSONVILLE G. et PLAT R., 1968)

4.6.3. Définition du critère « débit d'exploitation par forage »

a) Calcaires carbonifères lillois

Ce critère a été déterminé à partir des données de transmissivités (Figure 46) du modèle hydrogéologique de 1981 (données issues de COMBES P., 1991). Les transmissivités les plus élevées se rencontrent au cœur du synclinal Viséen (Roubaix, Tourcoing).

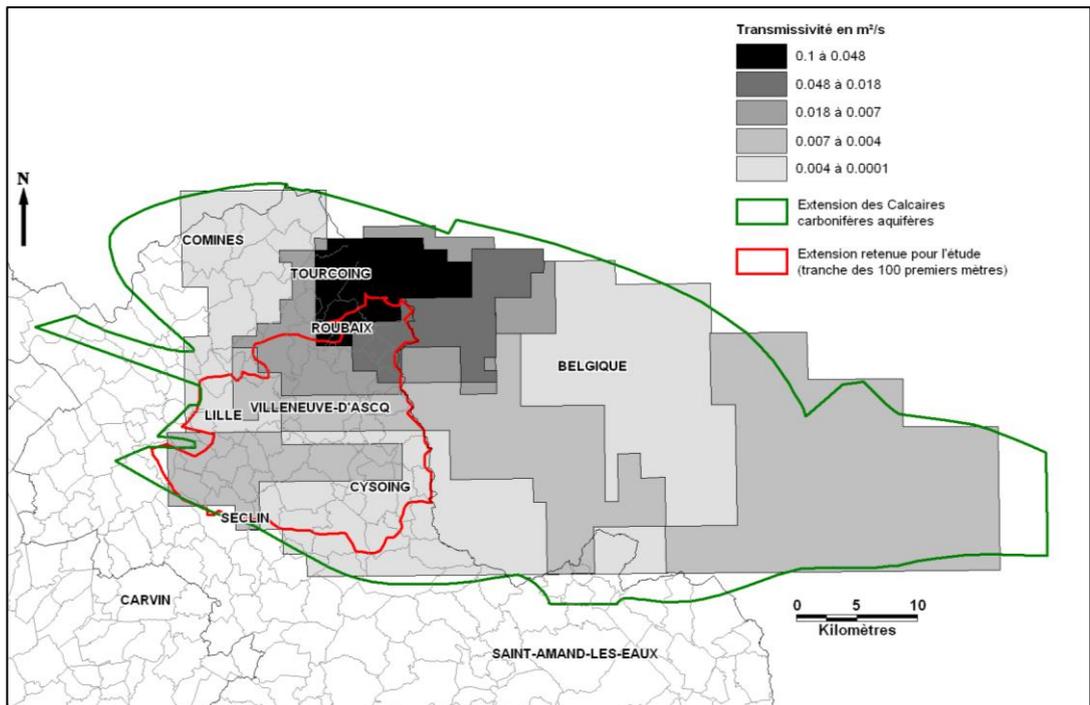


Figure 46 : Carte des transmissivités de la nappe des Calcaires carbonifères issu de la modélisation de 1981 (image provenant de P. COMBES 1991 « modélisation mathématique de la nappe du calcaire carbonifère », modifié BRGM)

Pour chaque zone, la valeur moyenne a été retenue, soit :

Zonage des transmissivités de 1981 en m ² /s	Valeur retenue pour l'atlas en m ² /s
10^{-1} à $4,8 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$
$4,8 \cdot 10^{-2}$ à $1,8 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
$1,8 \cdot 10^{-2}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
$7 \cdot 10^{-3}$ à $4 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
$4 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-4}	$2,05 \cdot 10^{-3}$

Pour les Calcaires carbonifères on considère que la transmissivité est égale au débit spécifique ($\alpha = 1$, paragraphe 3.3).

L'épaisseur productive de ces calcaires est estimée à 30 à 50 mètres (ROUX J.-C., 2006). Le rabattement théorique acceptable défini pour cette étude étant limité à 1/3 de l'épaisseur productive bornée au maximum à 5 m, celui-ci est donc de 5 m en tout point du secteur d'étude.

Selon la méthode de calcul défini au paragraphe 3.3, les débits d'exploitation par forage obtenus pour la nappe des calcaires carbonifères de la région lilloise s'échelonnent entre 36,9 et 1332 m³/h (Figure 47), soit **un critère favorable à très favorable pour la géothermie sur nappe** (Annexe 1, planche 14).

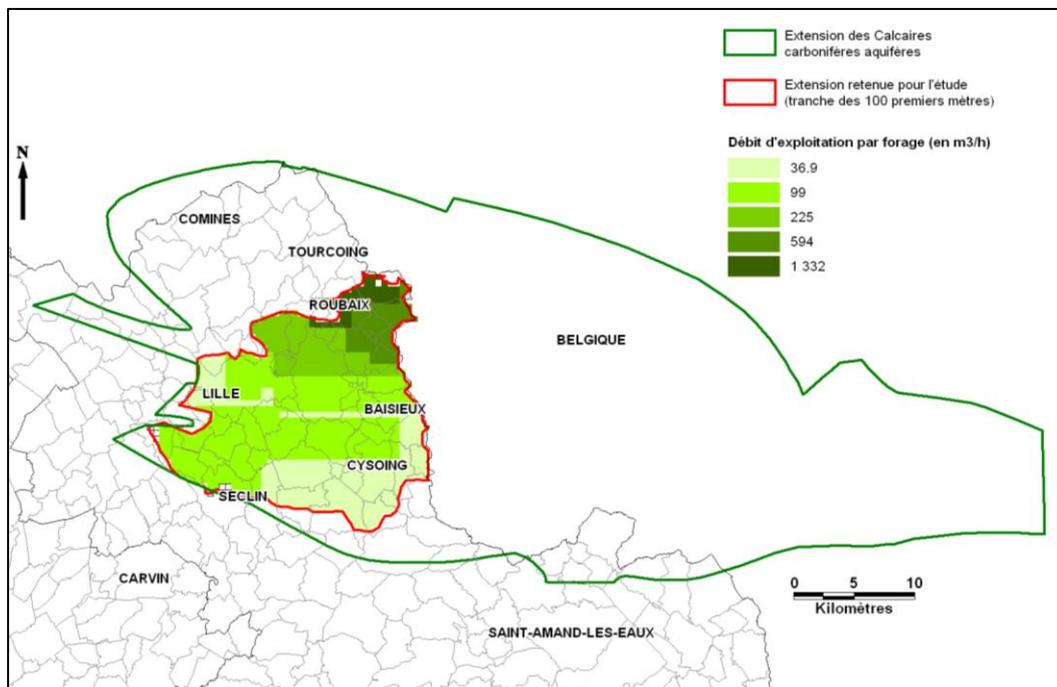


Figure 47 : Carte des débits d'exploitations par forages obtenus à partir des données de transmissivités de la modélisation de 1981

Il est à noter qu'au moment de la rédaction du présent rapport une étude approfondie des Calcaires carbonifères est en cours. Les futurs rapports apporteront probablement un complément d'information sur le potentiel d'exploitation de cet aquifère.

b) Calcaires carbonifères de l'Avesnois

Les Calcaires carbonifères sont très structurés dans l'Avesnois. Les structures observées résultent du chevauchement de l'allochtone ardennais sur le parautochtone brabançon par l'intermédiaire de la faille du Midi, notamment toute une série de plis d'orientation N70 à 80°E.

Quatre synclinaux à cœur de Carbonifère inférieur (Mississipien) séparés par des schistes et psammites du Dévonien supérieur sont distinguables (du nord au sud) :

- Le synclinal de Bachant – Ferrière-la-Petite ;
- Le synclinal de Tainières – Sars-Poteries – Solre-le-Château ;
- Le synclinal de Marbaix – Avesnes-sur-Helpe ;
- Et le synclinal d’Etroeungt.

Chaque synclinal constitue un système aquifère indépendant des autres car isolé par les assises schisteuses du Famennien peu aquifères donc chacun à sa propre dynamique hydrogéologique. Ils se réunissent à l’ouest avant l’envoyage des couches sous le Crétacé. Les circulations d’eau se font à la faveur de discontinuités sédimentaires telles que les joints de stratification, tectoniques telles que les diaclases et les failles, et des érosions telles que les karsts. Les caractéristiques hydrogéologiques de ces calcaires sont donc très hétérogènes. La profondeur de fissuration efficace est estimée autour de 50 à 60 m, mais elle peut atteindre jusqu’à 100 m localement.

Les caractéristiques hydrodynamiques des 4 synclinaux sont différentes, une estimation du critère « débit d’exploitation par forage » a donc été fait pour chaque synclinal.

Cependant, une précaution toute particulière doit être apportée à l’utilisation ces estimations car les calcaires ont une perméabilité multiple (joints de stratifications, diaclases, failles, karsts) très hétérogène aussi bien verticalement qu’horizontalement. Par exemple, les cœurs des synclinaux sont plus perméables que les bords, ou encore, dans le synclinal de Bachant, les valeurs de transmissivités sont plus élevées à l’ouest qu’à l’est. Ce degré de précision n’a pas pu être rendu dans l’atlas. Les valeurs données dans les paragraphes suivants sont plus des indicateurs que des valeurs concrètes.

• **Synclinal de Bachant – Ferrière-la-Petite :**

46 valeurs de débits spécifiques y sont recensées. Elles s’échelonnent entre $6,63 \cdot 10^{-5}$ et $1,2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Figure 48). La valeur moyenne de ses valeurs est égale à $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

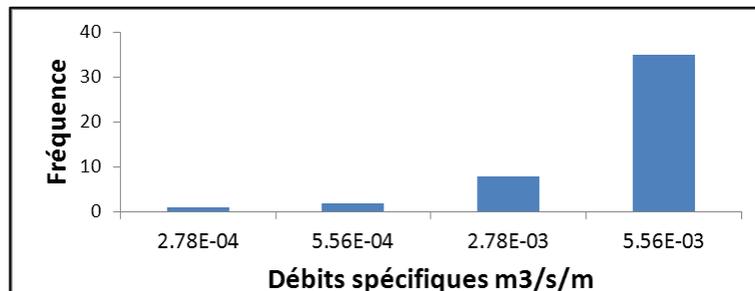


Figure 48 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant - Ferrière

Le débit moyen d'exploitation par forage estimé à partir de la valeur moyenne des débits spécifiques et avec un rabattement acceptable de 5 m, est de 207 m³/h, soit un critère **très favorable** à la géothermie sur nappe.

• **Synclinal de Tainières – Sars-Poteries – Solre-le-Château :**

10 valeurs de débits spécifiques y sont recensées. Elles s'échelonnent entre $4,7 \cdot 10^{-4}$ et $4 \cdot 10^{-2}$ m³/s/m, ce qui donne des débits d'exploitation par forage très dispersés (calculés avec un rabattement de 5 m, Figure 49).

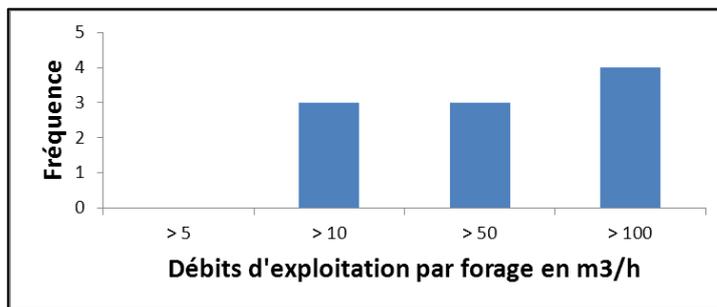


Figure 49 : Histogramme des débits d'exploitation par forage, calculés à partir des débits spécifiques avec un rabattement de 5 m.

La moyenne n'est ici pas représentative de la réalité. Aucune valeur de débit d'exploitation par forage n'a été retenue pour ce synclinal. Les valeurs apparaissent **peu favorables à très favorables à la géothermie sur nappe**.

• **Synclinal de Marbaix – Avesnes-sur-Helpe :**

La moyenne des 15 valeurs de débits spécifiques recensés est de $2,7 \cdot 10^{-3}$ m³/s/m (Figure 50). Ainsi, le débit moyen d'exploitation par forage est estimé à 48 m³/h (avec un rabattement acceptable de 5 m), c'est-à-dire un critère **favorable** à la géothermie sur nappe avec PAC.

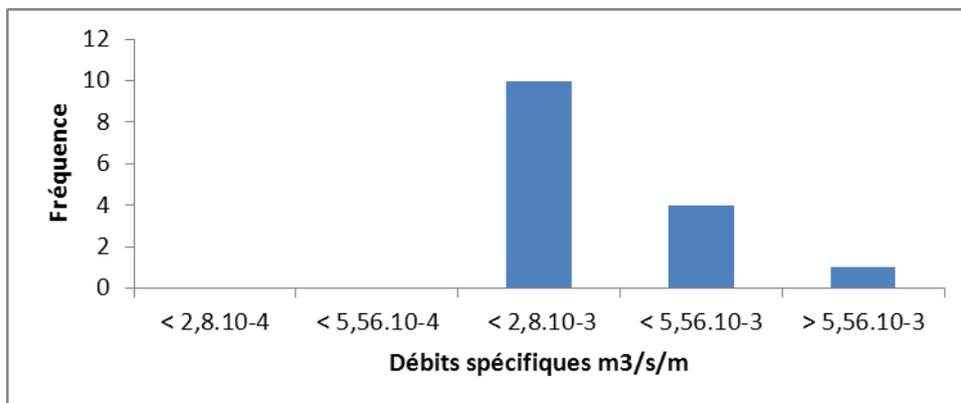


Figure 50 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Marbaix – Avesnes-sur-Helpe

- **Synclinal d'Etroeungt :**

Trois valeurs de débits spécifiques ont été recensées : $3,8 \cdot 10^{-4}$ m³/s/m (sondage 00388X0003) $5,5 \cdot 10^{-4}$ m³/s/m (sondage 00388X0024) et $4,6 \cdot 10^{-4}$ m³/s/m (sondage 00388X0251). La moyenne de ces valeurs est de $4,6 \cdot 10^{-4}$ m³/s/m.

Ainsi, le débit moyen d'exploitation par forage est estimé à 8,4 m³/h (avec un rabattement acceptable de 5 m), c'est-à-dire un critère **peu favorable** à la géothermie sur nappe avec PAC pour un pavillon.

4.6.4. Définition du critère température

a) Région lilloise

Les données sur la température de l'eau de l'aquifère du calcaire carbonifère de la région lilloise ont été récupérées sur ADES et sur la BSS. Une analyse de la distribution des valeurs récupérées a été réalisée et est présentée dans le Tableau 9. 12 de ces points sont concentrés autour de la région lilloise.

Nombre de points mesurés	13
Nombre de mesures effectués in situ	203
Date du prélèvement le plus ancien	20/03/1964
Date du prélèvement le plus récent	28/05/2009
Température moyenne de l'eau (en°C)	14
Température minimale de l'eau (en°C)	9,8
Température maximale de l'eau (en°C)	23
1 ^{er} Quartile	13,1
Valeur médiane	13,9
3 ^{ème} Quartile	15
Coefficient de variation	0,1
Ecart-type (n)	1,4

Tableau 9 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Calcaires carbonifères lillois.

La carte des températures réalisées en septembre 1980 (Bosch et *al.*, 1980) a été digitalisée, de manière à définir les valeurs de température de chaque maille dans cette zone et est présentée en Figure 51. La température augmente progressivement

vers le nord, parallèlement à l'approfondissement de l'aquifère (gradient géothermique).

Cette carte montre que la température est **favorable pour une utilisation à des fins géothermiques via une pompe à chaleur** (Annexe 1, planche 15).

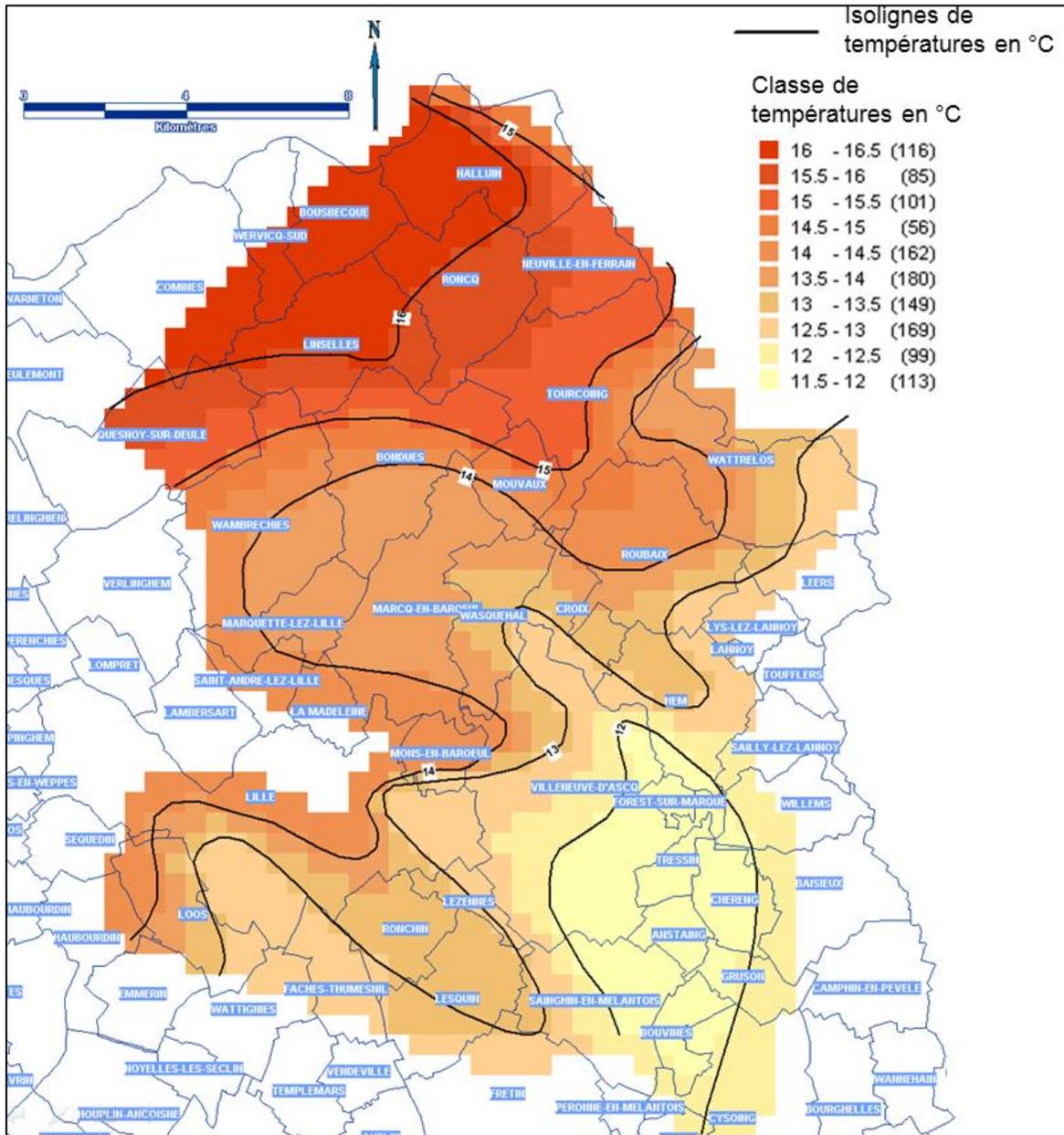


Figure 51 : Isolignes des températures de la nappe des Calcaires carbonifères lillois.

b) Avesnois

Les données sur la température de l'eau de l'aquifère du Calcaire carbonifère de l'Avesnois ont été récupérées sur ADES et sur la BSS. Une analyse de la distribution des valeurs récupérées a été réalisée et est présentée dans le Tableau 10.

Nombre de points mesurés	37
Nombre de mesures effectués in situ	263
Date du prélèvement le plus ancien	03/08/1971
Date du prélèvement le plus récent	25/05/2009
Température moyenne de l'eau (en°C)	11,1
Température minimale de l'eau (en°C)	8,5
Température maximale de l'eau (en°C)	19
1^{er} Quartile	10,5
Valeur médiane	11
3^{ème} Quartile	11,6
Coefficient de variation	0,1
Ecart-type (n)	1,1

Tableau 10 : Distribution des valeurs de température de la nappe des Calcaires carbonifères de l'Avesnois

85% des valeurs sont centrés autour de la médiane, entre 10 et 12°C. En effet, le 1^{er} et le 3^{ème} quartile ont des valeurs assez proches, respectivement 10,5 et 11,6°C.

Sur la Figure 52, les points de mesures sont assez bien répartis au nord-est et au centre de la zone d'extension des Calcaires carbonifères de l'Avesnois. Par contre, le secteur sud est pauvre en données.

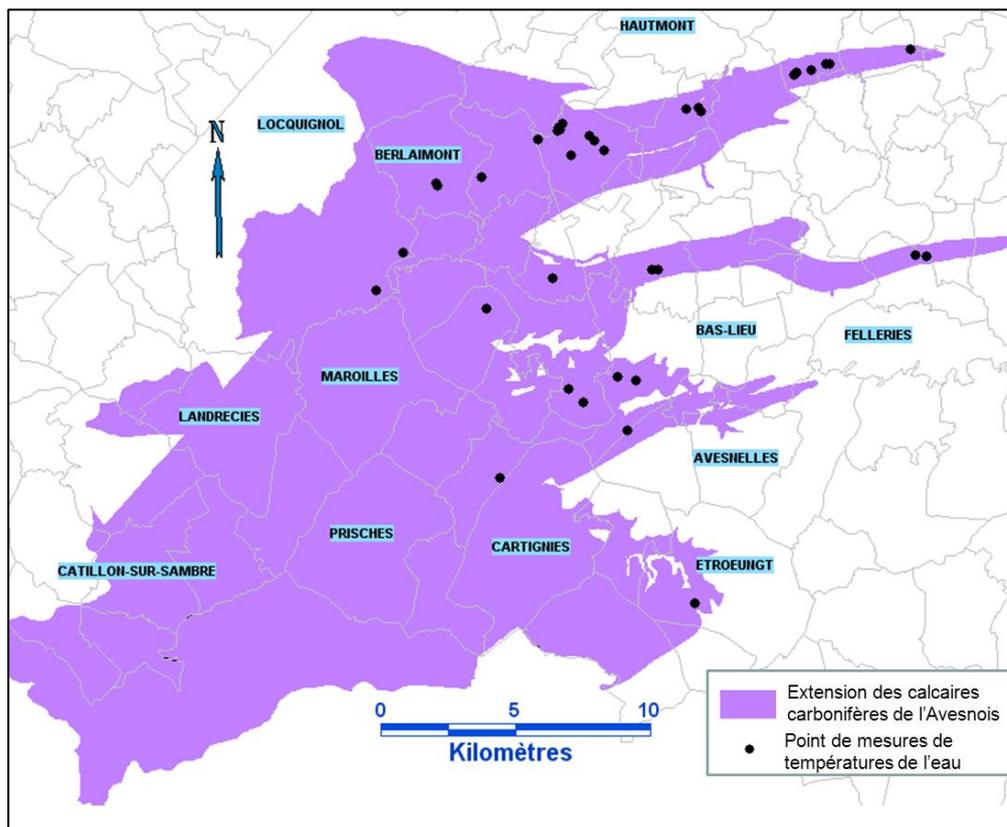


Figure 52 : Répartition des points de mesure de la température de la nappe des Calcaires carbonifères de l'Avesnois

Au vu de la distribution très centrée des données, une valeur unique de 11°C a été attribuée aux secteurs disposant de points de mesures, **c'est donc un critère favorable** (annexe 1, planche 15).

Dans le secteur ouest, là où les Calcaires carbonifères plongent sous les assises crétacées, il est probable que la température de la nappe augmente en fonction de la profondeur. Le manque de données ne permet pas de compléter la cartographie du critère température.

4.6.5. Qualité de l'eau

a) *Calcaires carbonifères lillois*

D'après les données disponibles dans ADES et la BSS, les eaux de la nappe des calcaires carbonifères lillois sont globalement peu corrosives (Figure 53) :

- Le CO₂ dissous mesuré est globalement inférieur à 50 mg/l (analyses provenant de 35 forages) ;
- Les conductivités mesurées sont toutes inférieures à 1300 µS/cm (analyses provenant de 10 forages) ;
- Les pH mesurés sont proches de la neutralité et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations (analyses provenant de 94 forages) ;
- Les teneurs en chlorures sont majoritairement inférieures à 150 mg/l (analyses provenant de 103 forages). Seulement 6 forages présentent des teneurs supérieures à 150 mg/l ;
- Les teneurs en sulfates sont majoritairement inférieures à 250 mg/l (analyses provenant de 101 forages) ;

D'autre part, les eaux de la nappe des calcaires carbonifères sont globalement dures à très dures et peuvent potentiellement poser des problèmes de colmatage d'équipement de forage. En effet, 50% des valeurs de dureté sont comprises entre 24 et 40°f (analyses provenant de 99 forages).

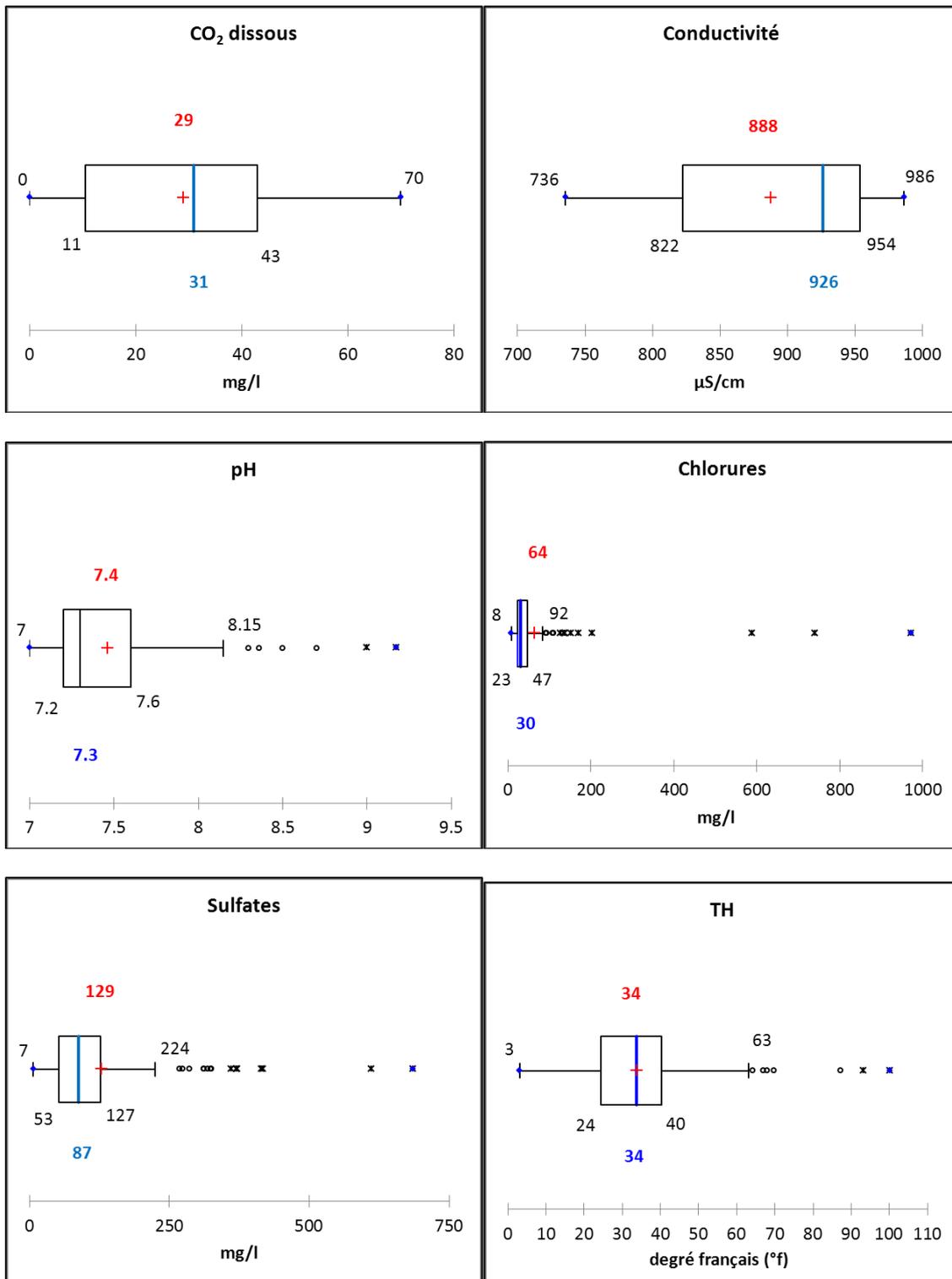


Figure 53 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères lillois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

b) Calcaires carbonifères de l'Avesnois

D'après les données disponibles dans ADES et la BSS, les eaux de la nappe des calcaires carbonifères de l'Avesnois sont globalement peu corrosives (Figure 53) :

- Le CO₂ dissous mesuré est inférieur à 50 mg/l (analyses provenant de 25 forages) ;
- Les conductivités mesurées sont toutes inférieures à 1300 µS/cm (analyses provenant de 39 forages) ;
- Les pH mesurés sont proches de la neutralité et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations (analyses provenant de 45 forages) ;
- Les teneurs en chlorures sont toutes inférieures à 150 mg/l (analyses provenant de 45 forages) ;
- Les teneurs en sulfates sont quasiment toutes inférieures à 250 mg/l (analyses provenant de 45 forages) ;

D'autre part, les eaux de la nappe des calcaires carbonifères sont globalement très dures et peuvent potentiellement poser des problèmes de colmatage d'équipement de forage. En effet, quasiment toutes les valeurs de dureté sont supérieures à 30°f (analyses provenant de 35 forages).

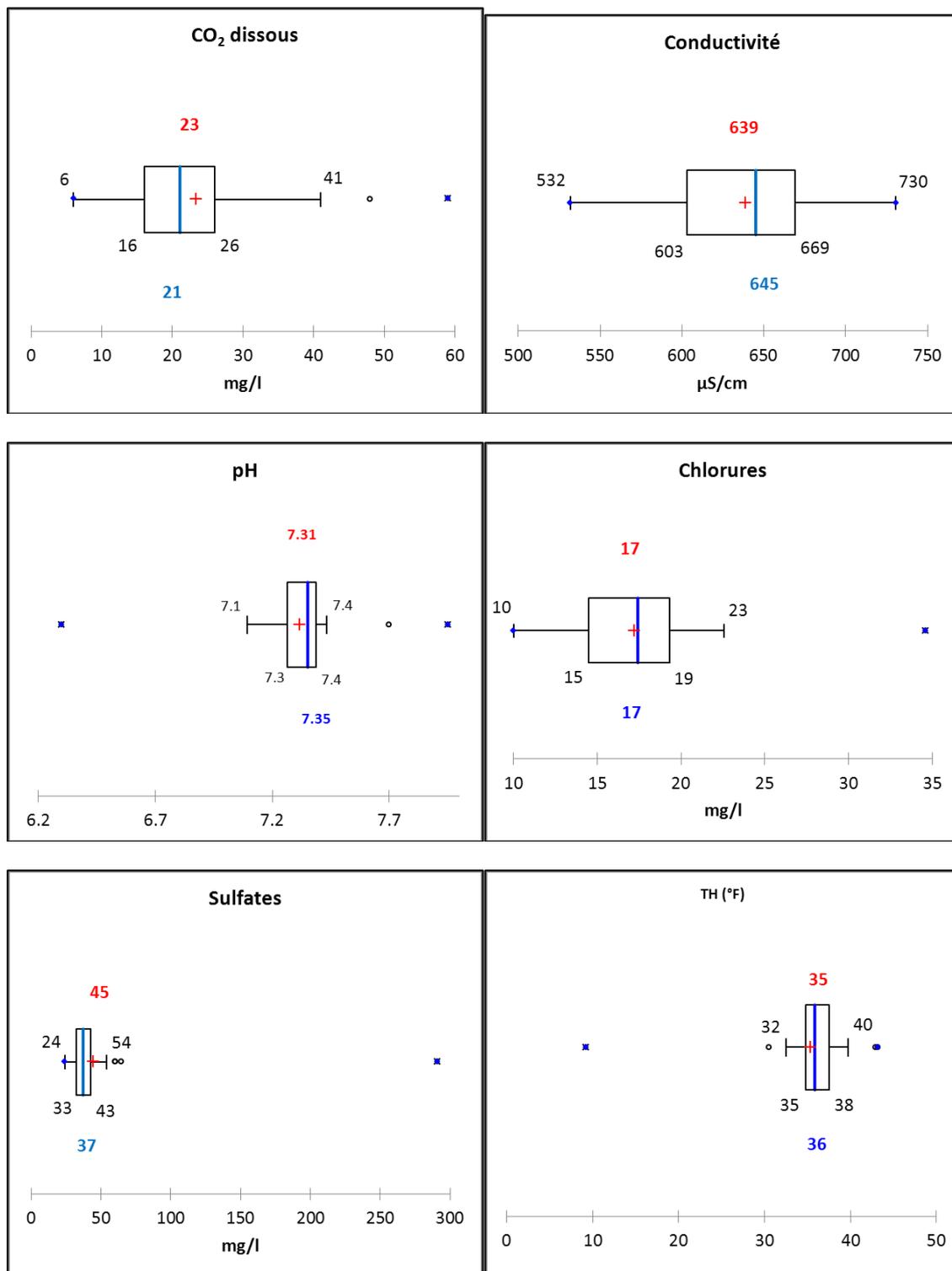


Figure 54 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères de l'Avesnois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

4.7. AUTRES AQUIFÈRES

4.7.1. L'aquifère des Sables Verts aptien-albiens

Ces sables verts et glauconieux datant de l'Aptien inférieur à l'Albien inférieur (Crétacé inférieur) sont à l'affleurement en bordure du Boulonnais. Ils s'approfondissent très rapidement vers l'est sous les terrains du Crétacé supérieur (craies et marnes). La nappe qu'ils renferment présente peu d'intérêt hormis pour des usages agricoles ou domestiques. Aucune donnée n'existe sur ces sables.

4.7.2. Les aquifères jurassiques

Dans la région Nord-Pas de Calais, les formations du Jurassique sont principalement présentes dans le Boulonnais. Elles sont composées d'alternances de marnes, d'argiles, de sables, de grès et de calcaires (Figure 55). Les nappes qu'elles renferment sont nombreuses, de petite taille (faible épaisseur et extension modeste), de superficie d'affleurement faible et affectées de discontinuités diverses (failles, vallées, etc.). Elles ne dépassent guère le périmètre du Boulonnais et sont d'intérêt local. Il n'existe pas de cartes piézométriques de ces nappes.

Le logiciel GDM ne permet pas la modélisation géologique des couches de ce secteur car le contexte structural est trop complexe.

Les aquifères jurassiques sont les suivants :

- L'aquifère des Grès, Calcaires, Sables et Argiles de la « Pointe aux Oies », Tithonien supérieur ;
- L'aquifère des Grès de la « Crèche, Tithonien supérieur ;
- L'aquifère des Grès de Châtillon, Calcaire du Moulin Vibert, Grès de Connincthun, Argile du Moulin Vibert du Kimméridgien supérieur ;
- L'aquifère des Calcaires de Brecquerecque, Caillasses d'Hesdigneul, Oolithe d'Hesdin-l'Abbé, Grès de Brunembert de l'Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur ;
- l'aquifère du Mont des Boucards, Callovo-Oxfordien ;
- Et l'aquifère de l'Oolithe de Marquise, Calcaire de Rinxent, Marnes et Sables d'Hydrequent du Bajocien-Bathonien.

Les aquifères du Tithonien supérieur et du Callovo-Oxfordien n'ont aucune donnée hydrodynamiques dans la BSS et ADES. Les autres aquifères, disposant de données, sont présentés dans les paragraphes suivants.

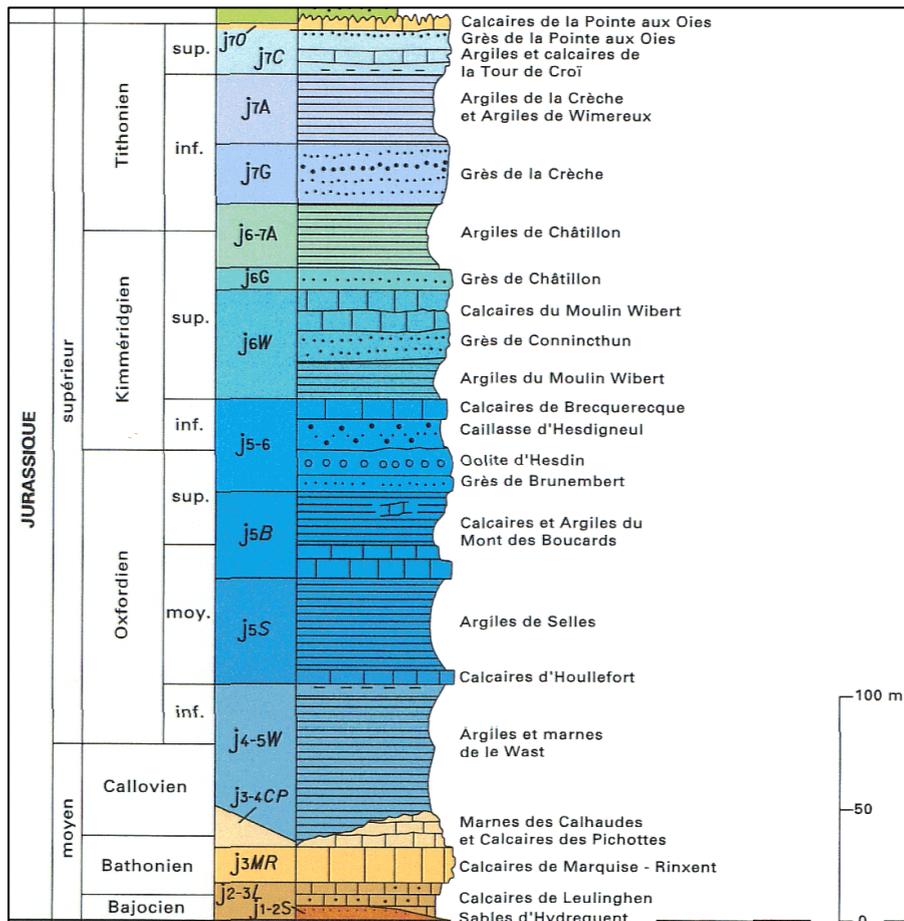


Figure 55 : Colonne lithostratigraphique des terrains jurassiques présents dans le Boulonnais

a) Aquifère des Grès de Châtillon, Calcaire du Moulin Vibert, Grès de Connincthun, Argile du Moulin Vibert du Kimméridgien supérieur

Les valeurs de débit d'exploitation disponibles indiquent que cet aquifère est plutôt favorable à très favorable à la géothermie sur nappe avec PAC. Les valeurs de température de la nappe sont centrées autour de 11 et 14°C, c'est donc une température plutôt favorable à la géothermie sur nappe avec PAC (Tableau 11 et Figure 56). Il est toutefois difficile de généraliser ces conclusions à tout l'aquifère car les données disponibles sont peu nombreuses et réparties dans 4 forages pour les débits d'exploitation et dans seulement 2 forages pour les mesures de températures.

Paramètre	Nombre de valeurs	Mini	Maxi	Moyenne
Débit spécifique (m ³ /s/m)	5 valeurs réparties dans 4 forages	1,6.10 ⁻³	4,7.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³
Transmissivité (m ² /s)	3 valeurs comptées dans un forage	6,1.10 ⁻⁴	2,3.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	0			
Débit d'exploitation (m ³ /h)	5 valeurs réparties dans 4 forages	25.2	84	43.8
Température (°C)	21 valeurs réparties dans 2 forages	9,8	14,8	12,4

Tableau 11 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Grès de Châtillon

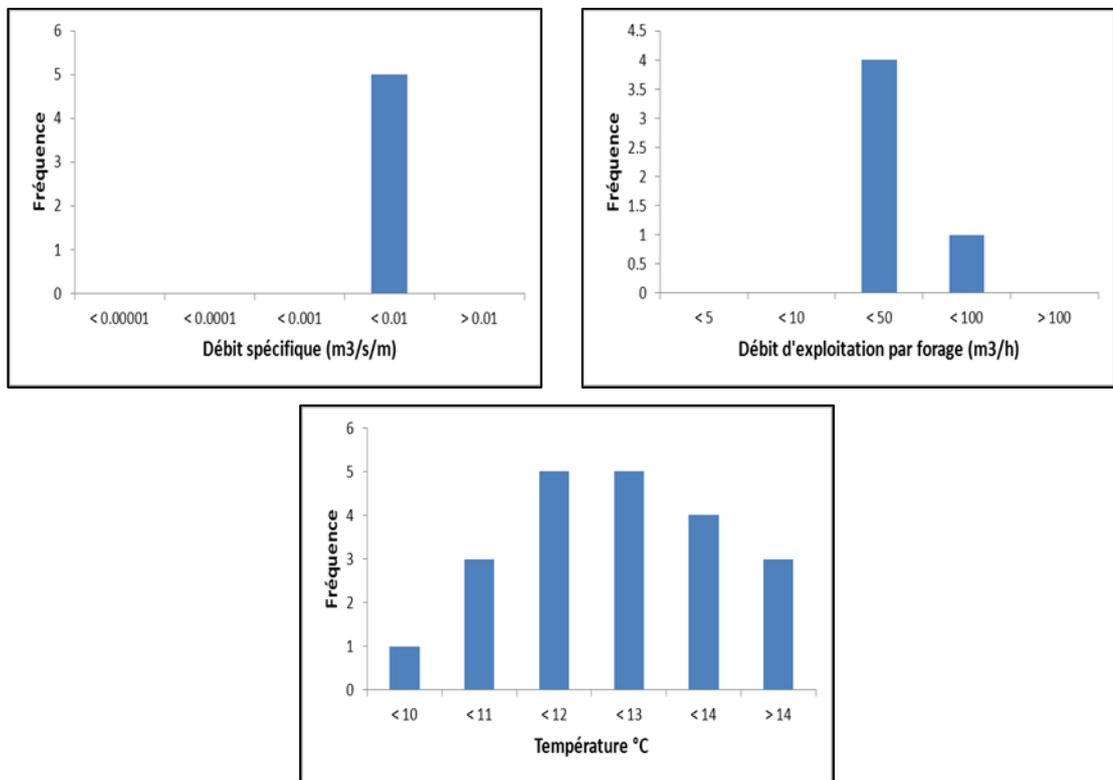


Figure 56 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Grès de Châtillon (ADES et BSS)

b) Aquifère des Calcaires de Brecquerecque, Caillasses d'Hesdigneul, Oolithe d'Hesdin-l'Abbé, Grès de Brunembert de l'Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur

Les valeurs de débit d'exploitation disponibles indiquent que cet aquifère est plutôt favorable à très favorable à la géothermie sur nappe avec PAC. La distribution des valeurs de température de la nappe montrent que cet aquifère est plutôt peu favorable à favorable à la géothermie sur nappe avec PAC (Tableau 12 et Figure 57). Il est cependant difficile de généraliser à tout l'aquifère car les données disponibles sont peu nombreuses et réparties dans seulement 6 forages pour les débits d'exploitation et dans 4 forages pour les mesures de température.

Paramètre	Nombre de valeurs	Mini	Maxi	Moyenne
Débit spécifique (m ³ /s/m)	7 valeurs réparties dans 6 forages	1,5.10 ⁻³	1.10 ⁻²	6,7.10 ⁻³
Transmissivité (m ² /s)	1 seule valeur recensée			1,9.10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	0			
Débit d'exploitation (m ³ /h)	7 valeurs réparties dans 6 forages	26,5	262	173
Température (°C)	64 valeurs réparties dans 4 forages	8,5	16	12,1

Tableau 12 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Calcaires de Brecquerecque

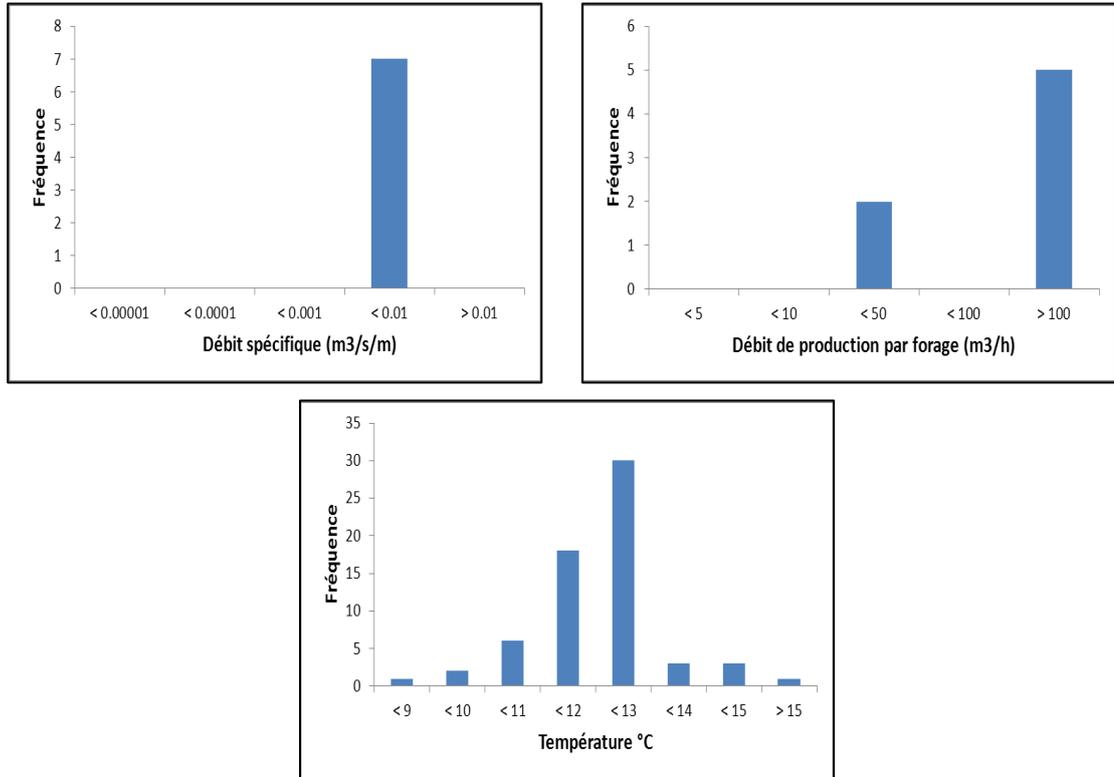


Figure 57 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires de Breccquerecque (ADES et BSS)

c) Aquifère de l'Oolithe de Marquise, Calcaire de Rinxent, Marnes et Sables d'Hydrequent du Bajocien-Bathonien

Les débits d'exploitation mesurés dans les forages sont très variables, allant de défavorable à très favorables à la géothermie sur nappe avec PAC (Tableau13 et Figure 58). Les débits d'exploitations les plus fréquemment rencontrés dans les bases de données sont compris entre 10 et 50 m³/h, c'est-à-dire plutôt favorables à la géothermie sur nappe.

La température moyenne de la nappe est d'environ 11°C, c'est donc un critère favorable à la géothermie sur nappe. Cependant il existe quelques mesures peu favorables en dessous de 10°C.

Il est cependant difficile de généraliser à tout l'aquifère car les données disponibles sont peu nombreuses et réparties dans seulement 7 forages pour les débits d'exploitation et dans 2 forages pour les mesures de températures.

Paramètre	Nombre de valeurs	Mini	Maxi	Moyenne
Débit spécifique (m ³ /s/m)	125 valeurs réparties dans 7 forages	1,4.10 ⁻⁶	1.10 ⁻²	3,4.10 ⁻³
Transmissivité (m ² /s)	16 valeurs réparties dans 5 forages	4,9.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	4 valeurs réparties dans 2 forages	2,3.10 ⁻⁶	3,9.10 ⁻⁴	1,1.10 ⁻⁴
Débit d'exploitation (m ³ /h)	127 valeurs réparties dans 7 sondages	0,1	238	34,7
Température (°C)	32 valeurs réparties dans 2 forages	7,1	14	11,4

Tableau 13 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère de l'Oolithe de Marquise

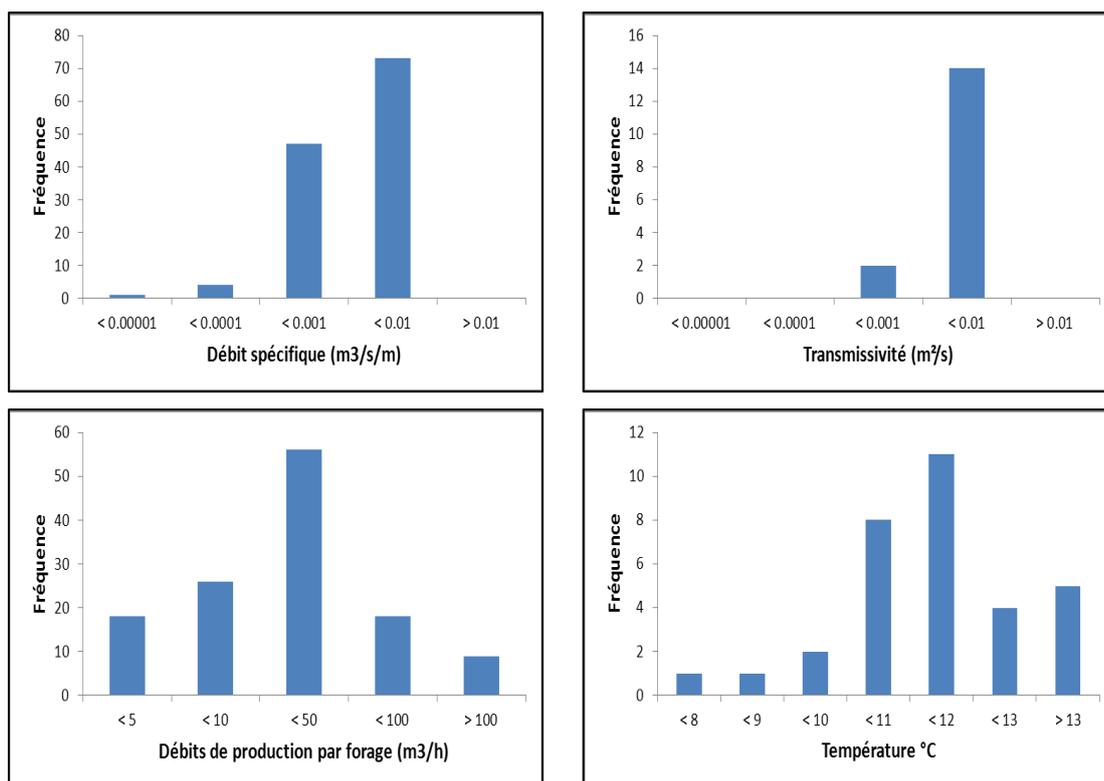


Figure 58 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère de l'Oolithe de Marquise (ADES et BSS)

4.7.3. L'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais

Les Calcaires carbonifères affleurent dans le Boulonnais et constituent une partie du Massif Paléozoïque de Ferques. Ce secteur est très structuré (failles, blocs abaissés, etc.). Les calcaires ont un caractère aquifère grâce aux fissures, aux failles et aux karsts, leur porosité est donc très hétérogène.

Il y est difficile de tracer une carte piézométrique car la nappe est compartimentée et discontinue. D'autre part, plusieurs carrières exploitant ces calcaires pompent les eaux d'exhaures et rabattent la nappe sur plusieurs dizaines de mètres, modifiant fortement les écoulements souterrains.

La BSS dispose toutefois de données hydrodynamiques concernant cet aquifère (Tableau 14 et Figure 59).

Paramètre	Nombre de valeurs	Mini	Maxi	Moyenne
Débit spécifique (m ³ /s/m)	8 valeurs réparties dans 2 forages	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
Transmissivité (m ² /s)	3 valeurs réparties dans 2 forages	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Perméabilité (m/s)	0			
Débit d'exploitation (m ³ /h)	9 valeurs réparties dans 2 forages	4,8	238	99,3
Température (°C)	0			

Tableau 14 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour l'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais

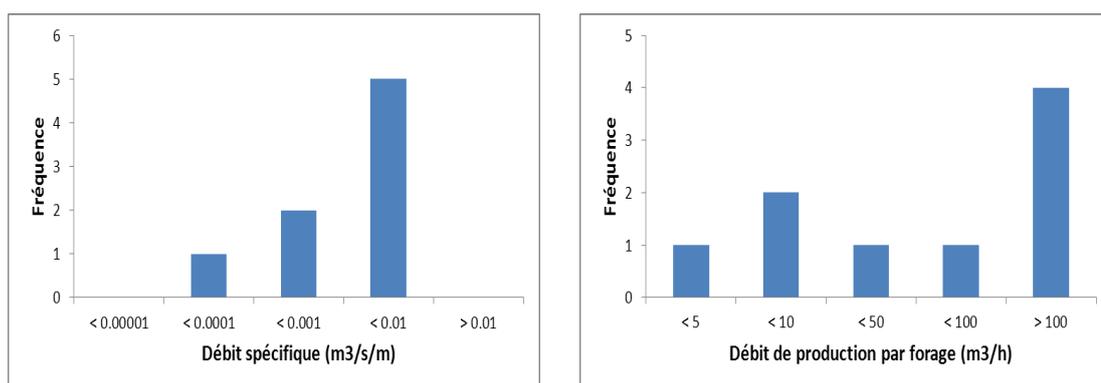


Figure 59 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais (ADES et BSS)

Les débits d'exploitation mesurés dans les forages sont très variables, allant de défavorable à très favorables à la géothermie sur nappe avec PAC. La moyenne des débits d'exploitations est d'environ 100 m³/h, c'est-à-dire un critère très favorable à la géothermie sur nappe. Il est difficile de généraliser à tout l'aquifère car les données disponibles sont peu nombreuses et réparties dans seulement 2 forages.

4.7.4. Les aquifères du Dévonien moyen et supérieur

Les réservoirs du Dévonien sont constitués d'alternances de schistes calcaireux et des calcaires de l'Eifelien terminal, des assises calcaires et calcschistes du Givétien et des calcaires du Frasnien. Ces aquifères ont une porosité de fractures (diaclasses et failles), de joints de stratification et de karsts.

Chaque aquifère est indépendant car il se trouve dans des structures tectoniques plissées (telles que des synclinaux et des anticlinaux) qui font que la continuité n'existe que temporairement à la faveur de trop-pleins ou de cours d'eau transversaux. Ils ne forment donc pas une nappe régionale. Les caractéristiques de ces aquifères sont hétérogènes, les valeurs données ci-après restent ponctuelles et sont données à titre d'exemple (Tableau 15 et Figure 60, source BSS et ADES) :

Paramètre	Nombre de valeurs	Mini	Maxi	Moyenne
Débit spécifique (m ³ /s/m)	44 valeurs réparties dans 29 forages	2,9.10 ⁻⁵	7.10 ⁻²	4,9.10 ⁻³
Transmissivité (m ² /s)	15 valeurs réparties dans 13 forages	8,6.10 ⁻⁵	8.10 ⁻²	9,1.10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	2 valeurs réparties dans 2 forages	2,22.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³	
Débit d'exploitation (m ³ /h)	45 valeurs réparties dans 29 forages	2,5	280	57,8
Température (°C)	88 valeurs réparties dans 13 forages	9,4	14,2	11,7

Tableau 15 : Synthèse des données disponibles dans ADES et la BSS pour les aquifères du Dévonien moyen et supérieur

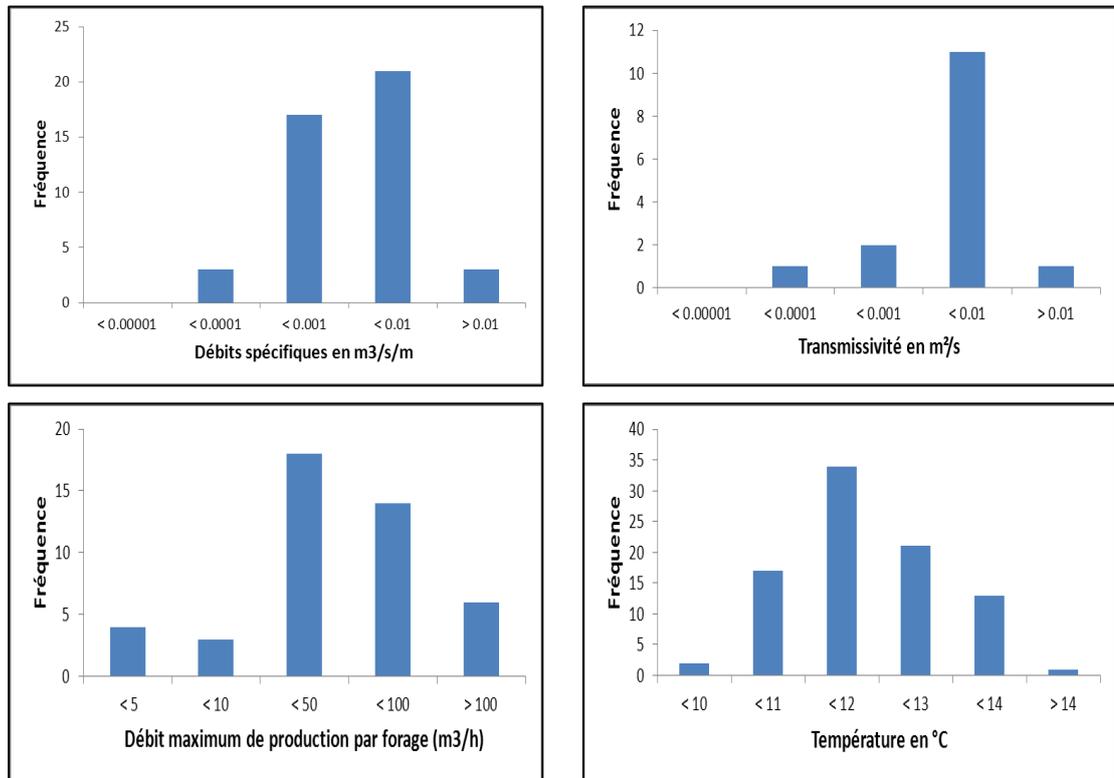


Figure 60 : Histogrammes des caractéristiques hydrodynamiques et des températures des aquifères dévoniens recensés dans la BSS et ADES.

Les débits d'exploitation mesurés dans les forages sont très variables, allant de défavorable à très favorables à la géothermie sur nappe avec PAC. La moyenne des débits d'exploitations est d'environ 58 m³/h, c'est-à-dire un critère très favorable à la géothermie sur nappe.

Au vu de la distribution des données, la température de la nappe semble favorable à la géothermie sur nappe avec PAC.

Il est cependant difficile de généraliser au vu du contexte structural des aquifères, de leur porosité et des données ponctuelles disponibles.

4.7.5. Conclusion sur le potentiel géothermique de ces aquifères

Compte tenu des caractéristiques de ces aquifères, du faible taux d'information sur les paramètres hydrodynamiques, de l'absence de cartes piézométriques, aucune carte de potentiel géothermique n'a été tracée. Toutefois la présence de ces aquifères sera signalée sur le portail internet.

4.9. SYNTHÈSE DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DES AQUIFÈRES DU NORD-PAS DE CALAIS

Le potentiel géothermique est basé sur la pondération de trois critères : température de la nappe, débit d'exploitation par forage, profondeur d'accès à la ressource en eau (paragraphe 3.1.1.c *Construction des cartes du potentiel géothermique*). Les cartes du potentiel géothermique de chaque aquifère figurent en annexe 1, planches 4, 8, 12 et 16.

La nappe des Sables Pissards est la moins renseignée car près de 77,6% de son extension présente un potentiel non connu précisément (c'est-à-dire qu'au moins un des trois critères est absent). Lorsque les trois critères sont réunis, cette nappe présente généralement un potentiel moyen (Tableau 16).

La nappe des Sables landéniens présente un potentiel géothermique globalement moyen (83,6% de l'extension retenue). À quelques rares endroits le potentiel est faible car la nappe est très proche de la surface (critère peu favorable à cause des problèmes liés à la réinjection), et le débit d'exploitation est également faible.

La nappe de la Craie présente un potentiel fort et moyen sur plus de 65% de son extension en raison des débits d'exploitation élevés et de la faible profondeur de la nappe. Les secteurs à potentiel faible sont souvent associés à des zones peu productives et où la nappe est plus profonde (Bassin d'Orchies, Plaine des Flandres, sous les plateaux dans l'Artois et le Ternois, etc...).

Là où tous les critères sont connus, **les Calcaires carbonifères de l'Avesnois** sont très propices à la géothermie sur nappe car les débits d'exploitation sont élevés. En ce qui concerne les **Calcaires carbonifères de la région lilloise**, ceux-ci sont très favorables à la géothermie sur nappe malgré le fait que la profondeur d'accès à la ressource en eau soit défavorable.

Aquifère \ Potentiel	Sables Pissards (planche 4)	Sables landéniens (planche 8)	La Craie (planche 12)	Les Calcaires carbonifères (planche 16)
Fort	1%	0%	33,7%	32%
Moyen	21,4%	83,6%	31,3%	0,6%
Faible	0%	2%	11,1%	0%
Non connu précisément	77,6%	14,4%	23,9%	67,4%

Tableau 16 : Statistiques sur le potentiel géothermique de chaque aquifère étudié

La carte régionale du potentiel géothermique du meilleur aquifère (Annexe 2, planche 17) résulte de la combinaison des cartes du potentiel géothermique de chaque aquifère. La meilleure note a été retenue pour chaque maille. Le potentiel géothermique est connu sur environ 67% de la région et se répartit de la manière suivante : 26% en potentiel fort, 34% en potentiel moyen et 7% en potentiel faible.

4.10. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les résultats (carte du potentiel régional, rapport, outil de consultation) de l'atlas sont diffusés sur le site Géothermie Perspectives <http://www.geothermie-perspectives.fr>

4.10.1. Données générales du site

Outre les atlas réalisés à l'échelle régionale, un certain nombre de documents sont mis à disposition des utilisateurs sur le site Géothermie Perspectives (Figure 61) :

- Synthèse des mécanismes d'aides mobilisables ;
- Synthèse sur la réglementation en vigueur ;
- Présentation des acteurs locaux de la géothermie (administrations, foreurs, bureaux d'études, ...) ;
- Exemples de réalisations ;
- Documents divers.

Géothermie perspectives Toute l'information sur l'énergie de la Terre

Je chauffe ma maison | Chauffer des bâtiments | Les réseaux de chaleur | Autres Utilisations

La géothermie
 Comment ça marche ?
 La géothermie en France
 Les enjeux
 Recherche
 Actualités/Presse
 Médiathèque
 FAQ/Glossaire
 Les acteurs
 Liens

La géothermie en région

Espace professionnel
 S'inscrire à l'espace professionnel

- Accueil
- Plan du site
- Rechercher
- Contact

Une information proche de chez vous
 >> En savoir plus...

>>Le potentiel géothermique de votre projet

>>Trouver un foreur de sondes Qualiforage

Formations 2011
 >> En savoir plus...

Journée de sensibilisation en région Bourgogne - 29 sept. 2011
Introduction à la géothermie - sept. et nov. 2011
Géothermie sur pompes à chaleur collectif et tertiaire, montage de projet - oct. 2011

Ouvrages
 >> En savoir plus...

La géothermie et les réseaux de chaleur
Guide du Maître d'Ouvrage
 Manuel co-édité par l'ADEME et le BRGM
 Prix de vente : 45 €
 >> En savoir plus

Pompe à chaleur géothermique sur aquifère
 Conception et Mise en Oeuvre
 Manuel co-édité par l'ADEME, l'ARENE et le BRGM
 Prix de vente : 30€
 >> En savoir plus

Partenariat
 >> En savoir plus...

Les Journées de la Géothermie 14-15 déc. 2011, Parc Floral, Paris

La première manifestation officielle de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) se déroulera le 14 et 15 décembre 2011. Celle-ci s'organisera autour d'un salon d'affaires et de conférences au Parc Floral de Paris.

A la Une

Newsletter Géothermie 2011 n°6
 2 septembre 2011
 Retrouvez les dernières informations sur la géothermie en France et à l'étranger : politique, opérations en cours, projets, normes et actualité scientifique.
 >> Accéder à ce numéro

La Géothermie en France n°9
 18 juillet 2011
 >> Accéder à ce numéro

>> toutes les actualités...

Agenda

5-6 octobre 2011 : Soultz Geothermal Conference, Soultz-sous-Forêts
 >> En savoir plus

14-15 décembre 2011 : Les Journées de la Géothermie 2011, Paris
 >> En savoir plus

Géothermie Perspectives metra votre disposition toutes les informations que vous devez savoir sur la géothermie, en particulier sur le chauffage à énergie géothermique, que ce soit l'exploitation des nappes d'eau chaudes grâce à des forages profonds pour alimenter les réseaux de chaleur, ou, l'aide d'une pompe à chaleur géothermique, qui permet d'extraire l'énergie emmagasinée dans les nappes phréatiques ou même celle contenue directement dans les terrains pour le chauffage géothermique d'une habitation.

© ADEME-BRGM Qui sommes-nous ? Informations légales

Figure 61 : Page d'accueil du site Géothermie Perspectives

4.10.2. Outil de consultation à l'échelle du Nord-Pas de Calais

L'outil de consultation constitué à l'échelle du Nord-Pas de Calais permet d'obtenir des informations utiles à l'analyse de la faisabilité d'un projet de géothermie très basse énergie, notamment :

- Le potentiel géothermique des aquifères ;
- Des données d'exploitabilité des aquifères présents (profondeur d'accès à la ressource en eau souterraine, débit exploitable, température de la nappe) et coupes hydrogéologiques types.

Les informations fournies revêtent un caractère indicatif, qui doit permettre d'orienter un projet de pompe à chaleur, mais la détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessite une étude spécifique. En effet, les cartes, fournies à l'échelle du 1/100 000, sont construites à partir de la régionalisation de paramètres caractéristiques et leur degré de précision est

acceptable à l'échelle régionale, mais pas à l'échelle d'un projet qui nécessite une analyse fine des potentialités locales des aquifères.

Depuis la fenêtre d'accueil de l'espace régional Nord-Pas de Calais (Figure 62), les informations sont accessibles via une recherche cartographique (Figure 63) ou à partir du nom de la commune (Figure 64).

Géothermie perspectives Toute l'information sur l'énergie de la Terre

ADENE Agence de l'Environnement et de la Prévention de l'Énergie

brgm Géosciences pour une Terre durable

Je chauffe ma maison | Chauffer des bâtiments | Les réseaux de chaleur | Autres Utilisations

La géothermie

Comment ça marche ?

La géothermie en France

Les enjeux

Recherche-Développement

Actualités/Presse

Médiathèque

FAQ/Glossaire

Les acteurs

Liens

La géothermie en région

Espace régional Nord-Pas-de-Calais

Accès au SIG du potentiel géothermique des aquifères :

- Accès par la carte de la région NPC
- Accès par département ou par commune
- Documents d'accompagnement du SIG

La géothermie en région Nord-Pas-de-Calais

- Foreurs engagés dans la démarche qualité ADÈME-BRGM-EDF en région Nord-Pas-de-Calais
- Carte du potentiel régional Nord-Pas-de-Calais

ADENE Agence de l'Environnement et de la Prévention de l'Énergie

brgm Géosciences pour une Terre durable

RÉGION Nord-Pas de Calais

© ADÈME-BRGM Qui sommes-nous ? Informations légales

Figure 62 : Fenêtre d'accueil de l'espace régional Nord-Pas de Calais

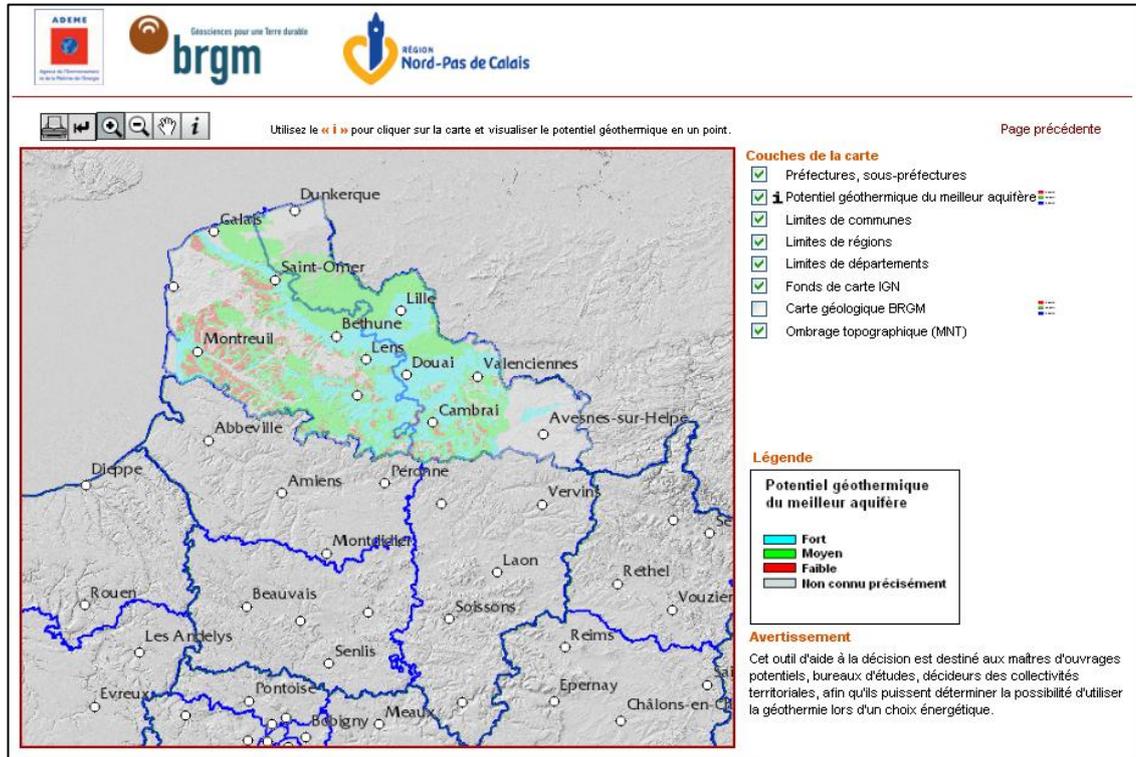


Figure 63 : Fenêtre d'interrogation de l'outil via la carte régionale



Figure 64 : Fenêtre de recherche par commune

Après sélection de la commune, une fenêtre cartographique s'affiche à l'échelle communale (Figure 65). Elle présente le potentiel du meilleur aquifère. La boîte à outils située en haut à gauche permet d'imprimer, revenir au zoom précédent, zoomer, dézoomer, se déplacer et s'informer « i ».

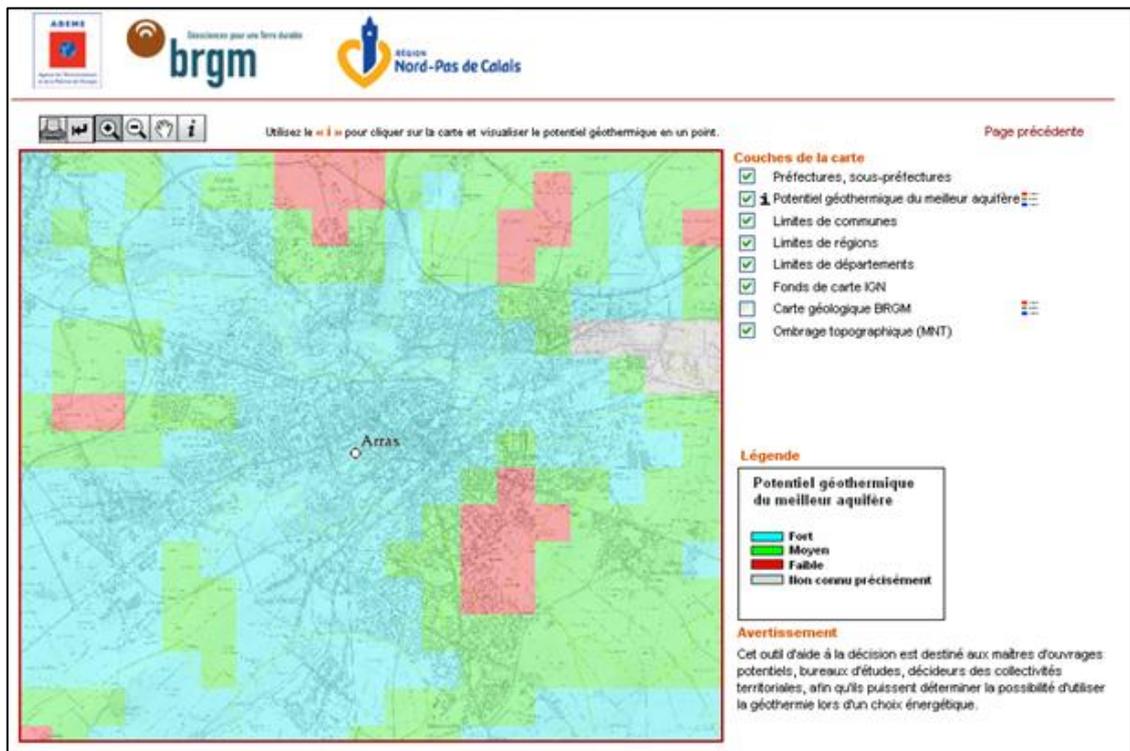
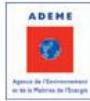


Figure 65 : Fenêtre cartographique à l'échelle communale

L'utilisateur peut alors cliquer sur une maille de son choix sur la carte, à l'aide du « i » de la barre d'outils pour faire apparaître la fiche de renseignements relative à la maille.

Un exemple de fiche de renseignements pour une maille située au droit de deux aquifères sur la commune de Cysoing (59) est présenté en Figure 66.

La fiche contient un schéma représentant la géologie du sous-sol de manière simplifiée adaptée à la situation locale permettant de rendre plus compréhensible la géologie et l'hydrogéologie au droit de la maille. Ces schémas ont été conçus pour différentes situations : absences d'aquifères, présence d'un, de deux ou de trois aquifères dans les 100 premiers mètres de profondeur.



Avertissements

Cet outil d'aide à la décision est destiné aux maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique.

Les valeurs affichées ici sont des moyennes réalisées sur une maille de 500 m sur 500 m.

Ces informations transmises ne peuvent ni ne doivent en aucun cas remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'études compétents !

Potentiel Géothermique sur la commune de de : **CYSOING (59168)**

Positionnement du point sélectionné

X (Lambert 2 étendu) : **662807 m**

Y (Lambert 2 étendu) : **2620160 m**

Altitude du sol (mini / moyenne / maxi) : **42 m / 48 m / 51 m**

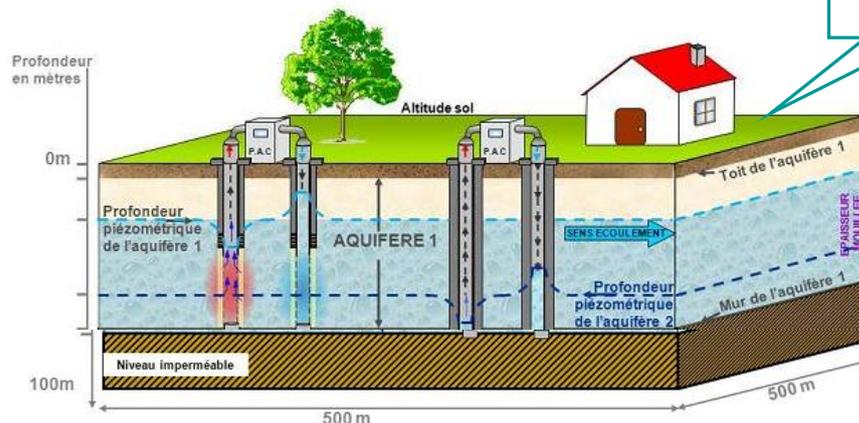
Coordonnées géographiques de la maille

Potentiel géothermique du meilleur aquifère

Potentiel géothermique du meilleur aquifère

Potentiel maximum de cet aquifère : **FORT**

Coupe schématique



Avertissement : le schéma représente la géologie du sous-sol de manière simplifiée.

Détails par aquifère

	Aquifère 1 Craie	Aquifère 2 Calcaires carbonifères	Aquifère 3
Profondeur du toit (m)	8	36	
Profondeur du mur (m)	36		
Profondeur minimale recensée de la nappe Période de mesure	10 oct-2009	29 oct-2010	
Profondeur maximale recensée de la nappe Période de mesure	22 mai-2009		
Profondeur d'accès (m)	22	36	
Température (°C)			
Paramètre hydrodynamique	Perméabilité (m/h) 0,7	Transmissivité (m2/h) 19,8	
Débit d'exploitation par forage (m³/h)	3	99	
Potentiel géothermique	MOYEN	FORT	
Remarque			

Potentiel géothermique de chaque aquifère

Figure 66 : Exemple de fiche de renseignement au droit de la commune de Cysoing

5. Conclusion

L'évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en Nord-Pas de Calais a été réalisée à partir de bases de données existantes, notamment celles issues de la Banque du Sous-Sol (BSS) et d'ADES. Ce projet a nécessité un important travail d'identification, de collecte et de traitement des données disponibles. Celles-ci ont été rassemblées dans une base de données unique puis intégrées à un SIG pour permettre leur visualisation et leur traitement. Les données relatives à la géométrie des formations ont été organisées dans un modèle géologique régional. Celui-ci permet des traitements tel que le tracé de profil, de carte de profondeur, d'épaisseur des formations géologiques.

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

Des informations complémentaires d'ordre hydrogéologique (aquifère concerné, débit d'exploitation par forage, niveau piézométrique) ou géologique (profondeur du toit et du mur de l'aquifère) sont également fournies pour chaque maille d'interrogation (de taille 500 m x 500 m).

La recherche peut se faire par le choix de la commune désirée, ou via un accès cartographique.

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

À l'échelle du Nord-Pas de Calais, le potentiel géothermique des aquifères est renseigné sur 67% de la surface de la région. Il est fort pour 26% de la surface, moyen pour 34%, faible pour 7%. La région présente donc un potentiel géothermique très intéressant, notamment la nappe de la Craie qui recouvre une grande partie de la région et qui possède des caractéristiques très intéressantes : faible profondeur de la nappe et débit d'exploitation élevés.

6. Glossaire

Débit de production * : est la quantité d'eau produite par un captage (exprimé en m^3/h).

Débit spécifique * : débit pompé dans un puits rapporté à la hauteur de rabattement dans le puits, dans des conditions définies (symbole usuel : Q_s ; exprimé en $m^3/h/m$).

Isobathe ** : courbe joignant les points d'une surface situés à une même profondeur sous la terre ou sous l'eau.

Isohypse ** : courbe joignant, sur une carte, les points d'une surface situés à une même altitude.

Isopièze ** : courbe joignant, sur une carte, les points d'égale hauteur piézométrique d'une nappe d'eau souterraine donnée.

Perméabilité * : aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel. Elle s'exprime quantitativement par la perméabilité intrinsèque et, pour l'eau, par le coefficient de perméabilité (de Darcy) ou perméabilité pris en abrégé dans ce sens quantitatif (symbole usuel : k ; exprimé en m/s).

Rabattement * : diminution de charge hydraulique déterminée en un point donné sous l'effet d'un prélèvement d'eau, traduite en pratique par l'abaissement du niveau piézométrique par rapport au niveau naturel. Sa signification est liée au débit prélevé, à la distance du point de prélèvement et en régime transitoire, au temps écoulé depuis le début du prélèvement (exprimé en m).

Transmissivité * : paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesurée selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement), et par unité de gradient hydraulique. Produit du coefficient de perméabilité (de Darcy) K par la puissance aquifère b , en milieu isotrope, ou produit de la composante du tenseur de perméabilité parallèle à la direction d'écoulement par la puissance aquifère (orthogonale à cette direction), en milieu anisotrope. (symbole usuel : T ; exprimé en m^2/s).

Sources des définitions :

* G. CASTANY, J. MARGAT, 1987 – Dictionnaire français d'hydrogéologie. Éd. BRGM.

** A. FOUCAULT, J.-F. RAOULT, 1988 – Dictionnaire de géologie. Éd. Masson.

7. Bibliographie

OUVRAGES :

AMRAOUI N., GOLAZ C., MARDHEL V., NEGREL Ph., PETIT V., PINAULT J.L., POINTET Th. – 2002 – Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig., 11 tabl., 5 ann.

BIZE J., CORREGE P., RAMON S. –1969 – Étude hydrogéologique des wateringsues - Nord-Pas de Calais (période de drainage) – BRGM/69-SGN-103-NPA, 51 p. 3 cartes

BOSCH B., CAULIER P., TALBOT A. – 1980 – Etude préliminaire à la réalisation de forages dans la nappe du calcaire carbonifère - Acquisition de données complémentaires (Deuxième phase) - BRGM/80-SGN-689-NPC, 26 p., 13 fig., 6 tabl. , 5 Ann.

BOUE JP. - 1985 - L'eau un vecteur d'énergie dans le bassin minier du Nord et du Pas-de-Calais - Recherches concernant l'exploitation technique de l'aquifère crayeux par pompes à chaleur - BRGM/85-AGI-069-NPC - Mémoire conseil national des arts et métiers

BOURGINE B. - 1995 - Logiciels géostatistiques de GDM - manuel de l'utilisateur - R37842 - BRGM – 82 p.

BOURGINE B. - 2008 – Analyse géostatistique à l'aide du programme Geostat2D – BRGM/RP-56354-FR – 57 p.

BUSCARLET E. et PICKAERT L., avec la collaboration de STOLLSTEINER P., KLINKA T. et ASFIRANE F. – 2011 – Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas de Calais - Schéma conceptuel - Calage du modèle hydrodynamique en régime permanent - Rapport d'avancement BRGM/RP-59720-FR – 91 p.

CAOUS J-Y - 1993 - Synthèse hydrogéologique de la nappe du Landénien des Flandres - BRGM/RR-37550-FR - 34 p.

CAOUS J.Y. (Juillet 1998) - Ressources thermo-minérales de Saint-Amand-les-Eaux (Nord). Etat des connaissances et possibilités d'exploitation - BRGM/RR-40146-FR 40p.

CAOUS J.-Y., CAUDRON M., MARDHEL V., NAIL C., NICOLAS J. avec la participation de BATKOWSKI D., BESANÇON S., GAUDEFROY M.-J., KIEFFER Cl., PINSON S., SAINT-OMER P., BRINON Ph. – 2001 – Bassin Artoit-Picardie, Nappe de la craie, carte piézométrique « hautes eaux » 2001. BRGM/RP-51149-FR. 31p.

CAOUS J.Y., LAMOTTE C., LEPRETRE J.P., NICOLAS J. – 1997 – Contrôle qualitatif et quantitatif de l'aquifère landénien des Flandres – Rapport BRGM R39678, 38 p., 16 fig., 6 ann.

CARDIN CH., DUFRENOY R. avec la collaboration de JOUBLIN F., CARON G., DESPIERRES J., MACQUET J., PASCOLI T., POLEZ K., GRYCZKA M., PIRA K. – 2011 - Nord-Pas de Calais – Nappe de la Craie – Campagne et carte piézométrique « hautes et basses eaux » 2009. BRGM/RP-58542-FR, 50 p., 5 fig., 3 ann.

CAULIER P. – 1974 – Étude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord – Université des Sciences et Technologies de Lille1.

CLEVENOT I. et DENUDT H. avec la collaboration de JOURDAIN E. – 1991 – Étude et synthèse hydrogéologique du Bassin d'Orchies – BRGM R33097NPC4S91, 101p.

COMBES P., 1991 – Modélisation mathématique de la nappe du Calcaire carbonifère – LHM/RD/91/91. 97p.

CRASTES DE PAULET F. et DUFRENOY R., avec la collaboration de RORIVE A. et BASTIEN J. – 2010 – Étude de la nappe du calcaire carbonifère, campagnes piézométriques de juillet et d'octobre de 2010 – BRGM/RP-59756-FR, 25p., 9 fig., 4 annexes.

DASSONVILLE G. et PLAT R., avec la collaboration scientifique de WATERLOT G. – 1968 – Données géologiques et hydrogéologiques sur le synclinorium carbonifère de Bachant – Ferrière-le-Petite (Nord). 68SGL059NPC, 38p.

DUFRENOY R., PETIT V. avec la collaboration de MARDHEL V. et XU D. - 2010 - Référentiel Hydrogéologique Français - BDLISA. Bassin Artois-Picardie. Années 3 et 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveaux 1, 2 et 3 en régions Nord-Pas de Calais et Picardie. BRGM/RP-57520-FR

LEGRAND C., ALLIER D., NACHBAUR A. avec la collaboration de BELKACIM S., COUEFFE R., HERNIOT P., TOURLIERE B. – 2010 – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région Franche-Comté. Rapport final. BRGM RP-58768-FR, 255 p., 103 ill., 13 annexes.

LE GUEN M. – 2001 – La boîte à moustache de Tukey, un outil pour initier à la statistique – Statistiquement Votre - SFDS, 4 (2001) 1-3 - 15p.

MANIA J. – 1971 – Contribution à l'étude de la nappe des sables Landéniens en Flandres franco-belges et dans le Bassin d'Orchies - 161 p.

MANIA J. et PHILIPPART A. – 1976 – Étude des ressources en eau de la zone littorale ; Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31/04/1975 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25 000 de Boulogne (6-7), Montreuil (1 à 8 et Rue (2 à 4). BRGM 76 SGN 122 NPC. 98p.

PERNEL F. avec la collaboration de BARAN N. et JOURDAIN E. – 1990 – Recueil et synthèse des données hydrogéologiques sur l'aquifère du calcaire carbonifère en vue d'actualiser le modèle de simulation mathématique. BRGM R 31912 NPC. 39p.

PHILIPPART A. – 1969 – Étude de l'état de pollution de la nappe de la craie au nord du seuil du Mélançois et de la nappe du calcaire carbonifère ; Compte rendu de fin de campagne de prélèvement. BRGM 69-SGN-104-NPA, 13p.

ROUX J.C., & al. (Ouvrage collectif sous la direction de Roux J.C.) – 2006 – Aquifères et eaux souterraines en France - BRGM-AIH éditions (2006) ; 956 pp.; pp. 330-397

TILLIE B. – 1980 – Nappe de la craie du bassin minier du Nord-Pas de Calais (zone médiane et occidentale). Acquisition et traitement des données. Modélisation des écoulements souterrains. - BRGM/80-SGN-069 - Thèse, université des sciences et techniques de Lille.

URBAN S., VANDENBROUCKE H., JAUFFRET D., ROBLET P., COLIN A., CHABART M., HOOGSTOEL R., NGUYEN D., MARCHAL J.P., PICOT J., PIRA K., DAVID P.Y., UDHIN Z., ARNAUD L., LERECULEY A., CONIL P., RODRIGUEZ G., CHRETIEN P., MINARD D., THINON-LARMINACH M., CAILLEAUD T., BRENOT A., CHRETIEN M., BÉZÈLGUES-COURTADE S., MARTIN J.C. (2009) – PNIGRA : Programme National des Inventaires Géothermiques Régionaux sur Aquifères. Rapport final. BRGM/RP-57915-FR, 195 p., 85 fig., 32 tab., 2 ann.

SITES INTERNET :

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

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

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

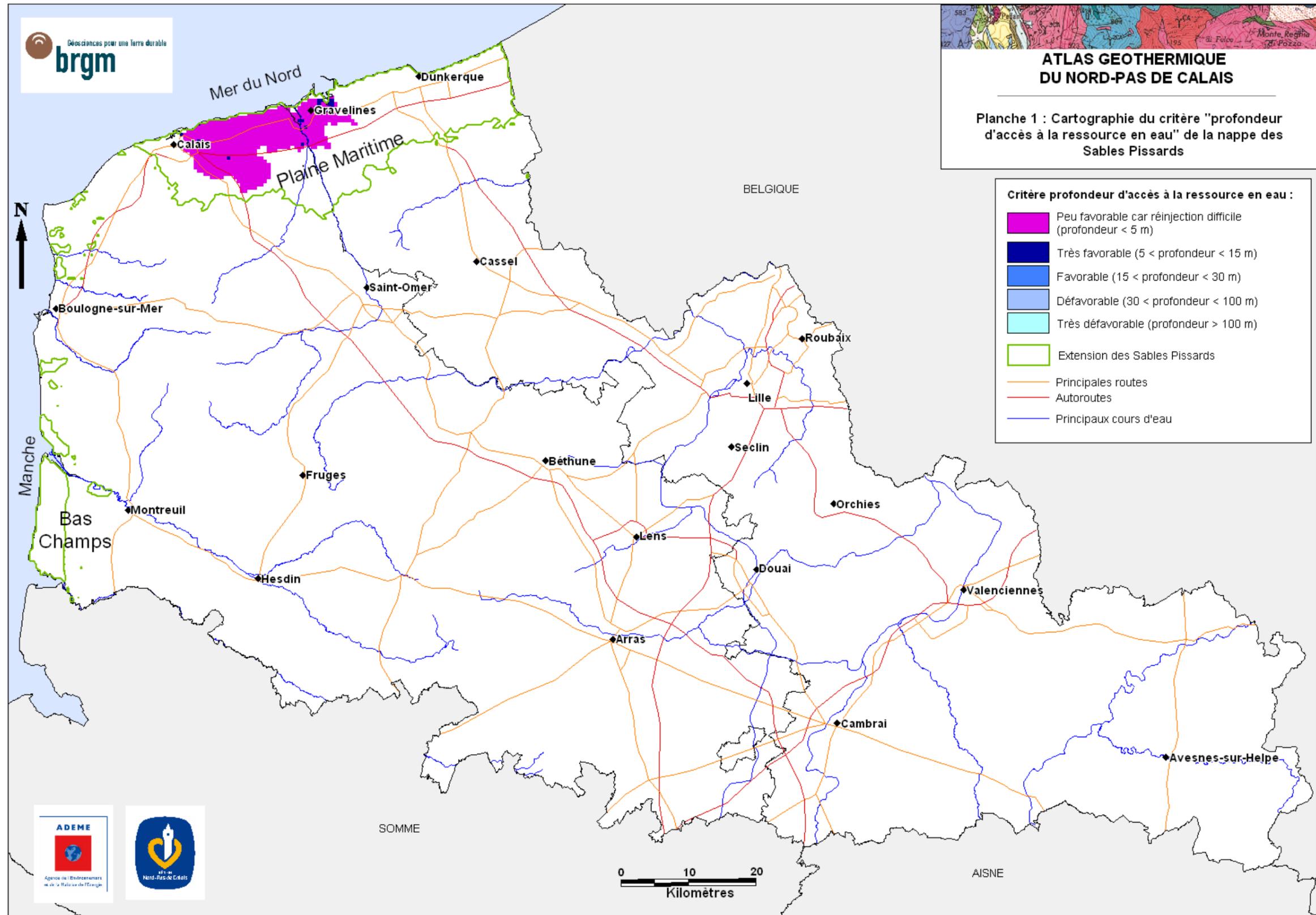
Région Nord-Pas de Calais : <http://www.nordpasdecals.fr>

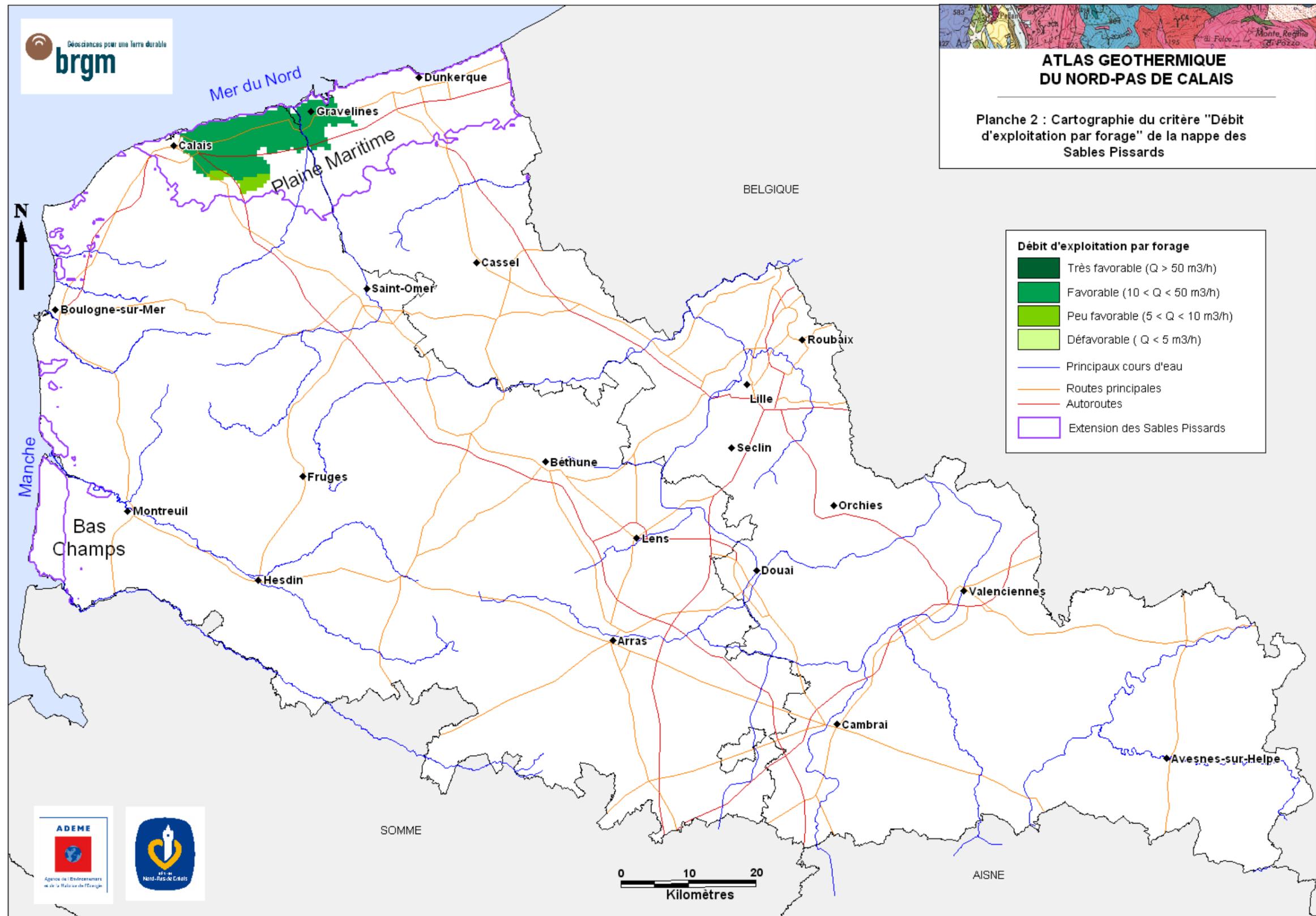
8. Annexes

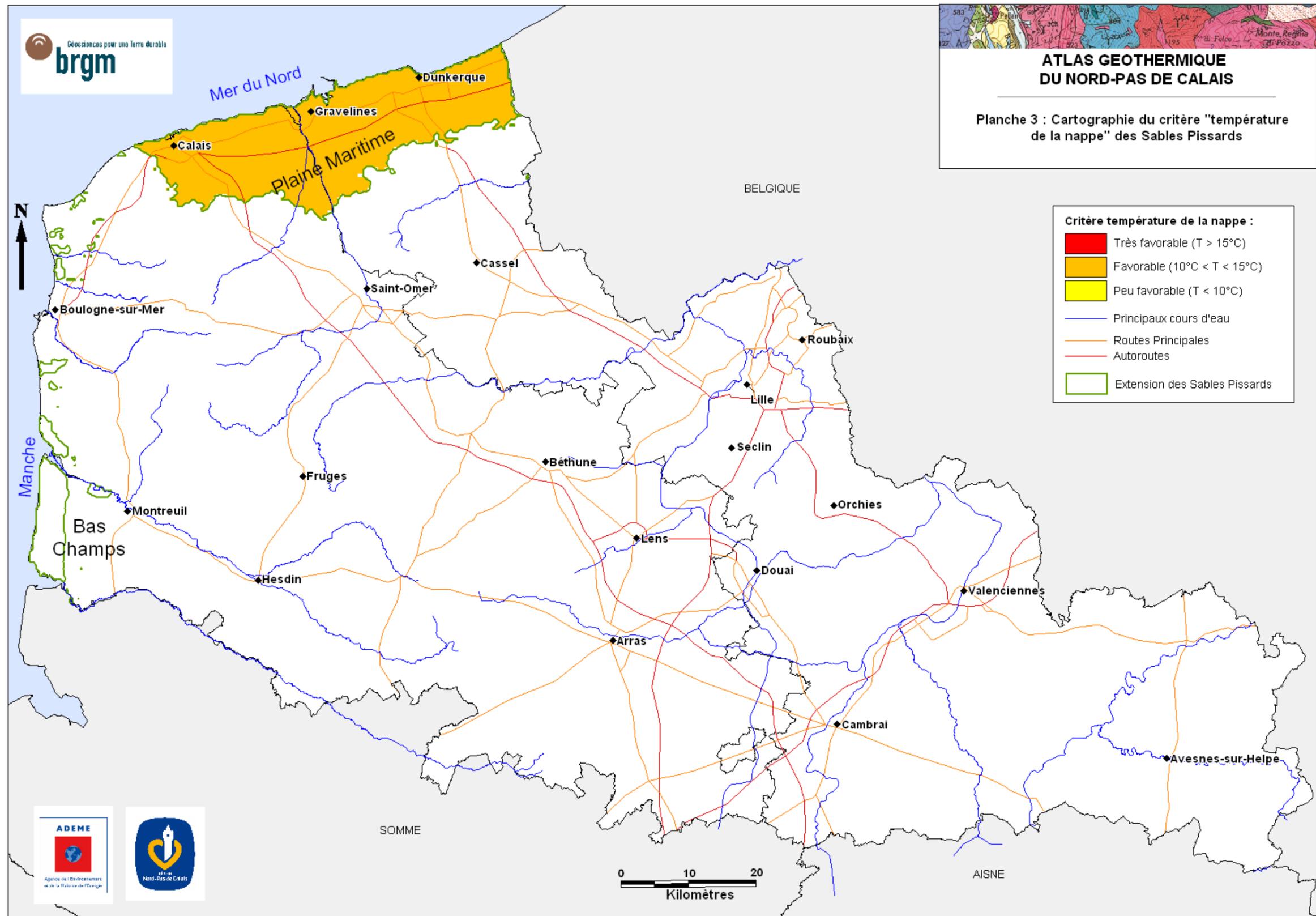
Annexe 1

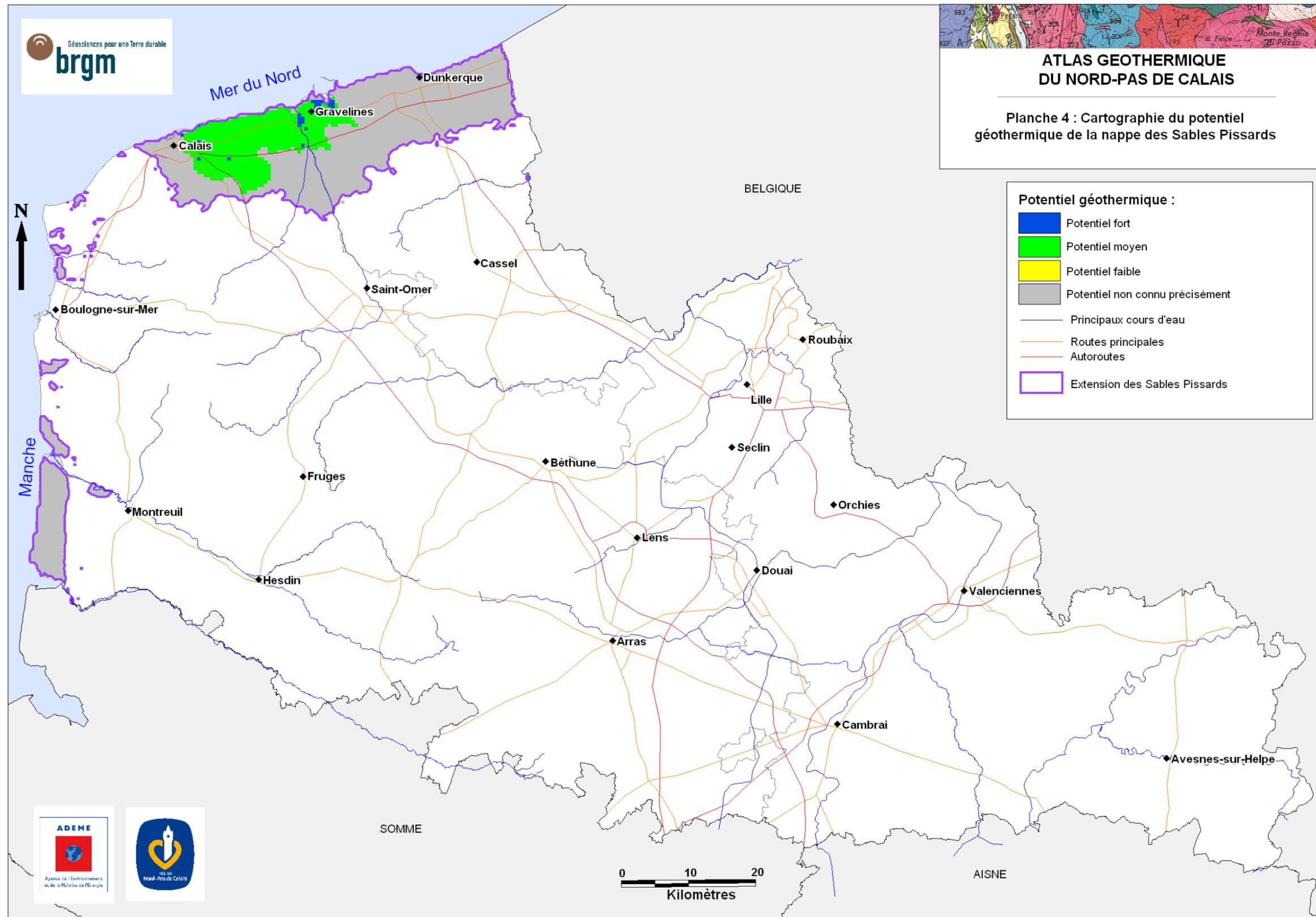
Cartes des critères par aquifère : profondeur d'accès à la ressource, débit d'exploitation par forage, température de la nappe et potentiel géothermique

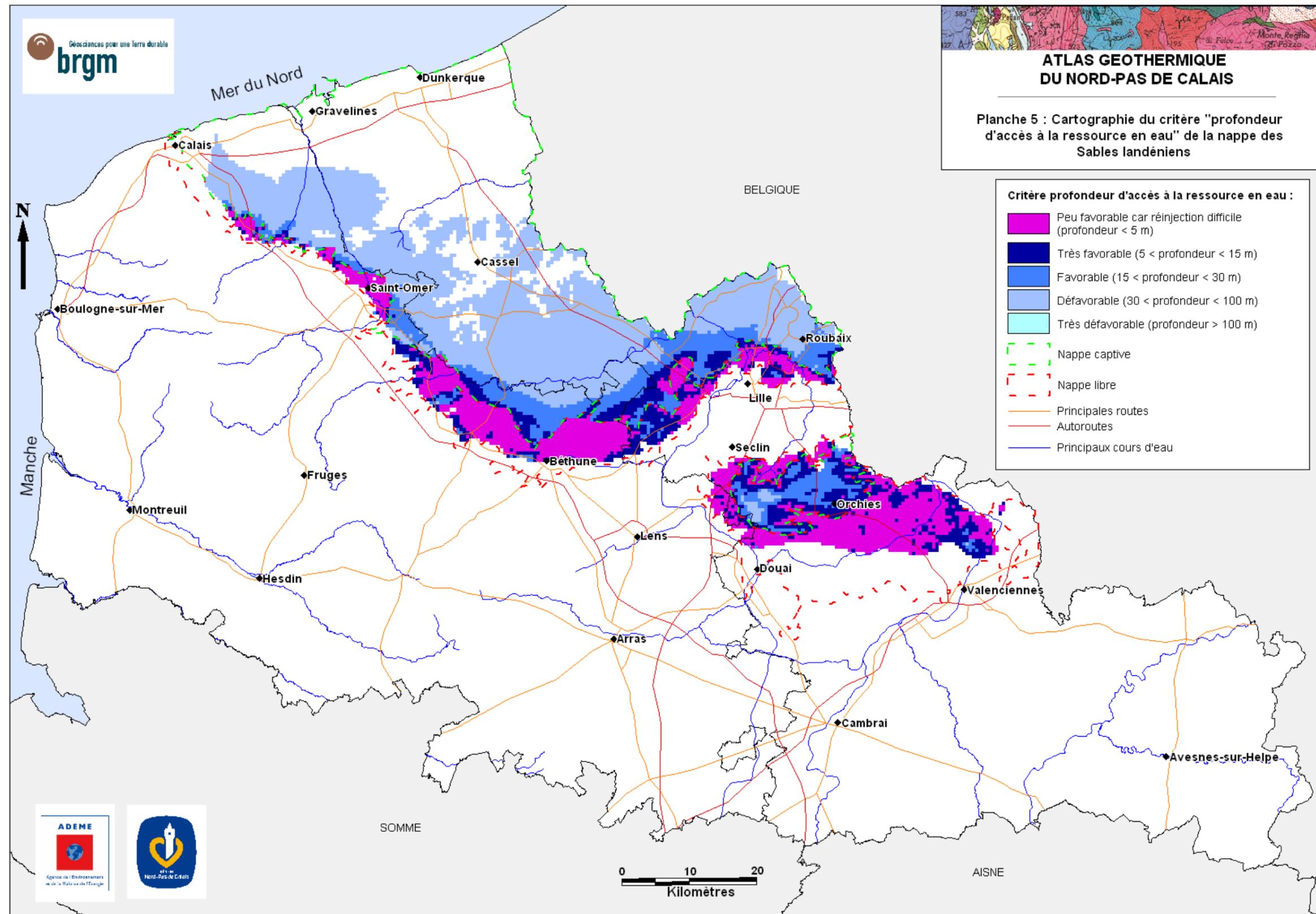
Libellé de l'aquifère	Numéro des cartes
Sables Pissards	Planche 1 : critère profondeur d'accès à la ressource Planche 2 : critère débit d'exploitation par forage Planche 3 : critère température Planche 4 : potentiel géothermique de l'aquifère
Sables landéniens	Planche 5 : critère profondeur d'accès à la ressource Planche 6 : critère débit d'exploitation par forage Planche 7 : critère température Planche 8 : potentiel géothermique de l'aquifère
La Craie	Planche 9 : critère profondeur d'accès à la ressource Planche 10 : critère débit d'exploitation par forage Planche 11 : critère température Planche 12 : potentiel géothermique de l'aquifère
Les Calcaires carbonifères	Planche 13 : critère profondeur d'accès à la ressource Planche 14 : critère débit d'exploitation par forage Planche 15 : critère température Planche 16 : potentiel géothermique de l'aquifère

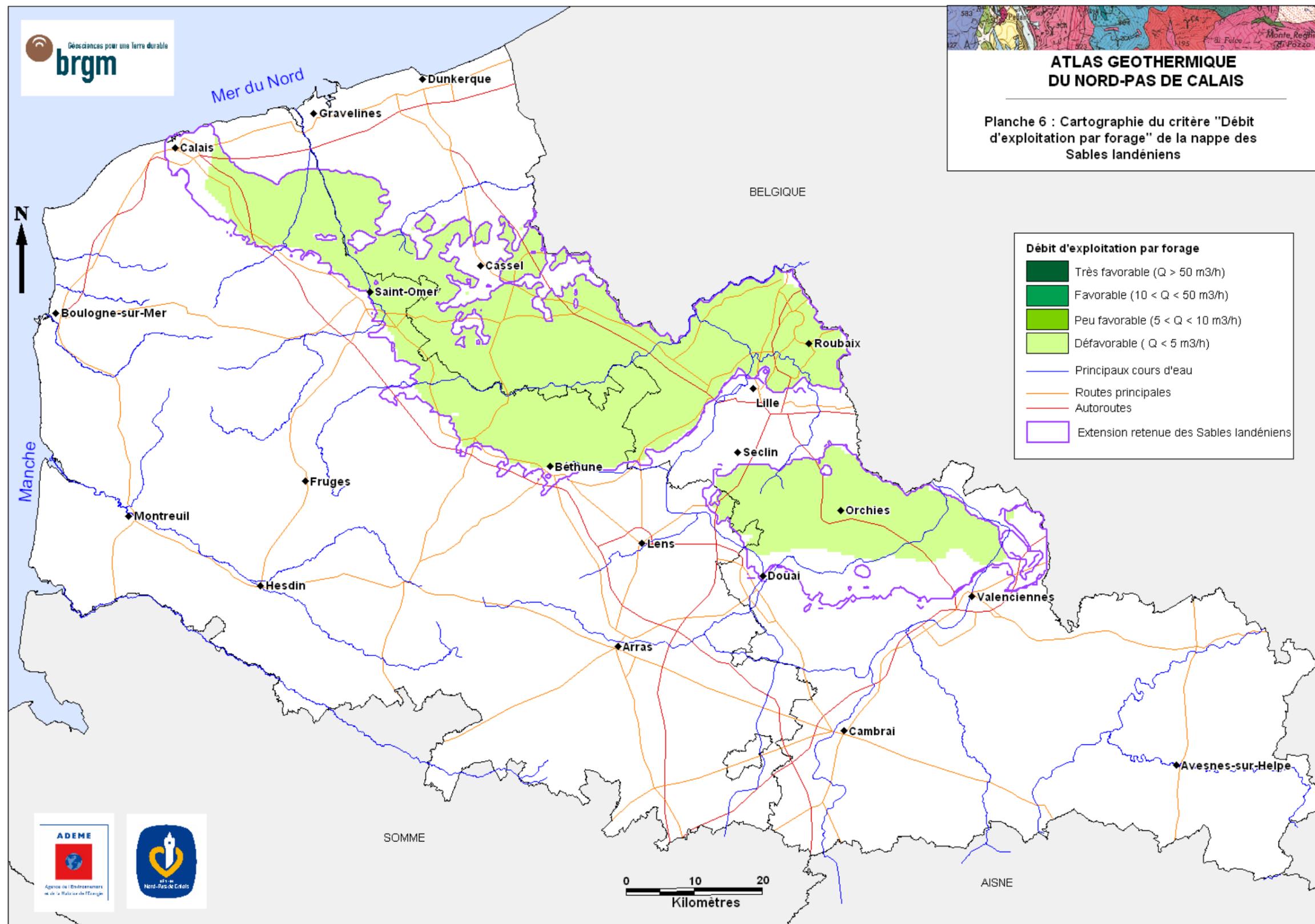


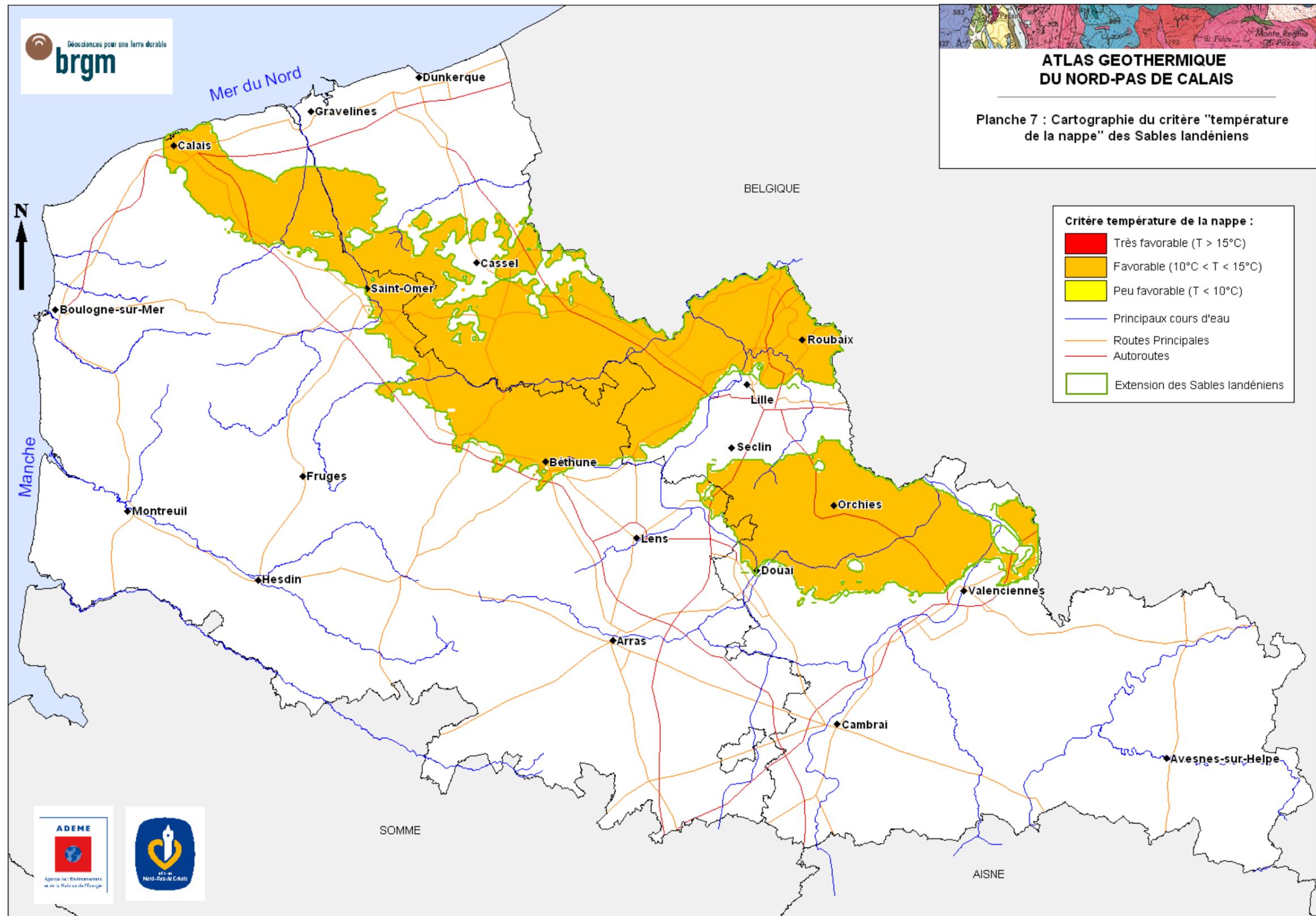


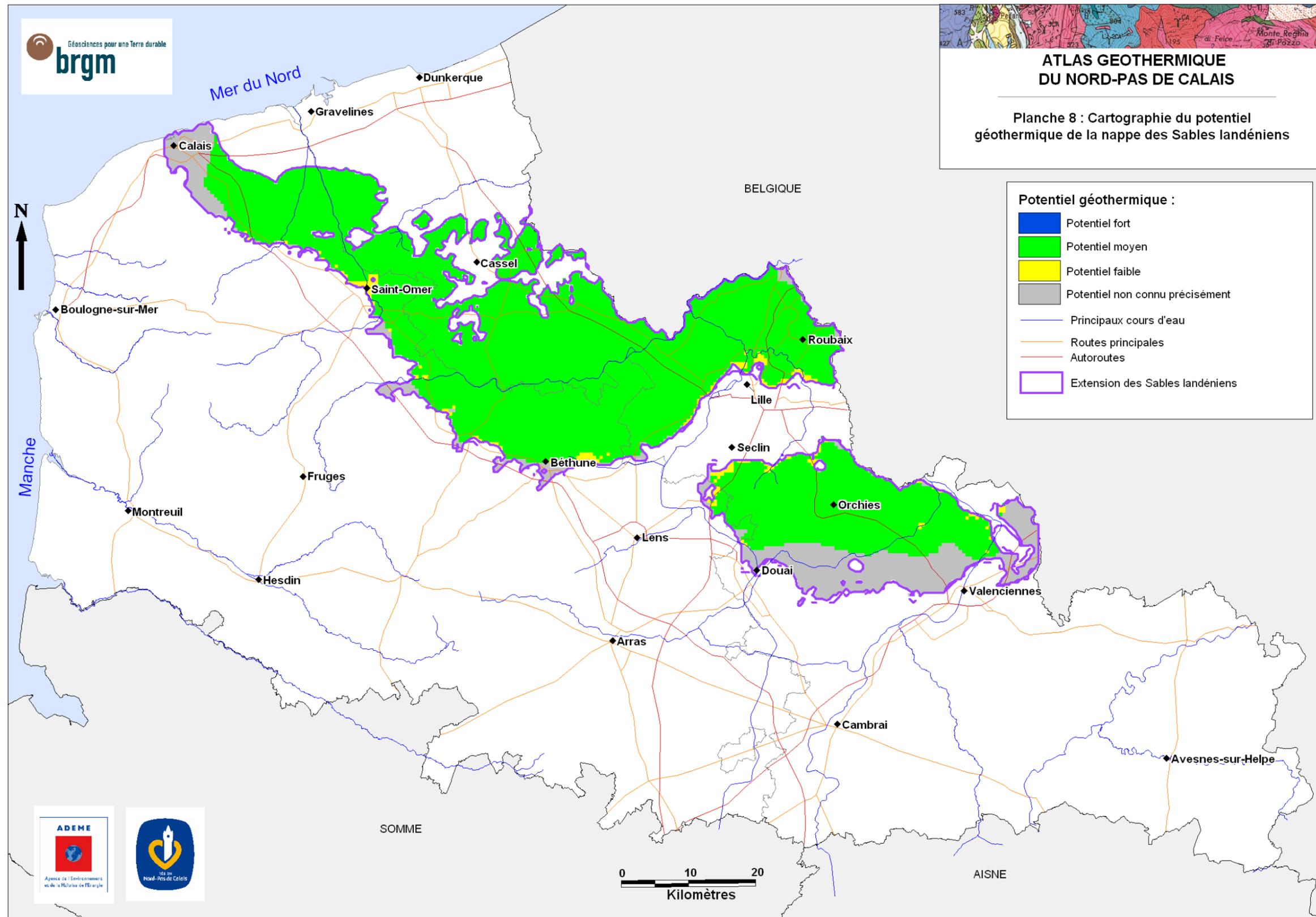


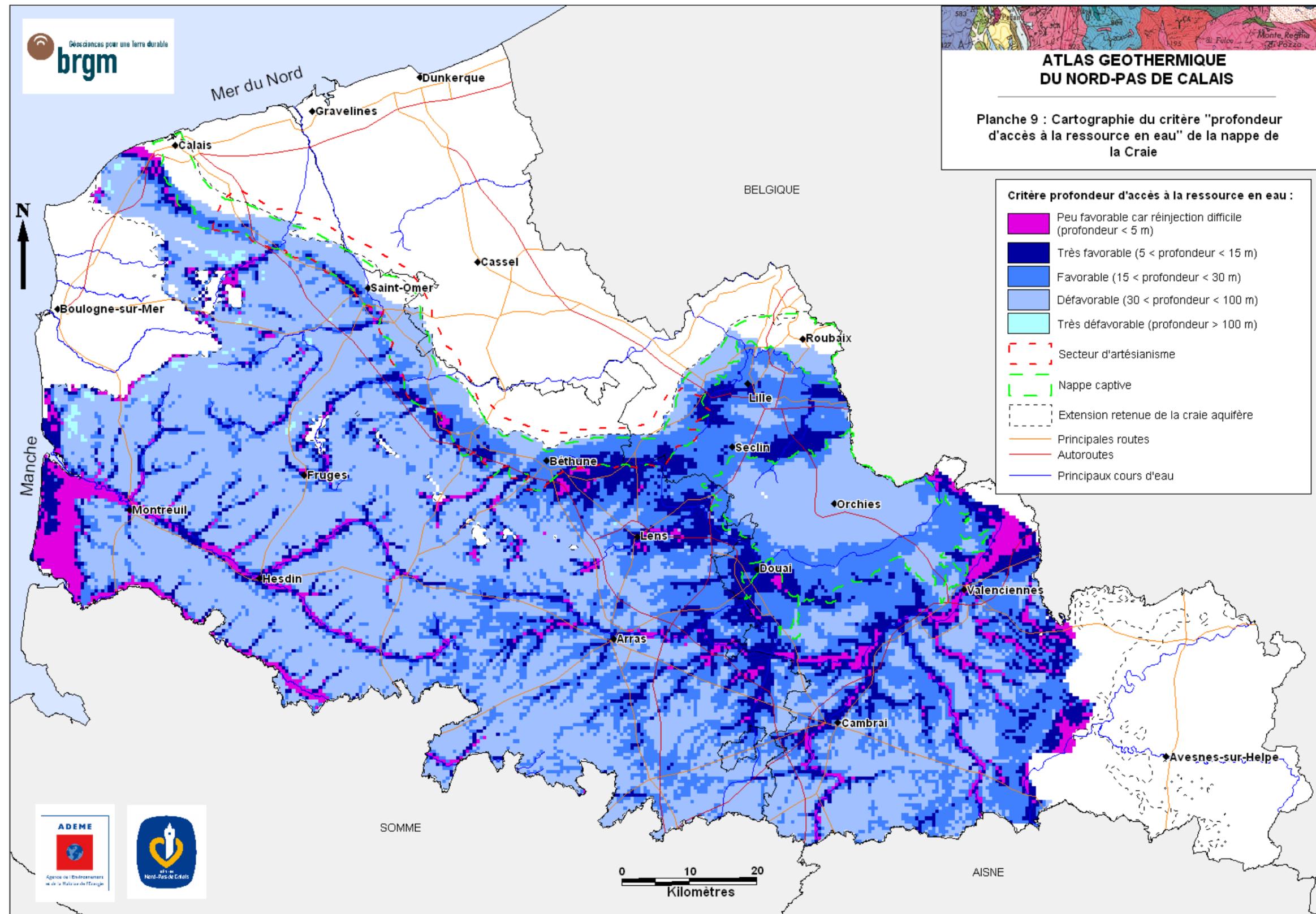


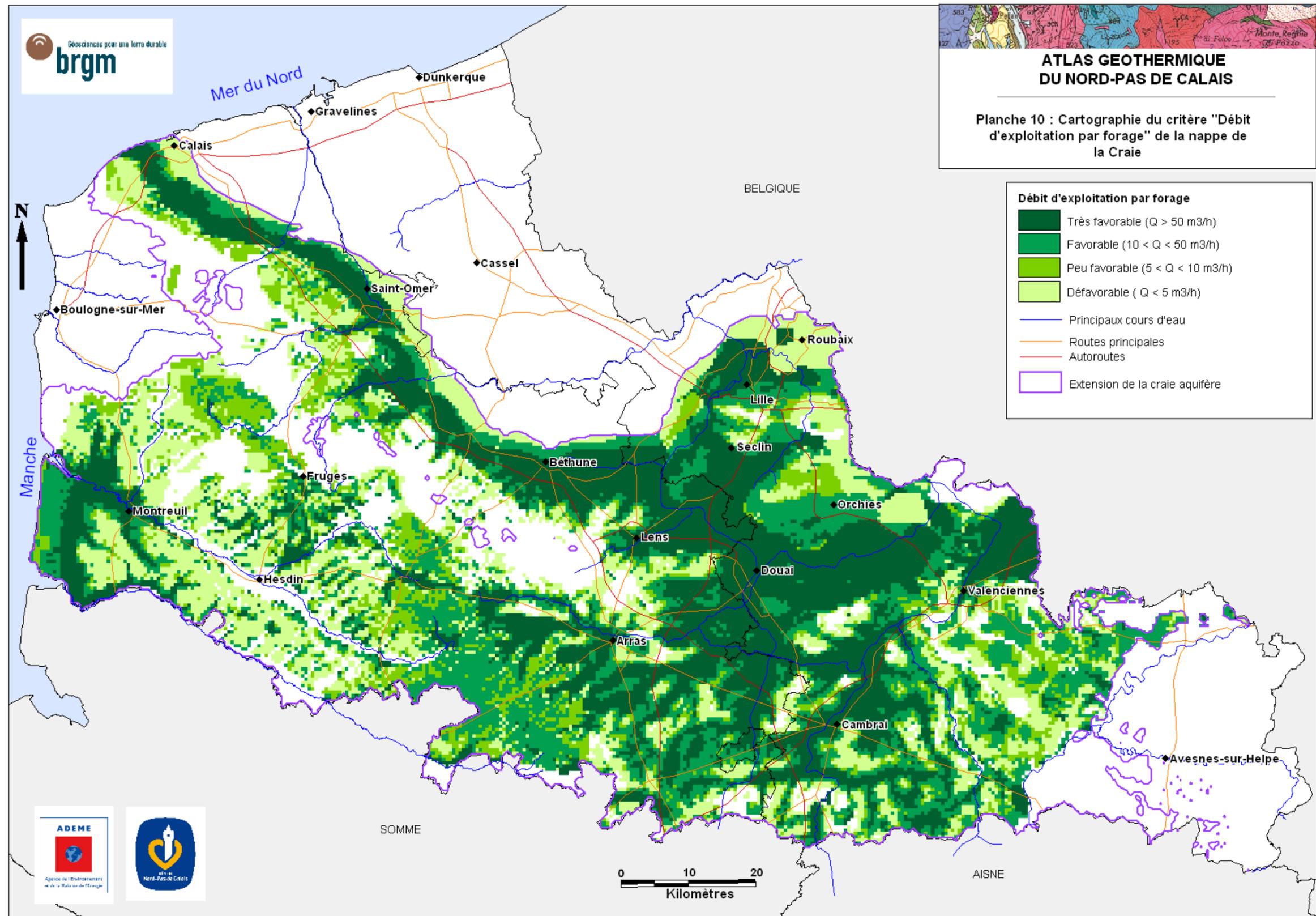


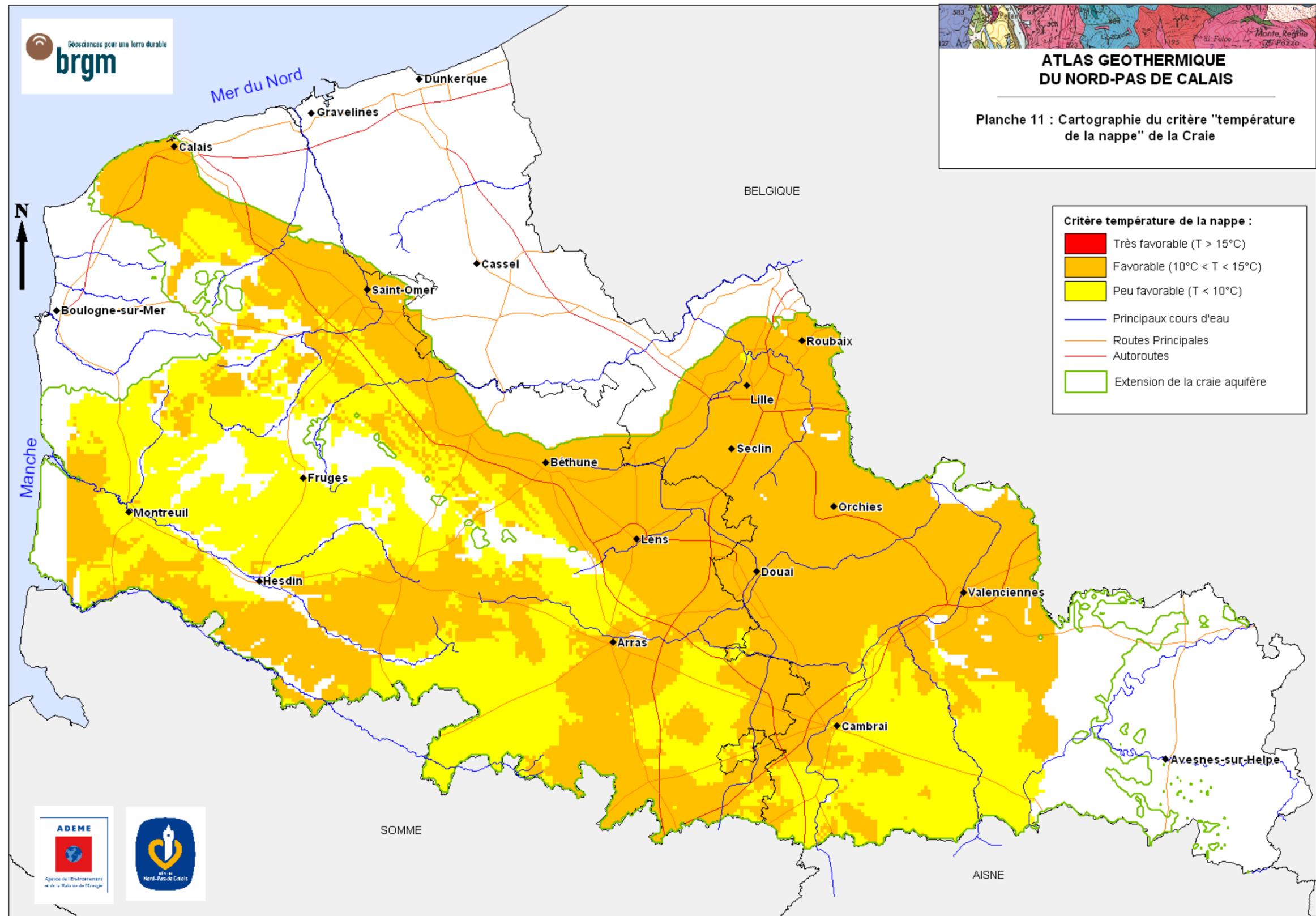


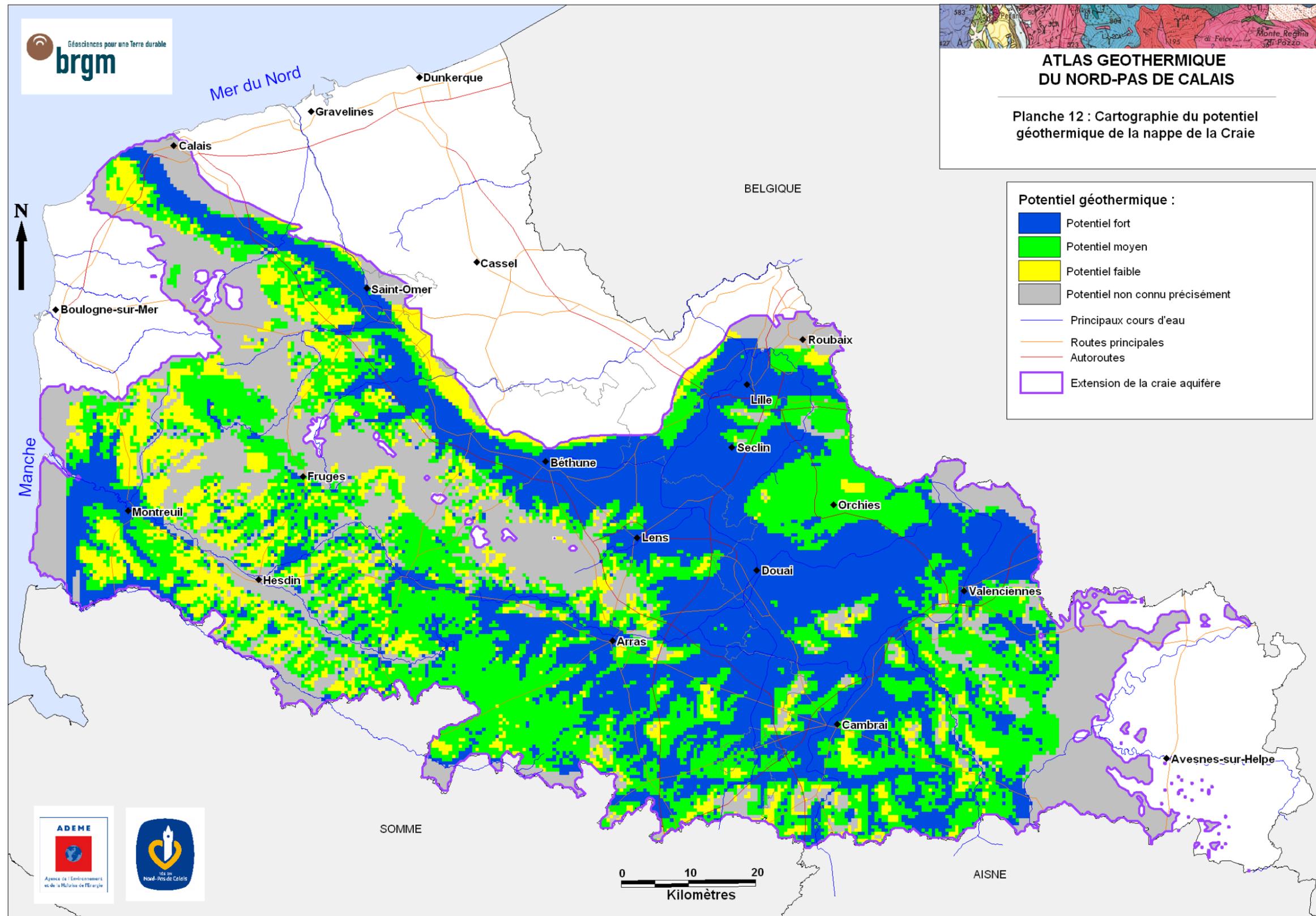


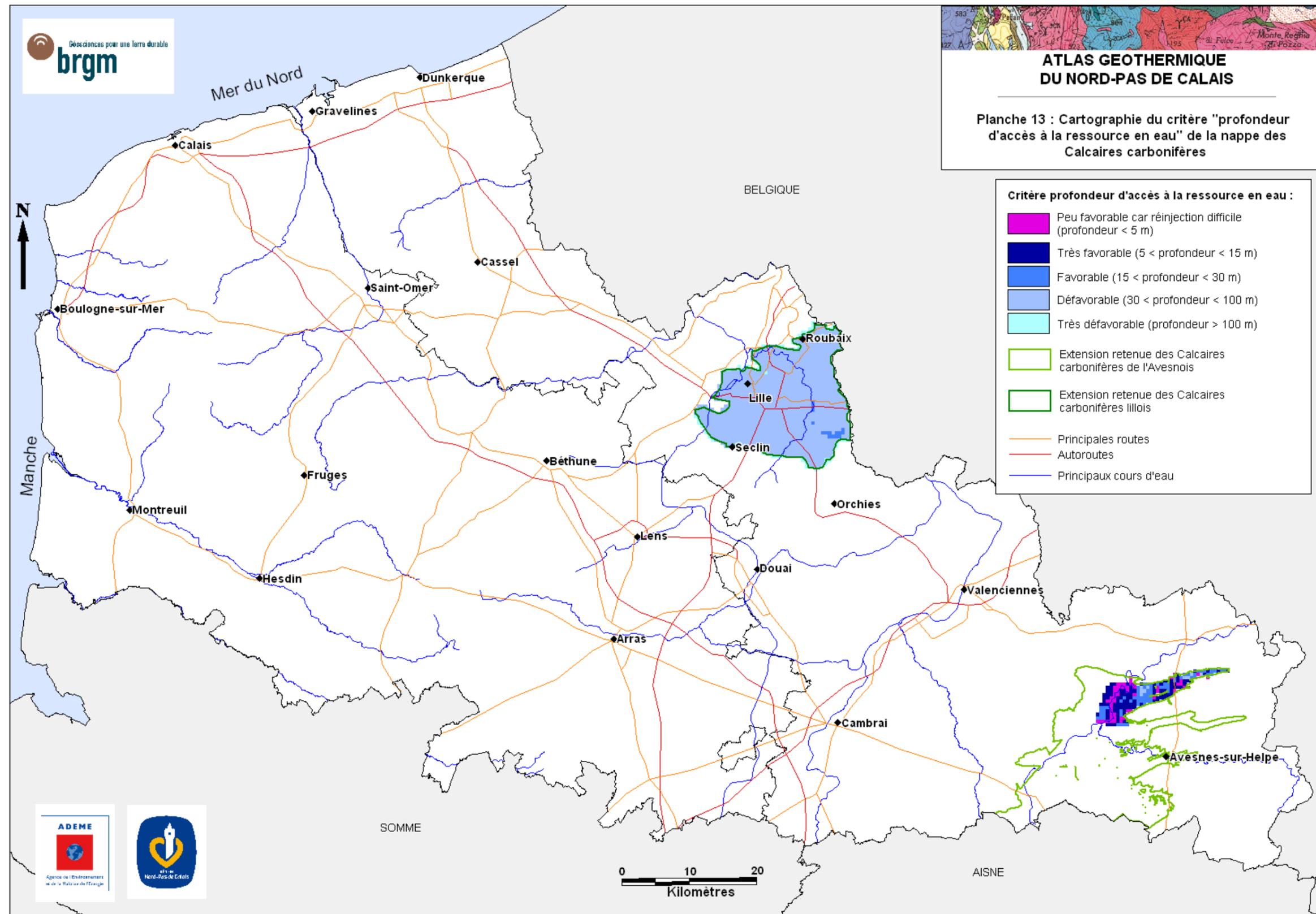


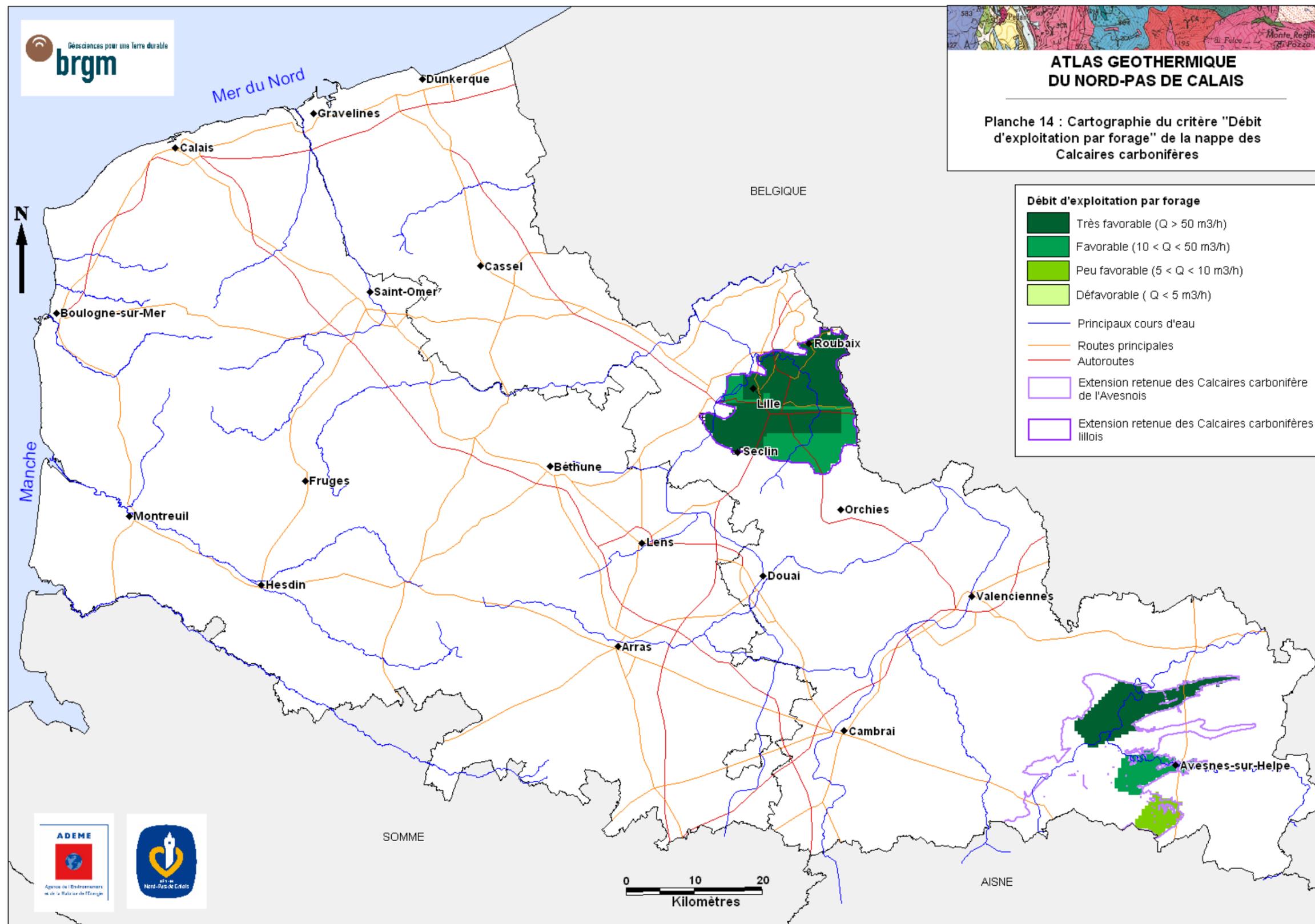


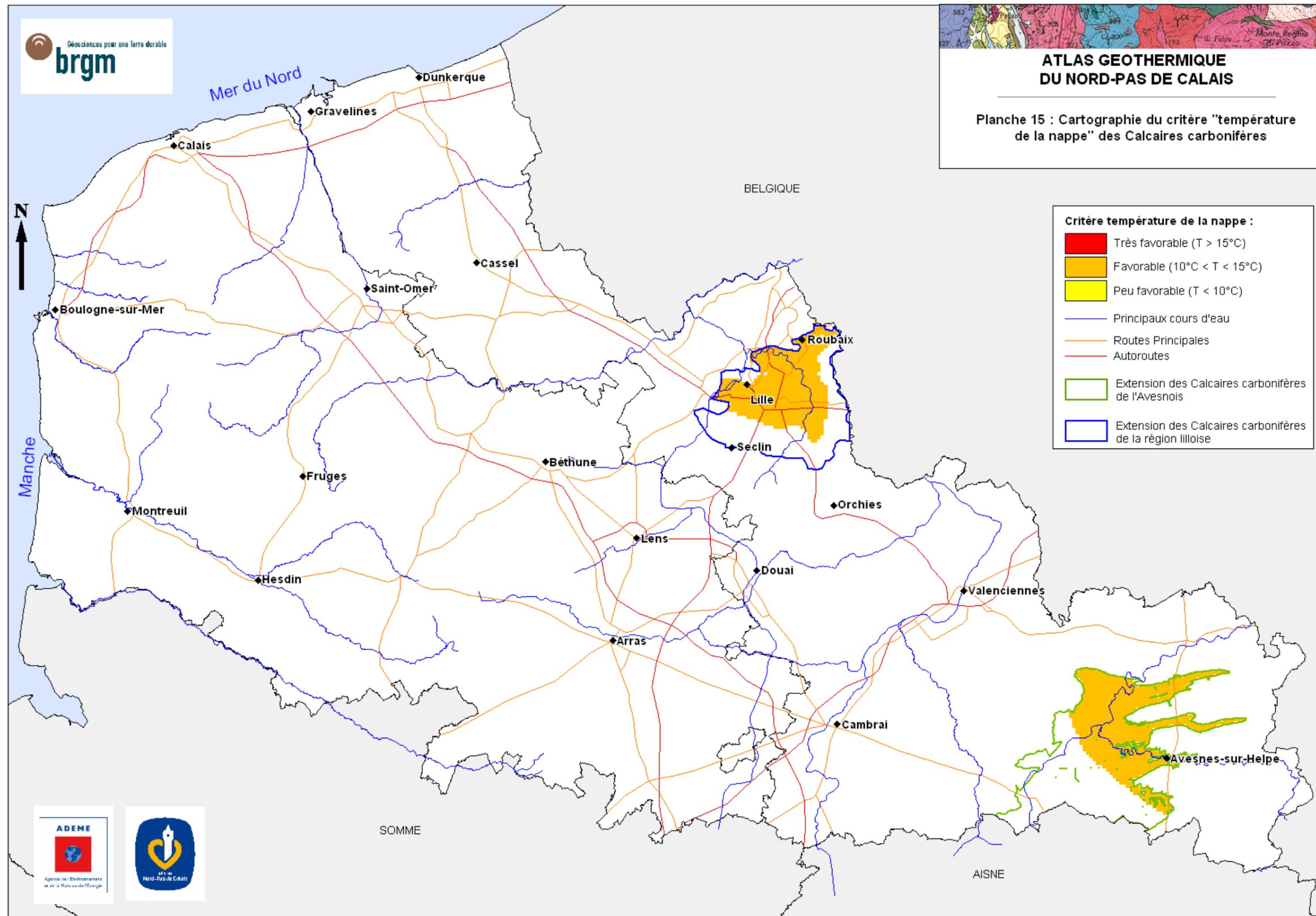


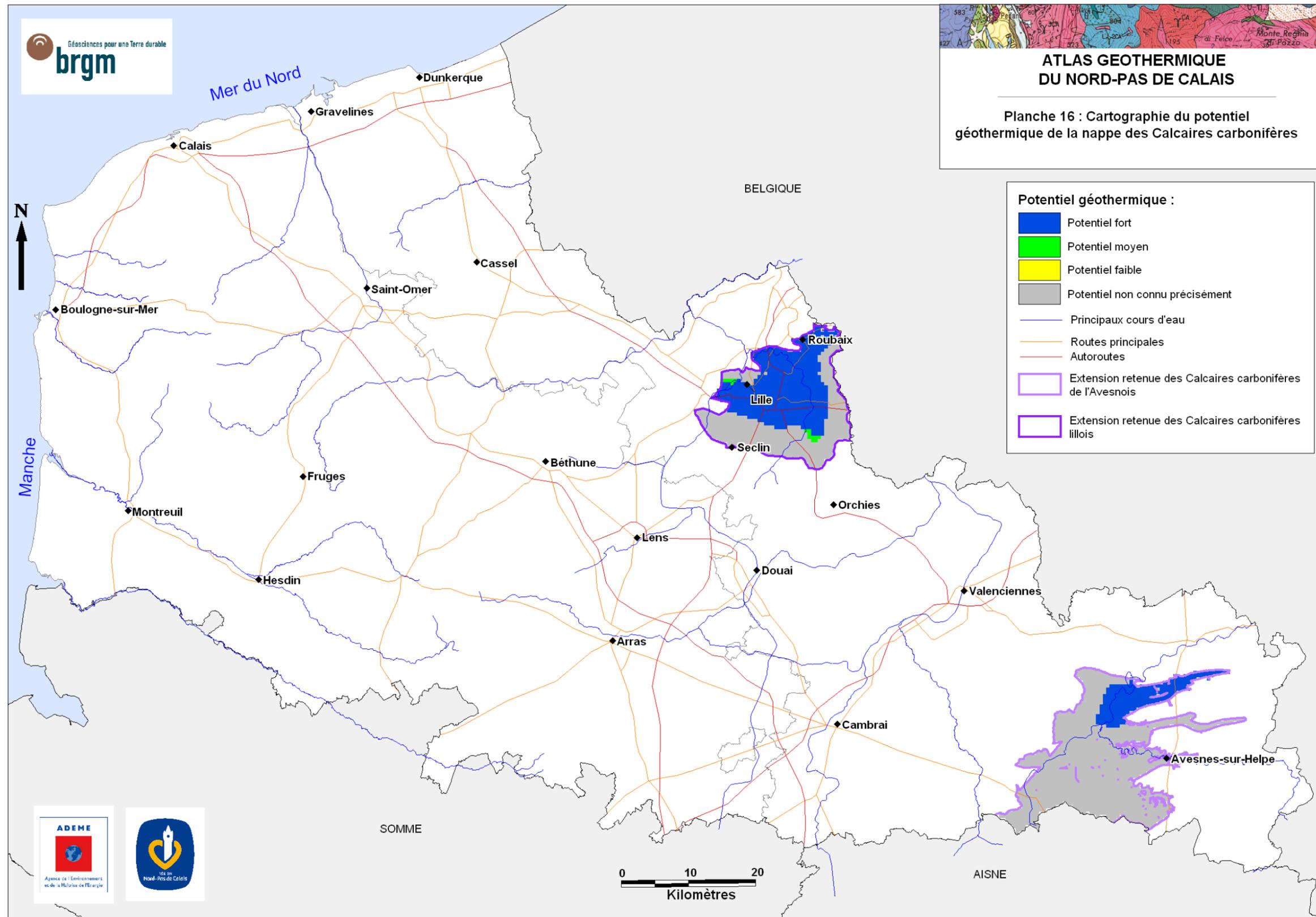






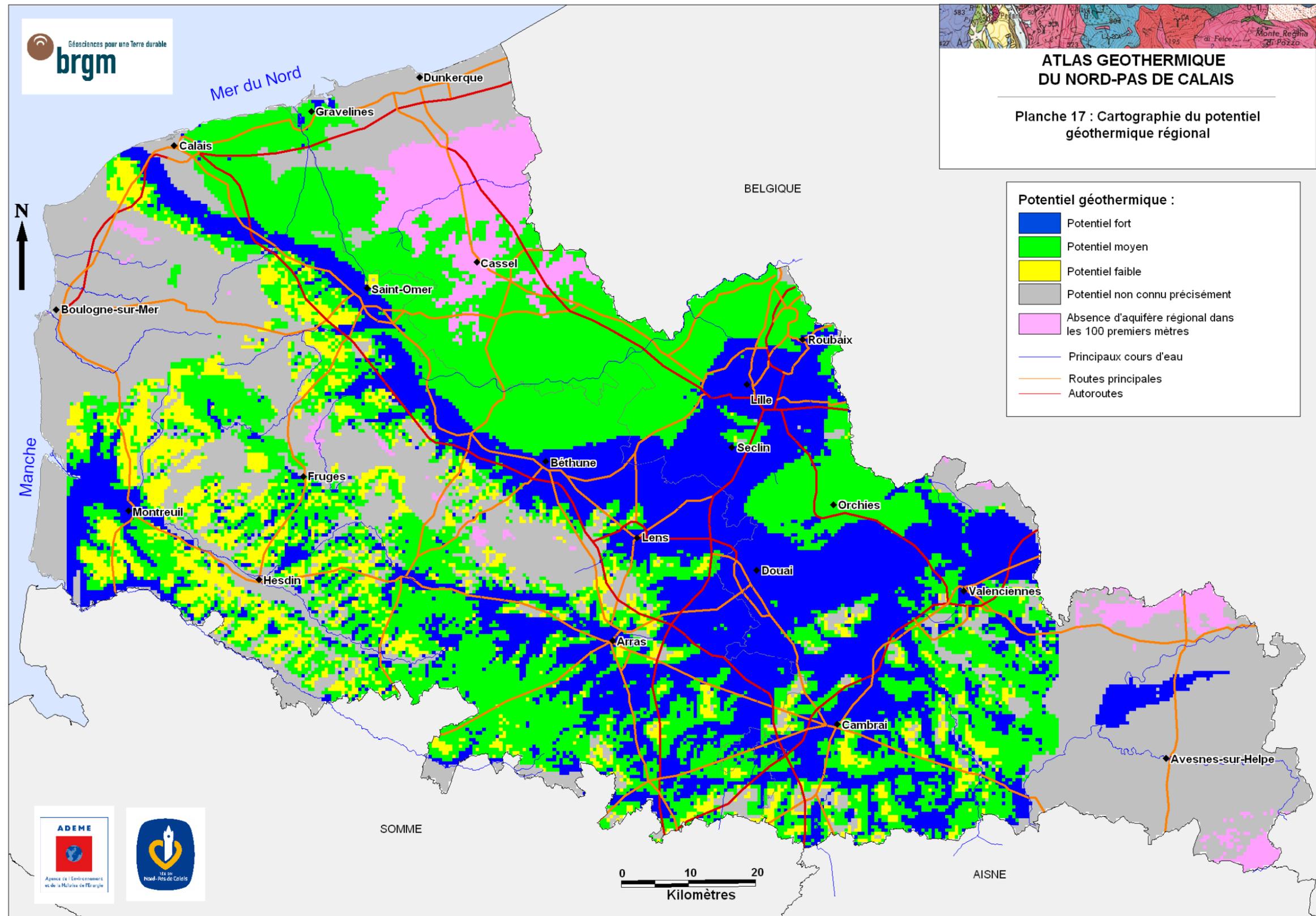






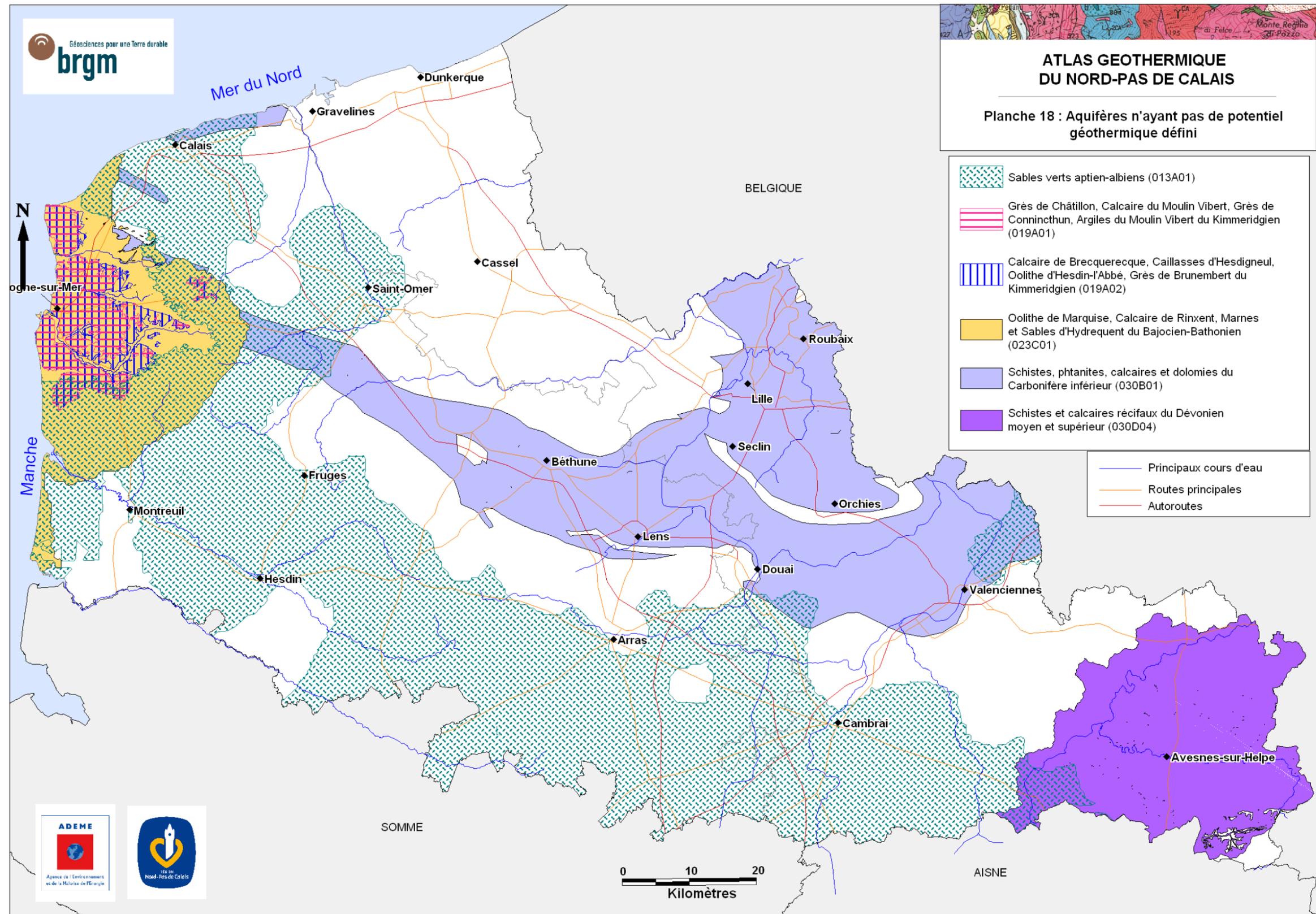
Annexe 2

Carte du potentiel géothermique régional



Annexe 3

Carte des aquifères n'ayant pas un potentiel géothermique défini





Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service Géologique Régional Nord-Pas de Calais
Synergie Park
6 ter, rue Pierre et Marie Curie
59260 – Lezennes – France
Tél. : 03 20 19 15 40