



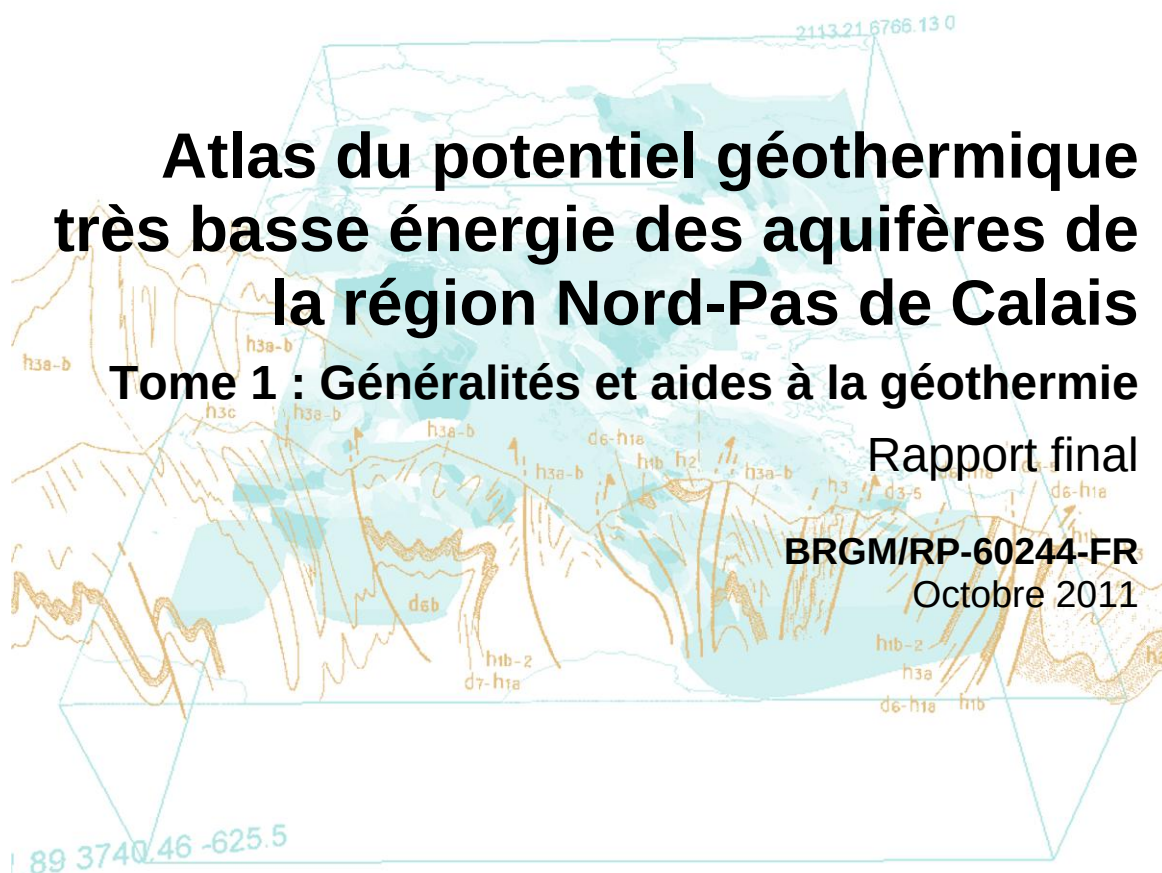
Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais

Tome 1 : Généralités et aides à la géothermie

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 1 : Généralités et aides à la géothermie

Rapport final

BRGM/RP-60244-FR
Octobre 2011

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

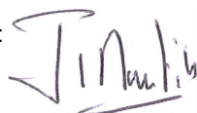
J. PICOT et K. PIRA
Avec la collaboration de
B. BOURGINE et P. HERNIOT

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, Aquapac, Qualiforage.

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	9
2. Principes généraux de la géothermie	11
2.1. DIFFÉRENTES RESSOURCES GÉOTHERMALES	11
2.2. DIFFÉRENTS TYPES DE GÉOTHERMIE	12
2.2.1. Géothermie moyenne et haute énergie	12
2.2.2. Géothermie basse énergie	12
2.2.3. Géothermie très basse énergie	12
2.3. DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE	13
2.3.1. Échange direct de chaleur	13
2.3.2. Pompe à chaleur (PAC) - Principes de fonctionnement	16
2.3.3. Pompe à chaleur sur aquifère	20
2.3.4. Pompe à chaleur sur le sous-sol	22
2.3.5. Installations mixtes	24
2.3.6. Installations terminales de chauffage	27
2.3.7. La géothermie très basse énergie (TBE) - Plusieurs technologies adaptées aux besoins	28
2.3.8. Surveillance et maintenance des installations	33
3. La production géothermique dans le monde, en Europe et en France	37
3.1. PRODUCTION MONDIALE DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE	37
3.2. PRODUCTION DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE EUROPÉENNE	38
3.3. PRODUCTION DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE FRANÇAISE	39
3.4. ENJEUX DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE, DANS LES DOMAINES DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	40
3.5. PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE	43
3.6. APERÇU DES OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES MONDIAUX, EUROPÉENS, NATIONAUX ET LOCAUX POUR LIMITER L'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE	46
3.6.1. Politique internationale	46
3.6.2. Politique nationale	48

4. Principaux mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives pour le développement de la géothermie	51
4.1. MESURES DE GARANTIES CONTRE LE RISQUE GÉOLOGIQUE	51
4.1.1. Garantie AQUAPAC®, pour les opérations de Pompes à Chaleur sur aquifères superficiels (cf. Annexe 1)	51
4.1.2. SAF-environnement, pour les opérations de géothermie sur aquifères profonds	52
4.2. DÉMARCHE QUALITÉ POUR LES SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES : QUALIFORAGE	53
4.3. LES AIDES FINANCIÈRES	55
4.3.1. Pour les particuliers	55
4.3.2. Pour les opérations collectif et tertiaires (dont réseaux de chaleur, hors particulier)	56
5. Contexte réglementaire de la géothermie	63
5.1. LE CODE MINIER	63
5.1.1. Dispositions spécifiques à chaque type d'exploitation géothermique	64
5.1.2. Dispositions applicables à toutes les opérations de travaux de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques	65
5.2. LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT	67
5.2.1. Réglementation relative à l'eau et aux milieux aquatiques	67
5.2.2. Réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'environnement	70
5.2.3. Articulation avec le code de la santé publique	72
5.2.4. Bilan sur l'application du code de l'environnement aux opérations de géothermie	72
5.3. LE CODE DE LA SANTÉ PUBLIQUE	72
5.4. LE CODE GÉNÉRAL DES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES	73
6. Conclusion	75
7. Bibliographie	77
8. Annexes	79

Liste des illustrations

Figure 1 : Principe de l'échange direct de chaleur (source : BRGM - im@gé).....	13
Figure 2 : Dispositifs de pompage (source : BRGM – im@gé).....	14
Figure 3 : Doublets géothermiques avec différentes technologies de forage (source : BRGM – im@gé).....	16
Figure 4 : Evolution du COP réel d'une pompe à chaleur eau/eau en fonction de la température d'évaporation (Te) et de la température de condensation à la source chaude (Tc)	18
Figure 5 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques sur aquifère – ADEME, ARENE, BRGM mars 2008).	19
Figure 6 : Schémas de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe	20
Figure 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique	23
Figure 8 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques	23
Figure 9 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible avec un puits de production.	25
Figure 10 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible avec deux puits de production.....	26
Figure 11 : Schéma de principe du fonctionnement d'une thermofrigopompe.	27
Figure 12 : Solution de capteur horizontal et de capteur vertical.....	29
Figure 13 : Représentations de pieux géothermiques	30
Figure 14 : Opération de stockage souterrain.....	31
Figure 15 : Schéma d'une installation de réseau de chaleur urbain géothermique (tel qu'existant en région parisienne)	32
Figure 16 : Caractéristiques des principaux types d'échangeurs géothermiques très basse énergie.....	35
Figure 17 : Les usages de la chaleur géothermique dans le monde (Source : Word Geothermal Congress, 2010).....	37
Figure 18 : Utilisation directe de la chaleur géothermique (hors pompes à chaleur) dans les pays de l'Union Européenne) en 2008 (Source : Etat des énergies renouvelables en Europe, édition 2009, 9ème bilan EurObserv'ER).....	38
Figure 19 : Principaux marchés de pompes à chaleur géothermique dans les pays de l'Union européenne (en nombres d'unités installés en 2007 et 2008 (estimations)	39
Figure 20 : Marché français des Pompes à Chaleur (Données AFPAC, 2010)	40
Figure 21 : Evolution de la consommation finale énergétique nationale par secteur (source : « Observatoire de l'énergie : l'énergie en France - repères Edition 2007 »).....	41
Figure 22 : Consommation en énergie finale par usage des résidences principales en 2002 (d'après « Principaux chiffres ADEME secteur bâtiment »), IC = Immeubles collectifs, MI = Maison Individuelles.....	41

Figure 23 : Répartition de la chaleur renouvelable et supplément à acquérir d'ici 2012 et 2020	44
Figure 24 : Objectifs de production de chaleur renouvelable d'origine géothermique en ktep (Source : COMOP 10)	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Objectifs de développement de la production de chaleur d'origine géothermique en France	45
Tableau 2 : Faits marquants de la politique mondiale et européenne en matière de réduction des gaz à effet de serre	47
Tableau 3 : Sinistres garantis par le fonds de garantie Long Terme	53

Liste des annexes

Annexe 1 Procédure AQUAPAC	81
Annexe 2 Aides pour les opérations de rénovation.....	87
Annexe 3 Fiches types d'opération standardisées concernant la géothermie (Annexe 1 de l'arrêté du 28 juin 2010).....	93
Annexe 4 Régimes juridiques applicables à la géothermie sur sonde : code minier	103
Annexe 5 Régimes juridiques applicables à la géothermie sur nappe : code minier et code de l'environnement	107
Annexe 6 Nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement (Titres 1 et 5)	111
Annexe 7 Fiche de déclaration en mairie des prélèvements, puits et forages réalisés à des fins domestiques	117

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. Principes généraux de la géothermie

La géothermie se définit comme l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre et ayant pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et surtout la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes¹. L'énergie géothermique est présente partout à la surface du globe ; elle se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de 3,3°C par 100 m à l'échelle de la Terre. Ce gradient géothermique provient du flux géothermique égal en moyenne à 60 MW/m². Des variations locales de gradient géothermique sont néanmoins observées ; elles sont reliées à l'âge des formations géologiques et à leur composition.

L'énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation, ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies. La possibilité de mettre en œuvre chacune de ces technologies dépend du contexte géologique et hydrogéologique local.

2.1. DIFFÉRENTES RESSOURCES GÉOTHERMALES

Dans le cas de l'utilisation de géothermie pour la production de chaleur, un système géothermal est constitué d'une source de chaleur, associée à un dispositif de prélèvement de chaleur permettant son transfert pour utilisation. La source de chaleur est caractérisée, d'une part par son niveau de température (en °C) et par la nature et les caractéristiques du milieu concerné.

La température dépend de la profondeur et du gradient géothermique local. En ce qui concerne le milieu souterrain où l'on envisage de prélever de la chaleur, il peut être constitué de roches perméables ou imperméables, compactes, poreuses ou fissurées.

Lorsque les formations géologiques sont suffisamment poreuses et/ou fissurées et gorgées d'eau, elles sont dites « aquifères » ou « nappes d'eau souterraine » ou désignées comme « réservoirs ». Les caractéristiques physiques de ces aquifères permettent le prélèvement de l'eau en quantité suffisante par captage.

Les formations aquifères se rencontrent dans des couches géologiques sédimentaires (craie, calcaire, sable, ...), cristallines ou volcaniques.

Sont distingués ensuite les aquifères superficiels des aquifères profonds. Les aquifères profonds se trouvent, dans les bassins sédimentaires, au-delà d'une centaine de mètres et peuvent atteindre pour certains des profondeurs dépassant 2 000 m.

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

Les principaux bassins sédimentaires français sont le Bassin parisien et le Bassin aquitain mais on trouve également d'autres bassins ou fossés d'effondrement de taille plus modeste : Alsace, Couloir rhodanien, Bresse, Limagne, Hainaut, etc.

2.2. DIFFÉRENTS TYPES DE GÉOTHERMIE

On distingue généralement : la géothermie très basse énergie, la géothermie basse énergie, la géothermie moyenne énergie, et la géothermie haute énergie.

2.2.1. Géothermie moyenne et haute énergie

Ces types d'énergie géothermique correspondent à l'utilisation des ressources thermiques (eau et vapeur) dont la température est comprise entre 90 et 150°C (moyenne énergie) ou supérieure à 150°C (haute énergie). Ces ressources sont utilisées directement ou indirectement pour la production d'électricité et sont localisées à proximité des grands arcs volcaniques ou des zones à fort gradient géothermique.

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

2.2.2. Géothermie basse énergie

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

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

2.2.3. Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est inférieure à 30°C. À cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée par un simple échangeur de chaleur. Elle nécessite la mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) (cf. paragraphe 2.3.2) qui prélève l'énergie de la source de chaleur à basse température (roche, nappe aquifère) pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage.

La ressource géothermique de très basse énergie correspond à l'énergie naturellement présente dans le proche sous-sol, ou dans les aquifères peu profonds. **C'est cette ressource qui sera traitée plus particulièrement dans cet atlas (Tome 2).**

2.3. DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE

Selon la température de la ressource et l'existence ou pas d'un aquifère au droit du site visé, plusieurs technologies d'exploitation sont envisageables : les technologies par échange de chaleur direct ou assistées par PAC, par prélèvement sur nappes ou par échange sur sous-sol.

Pour les dispositifs équipés de PAC, selon les besoins, il est possible de fournir du chaud, du froid ou les deux alternativement ou simultanément.

Enfin, quelle que soit la technologie utilisée pour produire de la chaleur ou du rafraîchissement, les dispositifs terminaux doivent être compatibles avec le niveau de température de la chaleur fournie.

2.3.1. Échange direct de chaleur

Les installations fonctionnant par échange direct de chaleur utilisent les eaux géothermales et s'intéressent donc aux nappes d'eau souterraine dont la température est naturellement élevée (géothermie basse énergie).

L'eau géothermale est prélevée dans l'aquifère au niveau d'un forage de prélèvement ou **puits de production**, puis elle circule jusqu'à un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur depuis l'eau prélevée vers le « circuit géothermique ». L'eau géothermale refroidie est ensuite renvoyée dans l'aquifère d'origine par le biais d'un second forage dit **puits d'injection** (Figure 1).

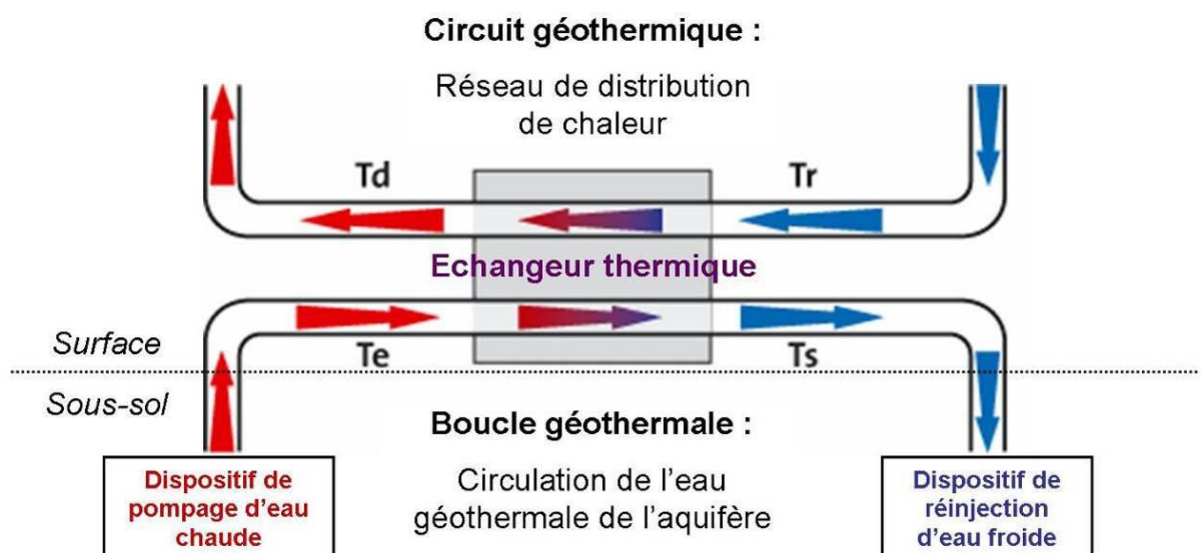


Figure 1 : Principe de l'échange direct de chaleur (source : BRGM - im@gé)

Le chemin suivi par l'eau géothermale depuis son prélèvement jusqu'à sa réinjection constitue la « **boucle géothermale** ». Ce fonctionnement comprenant un puits de prélèvement et un puits d'injection est appelé « doublet géothermique ».

Le « circuit géothermique » correspond au réseau de distribution de la chaleur ; il permet l'approvisionnement en chaleur des utilisateurs.

Les installations de ce type nécessitent donc la création de forages. Ceux-ci doivent être réalisés selon les règles de l'art (norme AFNOR NF X10-999 et fascicule FD X10-980) afin d'assurer une durée de vie correcte à l'installation et d'éviter tout risque de dégradation de la ressource en eau souterraine.

a) Dispositif de pompage

Pour fonctionner, ce type d'installation géothermique doit bénéficier d'un débit d'eau régulier et suffisant. Dans certains cas, si la pression de l'eau contenue dans le réservoir est supérieure à l'altitude du sol, le débit est *artésien* et peut se suffire à lui-même jusqu'à un certain débit. Dans le cas contraire, pour exploiter un débit supérieur au débit artésien, il est alors nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage (Figure 2).

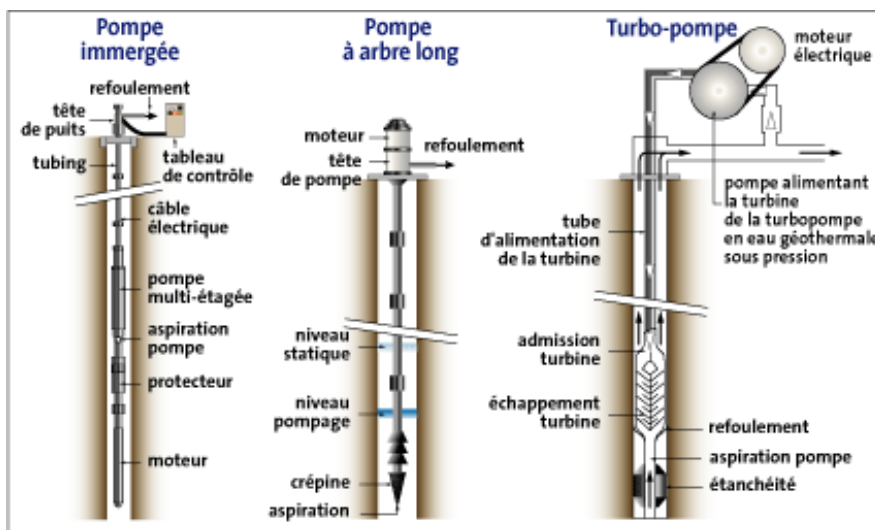


Figure 2 : Dispositifs de pompage (source : BRGM – im@gé)

Les pompes comportent toutes une partie hydraulique immergée descendue en profondeur selon le rabattement appliqué à la nappe et un moteur. On distingue généralement trois types de pompes selon l'emplacement du moteur :

- Pompes immergées (cas le plus fréquent) : le moteur est immergé sous le dispositif hydraulique ;
- Pompes à arbre long : le moteur est placé en surface ;

- Turbopompe : ce système fonctionne grâce à une circulation d'eau géothermale surpressée en surface, il présente un rendement inférieur aux deux autres types de pompes mais une durée de vie supérieure aux pompes immergées.

La *colonne d'exhaure* amène ensuite l'eau de la pompe à la surface du sol où elle est reprise par d'autres canalisations jusqu'à l'échangeur de chaleur. Les pompes immergées sont largement utilisées dans le Bassin parisien pour pomper la nappe du Dogger. Elles permettent d'obtenir des débits importants supérieurs à 300 m³/h.

b) Les échangeurs de chaleur

Dans le cas d'une installation géothermique de basse énergie, un échangeur de chaleur est placé entre la « boucle géothermale » et le « circuit géothermique » de distribution de chaleur. L'eau chaude issue de l'aquifère, chargée de sels minéraux, circule alors uniquement dans la « boucle géothermale ». Les eaux géothermales étant généralement corrosives, ce fonctionnement permet d'éviter la corrosion du réseau de chaleur. Les échangeurs peuvent être de types différents : échangeurs multitubulaires, échangeurs spirales, échangeurs à plaques. Les échangeurs à plaques, plus performants et plus commodes pour la maintenance, sont les plus utilisés.

La performance d'un échangeur placé dans une installation de géothermie est caractérisée par l'écart entre les températures à l'entrée de la boucle géothermale (**Te**) et à la sortie du circuit géothermique (**Td**) (cf. Figure 1). Cet écart appelé « pincement », doit être aussi faible que possible (de l'ordre de 2°C).

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques de faible épaisseur, assemblées verticalement les unes à la suite des autres. Les espaces entre les plaques sont alternativement traversés par le circuit primaire (eau géothermale) et par le circuit secondaire (circuit géothermique). Ces échangeurs permettent d'avoir une surface d'échange importante pour un espace réduit. Ils peuvent être agrandis en ajoutant le nombre de plaques nécessaires. Les matériaux utilisés dans les échangeurs doivent pouvoir résister à la corrosion inhérente à la majorité des fluides géothermaux. Ils peuvent être constitués en acier revêtu, en acier inoxydable ou en titane. Ce dernier matériau s'est révélé particulièrement adapté aux exigences d'exploitation du fluide du Dogger du Bassin parisien chargé notamment en sulfures.

c) Réinjection

Pour des raisons de protection quantitative de la ressource en eau souterraine, il est recommandé de pratiquer la réinjection de l'eau géothermale refroidie (à la température **Ts**) dans l'aquifère d'origine. Cette technique permet de maintenir les pressions au sein du réservoir aquifère. Aussi, les dispositifs de pompage sans réinjection ne seront pas évoqués dans le présent rapport.

Sur le plan thermique, ce dispositif entraîne la création d'une zone froide d'extension progressivement croissante autour du forage d'injection. Le doublet doit donc être dimensionné de façon à ce que le front froid n'atteigne pas le puits de production avant

amortissement de celui-ci (20 à 30 ans) et ne perturbe pas les exploitations voisines. Il s'agit de gérer durablement la ressource et son exploitation.

Le dimensionnement de ces dispositifs est basé sur une bonne connaissance du contexte hydrogéologique. Le risque de recyclage thermique, la distance à respecter entre les puits (de production, d'injection et d'autres usages) et le temps de percée thermique du doublet (temps nécessaire à la contamination thermique du puits de production par l'eau injectée dans le puits d'injection) doivent être évalués lors de l'étude de dimensionnement des installations.

Ces considérations spatiales, associées à l'obligation de respect des périmètres de protection autour des puits de prélèvement et de réinjection, peuvent avoir des impacts fonciers importants, qui ne sont pas toujours acceptables, surtout en contexte urbain. Dans de telles situations, le recours à des technologies de forage particulières, comme les forages inclinés ou déviés, peut pallier au manque d'espace disponible en surface. En effet, ceux-ci permettent un écartement important entre les puits de production et d'injection, tout en limitant l'impact foncier en surface (Figure 3).

Les forages déviés ne sont envisageables que pour les aquifères profonds comme le Dogger. Pour les aquifères supérieurs, la déviation ne conduirait pas à un écartement suffisant des points de prélèvement et de réinjection.

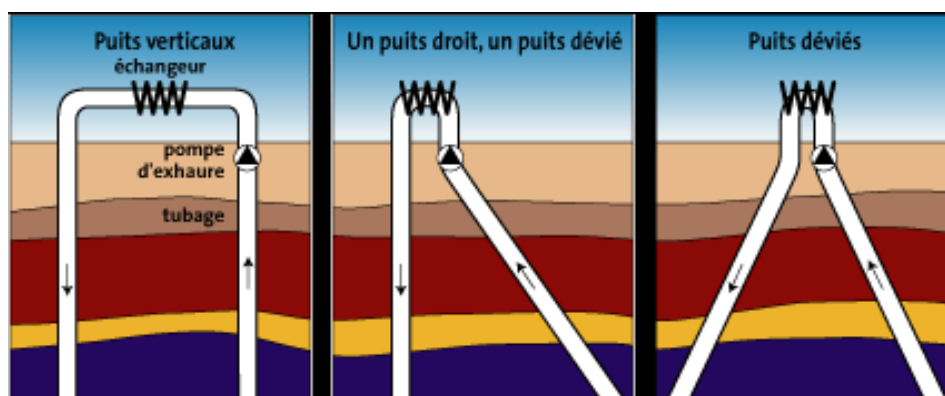


Figure 3 : Doublets géothermiques avec différentes technologies de forage (source : BRGM – im@gé)

Dans le cas où l'aquifère pourrait présenter des eaux de qualité suffisante pour être une ressource en eau potable, il est possible d'envisager un système de pompage géothermique en doublet fonctionnant toute l'année et couplé à un système d'Alimentation en Eau Potable (AEP) utilisé seulement en cas de nécessité (réserve de secours). Des mesures de précaution seront alors nécessaires.

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

Si la température naturelle de la ressource en eau souterraine n'est pas suffisamment élevée pour mettre en pratique l'échange direct de chaleur, le recours aux pompes à chaleur permet malgré tout de produire de la chaleur et/ou de la fraîcheur.

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à prélever des calories à basse température dans un milieu (source froide) et de les transférer à plus haute température dans un autre (source chaude). Ce transfert se fait via un fluide caloporteur ou fluide frigorigène qui présente un point d'ébullition à basse température.

Le fluide circule en circuit fermé, et le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude ne peut se réaliser que s'il y a apport extérieur d'énergie² (compresseur). Dans un fonctionnement classique en mode chauffage, la source froide correspond au milieu extérieur (nappe aquifère, sous-sol) et la source chaude correspond au bâtiment cible à chauffer.

Une pompe à chaleur est caractérisée par son COefficient de Performance COP qui est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie dépensée sous forme mécanique. L'énergie mécanique est généralement apportée par un compresseur entraîné par un moteur électrique. Les autres constituants de la PAC sont un échangeur côté source froide dénommé « évaporateur » et un échangeur côté source chaude nommé « condenseur ». Dans la pratique, du fait de la difficulté d'évoluer selon le cycle théorique de Carnot et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...), le COP réel est affecté d'un coefficient de 0.4 à 0.7. Le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la source et le milieu à chauffer sera faible (Figure 4).

La performance du système est fonction à la fois de la température où l'on prélève les calories (source froide) et du milieu où on transfère la chaleur (source chaude).

² ADEME, ARENE, BRGM, EDF, 2008 – Guide technique – Pompe à chaleur géothermique sur aquifère – Conception et mise en œuvre.

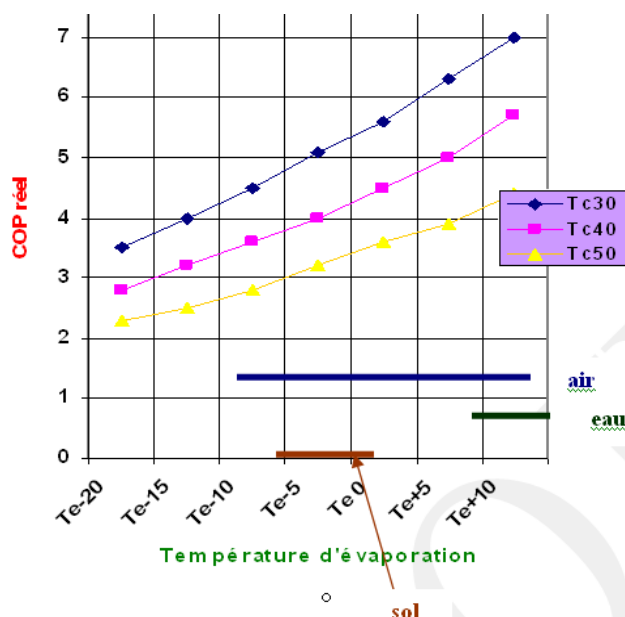


Figure 4 : Evolution du COP réel d'une pompe à chaleur eau/eau en fonction de la température d'évaporation (T_e) et de la température de condensation à la source chaude (T_c)

Il existe aujourd'hui deux grandes familles de pompes à chaleur selon la nature de l'énergie apportée au système :

- les pompes à chaleur à **compression** (énergie mécanique)
- les pompes à chaleur à **absorption** (énergie thermique) largement moins diffusées.

a) Pompe à chaleur à compression

Dans le cas d'une PAC à compression, l'apport d'énergie se fait sous forme de travail mécanique (Figure 5). La chaleur est prélevée à la source froide (aquifère, sous-sol) par le fluide frigorigène au niveau de l'« évaporateur ». Le fluide réchauffé passe à l'état de vapeur à haute température. La vapeur est dirigée vers le « compresseur » qui la comprime et augmente sa pression. La vapeur haute pression et haute température est alors dirigée vers le « condenseur ». En se condensant, la vapeur transmet sa chaleur à la source chaude (milieu à chauffer), ce qui a pour effet de diminuer sa température et le fluide passe à l'état liquide. Le liquide à haute pression et basse température redescend à basse pression via un « détendeur » avant d'être réintroduit dans la boucle.

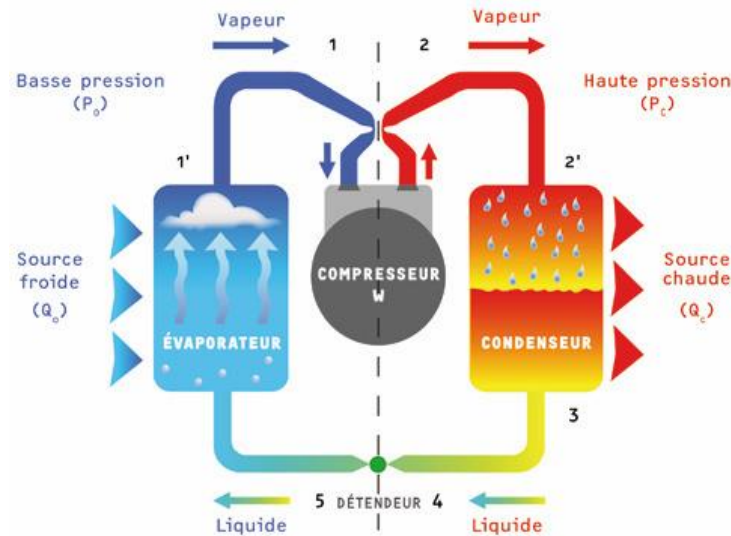


Figure 5 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques sur aquifère – ADEME, ARENE, BRGM mars 2008).

Ce système fonctionne grâce à un apport extérieur **d'énergie mécanique** : le compresseur est entraîné par un moteur électrique.

b) Pompe à chaleur à absorption

La PAC à absorption se distingue de la PAC à compression par le fait que l'énergie apportée au système est de **l'énergie thermique**. Ce système présente l'avantage de pouvoir produire de la chaleur ou du froid sans avoir de pièces en mouvement. Généralement, les PAC à absorption sont utilisées pour la production de froid. Le principe de fonctionnement général de la PAC à absorption est le même que celui de la PAC à compression sauf que la chaleur est produite par une réaction exothermique différente : absorption de vapeur dans une solution frigorigène au lieu de compression de vapeur. Le COP fourni par une PAC à absorption est nettement inférieur à celui des PAC à compression. Cette technologie est peu utilisée pour la géothermie en France.

Selon la nature de la source froide, milieu de prélèvement des calories, il est également possible de distinguer deux types de PAC :

- **Pompe à chaleur sur aquifère** : la source froide correspond à l'eau d'une nappe souterraine ;
- **Pompe à chaleur sur le sous-sol** : la source froide correspond au sous-sol lui-même indépendamment de la présence d'un aquifère. Le prélèvement de calories se fait par échange.

2.3.3. Pompe à chaleur sur aquifère

a) Principe de fonctionnement

Le principe des pompes à chaleur sur aquifère repose sur le prélèvement et le transfert des calories contenues dans les eaux souterraines, (généralement situées à des profondeurs inférieures à 100 m). Il existe donc une infrastructure souterraine destinée à assurer le flux d'eau depuis la nappe jusqu'à son point de rejet, en passant par la PAC.

Le principe de fonctionnement est le même que dans le cas des échanges directs de chaleurs, mais ici, la boucle est complétée par la PAC (Figure 6).

- Boucle géothermale**
- prélèvement d'eau souterraine ;
 - production de chaleur au niveau de la PAC ;
 - réinjection dans l'aquifère d'origine.

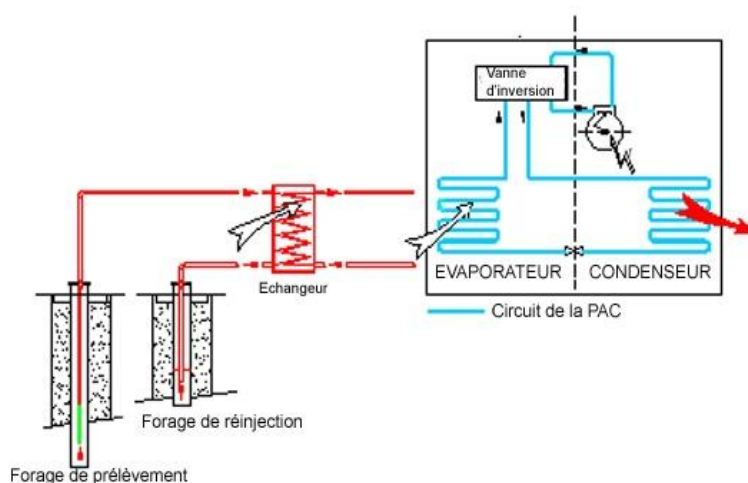
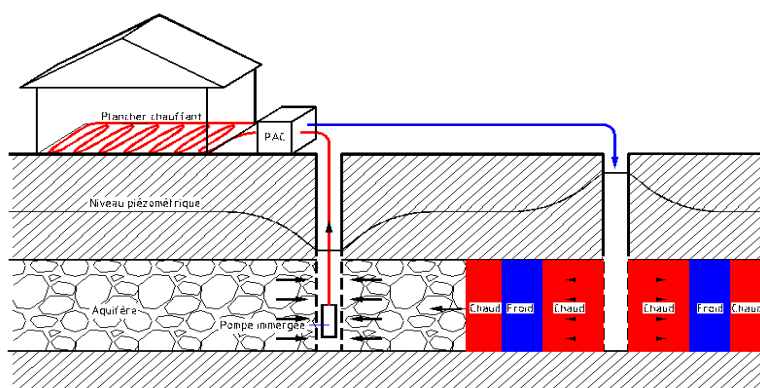


Figure 6 : Schémas de principe d'une pompe à chaleur sur eau de nappe

L'eau est prélevée à travers un premier forage et généralement réinjectée, après passage par la PAC, dans un deuxième forage (principe du doublet). Le dispositif de doublet géothermique est conservé, et les mêmes précautions de dimensionnement et de réalisation doivent être prises (éviter les interférences hydrauliques et thermiques entre puits d'injections et puits de production et entre doublet géothermiques et forages environnants, réalisation des forages conformément aux règles de l'art...).

Ces opérations permettent de couvrir des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de froid (cf. fonctionnement en page 24). En fonction des caractéristiques de l'aquifère (débit, température), il est possible de fournir des puissances de chauffage de plusieurs centaines de kW à plusieurs MW.

b) Procédure technique pour la mise en œuvre de pompes à chaleur sur aquifère

La validation d'un projet de pompe à chaleur sur nappe nécessite, en plus des études de conception nécessaires à tout projet, une approche spécifique de la connaissance de la ressource en eau souterraine qui sera sollicitée.

Les principales étapes de la mise en œuvre sont les suivantes :

- **Détermination des besoins.**

Il s'agit de déterminer les puissances chaud et froid qu'il faudra fournir au bâtiment.

- **Convertir ces deux puissances en débit d'eau à prélever sur la nappe ;**

- **Identification préalable de la ressource.**

L'analyse des données de l'atlas et l'estimation du débit nécessaire pour satisfaire tout ou partie des besoins thermiques permettra une première orientation.

Dans l'analyse de l'adéquation besoins/ressources, il n'est pas toujours pertinent de chercher à couvrir la totalité des besoins avec la solution PAC sur nappe. L'analyse du fonctionnement dynamique du bâtiment et des systèmes peut mettre en évidence des fluctuations importantes d'appel de puissance sur de faibles parts du temps de fonctionnement.

- **Étude de faisabilité hydrogéologique.**

Cette étape requiert l'intervention d'un bureau d'étude spécialisé, car il s'agit d'affiner la démarche d'identification préalable de la ressource, en intégrant en particulier le nombre et le dimensionnement préalable des ouvrages, leur positionnement prévisionnel en fonction des contraintes du site.

Une première approche réglementaire peut également être réalisée à ce niveau ; ce qui permettra de connaître les documents administratifs à prévoir.

- **Conception, suivi, réception des travaux en sous-sol.**

Dans cette étape, le bureau d'étude hydrogéologique intervient en tant qu'assistant à la maîtrise d'œuvre, de la phase de conception jusqu'à la réception des travaux,

tant pour les aspects techniques et financiers des ouvrages (forages, équipements, maintenance) que pour la partie administrative et réglementaire.

Enfin, il faut noter qu'il existe une procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques ». Il s'agit de la procédure AQUAPAC (cf. fonctionnement en page 51), destinée à couvrir le risque d'aléa sur la ressource et sa pérennité.

Ces différentes étapes doivent être menées en concertation avec les autres intervenants du projet, afin d'obtenir le meilleur ajustement besoin - ressource. Une analyse économique devra comprendre une étude comparative afin de justifier la solution pompes à chaleur sur nappe, intégrant les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement (énergie, maintenance), ainsi que l'aspect environnemental.

2.3.4. Pompe à chaleur sur le sous-sol

Dans les endroits où le sous-sol ne révèle pas d'aquifères exploitables, où si l'exploitation des aquifères superficiels présente des difficultés, il est possible, pour des usages thermiques, de récupérer la chaleur emmagasinée dans le sous-sol par le biais de sondes géothermiques. Dans ce cas, l'énergie du sous-sol est directement exploitée et non la chaleur de l'eau d'un aquifère. Les PAC sur sol sont préférentiellement adaptées aux zones dépourvues de nappe d'eau souterraine exploitable. Il existe deux types de capteurs, les **sondes verticales** et les **capteurs horizontaux**.

Sondes verticales ou géothermiques

Les sondes géothermiques correspondent à des capteurs géothermiques verticaux qui descendent à une profondeur généralement inférieure à 100 m, mais qui pourrait être supérieure. Elles sont également appelées « géosondes » ou « sondes sèches ». Elles présentent l'avantage d'avoir une faible emprise foncière et sont donc adaptées aux projets où la surface disponible est limitée.

La sonde correspond à deux tubes en U en matériau synthétique placés dans le forage. Le contact entre ce capteur et le sous-sol se fait par l'intermédiaire d'un mélange de ciment et de bentonite. Le système est parcouru par un liquide antigel qui est ensuite mené à la PAC en surface (Figure 7).

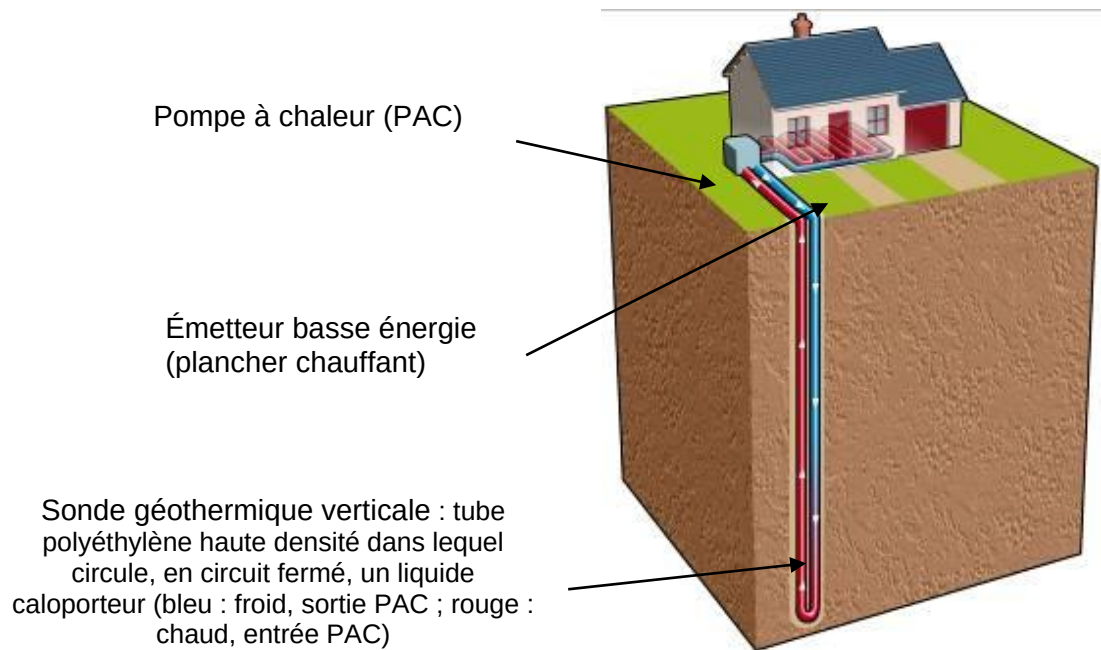


Figure 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique

La PAC restitue en surface, en l'amplifiant, la chaleur prélevée pour chauffer une habitation, de préférence au moyen d'un plancher chauffant. En été, le système peut être inversé pour fonctionner en mode rafraîchissement (cas d'une PAC réversible, cf. principe de fonctionnement en page 24).

La capacité de prélèvement de chaleur dépend du contexte géologique et de la nature des roches traversées (conductivité thermiques...). **Elle est de l'ordre de 50W/m.** Pour assurer des puissances comparables à celles prélevées sur aquifère, il est nécessaire d'utiliser plusieurs sondes dont l'implantation doit respecter certaines dispositions. On constitue alors un « champ de sondes » (Figure 8). Ces opérations sont constituées en moyenne de 10 à 50 sondes.

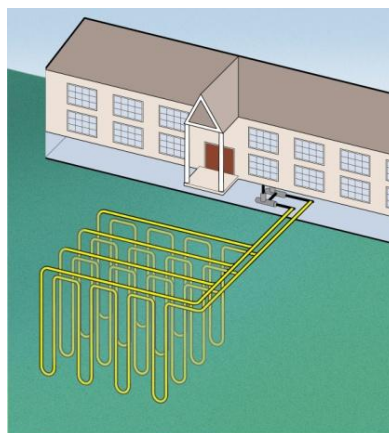


Figure 8 : Schéma d'un champ de sondes géothermiques

La norme NF X 10-970 sur la sonde géothermique verticale précise les conditions de dimensionnement et de mise en œuvre d'une sonde géothermique verticale.

Capteurs horizontaux

Les capteurs horizontaux permettent d'exploiter la chaleur géothermique à très faible profondeur. Ces capteurs sont organisés en réseau de tubes horizontaux installés en boucles et enterrés à une profondeur allant de 60 cm à 1,20 m qui vont permettre le prélèvement de l'énergie contenue dans le proche sous-sol.

Dans les tubes, un fluide circule en circuit fermé et, selon la technologie employée, il peut s'agir, soit d'eau additionnée d'antigel (dans ce cas les tubes sont en polyéthylène), soit du fluide frigorigène qui circule également dans la PAC.

Généralement la surface de terrain à mobiliser pour installer le capteur doit correspondre à 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Ces conditions de surface ne sont pas toujours envisageables, d'autant plus dans un contexte à forte pression foncière. Cette technique est généralement réservée aux pavillons individuels disposant d'un terrain suffisant.

2.3.5. Installations mixtes

a) Pompe à chaleur réversible

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

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

Notons que dans certaines configurations il est possible de faire du rafraîchissement direct (free cooling) sans utiliser la PAC.

Pour les dispositifs sur **nappe souterraine** qui fonctionnent en doublet, il existe deux configurations possibles :

- **Un seul puits de production** : Seul le puits de production est équipé d'une pompe d'exhaure. Le fluide réinjecté en été est plus chaud que la température normale de l'aquifère, et le fluide réinjecté en hiver est plus froid (Figure 9). Il faudra néanmoins tenir compte de l'hydrodynamisme de la nappe pour l'implantation des forages ;

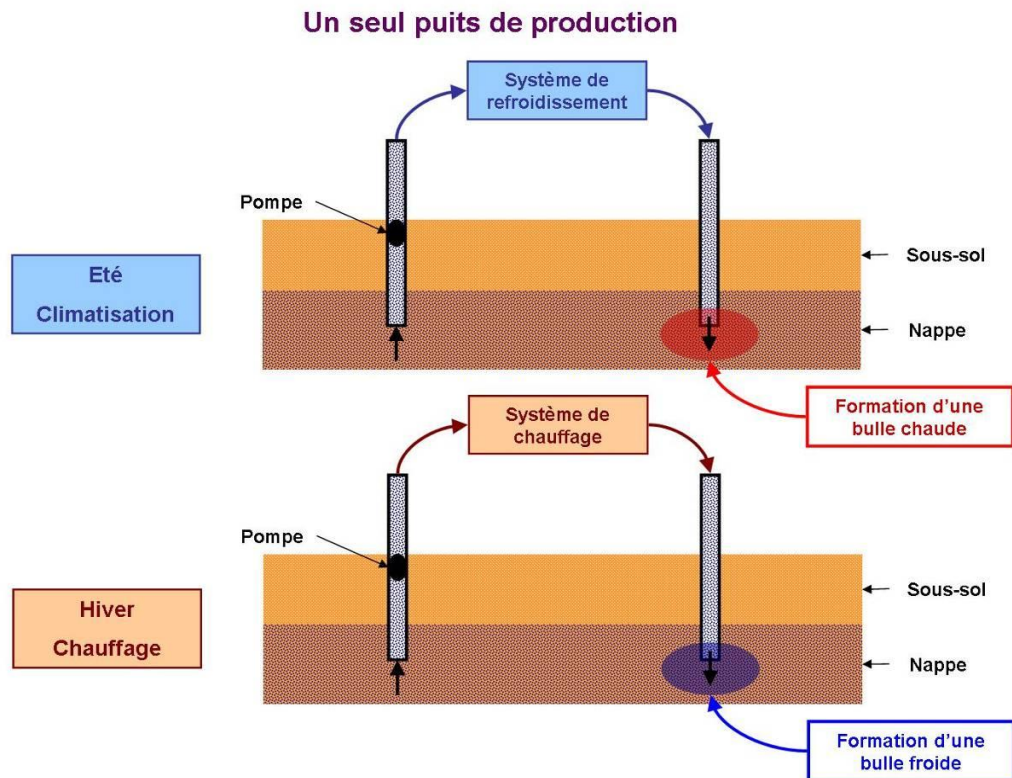


Figure 9 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible avec un puits de production.

- **Deux puits de production** qui fonctionnent alternativement. L'été, l'eau est prélevée dans le puits dit « froid » et l'eau réchauffée après passage dans le système de refroidissement est réinjectée dans le puits « chaud ». En hiver, le sens de circulation dans la boucle géothermale est inversé. L'eau de chauffage est prélevée au puits « chaud » et l'eau refroidie est réinjectée dans le puits « froid ». Un tel système s'avèrera très efficace lorsque l'écoulement de la nappe est faible ou nul car on observera la formation d'une bulle chaude et froide respectivement au droit des puits « chaud » et « froid », augmentant la performance du système au cours du temps (Figure 10).

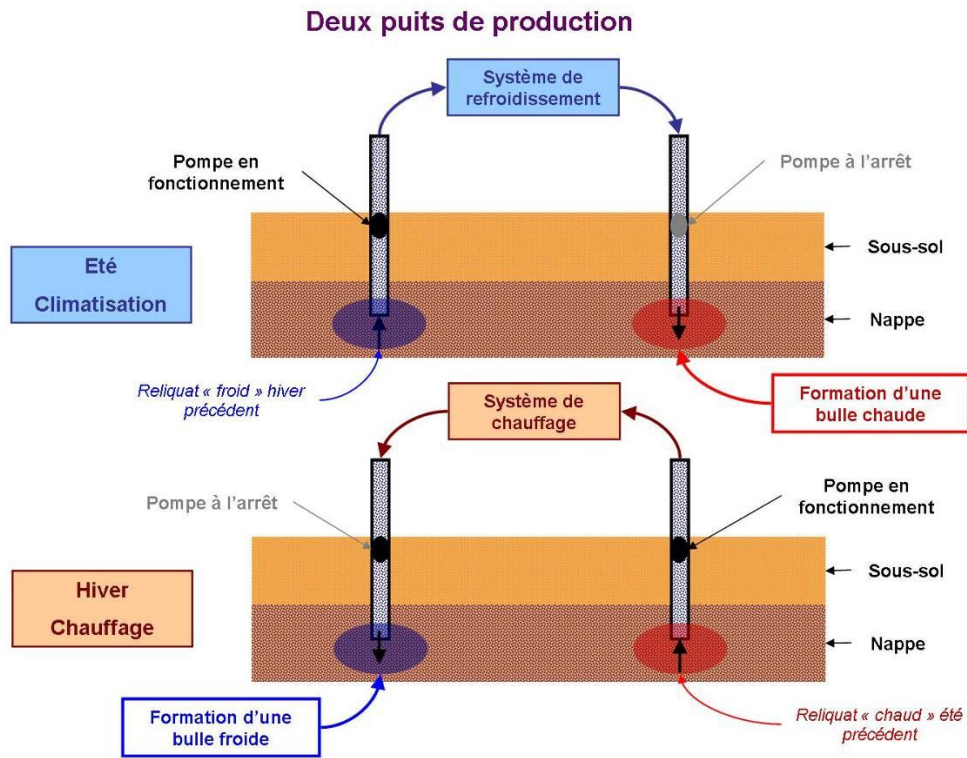


Figure 10 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible avec deux puits de production.

b) Thermofrigopompe

Une pompe à chaleur produit simultanément du chaud et du froid. Certains bâtiments du tertiaire ont des besoins de froid et de chaud toute l'année (cliniques, hypermarchés...).

Le principe de la thermofrigopompe est de satisfaire les besoins de chaleur et du froid par deux réseaux distinctifs (Figure 11).

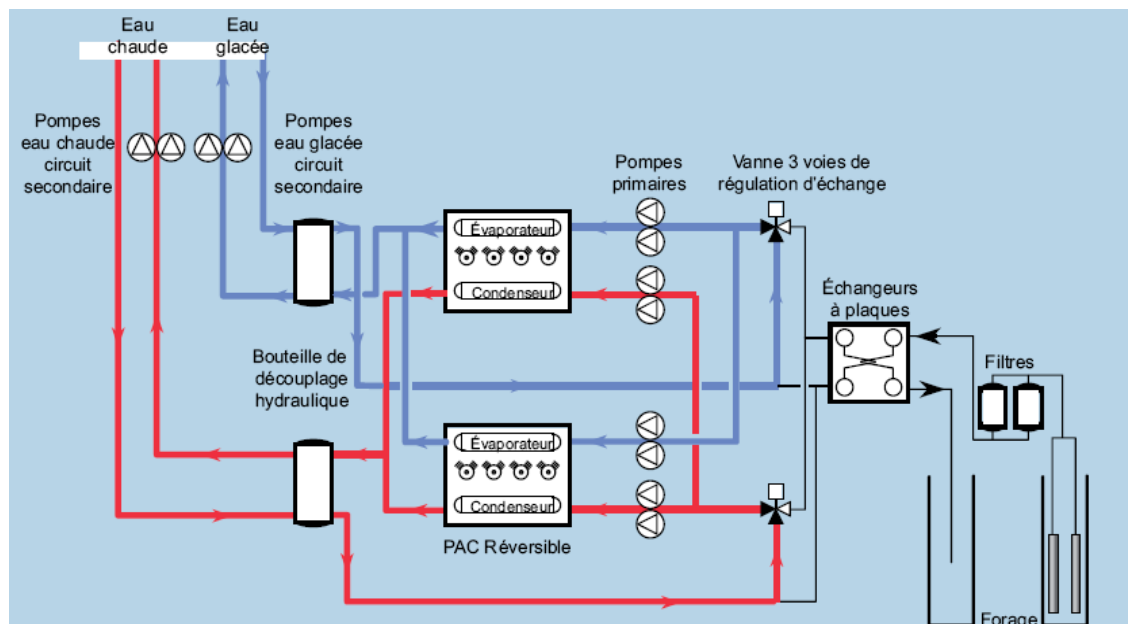


Figure 11 : Schéma de principe du fonctionnement d'une thermofrigopompe.

2.3.6. Installations terminales de chauffage

Quelle que soit la technologie utilisée pour émettre de la chaleur ou du froid, un système terminal est nécessaire pour chauffer ou climatiser un bâtiment.

L'efficacité d'un système géothermique est conditionné par les températures aller et retour des émetteurs de chauffage. Le dispositif sera d'autant plus performant que les températures de ces émetteurs seront basses.

On distingue généralement deux modes d'émission de chaleur ou de froid : le mode hydraulique ou aéraulique.

a) Émission en mode hydraulique

Ces technologies se basent sur la circulation d'un fluide (chaud ou froid) pour satisfaire les besoins. On distingue :

- **Radiateurs à eau** : ils sont généralement caractérisés par leur température aller retour pour la température extérieure la plus basse (exemple : aller 90°C – retour 90°C) Pour être compatible avec une ressource géothermique (limité à 55°C pour les systèmes avec PAC), il est nécessaire de mettre en place des émetteurs de grande surface. Les radiateurs ne permettent pas d'envisager la réversibilité ;
- **Planchers chauffants** : ils sont bien adaptés à un chauffage par PAC du fait de leur grande surface d'émission. Ces planchers peuvent être réversibles si l'on prend les précautions nécessaires notamment en terme de condensation sur le plancher lors du refroidissement l'été ;
- **Plafonds rayonnants hydrauliques** : ils sont bien adaptés à un système de climatisation associé à une PAC du fait de leur grande surface d'émission, et aussi pour les parties de bâtiment ayant surtout des besoins de rafraîchissement.

b) Émission en mode aéraulique

Le mode aéraulique permet l'émission de chaleur ou de froid par air raccordé à un circuit d'eau chauffée ou rafraîchie par PAC.

Le système le plus couramment utilisé est le **ventilo-convecteur**. Certaines techniques émergentes comme les **plafonds diffusants** ou **poreux** sont performantes mais leurs coûts demeurent à l'heure actuelle très élevés.

Les inconvénients souvent attachés à ce mode d'émission sont, en cas de défaut de dimensionnement : courants d'air, niveau sonore, sensations de trop chaud ou trop froid.

2.3.7. La géothermie très basse énergie (TBE) - Plusieurs technologies adaptées aux besoins

La géothermie très basse énergie (TBE), associée aux systèmes de pompes à chaleur, (cf. principe de fonctionnement au paragraphe 2.3.2) peut apporter une réponse énergétique et environnementale satisfaisante dans le domaine du chauffage (et rafraîchissement) résidentiel et tertiaire (logements, bureaux, commerces). La chaleur prélevée provient, soit d'aquifères superficiels par le biais de forages, soit du sol et du sous-sol (sans eau) par le biais de capteurs enterrés, horizontaux ou verticaux (sonde géothermique, Figure 12).

Les pompes à chaleur ayant un rendement optimal avec des émetteurs de chaleur basse température (de type "planchers chauffants"), le marché principal est celui du neuf. Cependant, cas le cas d'une rénovation importante de bâtiments existants, prenant en compte les émetteurs de chaleur (avec la mise en place par exemple d'un plancher basse température), la géothermie peut également être mise en œuvre.

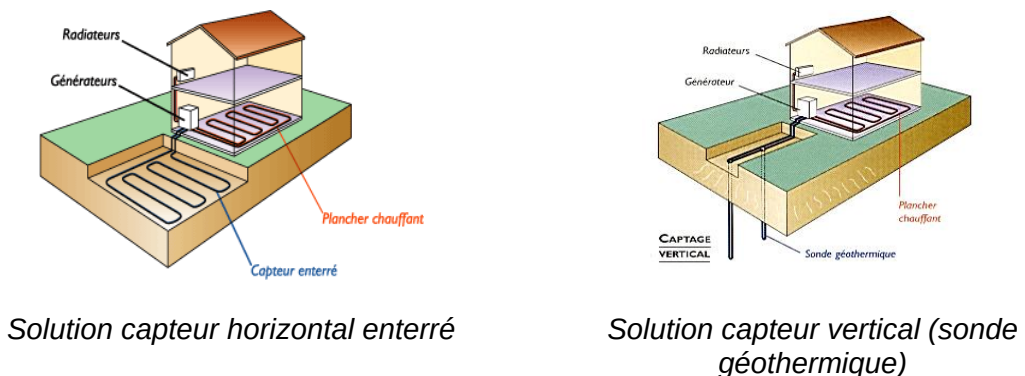


Figure 12 : Solution de capteur horizontal et de capteur vertical

a) La géothermie pour le particulier

En France, la technique la plus courante est celle du captage enterré horizontal. Cette technique est réservée de préférence à la maison individuelle car l'emplacement nécessaire pour implanter les capteurs requiert de 1,5 à 2 fois la surface à chauffer.

Le captage enterré vertical est également mis en œuvre particulièrement lorsque se présentent des contraintes de place. Cette technique est encore relativement peu répandue en France compte tenu de son coût encore élevé mais elle connaît des croissances comparativement importantes.

Les puits canadiens, dits également provençaux, sont aussi des techniques géothermiques utilisées dans les bâtiments. Il s'agit de systèmes de préchauffage ou de rafraîchissement et sont majoritairement utilisés dans l'habitat individuel.

Leur principe consiste à faire circuler de l'air ambiant nécessaire au renouvellement jusqu'à l'intérieur de l'habitat, via un tuyau, étanche, enterré à 1 ou 2 mètres de profondeur. En hiver, l'air froid prélevé se réchauffe en circulant dans le tuyau, en été, il se rafraîchit.

b) La géothermie pour le tertiaire et le résidentiel collectif

Cette filière, qui valorise la plupart du temps de la géothermie très basse énergie par le biais de pompes à chaleur, correspond généralement à des opérations de taille moyenne. On distingue :

- **Les opérations de " pompes à chaleur sur aquifères superficiels" (cf. principe de fonctionnement en paragraphe 2.3.3)**

Ces opérations permettent de couvrir des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de froid. En fonction des caractéristiques de l'aquifère (débit,

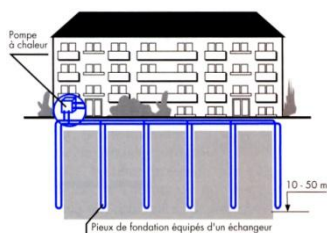
température), il est possible de fournir des puissances de chauffage de plusieurs centaines de kW à plusieurs MW.

- **Les champs de sondes géothermiques (cf. principe de fonctionnement en paragraphe 2.3.4)**

Les opérations avec champs de sondes géothermiques se multiplient à l'étranger depuis plusieurs années. En France, le développement est plus récent.

- **Les fondations géothermiques ou thermo-actives**

Certains bâtiments nécessitent, pour des raisons de portance, d'être construits avec des fondations sur pieux en béton. Le principe des pieux énergétiques consiste à y intégrer lors de leur fabrication ou de leur mise en place sur site un système de captage de l'énergie (tube en polyéthylène noyé dans le pieu renforcé par une armature en fer et dans lequel il est possible de faire circuler de l'eau – Figure 13). Le système de captage est connecté à une pompe à chaleur.



Exemple de dispositions de pieux géothermiques

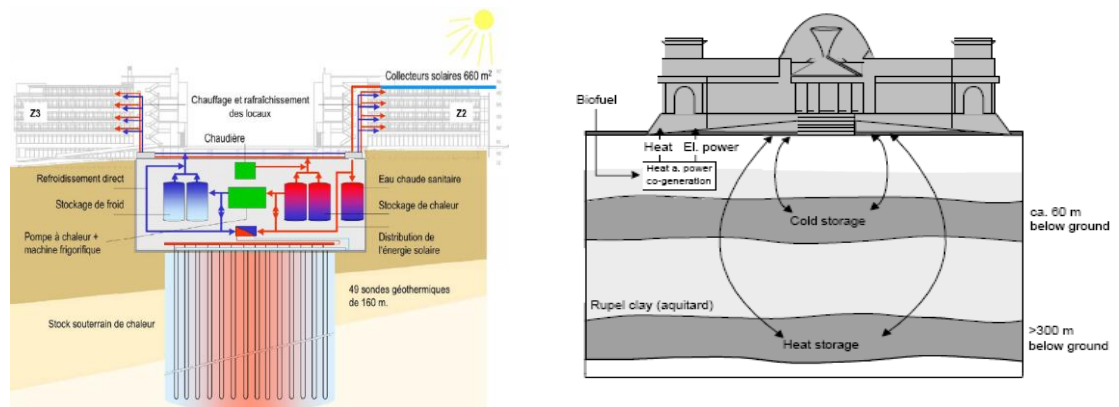


Armatures d'un pieu géothermique

Figure 13 : Représentations de pieux géothermiques

- **Les opérations de stockage thermique souterrain**

Le stockage d'énergie thermique dans le sous-sol consiste à mettre à profit les propriétés des formations géologiques pour emmagasiner une énergie disponible et excédentaire à un instant donné – c'est-à-dire sans utilisation immédiate - et pour l'exploiter ultérieurement en période de demande. Le domaine d'application le plus courant du stockage thermique souterrain est celui de la gestion de l'énergie dans les bâtiments. La chaleur prélevée l'été pour refroidir les bâtiments peut être stockée pour être utilisée l'hiver. Mais d'autres applications existent comme celle du chauffage des serres maraîchères ou horticoles. On distingue deux types de stockage : les stockages diffusifs – c'est-à-dire avec champ de sondes géothermiques – et les stockages sur aquifères (Figure 14).



Vue schématique d'un stockage diffusif réalisé à Root en Suisse

Schéma du stockage thermique sur aquifère au Reichstag à Berlin

Figure 14 : Opération de stockage souterrain

c) La géothermie pour alimenter les réseaux de chaleur

Un réseau de chaleur, ou chauffage urbain, est un ensemble d'installations qui produisent et distribuent de la chaleur à plusieurs bâtiments pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire. Le réseau de chaleur est constitué d'un réseau primaire de canalisations empruntant le domaine public ou privé, transportant de la chaleur, qui alimente des postes de livraison (appelés sous stations) installés dans les immeubles des utilisateurs (Figure 15). Sur les mêmes principes, il existe des réseaux distribuant du froid, transporté sous forme d'eau glacée et destiné à la climatisation de locaux.

Les collectivités territoriales (communes ou groupement de communes) ont compétence pour créer un service public local de distribution d'énergie calorifique. Il y a actuellement en France³ près de 450 réseaux de chaleur qui chauffent l'équivalent de plus de 2 millions d'habitants dans leur vie quotidienne, au travail ou dans leurs loisirs, dans plus de 350 villes. Cela représente annuellement près de 25 000 GWh d'énergie distribuée à 24 000 sous-stations. En France, les 2/3 des bâtiments chauffés par des réseaux de chaleur sont des logements ; le tiers restant est constitué essentiellement de bâtiments du secteur tertiaire (dans lesquels on compte les établissements de santé, d'enseignement ...)

Compte tenu de l'importance des investissements sous-sol que nécessitent la valorisation des aquifères profonds et l'utilisation de l'énergie géothermale par échange direct, un réseau de chaleur est généralement associé. Ces réseaux, aptes à desservir plusieurs milliers de logements par opération, permettent ainsi de répartir sur un plus

³ Source SNCU

grand nombre de postes de consommation la charge des investissements sous-sol de production géothermique.

Selon les cas, la production peut se faire soit via un puits unique associé à un échangeur thermique, soit plus fréquemment via un "doublet géothermique" (un forage de production, un forage d'injection) assorti d'un échangeur. Réinjecter l'eau après prélèvement des calories évite de polluer la surface si l'eau est salée et de maintenir la pression du réservoir géothermal exploité.

Parmi les installations de géothermie existant en France et produisant plus de 100 tep/an (tonne équivalent pétrole), la moitié (soit 80% de la production géothermale) est concentrée dans le Bassin parisien et exploite l'aquifère dit du Dogger (du nom de la période concernée de l'ère Jurassique). Cet aquifère s'étend sur une surface de 15 000 km² et alimente les 29 réseaux de chaleur géothermique de l'Ile-de-France.

Pour fixer un ordre de grandeur, une opération-type de la région parisienne permet de chauffer environ 4 000 à 5 000 équivalent-logements. L'eau géothermale exploitée est captée à environ 2 000 m de profondeur ; sa température atteint 80°C.

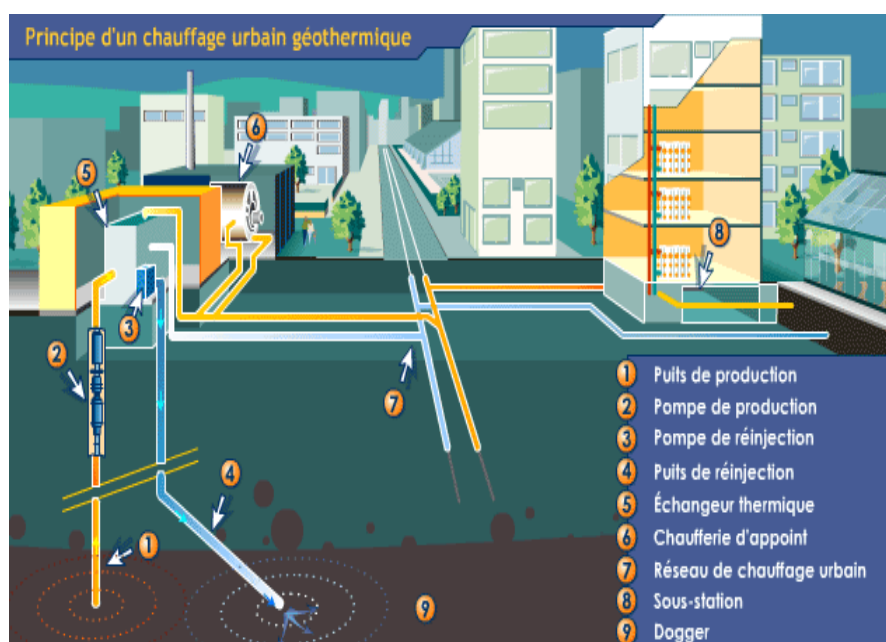


Figure 15 : Schéma d'une installation de réseau de chaleur urbain géothermique (tel qu'existant en région parisienne)

Les réseaux de chaleur géothermiques sont des réseaux multi-énergies. La base est assurée par la géothermie et le complément par des énergies fossiles, utilisées en appoint lors des jours les plus froids et également en secours. Il n'est alors pas nécessaire de dimensionner la puissance géothermique à la puissance maximale : en dimensionnant la puissance géothermique à seulement la moitié de la puissance maximale, il est possible d'assurer jusqu'à 80% des besoins, tout en limitant fortement l'investissement qui est proportionnel à la puissance installée.

d) Récapitulatif des différents types d'exploitation géothermique de très basse énergie

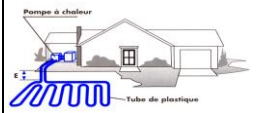
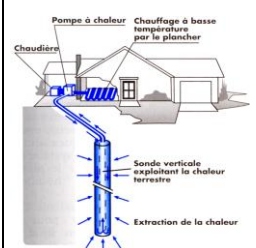
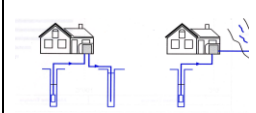
La Figure 16 présentée ci-après récapitule les différents types d'exploitation géothermique de très basse énergie.

2.3.8. Surveillance et maintenance des installations

Toute installation géothermique requiert une maintenance tant préventive que curative pour contribuer à :

- La fiabilité du fonctionnement et la continuité de service ;
- La performance énergétique.

Le maître d'ouvrage doit souscrire à un contrat d'entretien couvrant l'intégralité des installations de forage et de génie climatique.

Type d'échangeur géothermique	Principe Conditions d'implanation Profondeur moyenne	Paramètres dimensionnement Puissance extraction Coût investissement	Réglementation et procédures administratives liées au sous-sol	Avantages / inconvénients
CAPTEURS HORIZONTAUX Applications : Individuel 	Principe : Prélèvement de la chaleur dans le sol à partir d'un réseau de tuyaux (en polyéthylène) dans lequel circule un fluide frigorigène ou de l'eau glycolée (selon la technologie de PAC utilisée), enterré horizontalement dans le jardin Conditions d'implantation : Sol meuble ou reconstitué. Espace demandé ~2 fois la surface à chauffer. Proscrit dans les terrains en pente. Attention aux racines d'arbres et à l'écrasement des tuyaux Profondeur moyenne (m) : 0.80 - 1.50	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Nature du sol (conductivité thermique qui va influencer la puissance d'extraction par m ² de sol en W/m ²), diamètre des tubes PE (20 - 32 mm), espacement des tubes (0.30 - 0.75 m) Puissance d'extraction (W/m) : 3.3 - 21.1 W/m ¹⁾ Coût d'investissement (€) : 30 - 45 €/ml ²⁾	Déclaration à la DRIRE - Ingénieur en chef des mines si : Profondeur < 10 m + gîte géothermique à basse température de minime importance (débit calorifique maximum calculé par référence à 20 °C < 200 th/h et profondeur < 100 m) Références : Code minier : Art. 102 + 131 Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17	Avantages : Coût d'investissement selon les cas (nature du sol, coût du décapage) Inconvénient : COP influencé par les conditions climatiques (température extérieure, pluies) et ne bénéficiant pas du gradient géothermique. Nécessite une grande surface de pose. Jouissance de la parcelle limitée
SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES Applications : Individuel, collectif, tertiaire 	Principe : Prélèvement de la chaleur par conduction dans le sous-sol à partir d'un échangeur thermique vertical dans lequel circule, en circuit fermé, un liquide caloporteur de qualité alimentaire. Conditions d'implantation : Tous types de sous-sol avec présence ou absence d'eau souterraine. Espace demandé sur le terrain pour une sondes (0,120 - 0,180 m) et espace recommandé entre 2 sonde 10 m Profondeur moyenne (m) : 80 - 100 ³⁾	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Conductivité thermique des terrains qui va influencer la puissance d'extraction en W/m de sonde, présence d'eau souterraine, écoulement souterrain, diamètre des tubes (25 - 32 mm), conductivité thermique du laithier de scellement. Ratios de dimensionnement utilisés pour prédimensionnement : 50 W/m (terrains saturés); 30 W/m (terrains secs). Pour les champs de sondes, le dimensionnement sera réalisé par un bureau d'étude et validé in-situ par un ou plusieurs tests de réponse thermique. Puissance d'extraction (W/m) : 20 - 85 W/m ⁴⁾ Coût d'investissement (€) : 30 - 80 €/ml de sonde posée (inclus travaux de forage) ⁵⁾	Déclaration à la DRIRE - Ingénieur en chef des mines si : Profondeur de l'ouvrage (puits, forage) dépasse 10 m Ou Débit calorifique prélevé (calculé par référence à 20 °C) est < 200 th/h (232.5 kW) Références : Code minier : Art. 102 + 131 Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17 Demande d'autorisation à la Préfecture : Pour les travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques Si profondeur est > 100 m ou débit calorifique prélevé (calculé par référence à 20 °C) est > 200 th/h (232.5 kW) Si l'ouvrage est situé dans une zone de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public Si l'ouvrage est de nature à détruire les frayères ou les zones d'alimentation de la faune piscicole Références : Code minier : Art. 83 et Art. 98 à 102 Code environnement : Art. R214-1 (5.1.2.0) Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17 Code santé publique : Art. L.1322-4 Code environnement : Art. L.214-1 à L.214-6 et R214-1 (3.1.5.0)	Avantages : Technique simple et sûre (pas besoin d'eau souterraine). Rendements élevés (température d'entrée dans la PAC stable) et bénéficient du gradient géothermique). Nécessite un espace d'implantation réduit (zones urbaines). Jouissance totale de la parcelle. Entretien pluri-annuel minimum. Inconvénients : Coût d'investissement élevé en fonction de la profondeur totale forée et du type de terrain (tubage à l'avancement)
PAC SUR AQUIFERES Applications : Individuel, collectif, tertiaire 	Principe : Prélèvement de la chaleur dans l'eau souterraine par l'intermédiaire d'un puits de pompage et d'un forage de réinjection (doublet). Après son passage dans la pompe à chaleur, l'eau peut être également rejetée, après autorisation, dans un réseau, un cours d'eau ou un lac. Conditions d'implantation : Tous les types de sols à perméabilité de pore ou de fissure permettant l'écoulement de l'eau souterraine. Distance entre le puits de prélèvement et le forage de réinjection à déterminer en fonction des conditions hydrogéologiques locales (perméabilité, sens découlement de la nappe...) Profondeur moyenne (m) : "profondeur de l'aquifère déterminée par la géologie"	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Profondeur de la nappe, débit disponible pérenne dans le temps et température de l'eau souterraine. La garantie AQUAPAC pourra être souscrite (pour les puissances >30 kW) permettant de garantir le risque d'échec sur la ressource (débit insuffisant) et la pérennité de la ressource à long terme (diminution du débit). Puissance d'extraction (W/m) : 10 000 W par m3/h pompé ⁶⁾ Coût d'investissement (€) : 40 - 150 €/ml ⁷⁾	Déclaration à la Commune (mairie) pour : Dispositifs de prélèvements, puits ou forages à des fins d'usage domestique de l'eau (débit <1000 m3/an) Références : Décret n° 2008-652 du 2 juillet 2008 Déclaration à la Préfecture : Pour prélèvement souterrain temporaire ou permanent non destiné à un usage domestique (débit >1000 m3/an) Si 10 000 m3/an < débit < 200 000 m3/an Si débit entre 400 et 1000 m3/h ou 2 et 5% débit cours d'eau Références : Code environnement : Art. R214-1 (1.1.2.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.2.1.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.3.1.0) Demande d'autorisation à la Préfecture : Si débit ³ 200 000 m3/an Pour prélèvement en plan d'eau si débit ⁴ 1000 m3/h ou 5% débit du cours d'eau Zones où mesures permanentes de répartition quantitative des eaux souterraines si débit ⁵ 8 m3/h Références : Code environnement : Art. R214-1 (1.1.2.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.2.1.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.3.1.0)	Avantages : Excellent rendement (COP gén. > 4) favorisé par une température de l'eau souterraine stable et plus ou moins élevée). Adapté aux grosses puissances Inconvénients : Réinjection parfois problématique. Problèmes de colmatage, de corrosion ou d'incrustation liés à la qualité de l'eau souterraine à vérifier. Coûts d'investissement élevés si aquifère profond ou mauvaise qualité de l'eau
GEOSTRUCTURES Applications : Collectif ou tertiaire 	Principe : Pieux géotechniques équipés de tubes PEHD, identiques à ceux des sondes géothermiques verticales. Conditions d'implantation : Terrains dont les caractéristiques mécaniques montrent une faible portance sur une épaisseur de plus de 5 - 8 m depuis la surface. Terrains cibles : sables, argiles, limons, marnes, graviers. Profondeur moyenne (m) : 20 - 30 m	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Même approche que pour les sondes géothermiques verticales, avec en plus les paramètres liés à la résistance thermique (conductivité thermique du ciment) et mécanique (résistance à la compression simple, angle de frottement, interne, cohésion) des pieux, ainsi qu'aux modifications physico-chimiques de ces paramètres notamment en présence d'eau souterraine. Valeurs cibles : Conductivité thermique et capacité thermique volumique de l'ordre de 2.0 [W/mK] et de 2.3 [MJ/m3K] respectivement. En tous les cas, la conductibilité thermique du sol devrait être d'au moins 1.3 [W/mK] et si possible supérieure à 1.8 [W/mK] pour un bon fonctionnement d'un système.	Idem que sondes géothermiques verticales Déclaration à la Préfecture : Si la puissance électrique absorbée par la PAC est comprise entre 50 kW et 500 kW Demande d'autorisation à la Préfecture : Si la puissance électrique absorbée par la PAC est > 500 kW Références : Rubrique 2920 des ICPE	Avantages : Valorisation énergétique d'un système nécessitant une structure porteuse. Implantation au-dessous du bâtiment. Inconvénients : Coût d'investissement élevé. Système nécessitant une étude globale englobant la géotechnique, la thermique, l'hydrogéologie et les altérations physico-chimiques des pieux à terme.

¹⁾ Pour une boucle de 100 m. Principaux paramètres : nature du sol (puissance d'extraction par m² de sol en W/m²), diamètre du PE (20 - 32 mm), espacement des tubes (0.30 - 0.75 m)

²⁾ Le prix dépendra essentiellement de la nature du sol et du coût du décapage

³⁾ Il s'agit d'une profondeur moyenne des sondes réalisées en France pour le domestique. A noter qu'en Suisse ou en Allemagne, des sondes sont couramment réalisées à une profondeur de 150 m et qu'une sonde a déjà été réalisée en Suisse à une profondeur de 706 m.

⁴⁾ La puissance linéaire d'extraction va dépendre du type de roche (20 w/m pour des sables secs à 85 W/m pour des roches consolidées type gneiss par exemple)

⁵⁾ Le prix dépendra essentiellement de la technique de forage utilisée (MFT ou rotary, le deuxième se situant dans la fourchette haute des prix).

⁶⁾ Puissance extraite avec un delta T°C de 6°C et un COP de l'ordre de 3.0

⁷⁾ Le prix tient compte du forage de prélèvement, du forage de réinjection et de la pompe de prélèvement (immergée). Il dépendra essentiellement de la profondeur de la nappe et du tubage à l'avancement

Figure 16 : Caractéristiques des principaux types d'échangeurs géothermiques très basse énergie

3. La production géothermique dans le monde, en Europe et en France

3.1. PRODUCTION MONDIALE DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE

En matière de production de chaleur par usage direct sur un total de 78 pays, et pour l'année 2009, la capacité globale est de 50,6 MWth et la production annuelle de 121 600 GWh. Les cinq principaux pays producteurs, en termes de capacité installée, sont les USA, la Chine, la Suède, la Norvège et l'Allemagne (60% de la capacité mondiale). En termes d'énergie produite, il s'agit de la Chine, des États-Unis, de la Suède, de la Turquie et du Japon (55% de l'énergie géothermique par usage direct mondiale)⁴. La Figure 17 ci-dessous présente la répartition des usages de la chaleur au niveau mondial : le chauffage par pompes à chaleur est prépondérant.

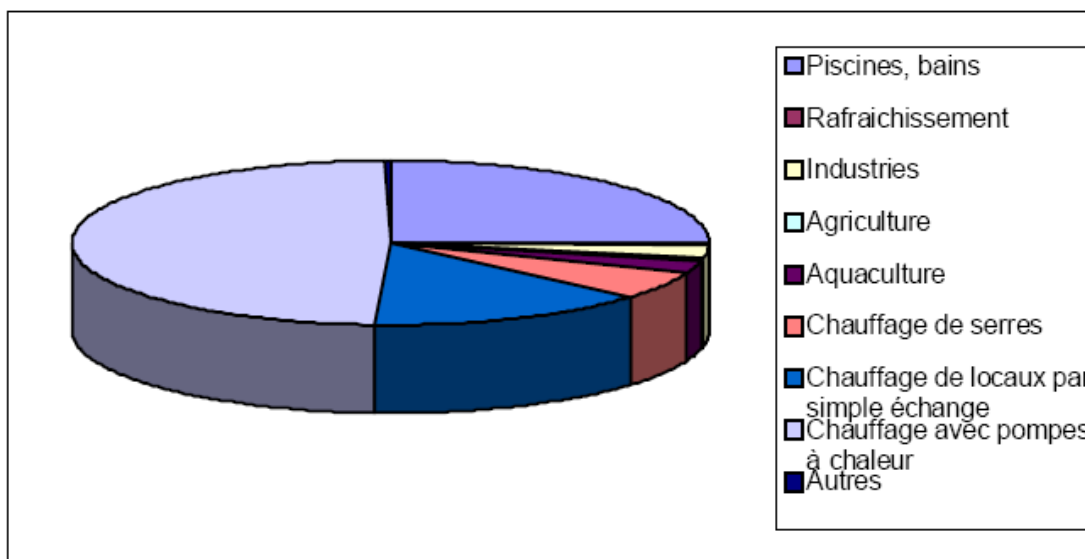


Figure 17 : Les usages de la chaleur géothermique dans le monde (Source : World Geothermal Congress, 2010)

⁴ Source : Lund et al, Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress 2010

3.2. PRODUCTION DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE EUROPÉENNE

Le bilan ci-après présente la production de chaleur avec usage direct de la chaleur géothermale (Figure 18). Ces chiffres comprennent l'énergie produite pour alimenter des réseaux de chaleur mais également les autres usages (balnéothérapie, agriculture..).

Utilisation directe de la chaleur géothermique (hors pompes à chaleur géothermiques) en 2007 et 2008 dans les pays de l'Union européenne. Direct uses of geothermal energy (excluding geothermal heat pumps) in 2007 and 2008* in the European Union countries.*

	2007		2008*	
	Puissance/Capacity (MWth)	Énergie prélevée Captured energy (ktep/ktoe)	Puissance/Capacity (MWth)	Énergie prélevée Captured energy (ktep/ktoe)
Hungary	694,2	189,6	694,2	189,6
Italy	500,0	176,7	500,0	176,7
France	307,0	109,0	312,0	114,0
Germany	240,0	13,8	280,0	14,0
Romania	145,1	67,9	145,1	67,9
Slovakia	131,0	10,5	142,8	13,0
Poland	110,0	10,3	110,0	11,5
Austria	97,0	12,3	97,0	16,0
Bulgaria	109,6	39,8	77,7	25,9
Greece	69,8	12,5	69,8	12,5
Slovenia	44,7	14,7	44,7	14,7
Portugal	30,4	10,3	30,4	10,3
Spain	22,3	8,3	22,3	8,3
Lithuania	17,0	8,7	17,0	8,7
Belgium	9,0	1,5	9,0	1,6
Czech Rep.	4,5	2,1	4,5	2,1
United Kingdom	3,0	1,9	3,0	1,9
Ireland	0,4	0,5	0,4	0,5
Total EU	2 535,1	690,5	2 559,9	689,2

* Estimation. Estimate.
Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma. Source EurObserv'ER 2009

Figure 18 : Utilisation directe de la chaleur géothermique (hors pompes à chaleur) dans les pays de l'Union Européenne) en 2008 (Source : Etat des énergies renouvelables en Europe, édition 2009, 9ème bilan EurObserv'ER)

En Europe, la Suède, l'Allemagne et la France sont, de loin, les plus importants marchés du secteur PAC (Figure 19).

*Principaux marchés de la PACg dans les pays de l'Union européenne
(en nombre d'unités installées) en 2007 et 2008*.
Main European Union ground source heat pumps markets
(numbers of installed units) in 2007 and 2008*.*

	2007	2008*
Germany	26 887	34 450
Sweden	27 938	25 138
France	21 200	21 725
Austria	8 288	8 566
Finland	5 300	7 500
United Kingdom	3 000	5 000
Netherlands	3 529	4 098
Czech Rep.	1 792	2 203
Ireland	2 608	2 095
Belgium	1 200	1 300
Poland	1 700	1 000
Estonia	1 123	972
Slovenia	420	405
Greece	65	n.c.
Total	105 050	114 452
* Estimation. Estimate.. Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma. Source EurObserv'ER 2009		

Figure 19 : Principaux marchés de pompes à chaleur géothermique dans les pays de l'Union européenne (en nombres d'unités installés en 2007 et 2008 (estimations))

3.3. PRODUCTION DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE FRANÇAISE

En France, la puissance de la **géothermie profonde** a légèrement augmenté en 2008, avec la réhabilitation, en région parisienne, de deux installations alimentant chacune un réseau de chaleur. La production de la centrale thermique d'Orly (Val-de- Marne) est ainsi passée de 3 à 4 ktep grâce au remplacement d'un doublet existant, faisant passer le débit total de l'installation de 250 m³/heure à 300 m³/heure. La mise en service d'un nouveau puits dans la centrale thermique de Sucy-en-Brie (Val-de- Marne) a également permis à la production d'augmenter de 2 à 3 ktep, le débit s'établissant à 300 m³/heure contre 200 auparavant. Ces deux réhabilitations représentent une puissance supplémentaire de l'ordre de 5 MWth, soit une puissance totale de l'ordre de 312 MWth.

En France, selon les chiffres de l'AFPAC (Association Française pour les Pompes à Chaleur), les ventes de **pompes à chaleur** (de 5 à 50 kW) ont subi en 2009 leur première baisse (- 20,7%) depuis trois ans (Figure 20). L'AFPAC croit cependant à un inversement de la tendance pour 2010. Pour l'association, il s'agit de l'effet de la crise ayant impacté le marché de la construction neuve et donc celui de l'équipement et du chauffage. De plus, le taux du crédit d'impôt a baissé (de 50% à 40% en 2009) et un déstockage massif, *conséquence des stocks importants constitués fin 2008 après trois années de forte croissance consécutives*, a été nécessaire, indique l'association.

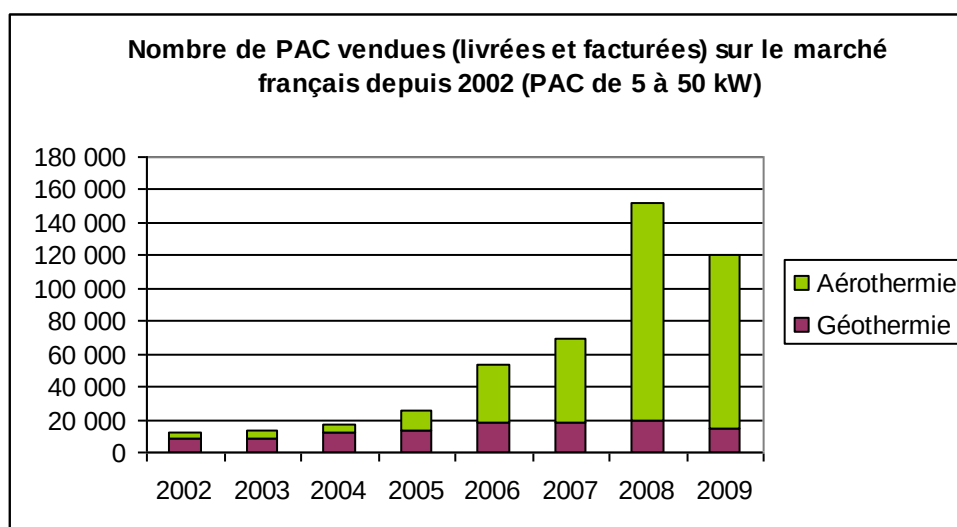


Figure 20 : Marché français des Pompes à Chaleur (Données AFPAC, 2010)

3.4. ENJEUX DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE, DANS LES DOMAINES DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

La France va être confrontée dans les années à venir à de grands enjeux énergétiques : maîtriser sa consommation énergétique globale, sécuriser ses approvisionnements et diviser par un facteur 4 d'ici 2050 ses émissions de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique.

Cependant la consommation finale d'énergie dans le résidentiel - tertiaire continue à augmenter (Figure 21), du fait de l'augmentation du parc (en nombre et en surface) et de l'augmentation du confort (y compris le recours accru à la climatisation durant l'été).

Consommation d'énergie finale par secteur

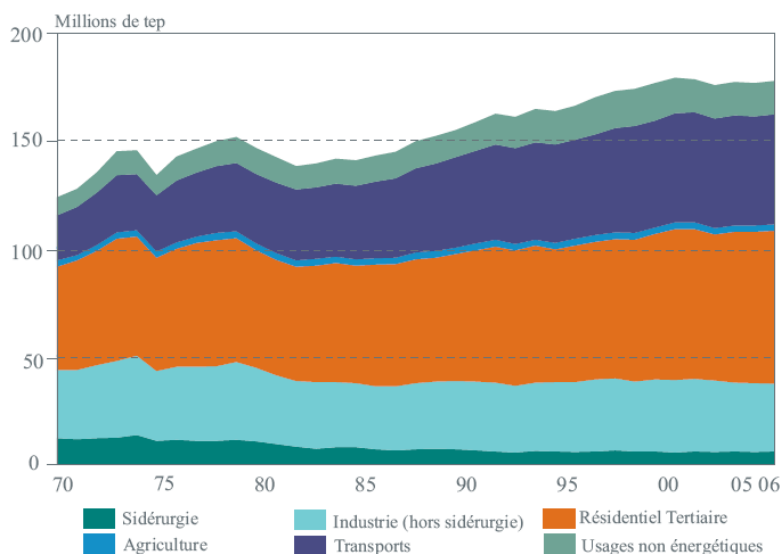


Figure 21 : Evolution de la consommation finale énergétique nationale par secteur (source : « Observatoire de l'énergie : l'énergie en France - repères Edition 2007 »).

Selon l'ADEME, le secteur du bâtiment produit plus de 20% des émissions de CO₂ totales et 43 % de la consommation d'énergie finale en France. Près de 70 % de la consommation d'énergie du résidentiel est liée aux besoins du chauffage (Figure 22). Il y a donc dans ce domaine une source importante d'amélioration qui doit passer tout d'abord par la qualité des bâtiments et par les comportements individuels, mais également par la pénétration des énergies renouvelables dans le Marché et de l'efficacité énergétique des dispositifs de chauffage.

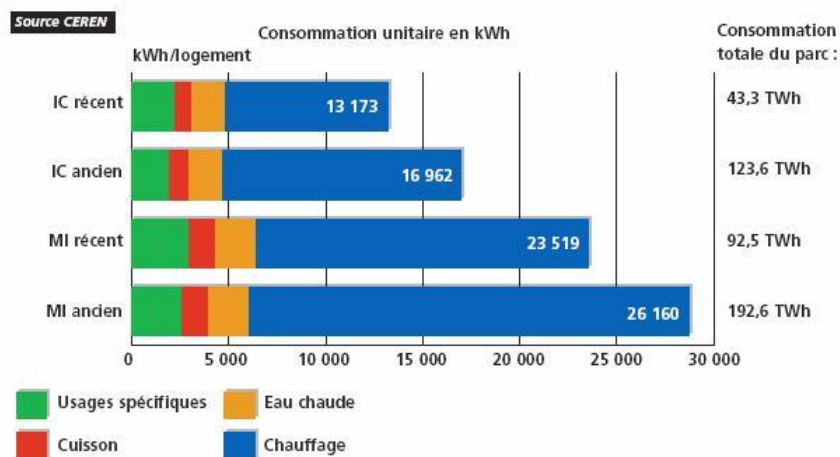


Figure 22 : Consommation en énergie finale par usage des résidences principales en 2002 (d'après « Principaux chiffres ADEME secteur bâtiment »),
IC = Immeubles collectifs, MI = Maison Individuelles

L'énergie géothermique présente des avantages non négligeables qui lui permettent de participer au développement de solutions durables. C'est une énergie :

- locale : Lorsque les ressources sont disponibles et en adéquation avec les besoins en surface, aucun transport d'énergie n'est nécessaire. Cela permet également un développement local.
- peu productrice de gaz à effet de serre.
- régulière : La géothermie n'est pas tributaire des conditions climatiques extérieures : elle dépend uniquement des caractéristiques intrinsèques du sous sol
- renouvelable : Correctement gérée, la chaleur du sous-sol reste stable ou est régénérée (au travers des écoulements souterrains, de manière naturelle ou artificielle).
- économiquement compétitive : La géothermie est une énergie capitalistique : les investissements élevés sont compensés par des coûts d'exploitation faibles

Regain d'intérêt pour les réseaux de chaleur :

Pour utiliser au mieux la chaleur géothermique, les réseaux de chaleur ont un rôle essentiel à jouer car ils permettent d'acheminer la chaleur d'origine renouvelable, tout en affranchissant l'utilisateur final des contraintes éventuelles liées à l'approvisionnement et à la manipulation de la source (le bois par exemple). Parmi l'ensemble des solutions renouvelables disponibles pour alimenter les réseaux de chaleur, la solution géothermie a son rôle à jouer.

S'appuyant sur des installations de production d'énergie de taille significative, ils permettent également une meilleure maîtrise des émissions polluantes (particules, oxydes d'azote, ...). Les réseaux de chaleur desservent aujourd'hui un peu plus d'un million de logements, c'est-à-dire 4% du parc national. Les énergies renouvelables ou de récupération représentent actuellement un peu plus de 20% de la consommation des réseaux. Il y a donc un grand potentiel pour accroître la part de ces énergies dans le bouquet énergétique des réseaux.

La prise de conscience des risques de pollution et de dégradation de la qualité de notre environnement par le biais des émissions de gaz à effet de serre (le protocole de Kyoto) et l'augmentation du prix des hydrocarbures conduisent progressivement à la mise en place de nouveaux objectifs énergétiques, tant au niveau européen, que national ou local.

3.5. PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

Le Grenelle environnement prévoit de porter à au moins 23% en 2020 la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale (ce qui équivaut à un doublement par rapport à 2005). Atteindre cet objectif suppose d'augmenter de 20 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) la production annuelle d'énergies renouvelables d'ici 2020, en portant celle-ci à 37 Mtep. Parmi ces 20 Mtep, 10 millions seront valorisées sous forme de chaleur.

Concernant le partage entre les différentes énergies renouvelables, la prospective dressée par le comité opérationnel énergie renouvelable est la suivante :

- Chaleur : + 10 millions tep
- Électricité : + 7 millions de tep
- Biocarburants : + 3 millions de tep

Concernant la chaleur renouvelable, la répartition est la suivante, en milliers de tep (Figure 23) :

(Equivalent ENR en ktep)	2006	2012	2020	Supplément 2012	Supplément 2020
Bois Individuel	7 400	7 400	7 400	0	0
Biomasse collectif industrie	1 400	3 040	7 600	1 640	6 200
géothermie	220	535	1 300	315	1 080
PAC aérothermiques	160	960	1 050	800	890
Solaire thermique	27	185	927	158	900
UIOM et bois DIB (Part EnR)	400	470	900	70	500
Biogaz	55	60	555	5	500
TOTAL	9 662	12 650	19 732	2 988	10 070

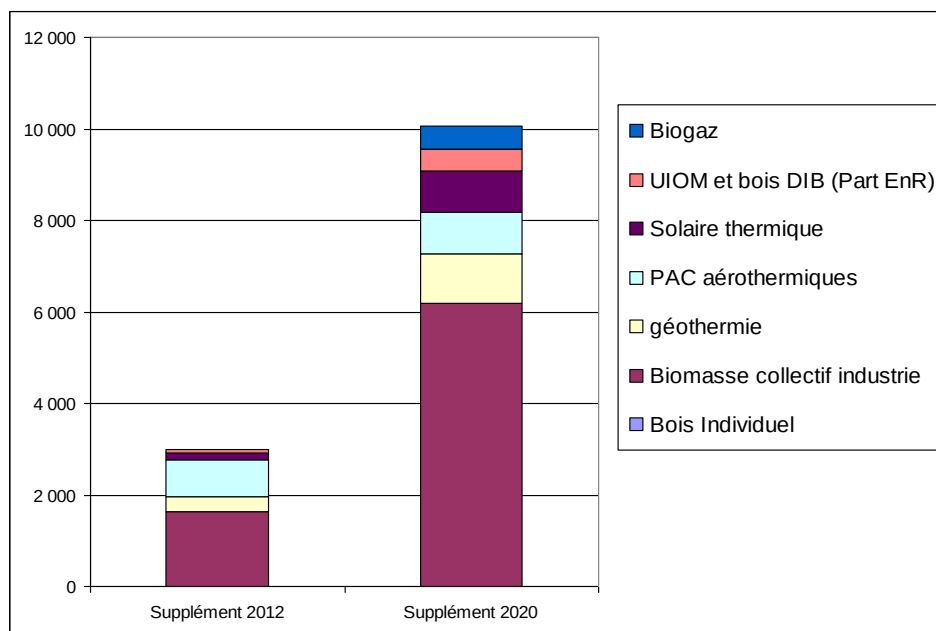


Figure 23 : Répartition de la chaleur renouvelable et supplément à acquérir d'ici 2012 et 2020

Le Comité Opérationnel « énergies renouvelables » (COMOP) du Grenelle environnement a proposé une multiplication par 6 de la production de géothermie et des pompes à chaleur à l'horizon 2020, soit une contribution de 2 millions de tonnes équivalent pétrole représentant 10% de l'augmentation de la production d'énergies renouvelables à cet horizon.

Plus précisément, pour la chaleur géothermique, l'évolution serait la suivante (Figure 24):

(Equivalent ENR en ktep)	2006	2012	2020	Supplément 2020
Réseaux de chaleur géothermiques	130	195	500	370
PAC géothermiques tertiaire et collectif	50	100	250	200
PAC géothermiques individuelles	40	240	550	510
Total géothermie	220	535	1 300	1 080

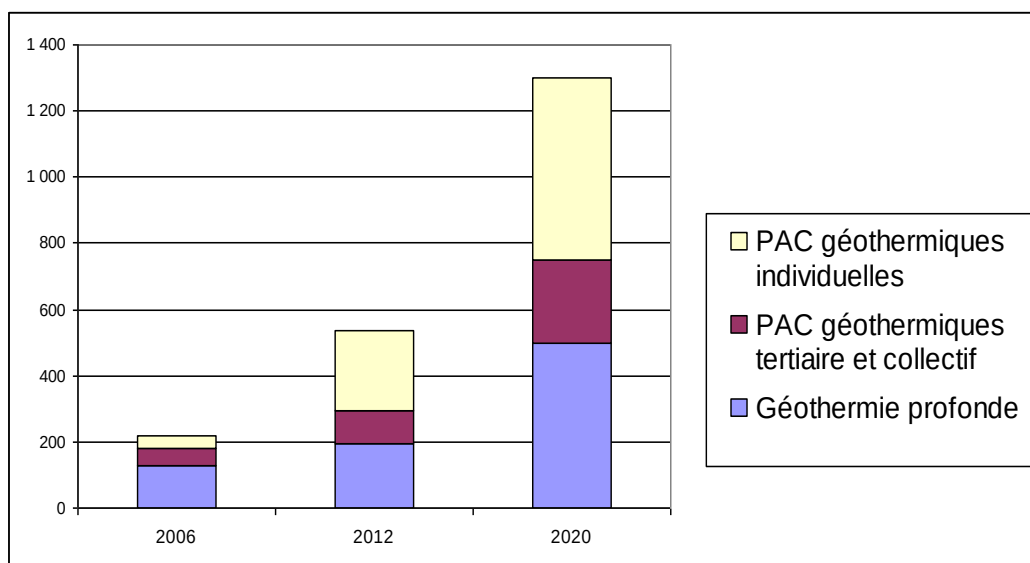


Figure 24 : Objectifs de production de chaleur renouvelable d'origine géothermique en ktep
(Source : COMOP 10)

Les objectifs de développement de la géothermie, proposés par les Comités Opérationnels du Grenelle, ont été fixés par arrêté du 15 décembre 2009 relatif à la programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur. Les objectifs de développement de la production de chaleur à partir d'énergie géothermiques en France (PPI Chaleur 2009-2020) sont les suivants, en termes de production globale (Tableau 1).

	Au 31 décembre 2012	Au 31 décembre 2020
Géothermie profonde	195 ktep	500 ktep
Géothermie intermédiaire	100 ktep	250
Pompes à chaleur individuelles	1 200 ktep	1 600

Tableau 1 : Objectifs de développement de la production de chaleur d'origine géothermique en France

Les nouveaux moyens mis en place comme le Fond Chaleur Renouvelable, pour les opérations du secteur du logement collectif et du tertiaire, ou la modification du crédit d'impôt, pour les particuliers, vont permettre d'accélérer la mise en place d'opérations de géothermie.

Parallèlement à cela, le Grenelle de l'environnement met également en avant le développement des réseaux de chaleur. La PPI chaleur 2009-2020 propose un doublement des équivalent-logement raccordés aux réseaux de chaleur d'ici 2020. La géothermie est capable d'alimenter des réseaux de chaleur, et notamment la géothermie profonde.

3.6. APERÇU DES OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES MONDIAUX, EUROPÉENS, NATIONAUX ET LOCAUX POUR LIMITER L'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

3.6.1. Politique internationale

Les éléments marquants de la politique internationale sont présentés dans le Tableau 2 ci-après :

Échelle	Date	Évènement / Document Clé	Point(s) clé
Mondiale	1992	Sommet de la Terre, à Rio de Janeiro	Texte fondateur de 27 principes « Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement » et adoption d'un programme d'action pour le 21ème siècle, appelé Agenda 21
	1997	3e Conférence des Nations unies sur les changements climatiques à Kyoto	Adoption du protocole de Kyoto
	2002	Sommet de Johannesburg	
	2005	Ratification du protocole de Kyoto	Objectif de - 8% d'émissions de GES en 2008-2012 par rapport à 1990 pour la communauté européenne
	2009	Conférence de Copenhague sur le climat	
Européenne	2003	Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté	Mise en place du Plan National d'affectation des quotas
	2008	Paquet climat-énergie (ou Plan Climat-énergie)	Triple objectif aux pays de l'Union Européenne à l'horizon 2020 : réduire de 20 % leur émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990, porter la part des énergies renouvelables à 20% de leur consommation et réaliser 20 % d'économie d'énergie.
	2001	Directive sur la promotion de l'électricité à partir d'énergies renouvelables 2001/77/CE	Mise en place d'un cadre communautaire pour la promotion des sources d'énergie renouvelables dans la production d'électricité. Elle fixe comme objectif une contribution de 21% des sources d'énergie renouvelables et prévoit des mesures spécifiques concernant, entre autres, l'évaluation de l'origine de l'électricité, le raccordement au réseau et les procédures administratives. La directive 2001/77/CE est abrogée par la directive 2009/28/CE, en vigueur à partir du 1er janvier 2012.
	2009	Directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables 2009/28/CE	La présente directive établit un cadre commun d'utilisation des énergies provenant des sources renouvelables afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir un transport plus propre. À cet effet, des plans d'action nationaux sont définis. Ils prévoient 23% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale française d'ici 2020.

Tableau 2 : Faits marquants de la politique mondiale et européenne en matière de réduction des gaz à effet de serre

3.6.2. Politique nationale

a) Quotas carbone

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, les Etats signataires se voient assigner un objectif de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Différentes mesures en découlent et peuvent concerner le secteur de la géothermie sur aquifères profonds dont le plan national d'affectation de quotas d'émission de CO₂ (PNAQ).

La directive européenne sur les quotas d'émissions (2003/87/CE) a mis en place l'établissement d'un marché de quotas d'émission de gaz à effet de serre au sein de l'Union européenne, à partir du 1er janvier 2005.

Le tonnage d'émission national est réparti par l'État, à travers un plan national d'affectation de quotas (PNAQ), entre les différents exploitants d'installations émettrices de gaz à effet de serre (entreprises des secteurs de l'industrie et de la production d'énergie, dont les grands réseaux de chauffage urbain de plus de 20 MW).

b) Plan National de Lutte contre le Changement Climatique 2000 (PNLCC) :

Il définit une stratégie nationale, axée sur des actions domestiques, sans recourir aux mécanismes de flexibilité prévus par le protocole de Kyoto. Ce plan répartit l'engagement national de stabilisation en matière d'émission de gaz à effet de serre, en attribuant des objectifs différenciés par secteurs : transports, bâtiment, énergie, industrie, agriculture, déchets.

Ce plan devrait permettre à la France de respecter ses engagements internationaux pris dans le cadre du protocole. Mais de nombreuses mesures du PNLCC n'ont pas été mises en œuvre. Des dérives sectorielles ont par ailleurs été constatées dans les secteurs des transports et du bâtiment. C'est pourquoi, pour rendre le PNLCC plus efficace, un Plan Climat a été adopté en juillet 2004.

c) Plan Climat

L'application du PNLCC ayant été insuffisante pour assurer le maintien des émissions françaises de gaz à effet de serre et en particulier pour enrayer l'augmentation des émissions de certains secteurs, le Plan Climat 2004 est un plan d'action qui doit permettre à la France d'atteindre cet objectif. Il reprend certaines mesures du PNLCC et en introduit de nouvelles. Il engage aussi une réflexion sur la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux impacts du changement climatique.

Il retient huit orientations fortes (campagne nationale de sensibilisation et adaptation ; transports durables ; bâtiment et écohabitat ; industrie, énergie et déchets ; agriculture

durable et forêts ; climatisation durable ; plans climats territoriaux et État exemplaire ; recherche, international et prospective après 2010).

Le plan a été réactualisé en 2006 puis en 2009. Le plan Climat 2009 fait la synthèse des mesures prises par la France en termes de lutte contre les changements climatiques et permet d'évaluer l'impact des objectifs du Grenelle sur les émissions de GES⁵.

En effet, la loi POPE (présentée ci-dessous) stipule que "La lutte contre le changement climatique est une priorité de la politique énergétique qui vise à diminuer de 3% par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre de la France. En conséquence, l'État élabore un "plan climat", actualisé tous les deux ans, présentant l'ensemble des actions nationales mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique."

d) Loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique Française (Loi 2005-781 du 13 Juillet 2005 dite loi POPE) et décrets du 23 mai 2006

La Loi POPE est l'aboutissement d'un processus engagé en janvier 2003 avec le Débat national sur les Énergies. La loi fixe les quatre grands objectifs de politique énergétique française et les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir :

- Contribuer à l'indépendance énergétique ;
- Assurer des prix d'énergies compétitifs ;
- Préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre ;
- Garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Ces objectifs induisent les axes d'action suivants :

- Maîtriser la demande d'énergie ;
- Diversifier les sources d'approvisionnement ;
- Développer la recherche dans les domaines de l'énergie.

Cette loi fixe des objectifs chiffrés :

- Diminuer les émissions de gaz à effet de serre de 3 % par an ;
- Porter la production intérieure d'électricité d'origine renouvelable de 16% à 21% de la consommation intérieure d'électricité totale à horizon 2010 ;
- Augmentation de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable à l'horizon 2012.

⁵ Gaz à effet de serre.

e) Le Grenelle de l'environnement

Les autorités françaises ont mis en place en 2007 une démarche originale, le « Grenelle de l'environnement ». Pour la première fois, l'Etat, les collectivités territoriales et les représentants de la société civile ont été réunis afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, en établissant notamment un plan de mesures concrètes recueillant un accord le plus large possible des participants. 34 « comités opérationnels » (COMOP), dédiés chacun à un thème spécifique, ont été constitués afin de traduire les objectifs fixés en mesures concrètes. Plusieurs programmes ont été définis, dont le programme en faveur des énergies renouvelables (COMOP n°10).

Ces discussions ont abouti à la mise en place de deux lois importantes :

- La loi de programmation de mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite « loi Grenelle 1 » a été adoptée par le parlement le 23 juillet 2009 (et promulguée le 3 août 2009). Cette loi reprend les engagements du Grenelle, avec une rédaction adaptée au cadre législatif, et notamment les éléments du Plan National pour le développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale, annoncé par JL. Borloo en 2008. Si la thématique énergie est un point clé pour la géothermie, les thématiques bâtiments et urbanisme vont également influencer sur le développement de cette énergie renouvelable. D'après le site officiel du Grenelle⁶, « L'année 2009 a été riche en réalisations pour le Grenelle environnement. 88% des engagements qui devaient être réalisés avant la fin 2009 ont été tenus ».
- La loi portant engagement national pour l'environnement, dite « loi Grenelle 2 », a été votée par le Parlement le 29 juin 2010. Elle rassemble la quasi-totalité des mesures législatives normatives nécessaires à la mise en œuvre des engagements du Grenelle et ne relevant pas d'une loi de Finance. Elle est décomposée en 6 titres : Bâtiment et Urbanisme, Transports, Énergie, Biodiversité, Risques / Santé / Déchets, Gouvernance et met en place des mesures phares, dans l'ensemble de ces thématiques.

⁶ <http://www.legrenelle-environnement.fr>

4. Principaux mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives pour le développement de la géothermie

4.1. MESURES DE GARANTIES CONTRE LE RISQUE GÉOLOGIQUE

4.1.1. Garantie AQUAPAC®, pour les opérations de Pompes à Chaleur sur aquifères superficiels (cf. Annexe 1)

Pour palier à l'incertitude locale sur la présence et/ou la pérennité de la nappe d'eau souterraine, la garantie Aquapac® a été initiée en 1983 sous l'égide de l'ADEME (AFME à l'époque), d'EDF et du BRGM.

Elle offre une double garantie portant sur les ressources pérennes en eau souterraine :

La garantie « recherche » couvre le risque d'échec consécutif à une ressource en eau souterraine insuffisante pour fournir le débit d'eau nécessaire. Le taux de cotisation pour cette garantie est de 5 %⁷ du montant des ouvrages garantis en recherche ;

La garantie « pérennité » couvre le risque de diminution du débit exploitable à terme qui serait liée à une détérioration prouvée de la ressource (non considérées les variations saisonnières du débit et/ou les cycles hydrologiques statistiquement normaux). La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance. En aucun cas, AQUAPAC n'a pour objet de se substituer aux polices d'assurances dommage-ouvrage ou de responsabilité décennale au titre desquelles les opérateurs doivent normalement être couverts. La durée de cette garantie est de 10 ans⁸, et le taux de cotisation pour cette garantie est de 4 % du montant des ouvrages garantis en pérennité. Cette garantie est limitée aux installations d'une puissance thermique minimale de 30 kW et aux ouvrages de moins de 100 m de profondeur.

La gestion de la garantie est confiée à la SAF environnement⁹. L'instruction des dossiers de demande de garantie et la décision d'octroi de garantie sont décidées par un comité Aquapac composé de trois représentants de : l'ADEME, de EDF et du BRGM. Ce comité se réunit périodiquement, avec la participation de la SAF environnement. Il statue également sur la recevabilité des éventuels sinistres.

⁷ Le taux initial de 10 % a été abaissé à 5 % depuis le 1^{er} septembre 2005.

⁸ La durée initiale de la garantie était de 5 ans et a été portée à 10 ans en 1997.

⁹ SAF environnement, 195 boulevard Saint-Germain, 75007 Paris tél : 01 58 50 76 76

4.1.2. SAF-environnement, pour les opérations de géothermie sur aquifères profonds

Compte tenu du poids financier important d'une opération de géothermie et de la durée élevée d'amortissement des installations, les pouvoirs publics ont mis en place, dès 1981, une procédure de couverture des risques inhérents à cette activité spécifique.

Ce fond, équilibré par les dotations de l'ADEME, les cotisations des assurés et les placements, est géré par la SAF environnement créée à cet effet en 1981.

Deux catégories de risques sont couvertes par ce fond :

- Le risque d'obtenir, lors du premier forage, une ressource géothermale aux caractéristiques de débit et de température insuffisantes, ne permettant plus alors la rentabilité de l'opération. C'est le risque appelé « Court Terme ».
- Le risque de voir cette ressource diminuer ou disparaître avant l'amortissement des installations, ainsi que les risques de sinistres affectant les puits, les matériels et équipements de la boucle géothermale. Ce sont les risques à « Long Terme ».

a) Le risque Court Terme

Le système mis en place garantit, la majeure partie du coût du premier forage en cas d'échec total ou partiel (c'est-à-dire si la ressource géothermale découverte se révèle insuffisante pour assurer une rentabilité minimale des installations). Les critères d'appréciation de succès ou d'échec sont déterminés, en fonction des résultats du premier forage à partir d'une courbe établie après une étude de sensibilité aux variations du couple (débit, température) sur la rentabilité du projet.

En cas d'échec total, le fond prend en charge 65% du coût du forage (après taxes et moins les subventions reçues). Certaines régions, comme la région Ile-de-France, la Provence Alpes Côte d'Azur et l'Alsace, apportent une participation complémentaire de 25%.

Le plafond est fixé à 4 200 000 € par forage.

La souscription au fond Court terme est validée après acceptation du dossier par le comité technique. Le montant de cette souscription est de 3.5% du coût assuré pour les opérations du bassin parisien et varie de 3,5 à 5% pour les autres régions en fonction de la connaissance du risque géologique.

b) Le risque Long Terme

La garantie long terme porte sur Tableau 3) :

- les puits,

- les matériels et les équipements de la boucle géothermale (à condition que l'incident survienne pendant la durée de vie normale du matériel)
- le débit et la température du fluide géothermal, c'est-à-dire la puissance thermique de l'installation.

Qualification du dommage		Compensation financière assurée par le Fond
Incident réparable (baisse de puissance de l'installation provisoire et récupérable)		Coût de la réparation des sinistres (pour autant qu'ils résultent d'une cause géologique ou géothermique) Indemnité d'immobilisation de l'installation consécutive au sinistre
Incident non réparable (baisse de puissance de l'installation irréversible irrécupérable et définitive)	Sinistre partiel ($P > 50\% P_0$)	Proportionnelle à la perte de puissance occasionnée.
	Sinistre total ($P < 50\% P_0$)	Globale, avec plafond fixé à 1 250 000 € et franchise de 100 000€ (en valeur 2008).

Tableau 3 : Sinistres garantis par le fonds de garantie Long Terme

La durée du contrat est de 20 ans.

La souscription au fond est validée si les législations en vigueur et règles techniques sont bien suivies. Le montant de cette souscription est de 12 500€ par an (valeur 2008).

4.2. DÉMARCHE QUALITÉ POUR LES SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES : QUALIFORAGE

L'AFPAC, Association Française pour les Pompes à Chaleur, regroupe un nombre important de fabricants et d'installateurs de pompes à chaleur (<http://www.afpac.org>).

L'ADEME et le BRGM proposent une démarche d'engagement qualité auprès des entreprises de forage pour l'installation des sondes géothermiques. Cette démarche vise à encadrer le marché des pompes à chaleur sur sondes géothermiques verticales grâce à :

- la mise en place d'un « standard de qualité », avec un cahier des charges de référence pour la réalisation de sondes selon les règles de l'art,
- la promotion d'une image de marque optimale de la sonde géothermique verticale.

La gestion de la démarche engagement qualité ainsi que la sélection des entreprises sont pilotées par le BRGM.

La performance de l'ensemble de l'installation de chauffage est conditionnée par la bonne mise en œuvre de la sonde géothermique. Les entreprises adhérant à Qualiforage s'engagent à respecter les règles de l'art pour :

- le dimensionnement des sondes, en fonction notamment de la nature des terrains, et de la présence ou non d'eaux souterraines, pour répondre correctement aux besoins de chauffage,
- le respect de l'espacement minimal de dix mètres entre deux sondes pour éviter le gel du sous-sol,
- les conditions techniques de réalisation avec la mise en œuvre d'une technique de forage adaptée, la mise en place des tubes à l'aide d'un touret pour ne pas endommager la sonde, la cimentation sous pression depuis la base de la sonde,
- le test in-situ de l'étanchéité des sondes,
- le respect de la réglementation et la clarification des responsabilités entre le foreur, le chauffagiste et le client.

Outre la réalisation des ouvrages selon les règles de l'art, les entreprises qui adhèrent à la démarche s'engagent formellement à :

- souscrire une assurance décennale avec la mention « sondes géothermiques »,
- participer à une journée technique d'information organisée par le BRGM,
- déclarer les forages à la DREAL conformément à la réglementation,
- renouveler annuellement la demande d'adhésion à la démarche Qualiforage.

La liste des entreprises de forage adhérant à cette démarche qualité sur l'ensemble du territoire français peut être consultée sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr>, ou sur le site Promotelec (<http://www.promotelec.com>, puis ouvrir la rubrique "Matériels homologués", puis "Produits répondant aux exigences du Label Promotelec habitat neuf").

Pour les forages d'eau et les sondes géothermiques verticales, on peut se référer à la norme AFNOR NFX10-970. Qualiforage s'engage à appliquer cette norme.

4.3. LES AIDES FINANCIÈRES

4.3.1. Pour les particuliers

Le crédit d'impôt développement durable est le principal mécanisme d'aide pour les particuliers, à l'échelon national. Des aides régionales et départementales peuvent cependant venir s'additionner.

Le crédit d'impôt est une disposition permettant aux ménages de déduire de leur impôt sur le revenu une partie des dépenses réalisées pour certains travaux d'amélioration énergétique portant sur une résidence principale. Le taux du crédit d'impôt est fixé chaque année par les lois de finance. Les lois des Finances rectificative pour 2009 et pour 2010, adoptées en décembre 2009, ont modifiés le crédit d'impôt : si le taux de 40% pour les solutions de géothermie n'a pas changé, l'assiette inclut maintenant la pose de l'échangeur.

Le crédit d'impôt porte sur le prix des équipements et des matériaux, hors main d'œuvre (travaux de forage et pose des sondes ou de la pompe par exemple). L'installation doit être réalisée par une entreprise et une facture (ou une attestation fournie par le vendeur ou le constructeur du logement neuf), qui porte la mention des caractéristiques requises dans l'arrêté, doit être établie pour les services fiscaux.

Les particuliers peuvent également profiter du taux réduit de TVA (5,5 %) appliqué par les entreprises qui vendent le matériel et en assurent la pose, à condition que la pompe à chaleur soit installée dans une résidence principale ou secondaire achevée depuis plus de deux ans.

Pour un même contribuable, le montant des dépenses donnant droit au crédit d'impôt en faveur du développement durable ne peut excéder la somme de 8 000 € pour une personne seule et de 16 000 € pour un couple. Ce plafond est majoré pour tenir compte de la situation de famille du contribuable. Ces montants sont majorés de 400 € par personne à charge (dont le premier enfant) au sens des articles 196 à 196 B du code général des impôts. Cette majoration est portée à 500 € pour le second enfant ; 600 € par enfant à compter du troisième.

Des aides particulières peuvent s'ajouter au crédit d'impôt pour des opérations de rénovation (éco prêt à taux zéro, aides de l'ANAH...) (cf. Annexe 2).

En cas d'aide publique supplémentaire à l'investissement (Conseil Régional, Conseil Général, Agence nationale de l'habitat (ANAH), etc...), par exemple pour l'achat d'équipements permettant d'utiliser les énergies renouvelables ou les pompes à chaleur, le calcul du crédit d'impôt se fait sur le coût des équipements déductions faites des aides publiques, selon les modalités qui seront définies dans l'instruction fiscale.

Les espaces info-énergie de l'ADEME permettent d'aiguiller vers les différents types d'aide possibles.

4.3.2. Pour les opérations collectif et tertiaires (dont réseaux de chaleur, hors particulier)

a) Dispositifs incitatifs de l'ADEME adopté le 14/02/08 (Système d'aide ADEME aux énergies renouvelables 2008-2013 : délibération n° 08-2-2 du CA ADEME)

L'ADEME a mis en place un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie permettant de financer :

- des études de faisabilité et des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage,
- des investissements tant pour la réhabilitation d'opérations existantes que pour la réalisation de nouvelles opérations, avec la mise en place du Fonds Chaleur. Les aides sont ramenées au coût du MWh géothermal produit.

Cinq types d'aides sont proposés :

Les aides à la décision

Pour accompagner les organismes et collectivités à étudier l'opportunité d'utilisation des énergies renouvelables, l'ADEME propose des outils méthodologiques et des aides financières, sous forme de subventions, aux organismes des secteurs concurrentiel et non concurrentiel qui font appel à un prestataire pour réaliser plusieurs types d'interventions : pré diagnostic, diagnostic ou étude de faisabilité.

Le système général des aides à la décision¹⁰ s'applique sans dérogation, hormis pour les projets de géothermie dont l'ampleur n'est pas compatible avec les plafonds prévus par le système général. Pour les opérations de géothermie profonde, le plafond de l'assiette est porté à 300 000 €, avec un taux d'aide maximum de 50%.

Les aides à la démonstration

Elles concernent des premières mises en œuvre de technologies issues de la R&D ou de technologies existantes transférées vers des applications nouvelles. L'ADEME propose d'aider ces opérations à un taux déterminé par une analyse économique. Dans tous les cas ce taux sera au maximum de 40% et compatible avec l'encadrement communautaire des aides d'État en faveur de l'environnement en vigueur.

¹⁰ Délibération n° 06-5-3 du Conseil d'administration du 11 octobre 2006

Les opérations exemplaires

Elles visent à introduire et développer, dans un territoire (par exemple, région ou département) ou un secteur d'activités (branches industrielles ou agricoles, par exemple), des technologies, des pratiques ou modes d'organisation permettant de progresser de manière exemplaire dans la voie d'un développement plus " durable ".

La région Nord-Pas de Calais, en partenariat avec l'ADEME, aide au développement de la filière géothermique, en diversifiant la palette des solutions disponibles (projets novateurs et exemplaires) afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et contribuer à l'indépendance énergétique de la région.

Pour la partie Études, les bénéficiaires potentiels de ces aides sont les suivants :

- secteur public : collectivités territoriales, EPCI ;
- habitat social : bailleurs sociaux et privés ;
- organismes consulaires ;
- secteur privé : entreprises et leurs groupements, exploitations agricoles et secteur du tourisme (centre de vacances, hôtel, camping) ;
- associations ;
- porteurs de projets collectifs (2 appartements et plus) et locatifs.

Pour la partie Investissement, sont concernés :

- le secteur public : collectivités territoriales, EPCI ;
- l'habitat social : bailleurs sociaux et privés ;
- les associations.

Ce dispositif, applicable uniquement pour les opérations exemplaires, est contractualisé avec l'ADEME qui intervient, en cumul, à même hauteur financière que la Région (sauf cas particuliers : fonds chaleur notamment).

Les critères d'éligibilité des aides sont les suivants :

Pompe à chaleur sur aquifère superficiel :

- Réinjection dans l'aquifère d'origine,
- COP machine supérieur ou égal à 4 selon norme EN 14511,
- Mise en place d'un comptage d'énergie.

Pompe à chaleur sur champs de sondes géothermiques :

- réalisation d'un test in situ des propriétés thermiques du sol,
- COP machine supérieur ou égal à 3,7 selon norme EN 14511,
- mise en place d'un comptage d'énergie.

Les aides à la diffusion

Outre les aides mentionnées précédemment, par nature très sélectives, l'Agence propose, dans des domaines particuliers, des aides plus systématiques à la diffusion de technologies ou de bonnes pratiques, de manière à surmonter des obstacles de marché, notamment dans la perspective de la baisse importante des coûts attendue de la croissance des volumes commercialisés. Elles visent principalement à structurer les filières concernées.

Le Fonds Chaleur

La mise en place du Fonds Chaleur renouvelable est un des engagements du Grenelle de l'environnement. Il concerne les opérations dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire et de l'industrie. Le principe régissant le calcul des aides du Fond Chaleur est de permettre à la chaleur renouvelable d'être vendue à un prix inférieur d'au moins 5 % à celui de la chaleur produite à partir d'énergie conventionnelle. Le montant exact des aides sera évalué au cas par cas pour les projets de géothermie. Le niveau d'aide proposé peut être atteint par le Fonds Chaleur seul ou en combinaison avec des aides régionales et/ou le FEDER (Fond Européen de Développement Régional) (Cf. paragraphe suivant).

Lancé en décembre 2008, un premier bilan sur les aides octroyées a été publié en octobre 2009. Concernant les projets de géothermie, 29 projets ont été aidés pour un montant total de 19 653 584 € (sur un coût total d'opérations de 90 874 672 €). À cela s'ajoutent les aides spécifiques au développement des réseaux de chaleur qui permettent l'acheminement de réseaux d'énergie géothermique.

Pour continuer à développer les énergies renouvelables, la dotation du fonds « Chaleur renouvelable » est doublée en 2010, passant à 314 millions d'euros contre 154 millions en 2009. Ce fonds devrait permettre de produire 350 000 tonnes équivalent pétrole en 2010 en plus des 250 000 réalisées au cours de cette année.

Pour les opérations sur aquifères profonds, l'octroi de l'aide sera subordonné à l'adhésion de l'opération au Fonds de garantie géothermie de la SAF-environnement.

Plus d'informations...

L'instruction des dossiers par l'ADEME se fait au cas par cas.

Les aides sont généralement allouées en trois versements :

- 50% à la notification
- 30% à la réception de l'installation
- 20% sur présentation des résultats de la première ou des deux premières années selon la taille de l'installation.

Des informations plus détaillées sur le Fonds Chaleur sont disponibles sur le site de l'Ademe, à l'adresse suivante :

<http://www.ademe.fr>

b) Fonds FEDER

Le rôle du FEDER (Fond européen de développement régional) est de promouvoir l'investissement et de contribuer à réduire les déséquilibres entre les régions de l'Union européenne. La recherche, l'innovation, les questions environnementales et la prévention des risques représentent les domaines prioritaires pour les financements FEDER. Chaque région a son propre programme opérationnel (PO FEDER), qui définit les priorités financées par le fonds européen pour la nouvelle programmation 2007-2013.

Le Programme Opérationnel « Compétitivité Régionale et Emploi » 2007-2013 articule son action autour de cinq axes :

- Axe 1 : Recherche et développement, innovation, politique de l'entreprise.
- Axe 2 : environnement, pratiques durables et prévention des risques.
- Axe 3 : Accessibilité.
- Axe 4 : Volet territorial
- Axe 5 : Assistance technique

Ces axes se déclinent en différentes fiches action décrivant les critères d'éligibilité des projets et les démarches à suivre.

Les bénéficiaires potentiels des aides FEDER sont les maîtres d'ouvrage publics et privés. Le guichet instructeur des demandes de subvention se situe à la Préfecture de département.

Des compléments d'informations sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.nordpasdecalais.fr/europe/feder.asp>

c) Certificats d'économie d'énergie (CEE)

La loi POPE met en place un mécanisme déjà éprouvé par ailleurs, en particulier en Angleterre : **les certificats d'économie d'énergie (CEE)**. Ce dispositif repose principalement sur l'obligation pour les fournisseurs d'énergie de déclencher chez leurs clients la réalisation d'économies d'énergie.

Le but des CEE est de relancer les économies d'énergie là où existent des gisements importants, mais diffus et difficiles d'accès (notamment dans les secteurs résidentiels et tertiaires), en mobilisant les acteurs du Marché (offre/demande) sans recourir à des subventions. Il s'agit donc d'un nouveau mécanisme de financement des projets d'efficacité énergétique adapté à un Marché libéralisé venant en complément d'outils publics existants (crédits d'impôt, subventions...).

Grâce à la création d'un véritable Marché de l'efficacité énergétique, le dispositif des CEE devrait ainsi permettre d'injecter 500 à 1 000 millions d'euros dans les trois années à venir. Seule serait définie la période de rodage du dispositif (2006-2008) à l'issue de laquelle 54 TWh d'économie d'énergie devront avoir été réalisés. Cet objectif de 54 TWh représente environ 2,13 TWh d'économie par an, soit 0,14 % de la consommation française annuelle totale, dont 1 TWh pour les réseaux de chaleur ou de froid.

Principe du dispositif CEE : l'obligation d'économie d'énergie s'impose aux principaux opérateurs (EDF, GDF, CPCU, etc.) qui fournissent au moins 400 GWh d'énergie finale par an (ce qui représente une vingtaine d'obligés).

Les fournisseurs de fioul sont également soumis à obligation. Cependant, le Marché étant constitué d'une myriade de petites entreprises, la loi POPE a prévu explicitement une possibilité de regroupement. Pour l'instant, les fournisseurs de carburants ont été exclus du dispositif.

Pour s'acquitter de cette obligation, les opérateurs disposent de trois voies possibles (variantes) :

- Investir sur leur propre patrimoine ;
- Inciter, par de la sensibilisation ou l'octroi d'aides financières, les clients (particuliers, petites entreprises, collectivités locales...) à réaliser des investissements permettant de réaliser des économies en énergie ;
- Acheter des certificats d'économie d'énergie auprès d'autres acteurs (dits éligibles).

C'est pourquoi ce dispositif s'accompagne de la mise en place d'un Marché de CEE.

L'offre de certificats provient de toute personne morale (acteur éligible) présentant un programme d'actions de taille suffisante (au moins 3 GWh d'économies d'énergie finale réalisées par programme, actualisées sur toute la période du programme présenté). Le dossier devra être validé par les DREAL (Direction Régionale de l'environnement de l'Aménagement et du Logement).

La demande de certificats vient des « Obligés », qui doivent atteindre leurs objectifs d'économies d'énergie fixés par décret, en complétant éventuellement leurs propres économies par l'achat de certificats auprès d'acteurs éligibles. Ainsi, ce dispositif ouvre à d'autres acteurs (collectivités publiques et territoriales, notamment), la possibilité de participer à la réalisation d'économies d'énergie.

Le CEE est immatériel, il est inscrit dans un registre national et peut faire l'objet de tractations négociées. Les certificats d'économies d'énergie concernent la géothermie, puisque le bénéfice des CEE a été élargi aux énergies renouvelables pour le chauffage des bâtiments, lorsqu'elles viennent se substituer aux énergies fossiles. C'est le cas de la géothermie sur réseaux de chaleur.

Le dispositif des certificats d'économies d'énergie devrait ainsi constituer une source de financement appréciable permettant de lancer de nouveaux projets de géothermie, sachant que les premières évaluations de projets potentiels ont montré que parmi les actions standards proposées, la géothermie sur réseaux de chaleur offrait les coûts de certificats parmi les moins élevés.

Remarque : Les aides du Fonds Chaleur ne sont pas cumulables, ni avec les Certificats d'Économie d'Énergie (lorsque ceux-ci portent sur le même objet que l'aide du Fonds Chaleur) ni avec les projets domestiques. Par contre, les entreprises ou réseaux de chaleur soumis au PNAQ sont éligibles aux aides du Fonds Chaleur.

Les aides pour la production d'électricité géothermale ne sont pas évoquées dans ce document. De même des aides spécifiques pour les territoires d'Outre-Mer pourraient être évoquées.

Des aides spécifiques pour les réseaux de chaleur existent également, comme la TVA à 5.5% pour les réseaux alimentés à plus de 50% en énergie renouvelable et/ou fatale.

d) Opérations standardisées

Le décret du 23 mai 2006, relatif aux conditions d'application des certificats d'économies d'énergie, a introduit la notion d'opérations standardisées : un calcul forfaitaire, attribué pour une installation nouvelle type, par rapport à une situation de référence. Les économies réalisées permettent aux obligés de revendiquer des certificats. Le dispositif est entré en vigueur le 1^{er} juillet 2006. L'arrêté du 28 juin 2010 définit les opérations éligibles au titre de ce dispositif. A cet effet, il modifie et complète divers arrêtés publiés précédemment.

Des fiches d'opérations standardisées ont été élaborées pour faciliter le montage d'actions d'économies d'énergie, définissant, pour les opérations les plus fréquentes, les conditions d'éligibilité et des montants forfaitaires d'économies d'énergie.

Quatre fiches concernent la géothermie :

- Pompe à chaleur de type eau/eau pour le résidentiel et pour le tertiaire ;
- Raccordement d'un bâtiment résidentiel à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ;
- Raccordement d'un bâtiment tertiaire à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ;
- Production de chaleur renouvelable en réseau (France métropolitaine).

Les fiches types concernant la géothermie sont présentées en Annexe 3.

e) Amortissement fiscal exceptionnel

Les entreprises du tertiaire ont droit à l'amortissement fiscal exceptionnel, qui offre aux entreprises la possibilité de pratiquer un amortissement immédiat, sur douze mois à compter de leur mise en service, des matériels destinés à produire de l'énergie renouvelable (PAC, matériels de télégestion, matériels divers ...).

f) Conclusions

Toutes les mesures progressivement mises en place sont favorables au développement de la géothermie en général, des pompes à chaleur géothermiques utilisées dans le neuf ou dans la rénovation, pour assurer les besoins de chaleur et de rafraîchissement en particulier.

Les pompes à chaleur géothermiques contribuent en effet à la réduction des consommations d'énergies fossiles, à la valorisation énergétique (par leur COP) et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

5. Contexte réglementaire de la géothermie

Les principaux textes réglementaires s'appliquant à l'exploitation des eaux souterraines par forage et à l'exploitation des calories souterraines, donc aux opérations de géothermie sont :

- le code minier et ses textes d'application, qui relèvent du ministre chargé des mines (la réglementation est appliquée par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement : DREAL) ;
- le code de l'environnement qui relève du ministre chargé de l'environnement ;
- le code de la santé publique, qui relève du ministre chargé de la santé ;
- le code général des collectivités territoriales qui relève du ministre de l'intérieur.

5.1. LE CODE MINIER

La géothermie est régie par le code minier¹¹ en vertu de son article 3 qui donne une définition de la géothermie et du régime juridique qui lui est applicable.

Ainsi, « *les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent* », sont considérés comme des mines.

Une substance minière appartient à l'État et non au propriétaire du sol. L'exploitation d'une ressource minière nécessite donc des autorisations accordées par l'État. L'instruction des demandes d'autorisation est effectuée par le préfet du département concerné avec l'appui des DREAL qui se prononcent sur la recevabilité des demandes et sur les garanties financières et techniques exigées par la réglementation en vigueur.

Plusieurs types d'exploitations géothermiques sont distingués : les gîtes à « haute température » (supérieure à 150°C) et les gîtes à « basse température » (inférieure à 150°C)¹².

Des règles spécifiques s'appliquent à chacun, mais des dispositions communes s'appliquent à tous. Un tableau simplifié des différentes situations rencontrées et des régimes juridiques applicables à la géothermie sur sonde est fourni en Annexe 4.

¹¹ Principaux textes d'application du code minier : décret n°78-498 du 28 mars 1978, décrets n°2006-648 et n°2006-649 du 2 juin 2006.

¹² Température mesurée à la surface du sol au cours des forages d'exploration.

5.1.1. Dispositions spécifiques à chaque type d'exploitation géothermique

a) Les opérations haute température (pour mémoire)

Elles sont régies par les titres II, III, IV, VI bis, VIII, IX et X du code minier. Le décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain précise les dispositions du code minier à leur égard :

- **Recherche de mine** (titre II) : lorsque sont entreprises des recherches de mines par une personne autre que le propriétaire des terrains, celle-ci doit alors soit recueillir le **consentement du propriétaire**, soit détenir une **autorisation** du ministre chargé des mines après mise en demeure du propriétaire, soit détenir un **permis exclusif de recherches**. Ce permis est délivré à l'issue d'une procédure d'enquête publique et de mise en concurrence, pour une période de 5 ans au plus renouvelable deux fois, à un explorateur qui jouit de l'exclusivité du droit d'effectuer tous travaux de recherches dans le périmètre dudit permis et de disposer librement des produits extraits à l'occasion des recherches et des essais qu'elles peuvent comporter ;
- **Exploitation de mine** (Titre III) : l'exploitation est soumise à l'octroi d'une **concession** par décret en Conseil d'État (Article 25 du code minier). Cette concession peut être accordée à titre exclusif au demandeur déjà titulaire d'un permis de recherches, à l'intérieur du périmètre de ce permis, pendant la durée de sa validité et sur des substances mentionnées par celui-ci. Une concession est octroyée pour une période ne pouvant pas excéder 50 ans, renouvelable par périodes de 25 ans maximum.

Les procédures d'attribution de ces titres miniers (permis exclusif et concession) sont décrites dans le décret 2006-648 du 2 juin 2006.

b) Les opérations basse température

Les opérations basse température sont soumises à un Titre spécifique du code minier, le titre V (articles 98 à 103), qui institue une procédure plus simple que celle établie par les titres II et III.

Les opérations basse température (régime normal)

- **Recherche de gîte géothermique de basse température** : une demande d'autorisation de recherches doit être adressée au Préfet (article 98 du code minier). Il s'agit de conférer une autorisation de recherches par arrêté préfectoral après enquête publique. Celle-ci, désignée également par l'appellation « permis exclusif de recherches », est accordée, en vertu du décret n°78-498 du 28 mars 1978, après instruction du dossier du demandeur pour une durée maximale de trois ans ;

- **Exploitation de gîte géothermique de basse température** : elle est soumise à l'obtention d'un **permis d'exploitation** minier accordé par le préfet après enquête publique (article 99 du code minier) pour une durée maximale de 30 ans renouvelable par périodes de 15 ans maximum. Le titulaire d'une autorisation de recherches peut seul obtenir, pendant la durée de cette autorisation, un permis d'exploitation aux conditions de l'article 99 du code minier.

Les procédures de demande et d'attribution de ces permis sont détaillées dans les articles 3 à 7 du décret n°78-498 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques.

Les opérations basse température de minime importance (régime dérogatoire)

Texte de référence : article 17 du décret 78-498 pris en application de l'article 102 du code minier.

- **Définition** : *« sont considérées comme des exploitations géothermiques à basse température de minime importance les prélèvements de chaleur souterraine :*
 - *dont le débit calorifique maximal possible calculé par rapport à une température de 20 degrés Celsius est inférieur à 200 thermies par heure (=230 kW)*
 - *ET dont la profondeur est inférieure à 100 mètres ».*
- **Régime réglementaire** : ce type d'exploitation est dispensées de l'autorisation de recherches et du permis d'exploitation prévus aux articles 98 et 99 du code minier ; elles sont en revanche soumises à **déclaration préalable**, au service interdépartemental de l'industrie et des mines (la DREAL aujourd'hui) un mois avant leur réalisation.

Cette formalité doit être effectuée par le maître d'ouvrage ou par le foreur. L'article 17 du décret de 1978 précité indique que l'accomplissement de cette formalité s'effectue « selon les modalités prévues pour les déclarations de fouille en application de l'article 131 du code minier » et par lettre recommandée avec accusé de réception.

Cette déclaration tient lieu de la déclaration prévue à l'article 131 du code minier.

5.1.2. Dispositions applicables à toutes les opérations de travaux de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques

a) Ouverture de travaux de géothermie

L'article 83 du code minier prévoit que *« toute ouverture de travaux d'exploration ou d'exploitation de mines est subordonnée à une **autorisation** administrative, accordée,*

après enquête publique et consultation des communes intéressées, dans les conditions prévues par un décret en Conseil d'Etat ».

Cet article fait partie du Titre IV du code minier qui s'applique à toute opération de géothermie (haute température, basse température et basse température de minime importance).

Les procédures de demande d'autorisation sont précisées par le décret n°2006-649 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines.

Une adaptation du droit minier est en cours sur ce sujet, afin de, s'agissant des installations de minimes importance, limiter les procédures administratives applicables à de simples déclarations.

b) Réalisation d'un forage

L'article 131 du code minier impose la déclaration préalable à la DREAL, par le maître d'ouvrage ou par le foreur, au moins un mois avant sa réalisation, de tout ouvrage, installation ou sondage de plus de 10 mètres de profondeur.

Pour les opérations de géothermie de minime importance, la déclaration préalable prévue par l'article 17 du décret de 1978 tient lieu de déclaration prévue à l'article 131.

La demande d'autorisation au titre de l'article 83 du code minier vaut déclaration au titre de l'article 131.

Le BRGM est chargé « de recueillir, directement ou auprès d'autres détenteurs, valider, archiver et mettre à la disposition des usagers sous une forme appropriée les informations couvrant le territoire national ainsi que le plateau continental, parmi lesquelles celles concernant les fouilles, forages et levés géologiques recueillis en application du code minier » (article 3 du décret n°2004-991 relatif à l'organisation administrative et financière du BRGM et pris en application de l'article 132 du code minier).

En conséquence, la déclaration préalable ainsi qu'un dossier de fin de travaux sont transmis par la DREAL au Service Géologique Régional (SGR) du BRGM, afin de permettre l'inscription des ouvrages dans la Base de données du Sous-Sol (BSS).

Un logiciel (GESFOR), mis en place par le BRGM et distribué aux maîtres d'œuvre, permet de simplifier ces démarches de déclaration.

La BSS est publique (article 132 du code minier) ; toutes les informations (650 000 forages ou ouvrages répertoriés) sont gratuitement accessibles sur le site Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) géré par le BRGM.

Un tableau simplifié des régimes juridiques applicables à la géothermie sur nappe (codes minier et de l'environnement) figure en Annexe 5.

5.2. LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT

Le code de l'environnement ne traite pas de la géothermie en particulier, mais uniquement, dans le cadre de la préservation des ressources en eau et de la prévention des pollutions, des risques et des nuisances, pour certaines activités pouvant avoir un impact sur la ressource en eau.

5.2.1. Réglementation relative à l'eau et aux milieux aquatiques

Les objectifs du code de l'environnement dans le domaine de l'eau sont :

- d'aboutir à la gestion équilibrée de la ressource et la protection de toutes les eaux vis-à-vis des pollutions (article L.211-1 du code de l'environnement) ;
- de mettre en place la « nomenclature Eau » (article L.214-3) : régimes d'autorisation ou de déclaration des ouvrages ou activités susceptibles de représenter un danger ou d'avoir un impact sur la ressource en eau (cf. nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en Annexe 6).

Ces dispositions sont issues de la loi sur l'eau de 1992, puis celle de 2003, lesquelles ont été codifiées depuis dans le code de l'environnement. La législation sur l'eau figure donc désormais au livre II (Milieux physiques), Titre 1^{er} (Eau et milieux aquatiques) de ce code.

a) Procédures d'autorisation et de déclaration s'appliquant aux opérations de géothermie

L'article L.214-1 du code de l'environnement indique que sont soumis à la « nomenclature Eau » :

- les installations non ICPE ;
- les ouvrages, travaux et activités réalisés à des fins **non domestiques** et entraînant des **prélèvements** sur les eaux superficielles ou souterraines, restitués ou non, une modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux, la destruction de frayères, de zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole ou des déversements, écoulements, **rejets** ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants.

L'article L.214-2 du même code définit la « nomenclature Eau » : « Les installations, ouvrages, travaux et activités (IOTA) visés à l'article L.214-1 sont définis dans une nomenclature, établie par décret en Conseil d'Etat » et sont « soumis à autorisation ou déclaration suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets sur la

ressource en eau et les écosystèmes aquatiques compte tenu notamment de l'existence des zones et périmètres institués pour la protection de l'eau et des milieux aquatiques ».

Cet article ajoute que le décret définit les critères de l'usage domestique.

b) Usage domestique – usage non domestique

Aux termes de l'article R. 214-5 du code de l'environnement, constituent un usage domestique de l'eau :

- les prélèvements et rejets destinés à la satisfaction des besoins des personnes physiques et animaux résidents (consommation, hygiène, lavage, productions végétale et animale familiale) ;
- tout prélèvement inférieur à 1 000 m³ /an.

Les usages géothermiques de l'eau ne constituent que rarement des usages domestiques et ils sont donc la plupart du temps concernés par la « nomenclature eau ».

c) La « nomenclature eau »

La nomenclature répartissant les installations ouvrages, travaux et activités (IOTA) soumis à autorisation ou déclaration figure à l'article R. 214-1 du code de l'environnement. Le principe du fonctionnement de la « nomenclature eau », d'après les circulaires d'application¹³ consiste à appliquer soit le régime déclaratif, soit le régime d'autorisation, soit, pour les IOTA entrant dans plusieurs des rubriques, le régime le plus contraignant (c'est-à-dire le régime d'autorisation).

Les opérations de géothermies sont concernées par la « nomenclature Eau » dans différents cas de figure :

- Pour la réalisation d'ouvrages souterrains en lien avec les eaux souterraines ;
- Lorsqu'elles impliquent des prélèvements d'eau souterraine ;
- Lorsqu'elles impliquent des rejets dans le milieu naturel.

Rubriques « réalisation de forages en lien avec les eaux souterraines »

- **Rubrique 1.1.1.0. :** sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en

¹³ Circulaire du 16 mars 2004 et circulaire du 22 octobre 2006

vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau sont soumis à déclaration.

Rubriques « prélèvements »

- **Rubrique 1.1.2.0 :** les prélèvements permanents ou temporaires issus d'un forage, puits ou ouvrage souterrain dans un système aquifère à l'exclusion de nappes d'accompagnement de cours d'eau, par pompage, drainage, dérivation ou tout autre procédé sont soumis à :
 - Autorisation si le volume total prélevé est supérieur ou égal à 200 000 m³/an ;
 - Déclaration si le volume total prélevé est supérieur à 10 000 m³/an mais inférieur à 200 000 m³/an.
- **Rubrique 1.3.1.0 :** les prélèvements dans des zones où des mesures permanentes de répartition quantitative sont instituées (Zones de Répartition des Eaux), sont soumis à :
 - Autorisation si leur débit est supérieure ou égale à 8 m³/h ;
 - Déclaration dans les autres cas.

Rubriques spécifiques « ouvrages géothermiques » (« réalisation de forage » et « rejets »)

- **Rubrique 5.1.1.0 :** la réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie est soumise à :
 - Autorisation si la capacité totale de réinjection est supérieure ou égale à 80 m³/h ;
 - Déclaration si la capacité totale de réinjection est supérieure à 8m³/h mais inférieure à 80 m³/h.
- **Rubrique 5.1.2.0 :** les travaux de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques sont soumis à autorisation.

Ces rubriques renvoient à l'autorisation de travaux régie par le décret 2006-649 d'application de l'article 83 du code minier et une autorisation obtenue au titre du code minier (Art 83) vaut autorisation ou déclaration au titre du code de l'environnement, sous réserve que le dossier de demande comporte les éléments exigés par le code de l'environnement (dispositions définies aux articles R.214-6 dans le cas d'une autorisation et R.214-32 dans le cas d'une déclaration).

Par ailleurs, comme prévu par le décret n°2006-649 du 2 juin 2006, les demandes d'autorisation et les déclarations prévues par le code de l'environnement valent déclaration au titre de l'article 131 du code minier.

Enfin, d'autres rubriques peuvent être appliquées à la géothermie : notamment les rubriques prélèvement (1.2.1.0. et 1.2.2.0) ou rejet (2.2.1.0., 2.2.2.0., 2.2.3.0. et 2.3.2.0) s'appliqueront, le cas échéant. Les prescriptions techniques qui leurs sont assorties sont également applicables (cf. Annexe 6).

Un tableau simplifié des régimes juridiques applicables à la géothermie sur nappe (codes minier et de l'environnement) figure en Annexe 5.

5.2.2. Réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'environnement

Les opérations de géothermie peuvent également être soumises à déclaration ou autorisation au titre de la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'environnement qui figure au code de l'environnement (Livre V "Prévention des pollutions, des risques et des nuisances" - titre 1er "Installations classées pour la protection de l'environnement").

a) Forages

Dans la législation applicable aux opérations relevant des installations classées pour la protection de l'environnement, les forages en eux-mêmes ne font pas l'objet d'une rubrique de la nomenclature des installations classées. Toutefois, ils sont considérés comme des ouvrages connexes des activités soumises à autorisation ou déclaration lorsqu'ils sont nécessaires à leur fonctionnement et à ce titre, ils relèvent de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement définies à l'article L.511-1 du code de l'environnement.

Ainsi, l'autorisation d'exploiter délivrée au titre de la législation des installations classées vaut autorisation au titre de la loi sur l'eau pour les forages.

Les prescriptions applicables à ces ouvrages sont celles fixées par les arrêtés ministériels applicables à l'activité :

- pour les activités soumises à autorisation, il s'agit :
 - de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation ;
 - des arrêtés ministériels plus spécifiques à l'activité ;
 - des dispositions de l'arrêté préfectoral d'autorisation.
- pour les activités relevant du régime déclaratif, il s'agit :
 - des arrêtés ministériels applicables à l'activité (L.512-10 du code de l'environnement) ;

- des prescriptions générales préfectorales (L.512-9 et R.512-51 du code de l'environnement) imposées par secteur d'activité ;
- des dispositions imposées par arrêté préfectoral spécifiquement à l'installation (L. 512-12 et R.512-52 du code de l'environnement).

Il convient de noter que l'arrêté ministériel du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondages, forages, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration, même s'il n'est juridiquement pas applicable, peut constituer une référence utile à prendre en considération.

Par ailleurs, et conformément à l'article L.214-7 du code de l'environnement, les forages nécessaires au fonctionnement d'ICPE *« sont soumis aux dispositions des articles [L. 211-1](#), [L. 212-1](#) à [L. 212-11](#), [L. 214-8](#), [L. 216-6](#) et [L. 216-13](#), ainsi qu'aux mesures prises en application des décrets prévus au 1° du II de l'article [L. 211-3](#). Les mesures individuelles et réglementaires prises en application de la législation des installations classées fixent les règles applicables aux installations classées ayant un impact sur le milieu aquatique, notamment en ce qui concerne leurs rejets et prélèvements »* :

- Article L.211-1, qui a pour objet une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau (cette gestion prend en compte les adaptations nécessaires au changement climatique).
- Article L.212-1 à L.212-11, relatif aux documents de planification par bassin, sous-bassins ... (SDAGE, SAGE...) ;
- Article L.214-8, relatif à l'instrumentation avec des moyens de mesure, à la charge des exploitant ou des propriétaires, des installations permettant d'effectuer à des fins non domestiques des prélèvements en eau superficielle ou des déversements, ainsi que toute installation de pompage des eaux souterraines ;
- Article [L. 211-3](#) alinéa 1^{er} du point II, relatif aux mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau, pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse, d'inondations ou à un risque de pénurie ;
- Articles L.216-6 à L.216-13 imposant des sanctions pénales en cas d'infraction à différentes dispositions prévues pour protéger les intérêts mentionnés à l'article L.211-1 du code de l'environnement (loi sur l'eau).

b) Pompes à chaleur

Le décret n°2010-1700 du 30 décembre 2010 modifiant la colonne A de l'annexe à l'article R.511-9 du code de l'environnement relative à la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, qui est entré en vigueur le 1^{er} janvier

2011, modifie la rubrique 2920 relative aux installations de réfrigération ou de compression.

Un des objectifs est de simplifier cette rubrique et de la recentrer sur les activités à fort impact sur l'environnement que sont les installations de compression de gazoduc.

Désormais, une autorisation n'est demandée que pour les installations de compression fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10^5 Pa et comprimant ou utilisant des fluides inflammables ou toxiques, la puissance absorbée étant supérieure à 10MW. Les pompes à chaleur ne rentrent pas dans cette classification.

5.2.3. Articulation avec le code de la santé publique

Le code de l'environnement prévoit dans son article R214-4 que, « Lorsqu'ils sont situés à l'intérieur du périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public et qu'ils comportent des opérations de sondage ou de travail souterrain, les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à déclaration par la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 sont également soumis à l'autorisation prévue à l'article L. 1322-4 du code de la santé publique.

5.2.4. Bilan sur l'application du code de l'environnement aux opérations de géothermie

Au final, une opération de géothermie avec prélèvement d'eau :

- doit disposer de l'autorisation de travaux délivrée dans les conditions prévues par l'article 2006-649 d'application de l'article 83 du code minier (et qui remplace la déclaration au titre de l'article 131 du code minier) ;
- doit avoir obtenue cette autorisation en fournissant les documents prévus par le code de l'environnement (au titre de la législation « Eau » et/ou de la législation « ICPE ») et par le code de la santé publique, pour que cette autorisation vaille au titre du code de l'environnement ;
- doit être réalisée en conformité avec les prescriptions de l'arrêté du 11 septembre 2003 précisant les conditions techniques de respect de la rubrique 1.1.1.0,
- doit répondre, le cas échéant, aux prescriptions des arrêtés correspondants aux autres rubriques de la nomenclature « Eau » et « ICPE » dans lesquelles entre cette opération, au titre de ses prélèvements, ou rejets, ou réinjections, etc.

5.3. LE CODE DE LA SANTÉ PUBLIQUE

Le code de la santé publique s'applique au cas particulier des forages destinés à un usage alimentaire (notamment eau destinée à la consommation humaine ou utilisée dans l'industrie agroalimentaire).

Si l'ouvrage destiné à un usage thermique est également utilisé pour une application entrant dans ce champ, il tombe sous le coup du code de la santé publique.

Ainsi, lorsque le prélèvement d'eau dans le milieu naturel est destiné à la consommation humaine ou à une entreprise agroalimentaire, il est soumis à autorisation (articles R1321-6 à R1321-10 et R1322-4 du code de la santé publique).

Le captage doit respecter les prescriptions énoncées par son arrêté d'autorisation spécifique, pris en application de la législation sur l'eau et du code général de la santé. Il doit éviter les risques de pollution par retour d'eau (double réseau ou manchon souple). Les matériaux utilisés ne doivent pas être susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.

Pour un usage alimentaire et/ou sanitaire collectif (captage d'alimentation en eau potable - AEP), le captage et la zone affectée par le prélèvement est protégé par des prescriptions spécifiques détaillées dans les différents périmètres de protection du captage :

- Périmètre de protection immédiate : surface clôturée de quelques ares ;
- Périmètre de protection rapprochée : zone d'appel du captage dont la surface varie suivant le type d'aquifère (nappe captive ou aquifère karstique...) ;
- Périmètre de protection éloigné : zone d'alimentation du captage.

5.4. LE CODE GÉNÉRAL DES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES

Depuis le 1er janvier 2009, tout particulier utilisant ou souhaitant réaliser un ouvrage de prélèvement d'eau souterraine (puits ou forage), à des fins d'**usage domestique** doit **déclarer** cet ouvrage ou son projet en mairie. Les informations relatives à cette déclaration sont tenues à disposition du représentant de l'État dans le département et des agents des services publics d'eau potable et d'assainissement (décret 2008-652 du 2 juillet 2008 pris en application de l'article L. 2224-9 du code général des collectivités territoriales).

Une fiche déclarative est définie dans l'arrêté de 17 décembre 2008 ; elle est fournie en Annexe 7 et est disponible au téléchargement sur le site Internet : <http://www.foragesdomestiques.developpement-durable.gouv.fr>.

6. Conclusion

Les pompes à chaleur géothermiques et les autres techniques de géothermie contribuent à la réduction des consommations d'énergies fossiles, à la valorisation énergétique (par leur COP) et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Toutes les mesures progressivement mises en place sont favorables au développement de la géothermie. Les aides financières, garanties et démarches qualités sont variées (crédit d'impôt, éco-prêt à taux zéro, dispositifs incitatifs de l'ADEME, fonds Feder, Aquapac, Qualiforage, etc...). Dans tous les cas, il est judicieux de se renseigner auprès de l'espace info-énergie de l'ADEME.

Les principaux textes réglementaires s'appliquant à l'exploitation des eaux souterraines par forage et aux opérations de géothermie sont le code minier et ses textes d'application, le code de l'environnement, le code de la santé publique et le code général des collectivités territoriales.

7. Bibliographie

OUVRAGES :

ADEME, ARENE IDF, BRGM (2008) – Guide technique pompe à chaleur géothermique sur aquifère, Conception et mise en œuvre, 72 p.

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.

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

SITES INTERNET :

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

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

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

Code minier, code de l'environnement, code de la santé public, code général des collectivités territoriales : <http://www.legifrance.gouv.fr>

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

Grenelle de l'environnement : <http://www.legrenelle-environnement.fr>

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

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

8. Annexes

Annexe 1

Procédure AQUAPAC



**GARANTIE SUR LA RESSOURCE
EN EAU SOUTERRAINE
A FAIBLE PROFONDEUR
UTILISEE
A DES FINS ENERGETIQUES**

Les nappes d'eau souterraines de faible profondeur
recèlent un potentiel énergétique utilisable grâce aux pompes à chaleur.

Cependant, il peut exister une incertitude sur les conditions d'utilisation de la ressource
naturelle qui dépend des caractéristiques géologiques locales.

La procédure **AQUAPAC**, créée par l'**ADEME**, le **BRGM**, et **EDF** prend en charge la
couverture financière de ce risque géologique,

Gestion administrative et financière du système de garantie :

Fax : 01 58 50 06 80

SAF-ENVIRONNEMENT
195, boulevard Saint Germain
75007 PARIS

Tél. : 01 58 50 76 76 - Fax : 01 58 50 06 80 - e-mail : herve.raimbault@caissedesdepots.fr

AQUAPAC est une assurance qui couvre les risques **géologiques** liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général à **moins de 100 m de profondeur**, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Cette assurance s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique **supérieure à 30 KW**. C'est donc une double garantie, dont les deux aspects sont indissociables :

- **La garantie de recherche** couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu,

- **La garantie de pérennité** couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation.

AQUAPAC assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eau-eau et sa réinjection.

La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance.

Le Maître d'Ouvrage conserve l'entière responsabilité du respect de la réglementation, du choix des bureaux d'études ou entreprises, et de la réalisation de l'opération.

En aucun cas, **AQUAPAC** n'a pour objet de se substituer aux polices d'assurances dommage-ouvrage ou de responsabilité décennale au titre desquelles les opérateurs doivent normalement être couverts.

BENEFICIAIRES DE LA GARANTIE AQUAPAC

Les Maîtres d'ouvrages ou leurs mandataires (bureaux d'études, entreprises, prestataires de services, exploitants) désireux de se prémunir vis-à-vis des aléas géologiques liés à l'utilisation énergétique de l'eau souterraine à des fins de **chauffage** et/ou de **climatisation** peuvent souscrire la garantie **AQUAPAC**.

Cette garantie s'applique à tous les secteurs économiques: habitat, tertiaire, industriel ou agricole, qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou existants, et quelle que soit la puissance de l'installation thermique.

ATTRIBUTION DE LA GARANTIE

Un Comité composé des représentants de l'ADEME, du BRGM, et d'EDF, assisté de la SAF-Environnement, décide de l'attribution, ou non, de la garantie, après examen d'un dossier que le requérant aura déposé auprès de la Saf-Environnement .

Ce dossier, dont un modèle peut être demandé auprès de la Saf-Environnement doit comprendre :

- **L'identification** de l'opération concernée, sa localisation et ses différents acteurs,

- **Une fiche descriptive** des besoins thermiques, et du mode d'évaluation des besoins en eau,

- **Une étude de faisabilité du projet** comportant une évaluation des contraintes réglementaires et environnementales, les caractéristiques de la ressource, le mode de captage et de réinjection, les essais et mesures hydrogéologiques prévus, la description de l'installation et des ouvrages de sous-sol et de surface,

- **les éléments économiques** comprenant les coûts prévisionnels d'investissement et de fonctionnement : études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, échangeur, PAC,

- **Le montant des investissements** pour lesquels la garantie est demandée, qui devra être clairement établi.

Si l'avis du Comité **AQUAPAC** est favorable, un contrat est alors signé entre la SAF et le Maître d'Ouvrage qui verse **en une seule fois, et au moment de la souscription de chaque garantie**, les cotisations et commissions forfaitaires suivantes :

- *Pour la garantie de recherche :*

- une cotisation égale à **5%** du montant des ouvrages garantis en recherche,

- *Pour la garantie de pérennité :*

- une cotisation égale à **4%** du montant des ouvrages garantis en pérennité,

FONCTIONNEMENT DE LA GARANTIE

Garantie de recherche

Risques couverts

Le risque couvert est celui de l'échec quant à la découverte du débit d'eau maximal de production fixé dans le contrat de garantie comme suffisant au fonctionnement correct des installations, à partir des éléments techniques fournis.

Le risque couvert est aussi celui de l'échec quant à la possibilité de réinjection du débit.

Montant garanti en recherche

Le montant garanti en recherche, fixé dans le contrat, est égal au coût réel des études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, désignés dans la demande de recherche, (plafonné au montant prévisionnel), déduction faite des subventions reçues.

Lorsque plusieurs forages sont prévus, le contrat est établi pour le premier, et étendu par avenant au suivant après chaque constat de succès.

Fonctionnement de la garantie

La garantie prend effet dès la signature du contrat et le versement des primes de la garantie de recherche.

Le Maître d'Ouvrage peut alors faire réaliser les travaux de forage.

Il doit informer la Saf-Environnement de la date des essais et de la date de réception des ouvrages.

La capacité des ouvrages est mesurée à la fin des travaux, et le rapport de fin de forage avec les résultats des essais hydrogéologiques doit être envoyé à la Saf-Environnement

Evaluation du résultat du forage

Suivant la valeur du débit mesuré au cours des essais, il y aura succès, échec partiel ou échec total :

- *Succès* : le débit trouvé est supérieur ou égal au débit contractuel ;
- *Echec total* : le débit trouvé est inférieur à la moitié du débit contractuel ;
- *Echec partiel* : le débit trouvé est compris entre ces deux valeurs.

En cas de succès le demandeur reçoit alors l'appel de cotisation pour la garantie de pérennité, qui est accordée pour dix ans à partir de la date de réception du paiement de la cotisation correspondante.

Calcul de l'indemnité « recherche »

En cas d'échec total, le Comité AQUAPAC déclenche le versement de l'indemnité, égale au montant garanti.

En cas d'échec partiel, le Maître d'ouvrage peut néanmoins exploiter la ressource en son état et bénéficier alors de la garantie de pérennité :

- la nouvelle valeur du débit exploitable est définie par un avenant au contrat de garantie ;
- le montant de l'indemnité est alors proportionnel au déficit en eau sur le débit garanti initial

Garantie de pérennité

Risques couverts :

Sous réserve d'un entretien correct des ouvrages et des équipements d'exploitation, attesté par un carnet de maintenance ou des factures de prestations de services, la garantie de pérennité couvre les risques suivants :

a) *diminution des débits d'exhaure ou de réinjection* au-dessous de la valeur garantie :

- sinistre partiel : le débit diminue et atteint une valeur comprise entre la valeur garantie et la moitié de cette valeur.

- sinistre total : le débit atteint une valeur inférieure à la moitié du débit de garantie

b) *dommages* aux matériels de puisage et de réinjection et/ou aux équipements du circuit primaire, y compris l'échangeur, occasionnés par des changements survenus dans les caractéristiques de la ressource dus à des causes naturelles ou de voisinage.

Durée de la Garantie

La garantie est accordée pour une période de **10 ans** à partir de la date effective de mise en service.

Elle peut être différée en cas de forage d'essai. Si ce délai dépasse 6 mois, un nouvel essai de pompage devra être effectué.

Montant garanti en pérennité

Le montant garanti, fixé par contrat, est égal au coût de l'ensemble des ouvrages primaires neufs : forages, pompes, matériels de surface, y compris l'échangeur eau-eau. Ces coûts s'entendent toutes subventions déduites.

Pour tenir compte de l'amortissement de l'installation, ce montant garanti diminue de 5 % par semestre écoulé.

En cas d'échec total, le coût prévisionnel des travaux nécessaires à la restauration fonctionnelle de l'installation, peut être également garanti.

Calcul de l'indemnité « pérennité »

L'assiette **A** de l'indemnisation est calculée ainsi :

a) *Diminution des débits d'exhaure ou de réinjection* :

- en cas de sinistre partiel, **A** = la fraction du montant garanti proportionnelle au déficit en eau,
- en cas de sinistre total, **A** = montant garanti

b) *Dommages* :

- en cas de poursuite de l'exploitation, **A** = coût réel des travaux de remise en état, plafonné au montant garanti,
- en cas d'abandon de l'exploitation, **A** = montant garanti.

Fonctionnement de la garantie

En cas de constat de modification des caractéristiques de la ressource de nature à perturber l'exploitation, le maître d'ouvrage ou l'exploitant adresse une déclaration de sinistre à la Saf-Environnement.

Des essais hydrogéologiques peuvent alors être réalisés par le maître d'ouvrage, en accord avec le Comité qui pourra mandater un expert.

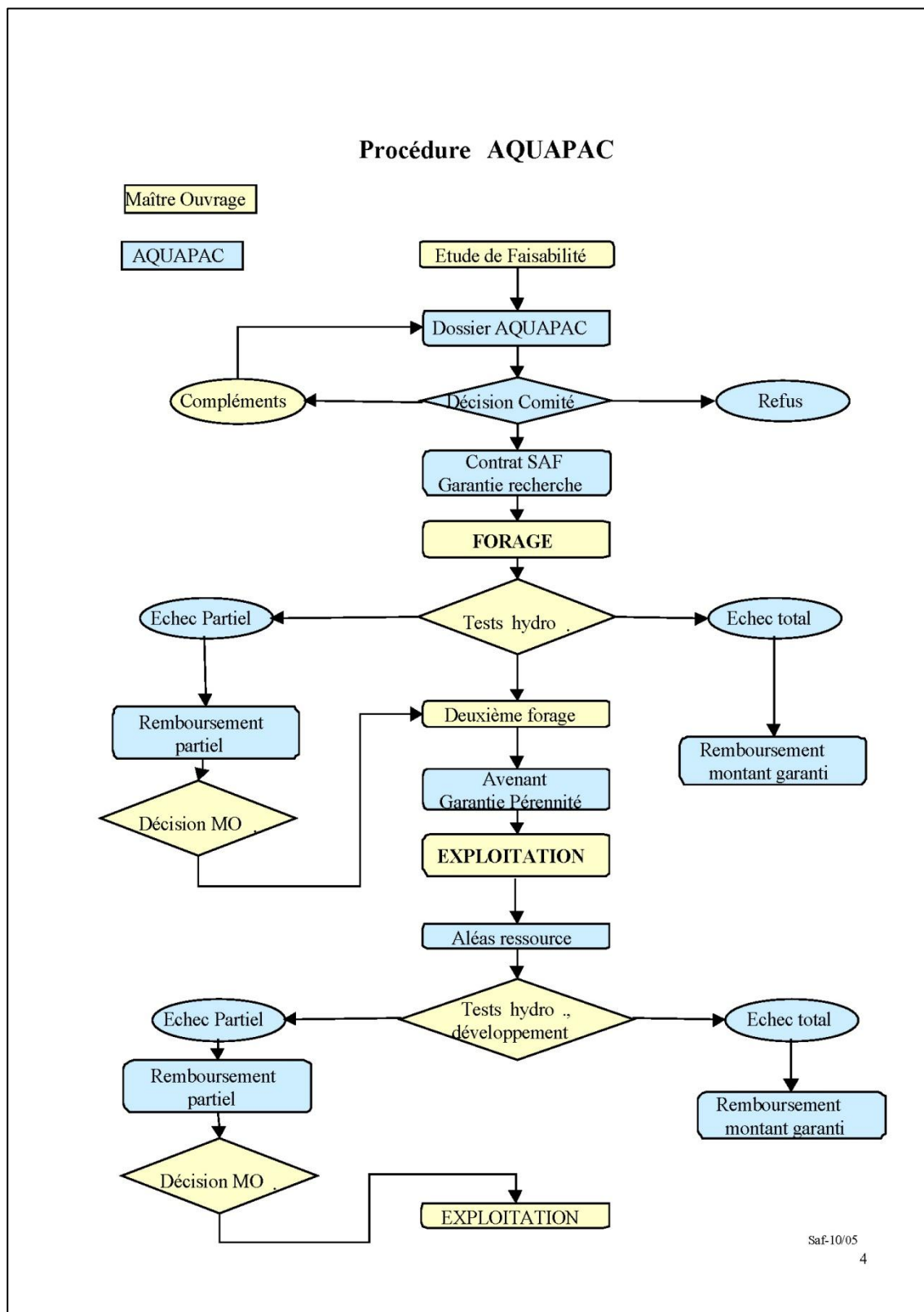
Ensuite, le Comité apprécie la recevabilité du sinistre et déclenche, s'il y a lieu, le paiement des indemnités.

Le Comité se réserve toutefois la possibilité en lieu d'indemnisation de restaurer le forage ou l'installation

PLAFOND

Les indemnisations sont plafonnées à ~~115 000 Euros~~ par sinistre.

140 000 Euros



Annexe 2

Aides pour les opérations de rénovation

Date de mise à jour : avril 2009

Synthèse

Différentes aides existent pour la modification de votre système de chauffage et l'installation d'un système de géothermie : Si le logement a plus de deux ans, bénéficiez de la TVA à 5.5%. Comme pour le neuf, le crédit d'impôt permet d'économiser jusqu'à 40% de l'investissement pour l'achat de la pompe à chaleur.

A cela peuvent s'ajouter des aides de l'ANAH (Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat) sous conditions de revenus, et des aides des régions ou des collectivités locales.

Enfin sachez que vous pouvez financer votre investissement, pour votre résidence principale construite avant 1990, avec un Eco prêt à taux zéro, en empruntant jusqu'à 30 000€ à une banque qui a signé une convention avec l'état. Ce dernier est cumulable avec le crédit d'impôt pour le développement durable sous conditions de revenus.

Pour connaître l'ensemble des aides disponibles, n'hésitez pas à vous adresser à l'Espace Info Energie de l'ADEME le plus près de chez vous !

Aides

Aides de l'ANAH (Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat)

Pour les propriétaires occupants : L'installation de système à usage domestique utilisant les énergies nouvelles ou renouvelables comme la géothermie figurent dans la liste des travaux éligibles.

Les subventions sont accordées aux propriétaires qui occupent leur logement mais qui ont des revenus limités.

Les travaux éligibles doivent de plus :

- être d'un montant minimum de 1 500 €
- être commencés après le dépôt de la demande de subvention.
- être réalisés par des professionnels du bâtiment.

Chaque projet sera étudié au cas par cas en étudiant le montage économique, technique et social. L'attribution de l'aide n'est pas systématique.

Les taux de référence nationaux maximum sont indiqués ci-dessous, ils peuvent varier en fonction du contexte local.

➡ TAUX MAXIMUM DE SUBVENTION			
	Plafonds de travaux par logement	Taux applicables aux propriétaires sous plafonds de ressources « de base »	Taux applicables aux propriétaires sous plafonds de ressources « prioritaires »
Cas général	13 000 €	20 %	35 %
OPAH rénovation urbaine, revitalisation rurale ou copropriétés dégradées		30 %	35 %

Source : ANAH

Dans le cadre de la politique de l'ANAH en faveur de la lutte contre la précarité énergétique, une éco-prime de 1 000 € peut venir compléter cette subvention, si :

- Le logement doit être classé en étiquette F ou G à l'occasion de l'évaluation thermique effectuée avant les travaux
- Le gain énergétique obtenu après réalisation des travaux doit être d'au moins 30 % sur la consommation conventionnelle.

Pour les propriétaires bailleurs : Les propriétaires qui louent ou souhaitent louer un bien immobilier en réalisant ou non des travaux peuvent conventionner leur logement, obtenir un rabattement fiscal et également obtenir une subvention supplémentaire de l'ANAH, ou éco-prime de 2000€.

Conditions d'obtentions :

- Le diagnostic de performance énergétique après travaux doit attester d'un gain d'au moins deux classes d'étiquette « énergie ».
- Le niveau de performance énergétique atteint doit être au minimum l'étiquette C ou D suivant le contexte local.
- Le logement doit faire l'objet d'un conventionnement social ou très social ou d'un financement au titre de la sortie d'insalubrité ou de péril.

Pour les copropriétés : Les syndicats de copropriétés pour des travaux sur les parties communes peuvent également obtenir des aides de l'ANAH, dans le cas où 75 % des « lots » sont des habitations principales et où le logement a été achevé depuis au moins 15 ans à la date où la décision d'accorder la subvention est prise.

Le taux de subvention est de 35 % dans la limite d'un plafond de 13 000 € par lot d'habitation pour les immeubles en OPAH copropriété dégradée et de 50 % hors plafond de travaux pour les immeubles en plan de sauvegarde ou en OPAH copropriété présentant des pathologies lourdes.

Les aides de l'ANAH sont cumulables avec l'éco-prêt et le crédit d'impôt en faveur des économies d'énergie et du développement durable.

ANAH	Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat
OPAH	Opération programmée d'amélioration de l'Habitat
ANIL	Agence Nationale pour l'Information sur le Logement

L'Eco Prêt à taux zéro

Fixé par les décrets et l'arrêté du 30 mars 2009

L'Eco Prêt à taux zéro est destiné à financer des travaux d'amélioration de la performance énergétique des logements achevés.

Conditions d'obtentions :

- Sans condition de ressources
- Logement existant construit avant le 1er janvier 1990
- Logement occupé à titre de résidence principale.

Les travaux doivent être composés d'au moins 2 travaux parmi une liste prédéfinie et présentée ci-dessous ou doivent permettre l'amélioration de la performance énergétique globale du logement.

Catégories de travaux éligibles	Caractéristiques et performances
1. Isolation de la toiture Planchers de combles perdus Rampants de combles aménagés Toiture terrasse	$R \geq 5 \text{ (m}^2\cdot\text{K) / W}$ $R \geq 4 \text{ (m}^2\cdot\text{K) / W}$ $R \geq 3 \text{ (m}^2\cdot\text{K) / W}$
2. Isolation des murs donnant sur l'extérieur Isolation par l'intérieur ou par l'extérieur	$R \geq 2,8 \text{ (m}^2\cdot\text{K) / W}$
3. Remplacement des fenêtres et des portes-fenêtres donnant sur l'extérieur et remplacement éventuel des portes donnant sur l'extérieur Fenêtre ou porte-fenêtre Fenêtre ou porte-fenêtre munies ou non de volets Seconde fenêtre devant une fenêtre existante Porte donnant sur l'extérieur (uniquement si réalisé en complément des fenêtres) Réalisation d'un sas donnant sur l'extérieur (pose devant la porte existante d'une 2ème porte) (uniquement si réalisé en complément des fenêtres)	$U_w \leq 1,8 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ $U_{jn} \leq 1,8 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ $U_w \text{ ou } U_{jn} \leq 2 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ $U_w \leq 1,8 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ $U_w \text{ ou } U_{jn} \leq 2 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$
4. Installation ou remplacement d'un système de chauffage (associé le cas échéant à un système de ventilation performant) ou d'une production d'eau chaude sanitaire (ECS) Chaudière + programmeur de chauffage PAC* chauffage + programmeur de chauffage PAC* chauffage + eau chaude sanitaire + programmeur de chauffage	à condensation (ou basse température, mais seulement en bâtiment collectif quand l'installation d'une chaudière à condensation est impossible*) $\text{COP} \geq 3,3^{**}$ $\text{COP} \geq 3,3^{**}$
5. Installation d'un système de chauffage utilisant une source d'énergie renouvelable Chaudière bois + programmeur Poêle à bois, foyer fermé, insert de cheminée intérieur	classe 3 au moins rendement $\geq 70 \%$
6. Installation d'une production d'eau chaude sanitaire utilisant une source d'énergie renouvelable Capteurs solaires	certification CSTBat, Solar Keymark ou équivalent

** Pompes à chaleur géothermique à capteur fluide frigorigène (sol / sol ou sol / eau) : $\text{COP} \geq 3,3$ pour une température d'évaporation de -5°C et une température de condensation de 35°C .

Pompes à chaleur géothermique de type eau glycolée / eau : $\text{COP} \geq 3,3$ pour des températures d'entrée et de sortie d'eau glycolée de 0°C et -3°C à l'évaporateur et des températures d'entrée et de sortie d'eau de 30°C et de 35°C au condenseur.

Pompes à chaleur géothermique de type eau / eau : $\text{COP} \geq 3,3$ pour des températures d'entrée et de sortie d'eau de 10°C et 7°C à l'évaporateur et de 30°C et 35°C au condenseur.

Le montant du prêt est à priori limité au montant des travaux, plafonné à 30 000 € pour le choix de 3 catégories.

L'Eco Prêt peut se cumuler avec :

- les prêts et aides suivants :
 - un prêt conventionné (CCH : R. 331-72),
 - un prêt à 0% (lorsque pour financer une acquisition accompagnée de travaux, un prêt à 0% est octroyé, le coût total de l'opération ne comprend pas les travaux financés par l'Eco Prêt),
 - les aides de l'ANAH,

- *les aides des collectivités territoriales en faveur du développement durable,*
- *les éco-prêts liés au Livret de développement durable, mis en place par les banques en 2007 suite à la transformation du CODEVI en livret de développement durable, pourront être utilisés comme prêt complémentaire à l'Eco Prêt ou pour financer des travaux non éligibles à l'Eco Prêt ;*
- *certains dispositifs fiscaux :*
 - *le crédit d'impôt en faveur du développement durable pour les ménages dont les revenus fiscaux de référence de l'avant dernière année précédant l'offre d'Eco Prêt (N-2) n'excèdent pas 45.000 € et pour les années 2009 et 2010 (loi de finances rectificative pour 2009 : art. 8 / CGI : art. 44 quater U I 7° modifié).*

Pour les autres ménages, le crédit d'impôt en faveur du développement durable ne sera possible que pour les travaux non financés par l'Eco Prêt ;

- *le crédit d'impôt sur les intérêts d'emprunt pour l'acquisition pour les propriétaires occupants*
- *la déduction de charges pour la détermination des revenus fonciers pour les propriétaires bailleurs.*

<http://ecocitoyens.ademe.fr/category/arborescence/financer-mon-projet/renovation/-savoir>

http://www.rendezvous-habitatdurable.fr/IMG/pdf/Guide_Aides_Anah.pdf

www.anil.org

<http://192.6.3.209/servlet/getBin?name=5A194438113D416C385286C2E1DD2BEF1239023443879.pdf>

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/textes/credit-impot-2005.htm>

Annexe 3

Fiches types d'opération standardisées concernant la géothermie (Annexe 1 de l'arrêté du 28 juin 2010)



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° **BAR-TH-03**

Pompe à chaleur de type eau / eau

1. Secteur d'application

Bâtiments résidentiels existants.

2. Dénomination

Mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) de type eau / eau.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

Coefficient de performance (COP), mesuré selon la norme EN 14511-2 pour des températures d'entrée et de sortie d'eau de 10° C et 7° C à l'évaporateur, et de 30° C et 35° C au condenseur, égal ou supérieur à 3,4.

La pompe à chaleur a une certification NF PAC ou un label EHPA ou l'Eco-Label européen ou des caractéristiques de performance et de qualité équivalentes établies par un organisme établi dans l'Espace économique européen et accrédité selon les normes NF EN ISO/CEI 17025 et NF EN 45011 par le Comité français d'accréditation (COFRAC) ou tout autre organisme d'accréditation signataire de l'accord européen multilatéral pertinent pris dans le cadre de European co-operation for Accreditation (EA), coordination européenne des organismes d'accréditation.

Mise en place réalisée par un professionnel.

Pour les actions engagées à partir du 01/01/2011, l'installateur doit obligatoirement être signataire de la charte QUALIPAC ou disposer d'une qualification professionnelle dans le domaine des pompes à chaleur géothermiques.

4. Durée de vie conventionnelle

16 ans

4 août 2010

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Texte 3 sur 128



5. Montant de certificats en kWh cumac

Pour une maison individuelle :

COP	Zone climatique	Montant unitaire en kWh cumac		Facteur correctif	Surface habitable en m ²
3,5 > COP ≥ 3,4	H1	160 000	X	0,2	< 35
	H2	130 000		0,4	35 - 60
	H3	84 000		0,7	60 - 80
4 > COP ≥ 3,5	H1	160 000		0,9	80 - 100
	H2	130 000		1,1	100 - 130
	H3	87 000		1,4	> 130
COP ≥ 4	H1	170 000			
	H2	140 000			
	H3	91 000			

Pour un appartement :

COP	Zone climatique	Montant unitaire en kWh cumac
3,5 > COP ≥ 3,4	H1	64 000
	H2	53 000
	H3	35 000
4 > COP ≥ 3,5	H1	67 000
	H2	54 000
	H3	36 000
COP ≥ 4	H1	69 000
	H2	57 000
	H3	38 000



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° BAT-TH-13

Pompe à chaleur de type eau / eau

1. Secteur d'application

Bâtiment tertiaire : locaux du secteur tertiaire existants, de surface totale inférieure à 5000 m².

2. Dénomination

Mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) de type eau / eau sur un système de chauffage électrique direct.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

Coefficient de performance (COP) mesuré selon la norme EN 14511 pour une température d'évaporation correspondant au point nominal de la norme et une température de sortie d'eau de 35°C égal ou supérieur à 3,3.

Mise en place réalisée par un professionnel.

4. Durée de vie conventionnelle

20 ans.

5. Montant de certificats en kWh cumac

Montant unitaire en kWh cumac / m²					X	Surface en m²	X	Zone climatique	Facteur correctif
Branche d'activité	3 ≤ COP < 3,3 <i>uniquement pour des actions engagées avant le 01/01/2008</i>	3,3 ≤ COP < 3,5	3,5 ≤ COP < 4	4 ≤ COP		S		H1	1,1
Bureaux	1 000	1 100	1 100	1 200				H2	0,9
Enseignement	680	710	720	760				H3	0,6
Commerces	760	790	820	850					
Hôtellerie – Restauration	820	860	880	930					
Santé	950	990	1 000	1 100					



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° **BAR-TH-37**

Raccordement d'un bâtiment résidentiel à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ou de récupération

1. Secteur d'application

Appartements existants.

2. Dénomination

Raccordement d'un appartement existant à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ou de récupération.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

Descriptif du réseau de chaleur à fournir : moyens de production et énergies utilisées sur les 3 dernières années (en précisant les éléments spécifiques aux énergies renouvelables ou de récupération).

Mise en place réalisée par un professionnel.

Application de cette opération non cumulable avec l'application de l'opération standardisée RES-CH-01 « Production de chaleur renouvelable ou de récupération en réseau (France métropolitaine) ».

4. Durée de vie conventionnelle

20 ans

5. Montant de certificats en kWh cumac

Montant unitaire pour un appartement en kWh cumac		
Zone climatique	Chauffage	Chauffage et eau chaude sanitaire
H1	220 000	280 000
H2	180 000	230 000
H3	120 000	150 000

X T

T (%) correspond à la part des besoins couverts par les énergies renouvelables ou de récupération, au sein du réseau de chaleur (et non du bâtiment), avant ce nouveau raccordement.



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° **BAT-TH-27**

**Raccordement d'un bâtiment tertiaire à un réseau
de chaleur alimenté par des énergies renouvelables
ou de récupération**

1. Secteur d'application

Bâtiments tertiaires existants.

2. Dénomination

Raccordement d'un bâtiment tertiaire existant à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ou de récupération.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

La puissance totale raccordée sur une année ne peut excéder 10 % de la puissance souscrite au réseau avant ces nouveaux raccordements.

Descriptif du réseau de chaleur à fournir : moyens de production et énergies utilisées sur les 3 dernières années (en précisant les éléments spécifiques aux énergies renouvelables ou de récupération).

Mise en place réalisée par un professionnel.

Application de cette opération non cumulable avec l'application de l'opération standardisée RES-CH-01 « Production de chaleur renouvelable en réseau ou de récupération (France métropolitaine) ».

4. Durée de vie conventionnelle

20 ans

4 août 2010

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Texte 3 sur 128

**5. Montant de certificats en kWh cumac**

Montant unitaire en kWh cumac / m ²				Surface totale chauffée en m ²	Secteur d'activité	Facteur d'occupation	
		Chauffage	Chauffage et ECS				
Zone Climatique	H1	2 200	2 400	S	Bureaux	1,1	X T
	H2	1 700	2 000		Enseignement	0,8	
	H3	1 100	1 300		Commerces	0,9	
					Hôtellerie – restauration	1,1	
				Santé	1,4		
					Autres	0,8	

T (%) correspond à la part des besoins couverts par les énergies renouvelables ou de récupération, au sein du réseau de chaleur (et non du bâtiment), avant ce nouveau raccordement.



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° **RES-CH-01**

Production de chaleur renouvelable ou de récupération en réseau (France métropolitaine)

1. Secteur d'application

Appartements existants et bâtiments tertiaires existants en France métropolitaine.

2. Dénomination

Mise en place d'un système de production de chaleur renouvelable ou de récupération (géothermie, incinération, bois-énergie, biogaz, chaleur industrielle, etc.) sur un réseau de chaleur.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

Cette opération s'applique aux installations non soumises à la directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre.

Le réseau de chaleur peut alimenter également des bâtiments neufs, non concernés par cette opération. La proportion de bâtiments existants alimentés par le réseau doit être fournie.

La chaleur renouvelable ou de récupération nette est déterminée par une étude spécifique.

Le terme kWh_{th} est égal au nombre de kWh renouvelables ou de récupération nets produits et valorisés par an par l'installation.

4. Durée de vie conventionnelle

Pour les sources d'énergie comme le bois-énergie et le biogaz : 15 ans

Pour les autres sources d'énergie, notamment les unités d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ou la géothermie : 20 ans

4 août 2010

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Texte 3 sur 128

**5. Montant de certificats en kWh cumac**

Source d'énergie	Coefficient cumac	X	Chaleur renouvelable nette/ an	X	C
Bois-énergie et biogaz	11,563		kWh _{th}		
UIOM – déchets géothermie autres	14,134				

C (%) = [surface des bâtiments existants alimentés par le système de production de chaleur renouvelable ou de récupération] / [surface de l'ensemble des bâtiments alimentés par le réseau (neufs + existants)]

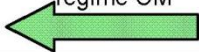
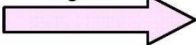
Annexe 4

Régimes juridiques applicables à la géothermie sur sonde : code minier

Tableau simplifié des différentes situations rencontrées et des régimes juridiques applicables à la géothermie sur sonde.			
Régimes applicables = code minier.			
Code minier	Géothermie haute température (> 150°C)	Géothermie basse température (<150°C)	
		Géothermie basse température sensu stricto	Géothermie basse température de minime importance
	Assimilé à une exploitation minière normale	Exploitation minière de type particulier	Demeure une mine au sens du code minier, mais de minime importance
Titre II	Permis exclusif de recherches dans un périmètre défini, après examen du dossier, mise en concurrence. 5 ans maxi, par arrêté ministériel.	Ne s'applique pas.	
Titre III	Concession octroyée par décret en CE, pour 50 ans maximum, de droit au détenteur d'un permis dans le périmètre considéré	Ne s'applique pas.	
Titre IV Article 83	Ouverture de travaux de recherche ou d'exploitation soumise à autorisation, possibilité de prévoir une déclaration sous certains seuils. Décret n°2006-649, Article 3 : les travaux de géothermie sont soumis à autorisation. S'applique à toutes les situations.		
Titre V	Ne s'applique pas.	Article 98 : les recherches sont soumises à un permis de recherche (délivré par préfet, pour 3 ans maxi, après enquête publique, dans périmètre défini). Article 99 : l'exploitation est soumise à un permis d'exploitation, de 30 ans maximum, donné par le préfet	Art. 102 : possible de déroger au titre V pour des prélèvements de faible débit calorifique et profondeur Décret 1978, Art 17 : Sont de minime importance les prélèvements de moins de 200 thermies / h ET de moins de 100 m. Les exploitations de minime importance doivent être déclarées selon les modalités prévues pour les déclarations en application de l'article 131 du code minier
Titre VIII Article 131	Obligation de déclaration à la DRIRE, au moins un mois avant la réalisation (si plus de 10m). L'autorisation prévue à l'article 83 vaut déclaration à l'article 131.		Décret 1978 art. 17 : La déclaration au titre du Titre V vaut déclaration au titre de l'article 131 Sondes horizontales moins de 10 m : pas de déclaration

Annexe 5

Régimes juridiques applicables à la géothermie sur nappe : code minier et code de l'environnement

Code minier (CM)		Equivalences inter-codes ⁴	Code de l'environnement (CE)
Géothermie haute température	Titres II - Travaux de recherche : permis de recherche	Régime CM vaut pour régime CE 	Rubrique 1.1.1.0 – Réalisation sondage, forage, ... en lien avec les eaux souterraines : déclaration Rubrique 1.1.2.0 - Prélèvement d'eau souterraine (cas général) : autorisation si $Q \geq 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$ // déclaration si $10\,000\text{ m}^3/\text{an} < Q < 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$. Rubrique 1.2.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en nappe d'accompagnement de cours d'eau : autorisation si $Q \geq 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $Q \geq 5\%$ du débit du cours d'eau // déclaration si $400\text{ m}^3/\text{h} < Q < 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $2\% < Q < 5\%$ du débit du cours d'eau. Rubrique 1.3.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en ZRE ⁵ : autorisation si $Q \geq 8\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $Q < 8\text{ m}^3/\text{h}$. Rubriques 2... - Rejets d'eau Rubrique 5.1.1.0 – Réinjection dans une même nappe : autorisation si $Q \geq 80\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $8\text{ m}^3/\text{h} < Q < 80\text{ m}^3/\text{h}$ Rubrique 5.1.2.0 - Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques : autorisation
	Titre III - Travaux d'exploitation : concession minière		
	Titre IV - Ouverture de travaux (Art 83) :		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM 	
Géothermie basse température (régime normal)	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	Régime CM vaut pour régime CE 	
	Titre V (Art.98) : Travaux de recherche : permis de recherche		
	Titre V (Art. 99) - Travaux d'exploitation : permis d'exploitation		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM 	
Géothermie basse température de minime importance	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	Régime CM vaut pour régime CE 	
	Titre V (Art. 102) + décret 78-498 (Art 17) – Minime importance : déclaration selon modalités Art 131.		
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	Régime CE vaut pour régime CM 	

⁴ Pour qu'il y ait équivalence inter-code, le dossier de déclaration et/ou d'autorisation déposé auprès des administrations compétentes doit comporter l'ensemble des pièces exigées indépendamment par chacun des codes.

⁵ ZRE : Zone de Répartition des Eau (zone où des mesures permanentes de répartition quantitative de la ressource sont instituées)

Annexe 6

Nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement (Titres 1 et 5)

Article Annexe du décret n°93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau (abrogé au 23 mars 2007)

Modifié par Décret 2006-881 2006-07-17 art. 1 2° JORF 18 juillet 2006 en vigueur le 1er octobre 2006

Abrogé par Décret n°2007-397 du 22 mars 2007 - art. 4 (V) JORF 23 mars 2007

Le débit de référence du cours d'eau s'entend comme le débit moyen mensuel sec de récurrence cinq ans ci-après dénommé le débit. Les niveaux de référence R1, R2, S1, N1 et N2, les teneurs à prendre en compte ainsi que les conditions de dérogation sont fixés par arrêté conjoint du ministre chargé de la mer et du ministre chargé de l'environnement.

TITRE 1er

PRÉLÈVEMENTS

1.1.1.0. Sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau (D).

1.1.2.0. Prélèvements permanents ou temporaires issus d'un forage, puits ou ouvrage souterrain dans un système aquifère, à l'exclusion de nappes d'accompagnement de cours d'eau, par pompage, drainage, dérivation ou tout autre procédé, le volume total prélevé étant :

1° Supérieur ou égal à 200 000 m³/h/an (A) ;

2° Supérieur à 10 000 m³/an mais inférieur à 200 000 m³/an (D).

1.2.1.0. A l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L. 214-9 du code de l'environnement, prélèvements et installations et ouvrages permettant le prélèvement, y compris par dérivation, dans un cours d'eau, dans sa nappe d'accompagnement ou dans un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe :

1° D'une capacité totale maximale supérieure ou égale à 1 000 m³/heure ou à 5 % du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau (A) ;

2° D'une capacité totale maximale comprise entre 400 et 1 000 m³/heure ou entre 2 et 5 % du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau (D).

1.2.2.0. A l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L. 214-9 du code de l'environnement, prélèvements et installations et ouvrages permettant le prélèvement, dans un cours d'eau, sa nappe d'accompagnement ou un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe, lorsque le débit du cours d'eau en période d'étiage résulte, pour plus de moitié, d'une réalimentation artificielle. Toutefois, en ce qui concerne la Seine, la Loire, la Marne et l'Yonne, il n'y a lieu à autorisation que lorsque la capacité du prélèvement est supérieure à 80 m³/h (A).

1.3.1.0. A l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L. 214-9 du code de l'environnement, ouvrages, installations, travaux permettant un prélèvement total d'eau dans une zone où des mesures permanentes de répartition quantitative instituées, notamment au titre de l'article L. 211-2 du code de l'environnement, ont prévu l'abaissement des seuils :

1° Capacité supérieure ou égale à 8 m³/h (A) ;

2° Dans les autres cas (D).

TITRE 5

RÉGIMES D'AUTORISATION VALANT AUTORISATION AU TITRE DES ARTICLES L. 214-1 ET SUIVANTS DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT

Les règles de procédure prévues par le décret n° 93-742 du 29 mars 1993 ne sont pas applicables aux installations, ouvrages, travaux et activités figurant dans ces rubriques, lesquels sont régis par des dispositions particulières.

5.1.1.0. Réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie, l'exhaure des mines et carrières ou lors des travaux de génie civil, la capacité totale de réinjection étant :

1° Supérieure ou égale à 80 m³/h (A) ;

2° Supérieure à 8 m³/h, mais inférieure à 80 m³/h (D).

5.1.2.0. Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques (A).

5.1.3.0. Travaux de recherche, de création, d'essais, d'aménagement ou d'exploitation des stockages souterrains soumis aux dispositions du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 :

a) Travaux de création et d'aménagement de cavités visées au 4° de l'article 3 (A) ;

b) Travaux de forage de puits visés au 5° de l'article 3 (A) ;

c) Essais visés au 6° de l'article 3 (A) ;

d) Mise en exploitation d'un stockage souterrain visée au 7° de l'article 3 (A) ;

e) Travaux de forage de recherche de cavité ou de formations souterraines visées au 2° de l'article 4 (D) ;

f) Travaux de forage de puits de contrôle visés au 3° de l'article 4 (D) ;

g) Essais visés au 4° de l'article 4 (D).

5.1.4.0. Travaux d'exploitation de mines :

a) Travaux d'exploitation de mines effectués dans le cadre de l'autorisation d'exploitation mentionnée à l'article 21 du code minier (D) ;

b) Autres travaux d'exploitation (A).

5.1.5.0. Travaux de recherche et d'exploitation des stockages souterrains de déchets radioactifs :

a) Travaux de recherche nécessitant un ou plusieurs forages de durée de vie supérieure à un an (A) ;

b) Autres travaux de recherche (D) ;

c) Travaux d'exploitation (A).

5.1.6.0. Travaux de recherches des mines :

a) Travaux de recherche visés au 2° de l'article 3 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 (A) ;

b) Autres travaux de recherche visés au même décret (D).

5.1.7.0. Travaux de prospection, de recherche et d'exploitation de substances minérales ou fossiles non visées à l'article 2 du code minier et contenues dans les fonds marins du domaine public (A).

5.2.1.0. Effluents radioactifs provenant d'une installation nucléaire de base (INB) (A).

5.2.2.0. Entreprises hydrauliques soumises à la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique (A).

5.2.3.0. Les travaux décidés par la commission d'aménagement foncier comprenant des travaux tels que l'arrachage des haies, l'arasement des talus, le comblement des fossés, la protection des sols, l'écoulement des eaux nuisibles, les retenues et la distribution des eaux utiles, la rectification, la régularisation et le curage des cours d'eau non domaniaux (A).

Annexe 7

Fiche de déclaration en mairie des prélèvements, puits et forages réalisés à des fins domestiques

1/2
cerfa
N° 13837*01

Cette déclaration doit être remplie par le propriétaire de l'ouvrage ou son utilisateur (si différent) et transmise en mairie

Conformément au décret n°91-1147 du 14 octobre 1991, toute personne désirant réaliser un forage domestique doit se renseigner au préalable auprès de sa mairie sur l'existence et les zones d'implantation éventuelles d'ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques impactés par son projet et envoyer une demande de renseignements (DR) à chacun des exploitants de ces ouvrages afin que les travaux envisagés puissent être exécutés en toute sécurité.

Les informations recueillies font l'objet d'un traitement informatique destiné à permettre une meilleure connaissance des ouvrages de prélèvement d'eau souterraine à des fins d'usage domestique, à mieux connaître les pressions qu'exercent ces ouvrages sur les nappes phréatiques et à limiter les risques de contamination des réseaux publics d'adduction d'eau potable. Les destinataires des données sont les personnels des services de la commune où a été déposée la déclaration, les agents des corps de contrôle visés à l'article L.521-12 du code de l'environnement et les agents de l'Etat autorisés hors corps de contrôle et qui auront un accès restreint aux données anonymisées.

Conformément à la loi « informatique et libertés » du 6 janvier 1978 modifiée en 2004, vous bénéficiez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent, que vous pouvez exercer en vous adressant aux services de la commune dans laquelle vous avez déclaré votre ouvrage de prélèvement d'eau souterraine à des fins d'usage domestique.

[illegible][illegible][illegible][illegible]

5 - Localisation de l'ouvrage. Veuillez joindre à la déclaration un plan de localisation de l'ouvrage à l'échelle du 1/25000 ou un extrait du cadastre. Les coordonnées GPS de l'ouvrage pourront être également communiquées.

Adresse Numéro : Voie :
 Lieu-dit : Localité :
 Code postal [][][][][][] BP [][][][] cedex [][][]
 Cadastre : Section(s) Parcelle(s) n°
 Code BSS (Banque du Sous-Sol) pour tout ouvrage existant :
 Coordonnées GPS de l'ouvrage* :
 Longitude (deg : mn,ss) Latitude (deg : mn,ss)

Nous vous rappelons qu'une déclaration spécifique doit être faite auprès des services déconcentrés régionaux chargés des mines, pour tout ouvrage de plus de 10 mètres de profondeur ; cette déclaration permet un enregistrement dans la Banque du Sous-Sol (BSS) et un code BSS est ainsi attribué à l'ouvrage (article 131 code minier). Adresse et Contact disponibles sur le site : www.drire.gouv.fr

6 - Type d'ouvrage (veuillez cocher la case correspondante).

Forage ☐ Puits ☐ Autres ☐ à préciser,
 Date de création¹ (cas d'un ouvrage ancien) [][][][][][][][][]
 Date prévisionnelle d'achèvement des travaux (cas d'un nouvel ouvrage) [][][][][][][][][]

7 - Usages auxquels l'ouvrage est destiné (veuillez cocher les cases correspondantes).

Utilisation de l'eau pour la consommation humaine (au sens de l'article R. 1321-1 du code de la santé publique) ☐ Oui ☐ Non
 En cas d'utilisation de l'eau pour la consommation humaine :
 pour un usage unifamilial², une analyse de l'eau de type P1, à l'exception du chlore, définie dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution) doit être réalisée et jointe à la déclaration ; pour les ouvrages à réaliser l'analyse est transmise après travaux ;
 pour les autres cas, une autorisation préfectorale doit être demandée au titre de l'article L.1321-7 du code de la santé publique.
 Autres usages de l'eau ☐ Oui ☐ Non
 Si oui, préciser :
 Existence d'un réseau de distribution d'eau intérieur au bâtiment alimenté par l'ouvrage ☐ Oui ☐ Non
 Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux usées ☐ Oui ☐ Non
 Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux pluviales ☐ Oui ☐ Non

8 - Caractéristiques de l'ouvrage (veuillez indiquer les caractéristiques réelles pour les ouvrages existants, et les prévisions pour les nouveaux ouvrages à réaliser).

Nom ou type de la nappe dans lequel le prélèvement va être effectué (si connu) :
 Profondeur de l'ouvrage : (en m) Diamètre de l'ouvrage : (en mm)
 Débit de prélèvement : (en m³/h) Volume annuel prélevé : (en m³/an)
 Présence d'une margelle béton autour de la tête du forage ou puits : ☐ Oui ☐ Non
 Ouvrage réalisé en se conformant à la norme NF X 10-999 forages d'eau et de géothermie : ☐ Oui ☐ Non
 Le respect de cette norme permet de garantir que l'ouvrage est réalisé dans les règles de l'art et permet notamment de protéger la ressource souterraine de toute infiltration directe d'eau de ruissellement superficielle potentiellement polluée.
 Il est rappelé que tout pompage doit être équipé d'un compteur volumétrique (article L.214-8 du code de l'environnement)

Fait à :

le [][][][][][][][][]

Nom, Prénom :

Signature

¹ ou date d'achèvement d'un nouvel ouvrage.

² unifamilial : usage restreint aux besoins d'une seule famille.

Les champs suivis de (*) sont facultatifs



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

**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

Rapport final

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

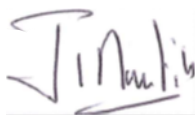
J. PICOT et K. PIRA
Avec la collaboration de
B. BOURGINE et P. HERNIOT

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-turonniennne (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.

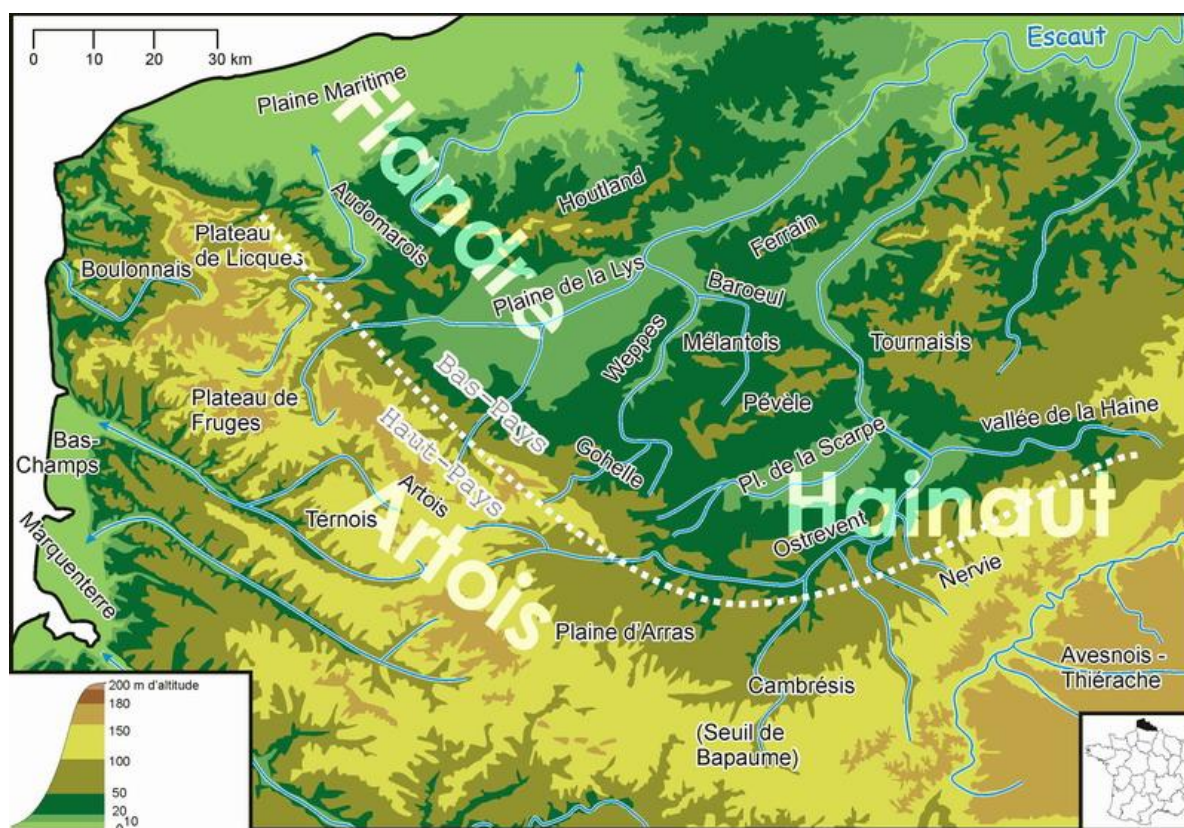


Figure 1 : Localisation des pays du Nord-Pas de Calais

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 pompes, d'inverser le cours de l'eau.

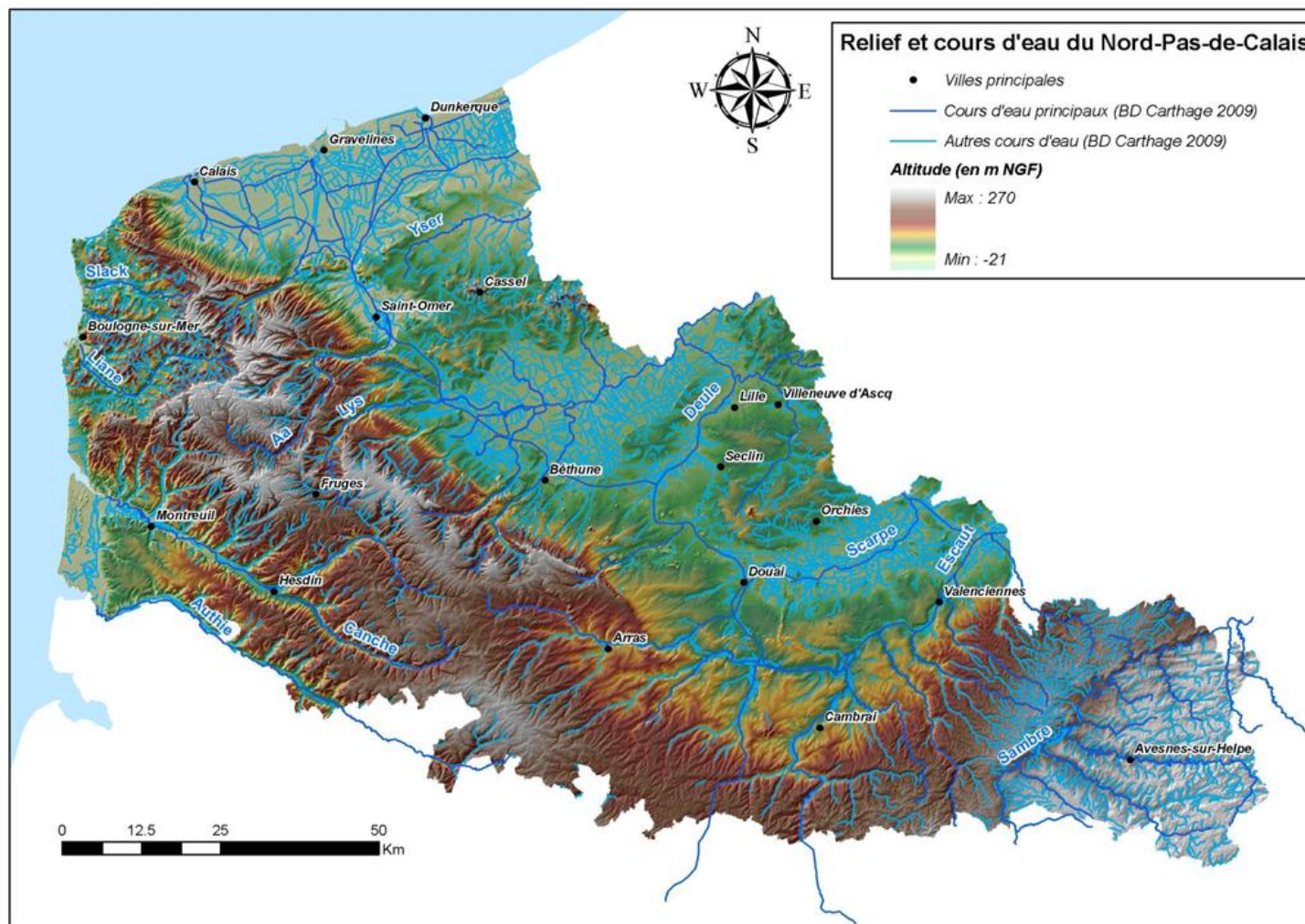


Figure 2 : Relief et cours d'eau du Nord-Pas de Calais

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).

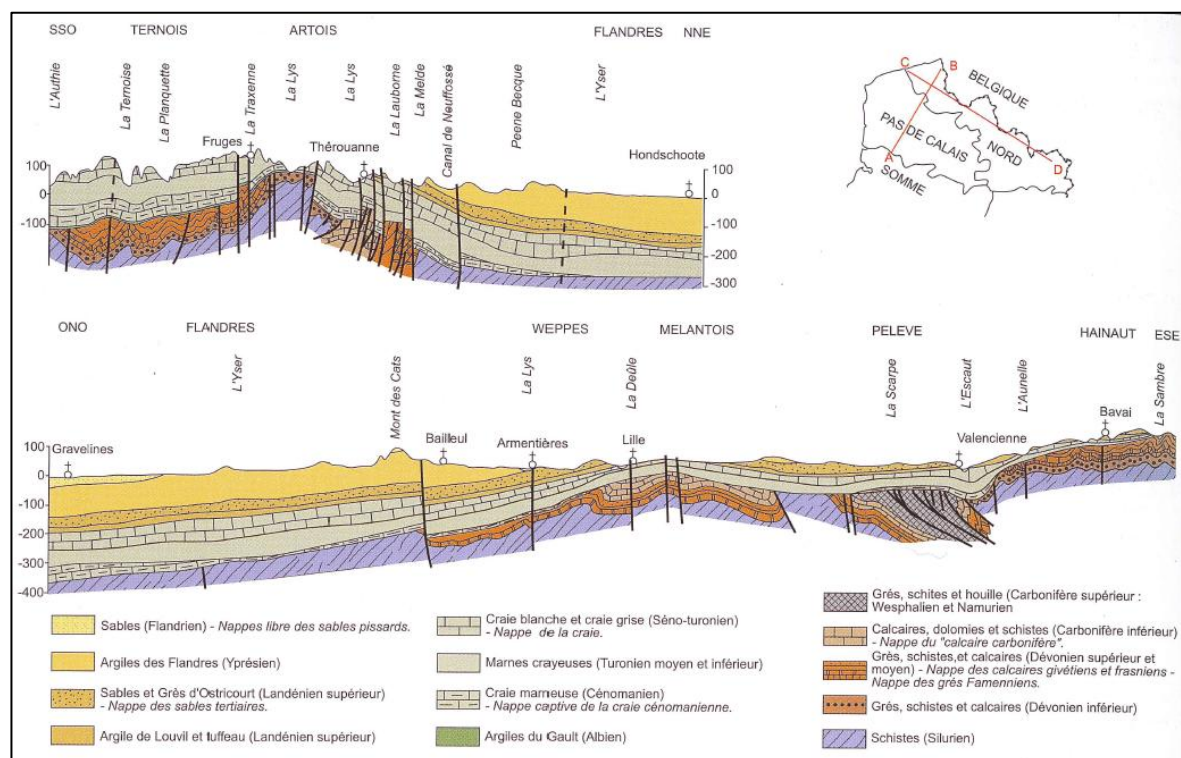


Figure 3 : Coupes géologiques régionales (J Beckelynck, 1981)

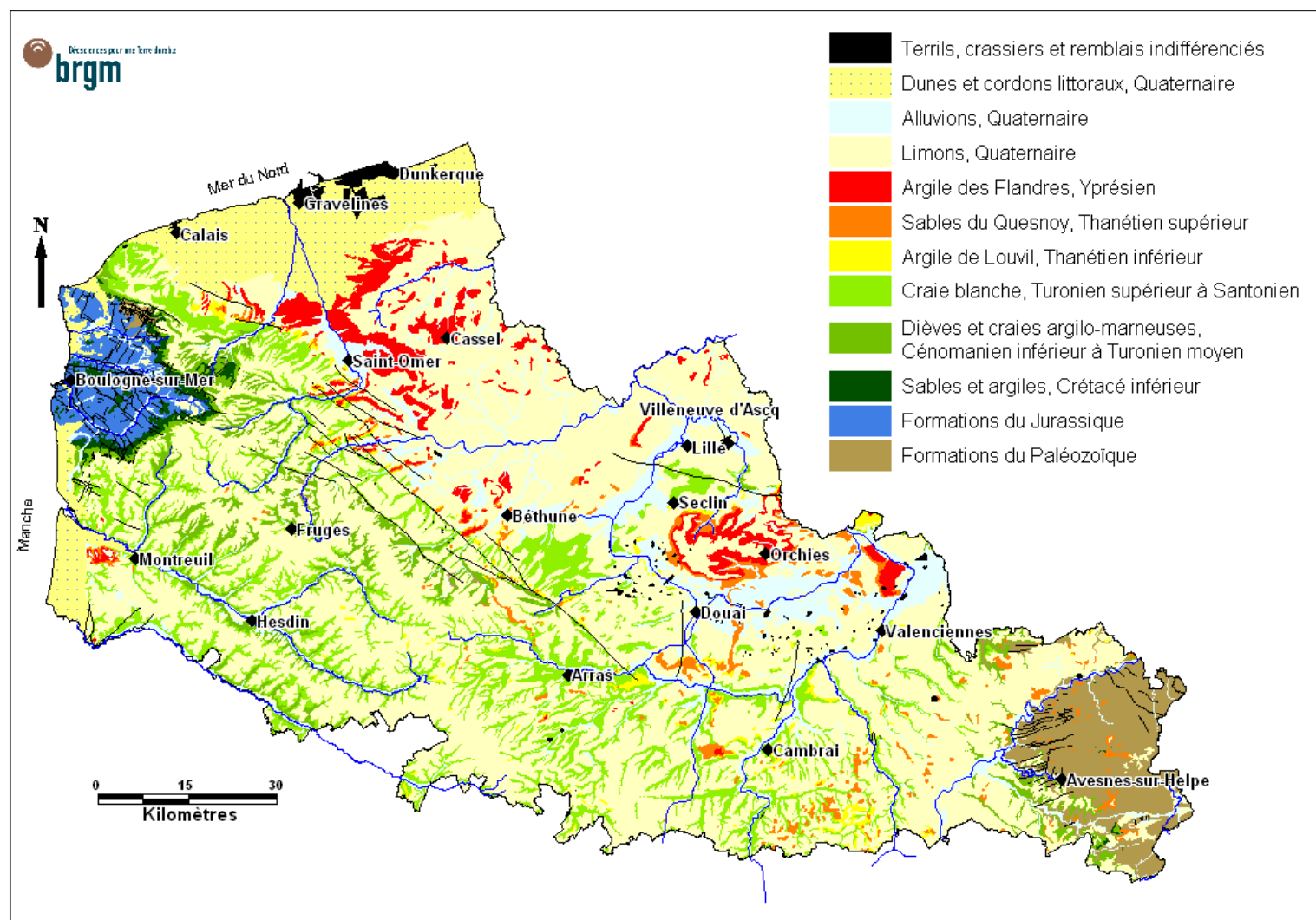


Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Nord-Pas de Calais

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.

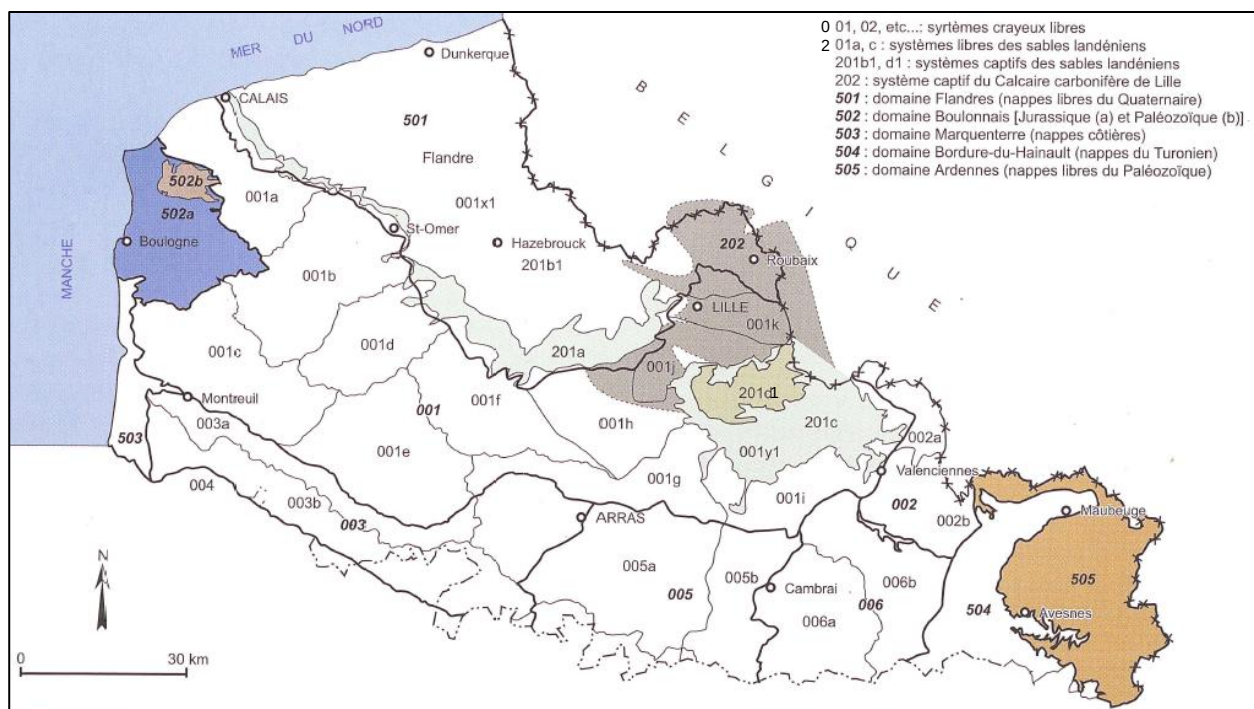


Figure 5 : Domaines et systèmes aquifères de la région Nord-Pas de Calais

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 Cénomanien est prouvée par traçages.

Plus au sud-est (secteur de Fruges), le Cénomanien 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 Cénomanien 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 (Cénomanien, 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 carrées 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 par 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.

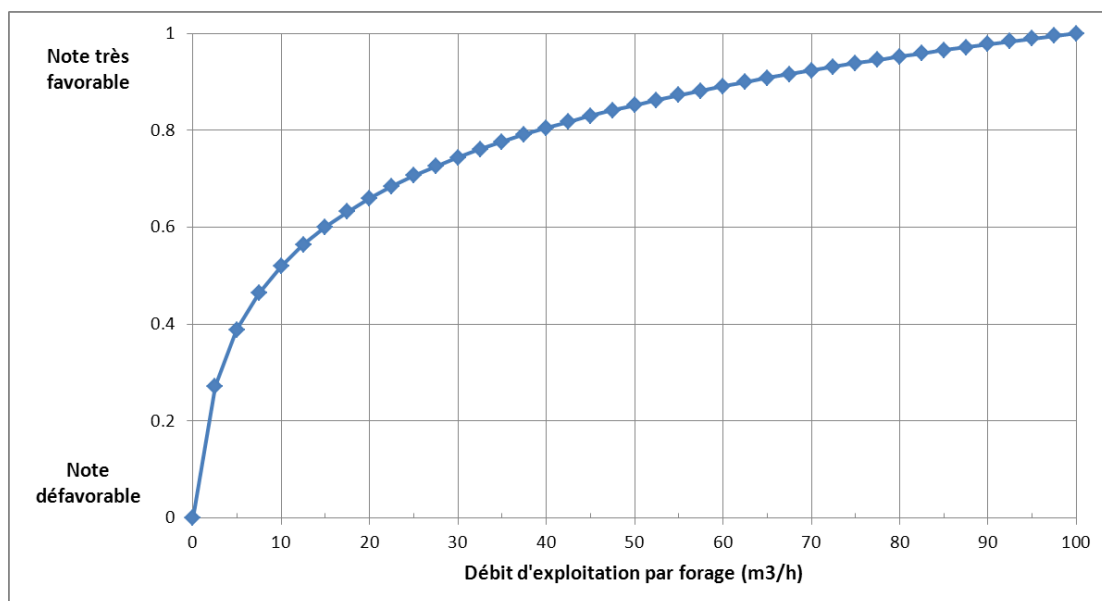


Figure 6 : Evolution de la note du critère du débit d'exploitation du forage

• 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 considérées 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.

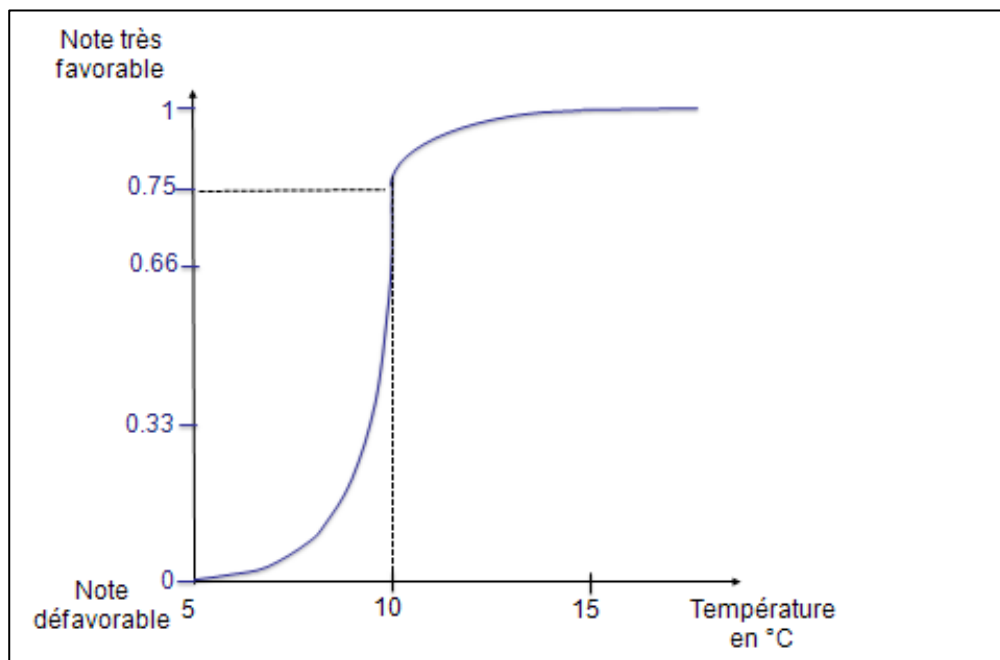


Figure 7 : Evolution de la note du critère température de l'eau de l'aquifère

- **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.

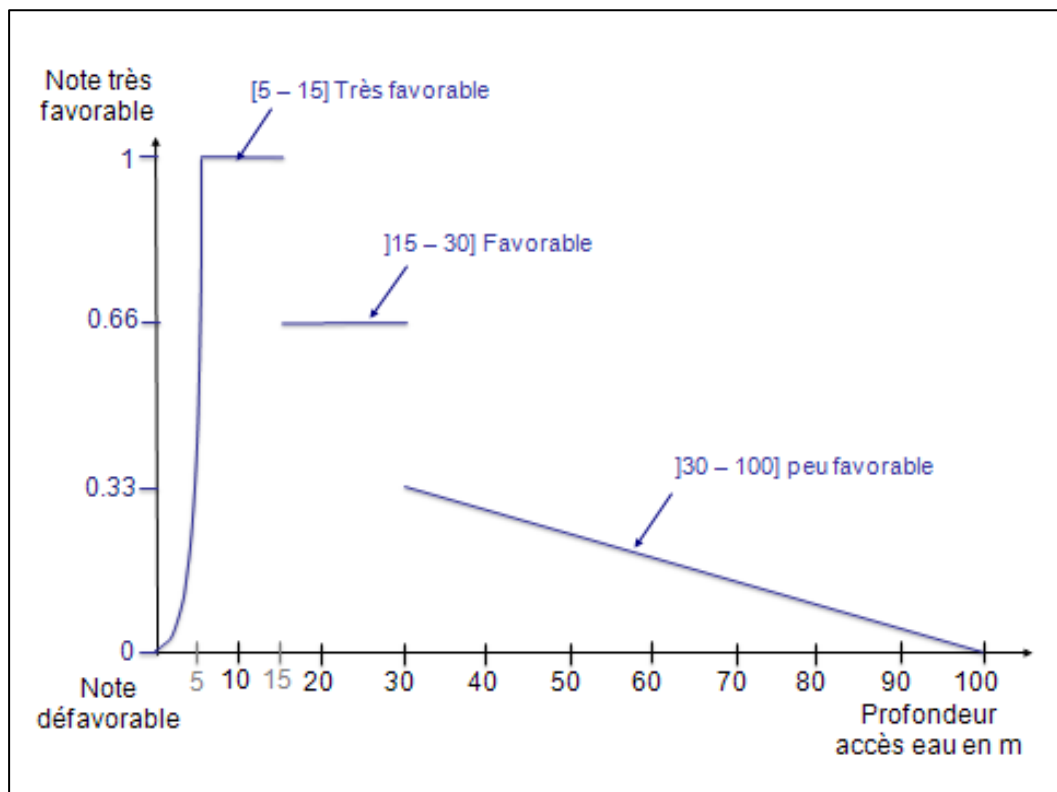


Figure 8 : Evolution de la note du critère profondeur d'accès à l'eau

- **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 :

2 x note du critère débit d'exploitation par forage
+
1 x note du critère température de la nappe
+
1 x note du critère profondeur d'accès à la nappe
=
POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE L'AQUIFÈRE

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

$0 < \text{note finale} < 1,33$



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 et 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.

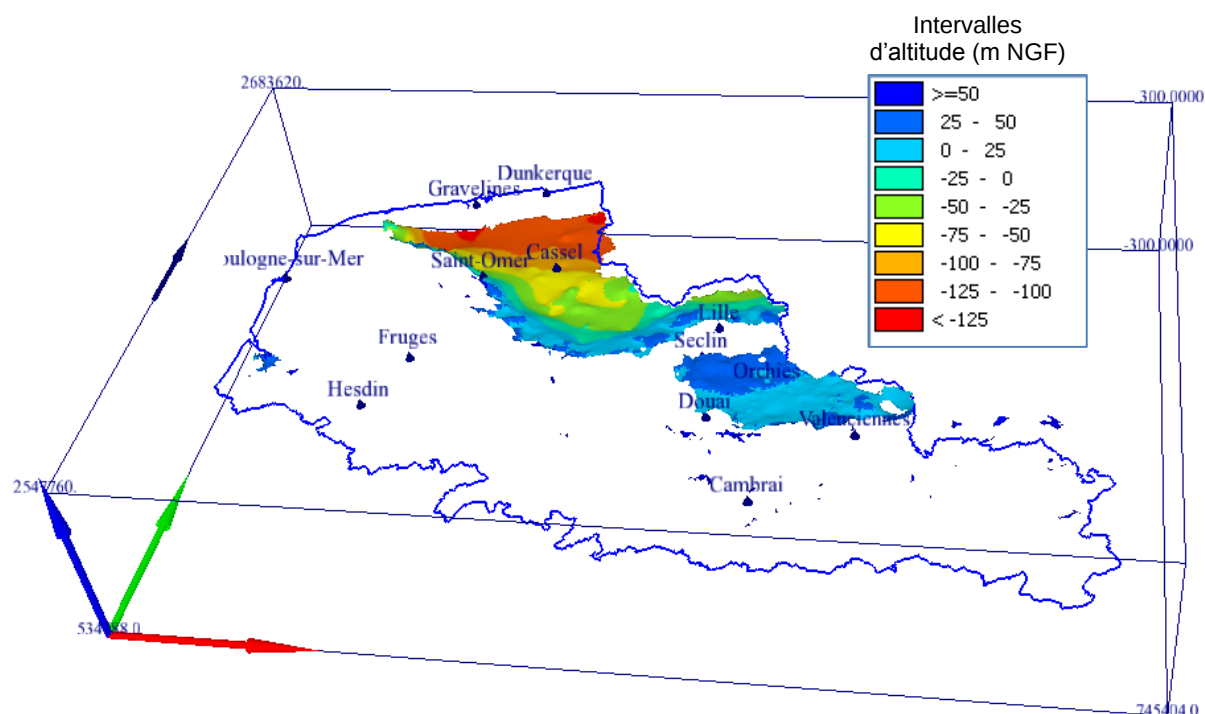


Figure 9 : Vue 3D du toit des Sables landéniens (dilatation en Z égale à 70)

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.

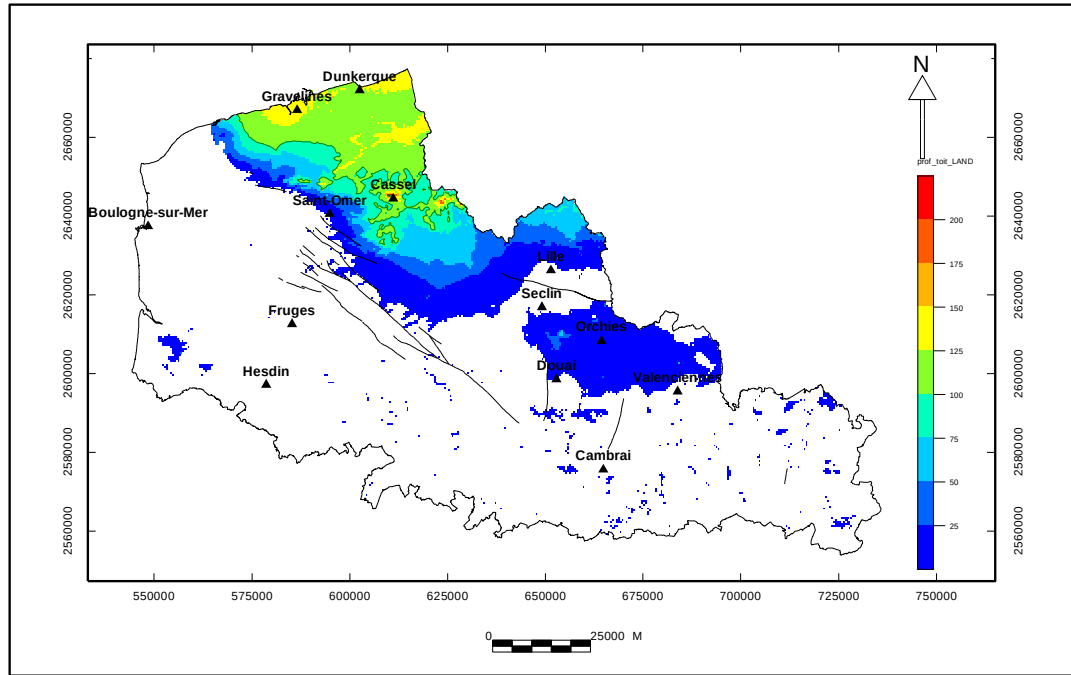


Figure 10 : Profondeur du toit des Sables landéniens

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).

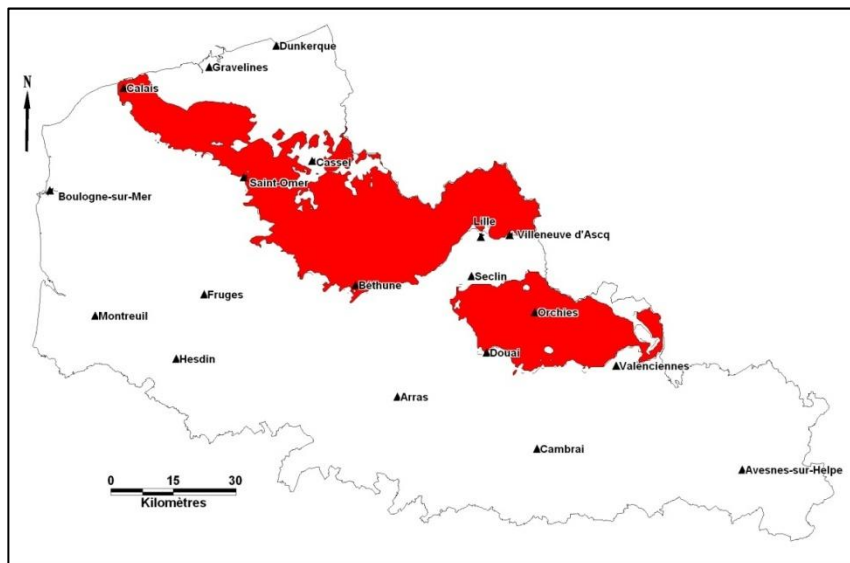


Figure 11 : Secteur retenu pour l'étude de l'aquifère des Sables landéniens

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.

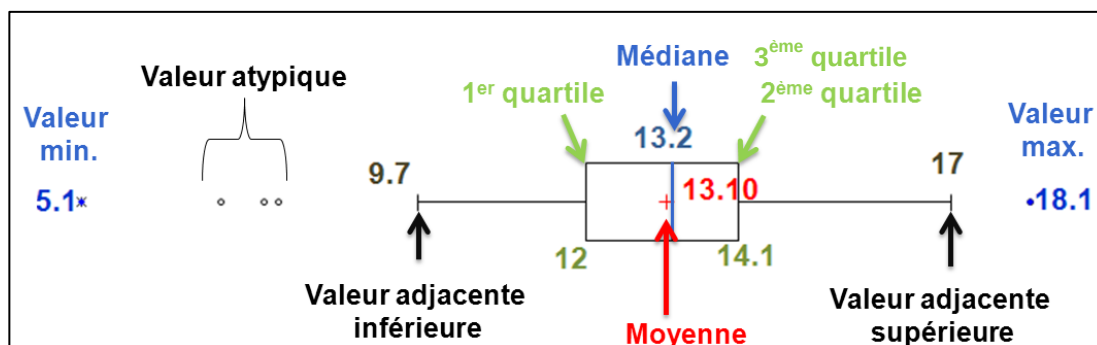


Figure 12 : Exemple de boîte à moustache de Tukey

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 $\frac{1}{3}$ 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 $\frac{1}{3}$ 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*

- $[\text{CO}_2 \text{ dissous}] < 50 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- $50 \text{ mg/l} < [\text{CO}_2 \text{ dissous}] < 120 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- $120 \text{ mg/l} < [\text{CO}_2 \text{ dissous}] < 200 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- $[\text{CO}_2 \text{ dissous}] > 200 \text{ mg/l}$: eau brute inapte à satisfaire l'usage → traitement ou équipement adapté nécessaire.

b) *Conductivité*

- $C < 1300 \text{ } \mu\text{S/cm}$: aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- $1300 \text{ } \mu\text{S/cm} < C \leq 3000 \text{ } \mu\text{S/cm}$: aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- $3000 \text{ } \mu\text{S/cm} < C \leq 6000 \text{ } \mu\text{S/cm}$: aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- $C > 6000 \text{ } \mu\text{S/cm}$: 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 $\text{pH} < 6,5$)
- 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).

- $[\text{Cl}^-] < 150 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage bonne ;
- $150 \text{ mg/l} < [\text{Cl}^-] < 400 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage passable ;
- $400 \text{ mg/l} < [\text{Cl}^-] < 1000 \text{ mg/l}$: aptitude à satisfaire l'usage mauvaise ;
- $[\text{Cl}^-] > 1000 \text{ mg/l}$: 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.

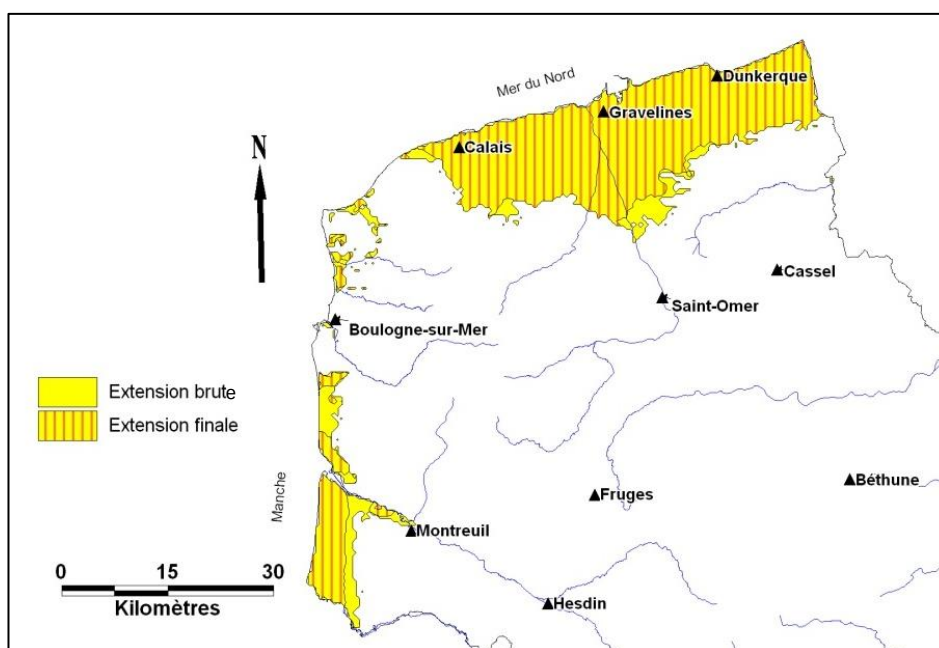


Figure 13 : Limite retenue pour l'étude de l'aquifère des Sables Pissards

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).

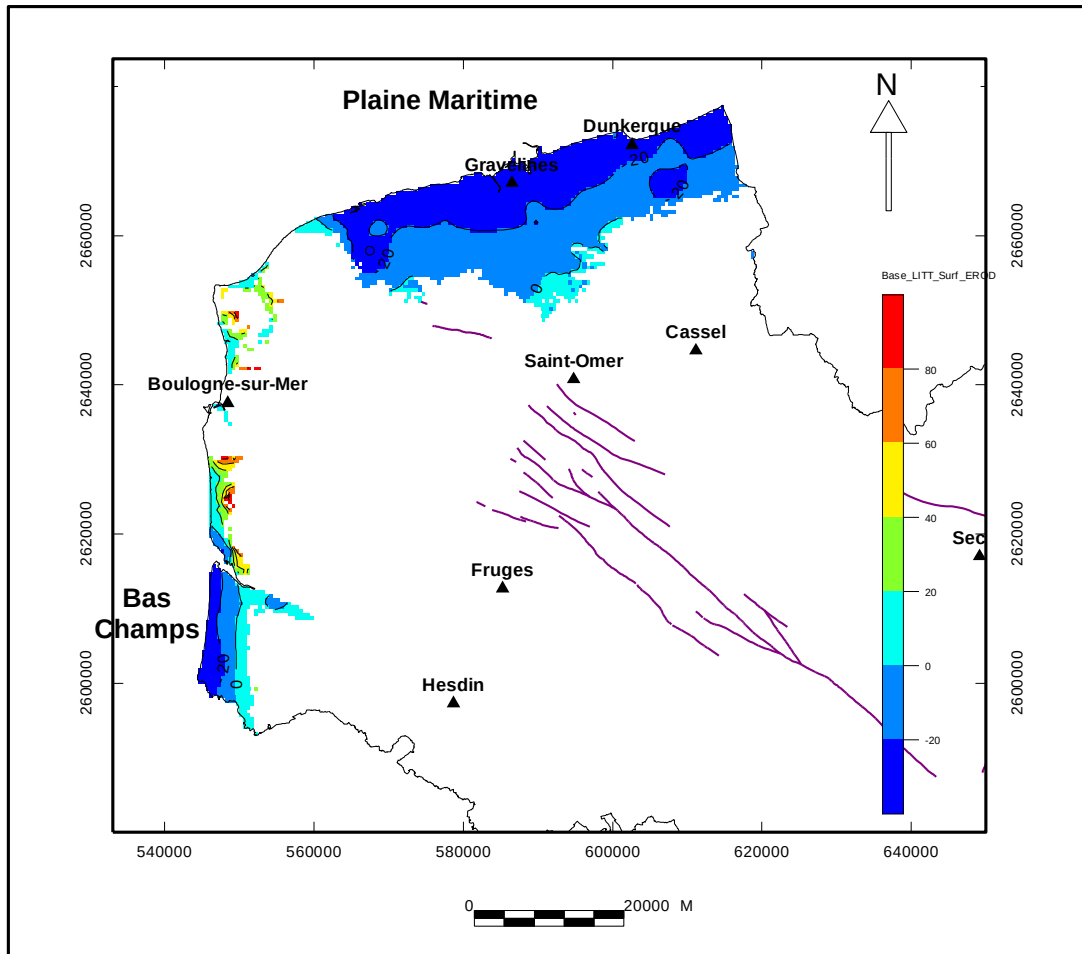


Figure 14 : Isohypsés du mur des Sables Pissards (en mètre NGF)

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.

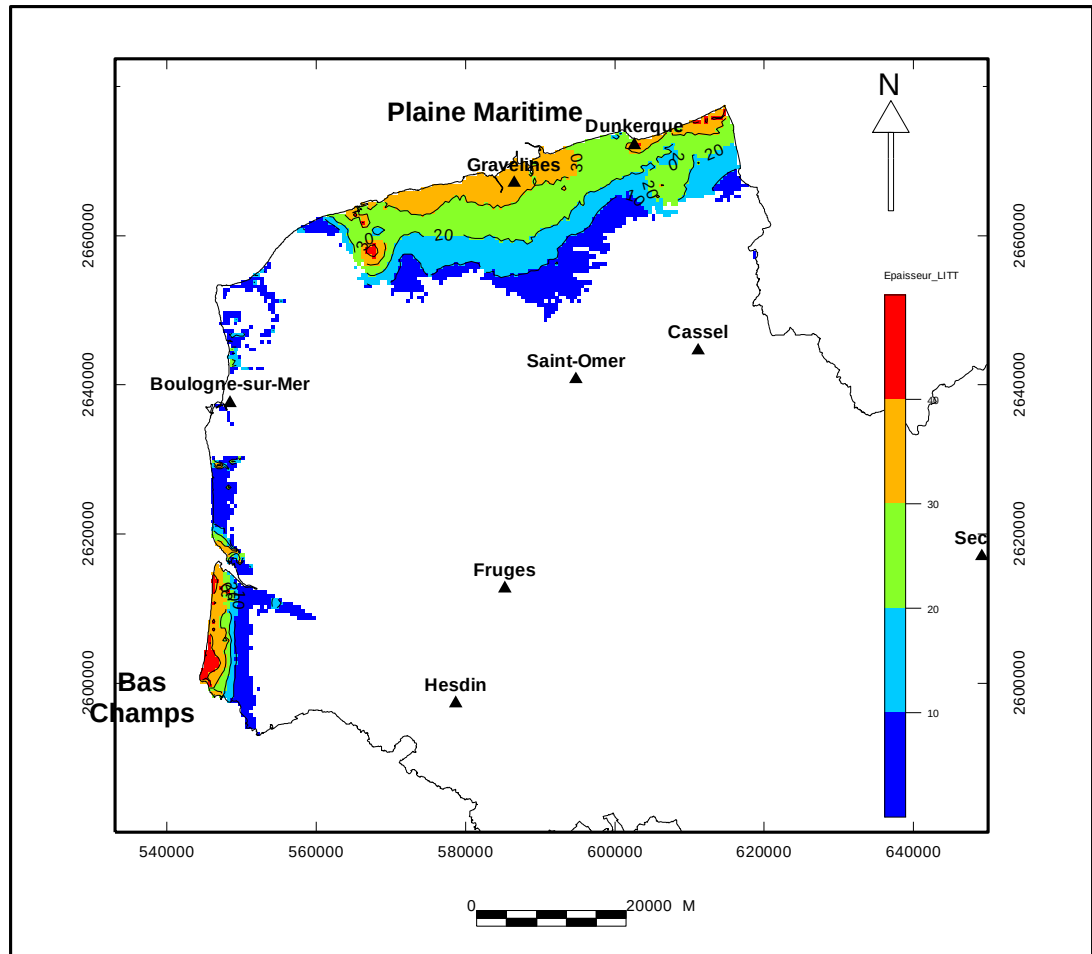


Figure 15 : Epaisseur des Sables Pissards

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 waterings (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.

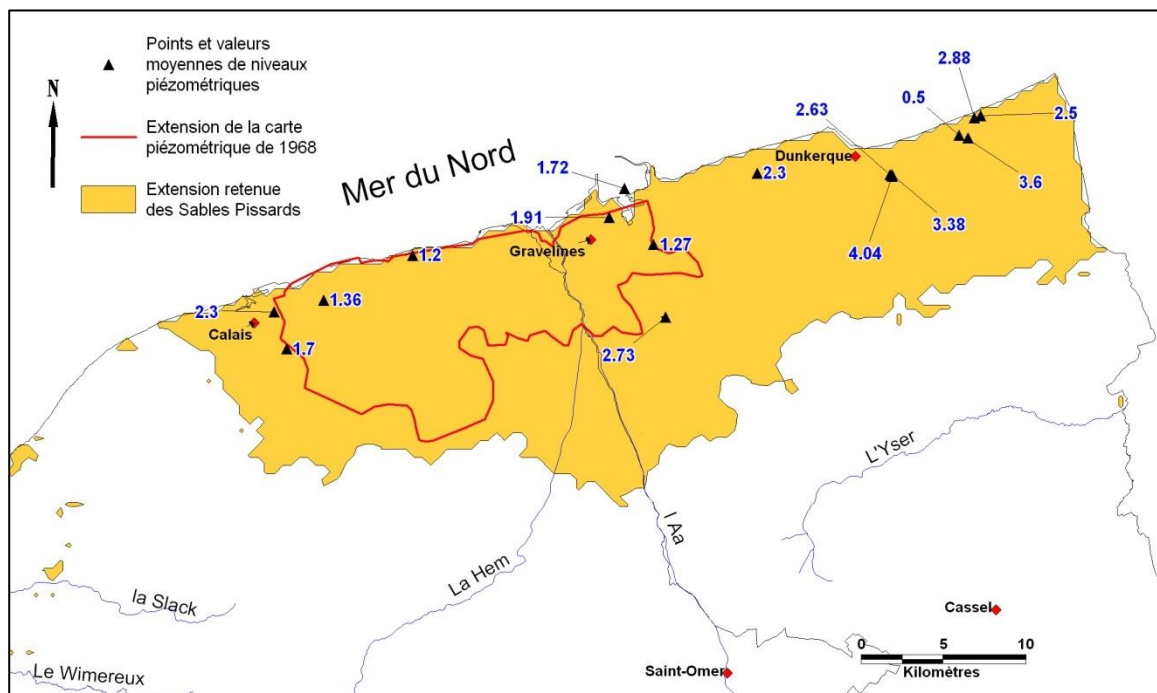


Figure 16 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans la Plaine Maritime

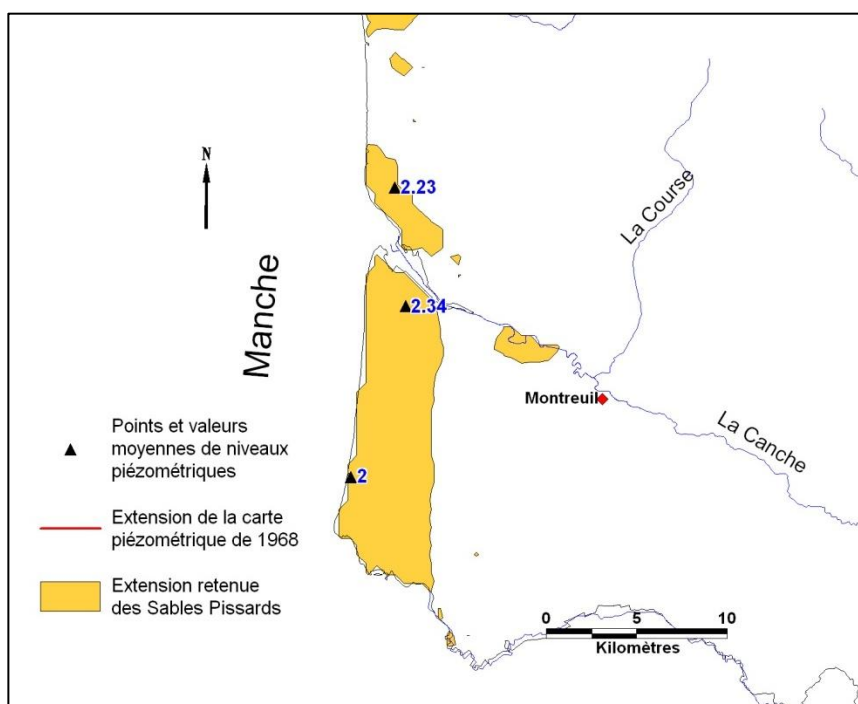


Figure 17 : Synthèse des données piézométriques des Sables Pissards dans les Bas-Champs

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

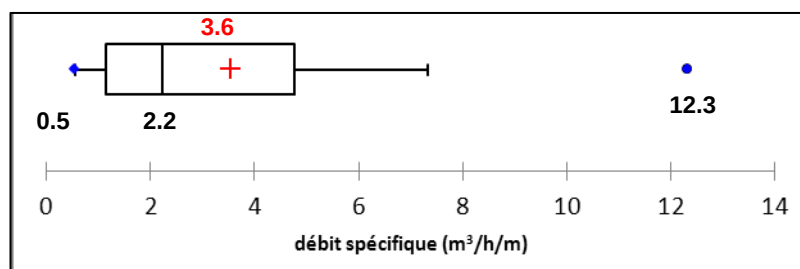


Figure 18 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables Pissards (m³/h/m)

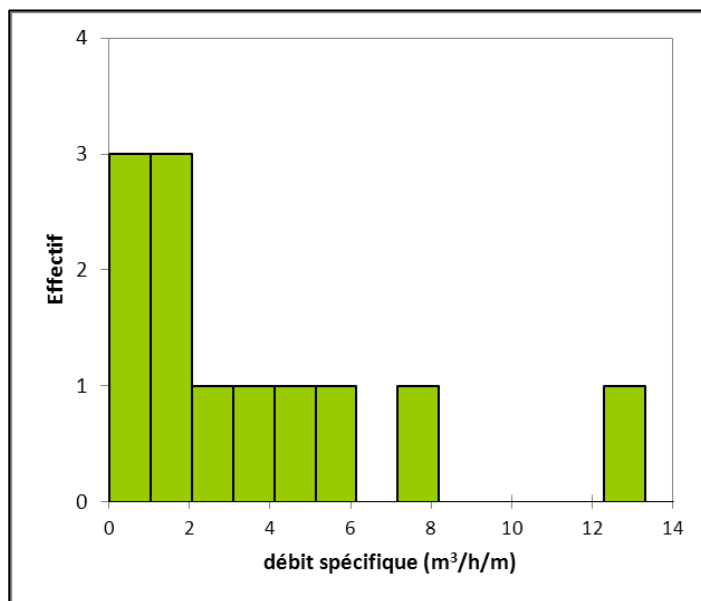


Figure 19 : Histogramme des débits spécifiques (m³/h/m) recensés dans les Sables Pissards de la Plaine Maritime

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 m³/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 $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur saturée avec un maximum de 5 m.

Les débits d'exploitation par forage obtenus varient entre 5 et 11 m³/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).

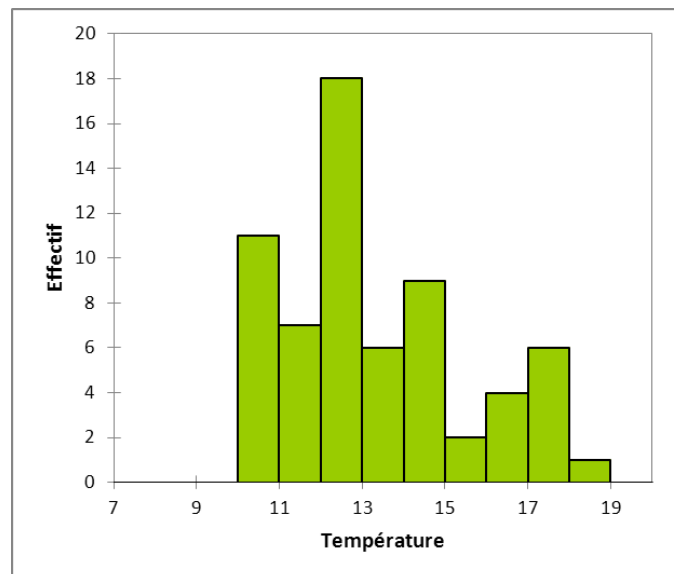


Figure 20 : Histogramme des températures de la nappe des Sables Pissards

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.

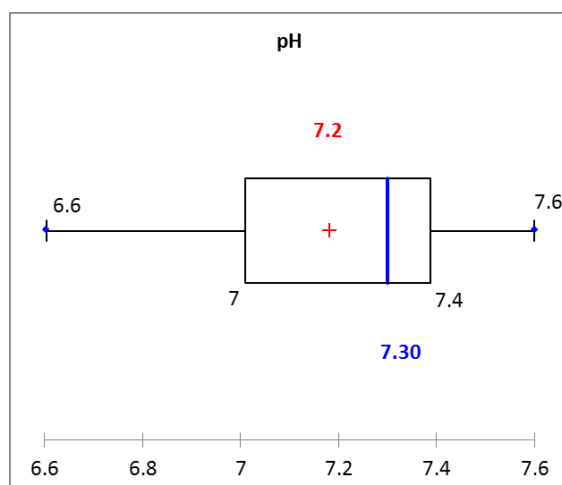


Figure 21 : Représentation du pH de la nappe des Sables Pissards par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

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 inexistante) sur l'existante d'une nappe locale, les buttes témoins ont également été désélectionnées (« *extension retenue* » sur la Figure 22).

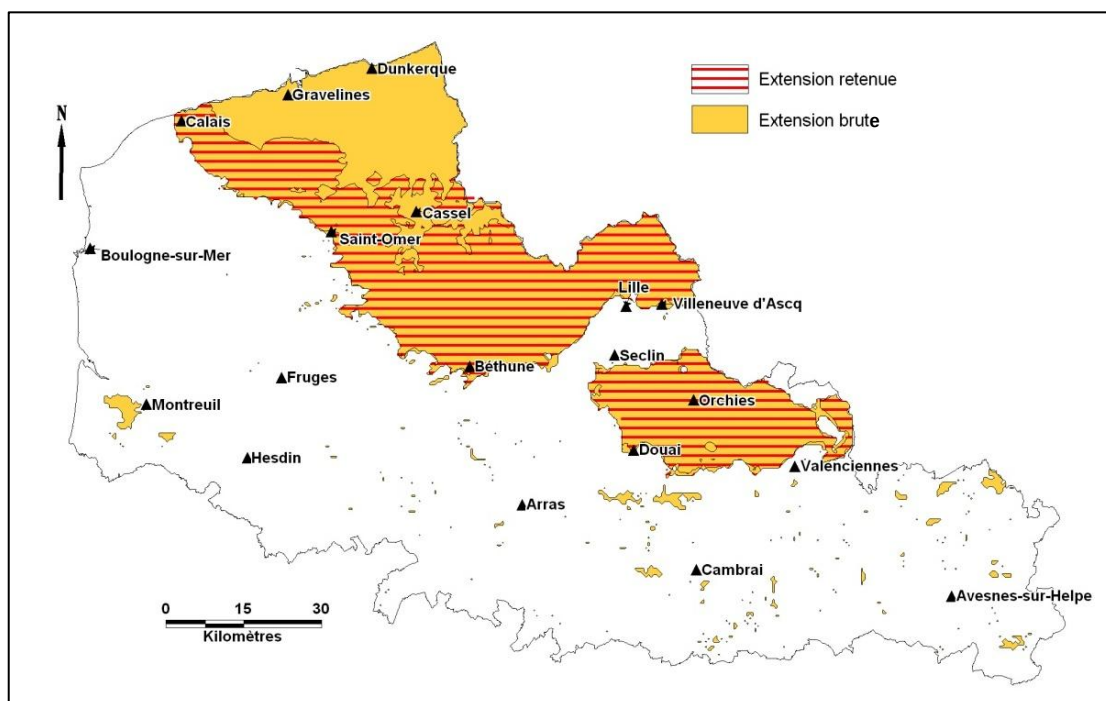


Figure 22 : Les extensions des Sables du Landénien supérieur

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).

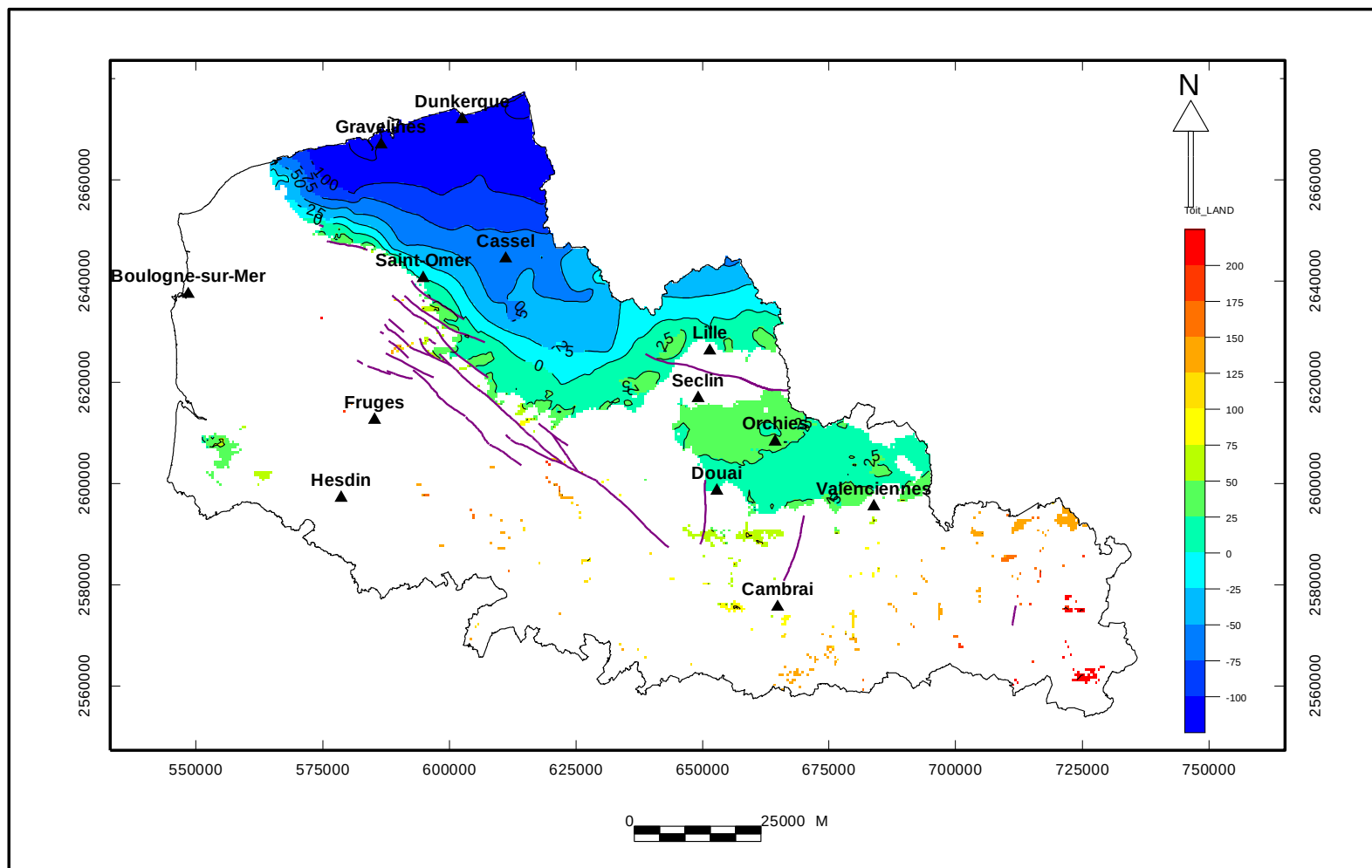


Figure 23 : Isohypses du toit des Sables landéniens (en mètre NGF)

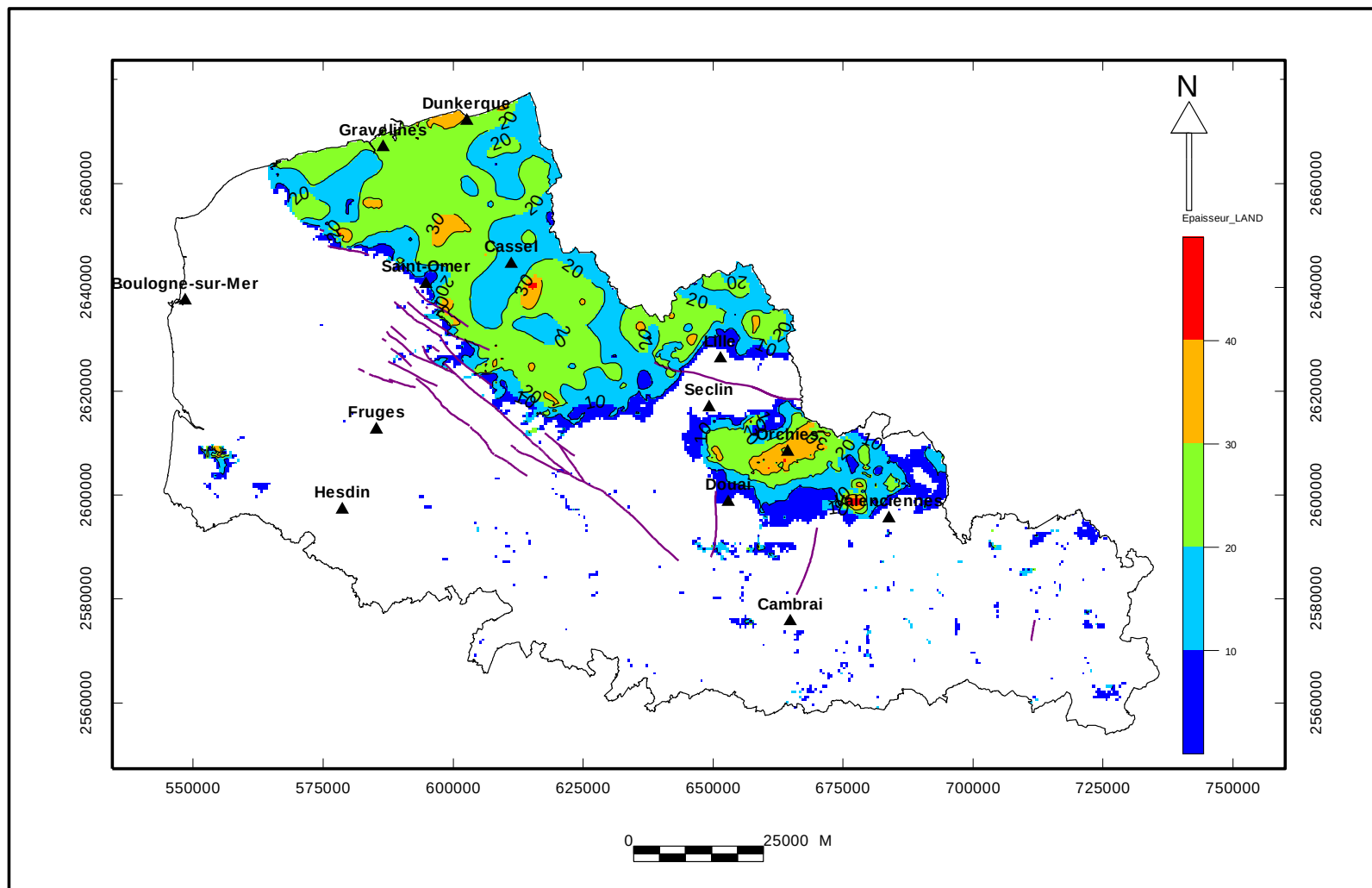


Figure 24 : Epaisseur des Sables landéniens (en mètre)

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).

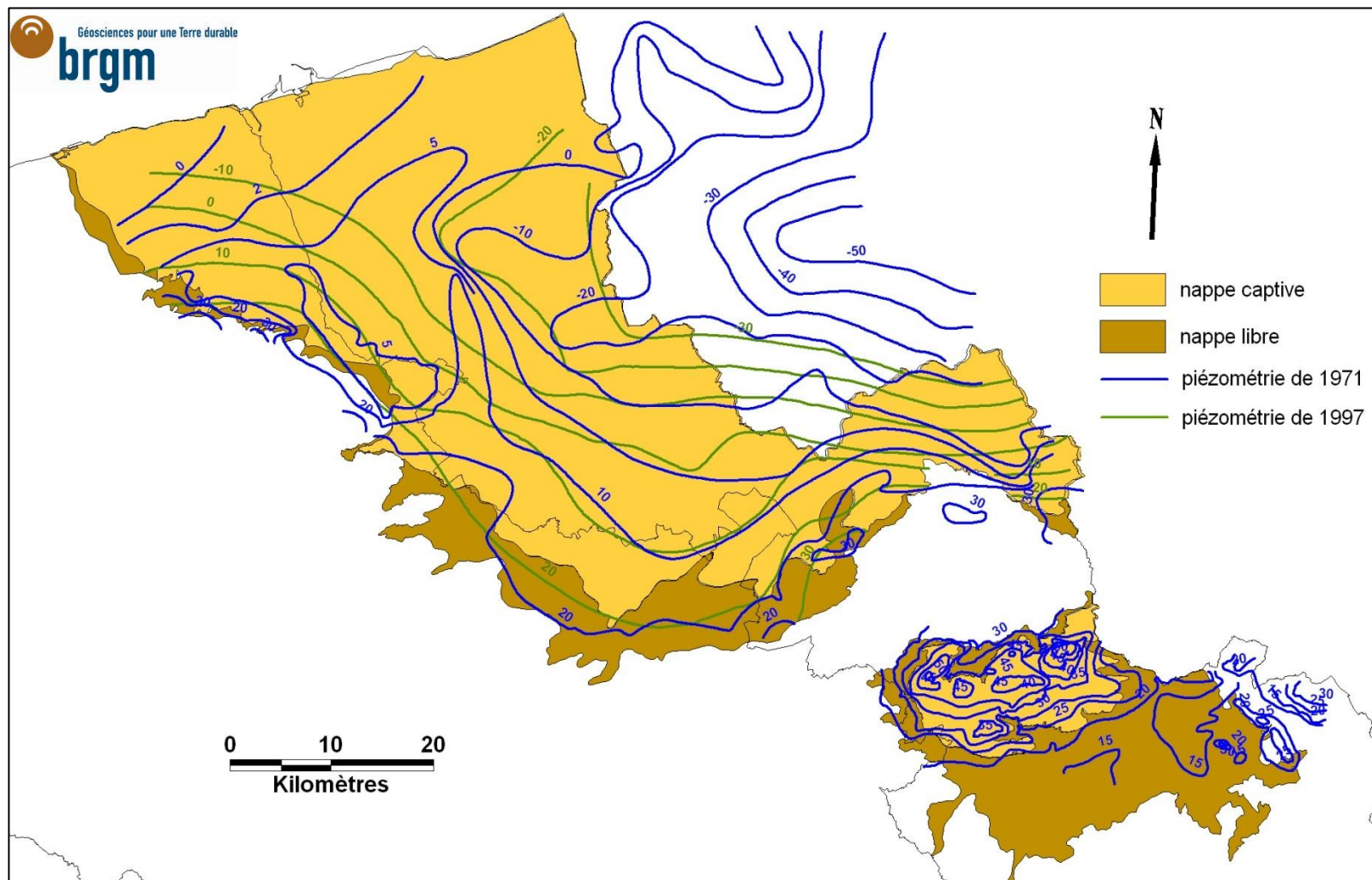


Figure 25 : Carte piézométrique des Sables landéniens

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

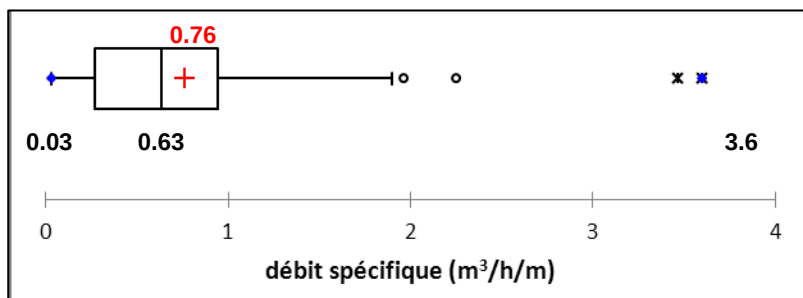


Figure 26 : Boîte à moustache de Tukey des débits spécifiques des Sables landéniens

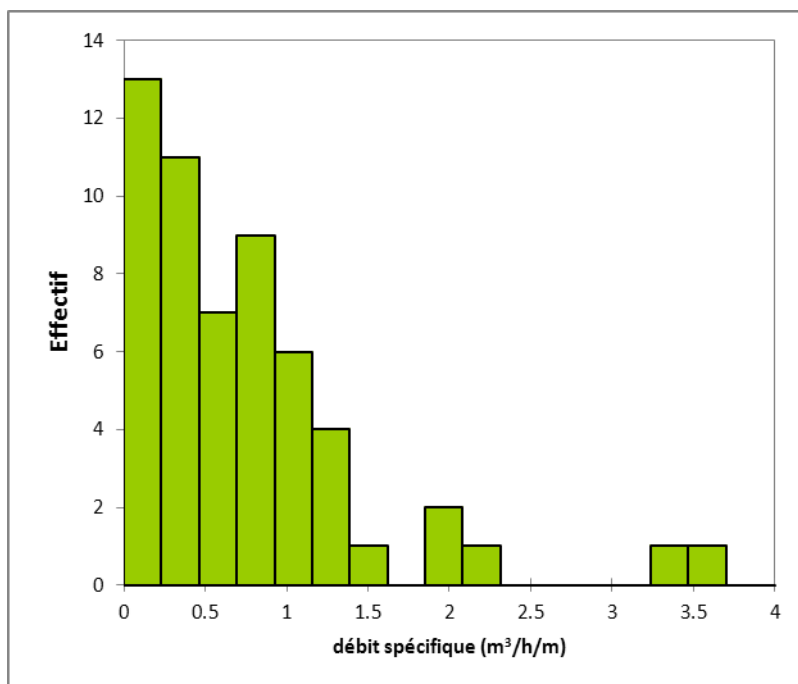


Figure 27 : Histogramme des débits spécifiques (m³/h/m) recensés dans les Sables landéniens

La valeur de débit spécifique retenue pour l'ensemble de l'aquifère des sables landéniens est la valeur de la médiane soit 0,6 m³/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 saturée de l'aquifère avec un maximum de 5 m.

Les débits d'exploitation par forage obtenus sont tous inférieurs à 5 m³/h (la valeur maximale obtenue est de 3,16 m³/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.

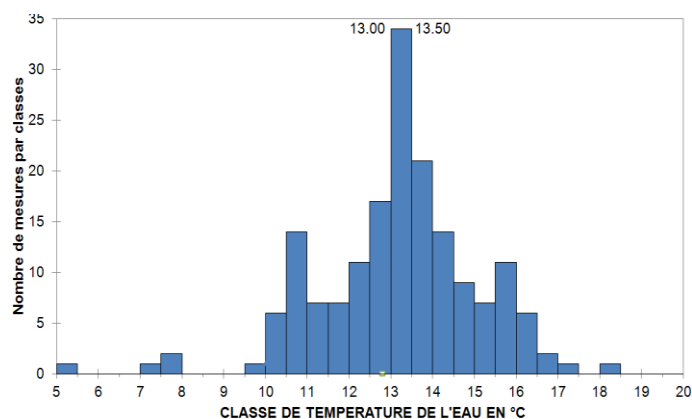


Figure 28 : Histogramme des températures de la nappe des Sables landéniens

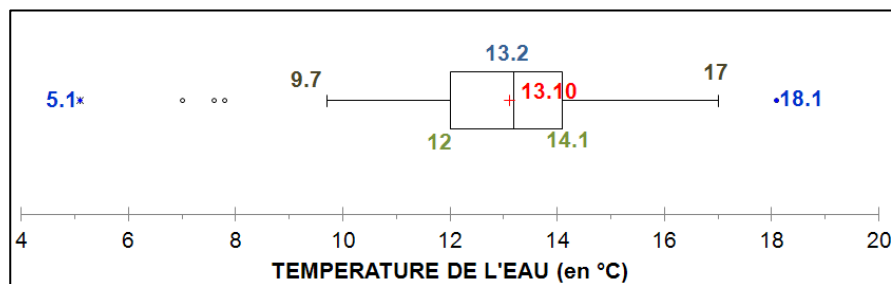


Figure 29 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe des Sables landéniens

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.

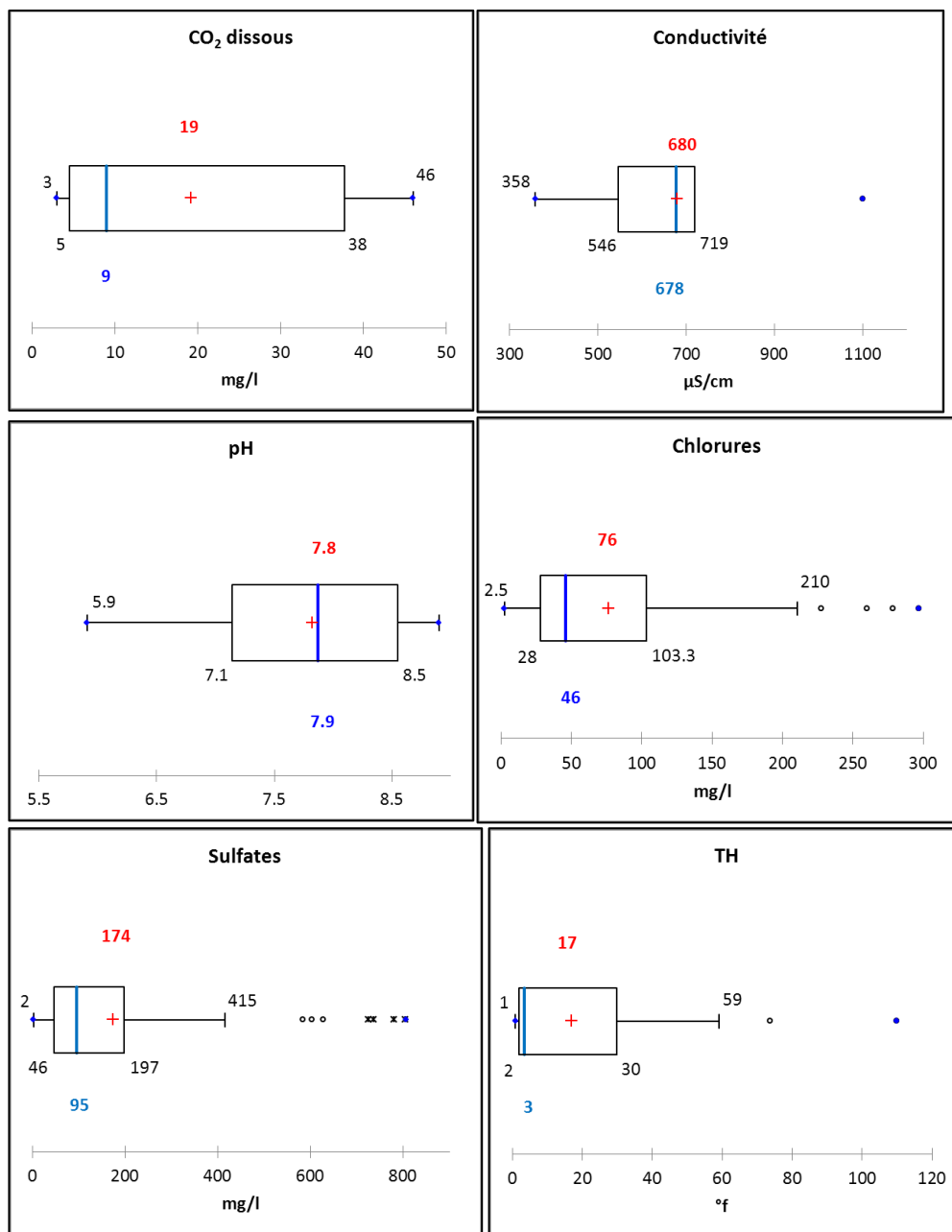


Figure 30 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des Sables landéniens par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

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).

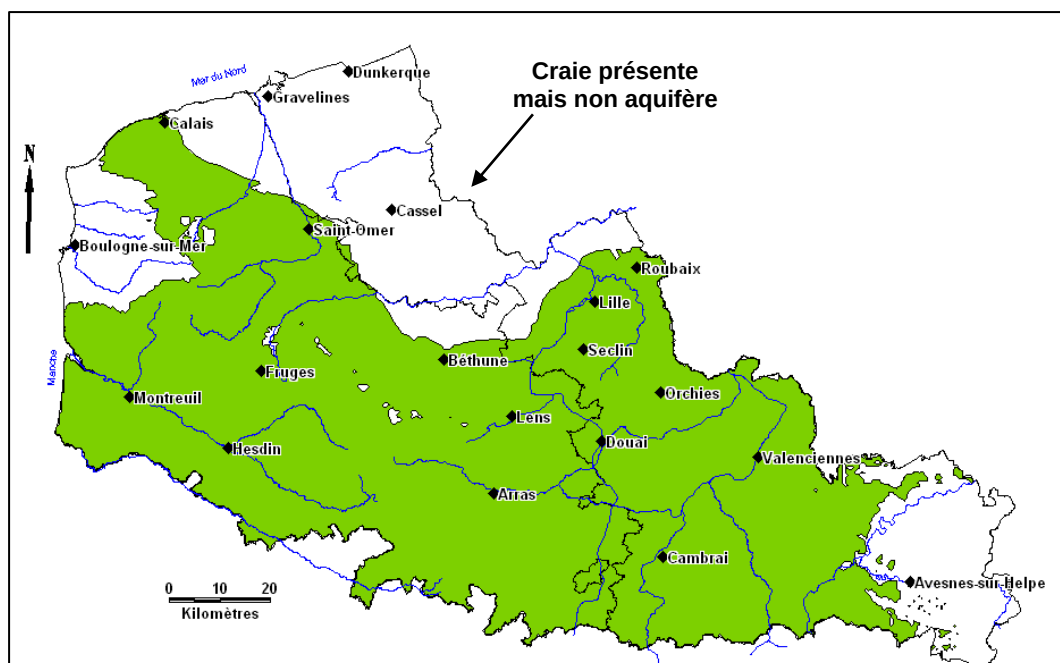


Figure 31 : Extension retenue pour l'aquifère de la Craie

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'enfonce 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.

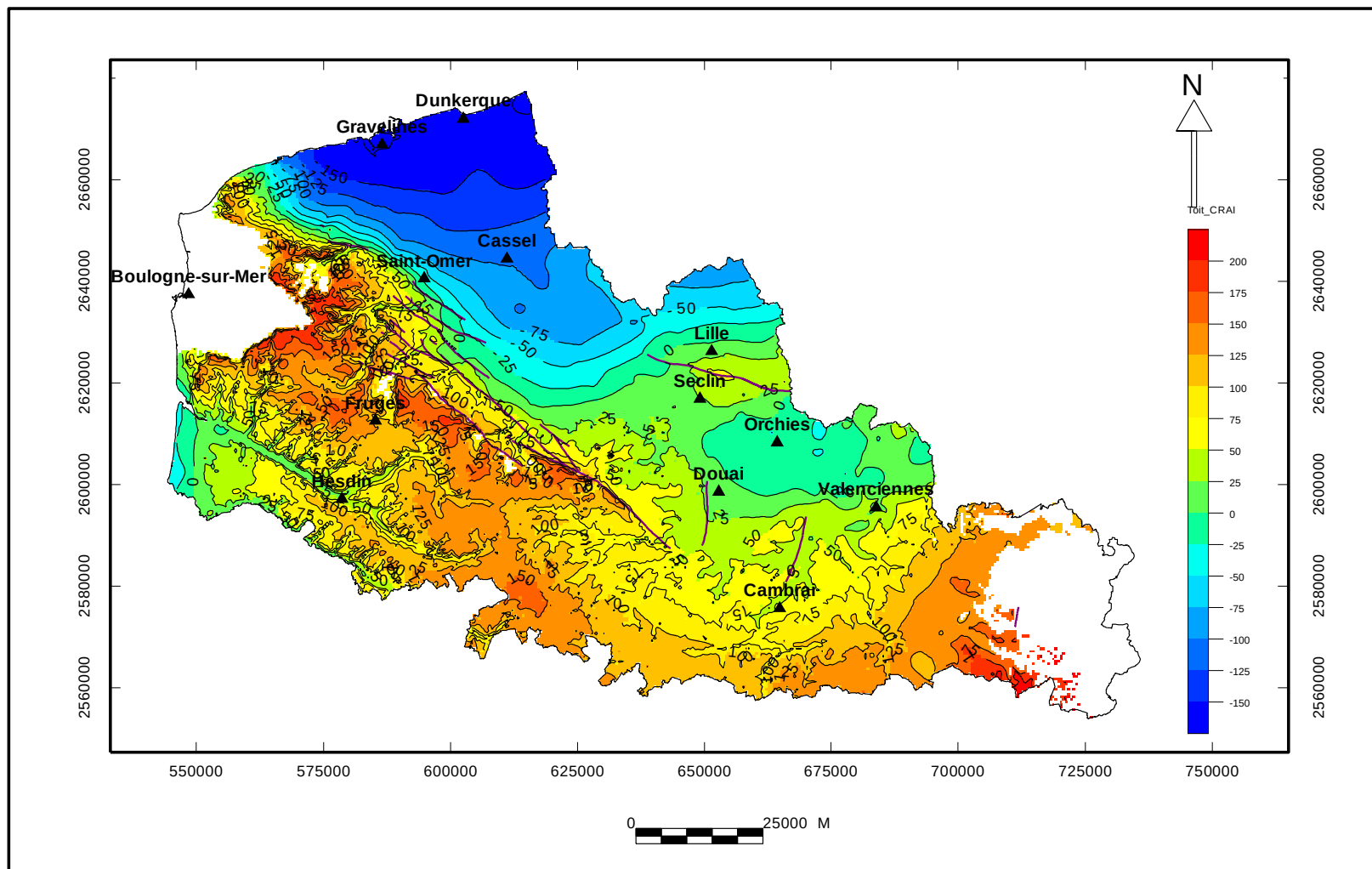


Figure 32 : Isohypses du toit de la Craie crétacée (en mètre NGF)

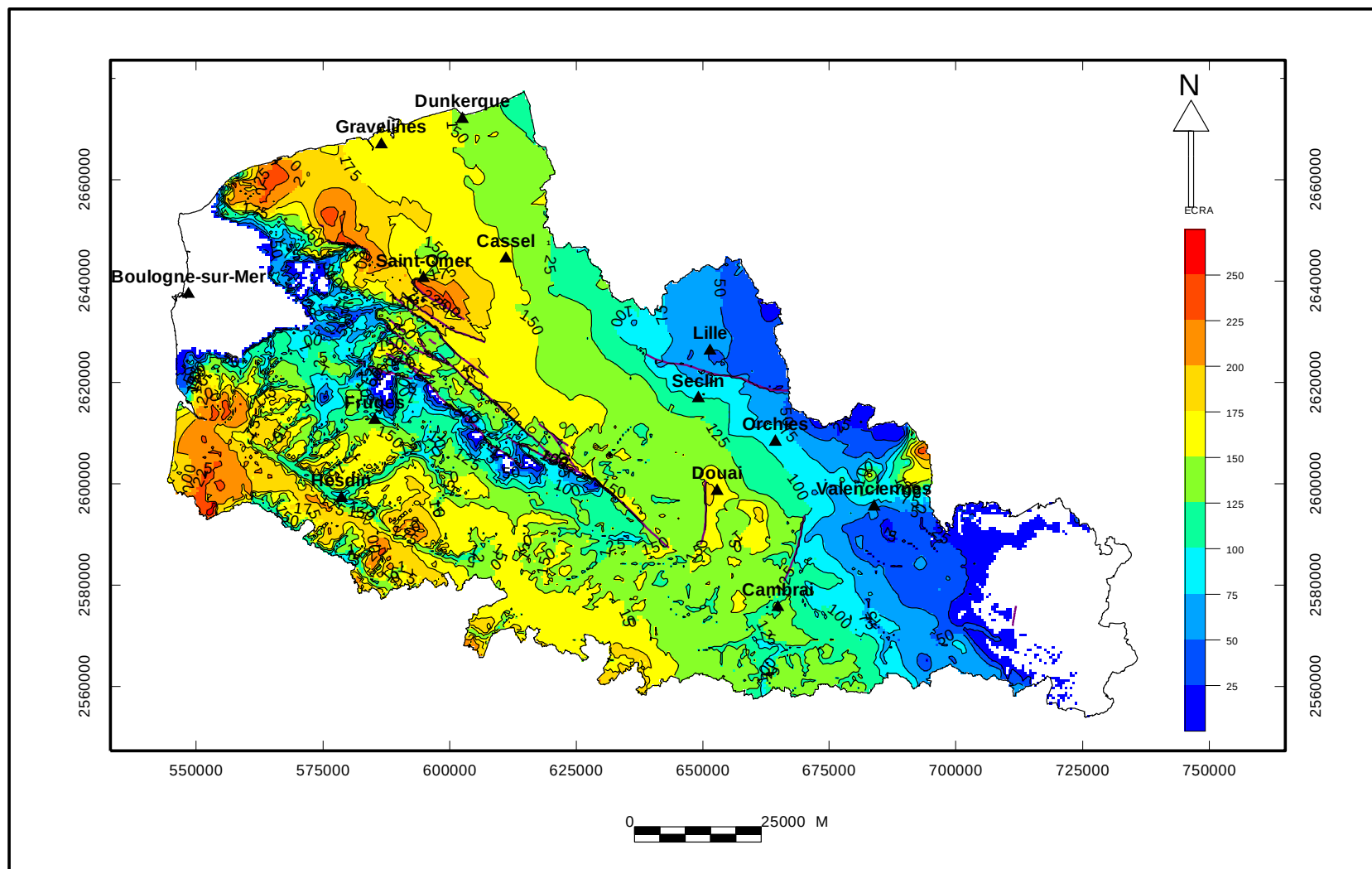


Figure 33 : Epaisseur de la Craie crétacée (en mètre)

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).

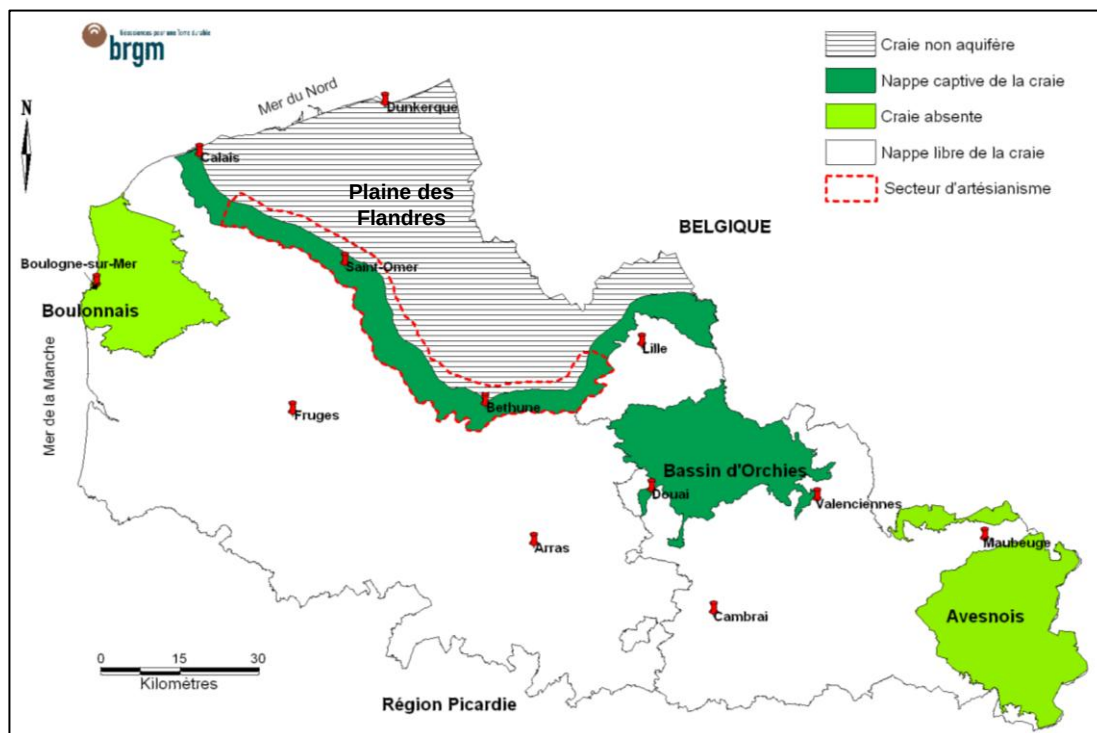


Figure 34 : Zones libre, captive et artésienne de la nappe de la Craie

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.

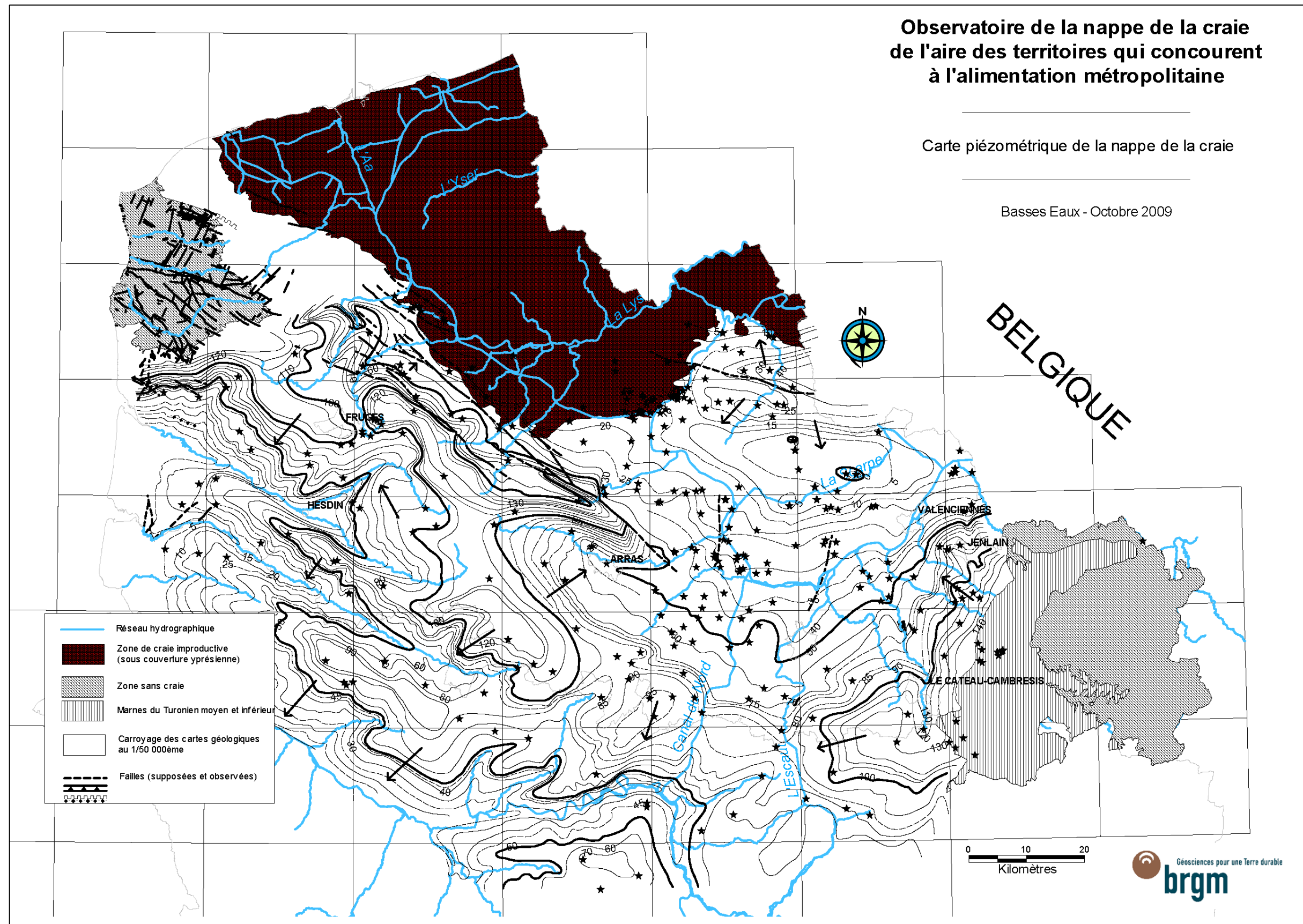


Figure 35 : Carte piézométrique de la nappe de la Craie – Basses Eaux 2009 (CARDIN et al., 2011)

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).

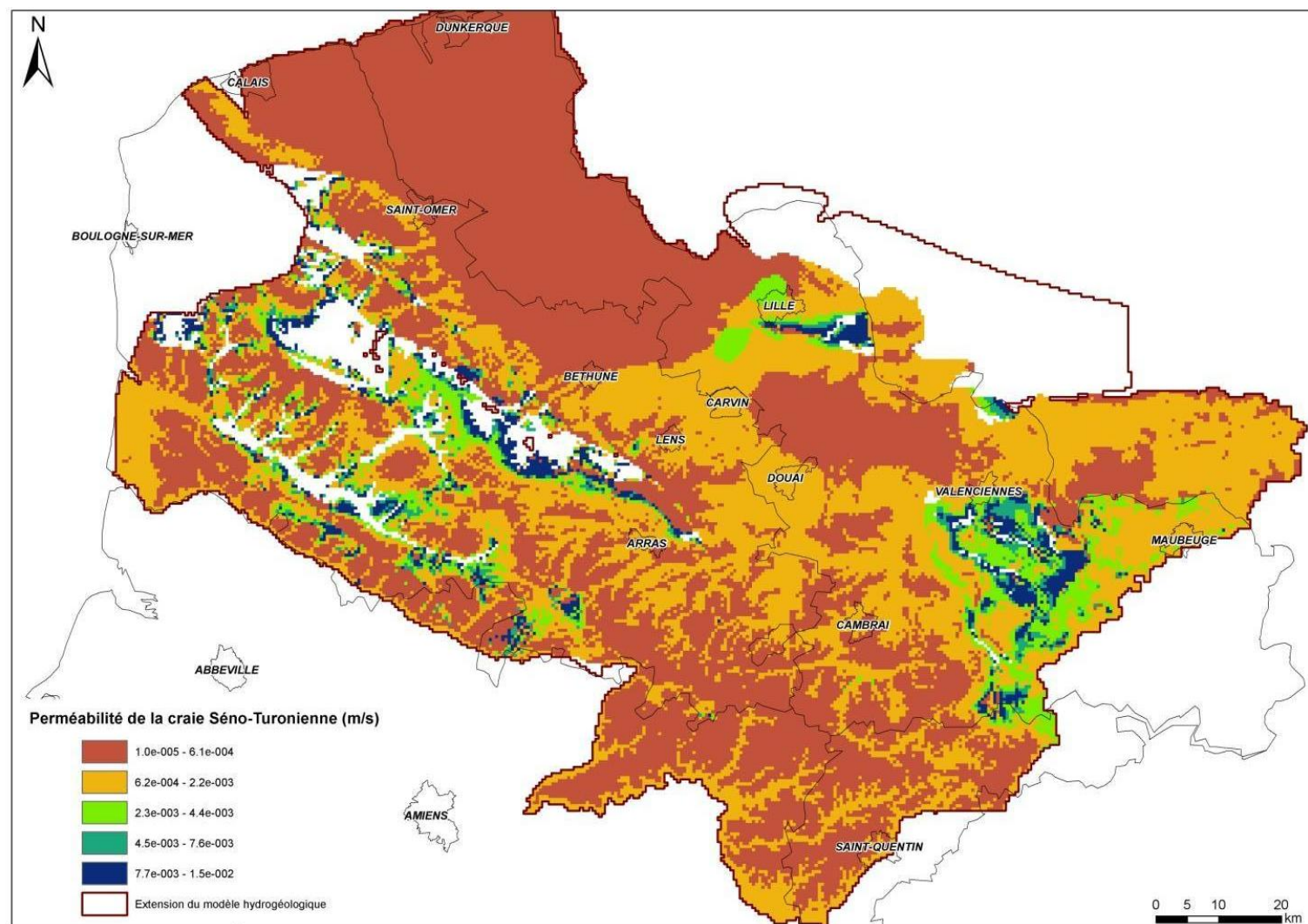


Figure 36 : Carte des valeurs initiales de perméabilité de la Craie séno-turonienne (BUSCARLET et al, 2011)

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

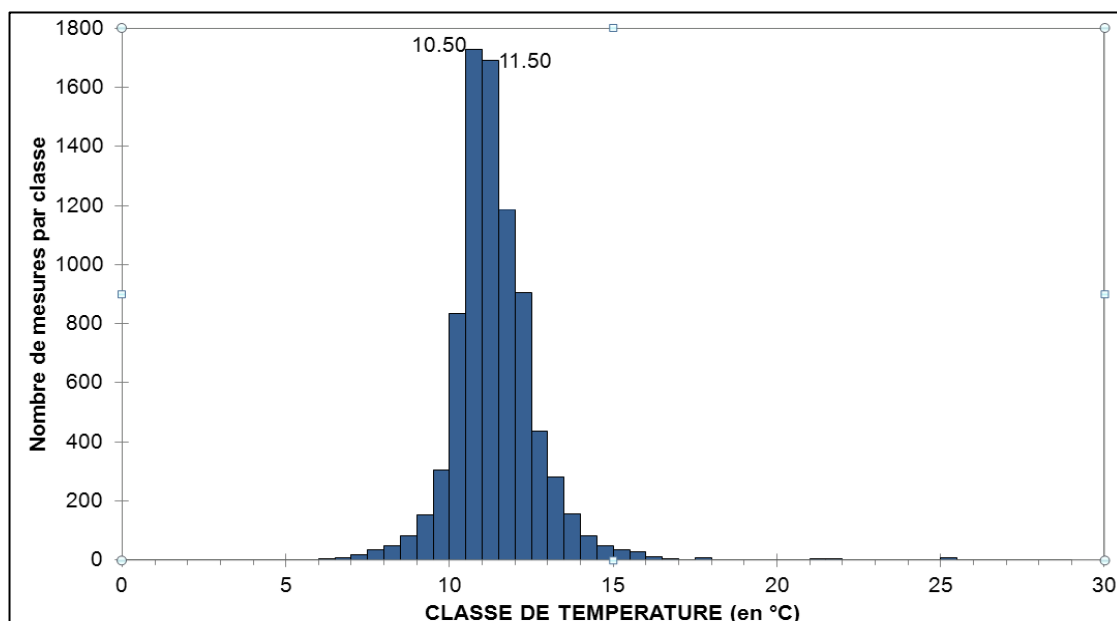


Figure 37 : Histogramme des températures de la nappe de la Craie

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.

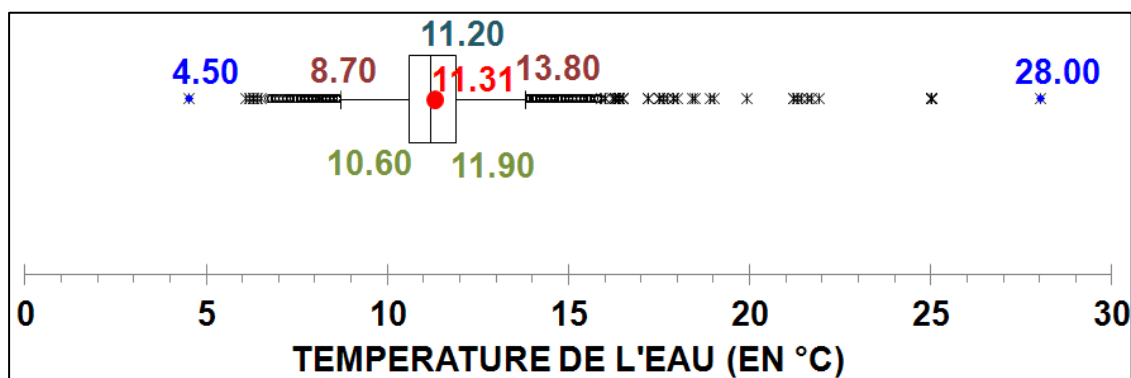


Figure 38 : Boîte à moustache de Tukey de la distribution des températures de la nappe de la Craie

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.

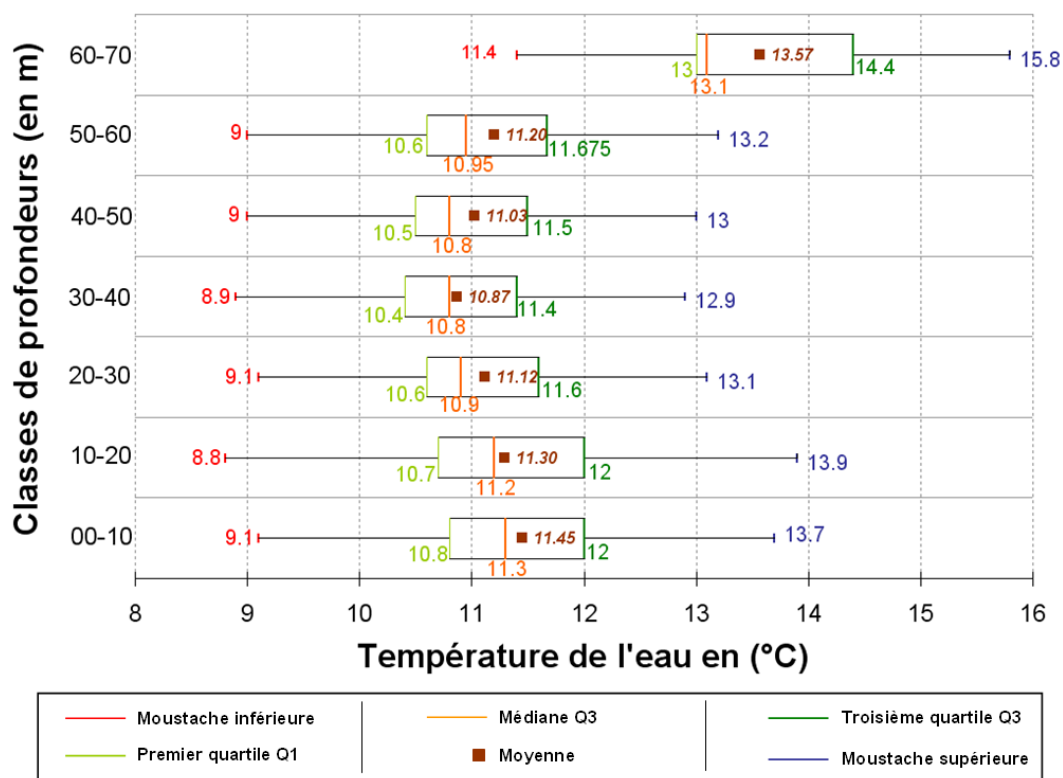


Figure 39 : Température de l'eau de l'aquifère de la Craie en fonction de la profondeur

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 calquée 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.

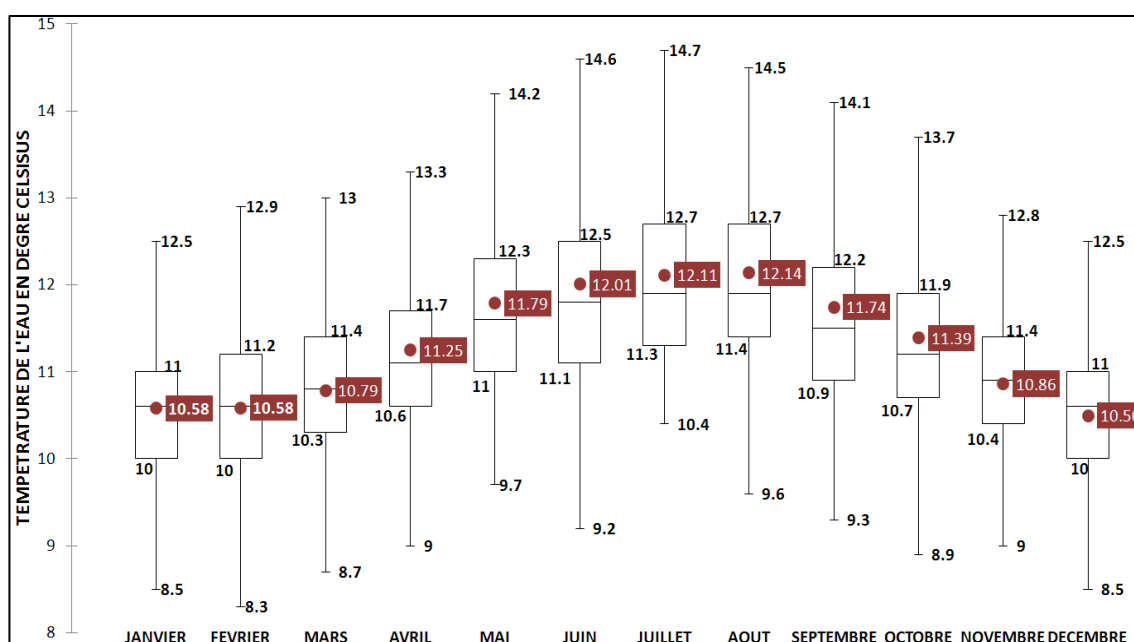


Figure 40 : Valeur moyenne mensuelle de la température de la nappe (en degré Celsius)

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, Mélantais, Plateau de Licques), les températures avoisinent les 11 à 13°C.

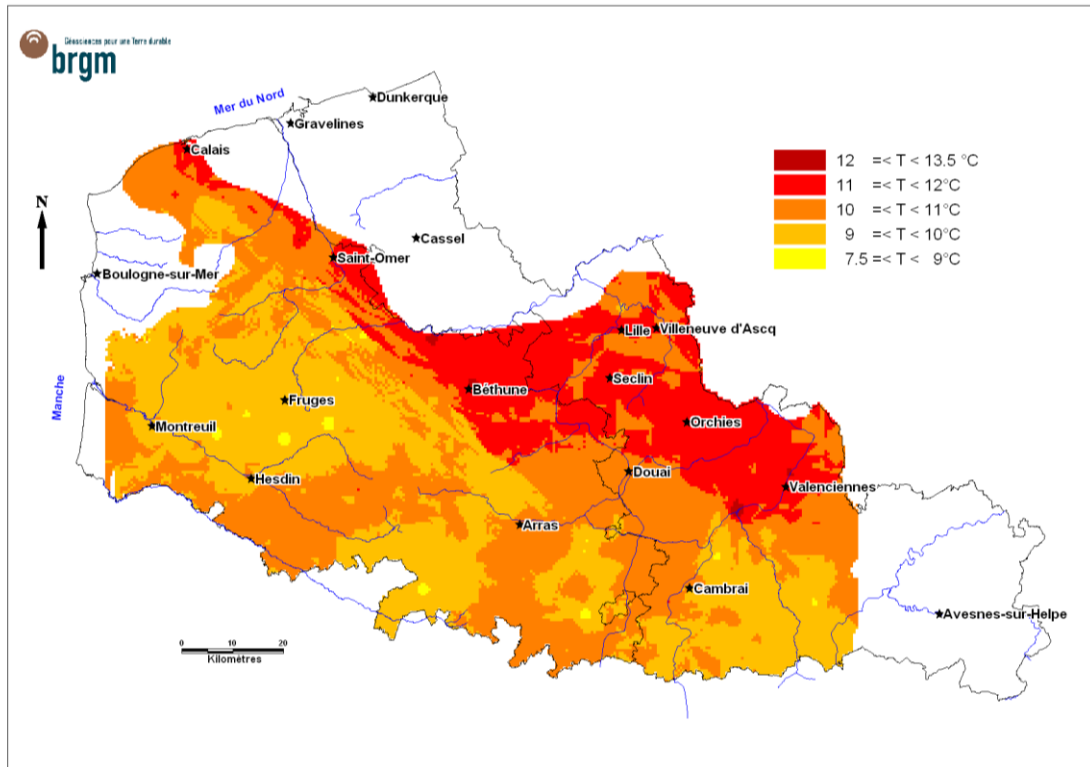


Figure 41 : Interpolation de la température de la nappe de la craie à partir des données hivernales.

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.

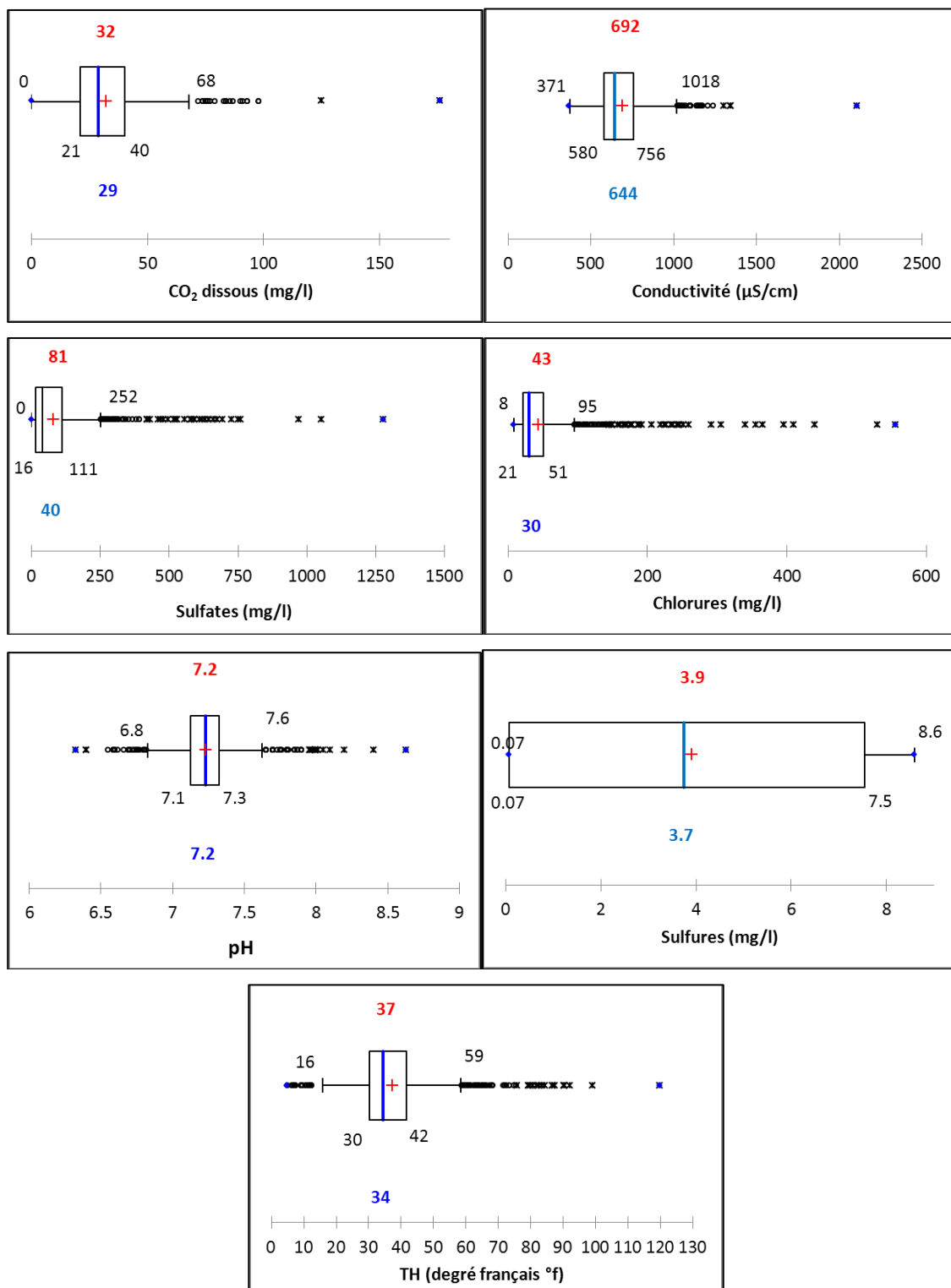


Figure 42 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe de la Craie par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

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 Mélantois, 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.

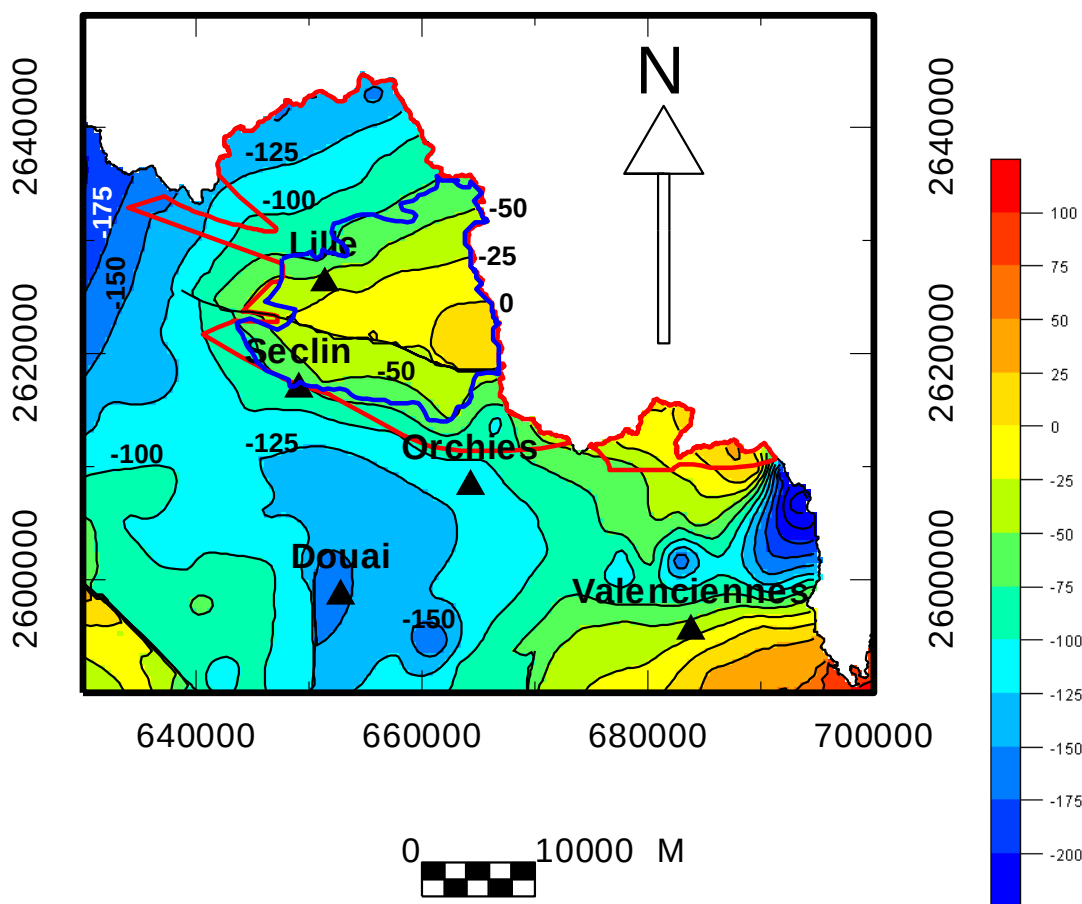


Figure 43 : Isohypsés du toit du Paléozoïque dans la région lilloise (en mètre NGF)

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).

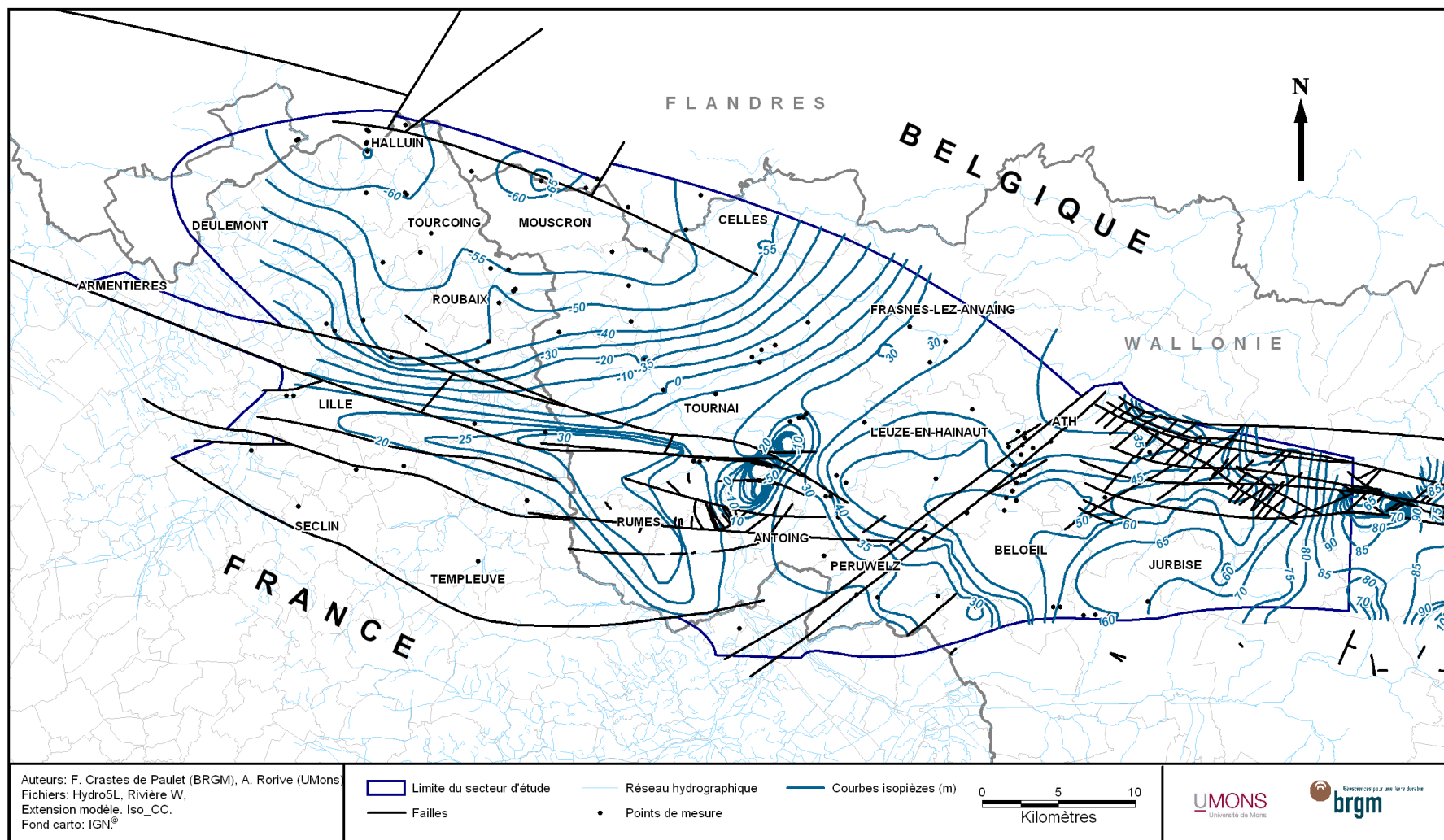


Figure 44 : Carte piézométrique d'octobre 2010 des Calcaires carbonifères de la région lilloise et de Belgique (CRASTES DE PAULET et al., 2010)

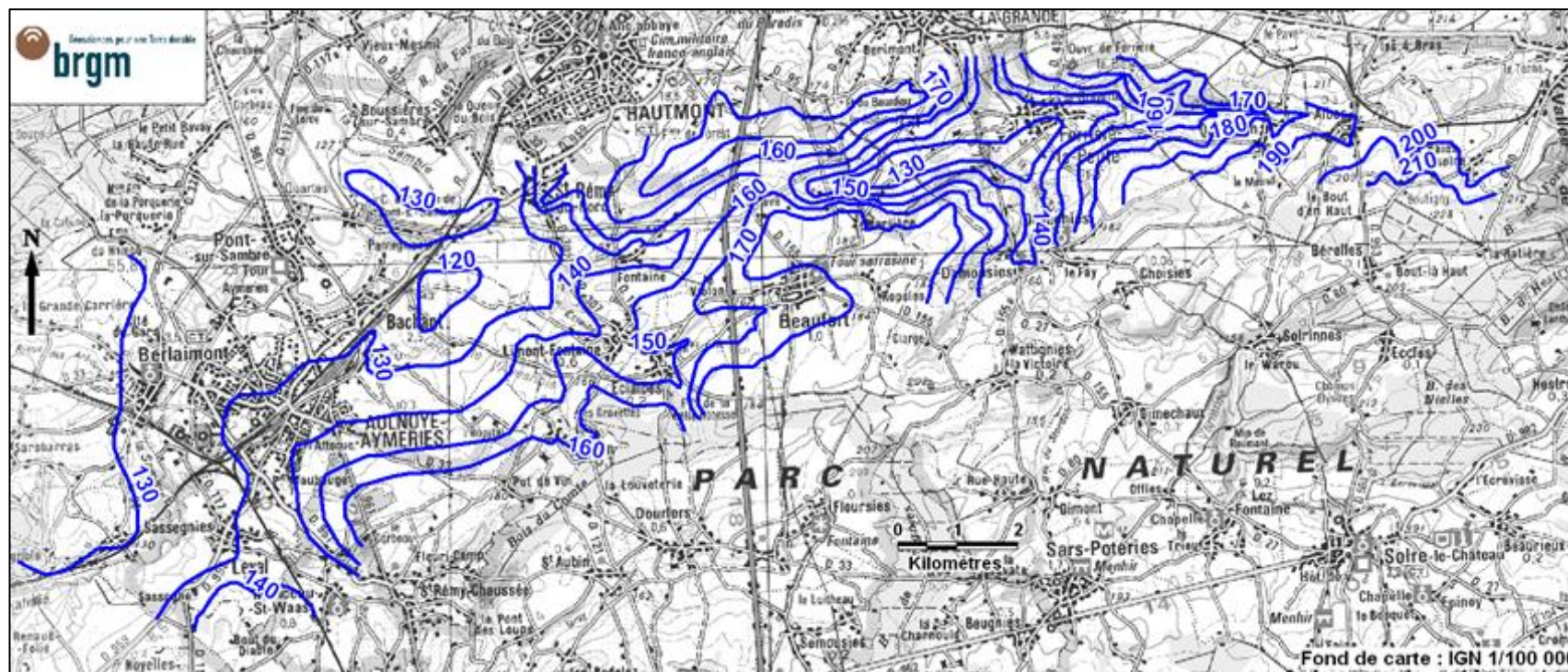


Figure 45 : Carte piézométrique d'octobre 1967 des Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant – Ferrière-la-Petite (DASSONVILLE G. et PLAT R., 1968)

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).

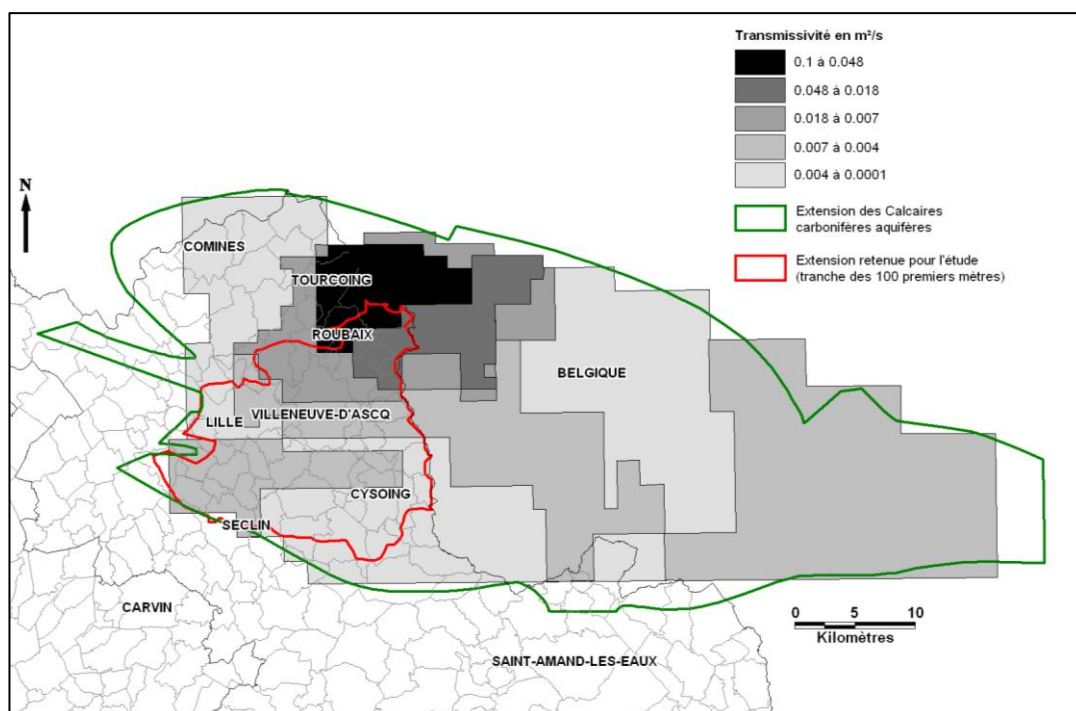


Figure 46 : Carte des transmissivités de la nappe des Calcaires carbonifères issu de la modélisation de 1981 (image provenant de P. COMBES 1991 « modélisation mathématique de la nappe du calcaire carbonifère », modifié BRGM)

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).

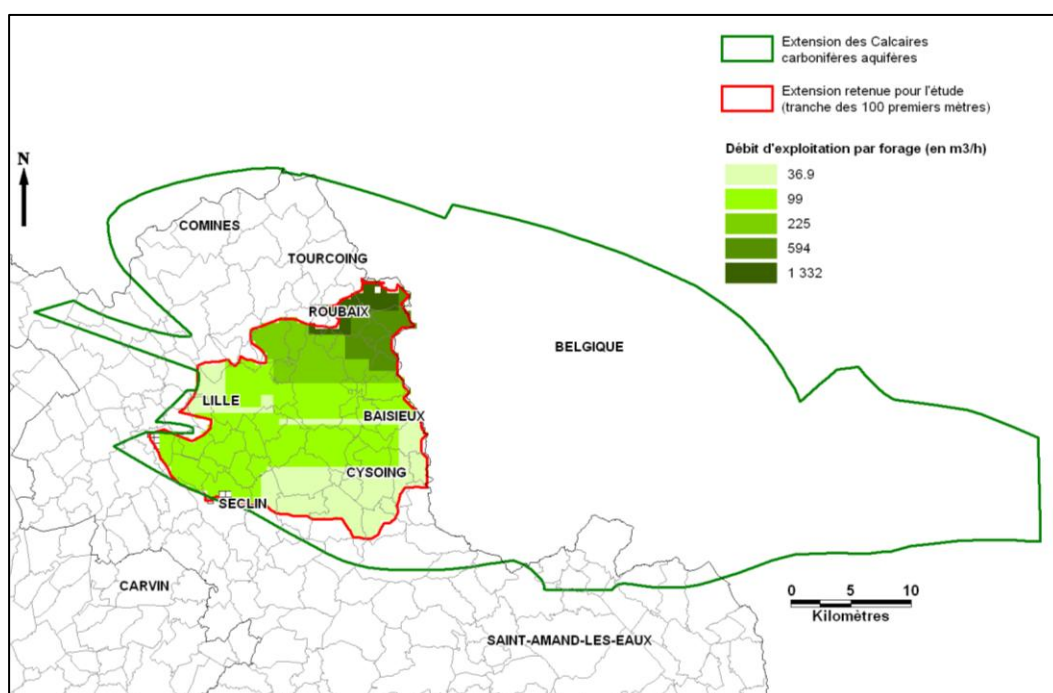


Figure 47 : Carte des débits d'exploitations par forages obtenus à partir des données de transmissivités de la modélisation de 1981

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 $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

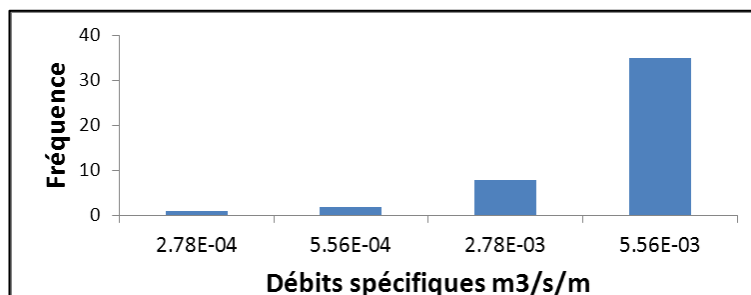


Figure 48 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Bachant - Ferrière

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).

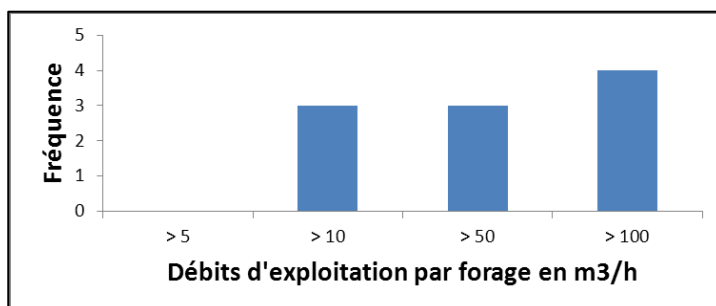


Figure 49 : Histogramme des débits d'exploitation par forage, calculés à partir des débits spécifiques avec un rabattement de 5 m.

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.

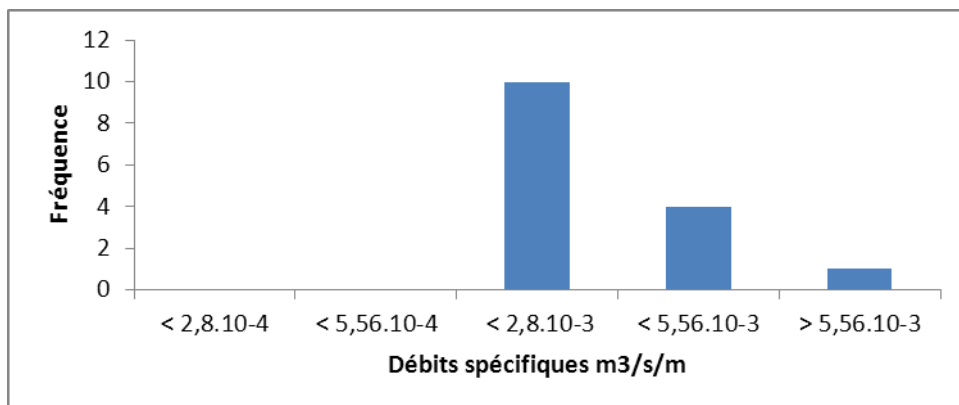


Figure 50 : Histogramme des valeurs de débits spécifiques recensés dans les Calcaires carbonifères du synclinal de Marbaix – Avesnes-sur-Helpe

• **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).

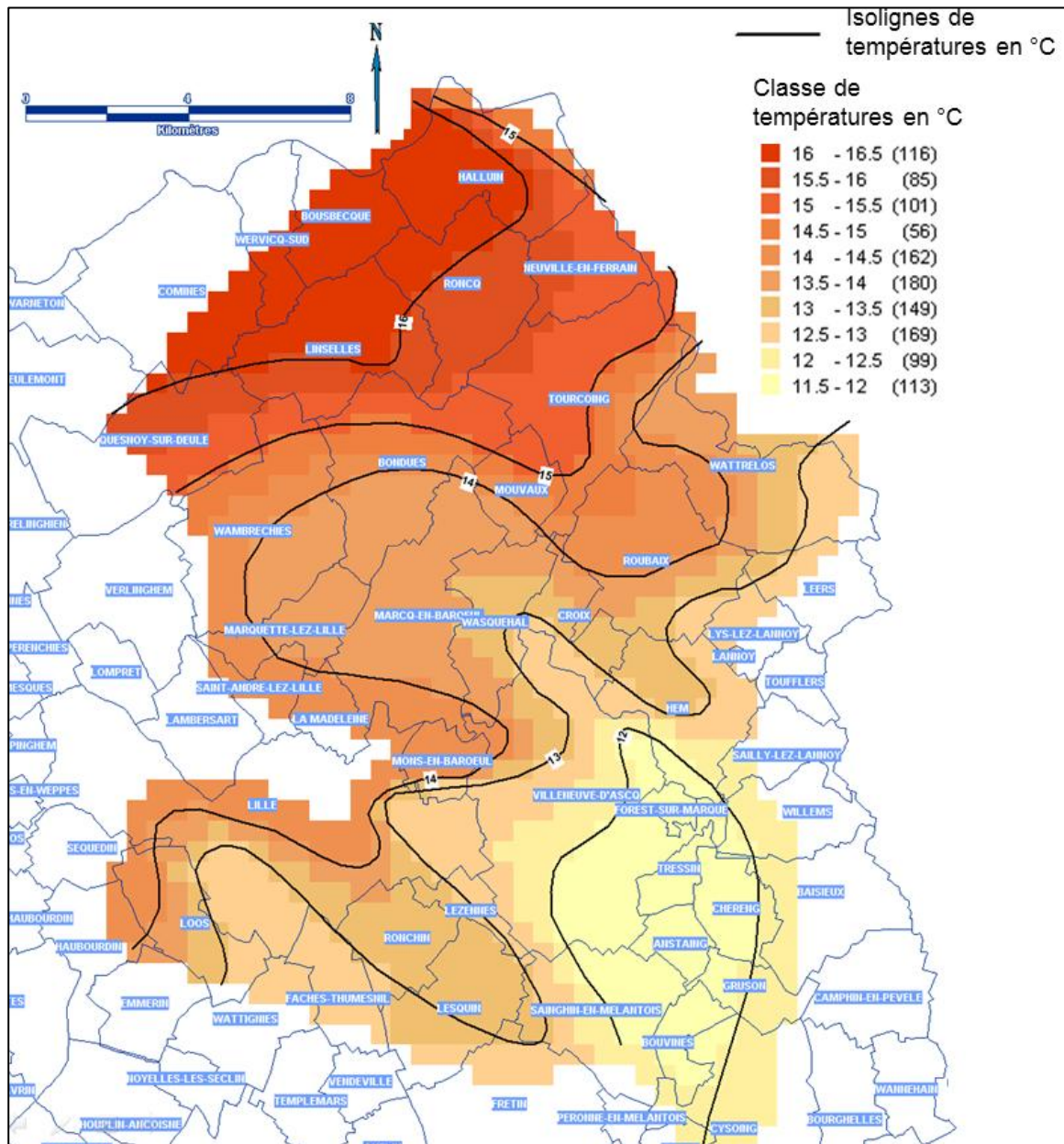


Figure 51 : Isolignes des températures de la nappe des Calcaires carbonifères lillois.

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.

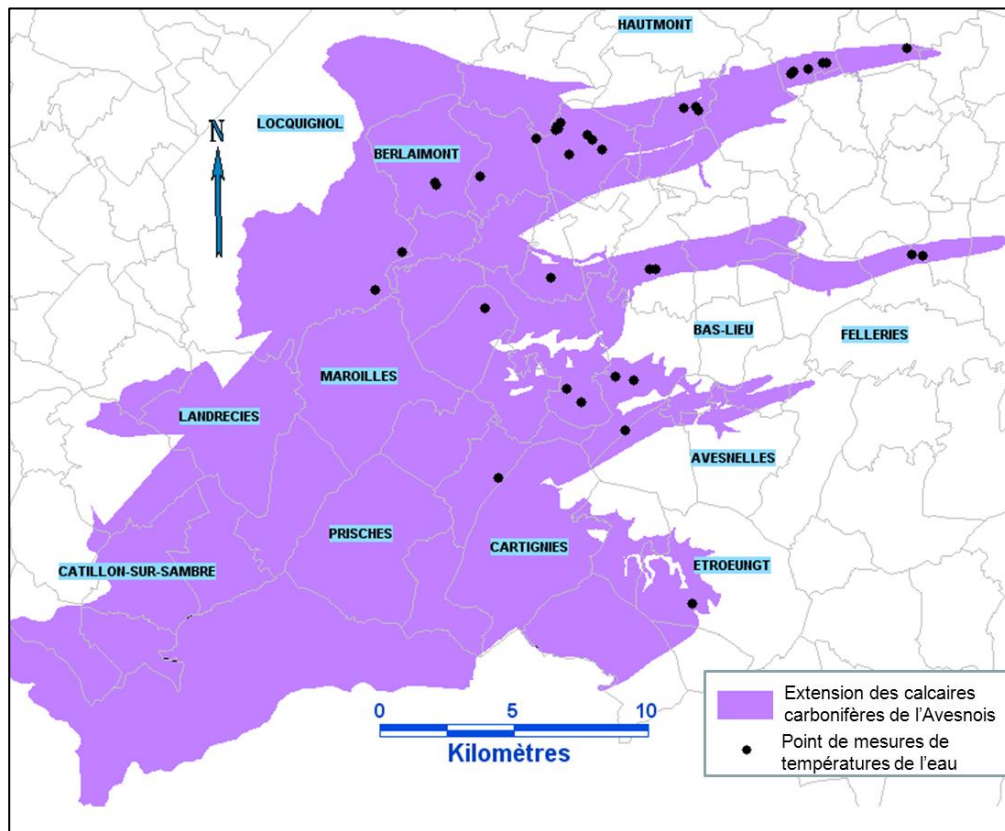


Figure 52 : Répartition des points de mesure de la température de la nappe des Calcaires carbonifères de l'Avesnois

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).

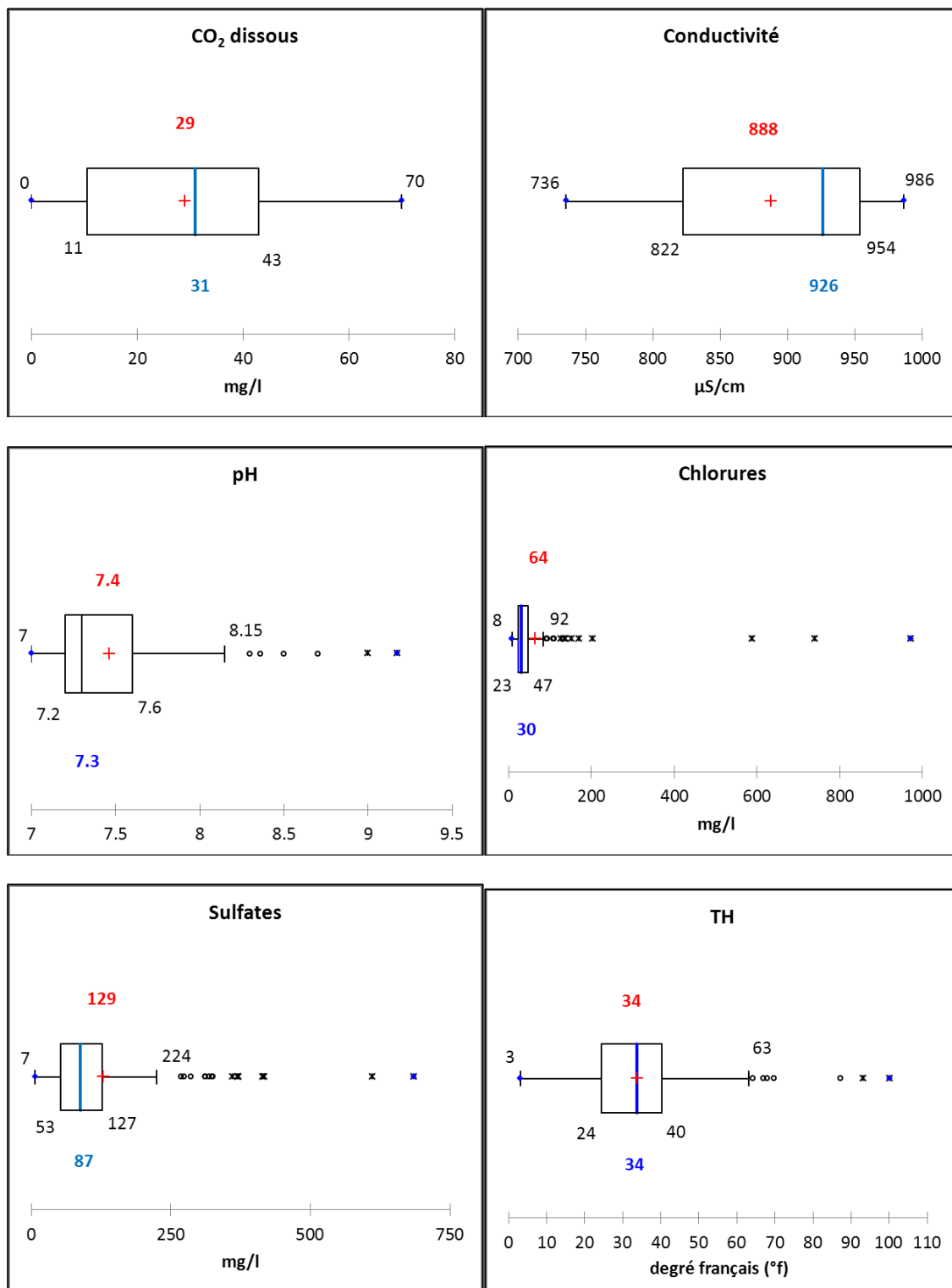


Figure 53 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères lillois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

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).

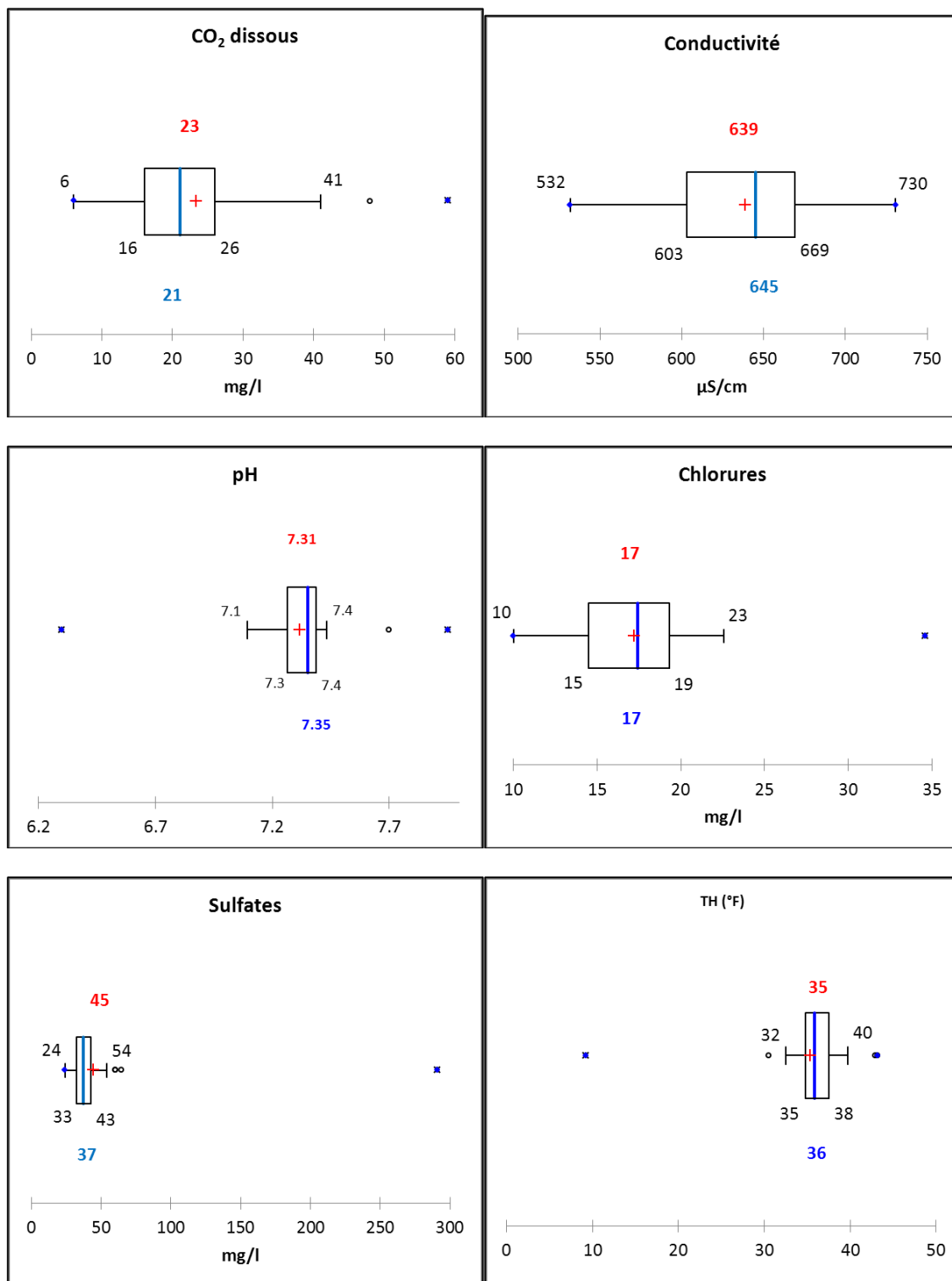


Figure 54 : Représentations de quelques paramètres hydrochimiques de la nappe des calcaires carbonifères de l'Avesnois par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

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.

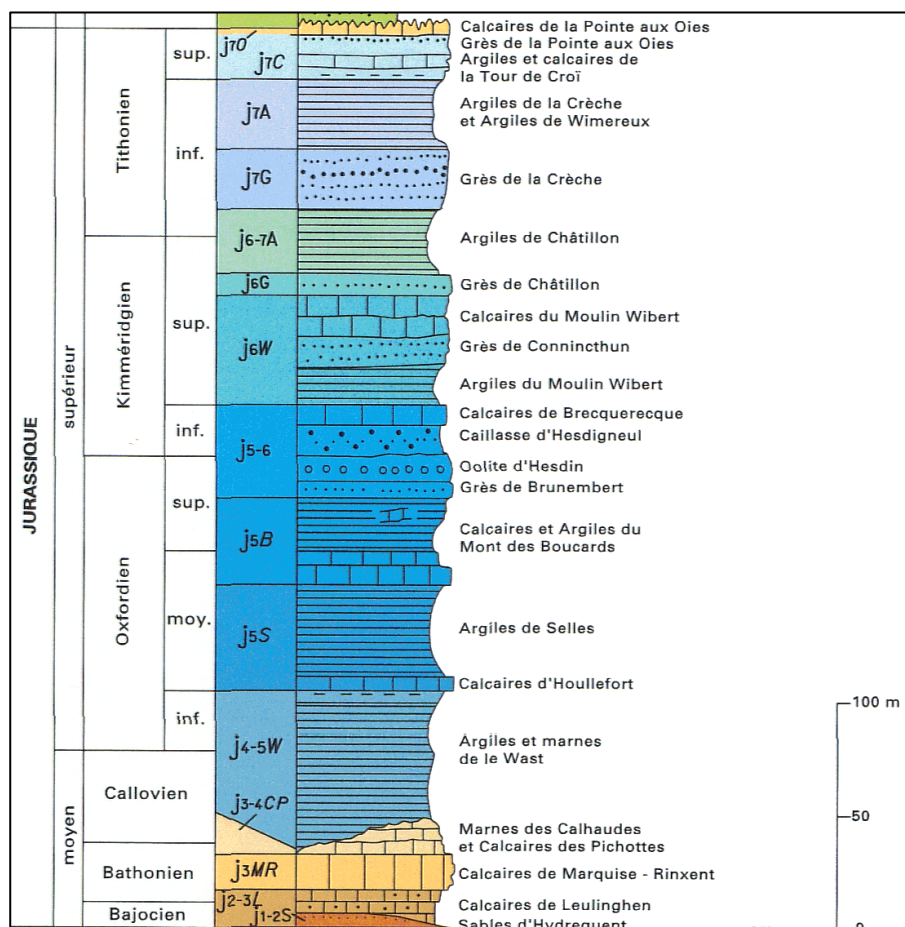


Figure 55 : Colonne lithostratigraphique des terrains jurassiques présents dans le Boulonnais

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

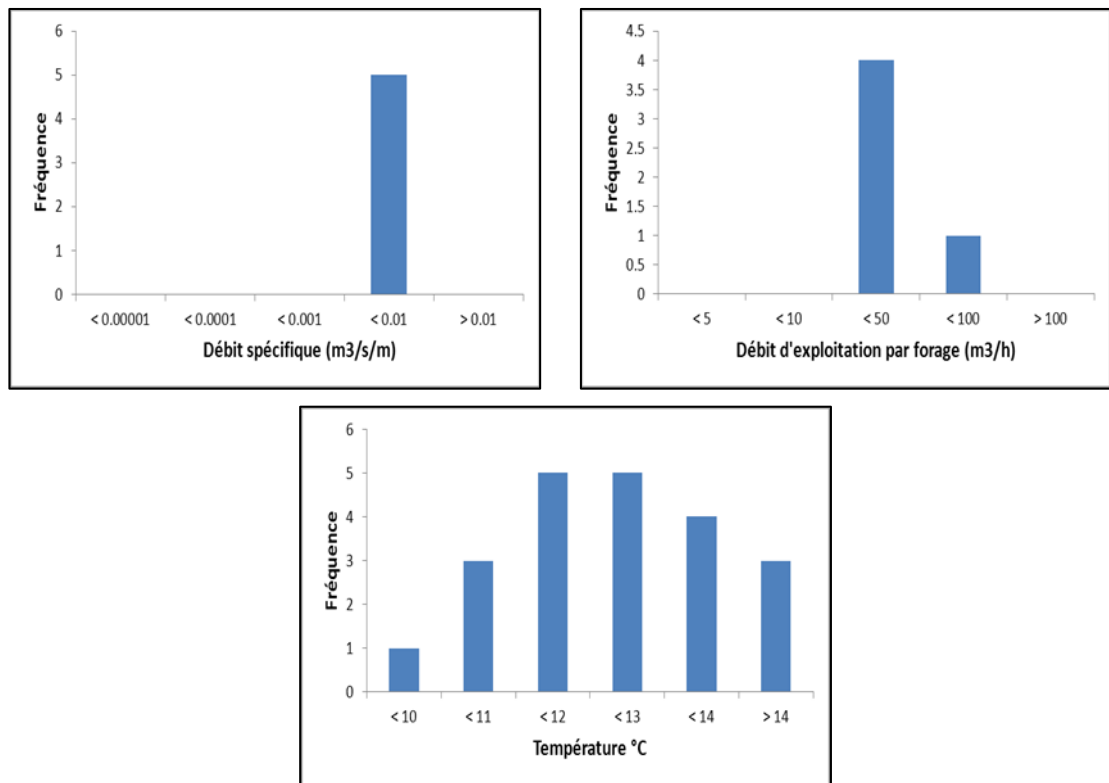


Figure 56 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Grès de Châtillon (ADES et BSS)

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

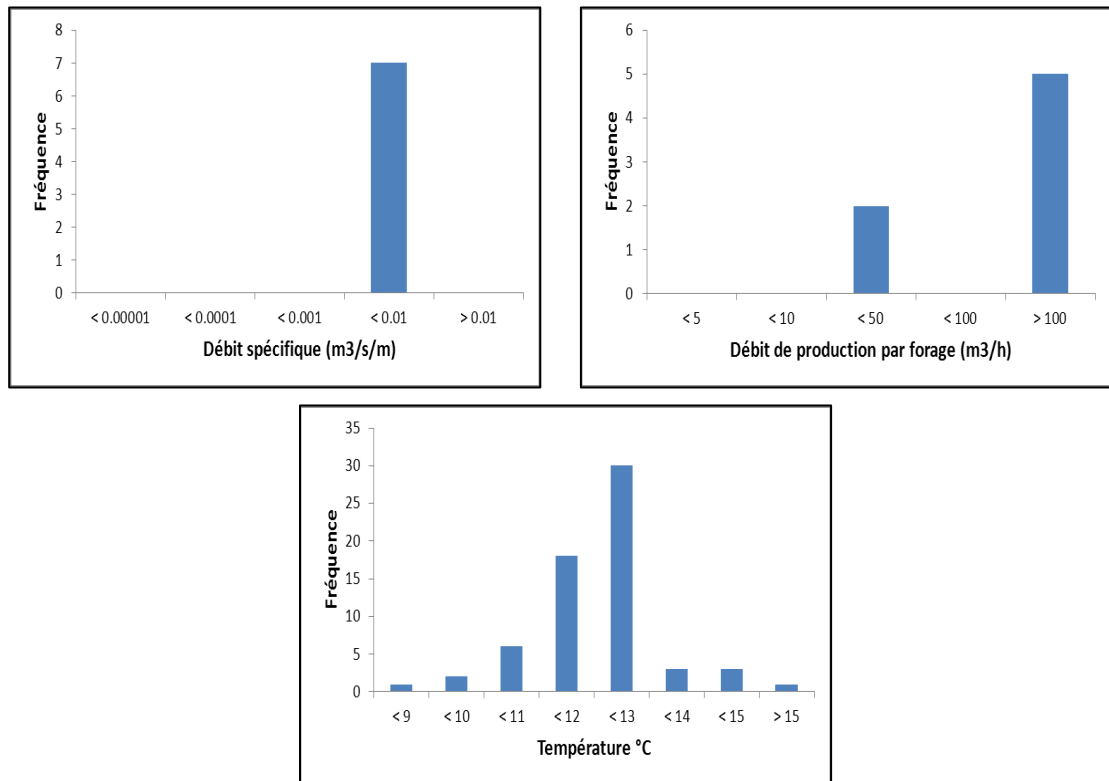


Figure 57 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires de Breccquerecque (ADES et BSS)

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

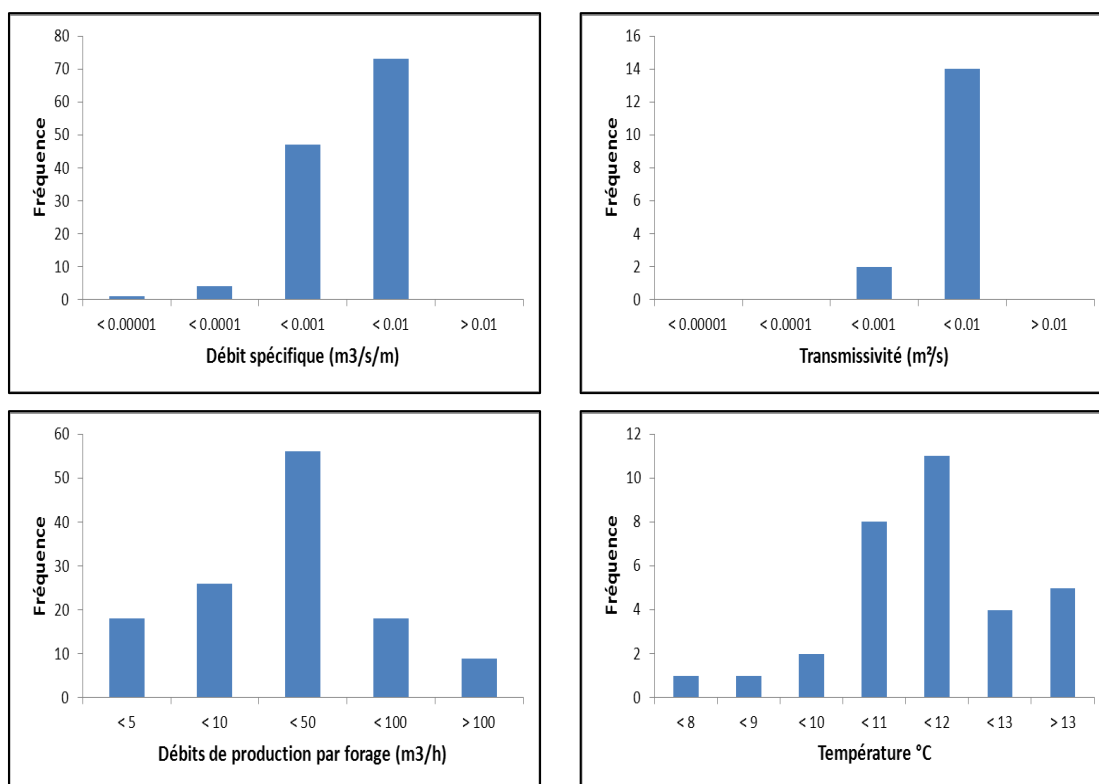


Figure 58 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère de l'Oolithe de Marquise (ADES et BSS)

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

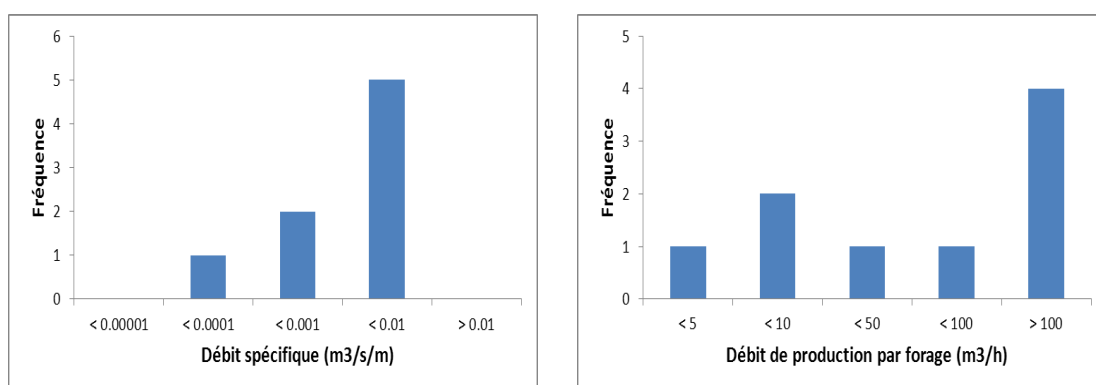


Figure 59 : Histogrammes des paramètres connus de l'aquifère des Calcaires carbonifères du Boulonnais (ADES et BSS)

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

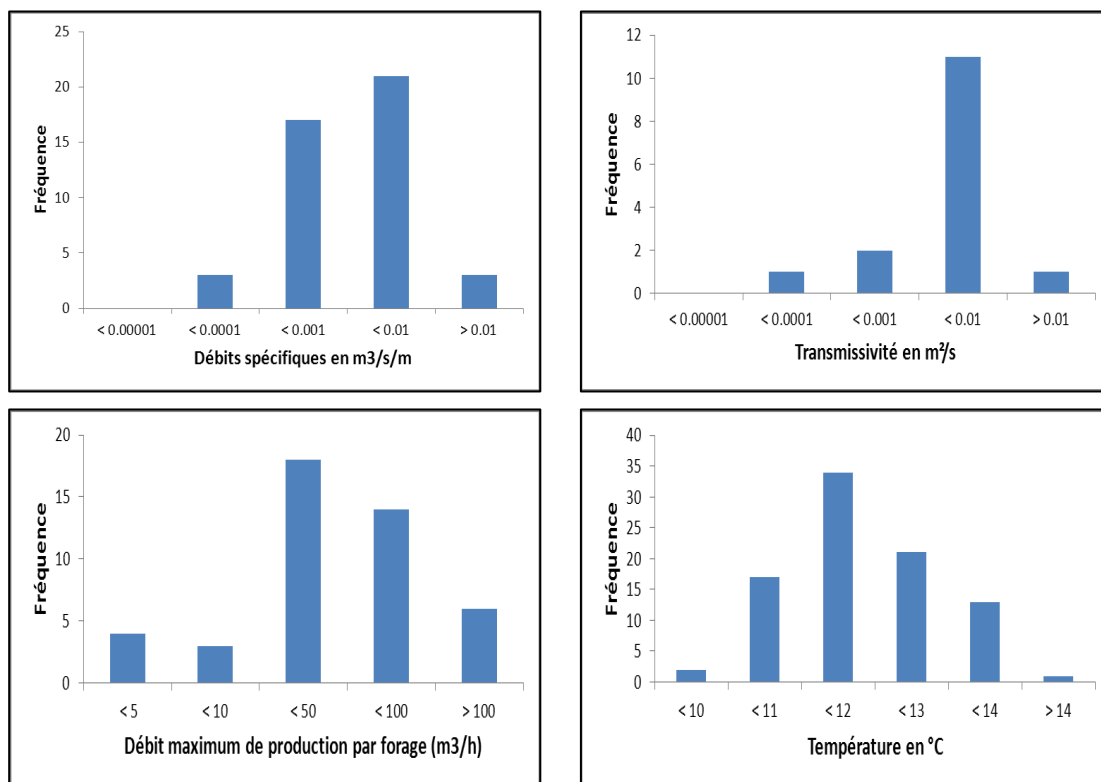


Figure 60 : Histogrammes des caractéristiques hydrodynamiques et des températures des aquifères dévoniens recensés dans la BSS et ADES.

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.



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).

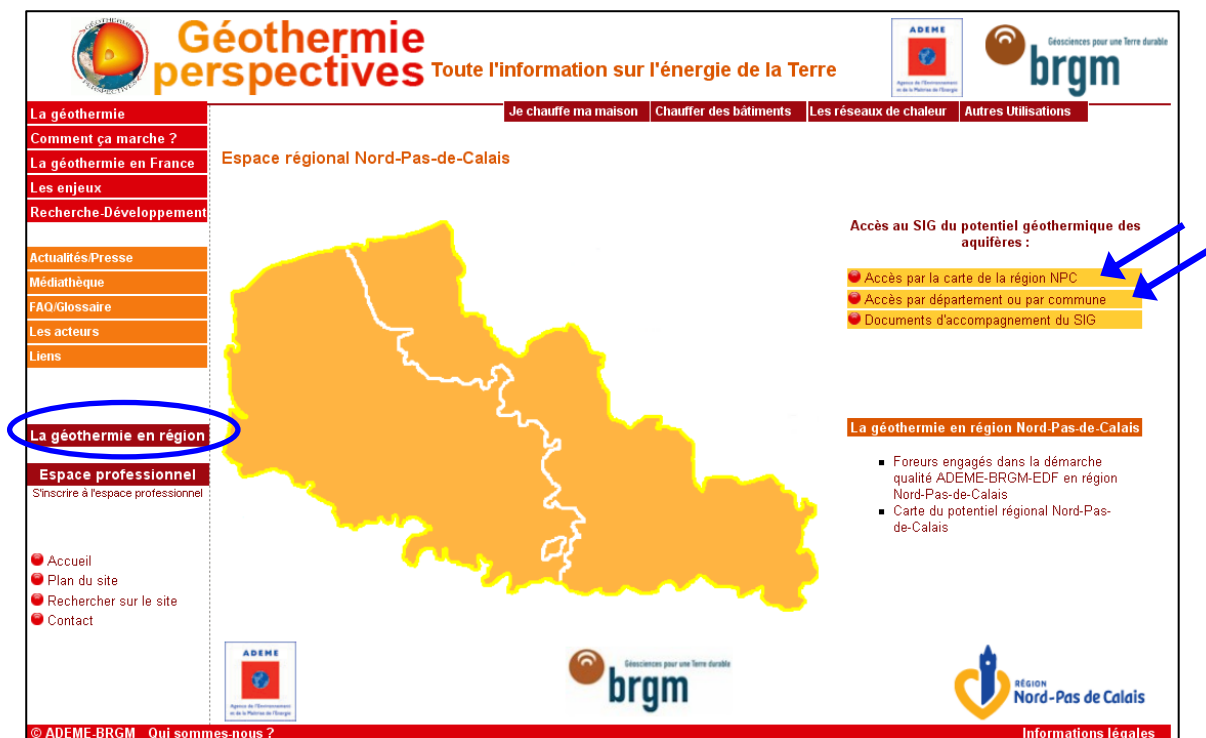


Figure 62 : Fenêtre d'accueil de l'espace régional Nord-Pas de Calais

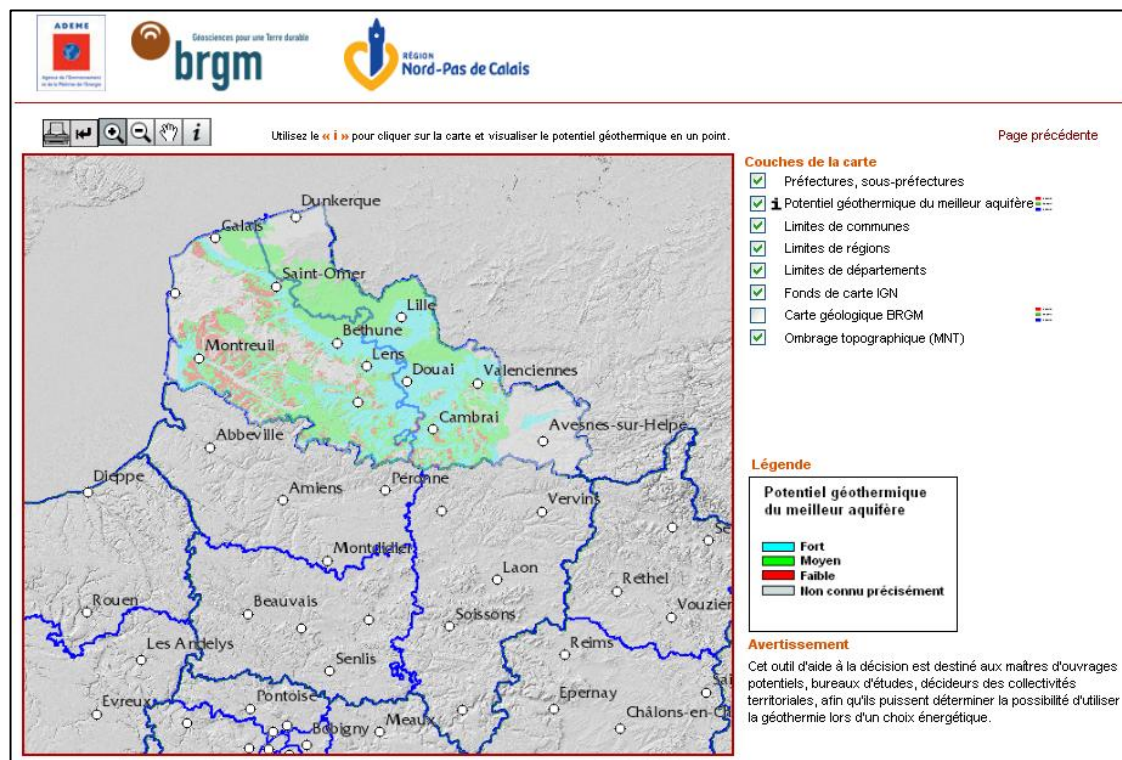


Figure 63 : Fenêtre d'interrogation de l'outil via la carte régionale



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 ».

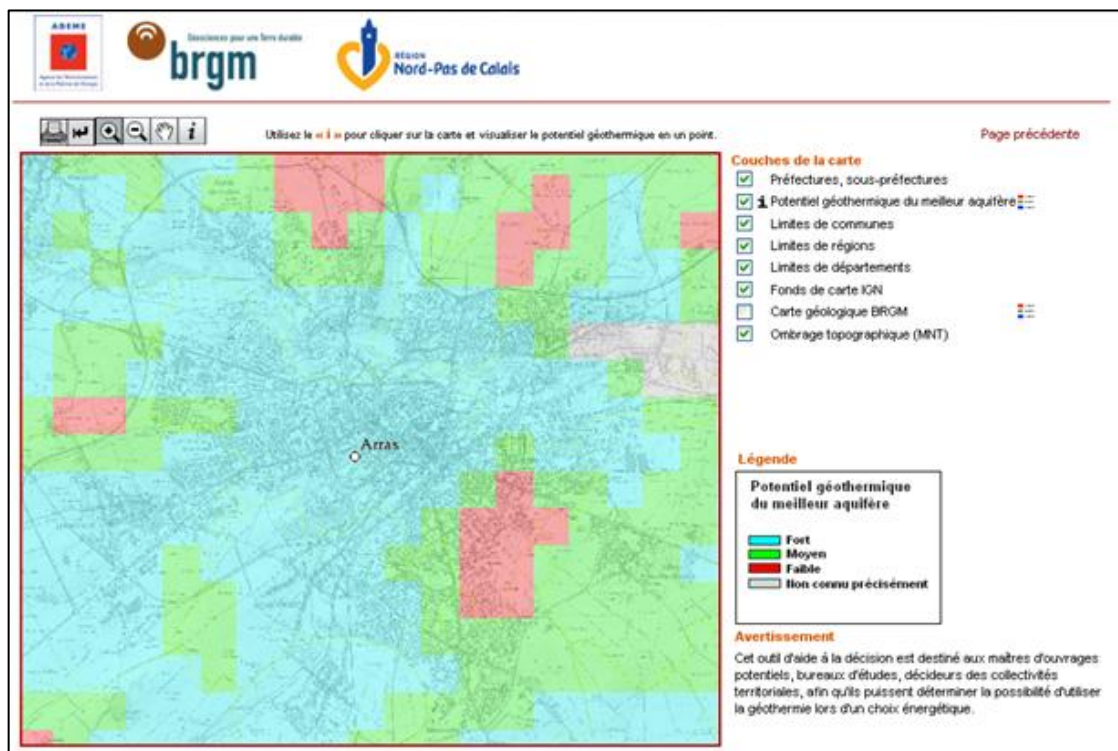


Figure 65 : Fenêtre cartographique à l'échelle communale

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.

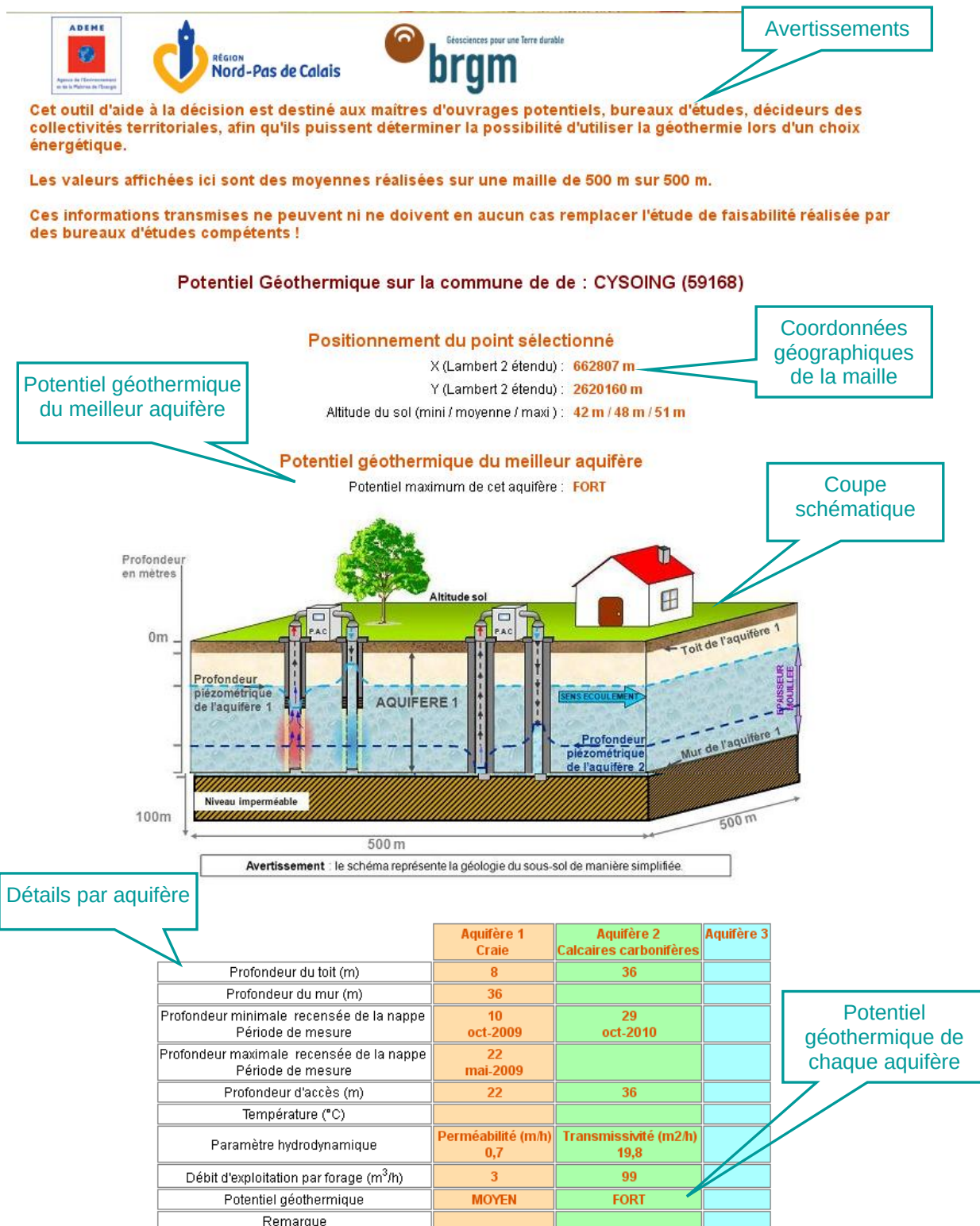


Figure 66 : Exemple de fiche de renseignement au droit de la commune de Cysoing

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 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$).

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 waterings - 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 Artois-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 Méantois 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>

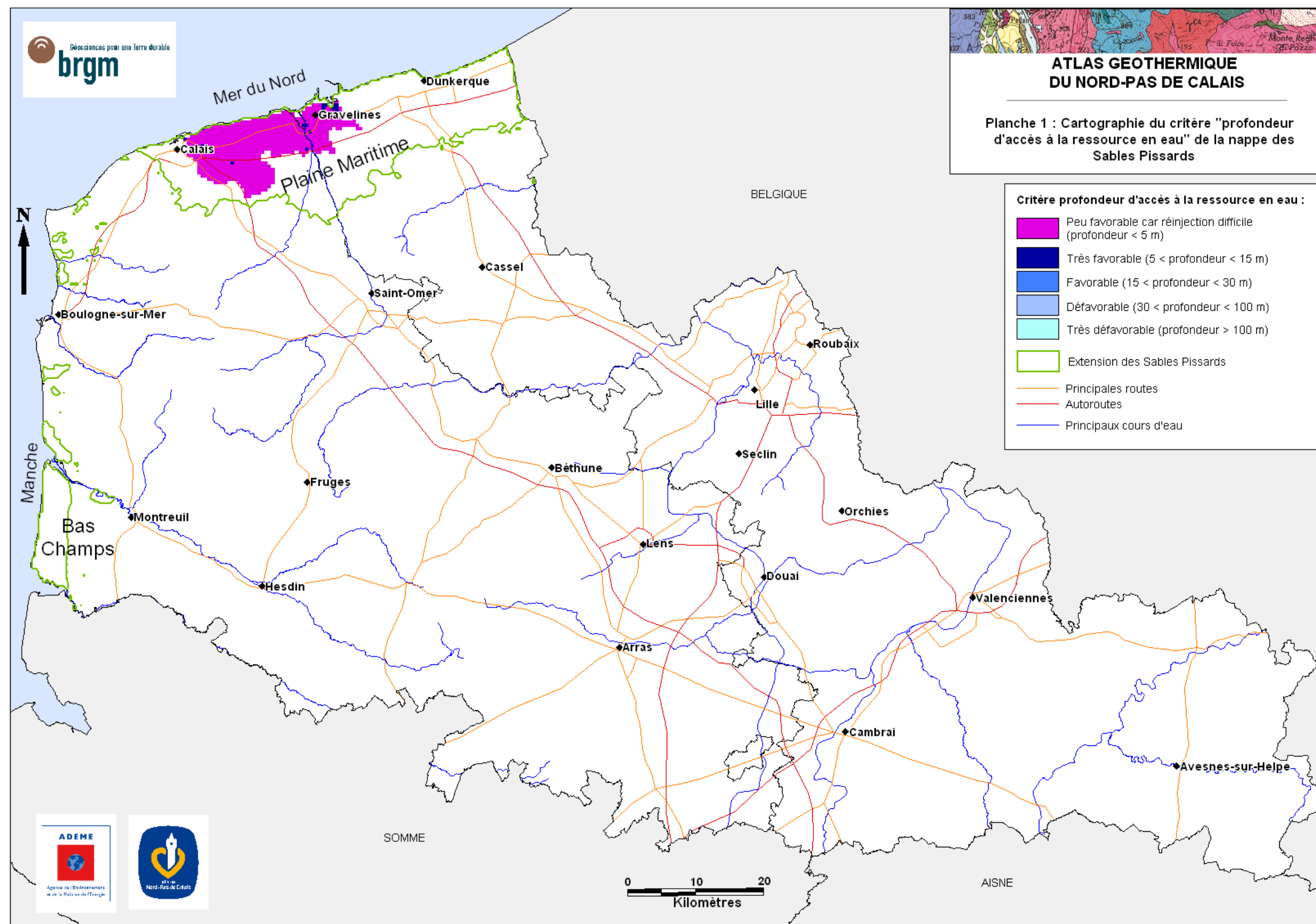
Région Nord-Pas de Calais : <http://www.nordpasdecals.fr>

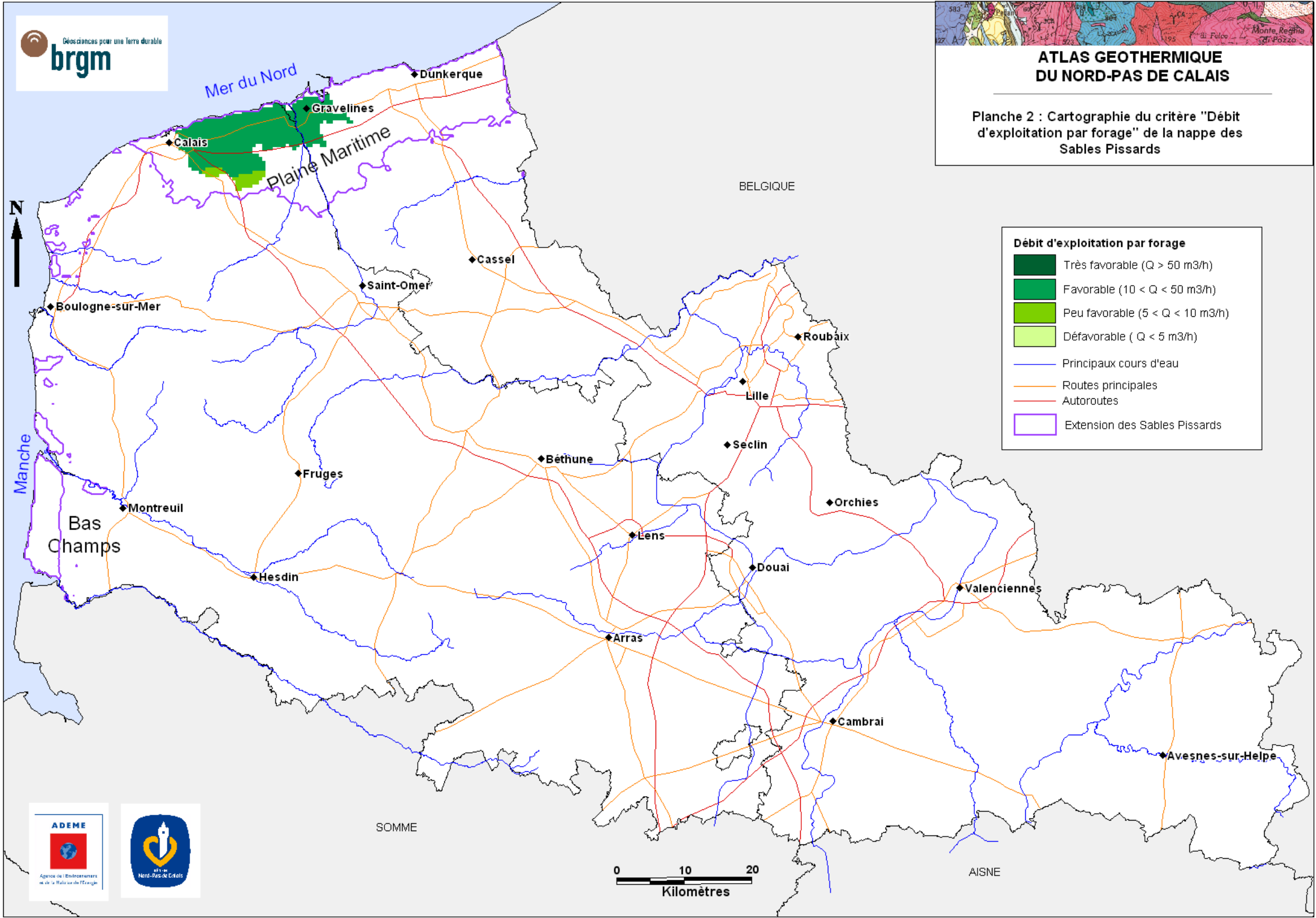
8. Annexes

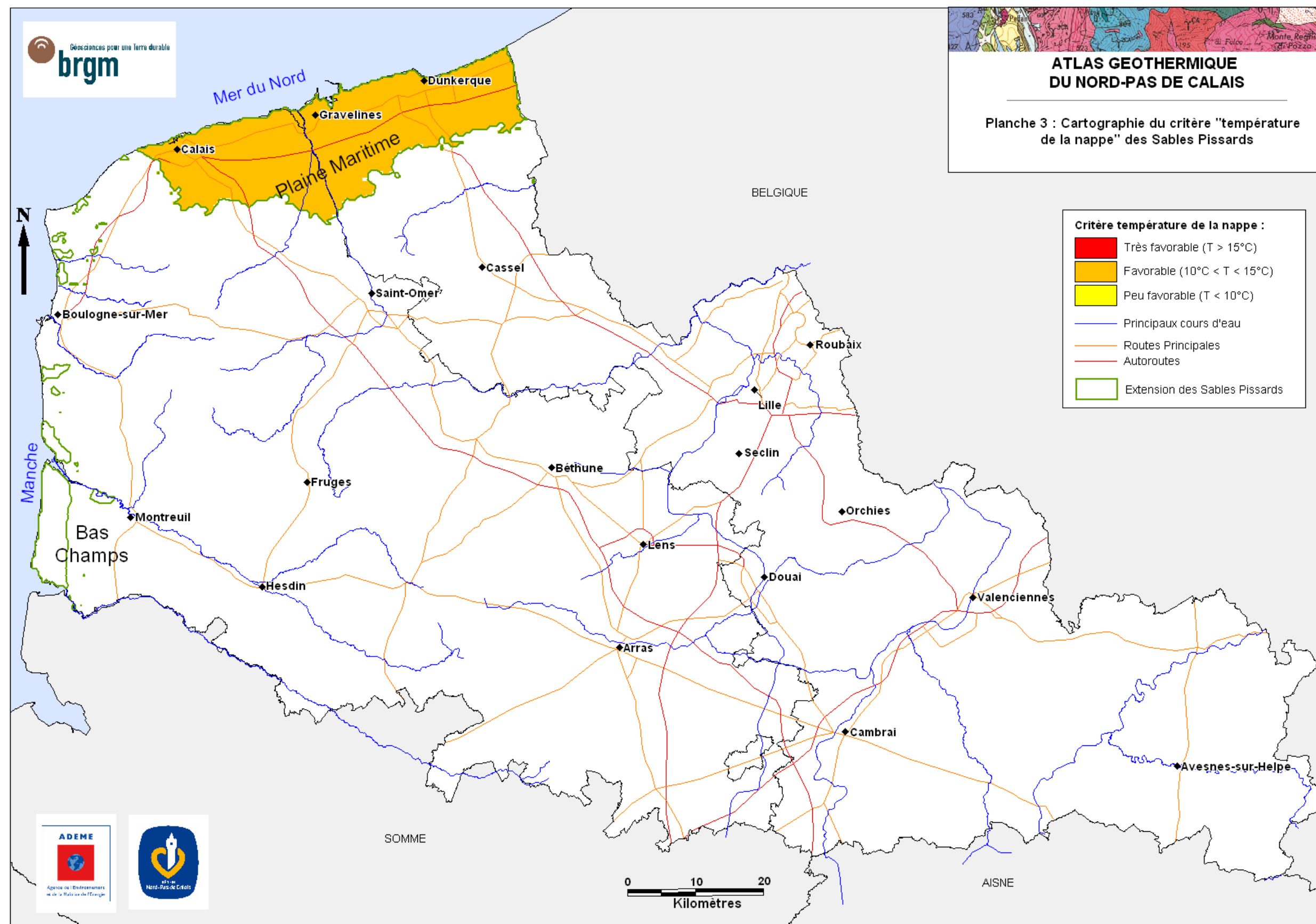
Annexe 1

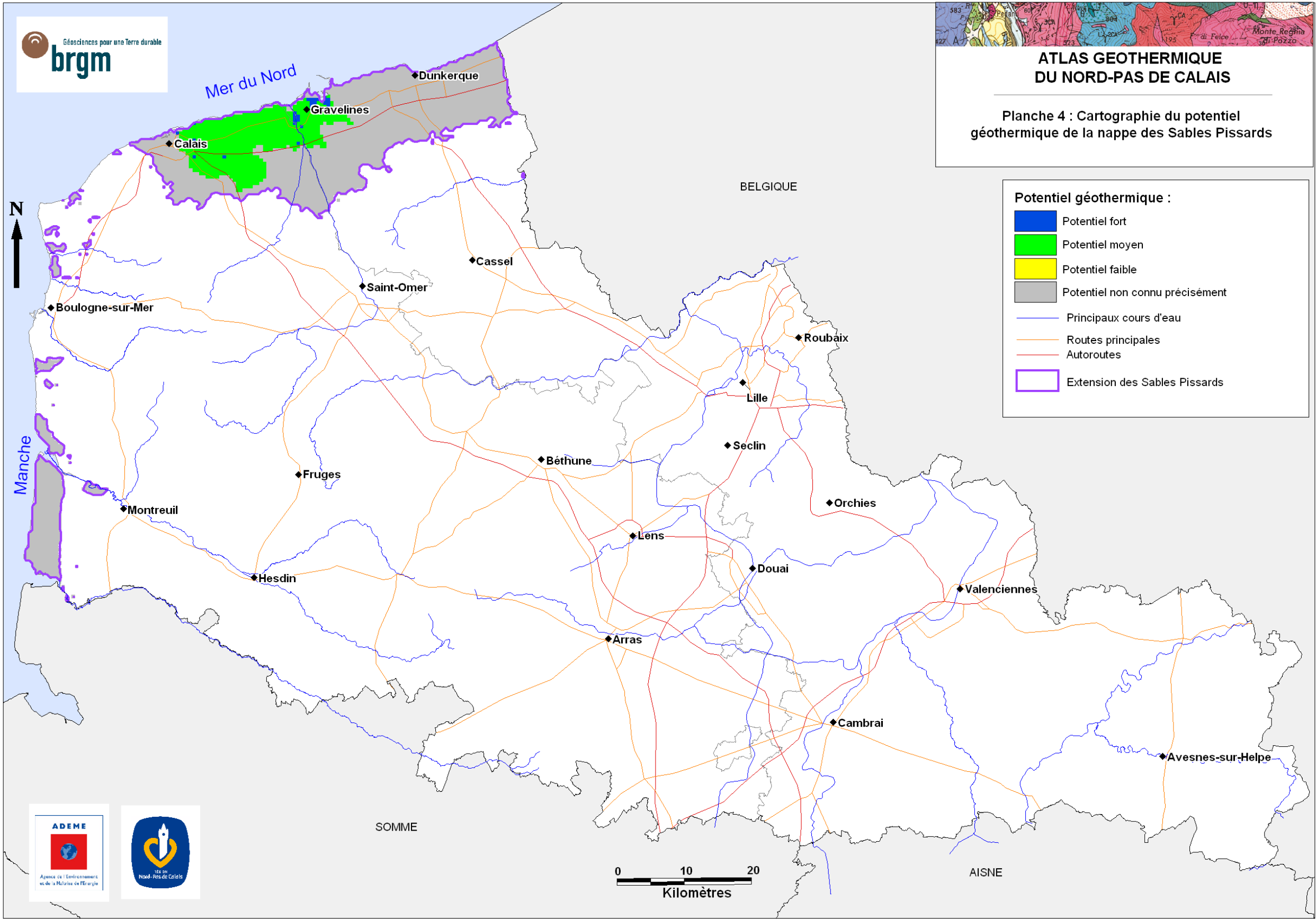
Cartes des critères par aquifère : profondeur d'accès à la ressource, débit d'exploitation par forage, température de la nappe et potentiel géothermique

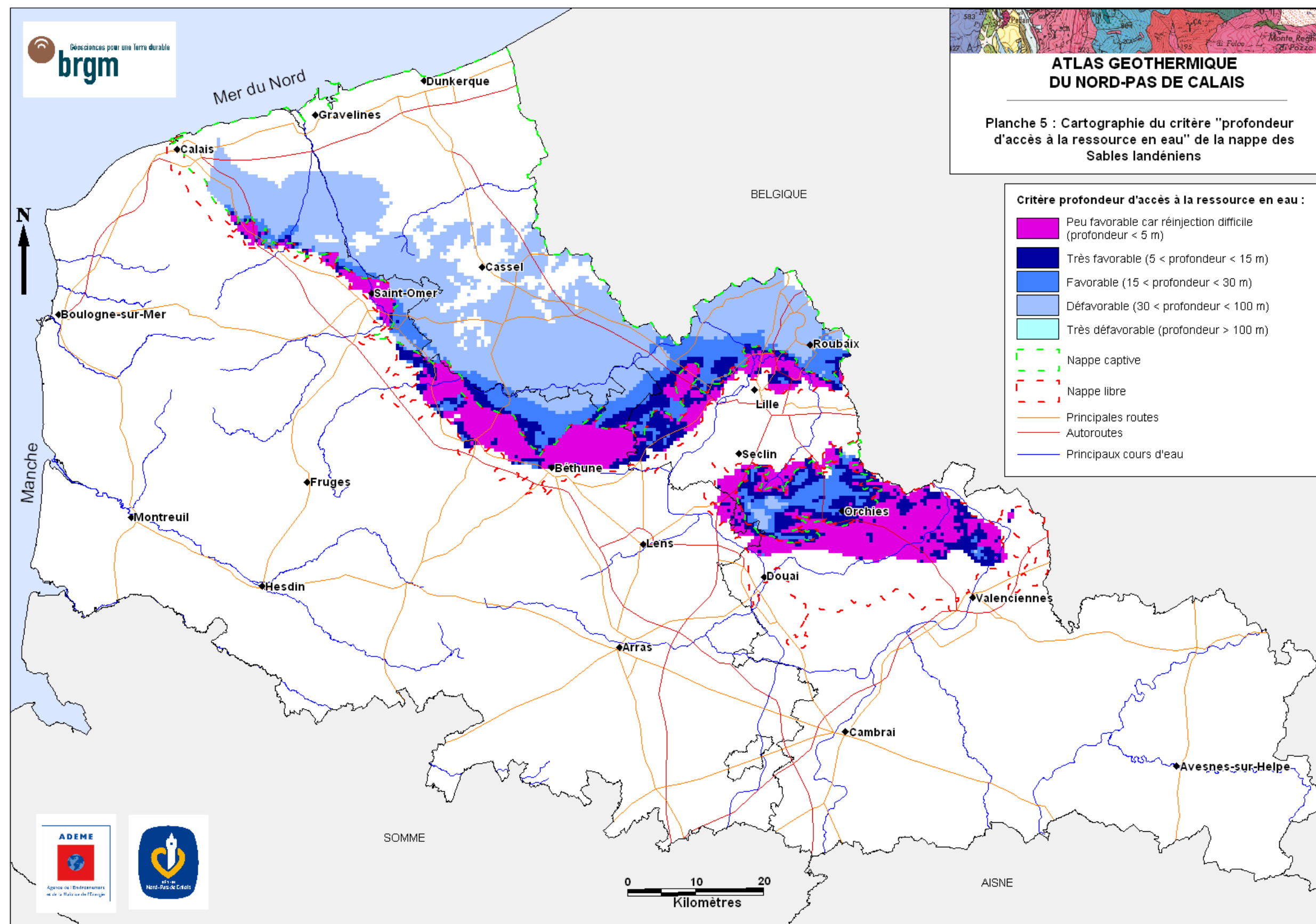
Libellé de l'aquifère	Numéro des cartes
Sables Pissards	Planche 1 : critère profondeur d'accès à la ressource Planche 2 : critère débit d'exploitation par forage Planche 3 : critère température Planche 4 : potentiel géothermique de l'aquifère
Sables landéniens	Planche 5 : critère profondeur d'accès à 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

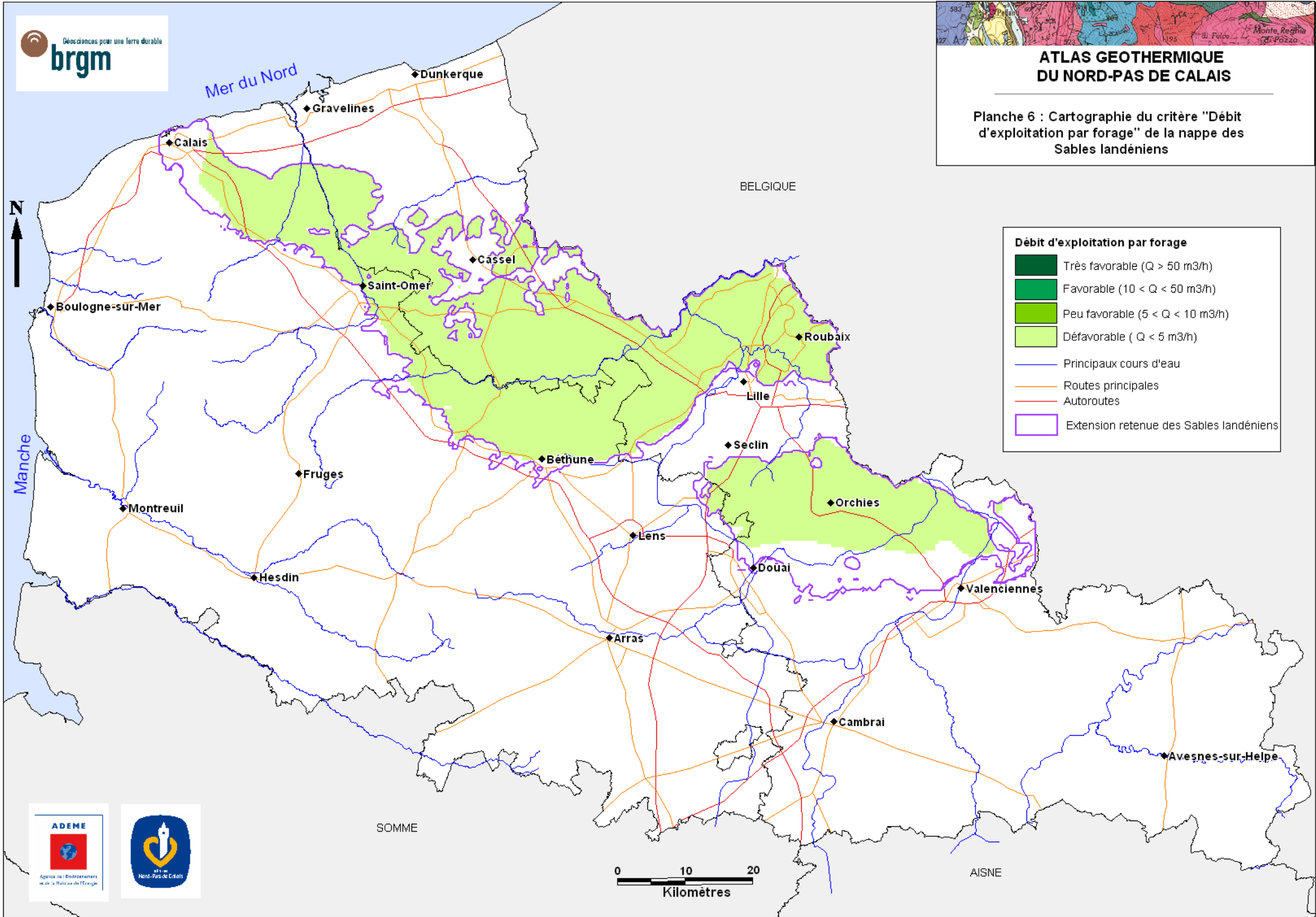


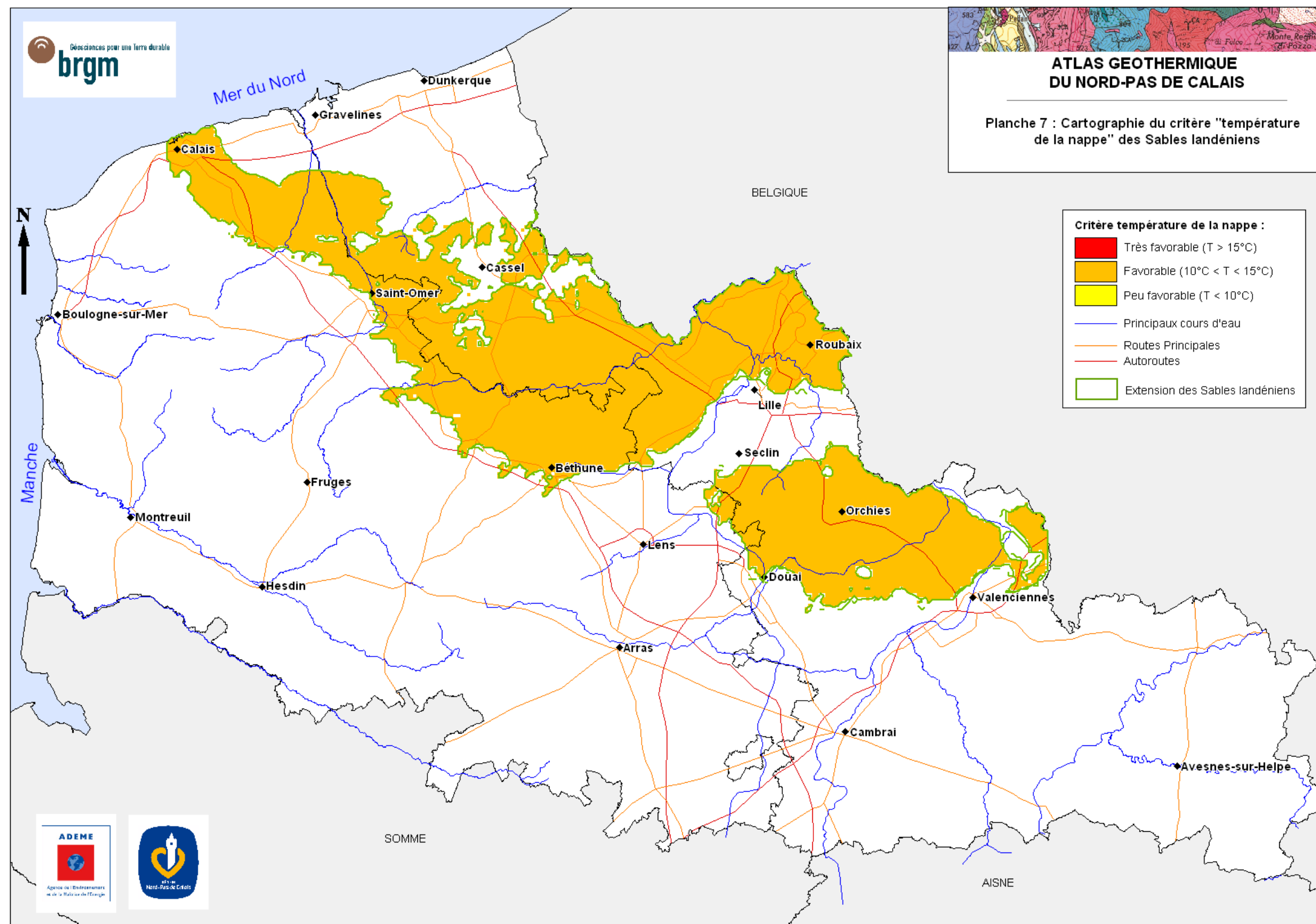


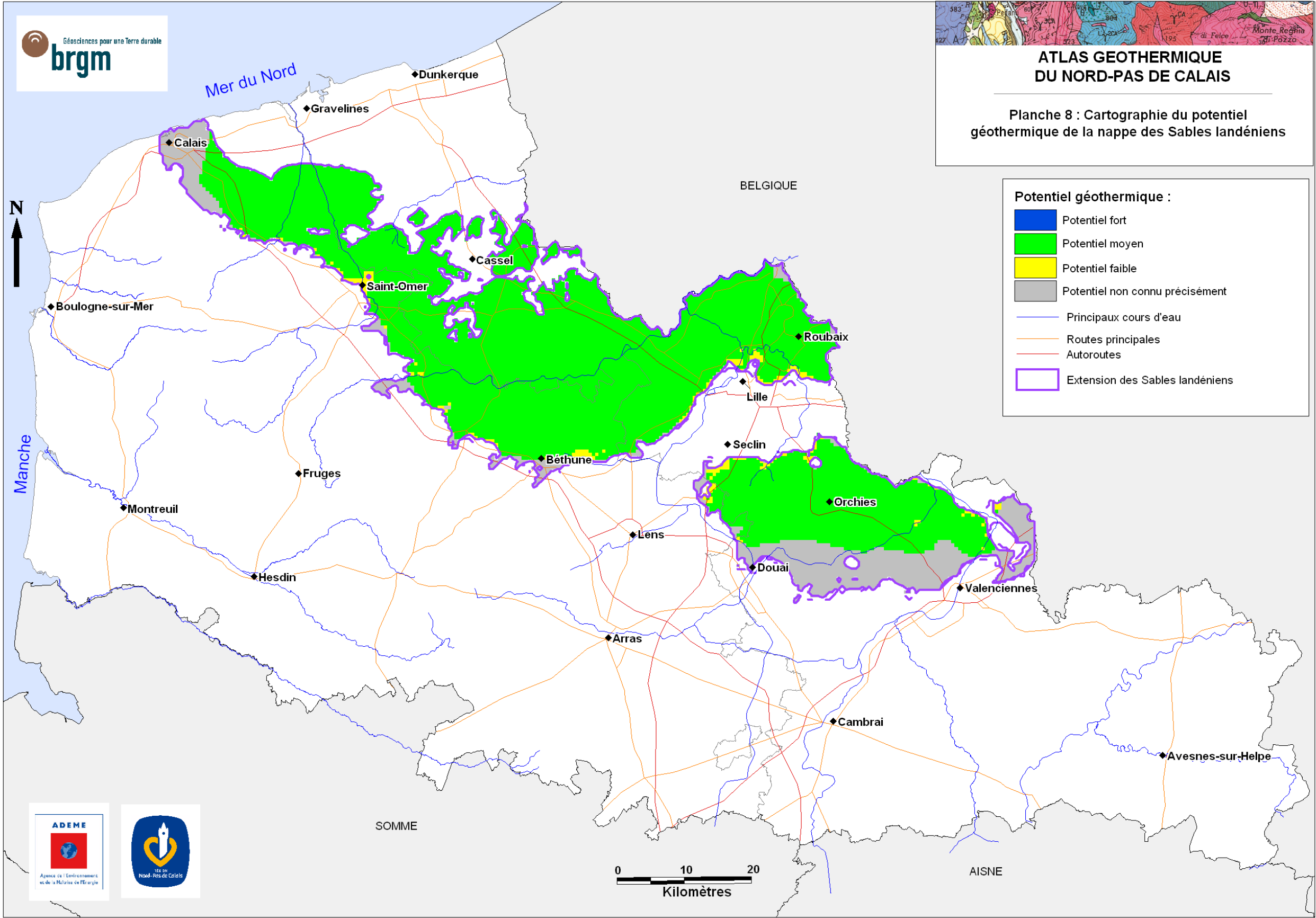


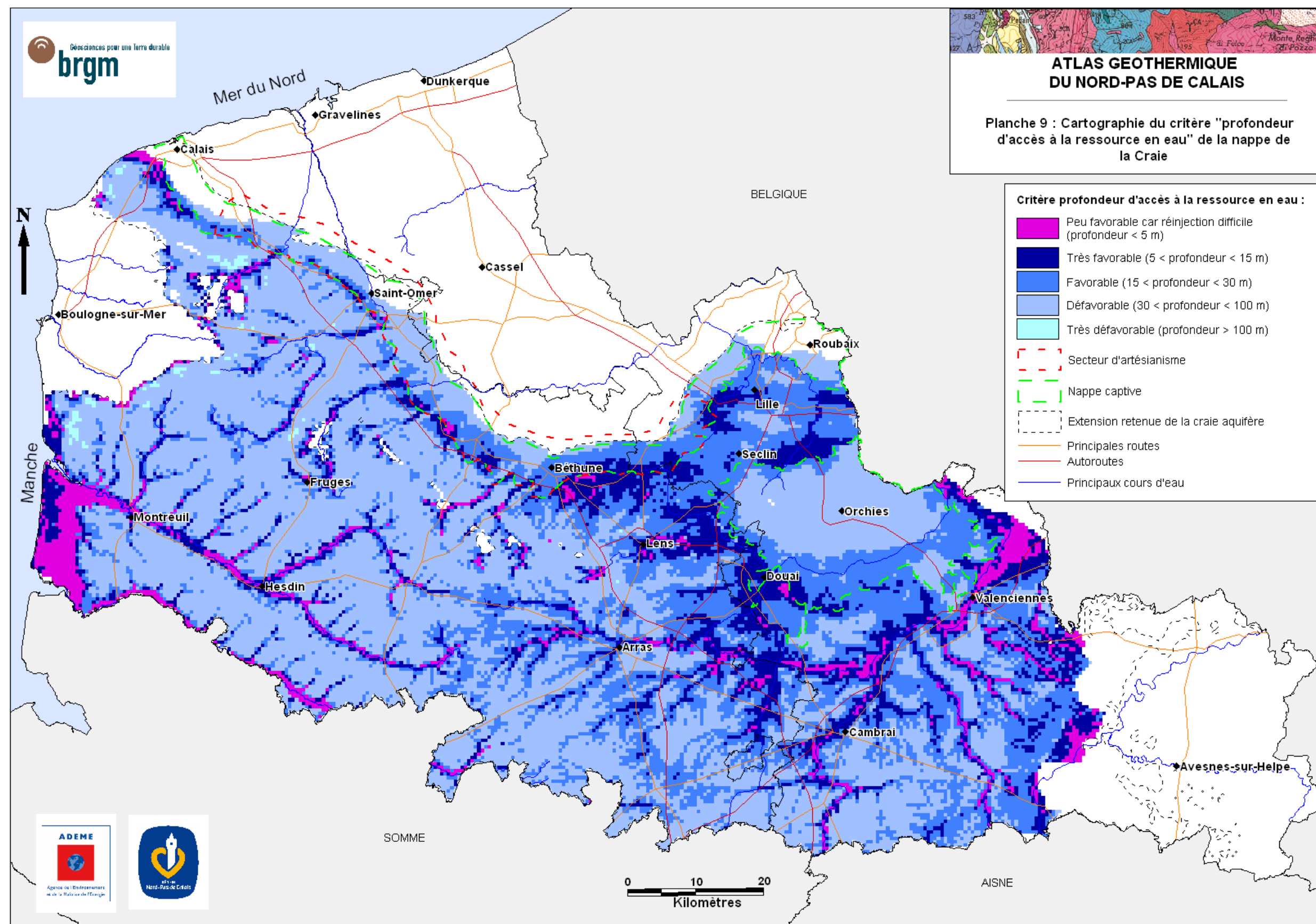


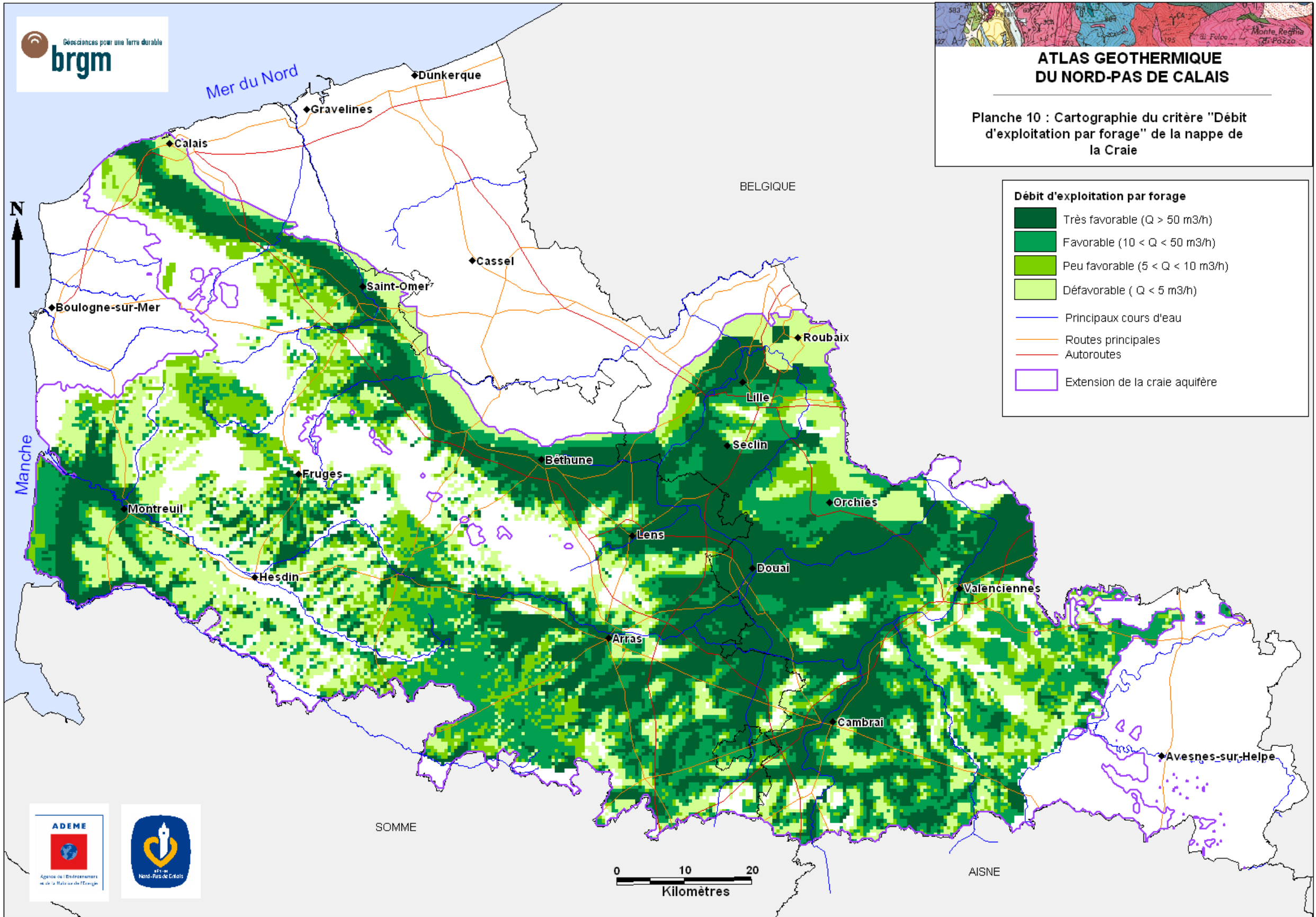


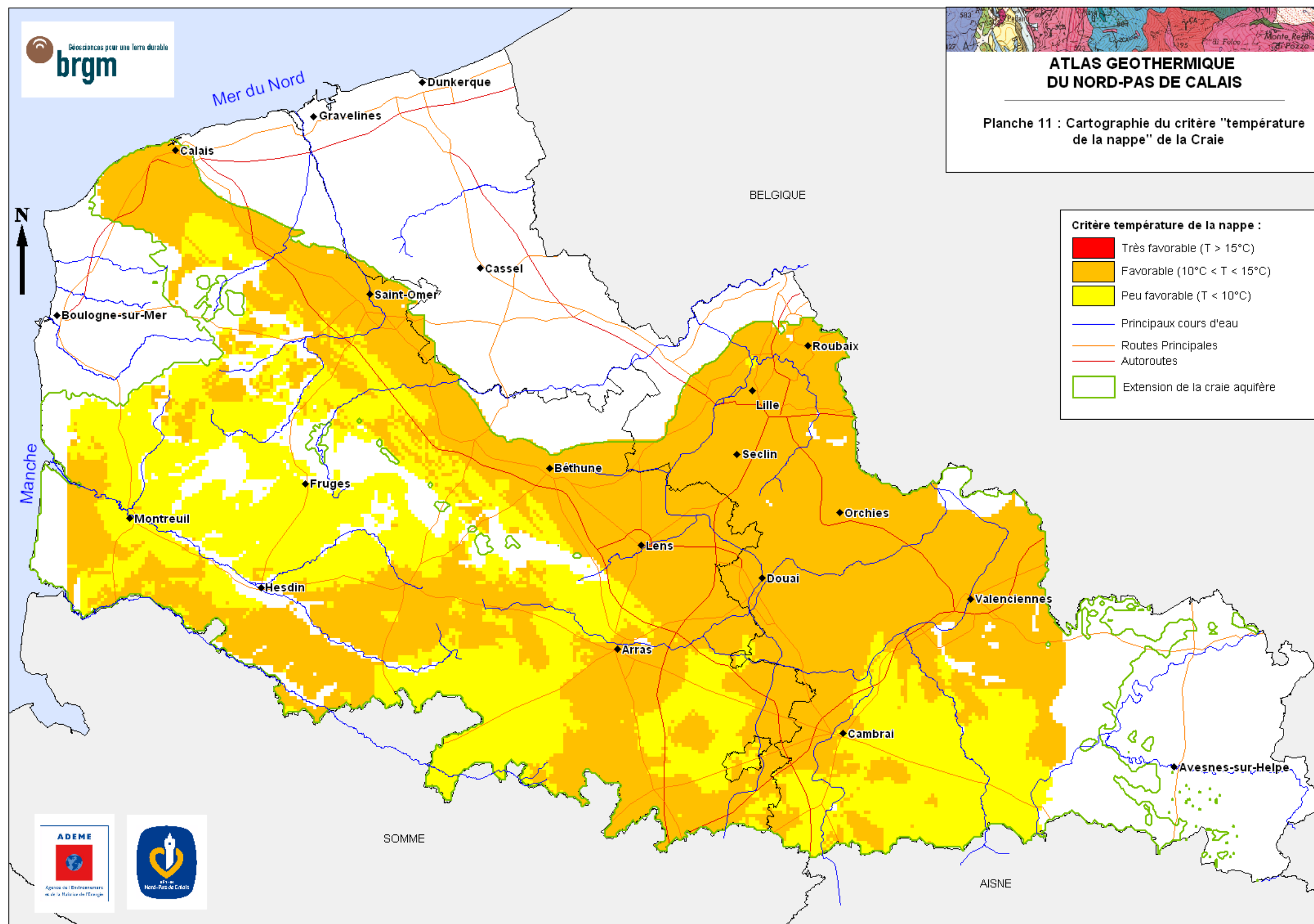


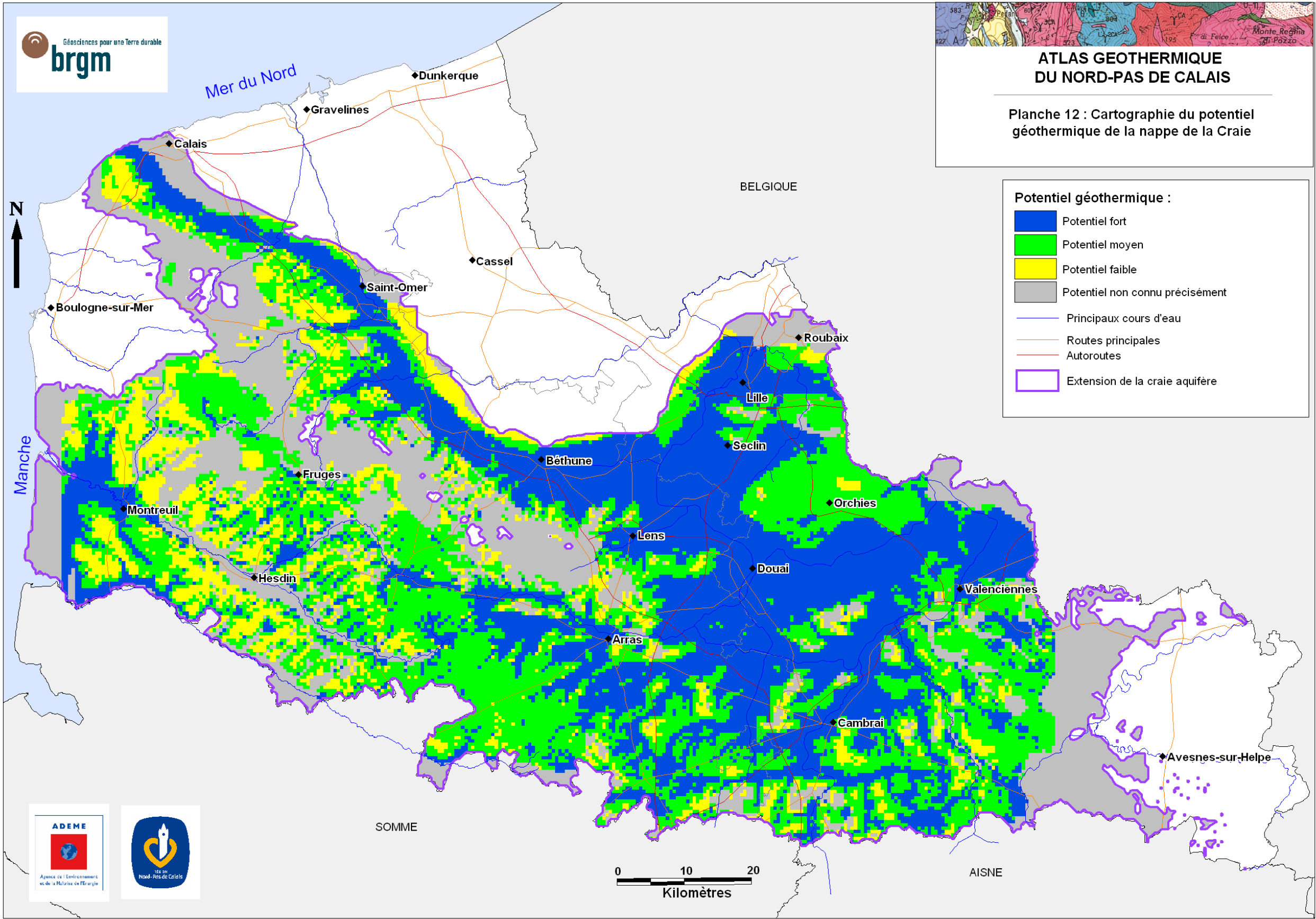


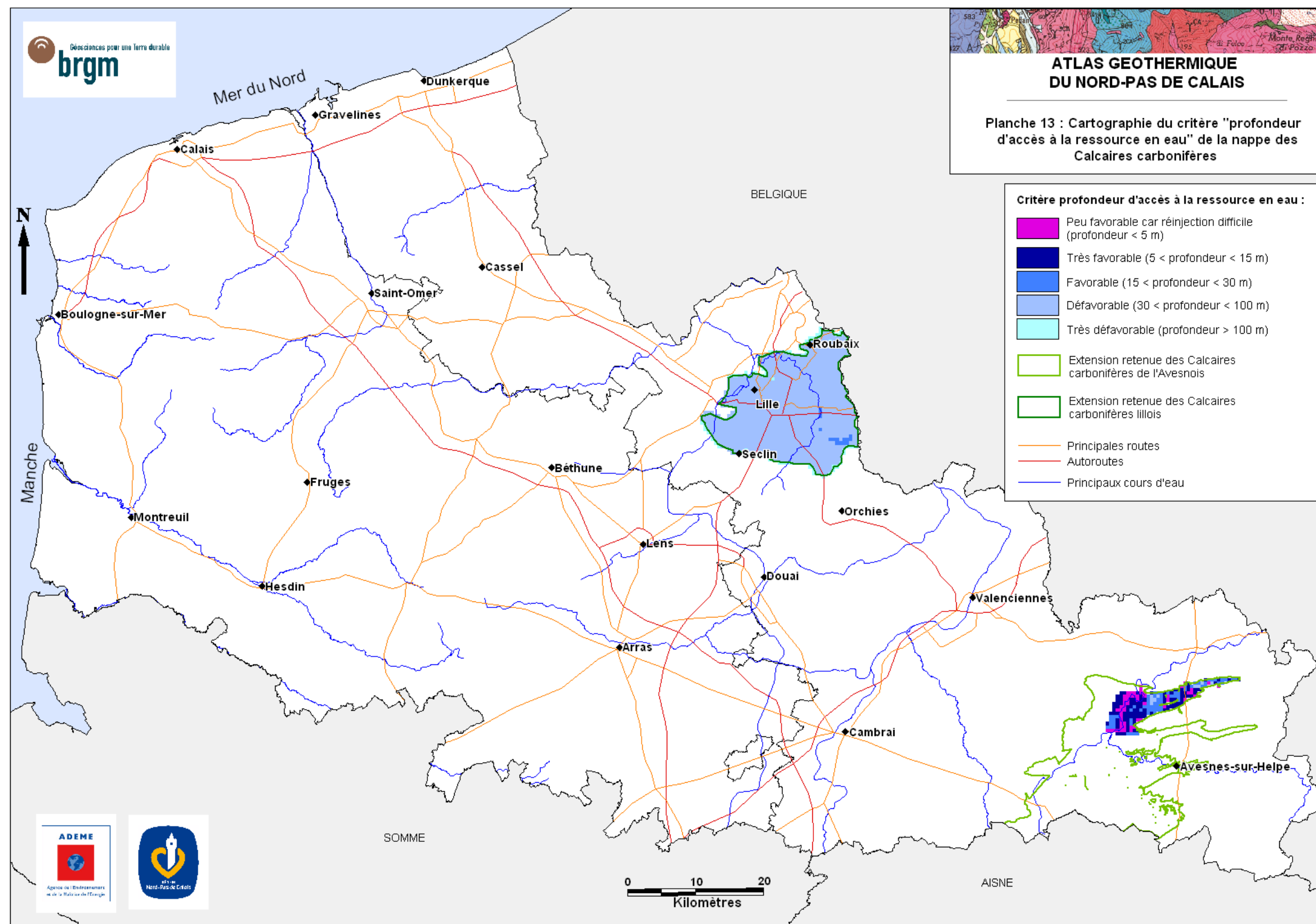


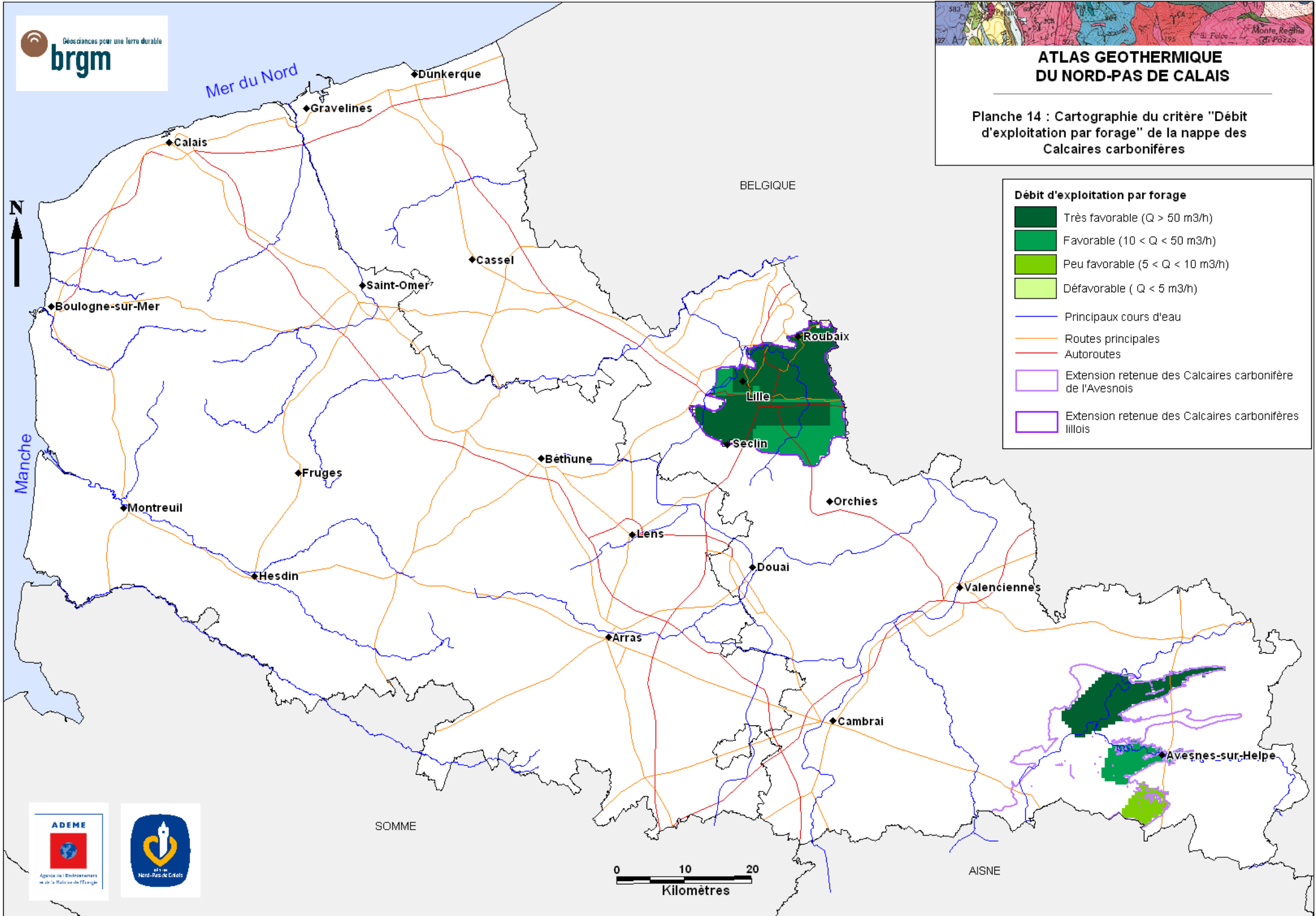


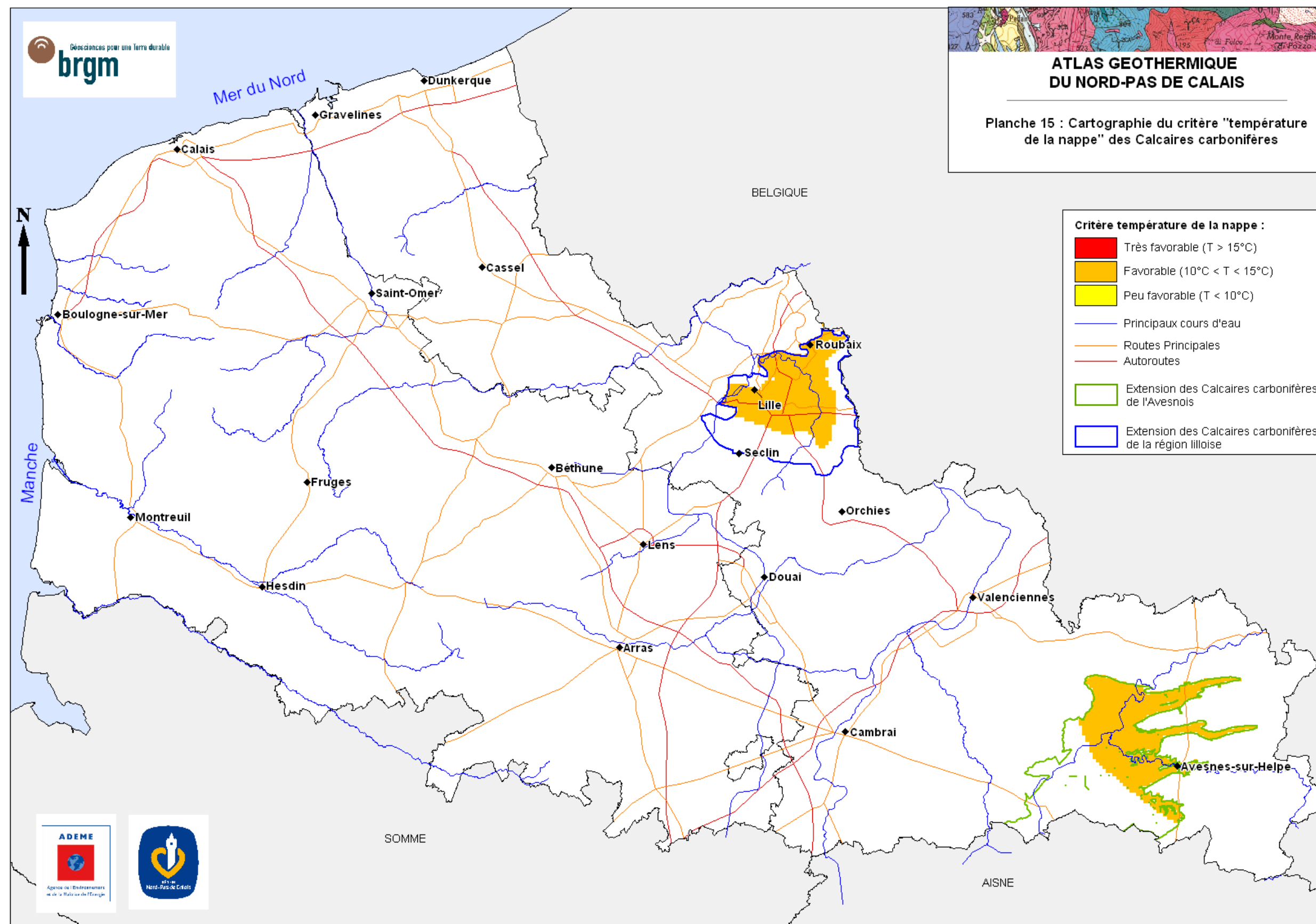


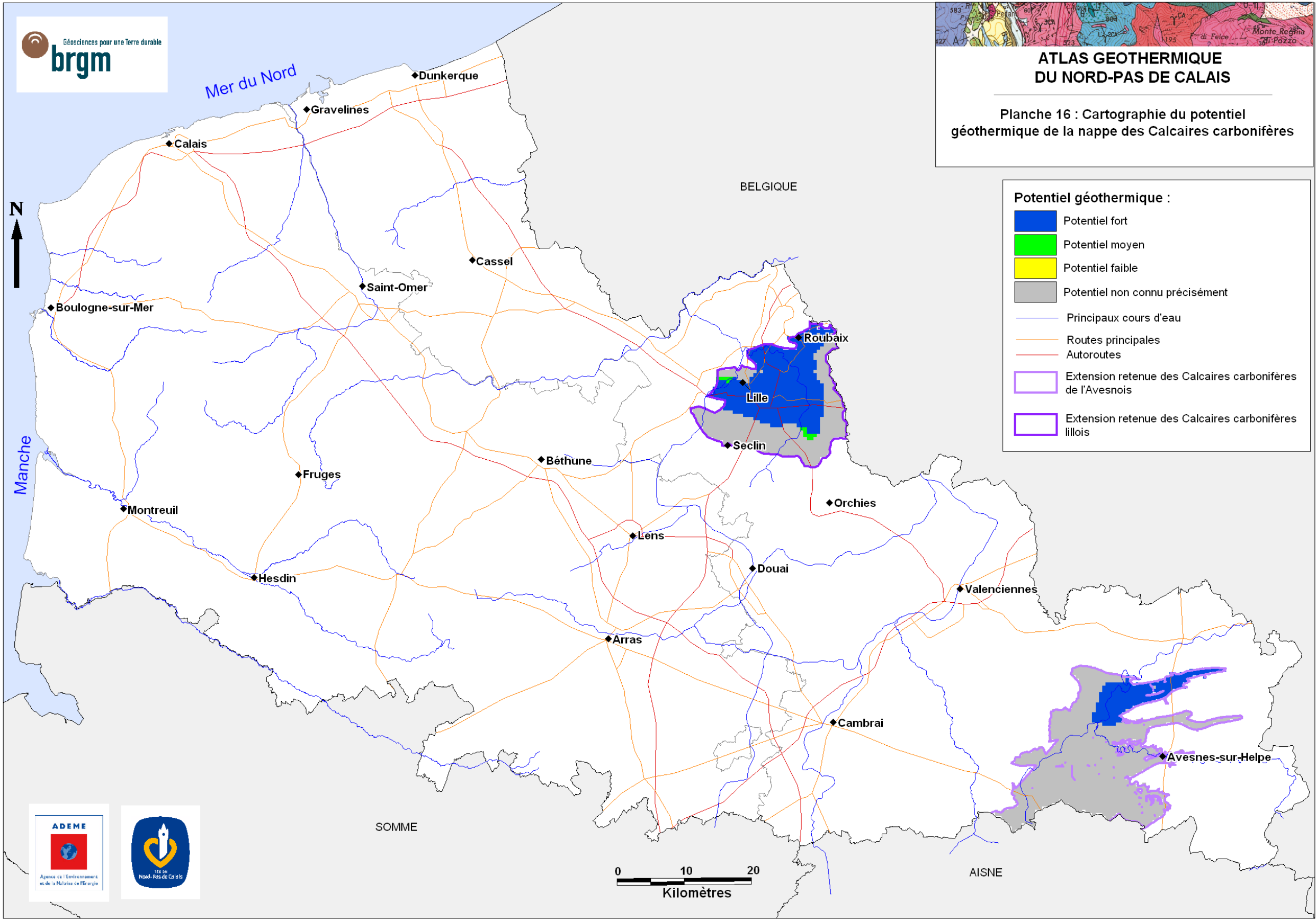






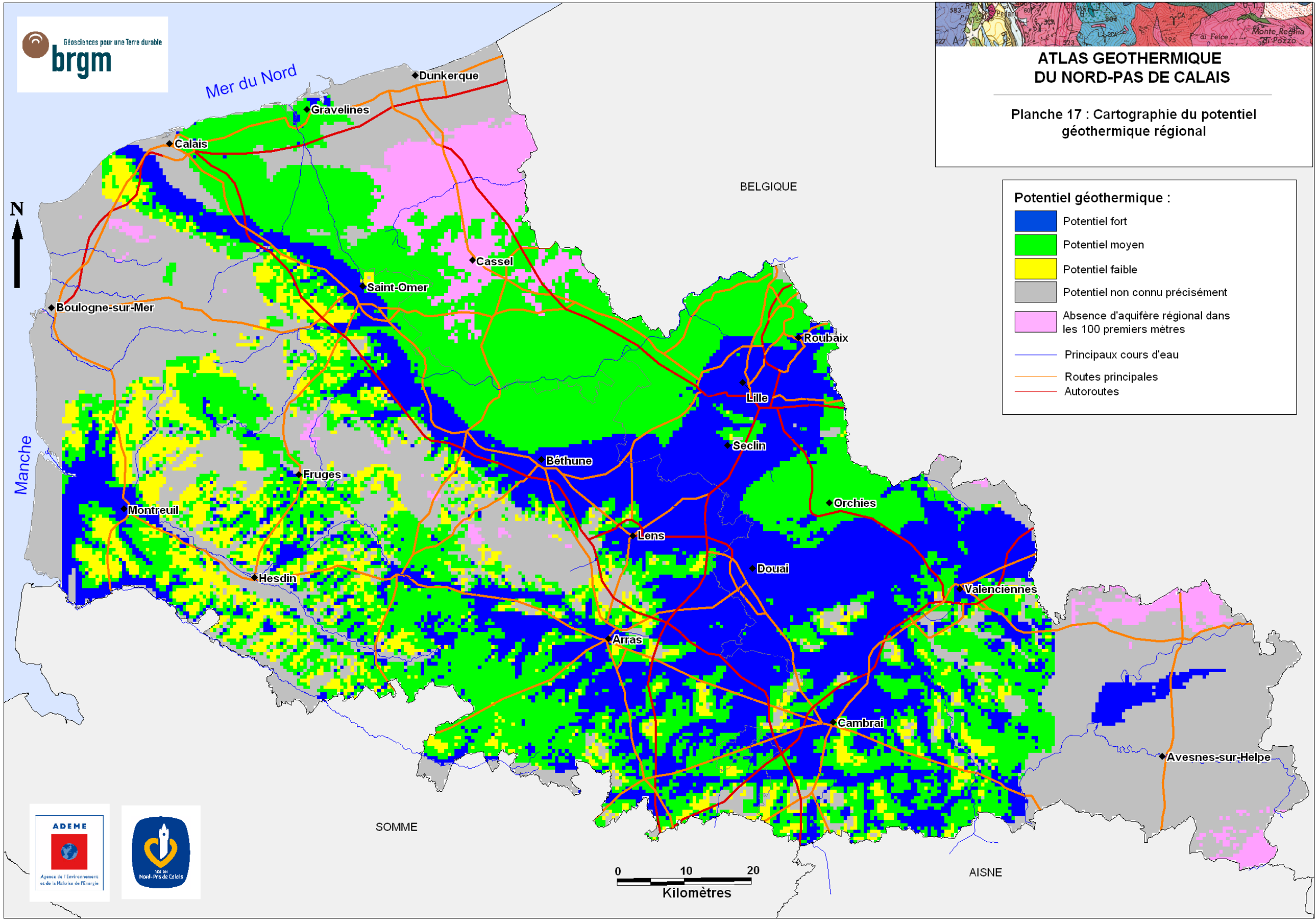






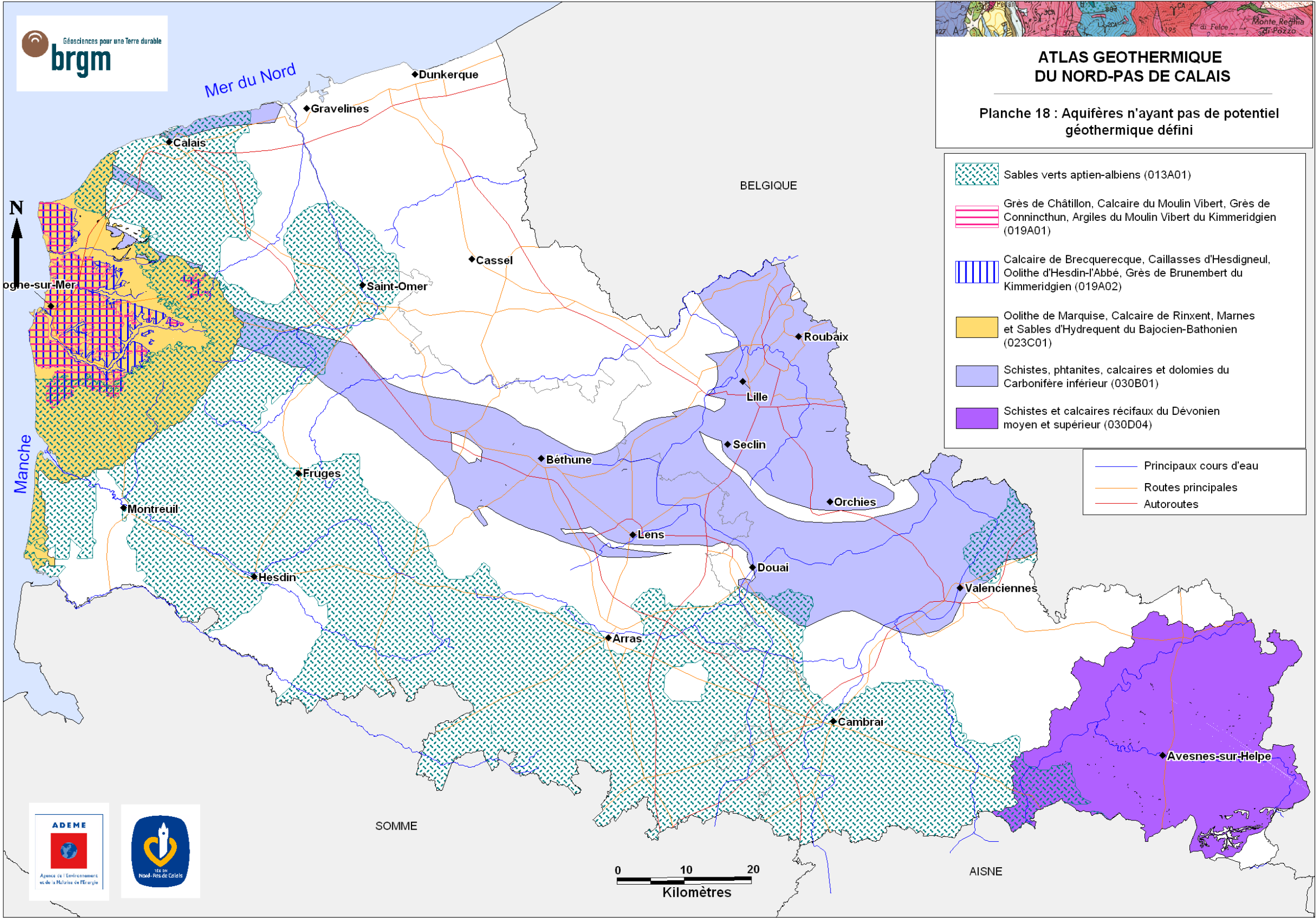
Annexe 2

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