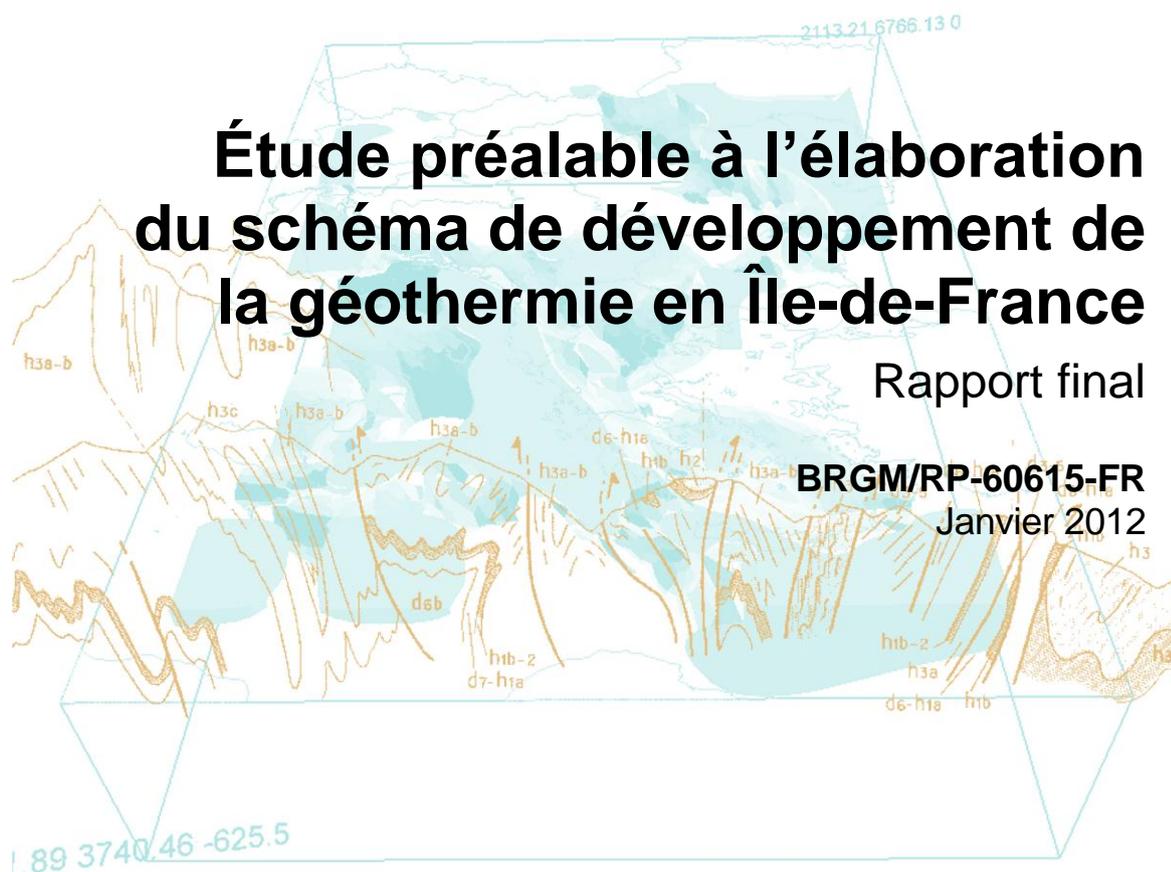




Étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France

Rapport final

BRGM/RP-60615-FR
Janvier 2012



Étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France

Rapport final

BRGM/RP-60615-FR
Janvier 2012

A. Bel, A. Poux, O. Goyénèche, D. Allier, G. Darricau, J. Lemale

Vérificateur :

Nom : Alain DESPLAN

Date : 01/08/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : Luc CLOSSET

Date : 2 août 2012

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 : Géothermie, Île-de-France.

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

Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D., Darricau G., Lemale J. (2012) – Étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France. Rapport final. BRGM/RP-60615-FR, 165 p., 56 fig., 16 tabl. 4 ann.

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

Synthèse

Ce rapport présente les résultats de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France, étude cofinancée par l'ADEME Île-de-France, le Conseil Régional Île-de-France et le BRGM. Ces partenaires ont co-piloté l'étude avec l'appui de l'IAU, l'ARENE, la SAF-Environnement, présents au Comité de Pilotage. Les travaux ont été menés par le BRGM, avec l'appui de Valor Consultants et de l'IAU.

Cette étude avait pour objectif de donner des éléments concernant la filière géothermie à la Préfecture de région et au Conseil régional Île-de-France afin que ces derniers puissent alimenter le volet Énergies Renouvelables du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE). Ce dernier a été mis en place par la loi portant engagement national pour l'environnement, dite loi « Grenelle 2 », promulguée le 12 juillet 2010.

La réalisation de l'état de lieux de la filière géothermie en Île-de-France, première phase de cette étude, a été réalisée en 2010. La deuxième phase, consistant en la définition d'objectifs de développement à échéance 2020, a été réalisée en 2011, ainsi que la troisième phase, pour la définition de proposition pour la réalisation d'un plan d'action.

État des lieux de la filière géothermie en Île-de-France

La région Île-de-France est une des régions de France la mieux pourvue en ressources géothermales, à partir d'aquifères, qu'ils soient superficiels (quatre aquifères superficiels sur l'ensemble de la région, avec des zones où trois coexistent) ou bien « profonds », comme l'aquifère du Dogger, ainsi que des aquifères « intermédiaires » (Albien, Néocomien), encore peu exploités.

L'état des lieux a permis de :

- réaliser une synthèse des ressources aquifères disponibles et valorisables pour la géothermie, en se basant particulièrement, pour les aquifères superficiels, sur les travaux menés dans le cadre de l'atlas spécifique mis en ligne sur le site internet ADEME-BRGM consacré à la géothermie (www.géothermie-perspectives.fr) ;
- présenter les contraintes techniques et réglementaires pouvant limiter le développement de la géothermie.

L'ensemble de ces aquifères est utilisé pour chauffer et/ou refroidir, par l'intermédiaire de PAC (Pompes à Chaleur) ou en usage direct, via des réseaux de chaleur. Lorsqu'il n'y a pas d'aquifère présent ou accessible (pour des raisons réglementaires, techniques...), il est possible d'utiliser la chaleur contenue dans les terrains par des échangeurs enterrés comme les sondes géothermiques verticales (systèmes en boucles dites « fermées »).

Concernant *les opérations de PAC sur aquifères et sur champs de sondes dans le résidentiel collectif et tertiaire*¹, la première difficulté rencontrée a été de dresser un bilan exhaustif des opérations existantes, et ce, à partir des dossiers auxquels il a été possible d'accéder et d'une enquête auprès de différents maîtres d'ouvrages et professionnels.

¹ Cet inventaire ne concerne pas la géothermie pour le particulier.

Une liste de 77 opérations en fonctionnement a été validée à fin septembre 2010. Il peut alors être estimé qu'une centaine d'opérations étaient en fonctionnement à la fin 2010. Et la tendance montre que ce nombre va croître de manière importante.

Les opérations sur aquifères profonds, et notamment l'aquifère du Dogger, dont la grande majorité ont été mises en service il y a une trentaine d'années, sont mieux connues. Un travail d'enquête a été réalisé sur les 29 opérations en fonctionnement en 2010 pour connaître leurs caractéristiques d'exploitation.

L'ensemble de ce travail d'inventaire a permis la réalisation d'un bilan énergétique et climatique en 2005 et 2010. La filière géothermique en Île-de-France (hors PAC individuelles), qui alimente plus de 187 000 équivalent-logement, a permis de substituer en 2010 plus de 100 000 tep et d'éviter plus de 240 000 tonnes de CO₂ annuellement.

Étude du potentiel de développement de la géothermie à l'horizon 2020

Le potentiel de développement de la géothermie, se définit, dans ce rapport, en croisant de manière géo localisée les ressources géothermales étudiées précédemment et les besoins des utilisateurs en surface, tout en prenant en compte un certain nombre de contraintes. En effet, la ressource géothermale est localisée et l'utilisateur doit se trouver au droit du site et ses besoins en adéquation avec cette ressource. Ceci est particulièrement vrai pour les ressources aquifères, les « solutions en « boucle fermé » » (sondes géothermiques verticales notamment) pouvant s'adapter aux besoins.

Cette étude a donc nécessité de travailler avec un Système d'Information Géographique (SIG), qui permet également de réaliser une cartographie des zones favorables au développement de la géothermie, à différentes échelles en fonction des différentes filières, basse et très basse énergie.

L'étude CENTER (IAU/AIR PARIF) a permis de cartographier les consommations énergétiques en 2005 et a développé des scénarios pour 2020 et 2030. Ces consommations (en MWh) sont géo localisées à une maille carrée de 250 m de côté, échelle de travail également prise dans l'étude du potentiel.

Potentiel de développement de PAC sur aquifères superficiels

La puissance géothermale disponible au niveau d'une maille CENTER a été définie à partir du débit moyen disponible au droit de la maille, issu de l'atlas du potentiel des aquifères superficiels, réalisé dans une étude antérieure. Cette puissance a été comparée aux données de consommations, converties en puissance, définies dans l'étude CENTER.

Les données de l'étude CENTER ont permis de calculer les consommations accessibles à la géothermie, c'est-à-dire les consommations pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, issues des combustibles gaz et pétrole, et ce, pour le résidentiel et le tertiaire. La part des consommations de surface pouvant être couvertes par la ressource géothermale (un des trois aquifères potentiellement disponible au droit de la maille) correspond à un taux de couverture : elle détermine le potentiel technique de développement.

Ce croisement a été réalisé en prenant en compte les contraintes techniques et réglementaires (périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable, cavités, zones à gypse, opérations de géothermie existantes pour limiter les conflits d'usage).

Le potentiel technique de développement est ainsi estimé, en prenant les consommations accessibles en géothermie en 2020 (dit scénario 2020_accessible), à 3 200 ktep.

Dans un second temps, une contrainte économique a été définie en se basant sur la profondeur de l'aquifère superficiel, la longueur de forage constituant l'un des postes principaux pesant sur l'investissement. Ainsi, une profondeur maximale permettant la rentabilité a été définie en fonction des besoins thermiques de surface et comparée avec la profondeur de forage de la maille. Le potentiel est donc considéré comme nul sur les mailles où la profondeur de forage pour atteindre l'aquifère est supérieure à la profondeur permettant la rentabilité.

Le potentiel technico-économique ainsi défini, pour le scénario 2020_accessible, est de 1 918 ktep.

Potentiel de développement de PAC sur sondes géothermiques

Il n'y a pas eu d'analyse spécifique sur les propriétés thermiques associées à la nature des terrains pour l'étude des systèmes en « boucle fermée » (principalement sondes géothermiques verticales). Le potentiel a été déterminé en prenant en compte les contraintes techniques et réglementaires et en se basant sur les besoins ne pouvant être couverts par les aquifères superficiels (lorsque ceux-ci sont limités ou lorsque ceux-ci sont trop importants, dans une certaine limite). Une contrainte liée à l'espace disponible a été ajoutée par rapport aux contraintes existantes pour les opérations sur aquifères superficiels. Elle permet de prendre en compte l'espace minimum nécessaire pour l'implantation du nombre de sondes, pris en première hypothèse, comme proportionnel aux besoins thermiques.

Le potentiel ainsi obtenu, à partir du potentiel technico-économique (scénario 2020_accessible), pour le développement de champs de sondes géothermiques verticales, est de 37 ktep.

Si une « priorité » a été donnée aux aquifères superficiels, les valeurs de potentiel, déterminées à partir des besoins, peuvent basculer entre les différentes technologies.

Potentiel de développement de réseaux de chaleur, alimentés par géothermie profonde (aquifère du Dogger)

Le potentiel de développement des réseaux de chaleur géothermiques peut se faire selon trois axes.

• Extension des réseaux de chaleur géothermiques existants

Les 29 réseaux de chaleur en fonctionnement en 2010 ont été analysés de manière globale, à partir des données de recensement, pour étudier leur potentiel d'extension, en prenant en compte, à la fois les possibilités de la ressource mais également les évolutions de consommations énergétiques en surface. Cela suppose également un maintien de la production et des systèmes actuels.

Ainsi, une évolution linéaire a été considérée, permettant en 2020, une production supplémentaire de 37 ktep.

• « Géothermisation » de réseaux de chaleur existants et actuellement alimentés par des énergies fossiles

Suite à une analyse multi critères, une dizaine de réseaux de chaleur franciliens a été identifiée comme pouvant faire l'objet d'une substitution d'énergie. Cela permettrait de substituer 35 ktep/an.

• Création de nouveaux réseaux de chaleur

Une cinquantaine de communes ont été mises en avant comme pouvant potentiellement développer un réseau de chaleur géothermique. Les critères, peu restrictifs (présence d'aucun réseau de chaleur actuel, bonne ressource géothermale au Dogger et consommation dans le résidentiel étendu supérieure à 50 000 MWh pour le scénario 2020) expliquent ce chiffre relativement élevé. Cela permettrait de substituer 185 ktep en 2020.

Bilan de l'étude du potentiel

Si l'on considère les techniques de PAC sur aquifères superficiels et sur champs de sondes, et de réseaux de chaleur géothermiques, le potentiel de développement de la géothermie est important, car il pourrait couvrir jusqu'à 30 % des consommations dites accessibles à la géothermie en 2020. Cela reviendrait à alimenter plus de 2,5 millions d'équivalent-logement².

Le potentiel de développement, défini dans cette étude, se base sur un scénario de consommations énergétiques tout en prenant en compte des contraintes, non exhaustives et susceptibles d'évoluer. D'une part, il existe des limites à la méthode définie. D'autre part, il ne prend pas en compte le potentiel de développement d'opérations sur d'autres aquifères, moins connus à l'heure actuelle, mais qui pourraient être utilisés pour des réseaux de chaleur de plus faible puissance, voire pour développer des opérations dans les zones où le Dogger est d'ores et déjà largement exploité.

Les cartographies proposées permettent de mettre en avant les communes qui ont du potentiel, à la fois en valeur absolue et en valeur relative (par rapport à l'ensemble de leurs consommations).

Ces valeurs de potentiel, définies au moyen d'une méthode adaptée à l'échelle régionale, voire départementale, avec toutes les limites qu'impose le travail à cette échelle, doivent cependant permettre de fixer des objectifs et des orientations pour le développement de la géothermie en Île-de-France, et ce par les autorités compétentes, en prenant en compte notamment le développement des autres filières renouvelables.

Propositions pour la définition d'un programme d'action à l'échelle régionale

En regard du potentiel de développement des différentes filières de géothermie et des spécificités de la région Île-de-France, l'enjeu principal est de promouvoir la filière géothermie sous ses différentes formes tout en veillant à préserver la ressource, qu'elle soit superficielle ou profonde, et donc en étant pro actif pour, dès à présent, limiter les éventuels impacts et conflits d'usage.

Les actions pour le développement de la géothermie peuvent se développer à différents niveaux. Des propositions sont faites pour que les acteurs régionaux :

- incitent à réaliser des opérations de géothermie, en ciblant le secteur du bâtiment, de l'aménagement et de la gestion énergétique ;
- pilotent ou cofinancent ou réalisent des actions :
 - de développement de stratégie énergétique,
 - d'information et de communication,
 - d'attribution des aides, dans leurs procédures de sélection,

² En faisant les hypothèses suivantes : taux de couverture moyen de 80 % et 1 équivalent-logement = 11,5 MWh utiles.

- de démarche qualité et de formation,
- de développement de travaux d'amélioration de connaissances, tant sur les ressources que sur leur mode d'exploitation et d'outils d'aide à la décision.

*Remarque : Une synthèse élargie de ce rapport est disponible : **Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D., Darricau G., Lemale J.** (2012) – Synthèse de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France. Rapport BRGM/RP-61325-FR, 26 p., 9 fig., 4 tab.*

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA GÉOTHERMIE	15
1.2. ENJEUX NATIONAUX DU DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE	18
1.3. MISE EN PLACE DES SCHÉMAS RÉGIONAUX CLIMAT AIR ÉNERGIE (SRCAE) ...	19
1.3.1. Contexte.....	19
1.3.2. Enjeux pour l'étude de la géothermie	19
1.4. SCHÉMA RÉGIONAL DE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN ÎLE-DE-FRANCE.....	20
1.4.1. Contexte régional	20
1.4.2. Objectifs de l'étude préalable à l'élaboration d'un schéma de développement de la géothermie	21
2. État de la filière géothermie en Île-de-France	23
2.1. LES RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES EN ÎLE-DE-FRANCE	23
2.2. OPÉRATIONS DE PAC SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS ET SUR CHAMPS DE SONDÉS	26
2.2.1. Objectifs	26
2.2.2. Inventaires des opérations franciliennes	27
2.2.3. Réalisation d'enquête complémentaire	33
2.2.4. Bilan énergétique et climatique des opérations de PAC dans le collectif et tertiaire	34
2.3. L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES INTERMÉDIAIRES : BILAN ÉNERGETIQUE ET CLIMATIQUE	35
2.4. LES RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES FRANCILIENS.....	35
2.4.1. Objectifs	35
2.4.2. Méthodologie	36
2.4.3. Caractéristiques des opérations géothermiques existants au Dogger.....	36
2.5. BILAN DE L'ÉTAT DES LIEUX	40
3. Méthodologie générale de détermination du potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France	43
3.1. LA DÉFINITION DE POTENTIEL.....	43
3.2. LA PRISE EN COMPTE DES PRINCIPALES FILIÈRES.....	43
3.3. LA PRISE EN COMPTE DE CONTRAINTES DE DÉVELOPPEMENT	43
3.3.1. Les contraintes réglementaires et techniques	43
3.3.2. Les contraintes économiques.....	45

4.	Détermination du potentiel de développement sur aquifères superficiels.....	47
4.1.	ENJEUX.....	47
4.2.	DÉFINITION DE L'ÉCHELLE DE TRAVAIL.....	47
4.3.	CARTOGRAPHIE DES BESOINS THERMIQUES DE SURFACE.....	48
4.4.	POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS.....	55
4.4.1.	Principe général.....	55
4.4.2.	Définition du taux d'adéquation technique et calcul du potentiel technique.....	61
4.4.3.	Définition du potentiel technico-économique : prise en compte de la contrainte économique et détermination du potentiel en froid.....	65
4.4.4.	Potentiel de production de froid.....	66
4.5.	RÉSULTATS DU CALCUL DE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT GÉOTHERMIQUE.....	66
4.5.1.	Résultats : Potentiel des aquifères superficiels.....	66
4.5.2.	Résultats cartographiés à l'échelle de la commune.....	67
5.	Détermination du potentiel de développement sur sondes géothermiques verticales	75
5.1.	MÉTHODE.....	75
5.1.1.	Généralités.....	75
5.1.2.	Détermination du potentiel de développement dans le cadre de cette étude.....	75
5.2.	RÉSULTATS.....	77
6.	Détermination du potentiel de développement des réseaux de chaleur.....	79
6.1.	POTENTIEL D'EXTENSION DES RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES EXISTANTS.....	79
6.1.1.	Préambule.....	79
6.1.2.	Potentiel géothermique à l'horizon 2020.....	80
6.2.	« GÉOTHERMISATION » DES RÉSEAUX DE CHALEUR EXISTANTS.....	82
6.2.1.	Méthodologie.....	82
6.2.2.	Classement d'intérêt des opérations « géothermisables ».....	83
6.2.3.	Bilan énergétique et climatique.....	87
6.3.	CRÉATION DE NOUVEAUX RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES.....	87
6.3.1.	Définition du potentiel.....	87
6.3.2.	Bilan énergétique et climatique.....	88
7.	Bilan du potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France.....	91
7.1.	BILAN CHIFFRÉ.....	91
7.2.	COMMENTAIRES.....	92
8.	Le cas des PAC dans l'individuel.....	95

9.	Propositions pour l'élaboration d'un plan d'action.....	97
9.1.	LES SPÉCIFICITÉS DE L'ÎLE-DE-FRANCE	97
9.1.1.	D'un point de vue de la ressource géothermale	97
9.1.2.	D'un point de vue des utilisateurs en surface	98
9.2.	LES ENJEUX DU DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE	98
9.2.1.	Retour d'expériences sur les opérations de PAC dans le collectif tertiaire	99
9.2.2.	Enjeux pour l'habitat individuel	101
9.2.3.	Enjeux de développement des réseaux de chaleur	102
9.2.4.	Enjeux en rénovation et pour les nouveaux bâtiments neufs : La question des émetteurs de température	102
9.2.5.	Enjeux spécifiques : la gestion de la ressource	102
9.3.	PROPOSITIONS D' ACTIONS.....	103
10.	Bibliographie.....	105
10.1.	PUBLICATIONS ET RAPPORTS.....	105
10.2.	SITES INTERNET	105

Liste des illustrations

Figure 1 -	Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour les maisons individuelles en Île-de-France.....	16
Figure 2 -	Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour les bâtiments collectifs en Île-de-France.	17
Figure 3 -	Objectifs de production de chaleur géothermale en ktep (Source : COMOP 10).	18
Figure 4 -	Départements d'Île-de-France.....	21
Figure 5 -	Évolution du nombre d'opérations en fonctionnement depuis 1990.	30
Figure 6 -	Nombre d'opérations PAC par commune en Île-de-France.....	31
Figure 7 -	Répartition des opérations de PAC en fonctionnement en Île-de-France.	32
Figure 8 -	Communes avec réseaux de chaleur géothermiques.....	37
Figure 9 -	Influence des opérations au Dogger sur le bilan énergétique.....	40
Figure 10 -	Illustration des enjeux de la territorialisation des besoins thermiques.	48
Figure 11 -	Cartographie à l'échelle de la maille 250 des consommations 2005 (consommations accessibles à la géothermie).....	50
Figure 12 -	Cartographie des consommations communales 2005 (consommations accessibles à la géothermie).....	51
Figure 13 -	Création du scénario 2020_accessible à partir du scénario 2020.	52
Figure 14 -	Représentation du scénario 2020 à la maille.	52
Figure 15 -	Cartographie des consommations 2020_accessible à l'échelle de la maille.	53

Figure 16 -	Cartographie des consommations 2020_accessible à l'échelle de la commune.	54
Figure 17 -	Carte du débit moyen de l'aquifère de l'Oligocène en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).	56
Figure 18 -	Carte du débit moyen de l'aquifère de l'Éocène Supérieur en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).	57
Figure 19 -	Carte du débit moyen de l'aquifère de l'Éocène Moyen et Inférieur en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).	59
Figure 20 -	Carte du débit moyen de l'aquifère de la Craie en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).....	60
Figure 21 -	Relation simplifiée entre taux d'adéquation (TA) et taux de couverture (TC) (données VALOR Consultants).	62
Figure 22 -	Cartographies des mailles sur lesquelles il existe une contrainte technique ou réglementaire.....	63
Figure 23 -	Schéma présentant la méthode de calcul du potentiel sur aquifères superficiels : taux d'adéquation, codes et valeurs de potentiel.	64
Figure 24 -	Schéma présentant la définition de la contrainte économique.....	65
Figure 25 -	Cartographie du potentiel technique des aquifères superficiels : Scénario 2005.	69
Figure 26 -	Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (valeurs absolues) : Scénario 2005.	70
Figure 27 -	Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (en pourcentage) : Scénario 2005.	71
Figure 28 -	Cartographie du potentiel technique des aquifères superficiels : Scénario 2020_accessible.	72
Figure 29 -	Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (valeurs absolues) : Scénario 2020_accessible.	73
Figure 30 -	Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (en pourcentage) : Scénario 2020_accessible.	74
Figure 31 -	Illustration présentant la surface disponible calculée par maille à partir de la BD-TOPO de l'IGN.	76
Figure 32 -	Évolution des raccordements des réseaux géothermiques d'ici 2020.	81
Figure 33 -	Carte des zones favorables aux opérations au Dogger.	84
Figure 34 -	Cartographies des communes favorables pour le développement de nouveaux réseaux de chaleur géothermiques.	90
Figure 35 -	Représentation graphique du potentiel de production de géothermie calculé pour 2020 (scénario 2020_accessible).....	92
Figure 36 -	Carte présentant la superposition des aquifères superficiels en Île-de-France.	97
Figure 37 -	Coupe Est-Ouest des grands aquifères multicouches du Bassin de Paris.	109
Figure 38 -	Série litho-stratigraphique et hydrogéologique du Bassin parisien.	110
Figure 39 -	Coupe géologique Nord-Est / Sud-Ouest de la région Île-de-France.	111
Figure 40 -	Répartition géographique des formations géologique aquifères affleurantes en Île-de-France.....	112
Figure 41 -	Lithostratigraphie simplifiée de l'Oligocène en région Île-de-France.	113
Figure 42 -	Lithostratigraphie simplifiée de l'Éocène supérieur en région Île-de-France.	115
Figure 43 -	Lithostratigraphie simplifiée de l'Éocène moyen et inférieur en région Île-de-France.	117

Figure 44 -	Lithostratigraphie simplifiée du Crétacé supérieur en région Île-de-France.	118
Figure 45 -	Lithostratigraphie simplifiée de l'Albien en région Île-de-France.	119
Figure 46 -	Sables de l'Albien : relation entre les niveaux de sables	121
Figure 47 -	Carte des valeurs moyennes de profondeurs des sables de l'Albien à l'échelle communale.	122
Figure 48 -	Carte de productivité de l'aquifère de l'Albien à l'échelle communale.	123
Figure 49 -	Lithostratigraphie simplifiée du Néocomien-barrémien en région Île-de-France.	124
Figure 50 -	Carte des valeurs moyennes de profondeurs des sables de l'Albien à l'échelle communale.	125
Figure 51 -	Carte de productivité de l'aquifère de l'Albien à l'échelle communale.	126
Figure 52 -	Lithostratigraphie simplifiée du Lusitanien en région Île-de-France.....	127
Figure 53 -	Lithostratigraphie simplifiée du Dogger en région Île-de-France.	128
Figure 54 -	Cartographie des SAGE et des ZRE en Île-de-France.	142
Figure 55 -	Carte présentant les zones de PPRI, PPRMT et périmètre de protection de stockages de gaz en Île-de-France.	150

Liste des tableaux

Tableau 1 -	Tableau récapitulatif des sources de données.....	25
Tableau 2 -	Inventaire des opérations PAC en Île-de-France (à fin septembre 2010).	30
Tableau 3 -	Bilan de production d'énergie géothermique en Île-de-France en 2005.....	40
Tableau 4 -	Bilan de production d'énergie géothermique en Île-de-France en 2010.....	40
Tableau 5 -	Principales contraintes à prendre en compte pour la mise en place d'une opération de géothermie.....	44
Tableau 6 -	Usages accessibles pour la géothermie retenus dans cette étude.....	49
Tableau 7 -	Schéma de la méthode utilisée pour déterminer le potentiel sur aquifères superficiels.	55
Tableau 8 -	Valeurs calculées des HPP par type de branche.	61
Tableau 9 -	Hypothèses de calcul du bilan énergétique et climatique.	67
Tableau 10 -	Énergie géothermique par filière complémentaire valorisable entre 2010 et 2020.....	91
Tableau 11 -	Énergie géothermique valorisable d'ici 2020.	91
Tableau 12 -	Production potentielle de la géothermie en 2020.....	92
Tableau 13 -	Liens Internet vers les PPRMNT par département.	145
Tableau 14 -	Liste des PPRT concernant des ICPE.	148
Tableau 15 -	Descriptions des six stockages de gaz en Île-de-France – Source : DRIEE IF.....	149
Tableau 16 -	Liste des réserves domaniales en région Île-de-France – Source : Site Internet de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel	155

Liste des annexes

Annexe 1 - Synthèse hydrogéologique de l'Île-de-France	107
Annexe 2 - Bilan de la géothermie francilienne en 2011	131
Annexe 3 - Les contraintes réglementaires et techniques	135
Annexe 4 - Modalités de calcul : Bilan énergétique et climatique – Profondeurs limites d'aquifères	159

1. Introduction

1.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA GÉOTHERMIE

La géothermie, qui est définie par la directive européenne de 2009 sur les énergies renouvelables comme l'exploitation de la chaleur contenue dans le sous-sol, est une énergie locale, basée sur l'exploitation des ressources du sous-sol, qu'elles soient aquifères ou non. Selon la présence ou non d'un aquifère au droit du site visé, et la température de la ressource, plusieurs technologies d'exploitation de la chaleur sont envisageables :

- par usage direct de la chaleur (à l'aide d'un simple échangeur thermique), lorsque la température de la ressource le permet. La ressource est généralement un aquifère dit « profond », la température augmentant avec la profondeur dans le sous-sol (géothermie qualifiée de basse énergie, ressources comprises entre 50 °C et 90 °C) ;
- avec utilisation d'une pompe à chaleur (PAC), lorsque la température de la ressource ne permet pas un usage direct (géothermie qualifiée de très basse énergie, température de ressource généralement inférieure à 30 °C). Dans ce cas, la chaleur prélevée provient :
 - soit d'aquifères dits superficiels par le biais de forages (systèmes dits « en boucle ouverte »),
 - soit par échange avec le sol, pour les systèmes dits « en boucle fermée » : la chaleur est récupérée grâce à un fluide caloporteur qui circule dans un échangeur en contact avec le sol.

Les différents types d'échangeurs utilisés pour alimenter des PAC sont présentés dans le tableau ci-dessous : que ce soit pour le chauffage d'une maison individuelle, ou pour les opérations dans le résidentiel collectif et le tertiaire. Les avantages et inconvénients des différentes solutions sont exposés. Le choix d'une solution par rapport à une autre devra cependant être étudié au cas par cas : typologie de l'utilisateur, ressource disponible (présence ou non d'un aquifère), conditions d'accès et d'exploitation de cette ressource, contraintes réglementaires...

Pour les dispositifs équipés de PAC, il est possible de fournir de la chaleur (pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire), du rafraîchissement/froid ou les deux alternativement ou simultanément, et ce avec le même système de prélèvement de la chaleur. Ce système est donc particulièrement favorable pour les bâtiments ayant des besoins de rafraîchissement importants (bâtiments du secteur tertiaire notamment) ou des besoins simultanés de chaud et de froid (établissements de santé par exemple).

Concernant l'échange direct de la chaleur, le système fonctionne généralement en doublet géothermique, comme pour les opérations sur aquifères superficiels (l'eau est pompée puis réinjectée). Cependant, compte tenu de l'importance des investissements de forage que nécessitent la valorisation des aquifères profonds et l'utilisation de l'énergie géothermale par échange direct, la puissance de ces installations est importante et un réseau de chaleur urbain y est généralement associé. Ces réseaux, aptes à desservir plusieurs milliers de logements par opération, permettent ainsi de répartir sur un plus grand nombre de postes de consommation la charge des investissements du sous-sol pour la production géothermique.

Pour plus d'information sur les techniques de géothermie, se référer aux éléments de la bibliographie, et notamment au site internet ADEME-BRGM <http://www.geothermie-perspectives.fr>.

Boucle géothermique	Type d'échangeur	Profondeur	Dimensionnement (ordres de grandeur)	Investissement pour l'échangeur (Ordres de grandeur)	Avantages	Inconvénients
Boucle fermée : échange avec le sol	Echangeurs horizontaux	de l'ordre du mètre	entre 25 et 37 W/m ² d'échangeurs (1)	30 à 45 €/ml (2)	Facilité de mise en œuvre pour les maisons neuves Coût d'investissement limité	Grande surface de pose (entre 1 à 2 fois la surface à chauffer, en fonction de la performance) Limitation de la jouissance du terrain Prospect dans les terrains en pente COP influencé par les conditions climatiques et ne bénéficiant pas du gradient géothermique
	Echangeurs "compacts"	quelques mètres	5 à 7 kW par échangeur	de l'ordre de 6000 € pour 10 corbeilles, comprenant la fourniture, la pose et les raccordements	Extrême facilité de mise en œuvre	Peu développé encore en France : manque de retour d'expérience
Boucle ouverte : échange avec les eaux souterraines	Sonde Géothermique Verticale	jusqu'à 100m	entre 30 et 50 W/mètre linéaire de sondes (3)	30 à 80 €/ml de sonde (4)	Coût d'investissement Profil de la stabilité de la température du sous-sol et du gradient géothermique Technique simple, indépendante de la présence d'eau souterraine Espace d'implantation réduit de l'ouvrage en surface (critères de distance à respecter dépendant)	COP faiblement influencé par le gradient géothermique Intervention d'un foreur nécessaire
	Doublet	quelques dizaines de mètres	Une dizaine de kW pour 1 m ³ /h (5)	40-150 €/ml pour le forage (6)	Maintenance simplifiée pour les échangeurs Permet de délivrer de plus fortes puissances Excellent rendement pour de	Maintenance plus fréquente Réinjection parfois problématique Risques de colmatage et/ou de corrosion Coût d'investissement plus élevé, en particulier si aquifère profond ou si mauvaise qualité d'eau

(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) La puissance linéaire d'extraction va dépendre du type de roche (20 w/m pour des sables secs à 65 W/m pour des roches consolidées type grès par exemple)

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

(5) Puissance thermique ~ 10 kW pour 1 m³/h avec un delta T°C de 6°C et un COP de l'ordre de 3.0

(6) 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 1 - Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour les maisons individuelles en Île-de-France.

Boucle géothermale	Type d'échangeur	Profondeur	Avantages	Inconvénients
Boucle fermée : échange avec le sol	Champs de sondes	jusqu'à 100m	<p>Profite de la stabilité de la température du sous-sol et du gradient géothermique</p> <p>Technique simple, indépendante de la présence d'eau souterraine</p> <p>Maintenance simplifiée pour les échangeurs</p>	<p>Dimensionnement par bureau d'étude spécialisé</p> <p>Emprise foncière non négligeable</p>
	Fondations géothermiques	quelques dizaines de mètres	<p>Profite de la stabilité de la température du sous-sol et du gradient géothermique</p> <p>Technique indépendante de la présence d'eau souterraine</p> <p>Valorisation énergétique d'un élément structurel du bâtiment</p> <p>Investissement faible (mutualisé avec le coût de la mise en place des fondations)</p>	<p>Dimensionnement par bureau d'étude spécialisé</p> <p>Applicable uniquement dans certaines conditions géotechniques</p> <p>Contraintes plus importantes sur l'exploitation (garantie sur la structure du bâtiment)</p>
Boucle ouverte : échange avec les eaux souterraines superficielles	Doublet	jusqu'à 100m	<p>Permet de délivrer de plus fortes puissances, lorsque les débits sont importants</p> <p>Possibilités de free-cooling</p> <p>Coût d'investissement réduit si aquifère peu profond</p> <p>Emprise limitée</p> <p>Possibilité de bénéficier de la garantie Aquapac® pour pallier l'incertitude locale sur la disponibilité et/ou la pérennité de la ressource en eau souterraine</p>	<p>Dimensionnement sur la base d'une étude de faisabilité hydrogéologique</p> <p>Maintenance plus fréquente</p> <p>Risques de colmatage et/ou de corrosion</p> <p>Réglementation pour la préservation de la ressource en eau</p> <p>Réinjection parfois problématique</p>

Figure 2 - Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour les bâtiments collectifs en Île-de-France.

1.2. ENJEUX NATIONAUX DU DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE

Selon les analyses de l'ADEME, le secteur du bâtiment est responsable de 21 % des émissions de CO₂ et de 43 % de la consommation d'énergie finale en France (648 TWh). Parmi ces 648 TWh d'énergie finale, le secteur résidentiel en représente 65 % et près de 70 % de la consommation d'énergie de ce secteur est liée aux besoins de chauffage et de climatisation. Pour résumer, environ 20 % de la consommation totale d'énergie finale en France concerne le chauffage et la climatisation des bâtiments résidentiels. Il y a donc dans ce domaine une source importante d'amélioration qui doit passer, tout d'abord par l'efficacité énergétique (qualité des bâtiments, comportements individuels...), mais également par la pénétration des énergies renouvelables dans le marché.

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

Le Grenelle de l'Environnement prévoit de porter à au moins 23 % en 2020 la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale de la France. Atteindre cet objectif suppose d'augmenter de 20 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) la production annuelle d'énergie renouvelable entre 2006 et 2020, en portant celle-ci à 37 Mtep. Parmi ces 20 Mtep, 10 millions seront valorisées sous forme de chaleur.

Le Comité Opérationnel « énergies renouvelables » du Grenelle de l'Environnement a proposé une multiplication par 6 de la production de chaleur géothermique (par pompes à chaleur géothermiques ou usage direct de la ressource géothermale) à l'horizon 2020, soit une contribution de 1 million de tonnes équivalent pétrole représentant 10 % de l'augmentation de la production d'énergie renouvelable valorisée pour la chaleur à cet horizon.

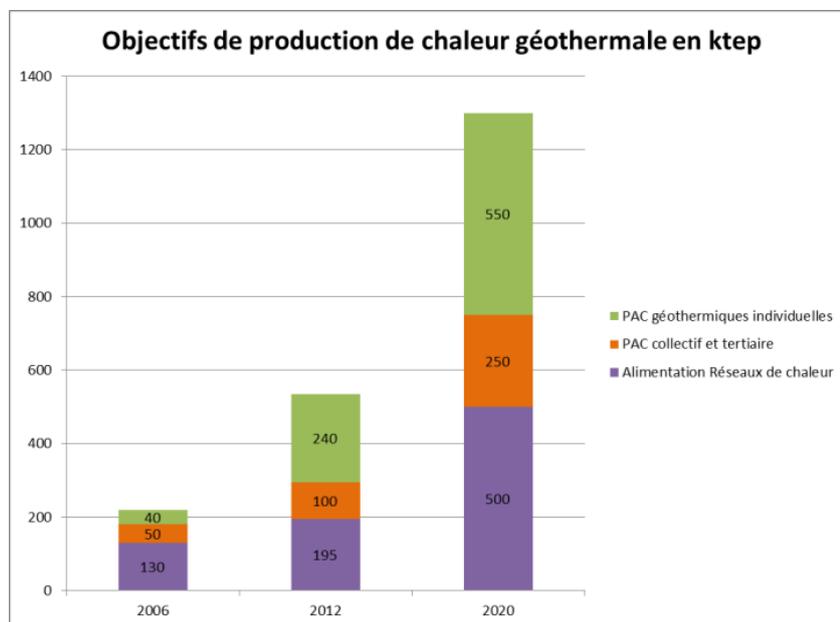


Figure 3 - Objectifs de production de chaleur géothermale en ktep (Source : COMOP 10).

Ces objectifs de développement de la géothermie, proposés par les Comités Opérationnels du Grenelle, ont ensuite été fixés par arrêté du 15 décembre 2009 relatif à la programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur (PPI chaleur 2009-2020).

1.3. MISE EN PLACE DES SCHÉMAS RÉGIONAUX CLIMAT AIR ÉNERGIE (SRCAE)

1.3.1. Contexte

La loi portant engagement national pour l'environnement, dite « loi Grenelle 2 », du 12 juillet 2010, impose dans son article 68 la mise en place, au niveau régional, de SRCAE (Schémas Régionaux Climat Air Énergie).

Le décret n° 2011-678 relatif aux Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) fixant le contenu et les modalités d'élaboration des SRCAE (articles R. 222-1 à R. 222-7 du Code de l'environnement) a été publié le 16 juin 2011.

Le schéma « est composé d'un rapport présentant l'état des lieux dans l'ensemble des domaines couverts par le schéma, d'un document d'orientation qui définit les orientations et les objectifs régionaux en matière [...] de développement des filières d'énergies renouvelables »

Il comprend « une évaluation du potentiel de développement de chaque filière d'énergie renouvelable terrestre et de récupération, compte tenu de la disponibilité et des priorités d'affectation des ressources, des exigences techniques et physiques propres à chaque filière et des impératifs de préservation de l'environnement et du patrimoine. »

« Des objectifs quantitatifs de développement de la production d'énergie renouvelable, à l'échelle de la région et par zones infrarégionales favorables à ce développement, exprimés en puissance installée ou en tonne équivalent pétrole et assortis d'objectifs qualitatifs visant à prendre en compte la préservation de l'environnement et du patrimoine ainsi qu'à limiter les conflits d'usage. »

Ainsi, l'élaboration d'un schéma régional de développement de la géothermie a pour objectif de déterminer la contribution potentielle de la région aux objectifs nationaux de développement de la géothermie, ainsi que la contribution de la géothermie au mix énergétique régional.

1.3.2. Enjeux pour l'étude de la géothermie

La prise en compte des spécificités de l'énergie géothermique va influencer la démarche à adopter pour la réalisation d'un schéma régional de développement de cette énergie.

La prise en compte des spécificités régionales et locales

La diversité régionale se manifeste en premier lieu dans la répartition des ressources géothermales. En effet, le territoire national est abondamment pourvu en aquifères, notamment dans les contextes sédimentaires, mais ceux-ci présentent une grande variabilité géographique. Cette disparité au niveau national se retrouve également au niveau régional et infrarégional. Il en est de même pour les sondes géothermiques verticales qui sont déconseillées dans certains contextes géologiques tels que les zones contenant des formations gypseuses ou karstiques.

Tout comme le climat qui varie en fonction des régions (ce qui va impacter la demande en chaud et en froid), les conditions réglementaires et administratives d'utilisation de ces ressources varient en fonction de la zone de territoire concernée.

Enfin, la diversité régionale se retrouve dans la typologie des besoins de surface et des équipements (comme la présence de réseaux de chaleur, par exemple). Les typologies et

caractéristiques de l'habitat des régions (part d'immeubles collectifs, lancement de projet de rénovation...) vont déterminer la nature des projets de géothermie et la typologie de la filière qui s'y développera à l'avenir.

La prise en compte de l'ensemble des filières

Dans le cadre de la mise en place d'une étude prospective, les principales filières de géothermie doivent être considérées :

- la géothermie très basse énergie, pour le secteur résidentiel collectif, le tertiaire et l'industrie : utilisation des aquifères superficiels couplés avec une PAC ou développement de (champs) de sondes géothermiques ;
- la géothermie basse énergie : utilisation des aquifères profonds (lorsqu'ils existent) pour alimenter des réseaux de chaleur urbains.

C'est également l'occasion de rappeler que les différentes formes de géothermie (pompes à chaleur sur sondes ou aquifères) sont à même de répondre à la fois au besoin de chauffage et à la demande de rafraîchissement, avec un meilleur coefficient de performance que la plupart des autres formes d'énergie.

La nécessaire géo localisation des ressources et des besoins

Comme souligné ci-dessus, la prise en compte de la notion de territoire est particulièrement importante dans le cas de l'énergie géothermique. En effet, le critère essentiel de performance lors de la mise en place d'une solution de géothermie est l'adéquation des ressources et des besoins.

C'est un des atouts principaux de la géothermie, en ce sens qu'il s'agit d'une réelle énergie locale (pas de consommations pour le transport notamment). Cependant, cela signifie également que le potentiel ne peut être défini par une étude des ressources d'un côté et des besoins de l'autre. La ressource du sous-sol doit localement correspondre au besoin de surface, que ce soit un besoin de chaleur, d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de rafraîchissement.

1.4. SCHÉMA RÉGIONAL DE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN ÎLE-DE-FRANCE

1.4.1. Contexte régional

L'Île-de-France représente 15,8 % de la consommation d'énergie française pour 19 % de la population. Le Conseil Régional a fixé dans son Schéma Directeur (SDRIF) l'atteinte du « facteur 4 » (division par 4 des GES pour les pays industrialisés) d'ici à 2050. Ces cibles sont le secteur de l'habitat et du tertiaire (qui représente 38 % des GES) et les transports (27 % pour le seul transport routier). Le SDRIF affiche ainsi l'ambition de faire de l'Île-de-France la première Éco-région d'Europe.

Le Plan régional pour la maîtrise de l'énergie, le développement des énergies locales et renouvelables et la réduction de l'effet de serre dans l'habitat et le tertiaire vise à orienter et structurer l'action de la Région, et à définir les priorités d'intervention et d'objectifs à court et moyen terme pour la collectivité régionale. Plusieurs mesures d'accompagnement des maîtres d'ouvrages ont été déclinées. La mesure n° 6 prévoit le lancement d'un programme « géothermie », avec notamment la poursuite du soutien financier pour l'extension des réseaux de chaleur géothermique

et l'installation de pompes à chaleur géothermales à usage collectif. Un programme de relance de la géothermie profonde en Île-de-France a ensuite été mis en place avec l'ADEME.

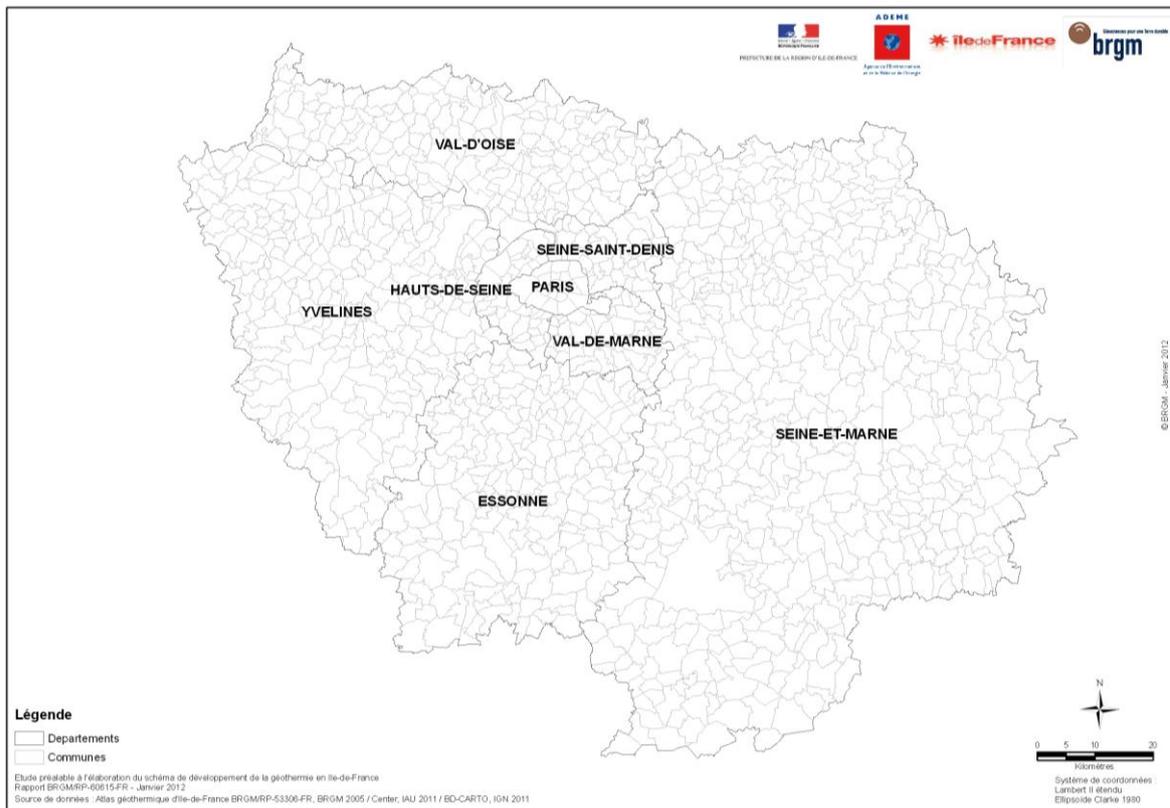


Figure 4 - Départements d'Île-de-France.

1.4.2. Objectifs de l'étude préalable à l'élaboration d'un schéma de développement de la géothermie

Le Conseil régional Île-de-France, la DRIEE Île-de-France et l'ADEME Île-de-France ont décidé de lancer une étude préalable à l'élaboration du Schéma Régional Climat Air Énergie sur le potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France.

Les principaux objectifs fixés sont les suivants :

- la réalisation d'un état des lieux des opérations existantes (hors opérations individuelles) et la définition de potentiel théorique du développement de la filière géothermie en Île-de-France par profondeur pour les solutions sur aquifères (nappe superficielle, Albien, Dogger...) et pour les champs de sondes ;
- la définition des potentiels de substitution des énergies fossiles par la géothermie à l'horizon 2020 ;
- la proposition d'un programme d'actions permettant d'atteindre les objectifs fixés en optimisant les moyens publics.

Cette étude concerne l'utilisation de la chaleur géothermale dans les trois secteurs suivants : résidentiel collectif, tertiaire et industriel.

Elle doit par ailleurs permettre de :

- susciter l'intérêt des futurs aménageurs pour la mise en œuvre de solutions de géothermie dans leurs projets ;
- mettre à la disposition des maîtres d'ouvrage et des institutions publiques un outil permettant de déterminer la ressource géothermale la mieux adaptée pour un type d'opération donné ;
- respecter une gestion optimisée et pérenne des nappes aquifères de l'Île-de-France.

Cette étude a donc été décomposée en trois phases :

- phase 1 : état des lieux de la filière et définition des besoins énergétiques théoriques aux horizons considérés en 2020 ;
- phase 2 : recensement des ressources géothermales, et définition des scénarii de développement ;
- phase 3 : définition d'un programme d'actions.

2. État de la filière géothermie en Île-de-France

Cette partie de l'étude consiste en une présentation des ressources géothermales aquifères en Île-de-France et du recensement des opérations de géothermie actuellement en fonctionnement, qui valorisent ces ressources aquifères ou l'énergie des terrains (pour les solutions à boucle fermées comme les sondes géothermiques verticales).

L'objectif de ce recensement est double, il doit permettre :

- d'effectuer un bilan énergétique et climatique permettant d'appréhender le poids de la filière géothermique par rapport aux autres énergies (renouvelables et fossiles) en Île-de-France. En effet, les travaux du Grenelle de l'environnement font état au niveau national pour la géothermie (et pour les autres énergies) d'un état des lieux sur la ressource et d'un potentiel supplémentaire en terme d'objectifs à réaliser (en ktep). La précision de cet état « zéro » dépend cependant directement des résultats du recensement et des ratios énergétiques considérés ;
- d'identifier l'existant en terme d'exploitation des aquifères pour la production de chaleur et/ou de climatisation géothermale afin de quantifier les pressions exercées sur les masses d'eau et les impacts thermiques possibles. Cet enjeu est d'autant plus fort dans les zones denses en termes de densité de besoins, qui pourraient donc, si les ressources étaient suffisantes et adéquates, être le siège de développement d'un nombre important d'opérations.

Le bilan énergétique et climatique de la filière géothermie s'établira ici en termes de :

- Tep substitués annuellement : c'est la traduction de la valorisation de la géothermie (MWh) en quantité d'hydrocarbures substituée (1 tep = 0,086 MWh / rendement du/des générateurs existants ou prévus dans le cas du neuf) ;
- gain en énergie primaire (MWh_{ep}) : ce gain fait la différence entre l'énergie primaire qui aurait été utilisée avec une solution de référence et celle nécessaire pour la solution géothermique (qui en compte la surconsommation d'électricité résultant du fonctionnement des PAC, $1 MWh_{elec} = 2,58 MWh_{ep}$) ;
- tonnes de CO_2 évitées annuellement : il s'agit du gain en termes d'émissions de CO_2 en comparaison avec une énergie de référence. Les émissions de CO_2 / an (tonnes / MWh primaires consommés) sont de 0,206 pour le GN (Gaz Naturel) et de 0,180 pour l'électricité.

La notion de taux de couverture géothermique, qui est souvent utilisée par la suite, est définie ainsi : le taux de couverture correspond au rapport de l'énergie géothermique valorisée sur l'énergie utile totale alimentant un réseau de chaleur ou nécessaire à un bâtiment. Il s'agit de besoins thermiques en chaud.

2.1. LES RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES EN ÎLE-DE-FRANCE

La faisabilité d'une opération de géothermie dépend principalement de l'adéquation du besoin et des ressources disponibles en sous-sol. La première étape de l'élaboration d'un schéma de développement de la géothermie passe donc par une connaissance des ressources disponibles.

Dans cette étude, seules les ressources en eau superficielles et la nappe profonde du Dogger, actuellement utilisées pour des usages géothermiques, ont été spécifiquement considérées pour le calcul du potentiel géothermique régional.

La ressource exploitable à partir d'aquifères est déterminée par des paramètres géologiques et hydrogéologiques locaux. Cette première partie de l'étude consiste donc à réaliser une synthèse des connaissances hydrogéologiques en vue d'inventorier et décrire l'ensemble des ressources en eau souterraine disponibles sous le sol de la région Île-de-France. Une connaissance approfondie cartographiée des ressources géothermales aquifères³ est une étape indispensable pour l'élaboration d'un schéma de développement de la géothermie. En effet, la performance d'une solution de géothermie repose sur une bonne adéquation des ressources et des besoins à satisfaire, étudiés par ailleurs.

L'objectif est de parvenir à une présentation cartographique synthétique des formations aquifères sélectionnées de façon à aider le décideur, non spécialiste en hydrogéologie, à juger de l'intérêt du choix géothermique au droit du projet dont il a la charge.

Les ressources géothermales aquifères en Île-de-France ont été évaluées à partir des sources de données suivantes :

- les cartes géologiques vectorisées et harmonisées de la région Île-de-France à l'échelle du 1/50 000 ;
- les logs validés des forages extraits de la Banque de données du Sous-Sol ;
- la délimitation des entités hydrogéologiques issues du nouveau référentiel hydrogéologique français BD LISA ;
- le modèle géologique 3D du Tertiaire du bassin de Paris couvrant l'Île-de-France⁴ ;
- l'atlas Géothermie Perspectives réalisé en 2005, pour les aquifères superficiels ;
- le modèle du Dogger ;
- les informations et cartes issues de différents rapports d'études, notamment les synthèses sur l'Albien Néocomien et le Lusitanien ;
- les informations contenues sur le site Internet du SIGES Seine-Normandie : <http://sigessn.brgm.fr/> ;
- les différentes études concernant l'hydrogéologie et la géothermie en région Île-de-France, notamment l'étude du potentiel géothermique de la région Île-de-France de 1979 réalisé par le BRGM.

Les informations existantes sur les ressources aquifères de la région parisienne sont très hétérogènes suivant l'entité considérée. Plus particulièrement, des difficultés ont été rencontrées au niveau des aquifères de l'Albien et du Néocomien. Il existe peu de données et elles n'ont pas été réactualisées depuis 1997.

³ Un aquifère peut être défini comme un « corps de roches perméables à l'eau, à substratum et parfois à couverture de roches moins perméables, comportant une zone saturée et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables ». Dictionnaire français d'hydrogéologie, par G. Castany et J. Margat.

⁴ Version 2010 du modèle géologique tridimensionnel du Tertiaire du bassin parisien réalisé sous GDM avec la DRIEE-IF. Lien internet pour la consultation du modèle : <http://drieef-eaux-souterraines.brgm.fr/geologie.htm>

Les ressources considérées plus spécifiquement dans cette étude sont :

• **Les aquifères superficiels, compris entre 0 et 100 m de profondeur**

Un ensemble de données relatif aux aquifères superficiels de la région parisienne est compilé dans l'atlas hydrogéologique réalisé en 2005 par le BRGM dans le cadre du projet « *Guide d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Île-de-France* » (Réf. BRGM/RP-53306-FR). Ces données n'ont pas été actualisées depuis 2005.

De plus, les données les plus récentes concernant ces aquifères ont été mises à disposition du public sur le site Internet du SIGES Seine-Normandie (Système d'Information et de Gestion - Eaux Souterraines Seine-Normandie), accessible à l'adresse mentionnée ci-avant. Les cartes piézométriques de certains aquifères superficiels sont notamment disponibles.

• **Les aquifères profonds et plus particulièrement le Dogger**

Les derniers éléments concernant le réservoir du Dogger datent de l'étude « Relance de la géothermie en Île-de-France », lancée en 2003 en partenariat avec l'ADEME, l'ARENE et le BRGM. Cette étude comprend une partie sur la révision de l'inventaire des ressources géothermales.

L'analyse des ressources en eau porte sur cinq critères principaux :

- la profondeur de la nappe et sa piézométrie ;
- l'épaisseur de la nappe ;
- l'hydrochimie de la nappe ;
- la transmissivité de l'aquifère ;
- la température.

Ces caractéristiques seront étudiées d'une part en fonction de la méthode de croisement entre les ressources et les besoins définie préalablement en concertation avec le comité de pilotage et d'autre part en fonction de la qualité et la quantité des données recueillies.

Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres actuellement disponibles par aquifère en précisant la source de la donnée.

Aquifères étudiés	Contours des entités	Piezométrie	Transmissivité	Perméabilité	Durété	Salinité	Débit max	Toit	Mur	Épaisseur ZNS	Épaisseur mouillée	Épaisseur productive cumulée	Logs validés	Pressions de cisement	Température
Oligocène (OLI)	B	A/S	A		A		A	A	A	A	A		B		
Éocène sup (EOS)	B	A/S	A	-	A	-	A	A	A	A	A		B		
Éocène moy et inf (EMI)	B	A/S	A		A		A	A	A	A	A		B		
Craie	B	A/S	A		A		A	A	A	A	A		B		
Dogger	B		R (relative)	R		R		R				R		R	R

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des sources de données.

Sources des données : B = BD LISA, A = Atlas hydrogéologique de 2005,
P = Potentiel géothermique du Bassin parisien, R = Relance de la géothermie en Île-de-France.

La synthèse hydrogéologique de l'ensemble des ressources aquifères de la région Île-de-France est présentée en annexe 1. Cette note présente notamment les ressources non prises en compte dans l'évaluation du potentiel géothermique régional.

• Les aquifères intermédiaires, de l'Albien et du Néocomien

La BD-LISA va être utilisée pour la définition des contours des aquifères intermédiaires. Peu de données sont actuellement disponibles sur ces entités.

Albien/Néocomien : l'hydrogéologie des aquifères de l'Albien et du Néocomien a été traitée dans le cadre de l'étude de synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris réalisée par le BRGM en 1997 (Réf. DSGR/IDF R39702). Aucune donnée plus récente sur la piézométrie de l'Albien n'est disponible.

Lusitanien : une attention particulière est portée sur le Lusitanien ; cet aquifère, actuellement non exploité pour la géothermie, pourrait se révéler intéressant. Une étude de synthèse des données disponibles sur la géologie du Lusitanien à l'échelle du bassin de Paris est en cours de réalisation par le BRGM en partenariat avec l'ADEME et la région. Cette étude révèle le peu d'information disponible sur cet aquifère. Cet aquifère a été étudié dans le cadre de l'étude du potentiel géothermique du bassin parisien réalisé en mai 1976 en concertation entre le BRGM et le groupe Elf-Aquitaine (mais ces données ne sont pas numérisées) et dans le cadre d'une thèse, réalisée par B. Bouniol en 1985 (Étude d'un réservoir géothermique carbonaté : le Lusitanien de la région parisienne. Réf. BRGM/AFME – n° 8504).

• Le Trias

L'aquifère profond du Trias, situé à plus de 1 000 m de profondeur en Île-de-France, est relativement peu connu car les grès qui le composent constituent le dernier réservoir profond du Bassin parisien. Les caractéristiques de cet aquifères sont succinctement présentées dans l'atlas géothermique du Bassin parisien de 1979.

Pour ces aquifères, les données ne permettent pas de définir un potentiel géothermique tel qu'il est défini dans le cadre de cette étude. Ils pourraient cependant, si des études complémentaires étaient menées pour les caractériser précisément, constituer des ressources géothermales non négligeables.

Contrairement aux nappes du Lusitanien et du Trias, les aquifères intermédiaires de l'Albien et du Néocomien sont quantifiés dans l'état des lieux car ils sont le siège de quelques opérations géothermiques connues.

2.2. OPÉRATIONS DE PAC SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS ET SUR CHAMPS DE SONDES

2.2.1. Objectifs

L'objectif de ce recensement est de :

- déterminer le plus précisément possible le nombre d'opérations et la localisation des PAC en Île-de-France, principalement pour les filières opérations de PAC sur aquifères et opérations sur champs de sondes ;
- déterminer les principales caractéristiques de ces opérations.

Dans un deuxième temps, une enquête sur un panel d'opérations représentatives a été réalisée afin d'obtenir des informations qualitatives et retours d'expériences sur les opérations.

Il est à noter que l'inventaire ne concerne pas les opérations chez les particuliers. En effet, outre la difficulté que représenterait l'inventaire de ces opérations, les enjeux, en termes d'impacts énergétiques et climatiques, voire même sur la ressource, sont moins importants : la majeure partie des installations sont des échangeurs fermés, les autres sont tout de même recensées en BSS. Ce recueil de données concerne l'utilisation de géothermie dans les secteurs résidentiels collectifs, tertiaires et industriels, les exploitations existantes et les exploitations projetées connues, pour la production de chaud et/ou d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de froid.

2.2.2. Inventaires des opérations franciliennes

Méthodologie

• Données accessibles

Différentes sources de données sont susceptibles de contenir des informations sur l'existence de projets de PAC dans le résidentiel collectif et le tertiaire :

- Les dossiers de demande de subvention de l'ADEME et du Conseil régional d'Île-de-France. L'ADEME et le Conseil régional d'Île-de-France accordent des aides aux opérations énergies renouvelables depuis les années 2000. Les aides actuelles (Fonds Chaleur), et conditions associées, délivrées par l'ADEME et le Conseil régional sont présentées dans ce rapport. Les dossiers étudiés dans le cadre de cette étude sont cependant antérieurs à cette nouvelle règle. Les dossiers ADEME et Conseil régional se recoupent. Le dispositif d'aide du Conseil régional étant plus restrictif au niveau des entités éligibles, les dossiers ADEME devraient couvrir l'ensemble des dossiers subventionnés.
- Les dossiers AQUAPAC de la SAF Environnement. Les dossiers AquaPac sont des dossiers de demande de garantie pour la Recherche et pour la Pérennité d'opérations de PAC de plus de 30 kW. Les dossiers pérennité sont particulièrement intéressants puisque, d'une part il confirme que l'opération est en fonctionnement, et d'autre part, ils contiennent des informations « sous-sol » basées sur les résultats des opérations et non sur les études de faisabilité réalisées préalablement.
- Les dossiers de déclaration et d'autorisation de services chargés de la police de l'eau. Certaines opérations de géothermie sont soumises à la fois à la réglementation du Code minier et à celle du code de l'environnement. La DRIEE Île-de-France est le service chargé de la police de l'Eau pour les aquifères de l'Albien et du Néocomien. Concernant les services chargés de la Police de l'Eau pour les autres aquifères, les acteurs départementaux sont principalement les DDAF/DDEA.

Les opérations peuvent faire l'objet d'une déclaration au titre de la Loi sur l'eau ou au titre des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement). Les conditions de déclaration ou autorisation, ainsi que les cas de recoupement entre les normes sont précisées dans la partie Réglementation.

- Dossiers Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS).

La Banque de données du Sous-Sol (BSS) est la base de données nationale des ouvrages souterrains déclarés sur le territoire français (code minier, code de l'environnement, loi sur l'eau). Elle regroupe les informations techniques et géologiques, acquises lors des forages et collectées auprès des foreurs et des maîtres d'ouvrages.

Ces dossiers sont issus des déclarations et autorisations au titre du code minier de la DRIEE IDF (voir partie réglementation) : la DRIEE Île-de-France transfère périodiquement les dossiers de déclaration à la Direction régionale Île-de-France du BRGM, afin que ce dernier puisse intégrer ces données en BSS.

Une extraction des données relatives à la géothermie a été réalisée à partir de la banque de données du sous-sol (BSS). Cette extraction fournit des précisions sur les forages déclarés (supérieurs à 10 m de profondeur) utilisés à des fins géothermiques renseignés dans la BSS (l'objet « géothermie » ou « pompe à chaleur » étant renseigné dans les champs « nature » ou « usages »). Les opérations ne correspondant pas aux critères de l'inventaire ont alors été écartées : géothermie profonde, réseaux de chaleur, et forages pour les particuliers.

D'autres études d'inventaires réalisées en Île-de-France permettent de compléter cette étude :

- « Pompes à chaleur réversibles sur aquifères, Etat des lieux en Île-de-France », étude réalisée par le Cabinet Kelman, SERMET et GAUDRIOT GEOTHERMA, en décembre 2000, pour le compte de l'ADEME Île-de-France et de l'ARENE Île-de-France ;

Cette étude décrit cinq opérations franciliennes (Immeuble Axe Seine Issy-les Moulineaux (92), Maison de Radio France Paris (75), SCI ATRIUM Boulogne-Billancourt (92), Immeuble A3C Rueil-Malmaison (92) et Immeuble « La résidence sociale » à Levallois-Perret (92)). Les données sont intéressantes, mais datent de 2000.

Elle présente également d'autres opérations suivant une « procédure GEOPAC » (garantie proposée dans les années 1980 par la société Geotherma) qui ont fonctionné mais dont la plupart ont été arrêtées avant 2000.

- « Inventaire des installations géothermiques sur eaux souterraines à Paris », étude réalisée par le BRGM en 2008 pour le compte de la DULE.

• Mise en perspective des données

Les données rassemblées grâce à ces différentes sources permettent d'établir une liste d'opérations de PAC envisagées en Île-de-France. Cependant, cela permet rarement de connaître le devenir de l'opération (en fonctionnement/en travaux/abandonnée).

Ceci s'explique, entre autres, par le fait que :

- certains dossiers AquaPac ont été annulés, contrairement aux opérations elles-mêmes ;
- certaines opérations ont fait l'objet de demande de subvention pour les études de faisabilité et les travaux n'ont pas eu lieu ;
- il n'y a en général qu'une seule déclaration par opération dans les dossiers BSS, le plus souvent faite avant les forages de reconnaissance et/ou d'essai, ne présentant pas de précision sur l'exploitation. Ces dossiers ne nous permettent donc pas de savoir si les essais ont été fructueux ou non, ni si le forage est exploité ;
- les opérations dont les travaux ont été subventionnés sont généralement en cours de réalisation. Cependant certaines sont abandonnées pour des raisons liées à la construction du bâtiment (projet abandonné, manque de temps...) ;
- certaines opérations sont présentes uniquement en BSS, elles devraient être considérées comme existantes et en fonctionnement. Mais une partie correspond à des forages de reconnaissance qui n'ont pas débouché sur l'exploitation de la ressource, ou à des forages qui ont été exploités puis abandonnés.

Afin de confirmer le fonctionnement de chaque opération, il a donc été nécessaire de contacter les personnes impliquées directement. La prise de contact avec les professionnels a permis de valider les opérations en cours de fonctionnement, celles en cours d'études et d'écarter celles qui ont été annulées.

• **Prise de contact avec les professionnels**

Les maîtres d'ouvrage ainsi que les professionnels de la géothermie ont été contactés afin de récupérer les informations relatives aux installations de géothermie. Il a été difficile d'établir certains contacts. De plus, comme il a été souligné par un des bureaux d'étude sous-sols contactés, « *compte tenu de notre type d'activité, nos missions s'arrêtent généralement à la réalisation des forages et nous n'avons la plupart du temps pas d'informations concernant le démarrage et le suivi des installations* ».

Enfin, une enquête auprès des acteurs de la filière a permis de récolter les références de certains bureaux d'études et entreprises de forages. Ces références, plus ou moins complètes, ont permis de consolider les connaissances acquises grâce aux autres sources de données, et de cibler les opérations non concernées par les dossiers de demande de subvention ou de garantie (opérations rentables d'elles-mêmes par exemple). Elles font également apparaître les opérations qui sont au stade de travaux (voire d'études) et qui ne sont donc pas encore déclarées en BSS ou dans le cadre de la *Loi sur l'eau*.

Après avoir recensé les bureaux d'étude et entreprises de forages concernés par les opérations identifiées comme incertaines dans la première étape, une enquête a été réalisée auprès de ces acteurs. L'échantillon de professionnels regroupant le plus grand nombre d'opérations possibles a été contacté en priorité.

Un premier questionnaire d'enquête a été envoyé par courriel, sans retours écrits. Des entretiens, par téléphone, par mail ou rendez-vous, ont donc ensuite été réalisés. Ils ont permis d'avoir des contacts avec onze bureaux d'études (surface et sous-sol), cinq entreprises de forage et sept maîtres d'ouvrages.

Cette enquête a donc permis de valider un certain nombre d'opérations et de connaître leur date de mise en service. Elle écarte aussi des opérations annulées, pour cause par exemple de débit trop faible ou d'abandon de la solution géothermique (par manque de temps notamment).

Résultats

L'étude de ces données a permis donc d'établir plusieurs listes d'opérations : les opérations :

- en fonctionnement ;
- en phase de travaux ;
- en phase d'études ;
- arrêtées.

Il est à noter qu'il reste une liste d'opérations incertaines. Ce sont les opérations présentes uniquement en BSS, celles qui ne sont mises en évidence que par une étude de faisabilité (ou dont seule l'étude a été subventionnée) ainsi que celles pour lesquelles on manque d'informations.

Un certain nombre d'opérations (une trentaine) ont été supprimées, pour cause de manque de temps dans le planning des travaux, de manque de ressource ou d'abandon de la construction du bâtiment à alimenter.

Solutions de géothermie envisagées (suites indéterminées ou abandonnées)	80
Phase d'études	27
Phases de travaux	40
Phase d'exploitation	77
Opérations arrêtées (après fonctionnement)	7

Tableau 2 - Inventaire des opérations PAC en Île-de-France (à fin septembre 2010).

Ainsi, à fin septembre 2010, 77 opérations de PAC étaient (autres qu'individuelles) en fonctionnement.

Il est à noter que le rassemblement des données a eu lieu lors du premier semestre 2010 et le travail d'enquête a eu lieu au second trimestre 2010. La liste d'opérations doit être considérée comme mise à jour en septembre 2010. Un contact datant de janvier 2011 avec un foreur a permis d'approfondir cette liste. Cependant, elle ne prend pas en compte toutes les opérations apparues depuis (dossiers de subvention validés et autres nouveaux dossiers). De même, certaines opérations notées en phase d'études ou en phase de travaux ont peut-être évolué depuis.

Le nombre d'opérations de géothermie en fonctionnement à fin 2010 peut donc être évalué à une centaine d'opérations.

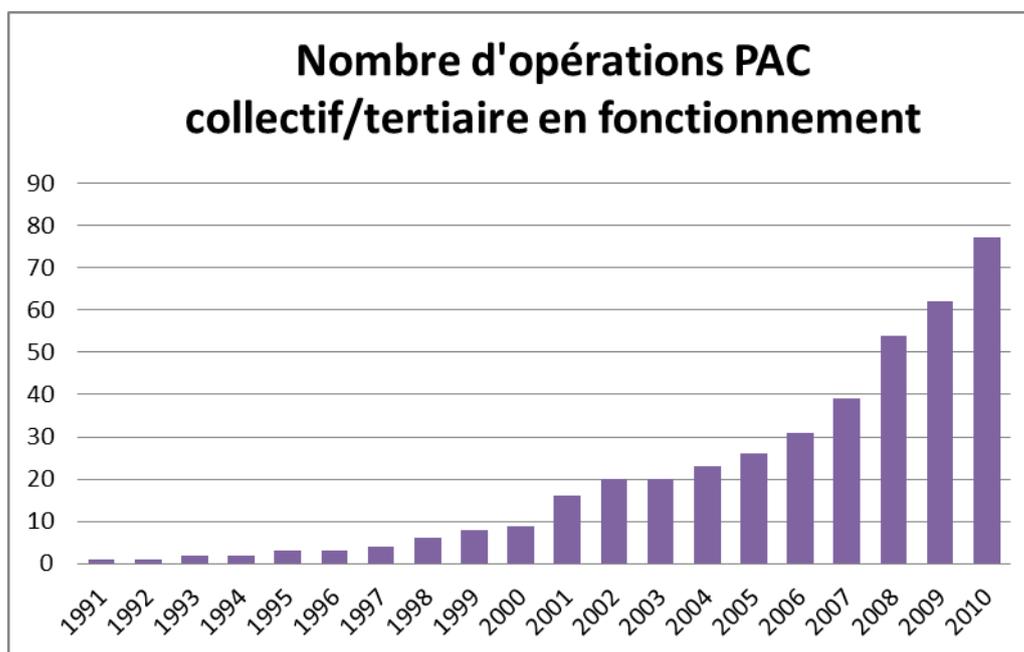


Figure 5 - Évolution du nombre d'opérations en fonctionnement depuis 1990.

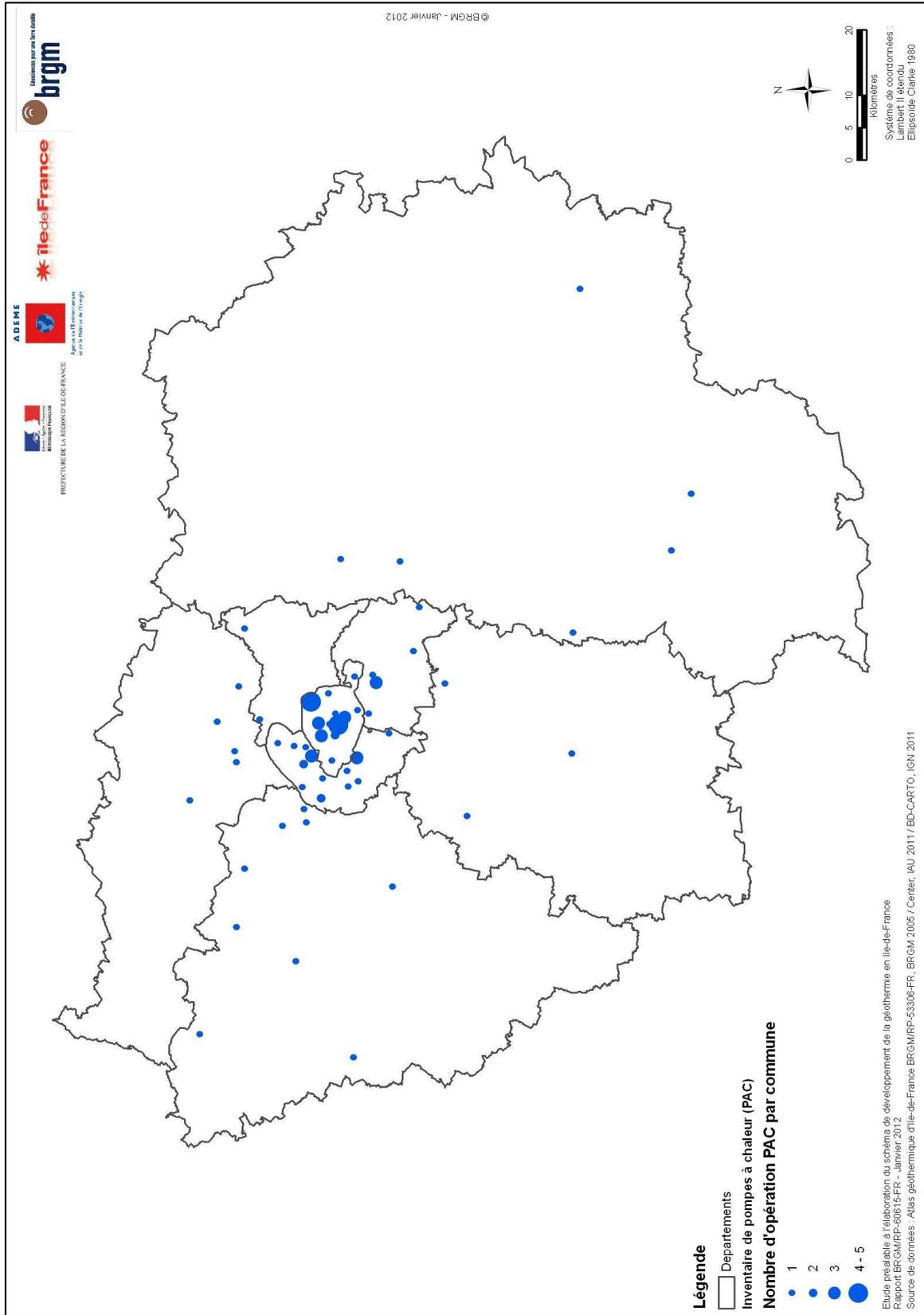


Figure 6 - Nombre d'opérations PAC par commune en Île-de-France.

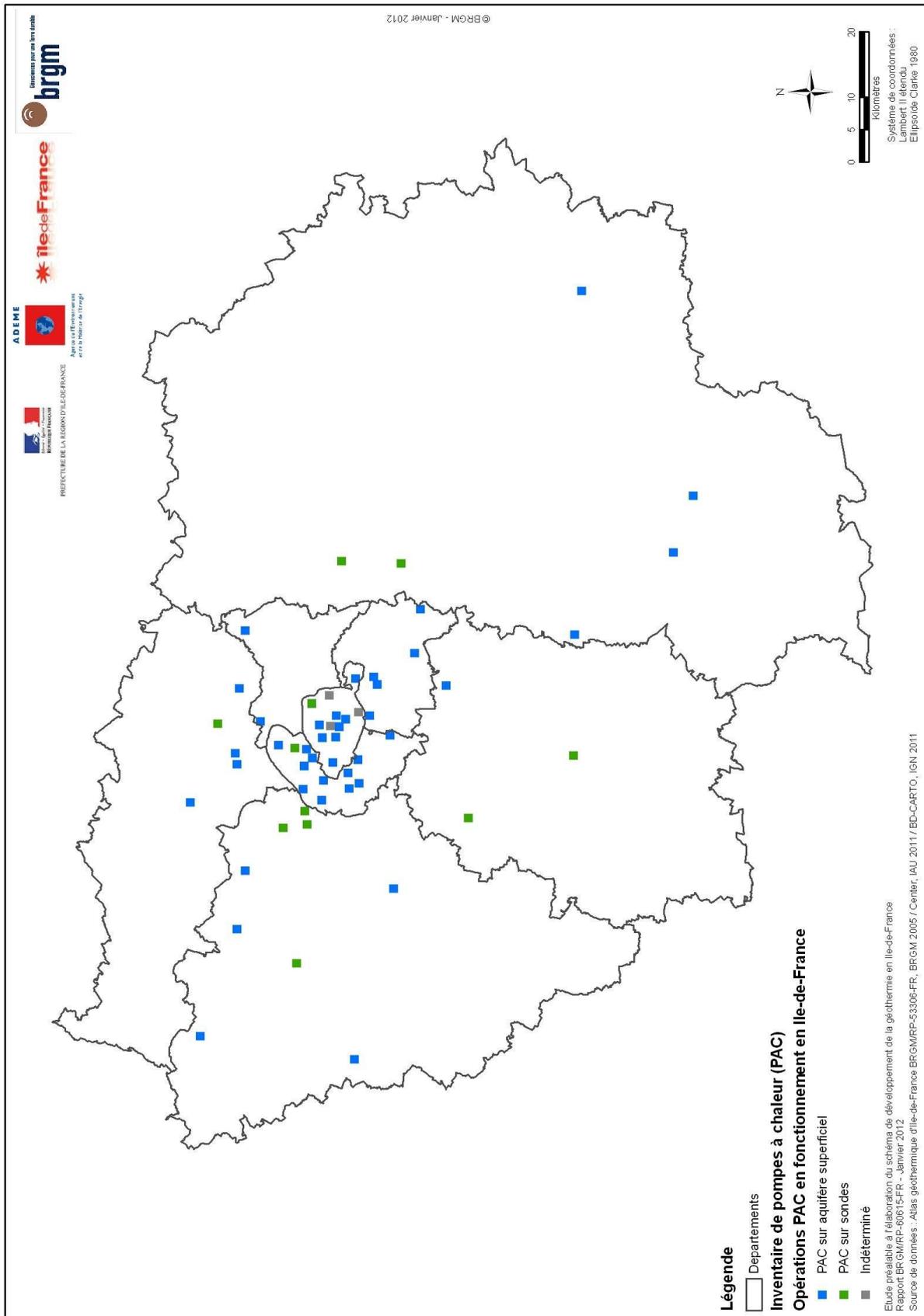


Figure 7 - Répartition des opérations de PAC en fonctionnement en Île-de-France.

Remarque : Sur les opérations en fonctionnement :

- 25 % des opérations ont bénéficié d'une subvention ;
- 25 % des opérations ont fait une demande de garantie AquaPac ;
- 60 % des forages ont été retrouvés en BSS.

Ce taux assez faible d'opérations retrouvées en BSS peut s'expliquer par le fait que :

- les forages réalisés lors d'opérations récentes n'ont pas encore été déclarés en DRIEE et n'apparaissent donc pas en BSS ;
- les forages ne sont pas répertoriés en BSS sous les objets « géothermie » ou « pompe à chaleur » dans les champs cités ci-dessus ;
- le forage est déclaré dans la BSS, mais le lien avec l'opération géothermique n'a pas été possible.

Les cartes présentées ci-avant présentent la localisation des opérations, géoréférencées au centroïde des communes d'implantation

2.2.3. Réalisation d'enquête complémentaire

Afin d'approfondir la connaissance des opérations, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, une enquête auprès d'un échantillon représentatif de maîtres d'ouvrages et d'exploitants a été menée sur les opérations existantes identifiées.

Au vu des premières visites réalisées, et des principales observations en résultant, il est apparu nécessaire de reprendre contact avec certains interlocuteurs (foreur, maître d'œuvre sous-sol...), car les informations fournies par les maîtres d'ouvrages n'étaient que parcellaires.

Pour chacune des installations, il a été établi un rapport de visite. Certaines opérations font l'objet de fiches sur www.geothermie-perspectives.fr.

Il été défini un panel de douze opérations représentatives, présentées dans le tableau ci-dessous, en terme de :

- type d'exploitation : PAC sur aquifères superficiels (AS) ou sur champ de sondes (SGV) ;
- typologie des locaux ;
- constructions neuves (10) ou réhabilitées (2).

Les opérations qui n'ont pas fait l'objet de visite ont été analysées à partir de documents adressés par les maîtres d'ouvrage et/ou maîtres d'œuvre.

Bien que non mis en service au moment du choix du panel, l'hôpital de Lagny (deux forages déjà réalisés) a été intégré à cette liste, car, d'une part, les besoins en chaud et froid sont très bien adaptés à l'utilisation d'une PAC, d'autre part, les aléas rencontrés au niveau du sous-sol nécessitent un fonctionnement de l'installation géothermale en triplet.

Pour compléter cette enquête, et en dehors des enquêtes individuelles des opérations, des contacts spécifiques ont été pris avec certains acteurs de la filière.

Département	Ville	Maitre d'ouvrage	AS/SGV	Typologie	Réhab.	Visite
					Neuf	
77	Lagny	C.H. Lagny	AS	Hôpital	Neuf	Oui
94	Alfortville	Mairie	AS	MJC	Neuf	Oui
78	Le Mesnil-le-Roi	Mairie	SGV	Bibliothèque	Réhab.	Oui
94	Limeil-Brévannes	Mairie	AS	Groupe scolaire	Neuf	Oui
95	Baillet-en-France	ATD 1/4 Monde	AS	Bibliothèque	Neuf	Oui
92	Ile Monsieur - Sèvres	Synd. Mixte. Nautique	AS	Centre de loisir	Neuf	Non
95	Eaubonne	Département du 95	AS	Collège	Neuf	Non
77	Ozoir-la-Ferrière	Mairie	SGV	Centre exposition	Réhab.	Non
78	Les Mureaux	Mairie	AS	Bureaux	Neuf	Non
92	La Défense	EDF	AS	Bureaux	Neuf	Non
92	Rueil-Malmaison	SAEIM Moulin à Vent	AS	Logements	Neuf	Non
95	Piscop	Mairie	SGV	École	Neuf	Oui

2.2.4. Bilan énergétique et climatique des opérations de PAC dans le collectif et tertiaire

Il convient de signaler les difficultés rencontrées pour établir les bilans énergétiques et environnementaux des opérations PAC. En effet, les données techniques (puissance, surface chauffée, débit géothermal) recueillies lors de la phase de recensement des opérations sont plus que parcellaires.

Pour certaines opérations, seul le type d'équipement (école, bureaux...), sans autre précision, est connu. Il a donc été nécessaire de faire pour celles-ci des hypothèses aléatoires sur la taille de ces équipements.

La méthodologie concernant l'établissement des bilans figure en annexe 4. Lorsque les données de base n'existent pas, ces dernières ont été reconstituées à partir des données disponibles (surfaces chauffées, puissances...)

Le recueil des informations techniques concernant les 77 opérations recensées, s'établit comme suit :

	Aquifère		Sondes (*)		Ensemble	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Disponibilité des données	18	28	2	17	20	26
Hypothèses sur données	47	72	10	83	57	74
Totaux	65	100	12	100	77	100

(*) Dont une opération sur fondation géothermique (logement Minergie – Paris 20°)

Compte tenu des difficultés rencontrées lors de l'analyse des dossiers consultés (dossiers aux contenus très hétérogènes, tant sur la partie sous-sol que surface, fiabilité incertaine des données et des résultats), les bilans thermiques et environnementaux ont été déterminés de manière homogène. C'est pourquoi, ces bilans ont été établis à partir d'hypothèses et de ratios communs de consommation (kWh/m²), définis en fonction de la nature des locaux (bureaux, écoles, logements, autres), et du type d'opération (réhabilitation, neuf)

Les hypothèses prises sont les suivantes :

- le Gaz Naturel (GN) est l'énergie substituée ;
- le rendement des générateurs GN est de 90 % (noté par la suite RGN) ;
- le Coefficient de Performance (COP) des PAC est de 3,5.

• **Le taux de couverture des PAC est de 80 %.**

Comme déjà indiqué, ce bilan est établi, pour les opérations en fonctionnement en octobre 2010, soit 77 au total.

L'apport de la géothermie est traduit par :

- les tep substitués annuellement ;
- le gain en énergie primaire (MWh_{ep}) : ce gain prend en compte la surconsommation d'électricité résultant du fonctionnement des PAC ;
- les tonnes de CO₂ évitées annuellement.

Bilan énergétique et climatique (2010)	Nombre d'opérations	tep substitués annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
PAC sur aquifères	65	4 727	29 923	5 456
PAC sur champ de sondes	12	834	5 281	963
Total PAC résidentiel collectif et tertiaire	77	5 561	35 204	6 419

2.3. L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES INTERMÉDIAIRES : BILAN ÉNERGETIQUE ET CLIMATIQUE

Trois opérations sont concernées. Il s'agit de celles réalisées :

- au Néocomien à Bruyères-le-Châtel ;
- à l'Albien : les Tours Mirabeau/Cristal à Paris 15^e et la Maison de la Radio.

L'opération à l'Albien de la Maison de la Radio, mise en service en 1961, est en cours de modification⁵.

Bilan énergétique et environnemental (2010)	Nombre d'opérations	Tep substitués annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
Albien (Opération de la Maison de la Radio)	1	399	1562	741
Albien (Opération de la Tour Mirabeau)	1	131	690	256
Néocomien (Bruyères-le-Châtel)	1	1 214	6 378	2 314
Bilan fin 2010	3	1 744	8 630	3 311

2.4. LES RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES FRANCILIENS

2.4.1. Objectifs

Les réseaux de chaleur sont un vecteur important pour la distribution de la chaleur géothermale et le Grenelle de l'Environnement a fixé des objectifs ambitieux de développement de réseaux mais également de conversion de ces derniers alimentés en énergie fossile en réseaux alimentés en grande partie par de la chaleur renouvelable. Comme indiqué précédemment, l'objectif national

⁵ Se reporter à l'annexe 2 présentant le bilan 2011.

revient à accroître de 300 ktep la contribution annuelle des réseaux de chaleur géothermiques en 2020 par rapport à 2005.

Il était prévu initialement, dans le cadre de cette étude :

- d'étudier les réseaux de chaleur géothermiques existants ;
- de recenser l'ensemble des réseaux de chaleur franciliens afin d'évaluer, dans la partie prospective, la possibilité de substituer les énergies fossiles par une alimentation géothermale.

Il se trouve que ce deuxième point ne sera pas réalisé dans le cadre de cette étude mais dans une étude plus large lancée par le Conseil régional et la DRIEE Île-de-France. Il a été demandé d'intégrer à cette étude des éléments caractéristiques des réseaux de chaleur, nécessaires dans le cadre de l'étude sur la géothermie⁶.

2.4.2. Méthodologie

Pour faire l'analyse des réseaux de chaleur géothermiques franciliens existants, des informations ont été recueillies :

- dans les rapports d'exploitation adressés par les maîtres d'ouvrage à la DRIEE. Elles concernent l'année civile 2008 ;
- par envoi de questionnaires et lors d'entretiens avec les gestionnaires (maîtres d'ouvrage/exploitant). Le questionnaire, ainsi que le courrier associé, est présent en annexe de ce rapport. Les informations demandées portent sur les trois dernières années.

2.4.3. Caractéristiques des opérations géothermiques existants au Dogger

Les principaux résultats de l'enquête réalisée sur ces opérations sont présentés ci-après.

Il est rappelé la terminologie utilisée dans ce document :

- une installation géothermale est un doublet ou bien un triplet (exemple de Sucy-en-Brie) de forages ;
- une opération géothermique est assimilée à un réseau de chaleur interconnecté ou non, qui peut être alimenté par une (ou plusieurs) installation(s) géothermale(s).

La carte des villes, sur lesquelles existent un (ou plusieurs) réseau(x) de chaleur, est présentée sur la carte ci-après (fig. 8).

Les principales caractéristiques des opérations franciliennes réalisées au Dogger, sont précisées ci-dessous, et ce pour l'année 2010. Il s'agit des 29 opérations présentées dans le prochain paragraphe et incluant l'opération ADP (Aéroport de Paris), mise en service fin 2010.

⁶ Une étude a été lancée spécifiquement sur le sujet des réseaux de chaleur. Elle a été confiée au groupement SETEC. Son objectif est de réaliser un recensement précis des données sur les réseaux de chauffage urbain de la région, de réaliser un Système d'Information Géographique, de déterminer les potentiels de raccordement supplémentaires possibles et d'identifier les freins et opportunités (réglementaires, financiers, techniques) concernant le développement des réseaux.

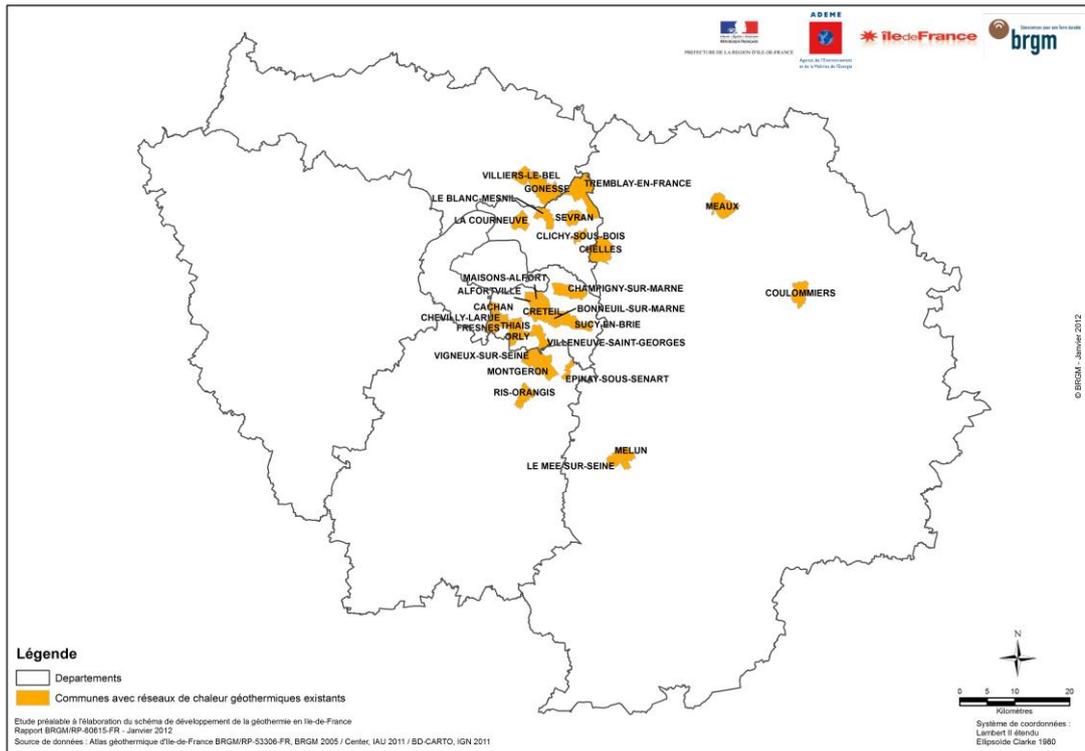


Figure 8 - Communes avec réseaux de chaleur géothermiques.

Nombre d'opérations	30
Nombre d'installations géothermales	36
Énergie substituée (tep)	98 253
Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	1 575 590
Tonnes de CO ₂ évitées annuellement	229 631

Depuis 1969, 54 forages de reconnaissance au Dogger ont été réalisés dans la région.

Il est à noter que 96 % des opérations ont eu des caractéristiques de débit et température conformes aux études de faisabilité (d'après les données de l'assurance SAF-Environnement). Les 4 % restants ont des caractéristiques différentes permettant cependant l'exploitation des forages

Après une phase de montée en puissance significative de réalisation de forage de puits au début des années 1980, il a été constaté un très net ralentissement à partir de 1986, année du contre choc pétrolier.

On constate un nouvel intérêt pour cette filière depuis 2009, qui se traduit, dans la région par la réhabilitation d'anciennes opérations : doublet pour la ville d'Orly, forage d'un nouveau puits de production pour un fonctionnement en triplet à Sucy-en-Brie et par la réalisation de nouveaux doublets :

- Paris Nord-Est (CPCU), en 2009 ;
- Orly (ADP), fin 2010 ;
- Torcy Val Maubuée mi 2011 ;
- La Courneuve Nord, fin 2011.

Sur les 51 installations géothermales (doublet, triplet) mises en service (les quatre dernières ne sont pas comptabilisées), 34 sont encore exploitées actuellement. Environ un tiers des installations ont donc été arrêtées, car confrontées à des difficultés d'ordre technique et/ou d'ordre économique.

Les problèmes techniques, liés à la nature agressive des fluides géothermaux ont été surmontés. Face aux phénomènes de corrosion-dépôt, des traitements préventifs ont été développés et sont utilisés désormais de manière routinière.

À court terme (horizon fin 2013 fixé dans les questionnaires), il est prévu une substitution énergétique supplémentaire estimée à 7 000 tep (~ 13 200 équivalent-logements), due aux extensions des réseaux de chaleurs. Dans la suite du rapport, les évolutions de cette filière Dogger sont quantifiées à l'horizon 2020.

Analyse des 29 réseaux de chaleur géothermiques

Une opération francilienne au Dogger se distingue de celle des autres opérations françaises. Sa productivité est deux fois plus importante au niveau de la substitution énergétique et 60 % plus élevée au plan climatique, par ailleurs, presque 4 fois plus d'utilisateurs y sont raccordés⁷.

En moyenne, une installation géothermale au Dogger, permet la substitution d'environ 2 810 tep (avec une dispersion de 650 à 5 380), et assure partiellement les besoins thermiques d'environ 4 720 équivalent-logements (avec une dispersion de 1 900 à 7 800).

Les besoins en amont du réseau, c'est à dire à la sortie des générateurs (chaudière d'appoint, cogénération, échangeur géothermique) de l'ensemble des réseaux s'élèvent à 1 997 GWh, ce qui correspond à une augmentation de 16 % par rapport à la situation de 2003 (1 724 GWh), et à un raccordement global supplémentaire de 30 000 équivalent-logements (balance entre les nouveaux abonnés et ceux qui se sont déconnectés).

Il convient de souligner que les apports de la cogénération⁸ ont augmenté d'une manière très significative, un peu plus du tiers, au cours des huit dernières années. Cette augmentation, résulte en grande partie de la mise en service de nouvelles installations : Le Blanc-Mesnil, Le Mée-sur-Seine et Vigneux.

Cette cogénération se substituant en base à la géothermie sur la courbe monotone des besoins thermiques, il en est résulté un apport géothermique global en baisse de 8 %, et cela malgré l'augmentation observée de la demande en énergie des abonnés due aux nouveaux raccordements. La baisse du taux de couverture géothermique global est voisine de 10 %.

Les réseaux de chaleur franciliens sont caractérisés par les principaux indicateurs ci-dessous, avec pour certains, un comparatif entre les périodes 1999/2001 et 2007/2009 :

- le quart des réseaux de chaleur franciliens, fin 2011/début 2012, sont alimentés par la géothermie. Les apports géothermiques de ces derniers concourent à la fourniture de 10 % de la chaleur distribuée par cette centaine de réseaux, et ce taux s'élève à 50 % dans le Val-de-Marne ;

⁷ Étude VALOR Consultants « Bilan énergétique de la filière géothermie – Actualisation de l'étude de 2003 » (juin 2010).

⁸ La cogénération est la production de chaleur et d'électricité, à partir d'une turbine ou de moteur à gaz, l'électricité étant revendue sur le réseau.

- il est à signaler les extensions significatives du réseau de Chevilly-Larue & l'Haÿ-les-Roses qui a vu, en six ans, les besoins thermiques de ces abonnés augmenter de plus de 40 %, ce qui classe cette opération comme la plus importante en Europe ;
- sur les 29 réseaux géothermiques (certains d'entre eux sont interconnectés), 17 disposent d'une installation de cogénération. Pour une production d'électricité totale de 473 GWh, la puissance garantie atteint 136 MW, et la chaleur fournie est de 493 GWh ;
- la température moyenne en tête de puits est voisine de 72 °C (dispersion : 57 à 83 °C), et celle moyenne des retours de 50 °C (dispersion : 38 à 61). Cette dernière pourrait être abaissée suite au raccordement, à moyen terme, de nouveaux abonnés disposant d'émetteurs basse température ;
- globalement, le taux de valorisation de la géothermie⁹ (égal à $Q_{\text{géothermique}} / P_{\text{max géoth}} * 210 * 24$) est de 54 %, ce qui laisse une marge conséquente pour le raccordement de nouveaux utilisateurs aux réseaux de chaleur. Ce taux est égal à 59 % (dispersion : 43 à 73) pour les réseaux sans cogénération, et de 53 % (dispersion : 37 à 74) pour ceux qui en sont pourvus ;
- la valeur moyenne du coefficient électrique volumique est voisine de 1,27 kWh_{élec}/m³ extrait (dispersion : 0,6 à 2,1). Il caractérise la ressource en terme d'électricité de pompage (et notamment l'influence de l'artésianisme). Il correspond à la consommation d'électricité de la centrale géothermique et des puits (pompe exhauve, de réinjection) par m³ d'eau géothermale valorisée.
- le coefficient de performance est proche de **20,6** MWh_{utiles géothermique} / MWh_{élec} (dispersion : 10 à 41) ;
- globalement, le taux moyen de couverture de la géothermie s'élève à **46 %**. Ce taux est égal à **79 %** (dispersion : 58 à 92) pour les réseaux sans cogénération, et de **35 %** (dispersion : 19 à 63) pour ceux qui en sont pourvus ;
- le taux de couverture « géothermie + cogénération » est de **71 %**. Ce dernier taux est égal à **79 %** pour les réseaux sans cogénération, et à **68 %** pour ceux qui en sont pourvus ;
- les performances des installations de cogénération se sont améliorées depuis 2003 ;
- la moyenne du contenu en CO₂ (kg CO₂/MWh en sous-station) des réseaux est de **113**. Elle est de 145 (dispersion : 84 à 173) pour ceux pourvus de cogénération, et de 62 (dispersion : 11 à 113) pour les autres, en baisse d'un facteur supérieur à 2 ;
- le coefficient d'épuisement géothermique volumique s'élève à **22,3** MWh_{utiles géothermiques}/m³ **extrait** (dispersion : 10 à 35). Il caractérise la bonne utilisation de la ressource. Ce coefficient est fonction de la ressource (débit, température), des installations de surface (émetteurs de chaleur) et de la nature des besoins (prise en charge de l'ECS, conception des installations en cascade ou non...) ;
- le taux de disponibilité des installations géothermales est voisin de **91 %**, (dispersion : 70 à 100) en baisse de 4 % par rapport à 2003 ;
- le débit moyen annuel des installations géothermales (33 doublets et un triplet), est égal à **132 m³/h** (dispersion : 55 à 216) ;
- la densité thermique moyenne des réseaux de chaleur est égale à **7,8 MWh/ml** (dispersion : 2,8 à 14,7).

⁹ Le taux de valorisation correspond au rapport de l'énergie géothermique valorisée sur son potentiel théorique.

2.5. BILAN DE L'ÉTAT DES LIEUX

Le bilan a été réalisé à deux années différentes : 2010, année durant laquelle l'inventaire a été réalisé, et 2005, année prise comme référence pour le SRCAE.

Les deux tableaux ci-dessous reprennent l'ensemble des filières de géothermie exploitées en région Île-de-France, pour les années 2005 et 2010.

2005	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	26	1 745	11 048	2 015
Opérations sur les aquifères intermédiaires (Albien et Néocomien)	3	1 745	8 630	3 312
Opérations aux Dogger	29	87 300	1 417 492	204 135
Total 2005		90 790	19 678	209 462

Tableau 3 - Bilan de production d'énergie géothermique en Île-de-France en 2005.

2010	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	77	5 561	35 204	6 419
Opérations sur les aquifères intermédiaires (Albien et Néocomien)	3	1 744	8 630	3 311
Opérations aux Dogger	30	98 253	1 575 590	229 631
Total 2010		105 558	1 619 424	239 361

Tableau 4 - Bilan de production d'énergie géothermique en Île-de-France en 2010.

La filière géothermique en Île-de-France alimente donc plus de 187 000 équivalent-logement (hors PAC individuelles).

Il est intéressant de noter dans ce bilan le poids de la filière géothermie au Dogger dans le bilan, comme le montre le diagramme ci-dessous.

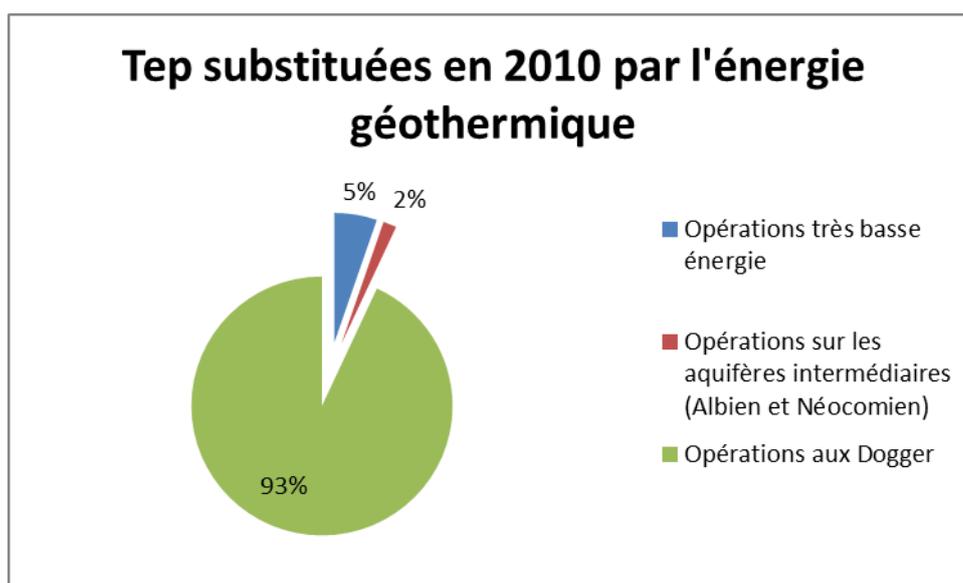


Figure 9 - Influence des opérations au Dogger sur le bilan énergétique.

Il en est de même pour les quatre autres indicateurs, qui dans l'ensemble évoluent sensiblement dans les mêmes proportions.

Le tableau ci-dessous met en évidence l'efficacité énergétique et climatique des trois filières géothermiques étudiées. Le comparatif est effectué par rapport à l'exploitation des aquifères superficiels).

Valeurs 2010	Tep substituées par opération		Gain en énergie primaire		Tonnes de CO ₂ évitées annuellement	
	Valeur	Coefficients de comparaison	Valeur	Coef. Comp.	Valeur	Coef. Comp.
PAC	72	1	457	1	83	1
Aquifères intermédiaires	581	8	2 877	6	1 104	13
Aquifère profond (Dogger)	3 388	47	54 331	119	7 918	95

3. Méthodologie générale de détermination du potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France

3.1. LA DÉFINITION DE POTENTIEL

L'étude du potentiel de développement de la géothermie à l'horizon 2020 doit se faire en comparant, de manière géolocalisée, les ressources géothermales aux besoins thermiques des utilisateurs en surface.

Le potentiel se définit en termes d'énergie pouvant être substituée par la géothermie, en prenant en compte les caractéristiques de la ressource et ses conditions d'accès. Il est calculé à partir des scénarios de consommations énergétiques (consommations pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire et/ou le froid) et donc uniquement au droit des secteurs présentant des besoins de surface.

3.2. LA PRISE EN COMPTE DES PRINCIPALES FILIÈRES

L'ensemble des technologies de géothermie susceptibles d'être exploitées en région Île-de-France doit être été considéré :

- la **géothermie très basse énergie** :
 - utilisation des aquifères superficiels couplés avec une PAC ;
 - développement de champs de sondes géothermiques.

Cette étude ne détermine pas de potentiel de développement de solutions sur aquifères intermédiaires (Albien et Néocomien) étant données les incertitudes sur les propriétés de la ressource et les conditions réglementaires d'exploitation. Les nouvelles opérations en cours de réalisation devront permettre de progresser sur la connaissance de ces aquifères.

La question du potentiel de développement des PAC individuelles est étudié de manière distincte : les enjeux ne concernent pas la ressource, étant données le nombre de solutions géothermiques disponibles.

- la **géothermie basse énergie** : utilisation des aquifères « profonds » pour alimenter des réseaux de chaleur urbains.

Cette étude présente une méthodologie pour déterminer uniquement le potentiel de développement sur l'aquifère du Dogger (déjà largement exploité, comme présenté dans les paragraphes précédents). Les aquifères du Lusitanien et du Trias sont encore trop peu connus à ce stade.

3.3. LA PRISE EN COMPTE DE CONTRAINTES DE DÉVELOPPEMENT

3.3.1. Les contraintes réglementaires et techniques

Les différentes contraintes réglementaires et techniques inventoriées sont pour la plupart prises en compte dans la méthodologie de croisement des ressources et des besoins. L'objectif est de

superposer ces données à la cartographie du potentiel géothermique en Île-de-France pour en faire ressortir un quantitatif des zones contraignantes à l'implantation de chacune des filières.

Une distinction est faite entre les contraintes prises en compte dans la méthodologie de croisement et celles uniquement renseignées à titre indicatif dans ce rapport ainsi que dans l'interface cartographique :

- les contraintes considérées dans la méthodologie de croisement correspondent à des éléments de portée réglementaire ou pouvant amener des conflits d'usages localement ;
- d'autres contraintes techniques peuvent impacter la mise en place de l'opération géothermique à plusieurs niveaux : technique de forage, possibilité d'implantation du doublet (distances à respecter vis-à-vis des décharges, des zones polluées, des zones inondables...¹⁰). Ces contraintes ne peuvent être prises en compte à l'échelle régionale et devront être étudiées au cas par cas dans le cadre d'une étude de faisabilité. Elles sont néanmoins renseignées dans cette étude à titre indicatif : elles sont cartographiées mais pas prises en compte dans la méthodologie de croisement à l'échelle de la maille. Il s'agit principalement des mesures de protection de la ressource en eau, renseignées à l'échelle de la commune.

		Contraintes		Source
		SDAGE Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux		DRIEE IDF
Éléments de portée réglementaire	Eaux / milieux aquatiques	SAGE Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux		DRIEE IDF
		ZRE Délimitation de Zones de Répartition des Eaux		DRIEE IDF
		Protection de captages AEP	Périmètres de protection rapprochée	ARS IDF
	Risques naturels	Plan de Prévention des Risques Inondations (PPRI)	Zones inondables	DRIEE IDF- DDT
		Plan de Prévention du Risque Mouvements de Terrain (PPRMT)	Aléa retrait-gonflement des argiles Aléa Effondrement (risque cavité) Aléa glissement de terrain	DRIEE IDF- DDT
	Ressources naturelles	Plan de Prévention du Risque Technologique (PPRT) - Stockages souterrains de gaz	Périmètre de protection des stockages souterrains	DRIEE IDF
Zones de conflit d'usage	Captages/ prises d'eau	Périmètre d'influence du captage d'eau Interaction hydraulique		-
	Opérations géothermiques	Périmètre d'influence de l'opération géothermique Interaction thermique		-

Tableau 5 - Principales contraintes à prendre en compte pour la mise en place d'une opération de géothermie.

L'annexe 3 présente plus en détails la prise en compte des contraintes techniques et réglementaires.

¹⁰ A. Bel, S. Bézégues-Courtade, M. Philippe, M. Jorio, A. Poux (2010) - La géothermie en Rhône-Alpes : comparatif technique et mesures d'encadrement. Rapport final. BRGM/RP-59048-FR. 109 p., 21 fig., 5 ann.

3.3.2. Les contraintes économiques

Les contraintes présentées ci-dessus sont liées aux propriétés de la ressource et conditionnent leur accès.

Concernant les aquifères superficiels, une contrainte économique liée à la profondeur d'accès à la ressource et dépendant des besoins en surface a été prise en compte.

4. Détermination du potentiel de développement sur aquifères superficiels

4.1. ENJEUX

L'étude du potentiel de développement de la géothermie doit se faire en comparant, de manière géolocalisée, les ressources géothermales aux besoins thermiques des utilisateurs en surface. Pour ce faire, une base de données (geodatabase) a été créée et l'ensemble des données géolocalisées ont été traitées grâce à un Système d'Information Géographique (SIG).

Déterminer le potentiel de développement d'opérations sur aquifères superficiels revient à comparer les besoins thermiques de surface à la ressource disponible au droit du site. Pour un besoin donné en surface, une ressource en eau superficielle peut exister. En Île-de-France, jusqu'à trois aquifères superficiels peuvent être superposés. Il faudra donc étudier si au moins un des aquifères peut satisfaire les besoins. La combinaison de plusieurs aquifères pour répondre à un besoin ne sera pas considérée. Par ailleurs, lorsque la ressource est « limitante » (débit potentiel exploitable trop faible), il se peut qu'une partie des besoins puisse cependant être satisfaite. Ces considérations sont importantes pour les choix méthodologiques retenus.

4.2. DÉFINITION DE L'ÉCHELLE DE TRAVAIL

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir l'échelle de travail qui permettra de comparer de manière satisfaisante les ressources géothermales et les besoins thermiques de surface. L'échelle de travail doit se situer entre :

- l'échelle fine qui constitue l'échelle de l'opération (bâtiment ou groupe de bâtiments). Cette étude réalisée sur l'ensemble du territoire régional n'a pas pour vocation et ne peut se substituer à des études de préfaisabilité pour chaque bâtiment ;
- l'échelle communale, qui semble constituer un seuil pour l'obtention de données notamment énergétiques. Cependant, le croisement à l'échelle de la commune n'est pas satisfaisant. En effet, la façon dont sont répartis les utilisateurs sur la commune va influencer directement l'utilisation du potentiel géothermique. Par exemple, si, à ressources et besoins thermiques constants à l'échelle de la commune, les densités énergétiques varient (existence de zones d'habitat collectif concentré par rapport à des zones pavillonnaires), le potentiel de valorisation sera différent (ressource pouvant être limitante dans le premier cas, alors qu'elle ne le serait pas dans le second). Le besoin total à l'échelle de la commune peut correspondre à la somme de besoins partiels dispersés ou bien à quelques gros consommateurs localisés.

L'objectif a donc été de trouver une échelle de travail intermédiaire, entre celle du bâtiment et celle de la commune : l'étude des ressources superficielles a été réalisée sur un maillage carré de 250 m sur 250 m. De plus, pour évaluer le potentiel des aquifères superficiels, par un croisement de données, il est nécessaire de prendre en compte un nombre limité de doublets de forages (ou nombre limité d'opérations) qui exploiteront les aquifères (densité limite d'opérations). Une hypothèse de travail va consister à considérer un doublet géothermique par maille, définissant ainsi une « densité limite », voire maximale, d'opérations. L'échelle de travail considérée pour les aquifères superficiels est une maille carrée de 250 m sur 250 m.

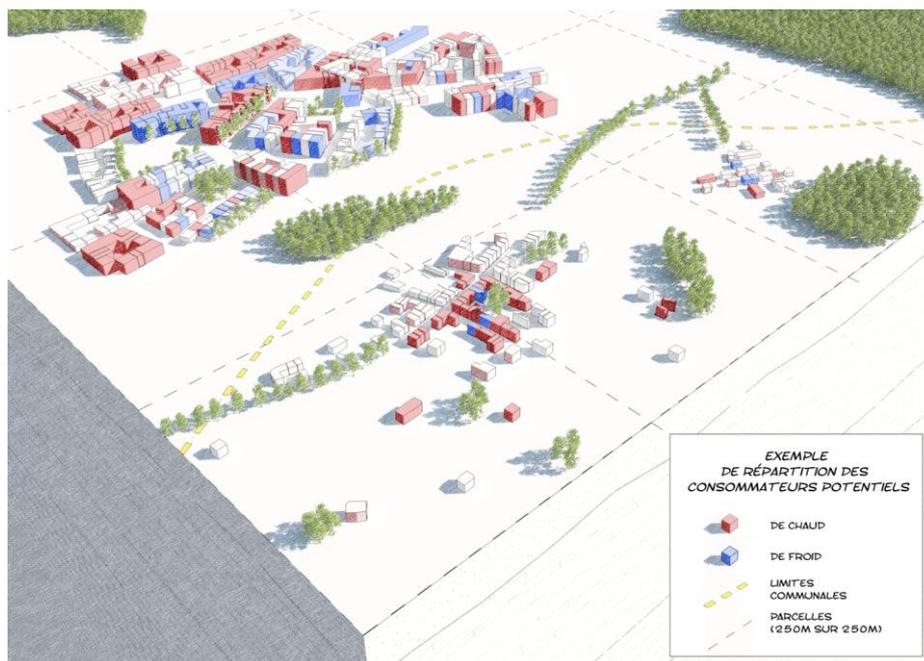


Figure 10 - Illustration des enjeux de la territorialisation des besoins thermiques.

4.3. CARTOGRAPHIE DES BESOINS THERMIQUES DE SURFACE

Consommations énergétiques

Les données de consommations énergétiques ont été déterminées dans le cadre d'un mandat sur la territorialisation des consommations régionales d'énergie, réalisé par l'IAU Île-de-France et AIRPARIF. Ce travail d'élaboration d'un outil de modélisation de consommations énergétiques et territorialisation à une échelle infrarégionale est une contribution spécifique du volet efficacité énergétique dans le bâtiment du SRCAE.

L'objet de l'étude était de :

- produire, à partir des données déjà existantes, des données de consommations énergétiques annuelles modélisées, transmises en MWh, exprimées en énergie finale et à climat normal francilien ;
- détailler par usage et par type d'énergie les consommations énergétiques du bâti pour l'état de référence 2005 ;
- détailler par usage les consommations énergétiques du bâti pour les horizons prospectifs 2020 et 2030.

L'ensemble de ces données dites « CENTER » ont été transmises pour la présente étude aux horizons 2005 et 2020¹¹. Les données de consommation énergétique sont fournies à l'échelle d'une maille carrée de 250 m sur 250 m pour 2005 (repérées par un numéro NUM250, auquel est associé le code INSEE de la commune). Les consommations sont données pour le secteur Résidentiel et Tertiaire par type de branche :

¹¹ Elles sont visibles sur le site internet de l'IAU IdF (Visiau Energie CENTER, <http://www.iau-idf.fr/cartes/cartes-et-fiches-interactives/visiau-energie-center.html>)

- (1 Individuel) ;
- 2 Collectif ;
- 3 Commerces ;
- 4 Bureaux ;
- 5 Santé et action sociale ;
- 6 Sport, Culture, Loisirs ;
- 7 Transports ;
- 8 Cafés, Hôtels, Restaurants ;
- 9 Habitat communautaire ;
- 10 Enseignement.

Le cas de l'individuel, mis entre parenthèses, sera traité par ailleurs.

Situation en 2005 : Prise en compte des consommations accessibles à la géothermie

Les usages accessibles pour la géothermie retenus sont les consommations énergétiques de toutes les branches (hors Individuel) liées à la combustion de produits pétroliers et de gaz naturel pour le chauffage et pour l'ECS (Eau Chaude Sanitaire).

Consommation énergétique liée à ...	Usage	Consommation accessible à la géothermie
la combustion de bois	Chauffage	non
	ECS	
	Autres usages	
la combustion de produits pétroliers	Chauffage	oui
	ECS	non
	Autres usages	
la combustion de gaz naturel	Chauffage	oui
	ECS	non
	Autres usages	
l'électricité	Chauffage	non
	ECS	
	Autres usages	
au chauffage urbain	Chauffage	non
	ECS	
	Autres usages	

Tableau 6 - Usages accessibles pour la géothermie retenus dans cette étude.

Les consommations exclues concernent donc :

- les consommations d'électricité : les travaux d'adaptation à la géothermie sont considérés en première approche comme trop onéreux, éventuellement réalisables dans le cas d'une réhabilitation lourde ;
- les consommations de bois : pas de concurrence entre énergies renouvelables ;
- les consommations liées au chauffage urbain : soit elles concernent une opération géothermique (existante ou à venir) soit un réseau classique. Si ce dernier est déjà alimenté par des énergies locales (bois, UIOM), il sera exclu, sinon la possibilité de le « géothermiser » sera étudiée par ailleurs ;
- les consommations énergétiques liées au chauffage urbain pour d'autres usages concernent les réseaux de froid ;
- les consommations de produits pétroliers, GN (Gaz Naturel) et d'électricité « pour d'autres usages ».

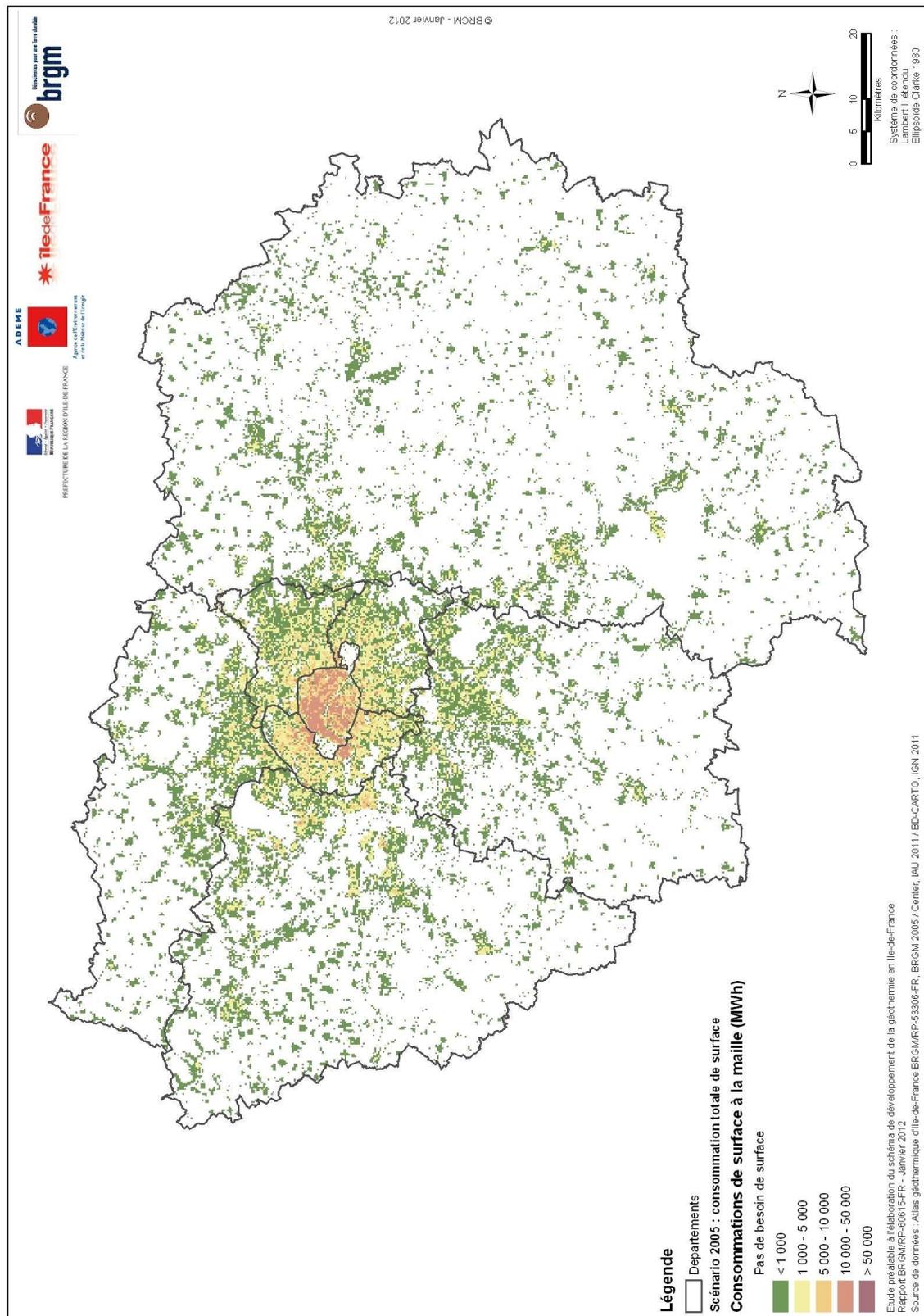


Figure 11 - Cartographie à l'échelle de la maille 250 des consommations accessibles à la géothermie.

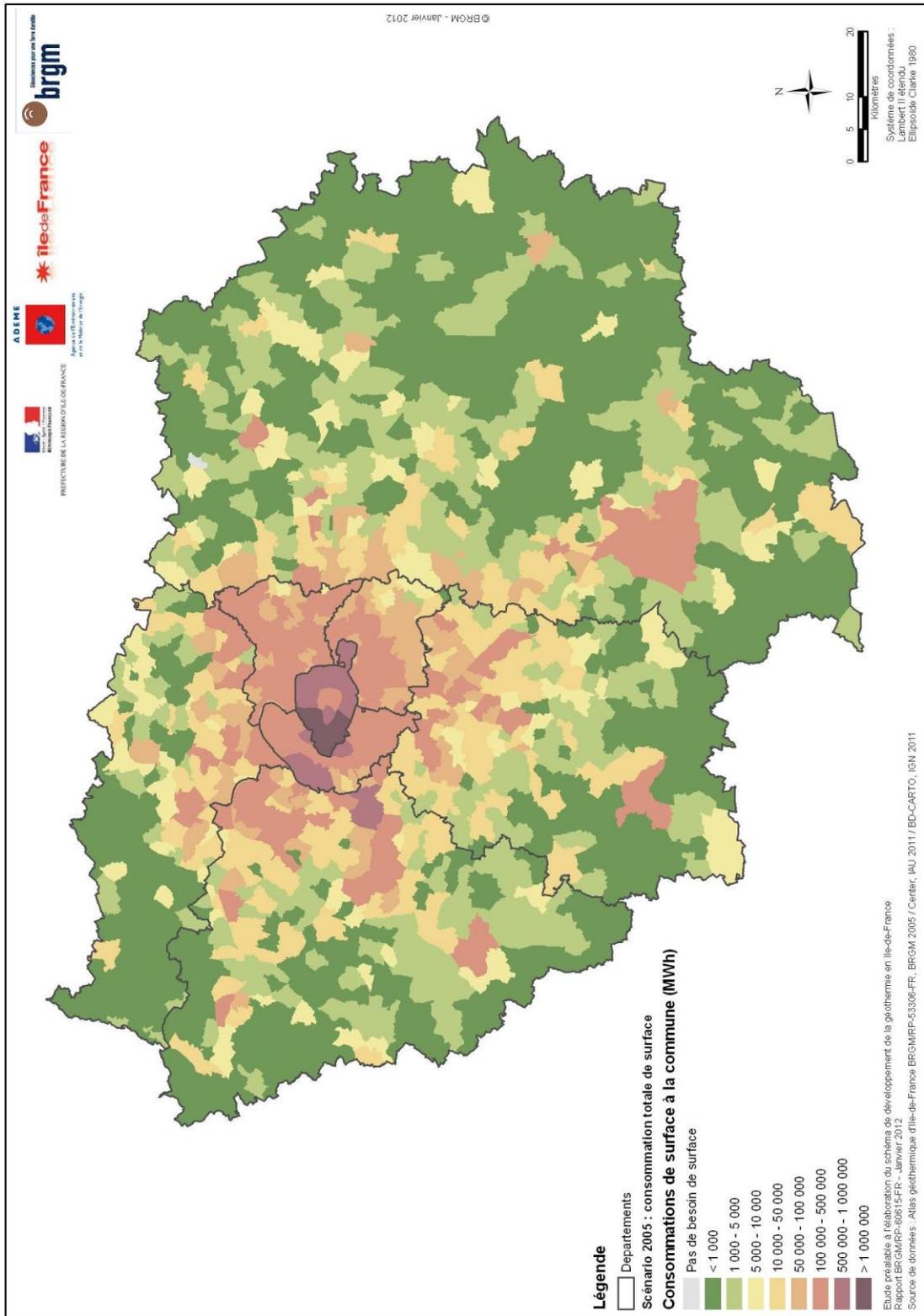


Figure 12 - Cartographie des consommations communales 2005 (consommations accessibles à la géothermie).

Scénario 2020 : Données communales ventilées à la maille et détermination des consommations accessibles à la géothermie

Les données CENTER fournies à l’horizon 2020 sont renseignées à l’échelle de la commune (une valeur de consommation par commune). Afin de les traiter suivant la méthodologie établie pour l’étude du potentiel des aquifères superficielles, ces données ont été ventilées uniformément sur le maillage. Le maillage a été défini, pour l’horizon 2020, en se basant sur la projection de la nouvelle tâche urbaine proposée l’étude CENTER et correspondant correspondant aux mailles urbaines 2020 du scénario volontariste¹². L’ensemble des mailles urbaines d’une même ville ont finalement mêmes valeurs de consommations.

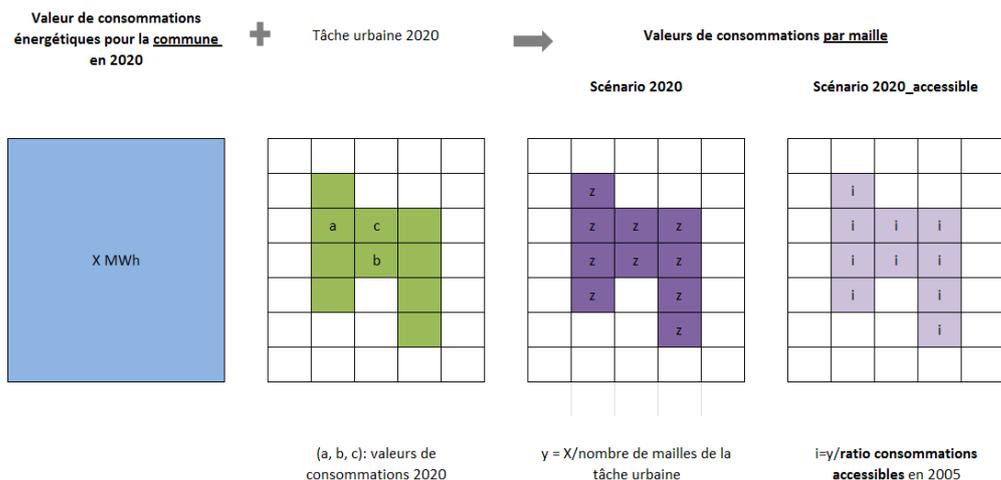


Figure 13 - Création du scénario 2020_accessible à partir du scénario 2020.

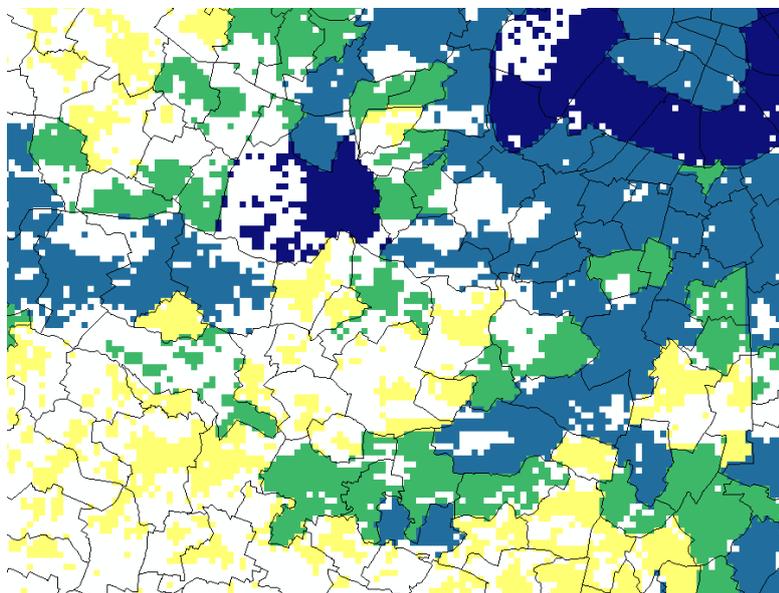


Figure 14 - Représentation du scénario 2020 à la maille.

¹² Le scénario volontariste (2020_S2) a été construit en prenant en compte le grenelle de l’environnement, en appliquant successivement les réglementations thermiques RT 2005 et RT 2012 et en utilisant un premier jeu d’hypothèses volontaristes de réhabilitation du parc existant.

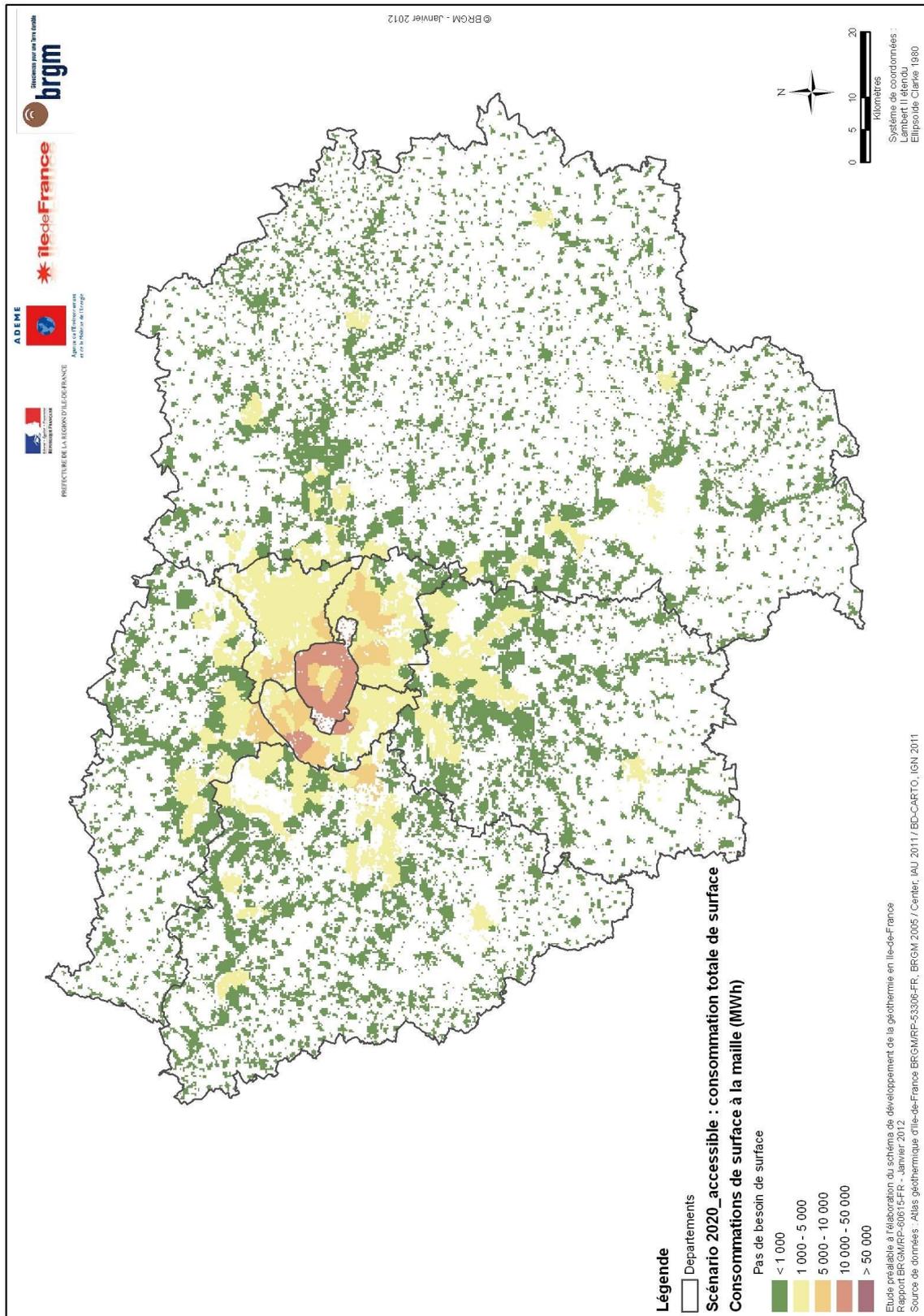


Figure 15 - Cartographie des consommations 2020_accessible à l'échelle de la maille.

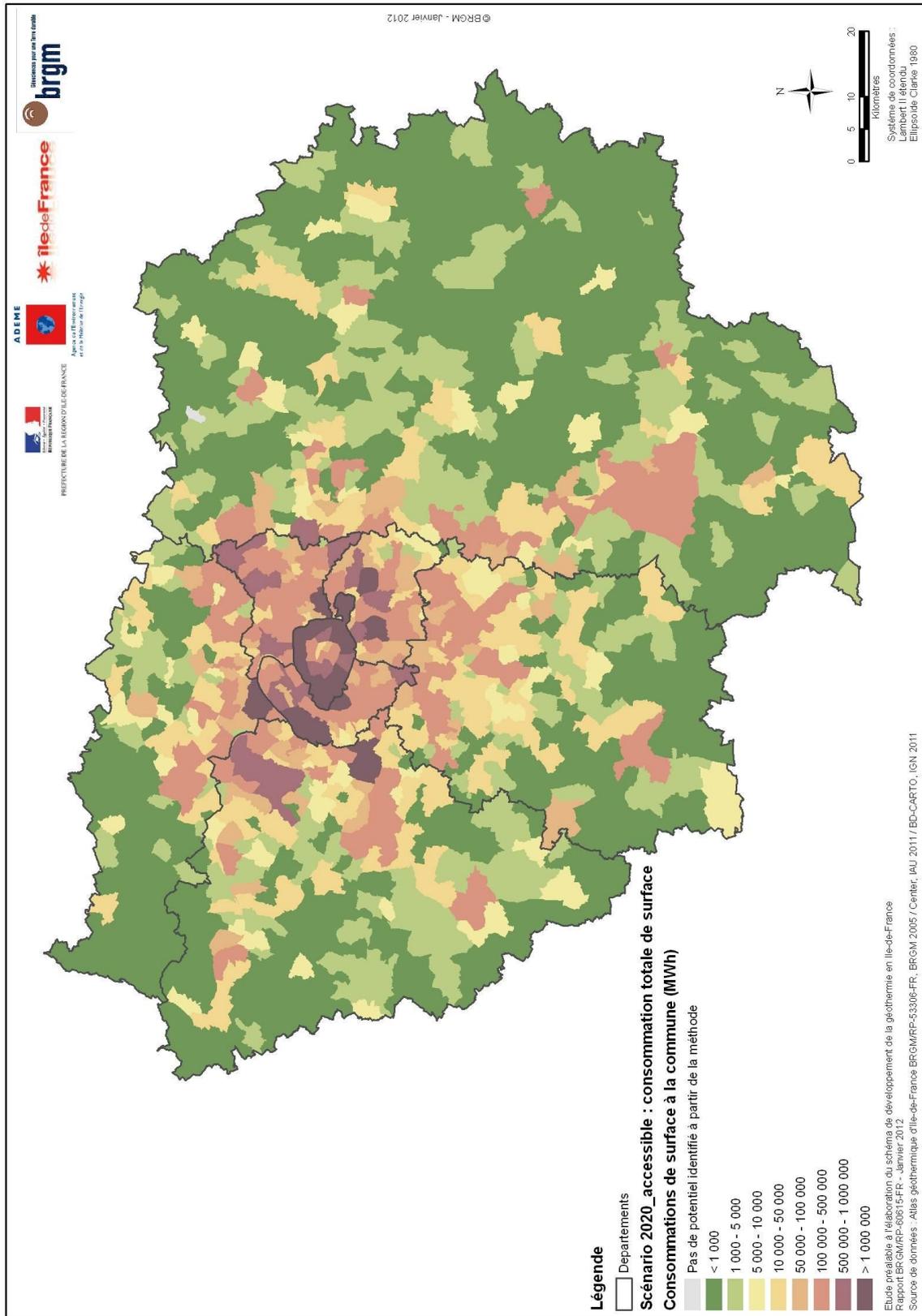


Figure 16 - Cartographie des consommations 2020_accessible à l'échelle de la commune.

De plus, le scénario proposé pour 2020 ne donne pas de détails concernant le combustible utilisé. Le scénario 2020 proposé par l'étude CENTER prend donc en compte l'ensemble des consommations. Ainsi, afin de distinguer les consommations énergétiques accessibles à la géothermie des consommations énergétiques totales, le ratio « consommations accessibles à la géothermie/consommations totales » calculé à partir des données du scénario 2005, a été appliqué aux valeurs 2020 et ce pour chacune des mailles. Un troisième scénario de consommations énergétiques est donc étudié : il est appelé « 2020_accessible » dans la suite du document.

4.4. POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS

4.4.1. Principe général

Le principe de base de la méthodologie développée est de comparer les ressources géothermales avec les besoins thermiques de surface, à l'échelle de la maille. La comparaison se fait pour chaque aquifère et pour différents besoins thermiques. En effet, d'une part, pour un même besoin, il peut exister différentes ressources capables de répondre aux besoins et inversement, lorsque la ressource est « limitante », autrement dit qu'elle ne peut pas satisfaire l'ensemble des besoins, il est possible qu'elle puisse cependant satisfaire une partie des consommations (un certain nombre de branches). L'ensemble des besoins a donc été décomposé pour chaque maille en deux : consommations du résidentiel étendu et consommations du tertiaire, c'est-à-dire en entités nécessitant des besoins thermiques de même nature.

L'objectif est alors de déterminer quelle part des besoins de chaud peut être satisfaite par un des aquifères superficiels. Le rapport des deux puissances (puissance géothermique disponible sur la puissance nécessaire en surface) définit le taux d'adéquation.

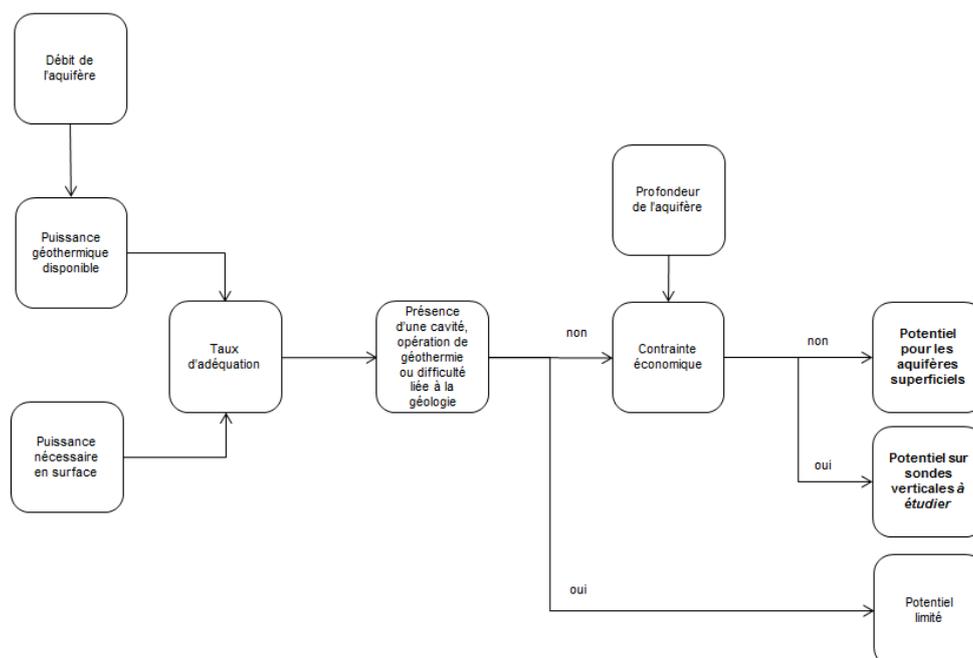


Tableau 7 - Schéma de la méthode utilisée pour déterminer le potentiel sur aquifères superficiels.

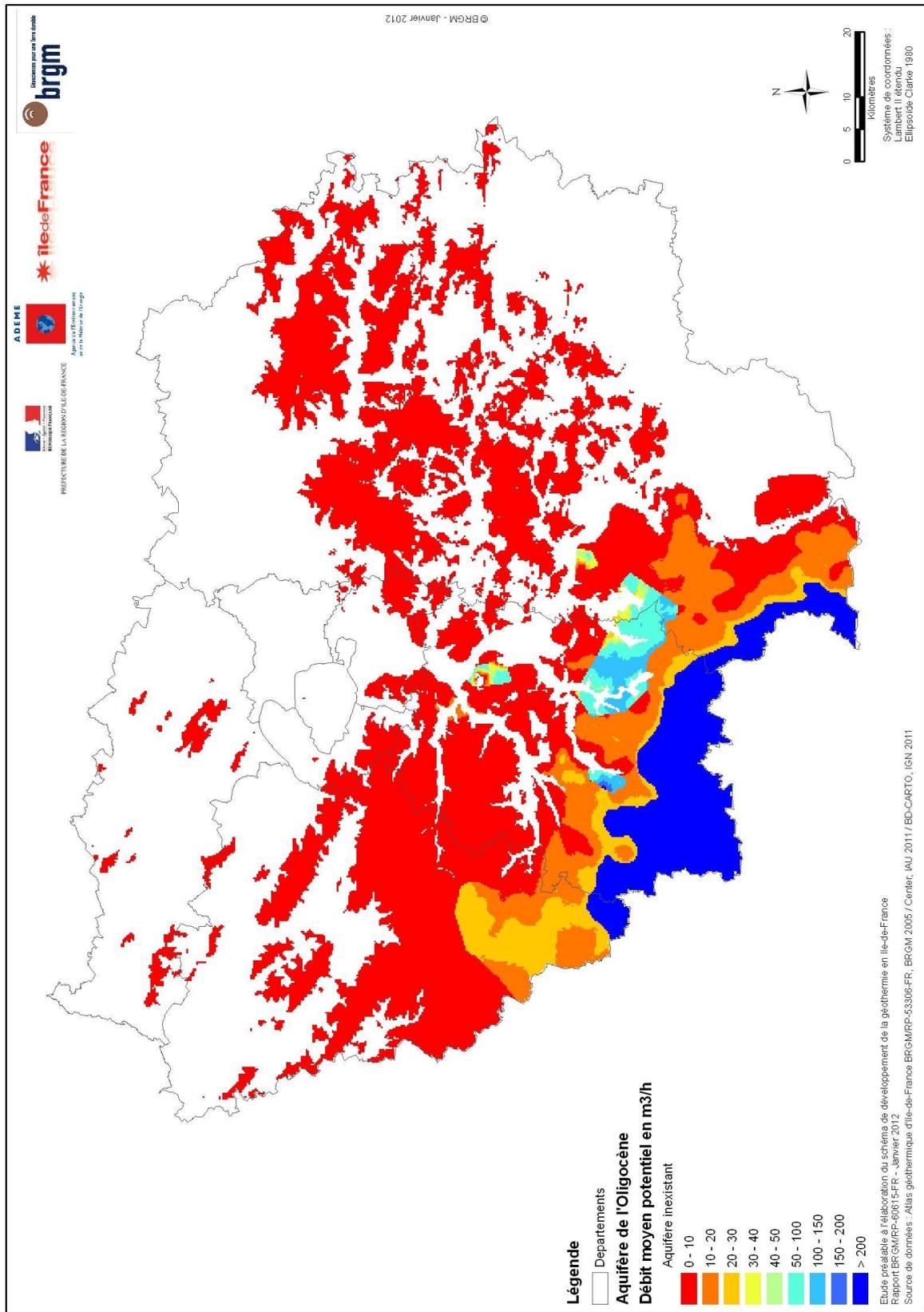


Figure 17 - Carte du débit moyen de l'aquifère de l'Oligocène en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).

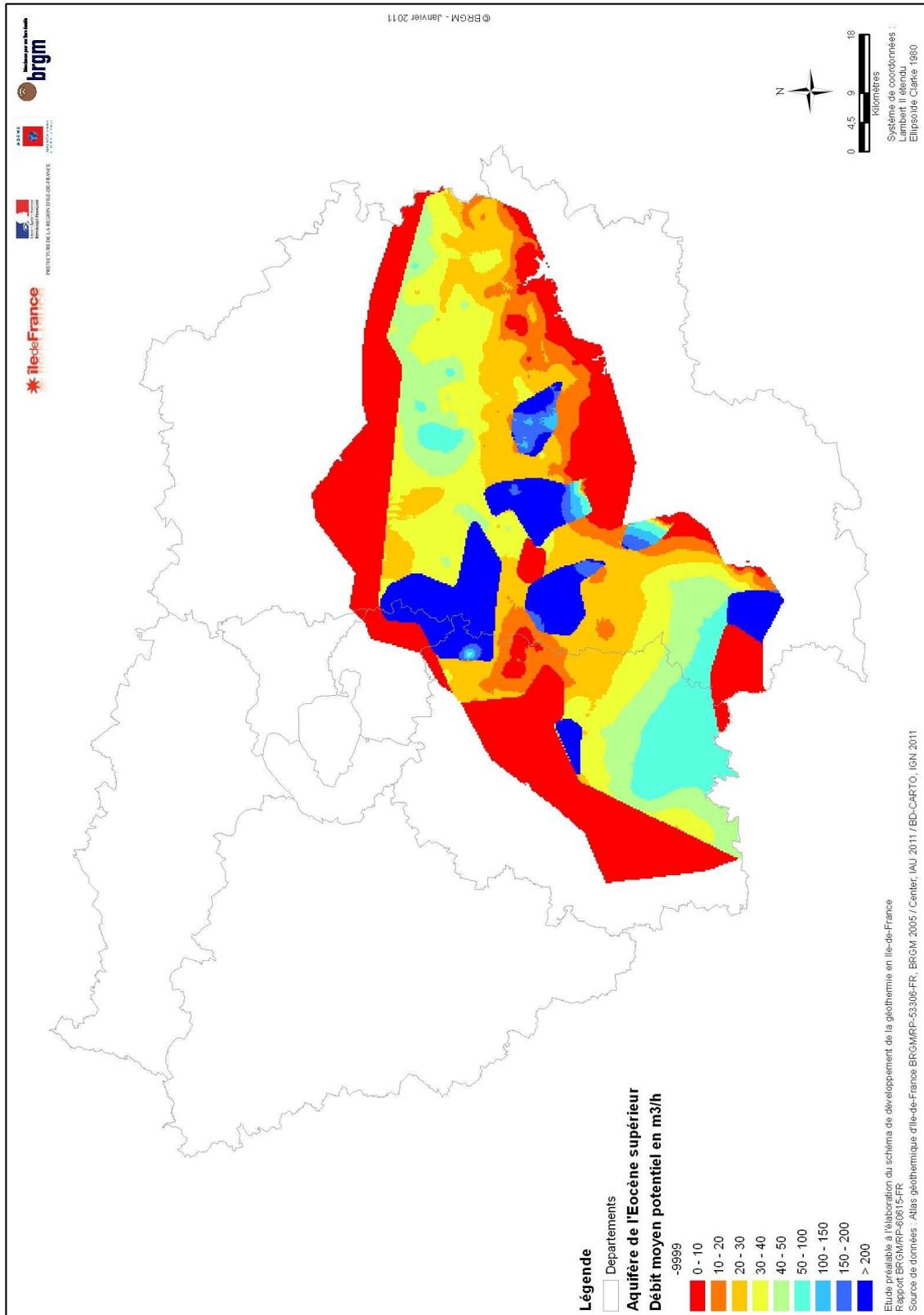


Figure 18 - Carte du débit moyen de l'aquifère de l'Éocène Supérieur en Île-de-France (d'après BRGM/IRP-53306-FR).

Puissance géothermique disponible assurée par la ressource en eau

Pour déterminer la puissance extractible d'un aquifère, il est nécessaire de définir un mode de fonctionnement par usage « production de chaleur » et usage « production de froid ». En effet, le dimensionnement en mode chauffage est différent du dimensionnement en mode rafraîchissement. Nous nous intéressons ici au potentiel des aquifères superficiels pour les besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

Le potentiel de climatisation/rafraîchissement est évalué en un second temps.

La puissance disponible est calculée à partir des valeurs de débit moyen potentiel de la nappe, en prenant une hypothèse de ΔT (différence entre la température de l'eau prélevée et la température de l'eau rejetée après utilisation par la PAC) et de COP (Coefficient de Performance) de référence des PAC.

La puissance chaude est calculée à partir de la formule suivante :

$$P_{ch} \text{ (kW)} = (Q * 1,16 * \Delta T) / (1 - 1/COP) = Q * 9,744$$

avec Q le débit moyen potentiel de la nappe (aquifère superficiel) en m^3/h ; $COP = 3.5$; $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ainsi, pour chaque maille et pour chaque aquifère présent au droit de cette maille (recouvrement possible de plusieurs aquifères superficiels), il a été possible de calculer la puissance maximale que peut fournir un doublet géothermique.

Remarque : les valeurs moyennes des débits sont tirées de l'atlas hydrogéologique réalisé en 2005 par le BRGM dans le cadre du projet « *Guide d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Île-de-France* » (Réf. BRGM/RP-53306-FR). Le maillage de cet atlas a été retraité de manière à obtenir des valeurs de débit pour chaque maille donnée par l'étude CENTER.

Puissance nécessaire en surface

La méthode propose que la puissance géothermique disponible dans la nappe superficielle soit comparée à la puissance thermique nécessaire en surface.

Dans le but d'éviter de multiplier les possibilités de croisement des ressources superficielles (quatre aquifères) et des besoins (neuf branches), il a été décidé de regrouper différentes branches selon la nature des besoins thermiques à assurer :

- branches 2, 6, 7, 8, 9 et 10 pour lesquelles seuls des besoins de chauffage et d'ECS sont à satisfaire, appelé Résidentiel Etendu ;
- branches 3, 4 et 5 pour lesquelles il existe également des besoins de climatisation, appelé Tertiaire ;
- un troisième cas, correspondant à la somme des dix branches, présente les consommations totales par maille, appelé Total.

Le lien entre la puissance maximale des besoins (par $-7 \text{ }^\circ\text{C}$) et l'énergie à fournir est déterminé par la courbe monotone d'une opération (réalisée lors du dimensionnement). Cette courbe dépend de la typologie du bâtiment et de ses besoins en énergie (utilisation d'eau chaude sanitaire, production de froid...). La relation entre la puissance maximale et l'énergie dépend du nombre d'heures d'utilisation à pleine puissance (HPP) de l'installation (Consommation énergétique = $\text{Puissance}_{(-7^\circ\text{C})} * \text{HPP}$).

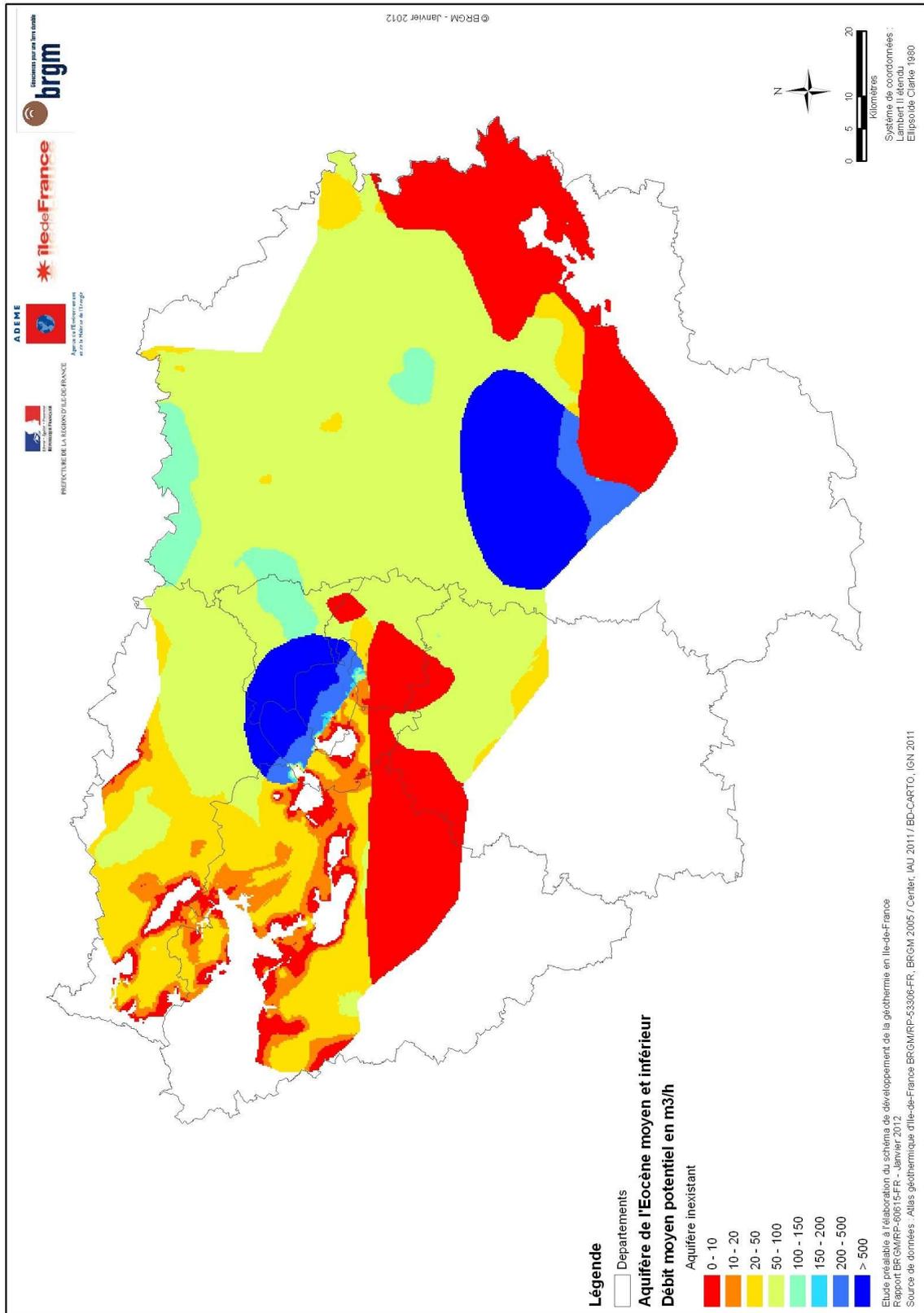


Figure 19 - Carte du débit moyen de l'Éocène Moyen et Inférieur en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).

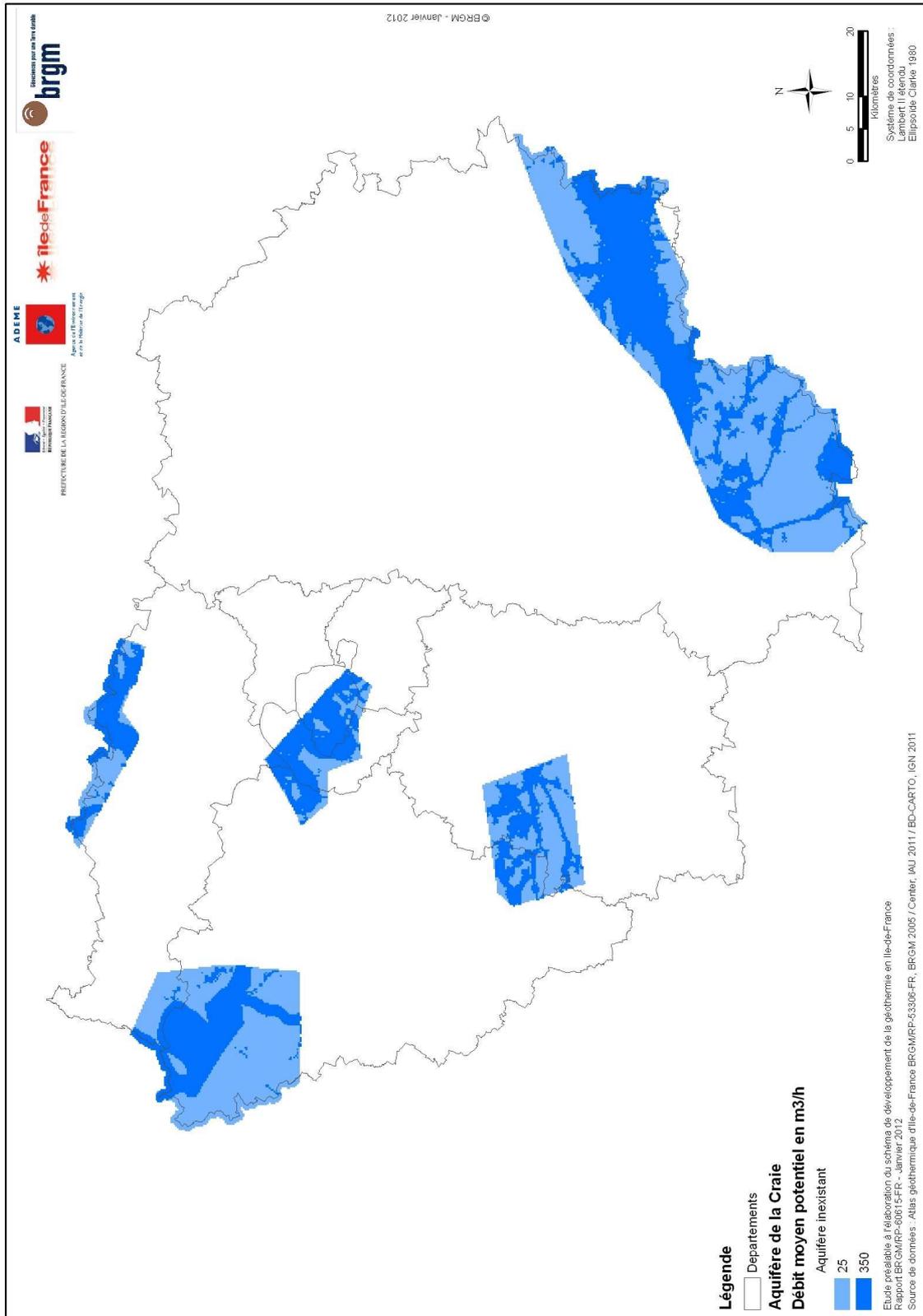


Figure 20 - Carte du débit moyen de l'aquifère de la Craie en Île-de-France (d'après BRGM/RP-53306-FR).

La puissance maximale a été calculée par maille pour chaque cas (résidentiel étendu, tertiaire et total) à partir des valeurs de consommation et des valeurs de HPP de chaque branche (déterminées à partir des consommations régionales). Les valeurs utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Secteurs	Branches		HPP chaud	HPP froid
	Nature	Code branche (CENTER)		
Résidentiel étendu (chauffage +ECS)	Rés Coll	2	2 300	
	Sport, Culture, Loisirs	6	2 100	
	Transports	7	1 700	
	Enseignement	10	1 600	
	Cafés, hôtel, restaurants	8	1 900	
	Habitat communautaire	9	2 400	
Tertiaire (chauffage + ECS + Climatisation)	Commerces	3	1 100	400
	Bureaux	4	1 600	250
	Santé et action sociale	5	2 400	800

Tableau 8 - Valeurs calculées des HPP par type de branche.

4.4.2. Définition du taux d'adéquation technique et calcul du potentiel technique

Définition du taux d'adéquation technique

Dans cette étude, le taux d'adéquation (TA), défini par maille, correspond au rapport entre les puissances disponibles de la ressource (aquifères superficiels) et les puissances nécessaires en surface. Sur chaque maille, le taux d'adéquation est déterminé pour chaque aquifère superficiel présent au droit de la maille et pour les trois puissances (Résidentiel Étendu, Tertiaire et Total).

Les valeurs de TA (Taux d'adéquation) limites ont été choisies en interprétant ses valeurs en termes d'énergie fournie. Le TA se distingue du taux de couverture (TC) qui désigne quant à lui le rapport de l'énergie thermique valorisée sur l'énergie géothermique nécessaire au bâtiment. Le rapport en puissance TA permet de qualifier la puissance à satisfaire pour la faisabilité de l'opération, le rapport en énergie permet de déterminer les consommations et les besoins thermiques satisfaits.

La courbe ci-dessous (fig. 21) présente le lien entre le TA et le TC, qui se détermine à partir de la courbe monotone des besoins.

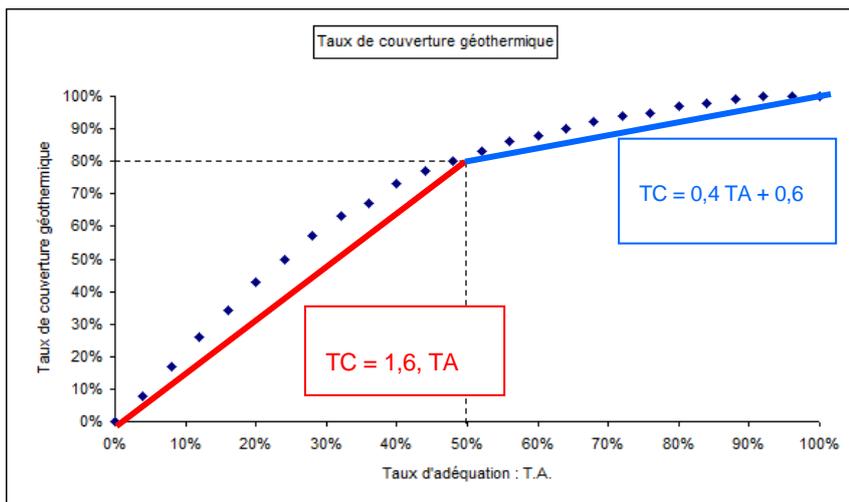


Figure 21 - Relation simplifiée entre taux d'adéquation (TA) et taux de couverture (TC) (données VALOR Consultants).

Le taux d'adéquation est calculé pour l'ensemble des aquifères superficiels et est étudié pour les trois types de besoin en surface : Résidentiel étendu, Tertiaire et Total.

Valeur du taux d'adéquation	Interprétation
supérieur à 100 %	La ressource permet de satisfaire plus de 100 % des besoins, en puissance et en énergie. Elle permettrait même de satisfaire des besoins complémentaires.
entre 50 et 100 %	La ressource devrait permettre de couvrir entre 80 et 100 % des besoins en énergie. Cette configuration nécessite la présence d'un générateur d'appoint, qui peut être déjà en place avant les opérations de réhabilitation.
inférieur à 50 %	Soit la ressource est limitée, soit les besoins de la maille sont très importants. Dans la deuxième hypothèse, il faudra étudier plus en détails les possibilités de considérer qu'une partie de ces besoins (si la maille regroupe un ensemble de petits consommateurs) puisse être assurée. La ressource pourra alors éventuellement satisfaire un des utilisateurs. Cela sera à étudier au cas par cas.

Prise en compte des contraintes réglementaires et techniques

À l'échelle de la maille, le potentiel sera pris égal à 0 lorsqu'il existe une contrainte technique importante.

Les contraintes techniques prises en compte (et cartographiées à l'échelle de la maille) :

- les opérations de géothermie existantes ;
- les périmètres de protection de captage immédiat ;
- la présence d'une cavité naturelle ou anthropique dans la maille.

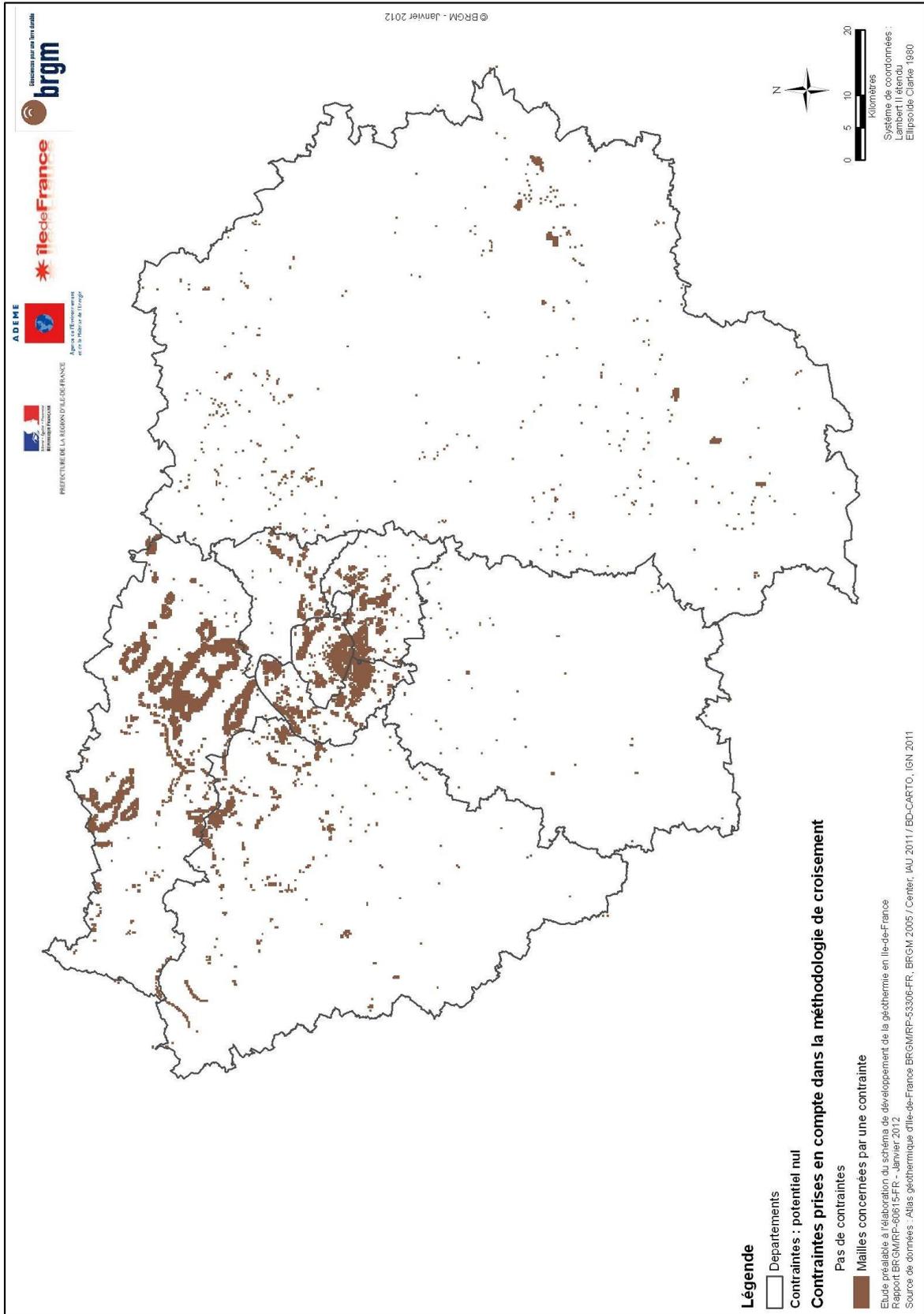


Figure 22 - Cartographies des mailles sur lesquelles il existe une contrainte technique ou réglementaire.

Codification

L'objectif de la codification est de distinguer et interpréter, par maille, l'ensemble des valeurs de taux d'adéquation technique calculées. En effet, douze taux d'adéquation ont été calculés sur chaque maille : quatre aquifères superficiels et trois consommations en surface (comme le montre la figure suivante).

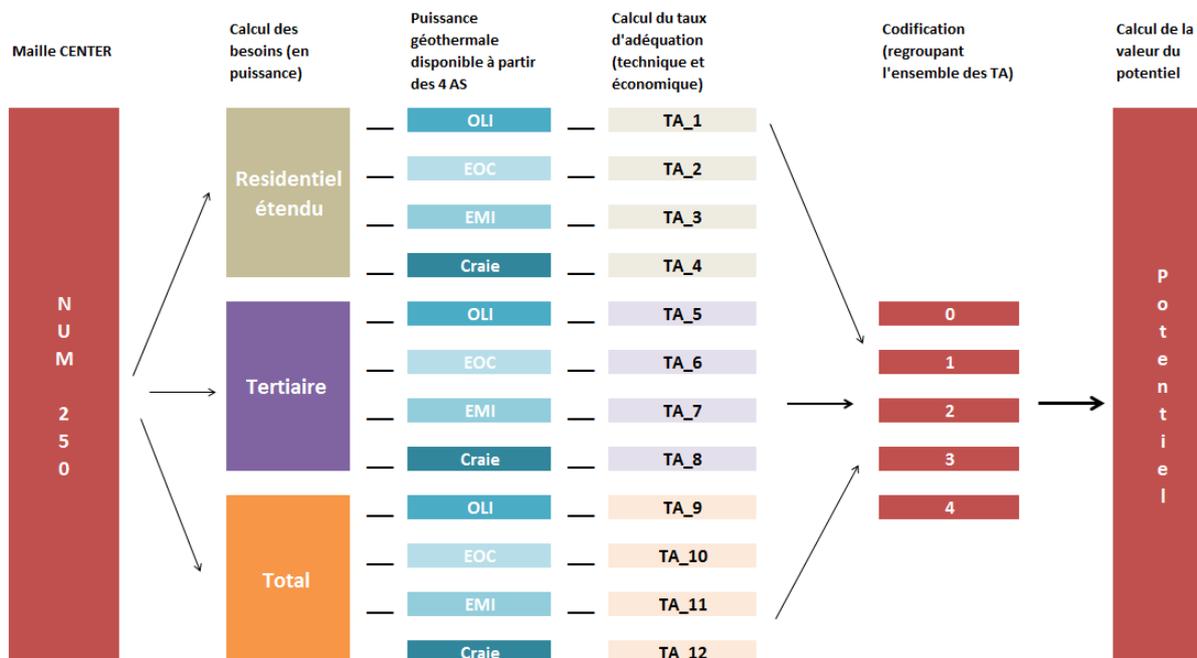


Figure 23 - Schéma présentant la méthode de calcul du potentiel sur aquifères superficiels : taux d'adéquation, codes et valeurs de potentiel.

Il s'agit alors de mettre en évidence les mailles pour lesquelles il existe un aquifère pouvant satisfaire au minimum 80 % des besoins (soit un taux d'adéquation supérieur à 50 %).

Ce calcul est effectué pour l'ensemble des besoins ou uniquement pour le résidentiel ou pour le tertiaire. Pour cela, les codes suivants ont été attribués aux mailles pour chaque aquifère :

Code	Interprétation
1	100 % des besoins totaux en puissance (Tot) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel
2	Entre 50 et 100 % des besoins totaux en puissance (Tot) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel
3	100 % des besoins en puissance du résidentiel étendu (Res) ou du tertiaire (Ter) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel
4	50 à 100 % des besoins en puissance du résidentiel étendu (Res) ou du tertiaire (Ter) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel
5	10 à 50 % des besoins totaux en puissance (Tot) du résidentiel étendu (Res) ou du tertiaire (Ter) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel
6	Les aquifères superficiels ne permettent pas de répondre aux besoins en puissance de surface (moins de 10 % des besoins peuvent être couverts).
0	Il n'existe pas d'aquifère superficiel présent au droit de la maille
-9999	La maille ne présente pas de consommations de surface

Quantification du potentiel technique

La valeur du potentiel géothermique à la maille est attribuée en fonction de la codification définie à partir du taux d'adéquation.

Le potentiel géothermique correspond à l'énergie valorisable au droit de la maille. Cette valeur est liée au taux de couverture (TC) lui-même en relation avec le TA (d'après la courbe présentée ci-dessus).

La valeur du code permet de déterminer la valeur du TC et donc, avec les valeurs des consommations en surface, le potentiel géothermique.

Code	Interprétation du calcul de potentiel
1	Potentiel = 100 % des consommations totales (Tot)
2	Potentiel = $(0,4 \cdot TA_{Tot} + 0,6) \cdot$ consommations totales (Tot)
3	Potentiel = 100 % des consommations du résidentiel étendu (Res) ou du tertiaire (Ter)
4	Potentiel = $(0,4 \cdot TA_{Res \text{ ou } Ter} + 0,6) \cdot$ consommations du résidentiel étendu (Res) ou du tertiaire (Ter) respectivement
5	Potentiel = $(1,6 \cdot TA_{Res, Ter \text{ ou } Tot}) \cdot$ consommations du résidentiel étendu (Res), du tertiaire (Ter) ou totales (Tot) respectivement
6	Les aquifères superficiels ne permettent pas de répondre aux besoins de surface
0	Il n'existe pas d'aquifère superficiel présent au droit de la maille
-9999	La maille ne présente pas de consommations de surface

4.4.3. Définition du potentiel technico-économique : prise en compte de la contrainte économique et détermination du potentiel en froid

Définition de la contrainte économique

Dans cette étude, une contrainte économique a été définie, qui dépend principalement de la profondeur de forage nécessaire pour atteindre l'aquifère permettant de répondre aux besoins.

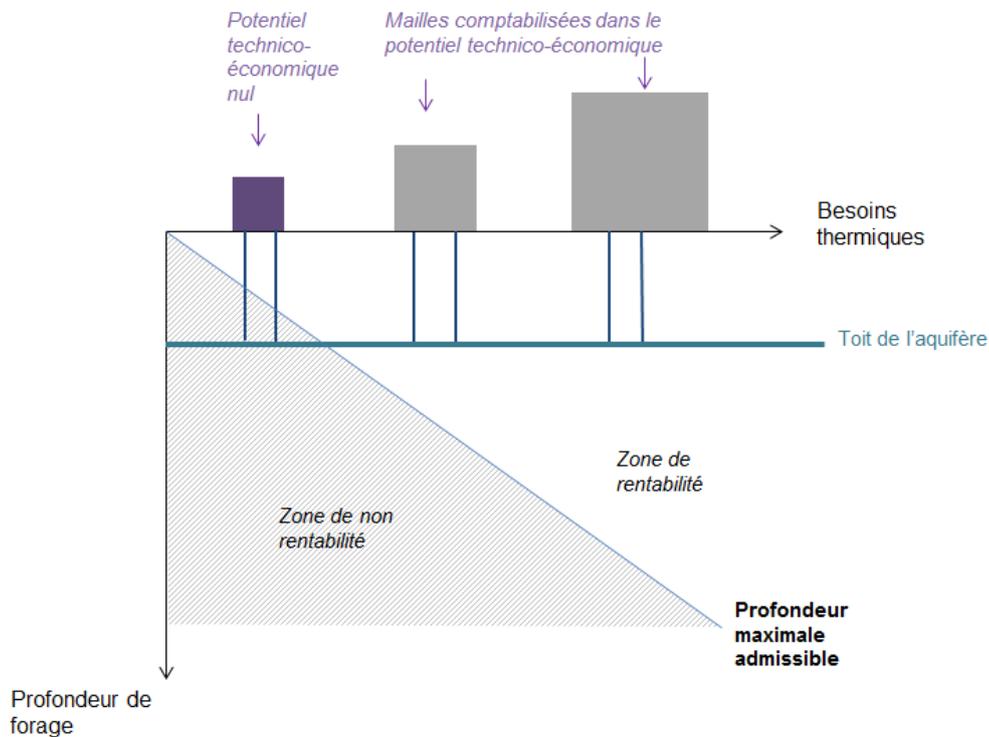


Figure 24 - Schéma présentant la définition de la contrainte économique.

Ainsi, la profondeur maximale de forage a été définie en fonction des besoins thermiques de surface et représente la profondeur de forage limite au-dessous de laquelle la mise en place de l'opération de géothermie n'est pas rentable. Cette profondeur économique a été comparée à la profondeur de la nappe, lorsque celle-ci est dite « libre » ou la profondeur de l'aquifère superficiel, lorsque la nappe est dite « captive ».

Par rentabilité, il est entendu le fait que le coût global du MWh géothermique soit inférieur au coût global du MWh gaz.

La prise en compte de cette contrainte permet alors de définir un potentiel technico-économique, nécessairement plus faible que le potentiel technique.

L'ensemble de la méthode, permettant le calcul de la contrainte économique ainsi que la détermination du potentiel technico-économique est présentée en annexe 4.

4.4.4. Potentiel de production de froid

Il a été déduit du calcul du potentiel de production technico-économique, un potentiel de production de froid (en MWh), et ce, pour les mailles du tertiaire pour lesquelles les besoins de chaud peuvent être satisfaits par les aquifères. En effet, les possibilités de production de froid ont été prises en compte (et donc déterminées) dans les calculs de rentabilité économique (cf. annexe 4).

Pour les équipements ayant des besoins en froid, ces derniers seront dimensionnant. C'est-à-dire que la totalité de la puissance froide doit pouvoir être assurée par la PAC. Contrairement aux besoins en chaud qui peuvent être assurés par la PAC avec un appoint GN, ceux en froid ne peuvent être fournis qu'intégralement par la PAC, car le recours à un appoint (groupe frigorifique et tour aéroréfrigérante) requière un montant d'investissement élevé, qui pénalise significativement le coût du MWh géothermique.

Les différentes hypothèses concernant les relations entre les puissances en chaud et en froid, ainsi que les modalités de calculs du potentiel de production de froid, figurent en annexe 4.

4.5. RÉSULTATS DU CALCUL DE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT GÉOTHERMIQUE

4.5.1. Résultats : Potentiel des aquifères superficiels

Pour la production de chaud

Les différentes valeurs de potentiel obtenues pour les aquifères sont les suivantes, et ce en fonction du scénario étudié :

	Potentiel technique		Potentiel technico-économique	
	en MWh	en tep	en MWh	en tep
2005	22 415 903	1 927 768	14 389 721	1 237 516
2020	66 430 286	5 713 005	37 029 822	3 184 565
2020_accessible	37 203 428	3 199 495	22 292 700	1 917 172

Ces résultats sont comparés aux consommations accessibles à la géothermie (telles que définies dans les paragraphes précédents). Le tableau ci-dessous présente donc les rapports entre potentiels et consommations :

Scénario de consommation	Taux de couverture technique (%)	Taux de couverture technico-économique (%)
2005	44	28
2020	27	15
2020_accessible	48	29

Pour la production de froid

Le potentiel pour la production de froid est calculé à partir du potentiel pour la production de chaud sur aquifères superficiels, lorsqu'il existe pour les consommations du tertiaire.

Les résultats, en fonction des différents scénarios de consommation en surface, sont les suivants :

Scénario de consommation	Potentiel pour la production de froid (en MWh)
2005	825 133
2020	3 302 816
2020_accessible	1 498 523

Bilan énergétique et climatique

Le bilan énergétique et climatique se déduit de la valeur de potentiel¹³ :

Coefficients multiplicatifs	Ensemble des cas
Tep substituées	1
Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	3,42
Tonnes de CO ₂ évité /an	1,82

Tableau 9 - Hypothèses de calcul du bilan énergétique et climatique.

On obtient ainsi les valeurs suivantes pour le potentiel technico-économique :

Scénario de consommation	Potentiel (en MWh)	tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
2005	14 389 721	1 237 516	4 232 305	2 252 279
2020	37 029 822	3 184 565	10 891 211	5 795 908
2020_accessible	22 292 700	1 917 172	6 556 729	3 489 253

4.5.2. Résultats cartographiés à l'échelle de la commune

L'ensemble des résultats sont restitués à l'échelle de la commune et ce à l'aide de trois valeurs pour les communes :

- potentiel technique et technico-économique de la commune en termes de MWh substitués, qui correspond à la somme des valeurs de potentiel par maille (somme des énergies substituables à la commune) ;
- ratio de la consommation totale géothermisable, ou pourcentage des besoins pouvant être couverts par la géothermie sur aquifères superficiel. Il correspond au rapport du potentiel de

¹³ Ces valeurs de ratios sont présentées en annexe 4.

la commune divisé par la somme des besoins de la commune (ou « taux de couverture » à l'échelle de la commune).

La valeur absolue permet de rendre compte de l'énergie pouvant être substituée par la géothermie. Celle-ci dépend :

- des besoins de la commune : une commune ayant de forts besoins va donc avoir potentiellement un potentiel en valeur absolu plus fort ;
- des ressources disponibles, et de leurs conditions d'accès (contraintes) : Deux communes ayant de forts besoins mais de très faibles ressources peut avoir un potentiel de développement à une commune avec des besoins plus faibles mais qui pourraient être satisfaits par la géothermie (ce que l'on appelle alors une bonne ressource pour la commune). La différence entre ces deux communes va donc s'apprécier à l'aide du ratio.

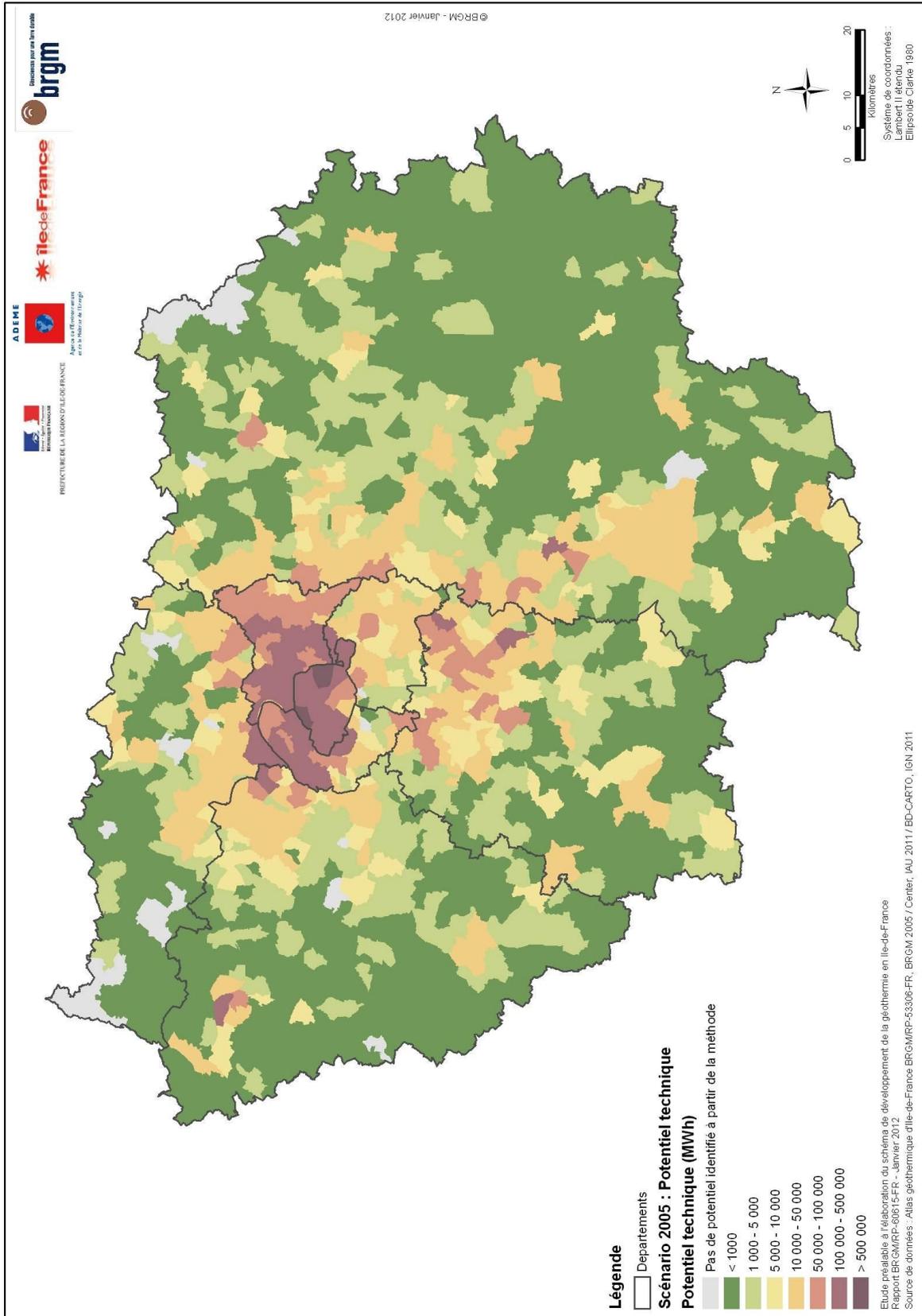


Figure 25 - Cartographie du potentiel technique des aquifères superficiels : Scénario 2005.

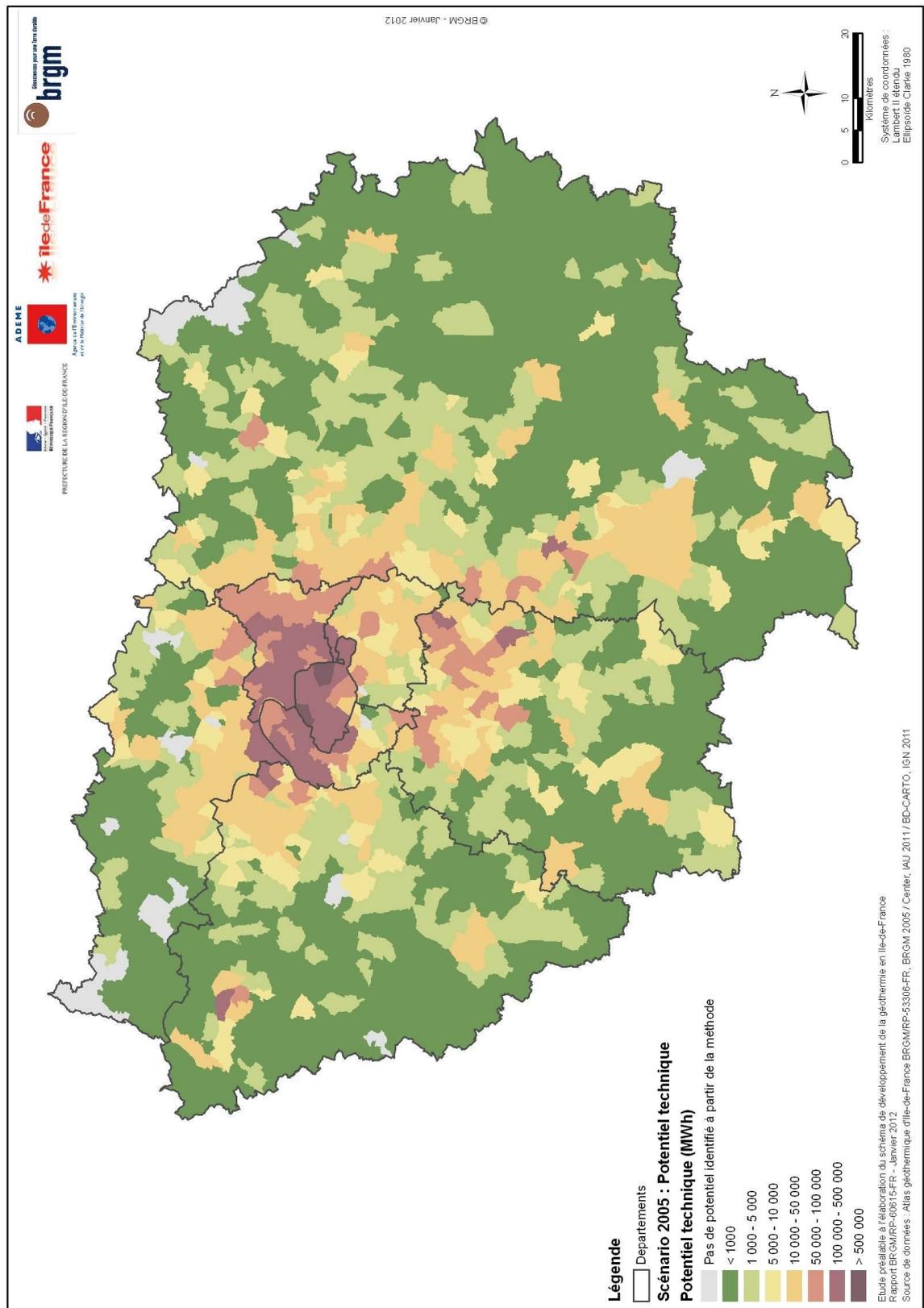


Figure 26 - Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (valeurs absolues) : Scénario 2005.

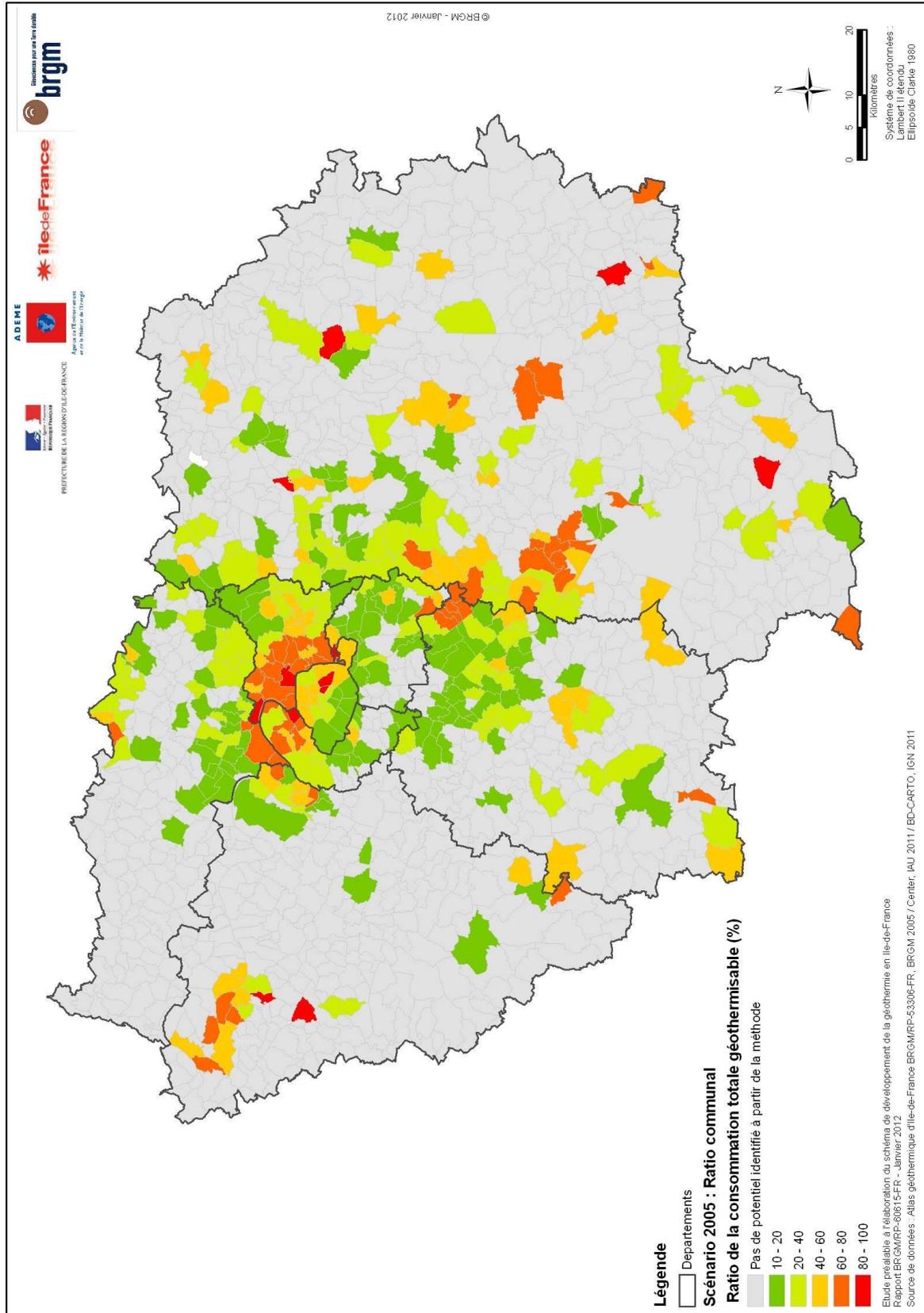


Figure 27 - Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (en pourcentage) : Scénario 2005.

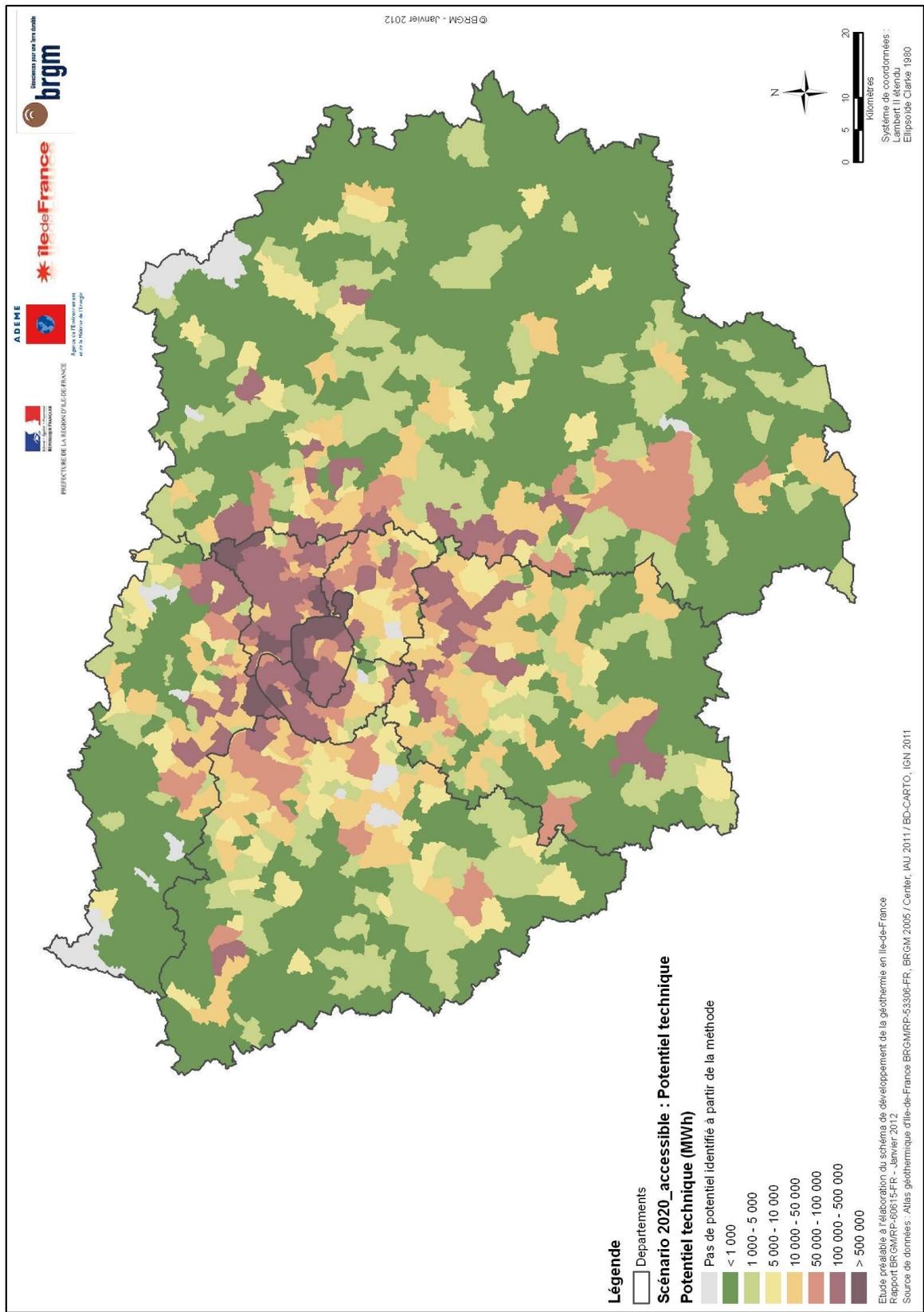


Figure 28 - Cartographie du potentiel technique des aquifères superficiels : Scénario 2020_accessible.

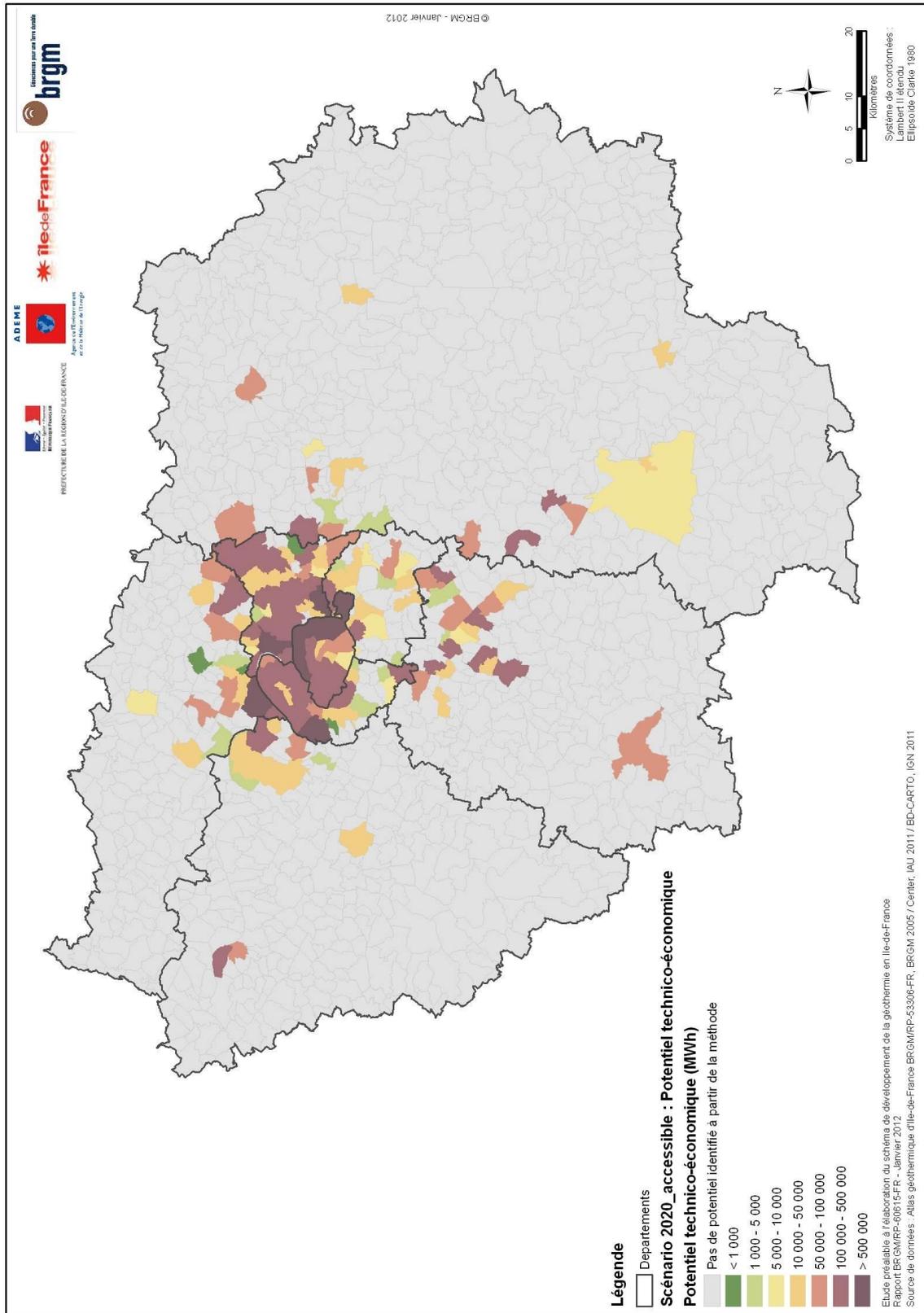


Figure 29 - Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (valeurs absolues) : Scénario 2020_accessible.

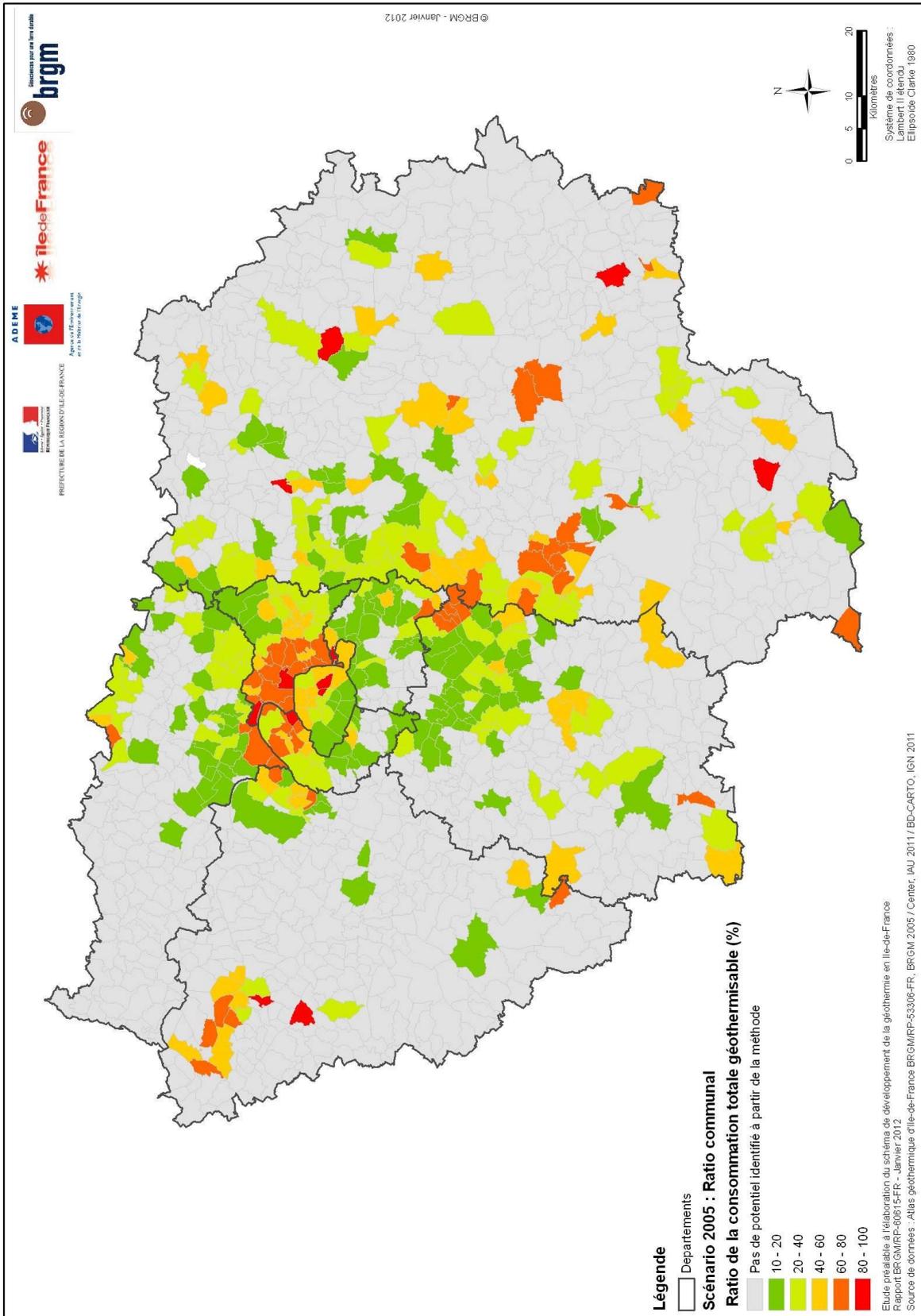


Figure 30 - Cartographie du potentiel technico-économique des aquifères superficiels (en pourcentage) : Scénario 2020_accessible.

5. Détermination du potentiel de développement sur sondes géothermiques verticales

5.1. MÉTHODE

5.1.1. Généralités

La ressource n'est pas le facteur limitant pour le développement d'opérations sur échangeurs fermés comme les sondes géothermiques verticales (SGV), le nombre de sondes étant déterminé en fonction des besoins énergétiques. Cette démarche est différente du dimensionnement de solutions sur aquifères superficiels : en effet, l'aquifère a un débit fixé, et donc une puissance de production qui doit être adaptée aux besoins en surface. Ainsi, la contrainte majeure d'implantation des SGV (hors considérations économiques) est la surface disponible de terrain pour l'implantation du forage. De plus, certains contextes géologiques sont peu favorables¹⁴ au développement de SGV, comme les terrains présentant une forte hétérogénéité, les zones structurales intensément fissurées, faillées ou bréchifiées, ou encore les zones présentant des cavités naturelles comme les karsts ou des cavités anthropiques. En effet, dans ces types de terrain, la mise en œuvre de la cimentation du forage présentera d'importantes difficultés et il sera difficile d'obtenir un scellement des sondes efficace et conforme à la norme.

De plus, des précautions particulières et le recours à l'avis d'un expert du sous-sol (géologue, hydrogéologue) sont vivement recommandés dans les zones où l'on rencontre des roches présentant des risques de dissolution (évaaporites) ou de retrait-gonflement (argiles).

5.1.2. Détermination du potentiel de développement dans le cadre de cette étude

Dans le cadre de cette étude, le potentiel des sondes géothermiques verticales se déduit de l'étude du potentiel des aquifères superficiels car ils ciblent tous deux les consommations énergétiques en surface. Il a été considéré¹⁵ que le potentiel des SGV serait calculé où le potentiel sur aquifère superficiel est limité. Le potentiel sur SGV est lui-même limité par la prise en contraintes techniques et réglementaires

Contraintes techniques et réglementaires

Les contraintes considérées dans cette étude sont identiques à celles prises en compte pour les forages sur aquifères superficiels. Il existe en effet les mêmes contraintes techniques que celles identifiées pour tous types de forages (mais qui ne sont pas cartographiables à cette échelle).

Espace disponible en surface et calcul du potentiel

L'espace disponible en surface a été calculé à partir de la BD-Topo © de l'IGN (Institut Géographique National). Il s'agit de la surface non bâtie, sans routes ni voies de chemin de fer.

¹⁴ Cf. Norme NF X 10-970 « Forage d'eau et de géothermie Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé), Réalisation, mise en œuvre, entretien, abandon ».

¹⁵ Hypothèse prise dans le cadre de cette étude, ne préjugant pas des orientations à prendre par ailleurs dans le choix entre solution sur aquifère superficiel ou sur SGV.



Figure 31 - Illustration présentant la surface disponible calculée par maille à partir de la BD-TOPO de l'IGN.

La surface disponible a été calculée pour chaque maille (maillage identique à l'exercice mené sur les aquifères superficiels) pour toute la région. La mise en place d'une SGV ou d'un champ de sonde nécessite toutefois que ces espaces libres soient suffisamment regroupés (par exemple, pour l'installation de plusieurs SVG, le passage du matériel de forage...). La surface accessible à la géothermie a donc été déduite de la surface disponible et a été déterminée comme suit :

- pour la zone Paris et Proche Couronne, au vu de la densité urbaine, il a été considéré que 50 % de la surface disponible pouvait être accessible à la géothermie ;
- pour les départements de la grande Couronne, une hypothèse de 80 % de la surface disponible a été appliquée pour déterminer la surface accessible ;
- un seuil de 12 500 m² correspondant à 20 % de la surface de la maille a été appliqué) en dessous duquel le potentiel n'est pas calculé.

La puissance fournie par la SGV pour la surface disponible considérée a été calculée à partir des hypothèses suivantes :

- les SGV font 100 m de profondeur ;
- une SGV de 100 m fournit 5 kW ;
- les SGV sont espacées tous les 10 m (une SGV pour 100 m²).

Cette puissance a été comparée aux besoins en puissance des bâtiments en surface (tels que définis dans la méthode de croisement appliquée aux aquifères superficiels).

Le potentiel des SGV en Île-de-France a été calculé dans le cas où le taux d'adéquation technique (défini pour le calcul du potentiel des aquifères superficiels) est inférieur à 10 %. Ce cas correspond au code 6 de la codification du potentiel technique.

Le potentiel correspond ainsi :

- aux besoins thermiques de la maille, lorsque la puissance disponible pour les SGV est supérieure à la puissance nécessaire en surface ;
- à l'énergie fournie par les sondes géothermiques verticales, dans le cas contraire.

5.2. RÉSULTATS

Les résultats de potentiel de développement sur sondes géothermiques verticales sont les suivants :

Scénario de consommation	Potentiel pour les SGV (en MWh)
2005	151 921
2020	1 143 487
2020_accessible	428 138

Les gains énergétiques et climatiques sont calculés de la même manière que ceux des solutions sur aquifères superficiels. On obtient alors le bilan suivant :

Scénario de consommation	Potentiel pour le développement des SGV (en MWh)	tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
2005	151 921	13 065	44 683	23 779
2020	1 143 487	98 340	336 322	178 979
2020_accessible	428 138	36 820	125 924	67 012

6. Détermination du potentiel de développement des réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur sont un vecteur important pour la distribution de la chaleur géothermale. Le Grenelle de l'Environnement a fixé des objectifs ambitieux de développement de réseaux de chaleur mais également de conversion de ces derniers alimentés en énergie fossile en réseaux de chaleur alimentés en grande partie par de la chaleur renouvelable.

Le potentiel de développement des réseaux de chaleur géothermiques en Île-de-France peut se faire en :

- maintenant, densifiant et étendant les réseaux de chaleur géothermiques existants ;
- « géothermisant » les réseaux de chaleur existants alimentés par des énergies fossiles (c'est-à-dire en substituant la source d'énergie fossile par de l'énergie géothermique) ;
- créant de nouveaux réseaux de chaleur.

Ces trois possibilités sont étudiées dans le cadre de cette étude.

6.1. POTENTIEL D'EXTENSION DES RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES EXISTANTS

6.1.1. Préambule

L'extension des 29 réseaux de chaleur existants dépend des facteurs suivants.

De la puissance géothermique encore disponible

Il faut vérifier que les réseaux ne soient pas « saturés géothermiquement », c'est-à-dire que toute extension se traduira par une valorisation d'énergie géothermale complémentaire, donc un gain énergétique et climatique.

Le suivi du taux de valorisation (TV) de la ressource est un ratio qui permet de juger de cette disponibilité. Celui-ci est calculé comme suit :

- $TV_{\text{chauffage}} = \text{Apport géothermie} / \text{Puissance géothermie } (-7\text{ °C}) * 210 \text{ jours} * 24 \text{ h}$;
- la moyenne pour les 29 réseaux est de 59 % (dispersion : 37 à 74 %) ;
- $TV_{\text{chauffage} + \text{ECS}} = \text{Apport géothermie} / \text{Puissance géothermie } (-7\text{ °C}) * 365 \text{ jours} * 24 \text{ h}$;
- la moyenne pour les 29 réseaux est de 32 % (dispersion : 21 à 43 %).

On constate donc qu'il y a une possibilité significative de raccordements complémentaires (environ plus du double de la situation actuelle) générant des gains.

De la rentabilité marginale du raccordement

Actuellement, l'on peut considérer qu'un raccordement peut se concevoir comme rentable si le ratio besoin complémentaire raccordé rapporté à la distance au réseau est au minimum égal à 1,5 MWh / mètre linéaire de réseau.

On peut admettre qu'au vu de l'augmentation du coût des énergies de référence (GN essentiellement), ce ratio va diminuer annuellement, et par voie de conséquence, les extensions annuelles observées (nombre d'équivalents-logements) sur la période 1999-2009 pourraient être réalisables jusqu'en 2020.

6.1.2. Potentiel géothermique à l'horizon 2020

Hypothèses de calcul

Elles sont extraites des données CENTER.

Le scénario pour 2020_S2, dit volontariste :

- prise en compte du Grenelle de l'Environnement ;
- application successives des réglementations RT 2005 et RT 2020 ;
- hypothèses volontaristes de réhabilitation du parc existant.

Parc de logements franciliens :

- en 2005 : 4 871 000 ;
- en 2020 : 5 562 000, soit une augmentation voisine de 14 % par rapport à 2005 ;
- en 2030 : 6 011 000, soit une augmentation voisine de 8 % par rapport à 2020 et de 23 % par rapport à 2005.

Sur ces bases, l'évolution du parc des logements est le suivant :

- constructions neuves : hors renouvellement, le rythme de construction de nouveaux logements est de 46 000 logements par an en Île-de France entre 2006 et 2030 ;
- pour un parc francilien de 4 871 000 logements en 2005, le taux annuel de construction de logements neufs est donc de 0,9 % ;
- renouvellements (destruction / reconstruction) : annuellement, le nombre de logements neufs relatif au renouvellement est de 9 300 logements, ce qui correspond à un taux de 0,2 % annuel.

Évolution de la réglementation – Consommation des logements

Consommations des logements neufs (données CENTER) :

- de 2009 à 2015 (RT 2005) : 130 kWh/m².an ;
- à partir de 2016 (RT 2012) : 90 kWh/m².an, soit un écart voisin de 30 %.

Dans le reste de ce chapitre, il sera pris les périodes CENTER concernant les logements comme mise en application de ces normes, ainsi que leurs consommations car ces derniers sont majoritairement présents dans les raccordements.

Consommations observées lors des enquêtes :

Pour un rendement moyen annuel des générateurs des réseaux de chaleur de 84 %, la consommation en énergie primaire d'un équivalent logement (surface de 60 m² – valeur CENTER) est de :

- en 1999 : 248 kWh_{ep} /m².an ;
- en 2009 : 228 kWh_{ep} / m².an, ce qui correspond à une diminution d'environ 8 %.

Situation en 2020

Parc des logements neufs en 2020 :

Nombre de logements neufs (constructions depuis 2009) :

- RT 2005 (2009 à 2015) : 46 000 * 6 = 276 000 logements, soit 4,6 % du total des logements en 2020 ;
- RT 2012 (2016 à 2020) : 46 000 * 4 = 184 000 logements, soit 3,1 % du total des logements en 2020 ;
- logements renouvelés (2009 à 2020) : 9 300 * 10 = 93 000 logements, soit 1,5 % du total des logements en 2020.

Courbe de tendance des extensions – Chaleur délivrée aux abonnés :

Le graphe présenté ci-dessous traduit l'évolution des raccordements observée lors des deux enquêtes réalisées :

- en 1999 : 1 582 GWh distribués en sous station ;
- en 2009 : 1 857 GWh distribués en sous station, ce qui correspond à une augmentation de 17,4 % ;
- tendance à l'horizon 2020 : 2 159 GWh délivrés en sous stations ;
- soit une augmentation de 16,3 % par rapport à l'année 2009.

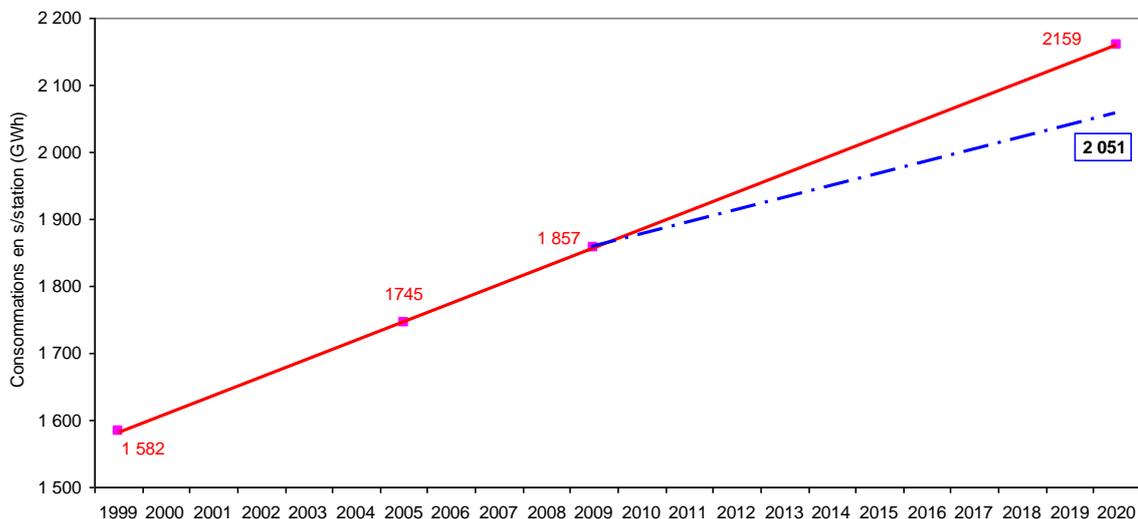


Figure 32 - Évolution des raccordements des réseaux géothermiques d'ici 2020.

Les nouvelles normes de construction des logements neufs et renouvelés ont pour conséquence une inflexion de cette courbe de tendance. Il est considéré que sur la période 2009-2020, les consommations des logements renouvelés étaient identiques à celles des logements neufs (RT 2005), soit 130 kWh/m².an.

Sur ces bases, la diminution de chaleur livrée aux abonnés en 2020 peut être estimée comme suit :

$$1 - \frac{228 * (1 - (0,046 + 0,031 + 0,015)) + 130 * (0,046 + 0,015) + 90 * 0,031}{228} = 5\%$$

ce qui correspond à une livraison de $2\,159 * 0,95 = 2\,051$ GWh en 2020 (soit une augmentation de 10,5 % par rapport à 2009).

Bilan énergétique et climatique

Au vu des évolutions du taux de couverture géothermique observé, sur la période 1999 à 2009, pour les opérations non pourvues de cogénération (augmentation de 7 %), et en considérant que le nombre de cogénération n'augmentera pas, en 2020, le taux de couverture géothermique devrait être proche de **60 %** (plus 5 % par rapport à 2009). Sur ces bases, la substitution d'énergie, en 2020, est de¹⁶ :

$$(2\,051 * 0,60) * 0,86 / (0,84 * 0,93) * 10 = 135\,473 \text{ tep} \sim \mathbf{135\,500 \text{ tep}}$$

(soit 40 900 tep supplémentaires par rapport à 2009.)

En ce qui concerne le gain en énergie primaire, il se monte en 2020 à :

$$2\,051 * 0,81^{17} = 1\,660 \text{ GWh}_{ep},$$

soit une augmentation de 156 GWh_{ep} par rapport à 2009.

$$\text{Quantité de CO}_2 \text{ évité / an} = 0,6 * \frac{\left[\frac{2051 * 206}{0,84 * 0,93} - \frac{2051 * 180}{0,93 * 20} \right]}{1000} = 312\,600 \text{ tonnes}$$

6.2. « GÉOTHERMISATION » DES RÉSEAUX DE CHALEUR EXISTANTS

6.2.1. Méthodologie

Les caractéristiques techniques (diamètre départ réseau, T départ et retour...), éléments, entre autres, déterminants permettant de juger de la faisabilité du déclassement des réseaux alimentés par de l'eau surchauffée¹⁸, n'étant pas disponibles au moment de la réalisation de cette partie de l'étude, ce potentiel de réseaux « géothermisables » a été déterminé à partir d'une méthodologie de classement des réseaux effectuée à partir de critères de faisabilité géothermique.

Cet exercice a été réalisé, en collaboration avec la DRIEE, à partir de la liste des réseaux qu'elle a recensée (une centaine au total) et de leurs caractéristiques. Dans la mesure du possible, ces dernières, qui figuraient dans l'étude « Relance de la géothermie en Île-de-France » (commanditée par l'ADEME en 2004 – réalisée par BRGM / SERMET / VALOR Consultants) ont été actualisées.

¹⁶ Rendement moyen annuel des générateurs des réseaux de chaleur : 84 %. Rendement moyen de distribution des réseaux : 93 %. COP moyen = 20 (MWh utiles Gth / MWh électrique).

¹⁷ Rapport des GWh_{ep} sur les MWh livrés en sous-station, en 2009.

¹⁸ Le déclassement d'un réseau consiste à effectuer des travaux (sur le réseau et en sous station) de manière à pouvoir utiliser comme fluide caloporteur de l'eau chaude (température <110 °C) en lieu et place d'eau surchauffée. Le seul réseau vapeur francilien est celui de la CPCU (non adaptable à la BT).

Pour mener à bien ce travail de classement, il a été considéré :

- que les réseaux situés sur des zones non productives du Dogger étaient exclus ;
- que les réseaux délivrant moins de 40 000 MWh n'étaient pas pris en compte, pour cause de non rentabilité ;
- que la part des émetteurs « basse température » BT (planchers chauffants) et celle des émetteurs « haute température » HT (radiateurs), actuelle était celle de l'étude 2004 ;
- que les bilans énergétiques et climatiques étaient établis, d'une part, sur la base d'un taux de couverture géothermique moyen, d'autre part à partir de la répartition de la nature des énergies alimentant le réseau, actualisée par la DRIEE.

La prise en compte des deux premières contraintes n'a conduit à étudier et classer, au final, qu'une vingtaine de réseaux.

6.2.2. Classement d'intérêt des opérations « géothermisables »

Il a été opéré à l'aide des critères suivants :

• Critère 1 : Taille du réseau de chaleur

Elle est caractérisée par le nombre d'équivalent-logements. Une taille suffisante est nécessaire pour amortir les investissements capitalistiques spécifiques d'une opération géothermique. *Le critère suivi est le nombre d'équivalent-logements.*

• Critère 2 : Épuisement thermique de la ressource (chauffage)

Les émetteurs « basse température » (panneaux de sol) sont mieux adaptés à l'utilisation d'une ressource géothermique que les émetteurs « haute température » (radiateur).

Le critère suivi est le nombre d'équivalent-logements chauffés par des émetteurs « basse température », en règle générale dans le cas présent, des panneaux de sol.

• Critère 3 : Épuisement thermique de la ressource (ECS)

Une production centralisée de l'eau chaude sanitaire (ECS) permet d'épuiser thermiquement, hors saison de chauffe, la ressource géothermique, en règle générale sans investissements importants. *Le critère suivi est le nombre d'équivalent-logements dont la production d'ECS est centralisée.*

• Critère 4 : Épuisement thermique de la ressource / coût des réseaux de surface

La présence d'un réseau de chaleur basse température est favorable. *A contrario*, celle d'un réseau d'eau surchauffée est en règle générale très pénalisante. Le fonctionnement d'une installation de cogénération avec récupération de chaleur obère (sauf étude particulière) la faisabilité d'une opération de géothermie (utilisation en base sur la courbe monotone des besoins thermiques de cette récupération).

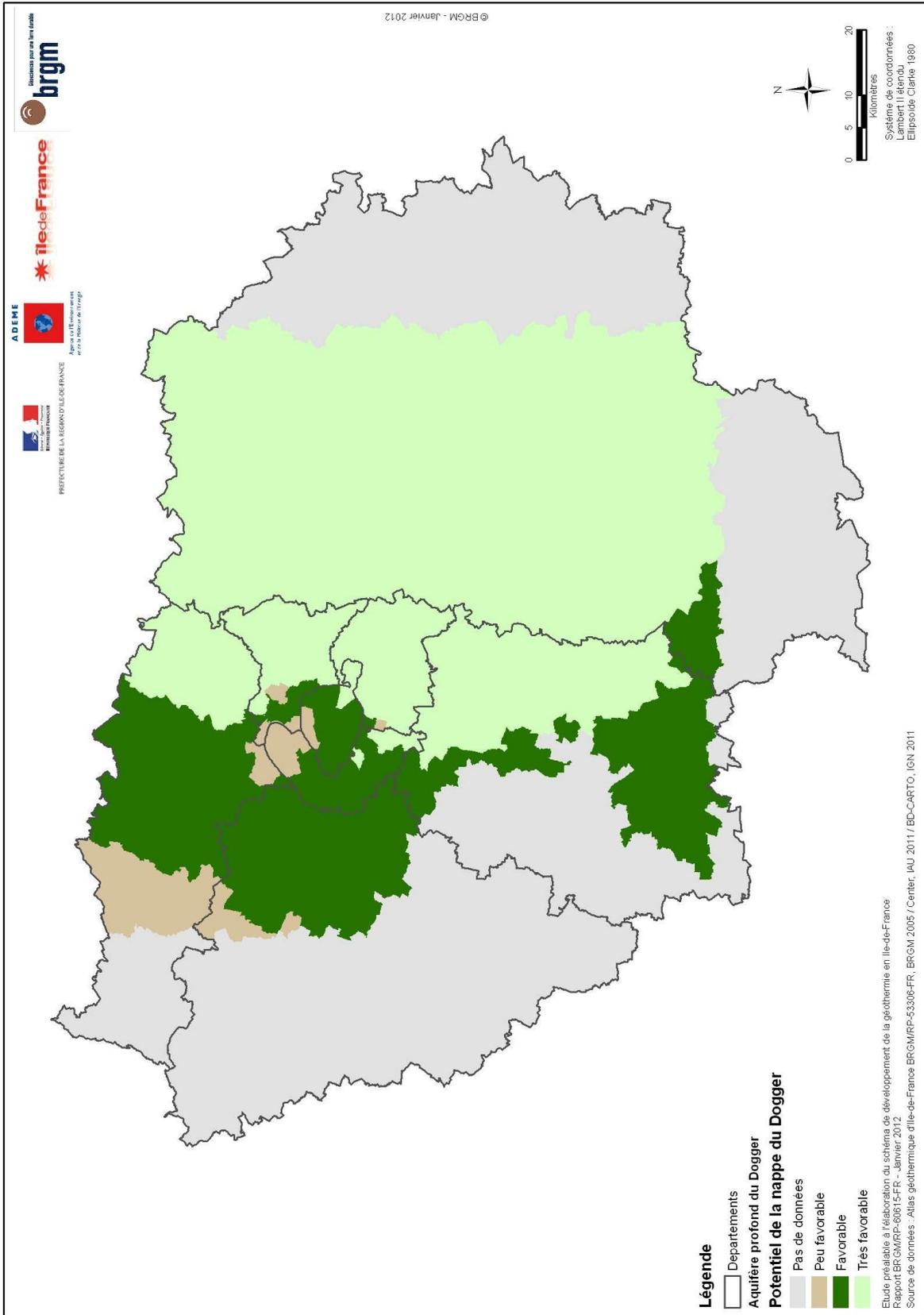


Figure 33 - Carte des zones favorables aux opérations au Dogger.

• Critère 5 : Ressource géologique

La carte de l'exploitabilité du Dogger en Île-de-France, en se ramenant à une valeur moyenne par commune, est présentée ci-contre. Les zones plus ou moins favorables ont été établies suite à une analyse combinant les critères de température (directement liées à la profondeur) et de transmissivité (combinaison de la perméabilité et de l'épaisseur utile) du Dogger¹⁹. Les autres paramètres, comme la salinité, masse volumique du fluide ou pression de réservoir ayant été considérés comme moins discriminants.

Ainsi, dans le cadre de cette analyse, ce sont en grande majorité les zones très favorables qui ont été retenues pour la sélection des réseaux « géothermisables ».

- Le critère « coût des énergies substituables » n'a pas été pris en compte.

Dans l'ensemble, la plupart des réseaux sont alimentés par des chaufferies fonctionnant au gaz naturel et la tendance demeure à la conversion au GN. La géothermie se substituera donc, à moyen terme, à du GN.

Une cotation globale puis un classement des opérations géothermiques potentielles ont été opérés comme suit :

- chacun des cinq premiers critères est coté (C_i), selon son positionnement, par rapport à des classes de valeurs (critères : taille, émetteurs BT, ECS collective), et des caractéristiques (critères : ressource géologique, réseau de chaleur) prédéfinies ;
- l'importance de ces critères, en matière de faisabilité géothermique, est caractérisée, en outre, par un coefficient de pondération (P_i), ce qui conduit à la détermination d'une cotation pondérée : $C_i * P_i$;
- la cotation globale de l'opération, à partir de laquelle le classement est opéré est égale à la somme des cinq cotations pondérées.

Cette méthodologie permet d'établir un tableau d'Analyse Multicritères et le tableau ci-dessous résume les hypothèses qui ont été prises en compte, en première approche, pour opérer le classement des opérations.

cotations		-3	-2	0	1	2	3	4	5	coefficient de pondération
critères	Taille du réseau			3 500	4 000	5 500	6 000	6 500		6
	Émetteurs Basse température			1	1 000	2 000	3 000	4 000		5
	ECS collective				1 000	2 000	3 000	4 000		5
	Ressource géothermale			pas de ressource	faible	moyenne	bonne	très bonne		7
	Réseau de chaleur	Cogé.	HT				BT			6

¹⁹ Adapté du rapport BRGM/ R-30169-FR (Novembre 1989) et établi dans le cadre du travail « Relance de la géothermie en Île-de-France » et mis en ligne sur www.géothermie-perspectives.fr.

Les différentes cotations, ainsi que le classement des réseaux géothermisables, figurent sur le tableau d'analyse multicritères de la page suivante.

D'autres critères ont été pris en compte :

• **critères d'exclusion du réseau :**

- la nature des énergies substituées. La géothermie ne doit substituer que des hydrocarbures. Il en résulte qu'elle ne doit pas être, entre autre, en concurrence avec la chaleur issue des UIOM (réseau de Vitry sur Seine, Massy, Sarcelles, Argenteuil...), et des installations biomasse²⁰. Les réseaux de Montereau-Fault-Yonne, Saint-Denis/Stains, Roissy-en-France (ADP), et Franconville (Sannois – Ermont), où des projets biomasse sont envisagés ont été exclus du classement ;
- l'alimentation par de la chaleur issue d'une cogénération extérieure (cas de Bobigny) ;

• **critères évolutifs des réseaux :**

- les possibilités d'extension connues, à très court termes, du réseau, donc des besoins à fournir. Par exemple : Corbeil (19 à 40 GWh – 1,6 km de réseau en plus).

Enfin, l'interaction au niveau de la ressource (« bulles froides » créées par les opérations en fonctionnement) devra être étudiée. En effet, l'influence éventuelle des opérations géothermiques existantes avoisinantes (ou bien celles où le réseau de chaleur est à créer) sera un des éléments clef concernant la faisabilité de l'opération.

La prise en compte des différents éléments exposés ci-avant a conduit à classer douze réseaux, comme suit.

Pour certains réseaux les données relatives à la nature des émetteurs et le type de production de l'ECS ne sont pas connus (cases grisées). Ils ont été néanmoins notés sur la base d'une estimation minimaliste.

N° d'ordre	Départements	Opérations	Coefficient de pondération					Cotati. globale
			Taille	Emetteurs	ECS	Réseau	Ressource	
1	91	Grigny (Grande Borne)	2	1	4	3	3	76
2	92	Meudon-La-Forêt	6	5	5	-3	1	75
3	93	Bagnole (Malassis - Pierre Curie)	6	5	1	-2	3	75
4	91	Grigny (Grigny 2)	3	5	5	-3	3	71
5	93	Neuilly-sur-Marne (Fauvette et Centre)	3	1	5	-2	4	64
6	94	Ivry	2	0	1	3	4	63
7	77	Dammarie-les-Lys	3	0	5	-3	4	53
8	94	Fontenay sous-bois	6	0	1	-3	4	51
9	91	Saint-Michel-sur-Orge (Bois des Roches)	2	4	4	-2	1	47
10	91	Evry	6	0	1	-3	3	44
11	93	Villepinte (ZUP)	3	0	3	-3	3	36
12	91	Corbeil-Essonnes (Les Tarterêts)	1	1	1	-2	3	25

²⁰ Deux réseaux alimentés par de la biomasse : Bagnole et Fontenay-sous-Bois ont été classés, car l'apport de cette source d'énergie (respectivement 8 300 et 5 400 MWh) est faible ; ainsi la géothermie, dont la ressource est bonne, pourra être valorisée.

Il convient de noter :

- que ce classement a été opéré en supposant qu'une opération géothermique n'était réalisée que sur une même ville. L'expérience montre que les prochaines qui seraient réalisées, à l'instar du projet Arcueil / Gentilly, pourraient être intercommunales. L'intérêt de cette approche est de mutualiser les besoins thermiques en surface pour amortir les investissements capitalistiques spécifiques à ce type d'opération au Dogger. Le nombre de ce type d'exploitation sera à court terme limité, compte tenu des difficultés liées à la mise en place de la structure de maîtrise d'ouvrage ;
- que les différentes études de faisabilité qui seront réalisées permettront de valider les hypothèses prises sur certaines données (part des émetteurs BT et nature de la production de l'ECS), et par la même de déterminer la rentabilité effective des opérations géothermiques.

Les incertitudes observées sur certaines données et la prise en considération des éléments exposés ci avant, conduisent à considérer un potentiel « géothermisable » estimé aux **dix premiers réseaux**.

6.2.3. Bilan énergétique et climatique

Le bilan énergétique sera établi sur la base d'un taux moyen de couverture géothermique (valeurs extraites de l'enquête opérée sur les opérations de géothermie en 2011) égal à :

- pour les réseaux sans cogénération : 65 % ;
- pour les réseaux avec cogénération : 35 %

affecté aux consommations énergétiques des réseaux (rendement de production 84 % et de distribution 93 %, soit 78 % globalement).

Sur ces bases, en prenant en compte un potentiel correspondant aux 10 premières opérations du classement précédent et les données ayant pu être exploitées pour ces réseaux :

- la substitution est voisine de **35 000 tep**, ce qui représente environ **30 %** de celle correspondante aux 32 opérations de géothermiques actuellement en fonctionnement au Dogger²¹ ;
- le gain en énergie primaire est proche de **360 000 MWh_{ep}**, ce qui représente environ **20 %** de celle correspondante aux 32 opérations de géothermiques actuellement en fonctionnement au Dogger ;
- en ce qui concerne le bilan climatique, c'est environ **92 000 tonnes de CO₂** qui sont évitées annuellement, soit **26 %** du gain actuel observé sur les 32 opérations évoquées ci-avant.

6.3. CRÉATION DE NOUVEAUX RÉSEAUX DE CHALEUR GÉOTHERMIQUES

6.3.1. Définition du potentiel

Le potentiel de développement de nouveaux réseaux de chaleur géothermiques est déterminé par une analyse basée sur trois critères :

²¹ Prise en compte des opérations en service : ADP Orly, Val Maubuée et CPCU (prévue début 2012).

- prise en compte des zones de productivité très favorables du Dogger (cf. carte présentée dans les paragraphes précédents); la présence de « bulles froides » (issues de travaux du Centre Technique) est prise en compte dans certaines communes. Une température inférieure à 55 °C au centre de la commune rend le potentiel défavorable ;
- exclusion des villes possédant un réseau de chaleur géothermique existant ou potentiel (présentés ci-dessus) ;
- prise en compte des seules villes dont la consommation de la branche Résidentiel_étendu est supérieure à 50 000 MWh/an, et ce pour le scénario 2020_accessible que l'on peut considérer comme valeur limite de consommation pour assurer la rentabilité d'une nouvelle opération au Dogger.

La liste des réseaux de chaleur existants est tirée de l'étude menée sur les réseaux de chaleur franciliens dans le cadre de l'élaboration du SRCAE. 53 communes apparaissent comme favorables au développement de nouveaux réseaux de chaleur géothermiques.

On retrouve dans cette liste certains projets connus, comme réalisables à moyen termes, comme Bagneux, Drancy, Rosny-sous-Bois, Boissy-Saint-Léger ou encore Villejuif. L'opération « Village Nature » située sur les communes de Bailly-Romainvilliers, Coutevroult et Villeneuve-le-Comte, ainsi que le projet Arcueil/Gentilly n'apparaissent pas dans cette méthodologie car il n'a pas été étudié les possibilités de regrouper plusieurs communes. Pour certaines d'entre elles (Arcueil/Gentilly, Villejuif Nord) des études de faisabilité ont déjà été réalisées.

Remarque : La même analyse multi-critères est conduite à partir des données issues de l'étude SETEC²² pour la prise en compte de la densité énergétique des réseaux. Seules les villes dont la somme des consommations des mailles pour lequel le ratio de densité est supérieur à 1,5 MWh par mètre linéaire de réseau en 2005 ont été prises en compte. Les consommations prennent en compte l'ensemble des branches, pour les combustibles bois, pétrole et gaz, pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

Il en ressort un potentiel de 59 communes, dont 48 sont communes avec l'analyse menée sur le scénario 2020_accessible, sans prendre en compte de critères de densité.

Si le calcul est fait pour les mailles dont la densité est supérieure à 4,56 MWh/ml, alors le potentiel est de 49 communes, dont 40 en commun avec la méthode basée sur les consommations de 2020_accessible.

6.3.2. Bilan énergétique et climatique

Pour estimer le bilan énergétique et climatique de ces projets, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- nombre d'équivalent-logements par opération : 5 000 ;
- taux de couverture moyen géothermique : 70 % ;
- combustible substitué : GN ;
- rendement moyen annuel des générateurs GN : 85 % ;
- COP moyen des opérations de géothermie : $20 \frac{\text{MWh}_{\text{utiles géothermiques}}}{\text{MWh}_{\text{électrique}}}$.

²² Étude menée dans le cadre du SRCAE sur les réseaux de chaleur géothermiques

On obtient alors des valeurs moyennes par opération :

tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
3 500	38 500	8 200

Ce qui donne un potentiel pour les 53 réseaux :

Nombre d'opérations	tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
53	185 500	2 040 500	434 600

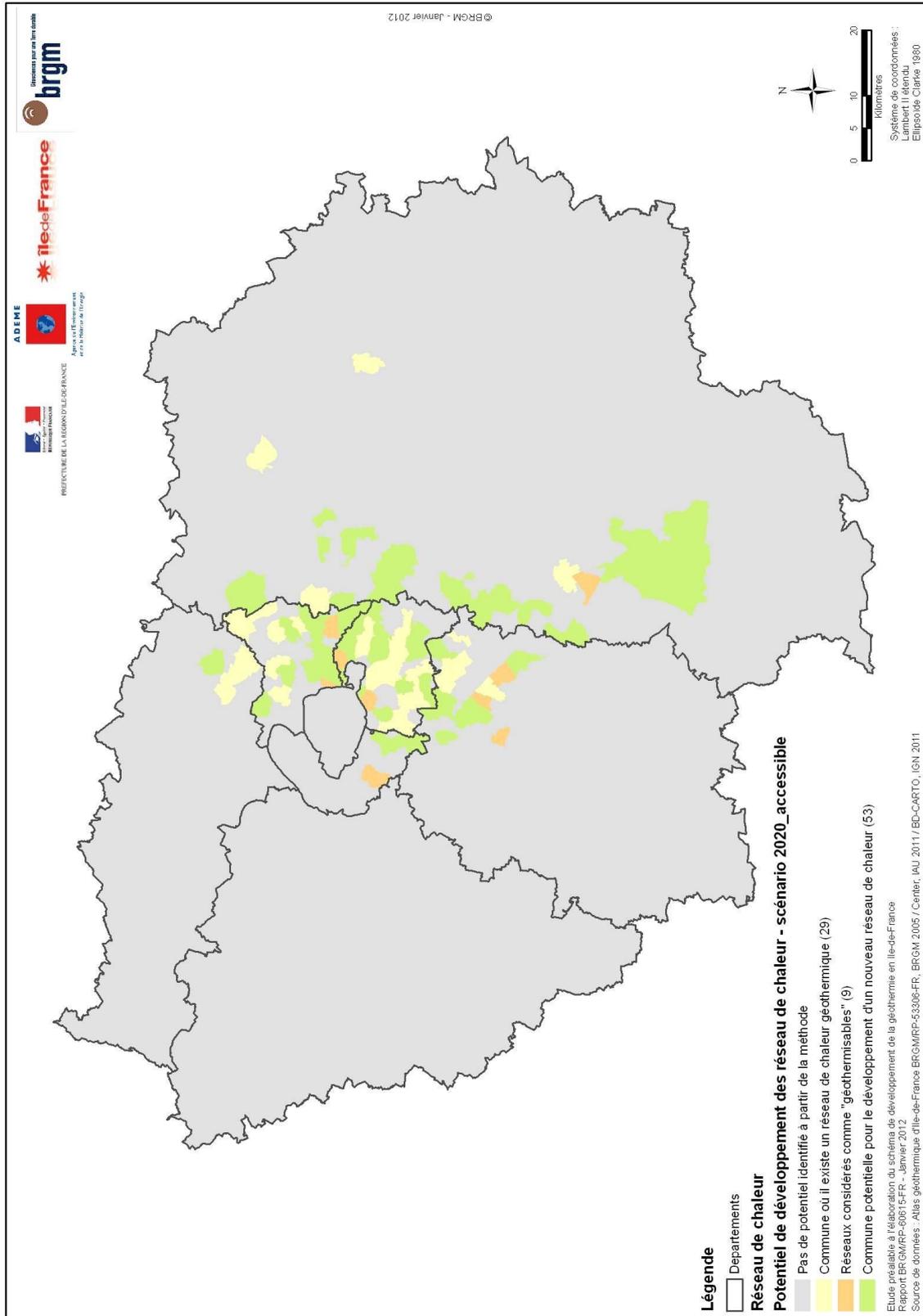


Figure 34 - Cartographies des communes favorables pour le développement de nouveaux réseaux de chaleur géothermiques.

7. Bilan du potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France

7.1. BILAN CHIFFRÉ

Il s'agit ici de faire la synthèse des résultats obtenus ci-dessus, en termes de bilan énergétique et climatique, en se basant sur le scénario 2020_accessible (consommations énergétiques en 2020 considérées comme accessibles à la géothermie).

Il s'agit alors d'un potentiel de valorisation complémentaire de géothermie :

	Année	Nombre d'opérations	tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	Aquifères superficiels		1 917 172	6 556 729	3 489 253
	Sondes géothermiques verticales		36 820	125 924	67 012
Opérations aux Dogger	Extension		37 247	84 410	82 969
	Géothermisation	10	35 000	360 000	92 000
	Création	53	185 500	2 040 500	434 600

Tableau 10 - Énergie géothermique par filière complémentaire valorisable entre 2010 et 2020.

Ces potentiels, qui ont été étudiés de manières distinctes à partir des mêmes besoins thermiques de surface, ne peuvent être cumulés.

Si l'on fait l'exercice en considérant qu'il n'y a pas d'opérations de PAC (ni sur aquifères superficiels ni sur champs de sondes) dans les communes pour lesquelles il existe un potentiel de développement de nouveaux réseaux de chaleur, on obtient les résultats suivants :

		Nombre d'opérations	tep substituées annuellement	Bilan en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	Aquifères superficiels		1 642 764	5 618 253	2 989 831
	Sondes géothermiques verticales		33 732	115 363	61 392
Opérations aux Dogger	Extension		37 247	84 410	82 969
	Géothermisation	10	35 000	360 000	92 000
	Création	53	185 500	2 040 500	434 600
Total			1 934 243	8 218 526	3 890 423

Tableau 11 - Énergie géothermique valorisable d'ici 2020.

Les communes pour lesquelles il existe déjà un réseau de chaleur sont conservées. En effet, les consommations thermiques liées au chauffage urbain (telles qu'elles ont été définies dans l'étude CENTER) n'ont pas été comptées pour l'étude du potentiel des aquifères superficiels.

Le tableau ci-dessus montre la part complémentaire que pourrait potentiellement apporter la géothermie en 2020 (basé sur le scénario optimiste de CENTER et sur les consommations accessibles à la géothermie).

Cela donnerait alors un bilan énergétique et climatique de la géothermie en 2020 de :

	tep substituées annuellement	Bilan en énergie primaire (MWhep)	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	1 682 057	5 768 820	3 057 642
Opérations sur les aquifères intermédiaires (Albien et Néocomien)	4 684	24 606	9 083
Opérations aux Dogger	356 000	4 060 500	839 200
Total	2 042 741	9 853 926	3 905 925

Tableau 12 - Production potentielle de la géothermie en 2020.

Cela équivaut à un potentiel de plus de 2,5 millions d'équivalent-logements.

7.2. COMMENTAIRES

Ces chiffres de potentiel sont particulièrement importants, et ce particulièrement pour les opérations très basse énergie comme le montre le graphique ci-dessous.

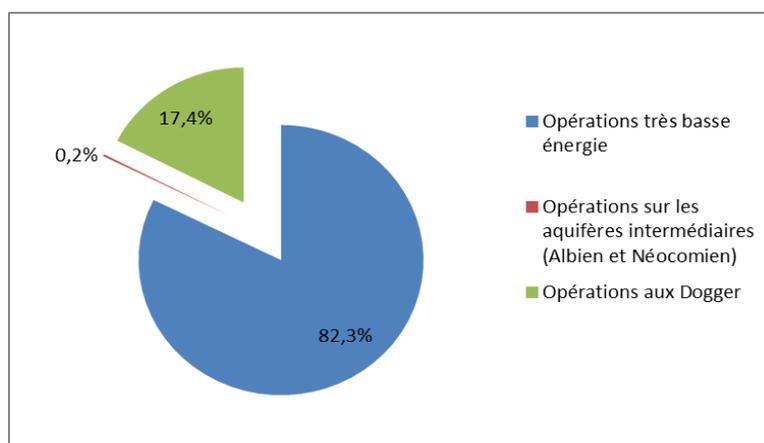


Figure 35 - Représentation graphique du potentiel de production de géothermie calculé pour 2020 (scénario 2020_accessible).

En effet, ces éléments de potentiel montrent la part que la géothermie pourrait couvrir en 2020, plus de 30 % des consommations définies comme étant accessibles à la géothermie.

Il est important de souligner quelques limites de l'exercice :

- Il est considéré dans cette approche que l'ensemble des bâtiments (si ce n'est ceux chauffés par l'électricité) pourraient être alimentés par géothermie. Il a été déterminé un scénario de consommations dites « accessibles à la géothermie ». Cependant, il existe des contraintes

en rénovation qui font que ces consommations seront plus ou moins accessibles. Certains freins sont présentés dans les propositions de plan d'action.

- Il existe des limites propres à la méthodologie d'étude du potentiel de développement sur aquifères superficiels définie dans le cadre de cette étude :
 - la méthode de calcul de développement sur aquifères superficiels présente des limites qui, en plus des hypothèses prises pour les calculs (valeurs de débit moyens, de coefficients de performance...), résident dans l'échelle de travail. En effet, le croisement des ressources et des besoins est basé sur une échelle de 250*250m. Il a été considéré une exploitation du débit sur ce périmètre (un doublet) et comparé à des consommations du résidentiel dit étendu et du tertiaire. Ainsi, lorsqu'il est considéré ici que la ressource était trop faible, les consommations en surface n'ont pas été décomposées plus finement. Inversement, lorsque la ressource couvrait largement les besoins, il n'a pas été étudié la possibilité de regrouper des consommations de différentes mailles ;
 - d'autres contraintes n'ont pas pu être prises en compte à l'échelle de travail de cette étude, comme les distances d'implantation des forages.
- Concernant l'exploitation du Dogger :
 - il est considéré que les exploitations actuelles sont maintenues (ce qui nécessitera des travaux sur les doublets). Sur ce point, de travaux sont en cours au BRGM afin de poursuivre la réflexion sur la gestion de cet aquifère et améliorer ces techniques d'exploitation ;
 - concernant le potentiel de développement de création de nouveaux réseaux de chaleur, il est à noter que les critères de développement pris en compte sont peu restrictifs : les deux critères sont nécessaires mais pas suffisant pour affirmer un développement potentiel de réseau de chaleur.

Par ailleurs, ces potentiels ne prennent en compte :

- ni les opérations sur aquifères « intermédiaires », tels que l'Albien et le Néocomien, ou plus profonds comme le Lusitanien, et le Trias, qui « entourent » le Dogger. Cela explique le pourcentage très faible des opérations sur aquifères intermédiaires présenté dans le graphique ci-dessus ;
- ni le potentiel sur pieux énergétiques (bien que celui-ci peut se confondre avec le potentiel sur champs de sondes) ou alors dans les aquifères superficiels

Enfin, les valeurs sont données à l'échelle de la commune, ce qui peut être des données intéressantes pour la construction de leur Plan Climat Énergie Territorial (PCET). Cependant, ces communes doivent garder en mémoire qu'il s'agit d'une méthode de calcul créée dans l'objectif de déterminer une valeur de potentiel à grande échelle (départementale, régionale), et non pas d'un outil déterminant le type d'opération géothermique à réaliser. Cette dernière approche nécessite, pour des équipements en surface identifiés, la réalisation d'une étude de faisabilité, voire localement, sur des zones où la géothermie pourrait être fortement sollicitée, d'un plan de gestion thermique des nappes

8. Le cas des PAC dans l'individuel

Les opérations dans l'individuel n'ont pas été prises en compte dans la détermination de ce potentiel. Il est en effet considéré que la ressource n'est en aucun cas le facteur limitant pour le développement d'opérations de PAC en maison individuelle. Il existe en effet différentes solutions, comme présentées en introduction.

Une approche statistique basée sur les objectifs fixés au niveau national est proposée dans le cadre de cette étude.

L'hypothèse faite est que toutes les régions ont un même pourcentage de pénétration des PAC géothermiques dans les maisons individuelles.

Il ne s'agit plus ici d'une valeur de potentiel mais d'un objectif.

Objectifs de développement des PAC dans les Maisons Individuelles Ile-de-France			
en France, en 2005	41 900	PAC au niveau français	(données AFPAC)
soit environ	0,27%	des maisons individuelles équipées	(données INSEE)
en Ile-de-France, en 2005	1365836	maisons individuelles	(données CENTER/ce qui équivaut environ à 5% du parc national)
dont	3666	équipées de PAC	si l'on fait l'hypothèse que ce ratio s'applique pour l'ensemble des régions)
L'objectif fixé par le Grenelle de l'Environnement est d'atteindre	600 000	PAC géothermiques	
soit une multiplication par	14	entre 2005 et 2020	
ce qui correspond à un objectif en 2020 pour la région Ile-de-France de	51331	PAC géothermiques	
ou encore	3%	des maisons individuelles franciliennes à l'horizon 2020	(données CENTER)
ou encore	24%	des nouvelles constructions	(données CENTER)

D'après les données de l'étude CENTER, près de 14 % des consommations pour le chauffage et l'Eau Chaude Sanitaire provient de l'électricité. *Ce ratio correspond à un ratio de consommations des consommations de l'étude CENTER pour les maisons individuelles*

Les tableaux ci-dessous indiquent pour une même maison : RT 2005 (Consommation chauffage et ECS de 20 MWh), et BBC (Consommation chauffage et ECS de 8 MWh), les bilans énergétiques et climatiques, ainsi que les gains des solutions PAC, par rapport aux solutions de référence GN et ELEC.

Les tableaux ci-dessous indiquent pour une même maison (avec des performances énergétiques RT2005 ou BBC) les bilans énergétiques et climatiques de la solution PAC par rapport aux solutions de référence GN et ELEC. Ces chiffres se basent sur les hypothèses ci-dessous :

Cas d'une maison RT 2005	unité	PAC	Solution tout électrique	Solution gaz naturel
Besoins utiles	kWh	20 000	20 000	20 000
COP / Rendement		3,5	1	0,9
Consommation				
Électricité	kWh	5 714	20 000	
Gaz	kWh			22 222
Énergie primaire	kWh _{ep}	14 743	51 600	22 222
Émissions liées à l'énergie	kg CO ₂ / an	1 029	3 600	4 556

Cas d'une maison BBC	unité	PAC	Solution tout électrique	Solution gaz naturel
Besoins utiles	kWh	8 000	8 000	8 000
COP / Rendement		3,5	1	0,9
Consommation				
Électricité	kWh	2286	8 000	
Gaz	kWh			8 889
Énergie primaire	kWh _{ep}	5897	20 640	8 889
Émissions liées à l'énergie	kg CO ₂ / an	411	1 440	1 822

On en déduit ainsi les gains de la solution PAC par rapport aux autres sources d'énergie :

	Tout électrique		GN	
	RT 2005	BBC	RT 2005	BBC
Tep substituées	0,00	0,00	1,91	0,76
Gain (MWh _{ep})	36,86	14,74	7,48	2,99
Tonnes CO ₂ évitées / an	2,57	1,03	3,53	1,41

Ainsi, on peut considérer le bilan énergétique et climatique suivant en 2005, en faisant l'hypothèse que 14 % des maisons individuelles sont alimentées par l'électricité et les autres par gaz naturel :

Bilan 2005	Nombre d'opérations		Tep substituées annuellement	Bilan en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
	tout électrique				
PAC dans le résidentiel individuel	tout électrique	513	0	18 919	1 320
	GN	3 153	6 026	23 583	11 121
	total	3 666	6 026	42 502	12 441

Pour le potentiel en 2020, on considère que l'ensemble des PAC sont installées dans des maisons de consommations de type BBC, en remplacement du gaz, afin d'être homogène avec la solution de référence prise dans le collectif. De plus, la nouvelle réglementation thermique (RT 2012) devrait fortement limiter la mise en place de solutions tout électrique.

Bilan 2020	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
PAC dans le résidentiel individuel	51 331	39 217	153 581	72 428

9. Propositions pour l'élaboration d'un plan d'action

9.1. LES SPÉCIFICITÉS DE L'ÎLE-DE-FRANCE

Comme cette étude le montre, la région Île-de-France possède de nouveaux atouts pour le développement de la géothermie.

9.1.1. D'un point de vue de la ressource géothermale

Les ressources aquifères sont importantes en Île-de-France, mais connues à des degrés divers :

- une présence connue d'aquifères superficiels. En effet, il peut exister jusque trois aquifères superposés, entre 0 et 100 m de profondeur, dans certaines zones, présentées sur la carte ci-dessous :

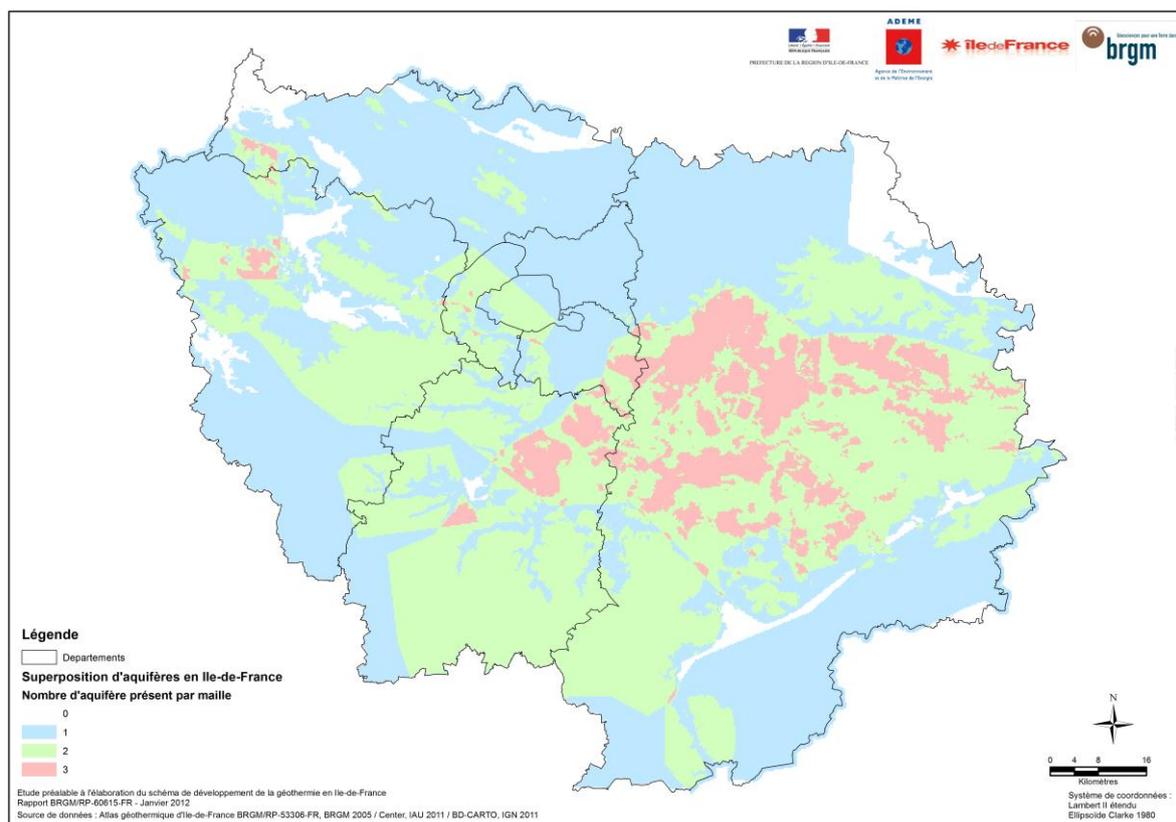


Figure 36 - Carte présentant la superposition des aquifères superficiels en Île-de-France.

Les données hydrogéologiques sur ces aquifères sont mises à disposition publique sur le site internet *géothermie-perspectives* par le biais de l'atlas des aquifères superficiels qui constitue un outil d'aide à la décision.

- Des aquifères intermédiaires et profonds disponibles pour s'adapter à des typologies de projet allant de 500 à plus de 5 000 équivalent-logements.

- Les conditions d'accès à la ressource, qu'elles soient aquifère ou non, sont également relativement bonnes (même s'il existe encore des études spécifiques à mener sur ce sujet pour mettre en avant des précautions pour les forages).

9.1.2. D'un point de vue des utilisateurs en surface

La région Île-de-France dispose :

- **des zones urbaines denses :**

- dans lesquelles il existe d'ores et déjà des réseaux de chaleur :
 - des réseaux de chaleur géothermiques existants sur lesquels le positionnement de PAC sur les retours permettrait un meilleur épuisement thermique de la ressource, avec une possibilité de raccordement supplémentaires d'utilisateurs,
 - des réseaux qui pourraient faire l'objet de substitution d'énergie ;
- qui des zones favorables pour le développement de nouveaux réseaux de chaleur ;
- avec des zones qui peuvent d'ores et déjà être sensibles : la géothermie n'émet pas de particules dans l'air ;
- avec des quartiers et bâtis historiques à protéger : la géothermie est un atout en milieu urbain (patrimoine historique).

- **des projets de développement importants, que ce soit :**

- des projets d'infrastructures : De grands projets sont en développement en Île-de-France, et notamment des projets avec besoins de chaleur et de rafraîchissement concomitants : ce sont les applications les plus adaptées à la géothermie très basse énergie. Elles concernent notamment les hypermarchés, hôpitaux, cliniques ou autres établissements de santé, certains immeubles de bureaux du secteur tertiaire, groupes sportifs alliant piscines et patinoires. La technologie de la thermo frigopompe, grâce à laquelle on peut distribuer le chaud et le froid sur deux réseaux distincts et simultanément, est adaptée à cette application. Les projets avec besoins saisonniers (besoin de chaleur en hiver et de rafraîchissement en été) sont également des applications très bien adaptées à la géothermie très basse énergie. C'est le cas d'immeubles et de certains bâtiments du tertiaire, comme les hôtels, maisons de retraite, immeubles de bureaux. Une valeur ajoutée supplémentaire milite pour l'usage de la géothermie très basse énergie dans le cas de besoins de rafraîchissement et de production d'eau chaude sanitaire en période estivale. Pour satisfaire des besoins de rafraîchissement avec une excellente efficacité énergétique, il est possible d'utiliser la capacité de refroidissement de l'aquifère, sans utiliser la PAC. C'est ce que l'on appelle le « free cooling » ;
- de nouveaux aménagements (ou écoquartiers) qui peuvent avoir recours à des solutions de micro réseaux de chaleur sur aquifères superficiels, avec différentes solutions possibles (PAC centralisée et distribution de chaleur, ou PAC décentralisées avec distribution d'eau « froide »).

9.2. LES ENJEUX DU DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE

Les atouts de la région Île-de-France se traduisent par un potentiel fort pour les filières de PAC dans le résidentiel collectif et le tertiaire, qu'il soit sur aquifère superficiel ou sur sondes, mais également par des possibilités de développement pour les réseaux de chaleur.

Cependant, face au développement potentiel, la filière devra se développer dans de bonnes conditions de durabilité, c'est-à-dire dans le respect de la ressource et des autres usages de cette ressource. Ce second enjeu passe par un encadrement réglementaire et normatif qui existe déjà mais qui devra évoluer et s'adapter aux technologies les plus couramment utilisées et à la quantité d'opérations attendue.

La matrice FFOM (Forces Faiblesses Opportunités et Menaces) ci-dessous présente les grands enjeux pour le développement de la géothermie :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> • Des techniques de base éprouvées • Des marchés déjà matures dans certains pays européens • Des performances énergétiques déjà très satisfaisantes • Des performances et coûts d'exploitation pouvant être garantis à long terme • Une large offre de composants • Une très longue durée de vie des composants enterrés • Une très bonne adaptabilité aux exigences des Réglementations Thermiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence d'image de marque • Absence de démonstrateurs pertinents • Manque d'acteurs économiques • Lacunes dans les filières de formation • Une grande diversité de solutions et variantes difficile à exposer aux clients • Méconnaissance des technologies chez les donneurs d'ordre • Des coûts d'investissement plus élevés que d'autres énergies renouvelables • Une ingénierie sous-employée et donc manquant de références
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> • Des possibilités d'adaptation aux divers contextes largement sous employées • Des technologies prêtes pour un plus large développement industriel • Un large potentiel de développement technologique sur l'ensemble du système • Un marché à créer de toute pièce 	<ul style="list-style-type: none"> • Des réalisations non professionnelles pourraient durablement décourager les maîtres d'ouvrages • Des solutions concurrentes moins performantes mais plus aisées à diffuser peuvent durablement bloquer l'essor

9.2.1. Retour d'expériences sur les opérations de PAC dans le collectif tertiaire

À l'issue des visites et analyses réalisées sur les opérations en fonctionnement, les conclusions qui se dégagent sont les suivantes.

Conception

La première étape de la conception doit être une analyse des besoins de chaud et de froid. On observe qu'ils sont très fréquemment surévalués, ce qui a deux conséquences importantes :

- un surdimensionnement de l'installation, ce qui génère un surcoût d'investissement inutile. Cet état de fait est accentué pour les opérations sur champ de sondes où l'optimisation du nombre de sondes est primordiale pour l'économie du projet ;
- des conditions de fonctionnement souvent en dessous de celles nominales : notamment un débit trop élevé et un écart de température (extraction/injection) trop faible, qui engendre une surconsommation de pompage réduisant le COP global de manière significative.

Certaines opérations sont conçues avec un fonctionnement en tout ou rien de la pompe d'exhaure, plutôt qu'en débit variable. Ceci conduit à la même incidence que celle signalée ci-avant sur le COP.

La liaison entre l'ingénierie sous-sol et thermique n'est pas ou insuffisamment réalisée. Un dialogue permanent doit être mis en place pendant cette phase de conception. Ce problème est résolu d'emblée lorsque le bureau d'études a la double compétence.

Réalisation des travaux

La réalisation des travaux se fait à partir de consultation d'entreprises avec des lots séparés (forage, chauffage...) ce qui peut poser des problèmes s'il n'existe pas une entité compétente pour assurer la coordination (maîtrise d'œuvre élargie, assistance à maîtrise d'ouvrage...).

En règle générale, pour les forages sur aquifères, il n'a pas été noté de problèmes de compétences des entreprises de forages.

Il est à noter que la garantie Aquapac n'est pas toujours sollicitée.

La réalisation des sondes s'avère plus complexe et les entreprises de la région découvrent cette nouvelle technologie.

La rencontre d'aquifères spécifiques pose parfois des problèmes pour la tenue du forage et nécessite la mise en place d'un tubage provisoire. La descente de sondes peut parfois être bloquée par une mauvaise tenue des formations rencontrées et nécessite de compléter le champ par des forages complémentaires.

Les entreprises adjudicataires du lot chauffage ne possèdent pas toujours la qualification suffisante pour mener à bien ce type de projet. En effet, la mise en œuvre d'une installation de PAC nécessite une compétence spécifique de frigoriste.

La régulation, à savoir l'adaptation des prélèvements aux besoins, n'est pas suffisamment prise en compte.

Fonctionnement

D'un point de vue fonctionnement et satisfaction des besoins thermiques, la majorité des opérations atteignent leurs objectifs dans des conditions qui néanmoins ne sont pas toujours optimales ou celles définies dans l'étude de faisabilité.

Incidents

Il faut noter quelques incidents liés à l'ensablement, soit au puits de réinjection (constaté pour une opération), soit au niveau des filtres (une opération). Ces problèmes ont trouvé des solutions.

Il a été constaté des incidents d'embouage au niveau des planchers chauffants sur deux opérations qu'un des maîtres d'ouvrages attribue à tort à la géothermie. En effet, cette partie de l'installation de chauffage, située en aval de la PAC, derrière un échangeur, ne peut en aucune manière être « perturbée » par le circuit géothermique.

Exploitation

Pour les solutions sur aquifère, un contrat de maintenance sous-sol est généralement mis en place, ce qui n'est pas toujours le cas pour les installations de surface.

Une supervision par un exploitant traditionnel pour les installations les plus importantes est généralement mise en place.

La compétence de l'équipe de maintenance sur place est un point important.

Évaluation des performances

Pour la majorité des anciennes opérations (non subventionnées dans le cadre du Fonds Chaleur), le suivi des performances est limité, voire inexistant. Il apparaît lors des visites, des dérives importantes par rapport aux éléments figurant dans l'étude de faisabilité, évaluées à partir de calculs simples et de ratios.

Pour certaines opérations, des campagnes de suivi ont été réalisées. Elles permettent d'avoir une première idée sur la performance globale des systèmes. Ces opérations peuvent être jugées comme satisfaisantes, mais il reste un manque de données relatives au comportement des certains facteurs géothermiques spécifiques : températures, consommation électrique des auxiliaires et notamment des pompes de forage...

Ce suivi a permis néanmoins la préconisation d'actions d'optimisation des installations. Les opérations ayant bénéficié des subventions dans le cadre du Fonds Chaleur ont été instrumentées et font l'objet d'une campagne de mesure. Pour celles analysées, il est signalé des problèmes de fiabilité des données mesurées qui rendent encore aujourd'hui difficile l'établissement de bilans énergétiques significatifs.

9.2.2. Enjeux pour l'habitat individuel

S'il est clair que la réglementation thermique 2012 va diminuer drastiquement les besoins de chauffage, elle va, par voie de conséquence, entraîner l'augmentation de la part de chaleur à fournir pour les besoins d'Eau Chaude Sanitaire (besoins qui ne devraient pas diminuer a priori puisque la tendance est plutôt à l'augmentation de la consommation d'eau chaude sanitaire par les ménages). Il existe une diversité de solutions de géothermie développées actuellement pour la maison individuelle. Des développements sont en cours sur le dimensionnement des échangeurs afin d'adapter celui-ci aux nouveaux besoins imposés par la RT2012. En effet, les échangeurs horizontaux par exemple, peu onéreux s'ils sont mis en place au moment du terrassement du terrain (construction neuve), auront un plus faible impact en terme de surface lorsque les besoins seront diminués. L'optimisation du dimensionnement entrainera de plus l'optimisation économique du système.

De plus, les échangeurs géothermiques compacts (de type corbeille par exemple) en cours de développement en France (mais plus largement développés à l'étranger) devraient permettre de répondre à une nécessité de limiter l'encombrement (par rapport aux échangeurs horizontaux) tout en évitant le coût important de forage de sondes géothermiques verticales.

L'ensemble de ces solutions permet donc d'envisager le développement de systèmes géothermiques dans les maisons individuelles, qu'elles soient neuves ou en rénovation.

S'il a été constaté depuis 2008 une stagnation du marché des pompes à chaleurs géothermiques, leur développement est un des objectifs du Grenelle de l'Environnement. Cet objectif ne pourra pas être satisfait uniquement par le développement des pompes à chaleur aérothermiques qui ont certes un coût d'investissement plus limité mais également un coefficient de performance globale plus faible impliquant une augmentation des coûts d'exploitation.

9.2.3. Enjeux de développement des réseaux de chaleur

La pérennisation des subventions du Fonds Chaleur et les différents mécanismes incitatifs pour le développement des réseaux de chaleur « vertueux » (obligation de raccordement lors du classement du réseau, par exemple) et leur conversion aux énergies renouvelables (pour bénéficier, entre autres, de la réduction de TVA à partir de 50 % de production d'origine renouvelable ou de récupération) devraient favoriser le développement de réseaux de chaleur.

Concernant la ressource valorisée par ces réseaux de chaleur, il existe un enjeu fort qui consiste à pérenniser les opérations existantes.

9.2.4. Enjeux en rénovation et pour les nouveaux bâtiments neufs : La question des émetteurs de température

Le réseau de distribution et les émetteurs de chaleur doivent être adaptés à une production de chaleur basse température pour conserver les performances énergétiques du système. Si la question ne se pose pas dans le cas de nouvelles constructions (RT 2012), elle se pose en rénovation.

L'enjeu en rénovation dans le collectif/tertiaire réside à la fois dans la baisse des consommations et dans l'adaptation des émetteurs de chaleur et du système de distribution existants, voire du niveau de température de la pompe à chaleur (côté émetteurs).

Il est cependant possible dans certains cas d'adapter le système d'émetteurs de chaleur existant lorsque celui-ci peut fonctionner dans des conditions imposées par la basse température. Cela dépend principalement de son dimensionnement initial et du niveau de réhabilitation du bâtiment. Dans le cas où une telle adaptation est possible, le recours à la géothermie est souvent pertinent. En effet, les besoins thermiques du bâtiment restent souvent supérieurs, même après rénovation, à ceux d'un bâtiment neuf et une solution d'appoint est déjà en place. Ces deux éléments permettent d'amortir plus facilement l'investissement.

Dans d'autres cas, il sera nécessaire de procéder à une rénovation lourde avec changement des émetteurs et du système de distribution si l'on souhaite l'alimenter avec de la géothermie.

9.2.5. Enjeux spécifiques : la gestion de la ressource

Pour les opérations avec PAC

Lorsque des projets sont mis en place pour des besoins uniquement de chaud ou uniquement de froid, il peut exister un risque de déséquilibre des conditions thermiques du sous-sol existe. Des solutions complémentaires permettant de maintenir cet équilibre sur une ou plusieurs années doivent éventuellement être envisagées (exemple : couplage à des énergies excédentaires l'été si la géothermie est utilisée en mode chauffage uniquement).

La présence de trois aquifères superposés dans certaines zones de la région Île-de-France devrait permettre de faire de la géothermie là où d'autres opérations sont déjà en fonctionnement. Cela demande cependant une connaissance et un suivi du développement des opérations et leurs propriétés pour évaluer l'impact sur la ressource.

La première étape avant le développement d'outils plus spécifiques pour gérer la ressource passe par un inventaire des opérations de géothermie.

Pour les opérations au Dogger (Réseaux de chaleur)

L'aquifère du Dogger est déjà largement utilisé dans certains départements, comme le Val de Marne. Dans ces zones, où les potentiels de développement ne sont pas nuls, il est nécessaire de gérer la ressource, pour éviter les conflits d'usage et donc de mettre en péril les opérations existantes.

9.3. PROPOSITIONS D' ACTIONS

Certaines actions doivent être menées au niveau national, comme la réflexion sur les mécanismes incitatifs (notamment le crédit d'impôt), en matière de réglementation (simplification des démarches administratives en cours) et en recherche et développement.

Le tableau ci-après vise à proposer des actions qui peuvent être menées au niveau régional, pour inciter les acteurs ciblés, à mettre eux même en place des actions) ou pour lancer les actions au niveau régional, en tant qu'acteur et/ou pilote et/ou co-financeur

	Action	Filière géothermie	Acteurs potentiels	Public ciblé
Inciter				
Énergie	Prendre en compte la géothermie dans les PCET (Plan Climat Énergie Territoriaux)	Toutes	ARENE	Collectivités
Bâtiment	Étudier la possibilité de la géothermie en rénovation, d'autant plus dans les quartiers urbains historiques car l'impact visuel du système géothermique est nul	Toutes	Professionnels du bâtiment	Maîtres d'ouvrages d'opérations (publics ou privés)
	Favoriser la basse température pour toutes les nouvelles constructions.	Toutes	Professionnels du bâtiment	
	Inciter les maîtres d'ouvrage à la souscription d'un dispositif de couverture du risque tel que la garantie AquaPac pour les opérations sur aquifères superficiels. Les opérations de plus de 30kW souscrivant à cette garantie sont assurées contre le risque de ne pas trouver la ressource souhaitée (adéquante avec le projet).	PAC sur aquifères superficiels	EIE, ALE, Maîtres d'ouvrages ...	
Aménagement du territoire	Communiquer auprès des aménageurs pour montrer l'intérêt de la mise en place d'une réflexion en amont pour favoriser la mutualisation des systèmes énergétiques, comme les micro-réseaux de chaleur	Toutes	Professionnels de l'aménagement	
Mettre en place des actions propres pour développer l'utilisation de l'énergie géothermie, toute en développant une filière de qualité et en gérant les ressources				
Stratégie énergétique	Réflexion à mettre en place sur la « concurrence » entre énergies renouvelables : incitation à la mise en place trop systématique de panneaux solaires pour la production d'eau chaude sanitaire en base, Concurrence avec les chaudières biomasse : privilégier les ENR localement, donner priorité à la géothermie, et installations de cogénération (qui passeraient en base en hiver, au détriment de la géothermie.	Toutes	Conseil Régional, ADEME, DRIEE, ARENE	
	Étudier le potentiel de la géothermie pour les bâtiments dont le Conseil Régional est maître d'ouvrage, comme les lycées	PAC	Conseil Régional	
	Mener une réflexion sur des propositions de recommandations en matière d'urbanisme (à l'adresse du SDRIF, des SCOT, voire des PLU) qu'il serait utile de formuler pour aider la faisabilité du développement de la géothermie	Toutes	IAU, BRGM	Collectivités
Information et communication	Sur le potentiel de développement de la géothermie en Île-de-France	Toutes	CR, ADEME, EIE, ALE, ARENE	Collectivités, Maîtres d'ouvrages publics ou privés, EIE
	Sur le taux d'aide disponible, même si rendu difficile par l'approche Fonds Chaleur qui nécessite une étude au cas par cas.		CR, ADEME	Maîtres d'ouvrages publics ou privés
	Sur les possibilités et spécificités de la géothermie (possibilités en rénovation, rôle des émetteurs basse température...)		CR, ADEME, EIE, ALE, ARENE	Maîtres d'ouvrages publics ou privés, professionnels du bâtiment et de l'aménagement
Procédures de sélection, d'attribution des aides	Favoriser la certification des professionnels, notamment le label Qualiforage pour les foreurs et le label QualiPAC pour les installateurs, pour améliorer la qualité des installations et les contre-références nuisibles à l'image de la géothermie.	PAC	CR, ADEME	
	Favoriser les opérations dont la puissance installée répond parfaitement aux besoins recensés et qui garantissent un équilibre thermique de la ressource	PAC	CR, ADEME	
Démarche qualité et formation	Mettre en place une labellisation de qualité des bureaux d'étude sous-sol intervenant sur les opérations dans le collectif et tertiaire	PAC	CRMA, ADEME, CR,	
	Favoriser les relations/communications entre bureaux d'études sous-sol et surfaces, en développant une compétence « assembleur »		CR	
Développement de connaissances et d'outils d'aide à la décision	Développer une méthodologie d'inventaire systématique des opérations de géothermie pour mettre à jour l'inventaire réalisé dans le cadre de cette étude	PAC	DRIEE, BRGM	
	Réflexion à mener au niveau des demandes d'autorisation	PAC	Police de l'eau, DRIEE	
	Approfondir la connaissance des contraintes géologiques (dont les zones à gypse) qui peuvent limiter l'implantation de forages géothermiques, pour prévenir des impacts potentiels d'opération de géothermie	PAC	CR, ADEME	
	Pérenniser les actions de modélisation de la ressource et la recherche d'indicateurs, pour pérenniser les opérations existantes	RC	CR, ADEME, DRIEE	
	Approfondir la connaissance des aquifères profonds comme le Trias, dans le but de développer des opérations sur d'autres aquifères disponibles mais moins bien connus, comme l'Albien/Néocomien, le Lusitanien ou le Trias	RC	BRGM	

10. Bibliographie

10.1. PUBLICATIONS ET RAPPORTS

Mégnyen C., Diffre Ph., Rampon G. (1970) - Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. BRGM : Paris.

Housse B., Maget P. (1976) - Potentiel géothermique du bassin parisien. Action concertée entre le BRGM et le groupe ELF-Aquitaine, *Edition BRGM*, 125 p.

Vernoux J.F., Maget P., Afzali H., Blanchin R., Donsimoni M., Vairon J. (1997) - Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris, rapport BRGM DSGR/IDF R-39702, 93 p., 2 tabl., 37 fig., 23 pl., 12 ann.

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

Roux J.C. (2006) - Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM Éditions EDV-STC003, 956 p., 2 tomes en coffret.

Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.M. (1989) - Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin parisien, France. Rapport BRGM R 30169.

BRGM-ADEME (2010). La géothermie et les réseaux de chaleur, Guide du maître d'ouvrage. Guides techniques BRGM-ADEME.

Bel A., Bezelgues-Courtade S., Philippe M., Jorio M., Poux A. (2010). La géothermie en Rhône-Alpes : comparatif technique et mesures d'encadrement. Rapport final. BRGM/RP-59048-FR. 109 p., 21 fig., 5 annexes

Bézègues-Courtade S., Martin J.C. (2011) – Synthèse de la réglementation française codifiant la recherche et l'exploitation de l'énergie géothermique. Rapport final. BRGM/RP-60195-FR, 102 p., 7 ann.

Poux. A., Impens A.C. (2011) - Géothermie et échelles de territoire-étude des micros réseaux de chaleur. Rapport final. BRGM/RP-59967-FR. 147 p., 6 fig., 4 annexes.

CLIP (2010) - Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermiques dans l'habitat à l'horizon 2050. Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective Énergie et Environnement (Cahier n° 20).

10.2. SITES INTERNET

Géothermie : <http://www.geothermie-perspectives.fr/>

Sites et sols pollués :

- [Portail National des sites et sols pollués](#)
- Base de données [BASOL](#) - Sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

- Base de données [BASIAS](#) -Inventaire des Anciens Sites Industriels et Activités de Service.

SAGE : <http://www.gesteau.eaufrance.fr/>

ZRE :

- <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?rubrique10#zre>
- <http://diren-idf-eaux-souterraines.brgm.fr/images/cartes/ZRE-SN.jpg>
- <http://diren-idf-eaux-souterraines.brgm.fr/files/ArreteZRE-31juillet2009.pdf>: Arrêté cadre du 31 juillet 2009 relatif à la mise à jour des Zones de Répartition des Eaux dans le bassin Seine-Normandie.

Risques industriels et risques naturels :

- Chambre de commerce et d'industrie de Paris : <http://www.environnement.ccip.fr/Thematique/Eau/Generer-le-risque-inondation-en-entreprise/Savoir-les-inondations-en-Île-de-France/Plan-de-prevention-des-risques-d-inondation-PPRI>
- <http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-mouvements-de-terrain>
- IGC Paris http://www.paris.fr/portail/pratique/Portal.lut?page_id=8603
- ICG Versailles <http://www.igc-versailles.fr/>
- Document réalisé par la Direction régionale de l'Environnement d'Île-de-France - Bassin Seine-Normandie : Document de référence pour la prévention du risque cavités souterraines en Île-de-France. Version 1 validée – juin 2010.

Espaces naturels :

- Article de Chasse et Droit : La protection des espaces naturels – Approche juridique rédigé par L. Barbier de l'ONCFS.
- <http://bibliothequeenligne.espaces-naturels.fr>

Annexe 1

Synthèse hydrogéologique de l'Île-de-France

La synthèse hydrogéologique a pour objectif d'inventorier et décrire les différentes entités hydrogéologiques présentes en région Île-de-France pouvant être considérées comme des ressources exploitables à des fins géothermiques. Il s'agit en particulier d'étudier la distribution ainsi que les caractéristiques des différents aquifères.

La géologie du bassin de Paris fait apparaître deux grandes entités distinctes qui sont le socle, d'âge antétriasique, et le bassin sédimentaire, plus récent, qui renferme les différents aquifères.

Le socle constitue le substratum²³ général du complexe aquifère sédimentaire du bassin de Paris. En terrains d'affleurements cristallins et métamorphiques, les eaux souterraines sont localisées dans les zones de broyage et de fracturation où elles sont relativement peu abondantes. Le bassin de Paris se présente topographiquement comme une vaste dépression formée de terrains secondaires (Trias, Jurassique et Crétacé), tertiaires (Éocène et Oligocène) et quaternaires (Alluvions) (cf. Figure 37).

Les couches sédimentaires du Secondaire affleurent en auréoles concentriques autour d'une vaste zone centrale Tertiaire. Cette structure géologique permet la formation de gisements d'eaux souterraines ou aquifères, importants et étendus.

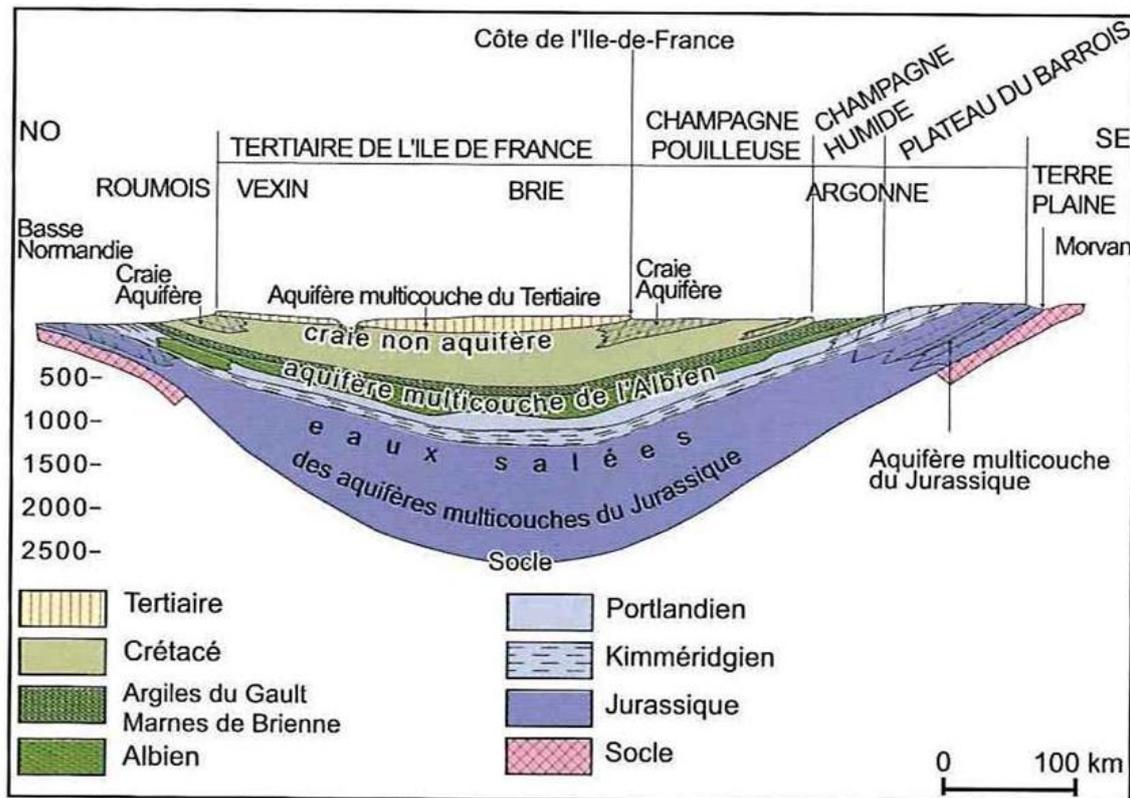


Figure 37 - Coupe Est-Ouest des grands aquifères multicouches du Bassin de Paris.
(Aquifères & Eaux Souterraines, Tome 1, Editions BRGM)

Le remplissage de dépôts sédimentaires du bassin, étudié sur une série verticale (fig. 38), est constitué d'une succession de formations géologiques de lithologie très variée. C'est dans ces formations perméables constituées de roches-réservoirs que sont localisés les aquifères. Les

²³ Couche inférieure sur laquelle repose une couche plus récente.

formations semi-perméables à imperméables séparent les aquifères ; parfois localement ou partiellement permettant toutefois des transferts d'eau verticaux entre aquifères (par drainance hydraulique). On trouve ainsi fréquemment dans le bassin Seine-Normandie des aquifères multicouches.

Période	Système	Etage stratigraphique	Lithologie dominante	Niveau aquifère
Quaternaire			Alluvions	Aquifères alluviaux
Tertiaire	Oligocène	Aquitainien	Calcaire de Beauce	Nappe de Beauce
		Stampien	Sables de Fontainebleau	
			Calcaire de Brie	
		Eocène sup.	Bartonien	Marnes vertes
	Marnes supragypseuses			
	Calcaires de Champigny			
	Eocène moy.	Lutétien	Calcaires de St. Ouen	
			Sables de Beauchamp	
	Eocène inf.	Yprésien	Calcaire grossier	Sables du Soissonnais et calcaire grossier
			Sables de Cuise	
Paléocène	Thanétien	Sables du Soissonnais	Sables de Bracheux	
		Argile plastique		
		Sables de Bracheux		
Secondaire	Crétacé sup.	Dano-Montien	Calcaires, marnes	
		Sénonien		Nappe de la Craie
		Turonien	Craie	
	Cénomaniens			
	Crétacé inf.	Albien	Argiles du Gault	
			Sables, argiles	Albien
			argiles, sables	Néocomien
	Jurassique sup.	Portlandien	Calcaires sup.	Malm
			Marnes	
			Calcaires récifaux	
	Jurassique moy.	Bathonien	Calcaires, marnes	Dogger
			Bajocien	
			Aalénien	
Jurassique inf.	Toarcien	Argiles, marnes	Lias	
		Domérien		
		Pliensbachien		
		Sinemurien		
		Hettangien		
Trias		Argiles bariolées	Aquifères locaux	
		Grès de base		
Primaire	Permien		Grès, argiles, conglomérats	
			Carbonifère	
			Dévonien	

Figure 38 - Série litho-stratigraphique et hydrogéologique du Bassin parisien.

Source : AESN (1974). Les bassins de la Seine et des cours d'eau Normands – Eaux souterraines, Volume Agence de l'Eau Seine-Normandie, Natterre, tome 1, Fasc/ 4. Wei H.F. (1990). Modélisation tridimensionnelle du transfert d'eau, de chaleur et de masse dans l'aquifère géothermique du Dogger dans le bassin de Paris. Thèse, ENSMP.

La figure 38 présente la série des entités géologiques et hydrogéologiques existantes en région Île-de-France. Les formations géologiques et niveaux aquifères associés sont superposés verticalement suivant un ordre stratigraphique, du plus ancien au plus récent.

1. LES AQUIFÈRES SUPERFICIELS

Quatre grands aquifères considérés comme superficiels, puisqu'ils concernent la tranche des terrains située approximativement entre 0 et 100 m sous le sol de la région Île-de-France, ont été retenus : l'Oligocène, l'Éocène supérieur, l'Éocène moyen et inférieur et le Crétacé Supérieur.

La coupe schématique 3.4 présente les quatre principales formations aquifères superficielles et la figure 4.5, la répartition géographique de ces formations aquifères affleurantes en Île-de-France.

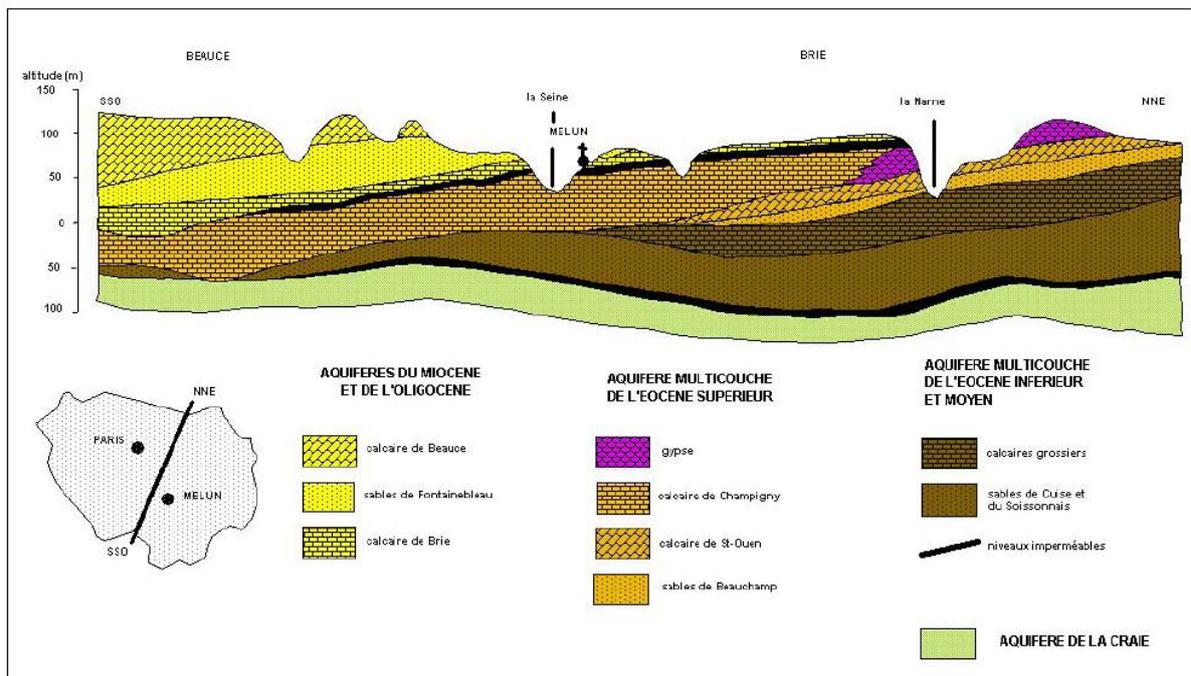


Figure 39 - Coupe géologique Nord-Est / Sud-Ouest de la région Île-de-France.

Les quatre aquifères multicouches suivants (voir figure 3.2) ont été étudiés :

- **l'aquifère multicouche de l'Oligocène** (-23 à -35 Ma) composé des Calcaires de Beauce, des Sables de Fontainebleau et du Calcaire de Brie. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les formations imperméables des Marnes Vertes, d'âge Sannoisien ainsi que par les Marnes supra gypseuses (Marnes de Pantin et Marnes d'Argenteuil), d'âge Bartonien Supérieur ;
- **l'aquifère multicouche de l'Éocène supérieur** (-35 à -42 Ma) composé du Calcaire de Champigny, des Sables de Monceau, des Calcaires de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les formations semi-imperméables des Marnes et Caillasses d'âge Lutétien supérieur, sous-étage de l'Éocène Supérieur ;
- **l'aquifère multicouche de l'Éocène moyen et inférieur** (-42 à -60 Ma) composé du Calcaire grossier du Lutétien inférieur, des Sables de Cuse et des Sables du Soissonnais.

Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure essentiellement par les formations imperméables des argiles plastiques du sparnacien (Éocène inférieur) ;

- **l'aquifère de la Craie d'âge Sénonien du Crétacé supérieur** (-74 à -83 Ma), formation très épaisse, exploitable uniquement dans les parties affleurantes.

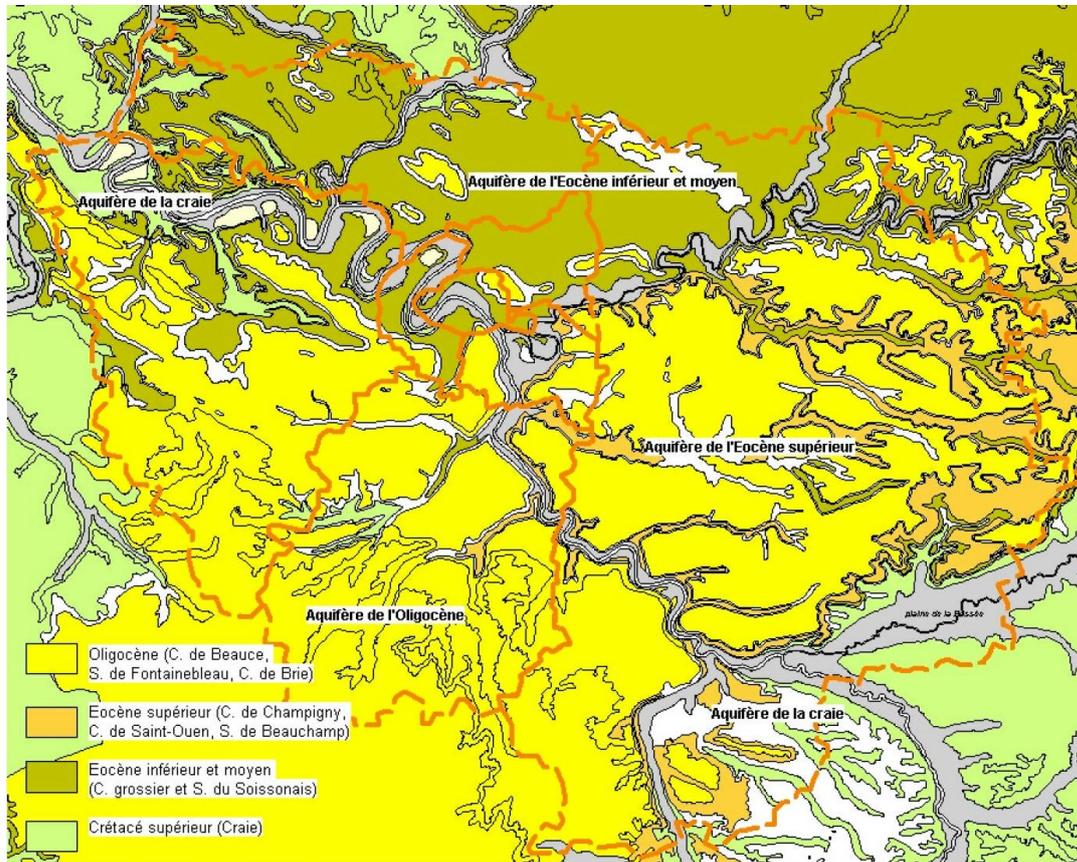


Figure 40 - Répartition géographique des formations géologique aquifères affleurantes en Île-de-France.

Les alluvions, d'âge quaternaire, que l'on retrouve essentiellement dans les vallées de la Seine, de la Marne, de l'Yonne et de l'Oise, composent des aquifères puissants. Cependant, compte tenu du caractère extrêmement vulnérable de ces formations (soumises aux aléas climatiques de productivité et sensibles aux effets de pollutions dus à l'activité humaine) et de leurs niveaux sub-affleurant peu adaptés, il a été convenu de ne pas considérer ces formations comme des objectifs de développement pour les pompes à chaleur sur nappe aquifère et de leur préférer l'aquifère plus profond de la Craie, souvent associé aux alluvions lorsqu'il est productif.

a. Aquifère multicouche de l'Oligocène

Le système aquifère de l'Oligocène, aussi communément appelé « Nappe de Beauce », est une vaste surface tabulaire au sud-ouest de l'Île-de-France couvrant à l'affleurement environ 2 500 km².

La nappe de l'Oligocène est surtout importante dans le secteur du sud-ouest de la région parisienne où elle intéresse principalement les couches des calcaires Brie et de Beauce enserrant la formation des sables de Fontainebleau. Cet aquifère s'étend au-delà vers le sud jusqu'en forêt d'Orléans (zone de partage des eaux souterraines entre les bassins de la Seine et de la Loire).

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
OLIGOCENE	Aquitaniens	Calcaires de Beauce	Aquifère multicouche de l'Oligocène
	Stampien	Sables de Fontainebleau	
	Sannoisien	Calcaires de Brie	
		<i>Marnes vertes de Romainvilliers</i>	
EOCENE SUPERIEUR			

Figure 41 - Lithostratigraphie simplifiée de l'Oligocène en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire.

La surface piézométrique²⁴ suit globalement la direction SW-NE et la nappe est libre, c'est-à-dire sans recouvrement, à l'exception de la zone orientale. La nappe de Beauce est fortement drainée par les cours d'eau (Juine, Essonne, Férole) qu'elle alimente. Le battement de la nappe est important dans les zones de plateaux avec 3 à 5 m de moyenne annuelle.

Ces niveaux perméables constituent le réservoir principal de la région du fait d'épaisseurs importantes au sud diminuant cependant vers le nord. On distingue des zones de faible puissance²⁵ où la hauteur d'eau est inférieure à 10 m. Ce sont : au nord les buttes de l'Île-de-France, à l'Est le plateau de Brie et les buttes Loing-Yonne, au centre la Bière et l'Hurepoix. La nappe prend plus d'importance dans les Yvelines (Rambouillet) et surtout dans la Beauce où elle peut dépasser 70 m de puissance.

Calcaires de Beauce

Les calcaires de Beauce constituent un ensemble aquifère de type karstique²⁶, bien que séparés par une lentille peu perméable, d'extension limitée correspondant à la Molasse du Gâtinais. Ils présentent des degrés variables de fissuration, de diaclases et de cavités karstiques et des épaisseurs de 20 à 40 m.

On observe des transmissivités²⁷ moyennes de 0,5 à $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s, pouvant varier rapidement dans l'espace, étant donnée la nature karstique de ces calcaires.

Sables de Fontainebleau

Les sables de fontainebleau sont constitués de sables quartzeux fins et légèrement micacés. Ils sont moins perméables et leur épaisseur est de 50 m en moyenne. Ils atteignent leur puissance maximale en bordure de la Beauce puis à mesure de leur enfoncement structural, ils se réduisent progressivement.

²⁴ La surface piézométrique est la surface supérieure de la zone saturée de l'aquifère.

²⁵ Hauteur d'eau mesurée depuis le substratum imperméable.

²⁶ Le karst est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de formations de roches carbonatées, principalement de formations calcaires.

²⁷ Capacité d'un aquifère donné (caractérisé par sa perméabilité et son épaisseur) à laisser s'écouler l'eau souterraine sous l'effet d'une différence de pression.

Calcaires de Brie

L'horizon des Calcaires de Brie est le plus âgé de la série multicouche. Cette formation est composée de calcaires lacustres, vermiculés, compacts avec des passées marneuses. Ils s'étendent entre la Marne et le nord de la Beauce avec une épaisseur maximale de 12 m. Malgré une faible épaisseur, ils peuvent être très productifs et donc jouer un rôle important comme réservoir. Des transmissivités moyennes de 0,1 à $0,5 \cdot 10^{-2}$ m²/s sont observées en Beauce et en Bière et sont largement inférieures en Brie.

Les marnes vertes

Les marnes vertes correspondent à des argiles marneuses plastiques où sont intercalés de minces niveaux carbonatés. Les marnes vertes forment un niveau imperméable à la base du Calcaire de Brie et forment ainsi le substratum imperméable de l'aquifère multicouche de l'Oligocène. Dans le sud, ces marnes deviennent calcaireuses et difficiles à distinguer des autres faciès. Dans ce secteur, le Calcaire de Brie, en contact direct avec le Calcaire de Champigny, forme le Calcaire de Château-Landon. Ce niveau repose sur un étage de marnes, les marnes supragypseuses de l'Éocène supérieur (cf. chapitre suivant). Ce niveau est également très peu perméable, ce qui limite fortement les circulations entre les nappes de l'Oligocène et de l'Éocène inférieur.

Un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) de la nappe de Beauce est actuellement en cours d'élaboration avec l'objectif de rendre compatibles les besoins de l'agriculture, la qualité et les niveaux d'étiage des rivières. Le SDAGE (schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) Seine-Normandie prend la mesure des enjeux sur la nappe de Beauce et démontre la nécessité d'une gestion équilibrée de cette ressource.

b. Aquifère Multicouche de l'Éocène Supérieur

L'aquifère de l'Éocène supérieur couvre la quasi-totalité de la région parisienne, mais les niveaux qui le composent présentent des variations latérales de faciès. Il s'étend à l'affleurement sur environ 1 700 km² couvrant la Brie dans l'est de la région et le nord-est de la Beauce au sud de la région.

Les Calcaires de Champigny sont recouverts sur les plateaux par le manteau des « marnes vertes », soutenant une nappe perchée²⁸ peu abondante dans les Calcaires de Brie composant l'aquifère multicouche de l'Oligocène (voir chapitre précédent).

²⁸ Nappe, généralement temporaire et localisée, résultant de l'interception de l'eau de percolation par un horizon peu perméable de faible étendue.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
OLIGOCENE			
EOCENE SUPERIEUR	Ludien	<i>Marnes supragypseuses</i>	Aquifère Multicouche du Calcaire de Champigny
		Calcaire du Champigny	
		<i>Marnes infragypseuses</i>	
	Marinésien	Sables de Monceau	
		Calcaire de Saint Ouen	
Auversien	Sables de Beauchamp		
EOCENE MOYEN ET INFÉRIEUR			

Figure 42 - Lithostratigraphie simplifiée de l'Éocène supérieur en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire.

Les Marnes supragypseuses

Les marnes supragypseuses forment un niveau globalement imperméable. La puissance totale de cette formation est comprise entre 0 et 20 m.

Les Calcaires de Champigny

Le réservoir de la nappe du Champigny, composante essentielle de l'aquifère multicouche, est de type calcaire dominant, fissuré, présentant de nombreux phénomènes karstiques et d'épaisseur moyenne de 25 m. Le réservoir principal de l'aquifère de l'Oligocène se limite donc au territoire de ce faciès du Ludien, c'est-à-dire dans le sud et le sud-est de la région (en Brie et en Bière).

Dans le Nord de l'Île-de-France et dans la région comprise entre Paris et Longjumeau, le faciès du Calcaire de Champigny devient gypseux (sédimentation de type lagunaire), ce qui rend les eaux inutilisables. Les Sables de Beauchamp sont alors exploités (ils ne sont exploitables qu'au Nord où l'aquifère se présente sous son faciès sableux). À un degré moindre, les Calcaires de Saint-Ouen (faciès marneux) sont aussi exploités.

Marnes infragypseuses ou Marnes à Pholadomyes

Ce niveau correspond à des marnes argileuses, généralement calcaires. La perméabilité de ce niveau est faible mais ne constitue pas un écran à la communication hydraulique entre les niveaux supérieurs et inférieurs du fait de sa très faible épaisseur.

Sables de Monceau

Ce niveau est très faiblement représenté et correspond à un mince niveau de marnes verdâtres, parfois sableuses.

Les Calcaires de Saint-Ouen

Les Calcaires de Saint-Ouen, formation de calcaires marneux et siliceux, ont une épaisseur de 15 à 30 m. Ils ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique important puisque dans le sud et le sud-est ils sont indifférenciables de l'ensemble calcaire lacustre et au nord, les calcaires de Saint-Ouen sont trop superficiels et contiennent des eaux trop minéralisées.

Les Sables de Beauchamp

Dans la région située au nord de la Marne et de la Seine, le Calcaire de Beauchamp est situé sous le gypse (alternance de gypse et de marne formant des buttes) et le Calcaire de Saint-Ouen (calcaires marneux à passées siliceuses et gypseuses). De faciès sableux ou argilo-sableux, les Sables de Beauchamp correspondent à l'horizon aquifère le plus important contenant une nappe dont l'écoulement est dirigé vers le sud. Cette nappe qui suit la pente structurale des terrains est parfois captive, parfois libre. Dans les vallées, elle est parfois artésienne par mise en charge sous les alluvions tourbeuses.

Les caractéristiques hydrodynamiques de cet aquifère multicouche sont très hétérogènes :

- la perméabilité²⁹ de l'ensemble est du type perméabilité de fissures extrêmement hétérogène. Suivant leur dimension et leur extension, les eaux pourront couvrir rapidement des distances importantes. Le terrain est hétérogène aussi bien verticalement qu'horizontalement ;
- la transmissivité de l'aquifère des Calcaires de Champigny est globalement 10^{-2} à 10^{-3} m²/s, mais peut localement varier fortement. La transmissivité des Calcaires de Saint-Ouen est de 10^{-3} à 10^{-4} m²/s ;
- la surface piézométrique montre un écoulement souterrain général E-W. La nappe est généralement libre et, en moyenne, à 15 m de profondeur avec une faible pente ;
- les fluctuations piézométriques des Calcaires de Saint-Ouen ne dépassent *a priori* pas 6 m, sauf dans la région est ;
- le coefficient d'emmagasinement³⁰ définissant la capacité de stockage d'eau varie de 0,01 à 1 %.

Dans le sud de la région, les différents terrains à dominante calcaire se comportent d'un point de vue hydrogéologique comme un même ensemble. L'épaisseur relative des niveaux argileux ou marneux ne constituent pas une barrière suffisante pour empêcher la percolation des eaux. Les Calcaires de Champigny sont en communication avec les réservoirs de l'Oligocène et de l'Éocène moyen et inférieur. Les Calcaires de Brie, de Champigny, de Saint-Ouen et du Lutétien constituent alors un réservoir unique dont l'épaisseur d'ensemble diminue à 30 m.

La couche imperméable de marnes supragypseuses et de marnes vertes disparaît dans les vallées et sur certains coteaux conférant ainsi à la Nappe des Calcaires du Champigny une vulnérabilité naturelle. L'étude du BRGM (BRGM/RP-52366-FR) de janvier 2003 montre les relations nappe-rivières, ainsi que la complexité de l'aquifère avec des zones de pertes dans des vallées et des zones d'alimentation de la rivière par les nappes. Ces pertes montrent une très forte perméabilité liée à une vulnérabilité des nappes.

Elle alimente en eau potable environ un million de franciliens dont 480 000 habitants de Seine-et-Marne. Paris est en partie alimentée depuis la fin du XIX^e siècle par l'aqueduc de la Voulzie qui transporte, entre autres, les eaux des sources émergentes du Champigny situées dans le bassin de Provins. Les prélèvements, qui varient entre 45 et 62 Mm³ par an, se répartissent entre production d'eau potable (75 %), usage industriel (22 %) et usage agricole (3 %).

²⁹ Elle rend compte de la capacité du milieu poreux (d'une roche donnée) à se laisser traverser par l'eau.

³⁰ Le coefficient d'emmagasinement d'un aquifère est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée. Dans les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement est égal à la porosité efficace ; il est beaucoup plus petit dans une nappe captive.

c. Aquifère multicouche de l'Éocène moyen et inférieur

L'aquifère multicouche s'étend très largement au nord de la Seine et de la Marne et occupe dans l'Île-de-France, à l'affleurement, une surface de 4 000 km². Plus au sud, s'enfonçant progressivement sous les formations de l'Éocène supérieur, elle est beaucoup moins connue.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
OLIGOCENE			
EOCENE MOYEN	Lutétien	<i>Marnes et Caillasses</i>	Aquifère multicouche du calcaire grossier du lutétien et des sables de l'Yprésien
		Calcaires grossier	
EOCENE INFÉRIEUR	Cuisien	Sables de Cuise	
		Sables du Soissonnais	
	Parnacien	Fausses Glaises Sables d'Auteuil	
<i>Argiles plastiques</i>			
CRETACE SUPERIEUR			

Figure 43 - Lithostratigraphie simplifiée de l'Éocène moyen et inférieur en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

Calcaire du Lutétien

Les Marnes et Caillasses sont considérées comme un niveau semi-perméable séparant la nappe de l'Éocène supérieur de la nappe de l'Éocène moyen et inférieur. Les circulations peuvent se produire horizontalement à travers les bancs de marnes et verticalement dans les cassures perpendiculaires.

Les calcaires grossiers, parfois très compacts, sont cependant toujours plus ou moins fissurés. Ce niveau est constitué d'une succession de bancs calcaires, plus ou moins sableux et fossilifères, séparés par des bancs marneux. Dans l'ensemble, ces bancs peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et sont de plus en plus sableux vers la base du niveau.

Il est souvent difficile de distinguer les Marnes et Caillasses du calcaire grossier. Le Lutétien se comporte comme un ensemble marno-calcaire, sans véritable niveau imperméable continu. La perméabilité du niveau est due aux fissurations du calcaire et semble globalement faible. L'épaisseur du niveau du Lutétien est comprise entre 0 et 50 m. Dans le sud de la région, l'épaisseur est inférieure à 20 m.

Sables de l'Yprésien et argiles plastiques

On distingue plusieurs niveaux dans l'Yprésien :

- les sables de Cuise : ce niveau correspond au faciès sableux de la partie supérieure de l'Yprésien, la perméabilité d'interstices de ce niveau est assez bonne, et l'épaisseur cumulée des sables ne dépasse pas 20 m ;
- les sables du Soissonnais : ce niveau comprend l'Arkose de Breuillet, les argiles plastiques (grises et bariolées) et les fausses glaises (constituées d'alternance d'argiles brunes et noires, de lignites et de bancs sableux).

Toutes ces couches forment une unité hydrogéologique avec des perméabilités moyennes. La transmissivité globale est de 10^{-3} m²/s, plus élevée dans la partie centrale plus puissante et plus faible (10^{-2} à 10^{-4} m²/s) au nord. Elles peuvent contenir des niveaux argileux peu perméables mais répartis de manière extrêmement irrégulière favorisant la circulation aquifère horizontale. L'épaisseur varie entre 30 à 180 m.

Il n'est pas possible de distinguer les surfaces piézométriques du Lutétien et de l'Yprésien, puisqu'en général, les niveaux statiques s'équilibrent. La nappe n'est productive qu'au nord d'une ligne Rambouillet - Melun - Fontainebleau.

En Île-de-France, la nappe est libre dans la partie ouest du Val d'Oise (Vexin), captive à l'est (Plaine de France) et en Brie.

Captées depuis le XVIII^e siècle, les eaux souterraines de cette nappe ont été longtemps surexploitées, surtout dans les zones de Paris et de Saint-Denis, ce qui a engendré un vaste cône de dépression jusqu'à 25 m. Aujourd'hui, l'exploitation a fortement diminué et la nappe est remontée d'environ 10 m. La diminution du cône de rabattement se traduit par des phénomènes de « remontées de nappes » et les constructions, réalisées dans des zones de rabattement, subissent aujourd'hui des inondations dans les sous-sols.

d. Aquifère de la Craie

La formation de la Craie (Crétacé supérieur), qui correspond au substratum des formations tertiaires de l'Île-de-France, est présente sur toute l'étendue de la région parisienne. Elle est le plus souvent en profondeur et n'affleure que rarement dans certaines régions bien délimitées. C'est au niveau de ces zones déterminées que la Craie est aquifère, tout particulièrement lorsqu'elle est recouverte d'une épaisseur d'alluvions.

La Craie affleure au sud-est de l'Île-de-France, à l'extrémité nord-ouest dans les vallées en aval de la Seine et dans la vallée de l'Oise au nord avec une surface d'environ 500 km².

La Craie représente le premier aquifère libre du bassin de la Seine en regard de sa surface d'affleurement et de l'importance de son épaisseur. Par contre, sous les formations tertiaires d'Île-de-France, la nappe devient captive et peu productive.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
EOCENE MOYEN ET INFÉRIEUR			
CRETACE SUPERIEUR	Senonien	Craie Supérieure	Aquifère de la Craie
	Turonien	Craie grise et marneuse	
	Cénomaniens	Craie inférieure glauconieuse	
CRETACE INFÉRIEUR			

Figure 44 - Lithostratigraphie simplifiée du Crétacé supérieur en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

Les zones suivantes peuvent être distinguées :

- la Craie recouverte par des formations imperméables (terrains du Tertiaire au sud de l'Île-de-France) ;

- les zones en bordure des formations imperméables, avec un système karstique parfois très important ;
- les affleurements de la Craie vers les plateaux. Dans ces zones d'affleurement, la nappe de la Craie est fissurée. Certaines zones présentent une karstification très développée où l'écoulement souterrain peut être très rapide. Les variations latérales de faciès, dues aux apports de sédiments argileux, sont fréquentes.

L'aquifère est très important du fait de l'épaisseur maximale utile (60 m) de la formation crayeuse. La perméabilité, qui définit la vitesse de l'écoulement dans l'aquifère, peut être importante dans les zones fracturées et sous les vallées. Les zones les plus productives de cet aquifère sont donc situées dans les zones affleurantes où la craie est la plus fracturée.

Parallèlement, cet aquifère peut stocker de grands volumes d'eau grâce à sa double porosité : celle de la matrice qui peut atteindre 40 % et celle des diaclases (fractures). Le coefficient d'emmagasinement, qui exprime la porosité globale utile, ne dépasse toutefois pas 5 à 9 % à proximité des vallées en présence de diaclases. Les zones de plateaux présentent un coefficient d'emmagasinement de 1 à 2 %.

2. LES AQUIFÈRES INTERMÉDIAIRES DU CRÉTACÉ INFÉRIEUR

a. Aquifère de l'Albien

L'aquifère de l'Albien est, par sa puissance, son extension et ses réserves en eau souterraines, le plus important du Crétacé inférieur. Il est constitué par de trois formations sableuses plus ou moins bien séparées par des formations semi-perméables.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
CRETACE SUPERIEUR			
CRETACE INFÉRIEUR	Albien	<i>Marnes de Brienne</i> <i>Argiles de Gault</i>	Aquifère multicouche de l'Albien
		Sables de Frécambault	
		<i>Argiles tégulines</i>	
		Sables des Drillons	
		<i>Argiles de l'Armance</i>	
	Sables verts		
	Aptien	<i>Argiles plastiques</i> <i>marnes sableuses</i>	
CRETACE INFÉRIEUR			

Figure 45 - Lithostratigraphie simplifiée de l'Albien en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

Albien supérieur

Les formations de l'Albien supérieur constituent une couche imperméable et continue sur l'ensemble du bassin, et séparent l'aquifère de l'Albien de l'aquifère de la Craie. On y distingue les formations suivantes :

- Marnes de Brienne : ce niveau correspond à des argiles gris verdâtres, légèrement calcaires et glauconieuses. Leur épaisseur est d'environ 15 à 20 m et est constante sur l'ensemble du bassin. Ce niveau est imperméable ;
- Argiles du Gault : ce niveau correspond à un faciès des Sables de Frécambault sous-jacents, développé au sommet de ce dernier niveau et d'autant plus important que l'on remonte vers le nord. Ce niveau correspond à des argiles plastiques grises et noires, finement sableuses par endroits. Malgré tout, ce niveau est considéré comme un niveau imperméable.

Albien moyen

Le niveau de l'albien moyen est constitué d'une alternance de niveaux sableux et de niveaux argileux, on distingue plus généralement les niveaux suivants :

- Sables de Frécambault : ce niveau se rencontre sur l'ensemble de l'Île-de-France, il est constitué de sables gris-verdâtres assez fins, légèrement glauconieux et comportant des intercalations argileuses, fines et discontinues. En Brie, leur épaisseur diminue et les sables tendent à être remplacés par les argiles du Gault ;
- Argiles tégulines : ce niveau correspond à un niveau semi-perméable. Il est composé d'argiles gris-noir à gris-vert qui peuvent être légèrement sableuses ;
- Sables des Drillons : cette formation contient des sables gris-verts, fins ou grossiers, légèrement glauconieux et pyriteux. Ce niveau peut contenir des intercalations argileuses d'importance très variable suivant les régions.

Albien inférieur

- Argiles de l'Armanche : ce niveau contient des argiles noirâtres et légèrement sableuses. Malgré leurs propriétés imperméables, ces argiles n'excluent pas les circulations aquifères verticales.
- Sables verts de l'Albien : ce sont des sables verdâtres, glauconieux, grésifiés par endroits. Ils renferment des intercalations argileuses ou argilo-sableuses discontinues qui peuvent être très importantes. À l'échelle régionale, on remarque que l'épaisseur des sables verts diminue en direction du sud.

Caractéristiques de la nappe de l'Albien

En Île-de-France, la nappe de l'Albien se trouve essentiellement dans les niveaux sableux des sables de Frécambault, des sables des Drillons et des sables Verts (cf. Figure 46). Seuls les niveaux des marnes de Brienne et les argiles de Gault (situées au toit du réservoir) et le niveau des argiles de l'Aptien (au mur du réservoir) constituent des couches imperméables. Les formations semi-perméables ou imperméables des argiles Tégulines et des argiles de l'Armanche ne constituent pas des obstacles aux circulations aquifères verticales du fait de leur discontinuité. Ainsi, l'aquifère de l'Albien correspond à un aquifère multicouche où les niveaux sableux sont en relation. Du fait de la présence de ces niveaux argileux, les circulations aquifères au sein des niveaux de l'Albien sont très hétérogènes.

La nappe étant contenue entre deux couches imperméables, elle est non seulement captive mais aussi « en charge », c'est-à-dire que la nappe est soumise en tout point à une pression supérieure à la côte du toit de la formation. Sa surface piézométrique est plus haute que le toit de l'aquifère, qui se trouve alors entièrement en zone saturée.

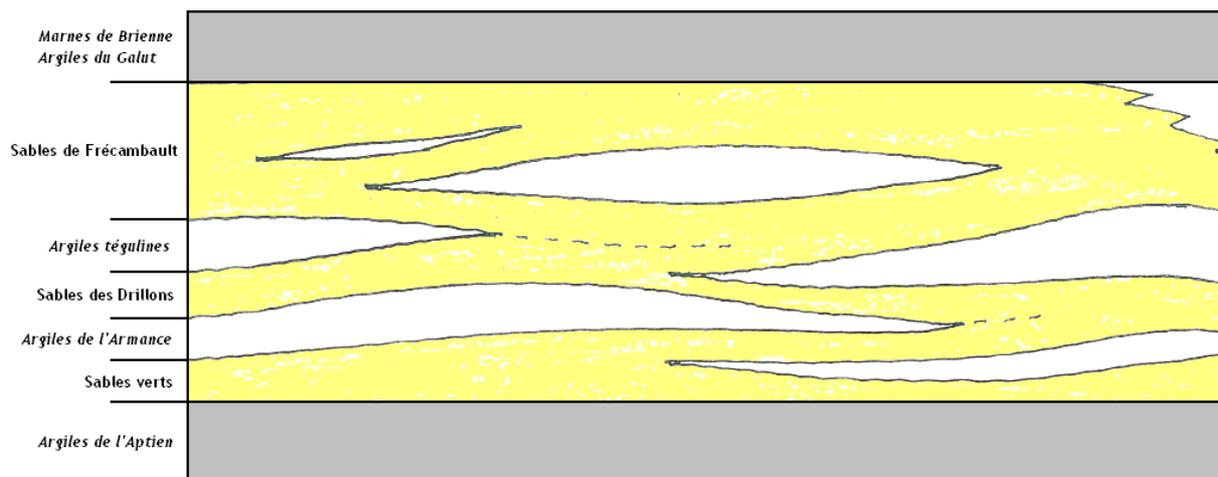


Figure 46 - Sables de l'Albien : relation entre les niveaux de sables
(les formations semi-perméables ou imperméables sont représentées en italique).

Le toit des Sables de l'Albien varie de 100 m de profondeur à l'extrême ouest de la région à plus de 800 mètres de profondeur en Seine-et-Marne. La carte 3-11 présente des valeurs moyennes de la profondeur de l'aquifère des sables de l'Albien, à l'échelle communale. La profondeur moyenne du toit de l'aquifère donne un ordre de grandeur de la profondeur de forage minimum à réaliser pour capter la nappe de l'Albien.

L'aquifère de l'Albien montre de fortes valeurs de transmissivité, liées au faciès sableux. La productivité de la nappe, évaluée à partir des valeurs de transmissivités observées ponctuellement à l'échelle de la région Île-de-France, est caractérisée comme suit :

- peu favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien inférieure à $50 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien comprise entre 50 et $150 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- plus favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien comprise entre 150 et $400 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- très favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien supérieure à $400 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ces données, issues de la synthèse hydrogéologique du crétacé inférieur du bassin de Paris, d'octobre 1997, sont présentées en figure 3-11.

Aptien

Le niveau de l'Aptien constitue le substratum imperméable de l'aquifère de l'Albien qui le sépare de l'aquifère sous-jacent du Néocomien-Barrémien. On distingue généralement deux niveaux dans cette formation :

- un banc argileux constitué **d'argiles** gris-noir à jaune. Leur faciès est sableux, parfois pyriteux ou quartzeux, voire gréseux ;
- un banc sableux fin à grossier, de couleur gris-vert, qui présente un faciès souvent glauconieux ou pyriteux. Parfois, les sables se sont consolidés en grès.

La perméabilité verticale de ce niveau semi-perméable est estimée à 10^{-9} m/s au niveau de l'intégralité du Bassin parisien. Correspondant à un niveau imperméable, il ne permet théoriquement pas la communication entre l'aquifère multicouche de l'Albien et celui du Néocomien-Barrémien.

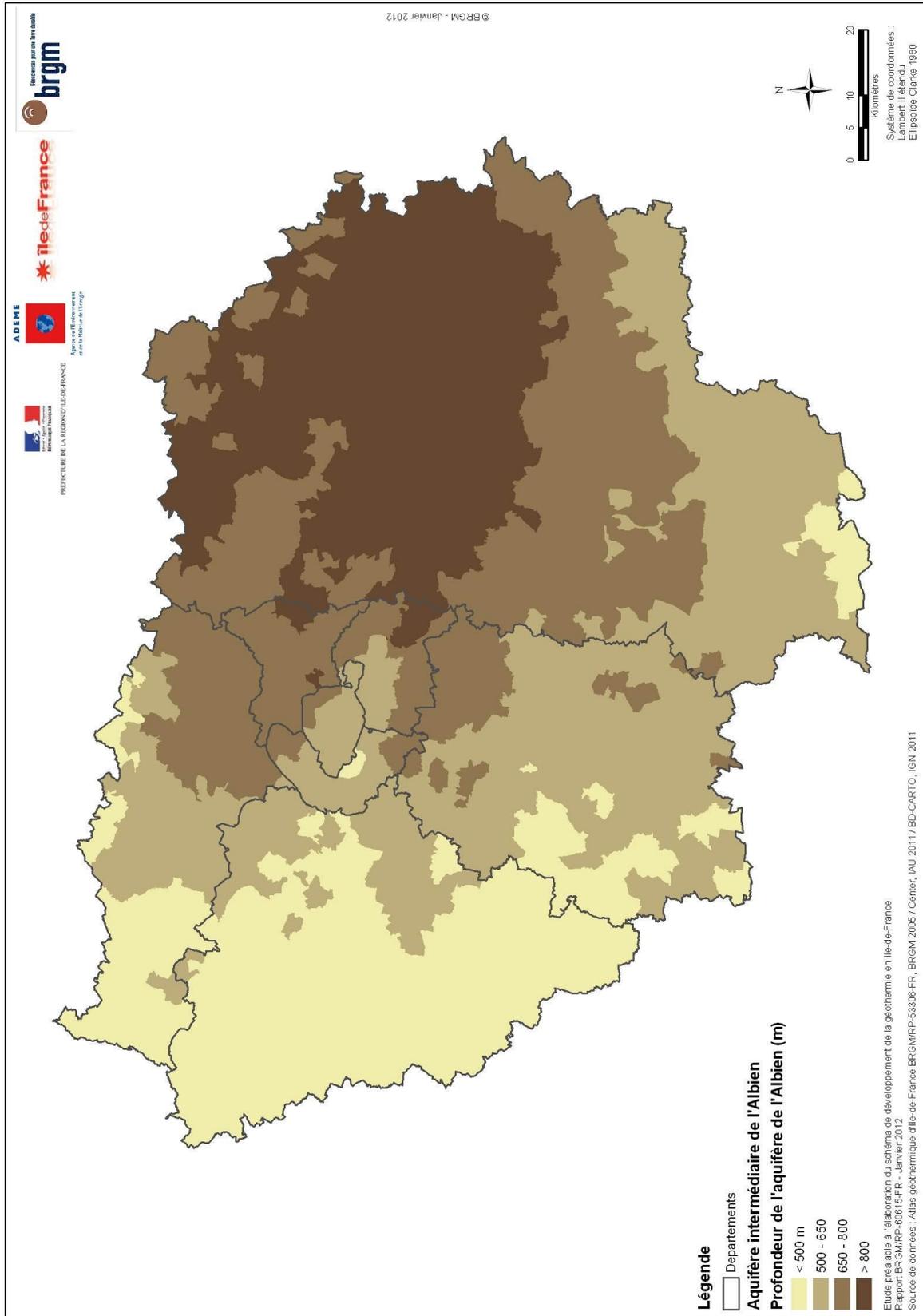


Figure 47 - Carte des valeurs moyennes de profondeurs des sables de l'Albien à l'échelle communale.

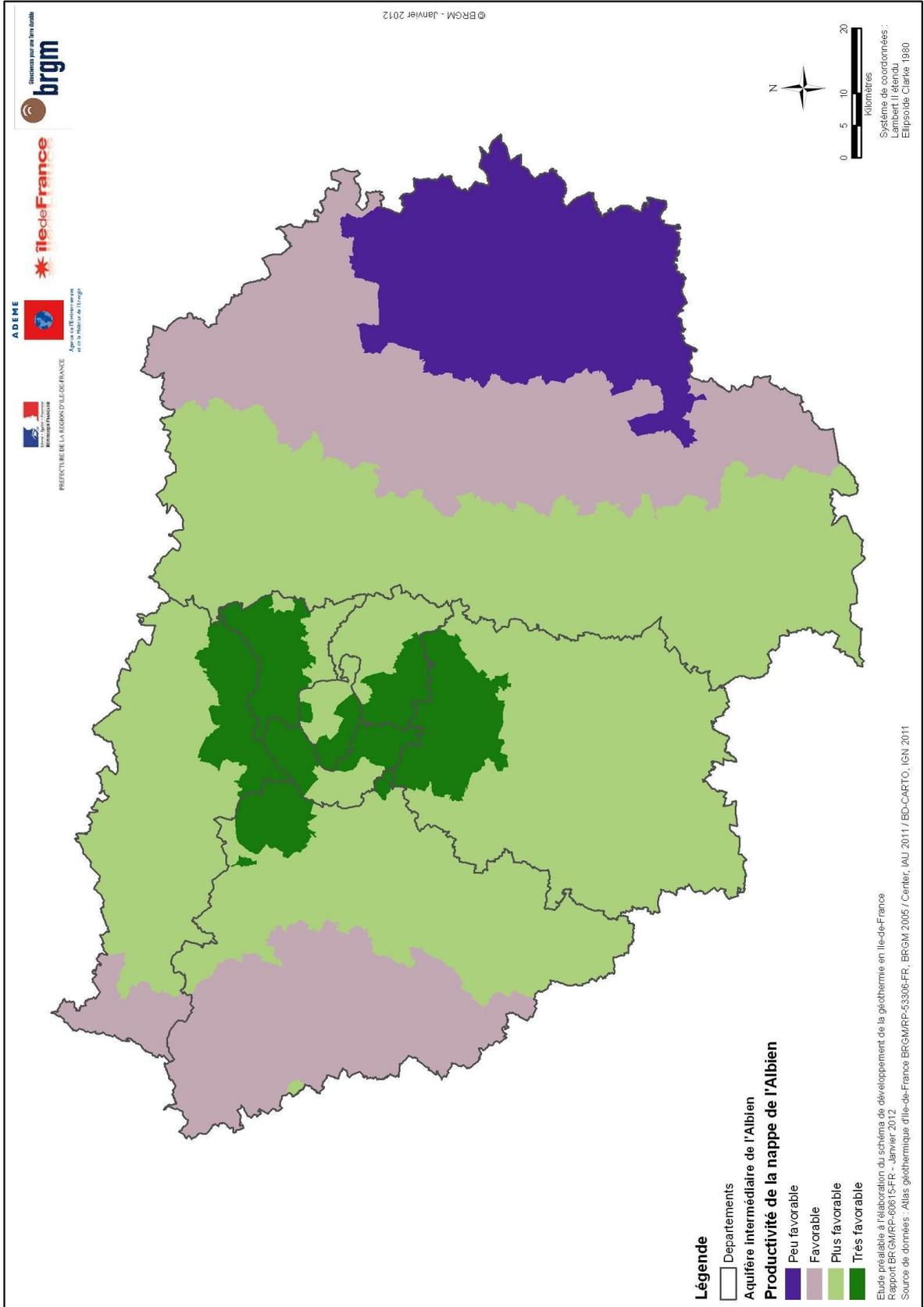


Figure 48 - Carte de productivité de l'aquitifère de l'Albien à l'échelle communale.

b. Aquifère du Néocomien

L'aquifère multicouches du Néocomien-Barrémien se situe dans le niveau inférieur du Crétacé inférieur et circule dans des formations d'argiles sableuses, montrant d'importantes variations latérales de faciès et intercalées de grès fins peu consolidés. Les niveaux imperméables ou semi-imperméables d'extension limitée ou d'épaisseur non significative ne permettent pas de séparer nettement l'aquifère du Néocomien-Barrémien en plusieurs aquifères distincts et indépendants. Les faciès calcaires du sud-est ne sont pas considérés comme aquifères. Enfin, le Néocomien peut être en communication avec les niveaux sous-jacents du Jurassique supérieur dans certains secteurs.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
CRETACE INFERIEUR			
CRETACE INFERIEUR	Barrémien	<i>Argiles bariolées à intercalations de grès et de sables lenticulaires</i>	Aquifère multicouches du Néocomien-Barrémien
	Néocomien	Argiles sableuses avec intercalations de grès fins peu consolidés	
JURASSIQUE			

Figure 49 - Lithostratigraphie simplifiée du Néocomien-barrémien en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

Barrémien

On distingue deux niveaux dans le Barrémien :

- Barrémien supérieur : ce niveau est identifiable par l'apparition d'argile bariolée, versicolore, rouge. Ce niveau constitue un ensemble argilo-sableux à forte variation de faciès et d'épaisseur. Les sables sont fins à très fins, parfois argileux. Vers la base, les couches sont de plus en plus sableuses ;
- Barrémien inférieur : ce niveau est à dominante argileuse avec un enrichissement en sables vers la base.

Néocomien

Le niveau du Néocomien correspond à un ensemble diffus argileux-sableux. Il est possible de distinguer deux niveaux au sein du Néocomien :

- Hauterivien : ce niveau est composé d'horizons sableux qui peuvent contenir des hydrocarbures (Gâtinais-Sénonais). Les niveaux sableux sont réguliers et, en direction du sud, ils peuvent former une unité indivisible qui évolue latéralement vers un faciès carbonaté (sud de la Brie) ;
- Valanginien : ce niveau débute par un niveau argileux avant de passer à un niveau grossièrement détritique, d'extension générale dans le bassin parisien. Les sables du Valanginien inférieur sont blancs, subanguleux et parfois accompagnés de lignite. Ils sont homogènes et contiennent un faible pourcentage d'argiles. Cet étage constitue la base du Crétacé inférieur ;
- dans les zones où ces niveaux sont peu différenciables, ils sont regroupés sous le nom « Wealdien », ce qui généralement rencontré dans la moitié nord du Bassin parisien. Dans ce cas, les formations rencontrées correspondent à un mélange de ce qui a pu être observé dans les niveaux de l'Hauterivien et du Valanginien.

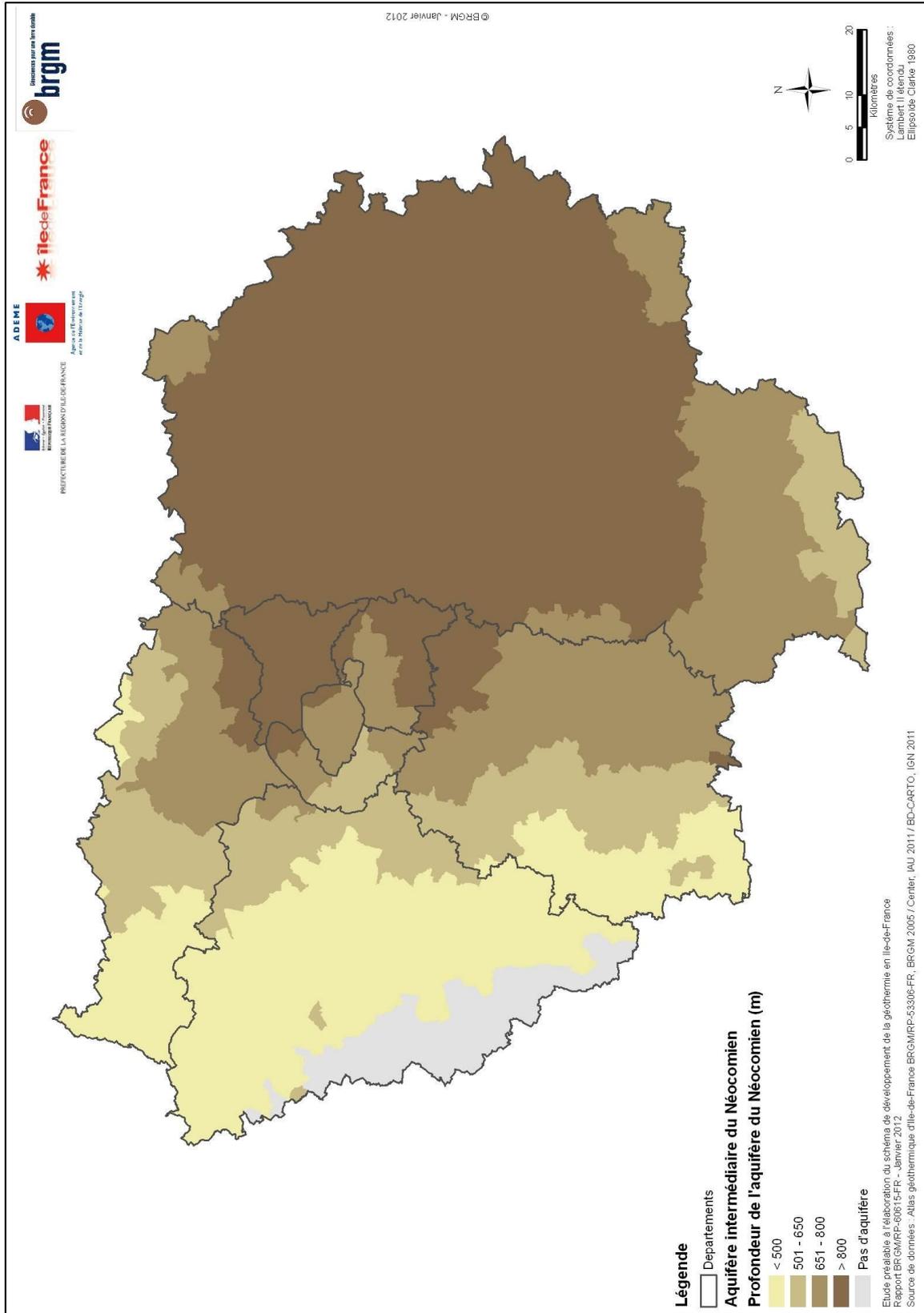


Figure 50 - Carte des valeurs moyennes de profondeurs des sables de l'Albien à l'échelle communale.

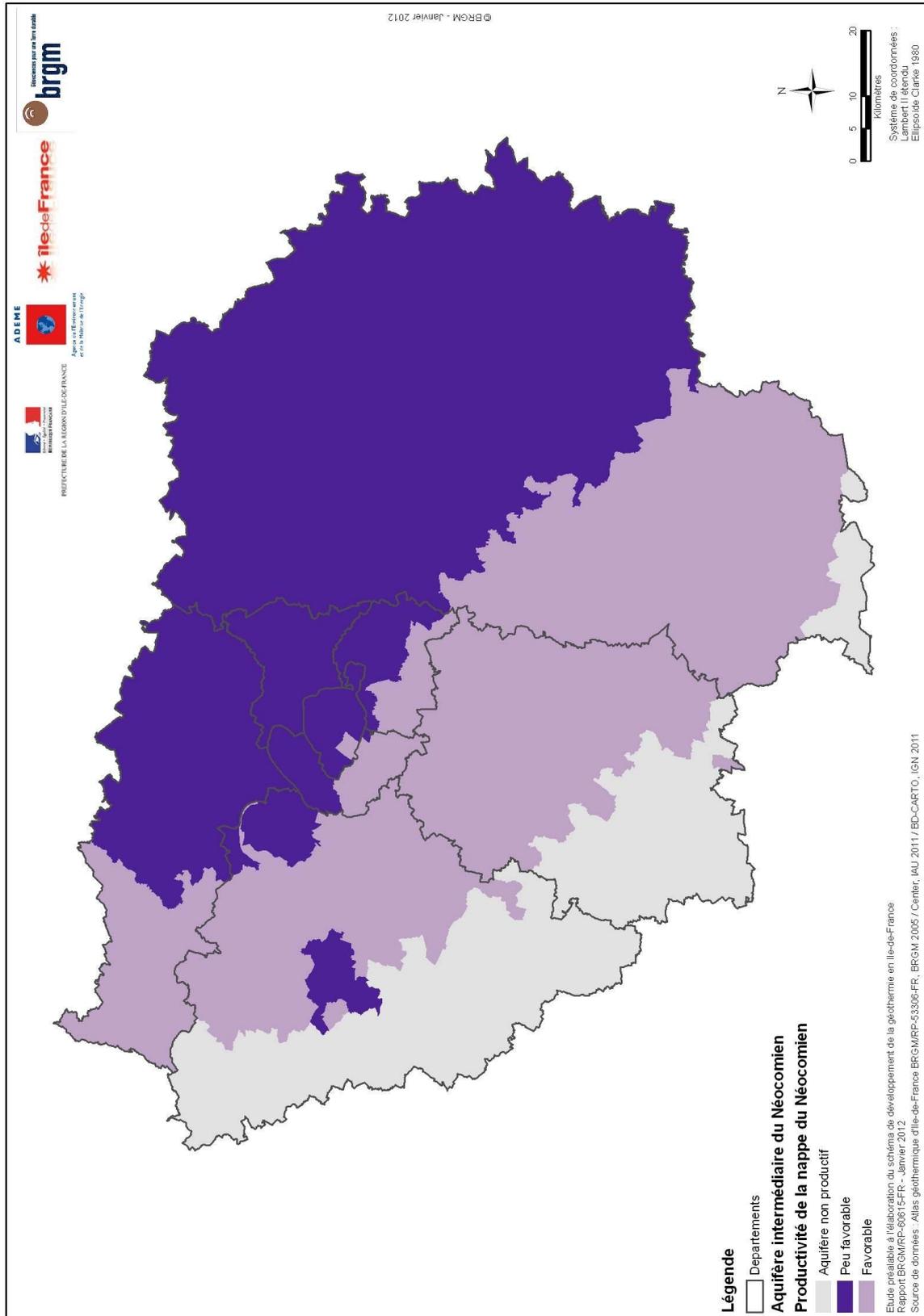


Figure 51 - Carte de productivité de l'aquifère de l'Albien à l'échelle communale.

Caractéristiques de la nappe du Barrémien/Néocomien

L'aquifère du Néocomien-Barrémien correspond à un ensemble diffus argileux-sableux. Les bancs argileux à perméabilité réduite étant discontinus et d'épaisseur plus ou moins réduite, la communication entre les bancs sableux est rendue possible. Ainsi, le Néocomien-Barrémien constitue un seul et même système aquifère. Cet aquifère est un aquifère captif. Circulant entre deux niveaux imperméables, la nappe est en charge.

Le toit de l'aquifère du Néocomien est situé, en région Île-de-France, à une profondeur variant d'environ 100 m à l'extrême ouest de la région à plus de 1 000 m en Seine-et-Marne. La carte 3-14 présente des valeurs moyennes, à l'échelle de la commune, de la profondeur de l'aquifère des sables du Néocomien. La profondeur moyenne du toit de l'aquifère donne un ordre de grandeur de la profondeur de forage minimum à atteindre pour capter la nappe du Néocomien.

Dans l'ensemble, les transmissivités du Néocomien sont plus faibles de celles de l'Albien avec des valeurs inférieures à $200 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ qui peuvent s'expliquer par une plus faible granulométrie des sables. De plus, la zone productive de la nappe du Néocomien, caractérisée à partir des valeurs de transmissivités observées, est moins étendue que celle de l'Albien :

- peu favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien inférieure à $50 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- favorable : transmissivité de la nappe de l'Albien comprise entre 50 et $160 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ces données, issue de la synthèse hydrogéologique du crétacé inférieur du bassin de Paris, d'octobre 1997, sont présentées en figure 3-15.

c. Malm– Lusitanien

Le terme « Lusitanien » désigne l'ensemble lithologique des dépôts essentiellement carbonatés bien individualisés dans la série stratigraphique Kimméridgien-Oxfordien. L'aquifère du Lusitanien est composé de trois réservoirs dont le principal est constitué des calcaires oolithiques et graveleux du Rauracien (sous étage de l'Oxfordien).

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
CRETACE INFÉRIEUR			
JURASSIQUE SUPERIEUR (MALM)	Portlandien	<i>Calcaires et grès</i>	
	Kimmeridgien	<i>Marnes noires</i>	
	Oxfordien	Calcaires récifaux oolithiques	Aquifère du Lusitanien
		<i>Marnes noires</i>	
JURASSIQUE MOYEN			

Figure 52 - Lithostratigraphie simplifiée du Lusitanien en région Île-de-France.

Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

L'aquifère du Lusitanien est relativement méconnu du fait de la présence de l'aquifère du Dogger, qui, bien que plus profond que le Lusitanien, est très productif. Les études de B. Bouniol³¹ ont

³¹ **Bouniol B.** (1985) – Étude d'un réservoir géothermique carbonaté : le Lusitanien de la Région parisienne – BRGM/AFME – n° 85 04.

Bouniol B. (1982) – Évaluation du potentiel géothermique du Lusitanien dans le Bassin parisien, BRGM.

montré que dans certaines régions de l'Île-de-France, il pouvait néanmoins constituer une alternative intéressante au Dogger pour la géothermie profonde.

Une étude, cofinancée par le CR Île-de-France, l'ADEME Île-de-France et le BRGM est en cours et devrait être publiée en 2012.

3. L'AQUIFÈRE PROFOND DU DOGGER

L'aquifère du Dogger correspond à des dépôts à dominante calcaire d'âge Jurassique Moyen, compris entre les marnes du sommet du Lias (Toarcien) et les marnes du Callovien Inférieur. En région parisienne, les dépôts du Jurassique Moyen correspondent globalement à une période de mise en place de plates-formes carbonatées, avec une variabilité verticale et horizontale très importante et une dégradation des caractéristiques à l'approche du sillon marneux à l'ouest et au sud de Paris.

Système	Sous-étage	Unités Lithostratigraphiques	Unités Hydrogéologiques
JURASSIQUE SUPERIEUR (MALM)	Callovien	<i>Barrière argileuse callovo-oxfordienne</i>	
JURASSIQUE MOYEN (DOGGER)	Bathonien	Calcaires feuilletés et marno-calcaires	Aquifère du Dogger
	Bajocien	Calcaire de base, calcaire à entroques	
	Aalénien	Grès Calcaires	
JURASSIQUE INFÉRIEUR (LIAS)	Toarcien	<i>Argiles, marnes et schistes</i>	
TRIAS (KEUPER)			

Figure 53 - Lithostratigraphie simplifiée du Dogger en région Île-de-France.
Tous les niveaux ne sont pas présents sur l'ensemble du territoire étudié.

L'essentiel de la production (50 à 70 %) provient de deux niveaux qui présentent des phénomènes de dissolution et de fracturation favorisant des productivités localement élevées (> 200 m³/h) :

- Calcaires oolithiques de barrière ;
- Calcaires du Comblanchien.

La partie inférieure du réservoir, constituée d'alternances, devient progressivement moins perméable en raison de phénomènes de compaction et de cimentation³².

4. L'AQUIFÈRE PROFOND DU TRIAS

Les grès du Trias et localement ceux du Permien constituent les derniers réservoirs profonds du Bassin Parisien et sont situés localement à plus de 2 000 m de profondeur au droit de la région Île-de-France.

³² Roux J.C. (2006) - Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM Éditions EDV-STC003, 956 p., 2 tomes en coffret.

Les ensembles détritiques du Trias constituent des réservoirs hétérogènes dont les caractéristiques sont mal connues. Les qualités des réservoirs sont cependant certaines sur la bordure des dépôts mais diminuent au fur et à mesure qu'ils s'enfoncent au vers le centre du Bassin.

Des études ponctuelles de recherche par forage de gîtes géothermiques dans l'aquifère du Trias peuvent renseigner les caractéristiques du réservoir très localement.

Annexe 2

Bilan de la géothermie francilienne en 2011

LES OPÉRATIONS DE PAC DANS LE RÉSIDENTIEL COLLECTIF ET TERTIAIRE

Les opérations dont la mise en service est prévue en 2011 comprennent :

- l'opération de la Maison de la Radio ;
- les nouvelles opérations estimées au nombre de 10, dans la proportion de 20 % de sondes.

Bilan énergétique et climatique (2011)	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
PAC sur aquifères	74	5 696	35 240	6 881
PAC sur champ de sondes	14	1 005	6 219	1 134
PAC résidentiel collectif et tertiaire	88	6 701	41 459	8 015

Au cours de l'année 2011, on peut considérer que **1 400** équivalent-logements supplémentaires (Maison de la Radio comprise) seront alimentés, ce qui correspondra, fin 2011, globalement à **6 800** équivalent-logements pour ces deux systèmes d'exploitation : **5 800** sur aquifères, et **1 000** sur champs de sondes.

L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES INTERMÉDIAIRES

L'opération à l'Albien de la maison de la radio a été modifiée : Un ensemble de quatre doublets (400 m³/h au total) sur une nappe superficielle, avec PAC, sera désormais le système d'exploitation. Du fait de cette évolution, cette opération, comptabilisée en fonctionnement à l'albien en 2010, est comptabilisée sur aquifère superficiel pour 2011.

Deux opérations supplémentaires devraient être mises en service au cours de l'année 2011 :

- l'une à Issy-les-Moulineaux (Albien) ;
- l'autre au Plessis-Robinson (Néocomien).

Ainsi, fin 2011, environ **9 000** équivalent-logements seront alimentés par des aquifères intermédiaires.

Bilan énergétique et environnemental (2011)	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ (évitées / an)
Opération sur aquifères intermédiaires	4	4 684	24 606	9 083

L'EXPLOITATION DU DOGGER

Les principales caractéristiques des opérations au Dogger en 2011 sont les suivantes :

Nombre d'opérations	32
Nombre d'installations géothermales	37
Énergie substituée (MWh utiles)	1 057 400
Énergie substituée (tep)	108300
Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	1 721 300
Tonnes de CO ₂ évitées annuellement	252720

Les opérations d'ADP, de la CPCU et de Val Maubuée ont été prises en compte.

Le rendement annuel moyen des opérations annuel des générateurs des énergies substituées a été considéré égal à 84 %.

BILAN 2011

2011	Nombre d'opérations	Tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	Tonnes de CO ₂ évitées annuellement
Opérations très basse énergie	88	6 701	41 459	8 015
Opérations sur les aquifères intermédiaires (Albien et Néocomien)	4	4 684	24 606	9 083
Opérations aux Dogger	32	108 259	1 761 363	252 720
Total 2011		119 644	1 827 428	269 818

Annexe 3

Les contraintes réglementaires et techniques

La mise en place d'un projet de géothermie doit s'assurer de la compatibilité du site et des conditions d'implantation des ouvrages et installations de prélèvement avec les orientations, restrictions ou interdictions applicables à la zone concernée.

Il s'agit en particulier de prendre en considération la réglementation applicable en géothermie mais aussi de respecter les contraintes associées aux mesures générales de protection des ressources en eau et aux documents d'urbanisme (Plan Local d'Urbanisme, Plan de Prévention des risques). Différents zonages peuvent alors présenter une contrainte à la réalisation d'une opération de géothermie : les zones concernées par un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, les Zones de Répartition des Eaux, les périmètres de protection d'un captage de prélèvement d'eau potable, les zones soumises à un Plan de Prévention des Risques Naturels, les périmètres de protection des stockages souterrains.

Les zones de protection des espaces et milieux naturels terrestres en région Île-de-France peuvent, dans certains cas, représenter une contrainte pour la mise en place d'un projet de géothermie. Elles sont donc aussi mentionnées dans ce chapitre.

RÉGLEMENTATION NATIONALE APPLICABLE EN GÉOTHERMIE

Les opérations de géothermies entrent dans le champ d'application de différents codes réglementaires : code Minier et code de l'Environnement concernent les cas les plus fréquents ; code de la santé publique et code général des collectivités territoriales peuvent s'appliquer dans certains cas particuliers.

En fonction de leurs caractéristiques techniques (profondeur, puissance extraite, débit d'exploitation), les opérations géothermiques peuvent être soumises à différents régimes d'autorisation ou de déclaration qui supposent le montage de dossier administratifs plus ou moins approfondis selon les cas et des circuits d'approbation administrative plus ou moins long.

Les principaux textes réglementaires qui s'appliquent à l'exploitation des eaux souterraines par forage et à l'exploitation des calories souterraines sont succinctement présentés dans ce chapitre. Pour en savoir plus, se référer au rapport concernant la réglementation en vigueur régissant la géothermie³³.

Le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, du Transport et du Logement mène actuellement une réflexion visant à faire évoluer la réglementation en vigueur de façon à l'adapter aux types d'opérations géothermiques qui se développent actuellement (très basse énergie, souvent faible profondeur et faible puissance).

Un rapport présentant la réglementation nationale en vigueur est disponible : BRGM/RP-60195-FR /*Synthèse de la réglementation codifiant la recherche et l'exploitation de l'énergie géothermique*.

³³ **Bézèlques-Courtade S., Martin J.C.** (2011) – Synthèse de la réglementation française codifiant la recherche et l'exploitation de l'énergie géothermique. Rapport final. BRGM/RP-60195-FR, 110 p., 8 ann.

LES RÉGLEMENTATIONS TERRITORIALISÉES

Certaines portions du territoire francilien, du fait de particularités naturelles, font l'objet de mesures de protection susceptibles d'impacter le dimensionnement d'un projet de géothermie voire, de l'interdire. Les dispositifs de protection les plus courants sont présentés ici.

Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE)

En France, les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) sont établis par grands bassins hydrographiques et constituent les premiers « plans de gestion » des eaux. En Île-de-France, le SDAGE Seine-Normandie est un document de planification qui fixe les grandes orientations de la politique de l'eau sur le bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands. Introduit par la loi sur l'eau de 1992, le premier SDAGE du bassin est entré en vigueur en 1996 mais en 2000, l'adoption de la directive cadre sur l'eau (DCE) a modifié le contexte institutionnel dans lequel s'inscrivait le SDAGE. La DCE engage en effet les états membres à mettre en place les outils nécessaires pour atteindre le bon état des eaux de surface -cours d'eau, eaux côtières, lacs et lagunes- et des eaux souterraines d'ici 2015.

Le SDAGE fixe ainsi les orientations d'une gestion équilibrée de la ressource en eau, ainsi que les objectifs à atteindre pour chaque masse d'eau (unité de découpage élémentaire du bassin). Comme demandé par la DCE, le SDAGE est accompagné d'un programme de mesures, qui décline ses grandes orientations en actions concrètes (amélioration de certaines stations d'épuration, restaurations des berges de certains cours d'eau, etc.)

Ces documents ont été approuvés par le préfet coordonnateur du bassin Seine-Normandie, préfet de la région Île-de-France, par [arrêté du 20 novembre 2009](#).

Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE)

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est un document de planification institué par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et élaboré de manière collective, pour un périmètre hydrographique cohérent. Il fixe des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau. Dans le prolongement du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), il décline au niveau d'un bassin versant (eaux superficielles) ou d'une nappe d'eau souterraine, les actions et moyens à mettre en œuvre pour gérer et garantir au mieux les usages de l'eau.

Du point de vue de sa nature juridique, le SAGE, tout comme le SDAGE, est un acte réglementaire qui présente quatre caractéristiques :

- il est opposable à l'administration (État, collectivités locales, établissements publics...) ;
- depuis la nouvelle Loi sur l'eau adoptée le 30 décembre 2006, il est également opposable aux tiers. Cela signifie que les modes de gestion, les projets ou les installations d'un tiers doivent être conformes avec le règlement du SAGE. En cas de non-respect, les contrevenants pourront être verbalisés ;
- il ne crée pas de droit, mais fixe des objectifs généraux en terme de qualité des eaux, de gestion de la ressource (aspect quantitatifs), de préservation des milieux naturels et de gestion du risque d'inondation, ainsi que des priorités pour les atteindre ;
- ses objectifs généraux s'imposent à l'administration de manière plus ou moins forte selon que celle-ci intervient dans le domaine de l'eau et de l'aménagement du territoire ou non.

Territoires SAGE	Avancement	Superficie	Nombre de communes
Mauldre	Mise en œuvre	420 km ²	53
Orge-Yvette	Mise en œuvre	940 km ²	116
Nappe de Beauce	Élaboration	9700 km ²	681
Yerres	Élaboration	1017 km ²	121
Petit et Grand Morin	Élaboration	1840 km ²	175
Bièvre	Élaboration	200 km ²	56
Marne Confluence	Élaboration	274 km ²	55
Croult-Vieille-Mer-Enghien	Émergence	446 km ²	87

Liste des SAGE en région Île-de-France - Source: DRIEE IF et <http://www.gesteau.eaufrance.fr/>

Lorsqu'il est situé à l'intérieur du périmètre d'un SAGE, un prélèvement d'eau à usage géothermique (soumis à déclaration ou à autorisation) doit être compatible avec les objectifs généraux et le règlement de celui-ci (Art. L.212-5-2 du Code de l'Environnement). Le règlement d'un SAGE peut limiter localement (voir interdire) l'usage géothermique des eaux souterraines.

Zones de Répartition des Eaux (ZRE)

Les Zones de Répartition des Eaux, comprenant les bassins, sous-bassins, fractions de sous-bassins hydrographiques et systèmes aquifères, ont été instituées au niveau national par les décrets n° [94-354 du 29 avril 1994](#) et n° [2003-869 du 11 septembre 2003](#), pris en application des articles L.211-2 et L.211-3 du Code de l'Environnement. Ce sont des zones où sont constatées une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins. Dans chaque département concerné, la liste de communes incluses dans une zone de répartition des eaux est constatée par arrêté préfectoral.

Dans les communes classées en ZRE, les [seuils d'autorisation et de déclaration pour les prélèvements](#) sont abaissés par le biais de l'application de la rubrique 1.3.1.0 de la nomenclature Eau (article R214-1 du Code de l'Environnement). Tous les prélèvements d'eau superficielle ou souterraine, à l'exception de ceux inférieurs à 1 000 m³/an réputés domestiques (voir paragraphe du Code des Collectivités Territoriales), sont soumis à autorisation ou déclaration dans les conditions suivantes :

- capacité maximale des installations de prélèvement supérieure à 8 m³/h : autorisation au lieu de 80 m³/h dans le cas général ;
- capacité maximale des installations de prélèvement supérieure à 1 000 m³/an mais inférieure à 8 m³/h : déclaration.

Les prélèvements en eau réalisés à des fins géothermiques dans une nappe classée en Zones de Répartition des Eaux sont contraints par l'abaissement des seuils réglementaires d'autorisation et de déclaration. Cette restriction ne s'applique pas aux installations géothermiques qui fonctionnent en doublet, avec réinjection dans l'aquifère après prélèvement.

Certaines nappes localisées en région Île-de-France connaissent des tensions du fait de leur surexploitation qui justifient des mesures de gestion sur le long terme, pour les plus importantes. L'[arrêté cadre n° 2009-1028 du 31 juillet 2009](#) relatif à la mise à jour des Zones de Répartition des Eaux dans le bassin Seine-Normandie classe les trois nappes de Beauce, du Champigny et de l'Albien-Néocomien en ZRE.

- **La nappe de Beauce**

La nappe de Beauce (ainsi que les cours d'eau exutoires de la nappe) étant intensément exploitée, voire surexploitée dans certains secteurs, elle fait désormais l'objet d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE Nappe de Beauce) qui a également été reclassé en Zone de Répartition des Eaux (ZRE B1 – Nappe de Beauce). Un arrêté cadre inter-bassin (Loire-Bretagne et Seine-Normandie) fixe en début d'année le volume maximum prélevable sur l'année.

<http://www.sage-beauce.fr/>

- **La nappe du Champigny**

La nappe du Champigny est en situation de tension quantitative structurelle avérée : les prélèvements actuels sur cette nappe ne permettent pas une gestion équilibrée de la ressource en eau, menant à un niveau de la nappe particulièrement bas depuis plusieurs années et des mesures de sécheresse quasi permanentes.

Une gestion spécifique regroupant les différents acteurs est progressivement élaborée et mise en œuvre pour résoudre les conflits d'usage dans le cadre d'une concertation animée par [l'association AQUI'Brie](http://www.aquibrie.fr) (<http://www.aquibrie.fr>). Cette nappe fait également l'objet d'un arrêté cadre interdépartemental spécifique (Seine et Marne et Val de Marne) fixant des seuils piézométriques à partir desquels des mesures de restrictions des usages de l'eau sont pris.

L'[arrêté n° 2009/DDEA/SEPR/497 du 12 Octobre 2009](#) constate la liste des communes incluses dans la zone de répartition de la nappe du Champigny.

- **La nappe de l'Albien-Néocomien**

L'Albien-Néocomien est une formation inférieure du bassin sédimentaire de Paris, elle est étendue sous la « cuvette » parisienne et déborde du bassin de la Seine sur le bassin de la Loire. Cette formation aquifère affleure à la bordure du bassin (partie libre constituant les ME 3 214 à 3 217), et partant de ces affleurements elle s'enfonce progressivement vers le centre du bassin où elle constitue la vaste masse d'eau de l'Albien – Néocomien captif (ME 3 218). Cette nappe constitue une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours de l'agglomération parisienne. Complémentairement à l'adoption d'un dispositif de gestion dans le cadre de la révision du SDAGE, la nappe de l'albien-néocomien est classée en [Zone de Répartition des Eaux \(ZRE B5\)](#).

[Lien vers le SDAGE Seine-Normandie](#) : Site de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie

Périmètres de protection des captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP) et de sources

Les périmètres de protection de captage, dans lesquels les activités susceptibles de polluer la ressource en eau souterraine (construction, mise en place d'une opération de géothermie...) sont interdites ou soumises à prescription particulière, sont établis autour des sites de captages d'eau destinée à la consommation humaine. Leur objectif est de réduire les risques de pollutions ponctuelles et accidentelles de la ressource. Les périmètres de protection de captage sont définis par l'[article L-1321-2](#) du Code de la Santé Publique et ont été rendus obligatoires pour tous les ouvrages de prélèvement d'eau d'alimentation depuis la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

Cette protection, mise en œuvre par l'Agence Régionale de Santé (ARS) et les délégations territoriales, comporte trois niveaux établis à partir d'études réalisées par des hydrogéologues

agréés en matière d'hygiène publique : Ils sont définis à trois échelles correspondant à trois niveaux de protection :

- Le périmètre de protection immédiate : site de captage clôturé (sauf dérogation) appartenant à une collectivité publique, dans la majorité des cas. Toutes les activités y sont interdites hormis celles relatives à l'exploitation et à l'entretien de l'ouvrage de prélèvement de l'eau et au périmètre lui-même. Son objectif est d'empêcher la détérioration des ouvrages et d'éviter le déversement de substances polluantes à proximité immédiate du captage.
- Le périmètre de protection rapprochée : secteur plus vaste (en général quelques hectares) pour lequel toute activité susceptible de provoquer une pollution y est interdite ou est soumise à prescription particulière (construction, dépôts, rejets...). Son objectif est de prévenir la migration des polluants vers l'ouvrage de captage.
- Le périmètre de protection éloignée : facultatif, ce périmètre est créé si certaines activités sont susceptibles d'être à l'origine de pollutions importantes. Ce secteur correspond généralement à la zone d'alimentation du point de captage, voire à l'ensemble du bassin versant.

L'arrêté préfectoral d'autorisation de prélèvement et d'institution des périmètres de protection fixe les servitudes de protection opposables au tiers par déclaration d'utilité publique (DUP). Il conviendra donc de se reporter aux arrêtés de mise en place des périmètres de protection de captage pour identifier d'éventuelles contraintes à la réalisation de dispositifs géothermiques.

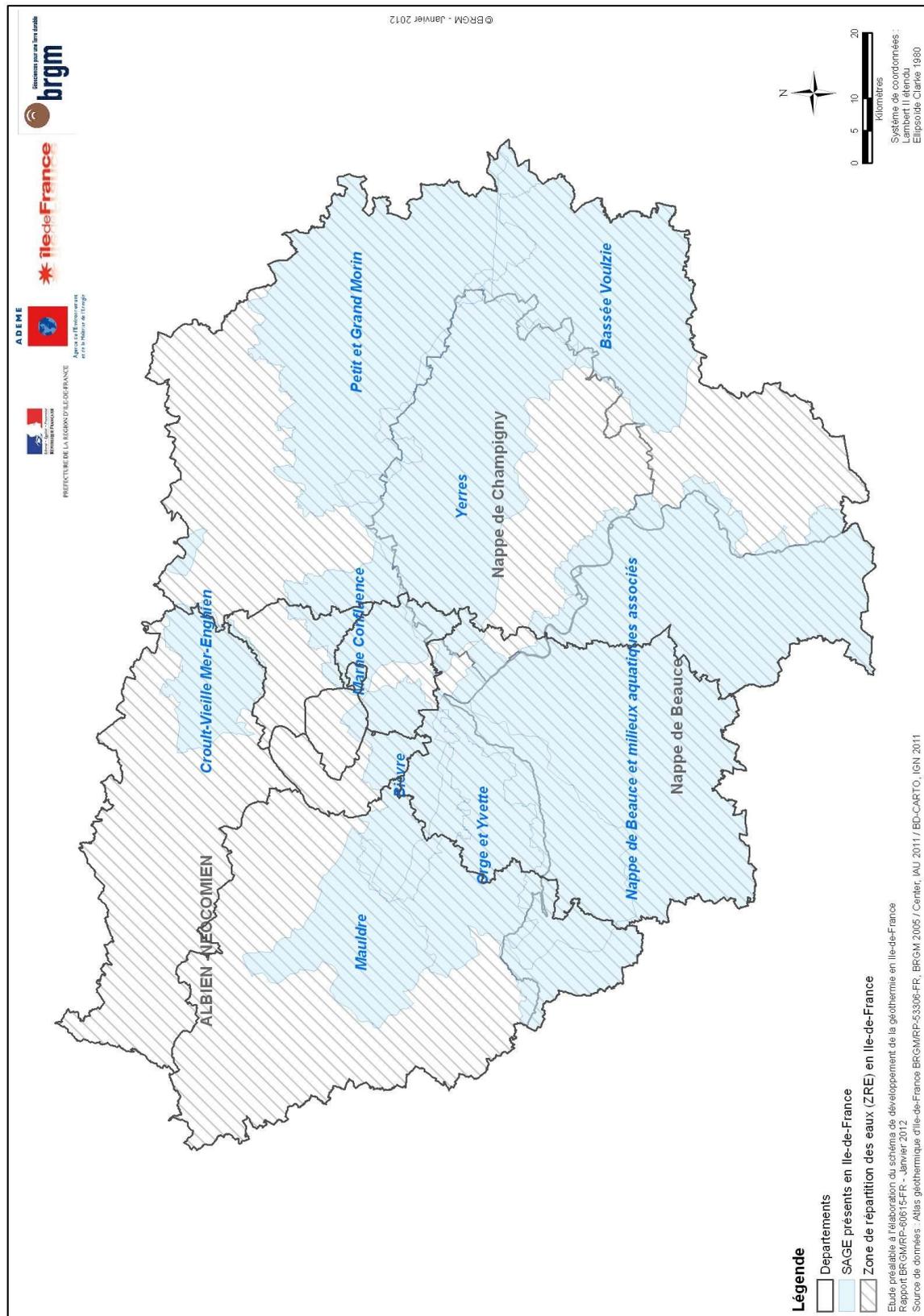


Figure 54 - Cartographie des SAGE et des ZRE en Île-de-France.

COHÉRENCE AVEC LES DOCUMENTS D'URBANISME ET INFORMATIONS CARTOGRAPHIQUES

Les documents d'urbanisme spécifiques à chaque commune ou EPCI (Établissement Public à Caractère Intercommunal) peuvent présenter des contraintes spécifiques pour la mise en place d'opérations de géothermie. Ces documents, et notamment les cartes associées, permettent également de donner des indications sur les conditions techniques d'accès à la ressource (cartographie des cavités, zones de gypse...).

Plan Local d'Urbanisme (PLU)

Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) fixe, à l'échelle de la commune, et éventuellement de l'intercommunalité, les dispositions en matière d'urbanisme. C'est un document de planification qui doit fixer les règles générales d'utilisation du sol.

Plan de prévention des Risques Naturels (PPRN), annexe du PLU

La densité urbaine, l'importance des biens, la valeur patrimoniale, la complexité du fonctionnement de l'agglomération, rendent l'Île-de-France particulièrement sensible aux risques naturels. Elle est confrontée au **risque d'inondation** (par débordement de cours d'eau ou par ruissellement) qui représente un potentiel majeur de dommages économiques. Elle est également largement exposée aux **risques de mouvements de terrains**, liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ou à la présence de cavités souterraines d'origines diverses (anciennes carrières de calcaire, craie ou gypse, ou dissolution du gypse).

Le Plan de Prévention des Risques Naturels, institué par la loi Barnier du 2 février 1995, est un outil réglementaire créé par l'article L.562-1 du Code de l'Environnement qui est réalisé par les préfetures de département en association avec les communes et en concertation avec la population. Ce document délimite et réglemente les zones exposées aux risques naturels, caractérise l'intensité possible de ces phénomènes et établit des règles d'urbanisme et de construction à mettre en œuvre afin de réduire l'exposition au risque ainsi que la vulnérabilité des personnes et des biens situés dans ces secteurs.

Il prévoit l'information préventive des citoyens, la protection par les collectivités et l'État des lieux habités, les plans de secours et d'évacuation. Les PPRN peuvent donc contraindre la mise en place d'opérations de géothermie sur certains secteurs. La nature des restrictions est spécifiquement définie dans le règlement de chaque PPRN et leur emprise, dans la cartographie du zonage réglementaire associée.

Les dispositions du PPR doivent être respectées pour la délivrance des autorisations d'utilisation et d'occupation du sol (permis de construire, lotissement, déclaration de travaux, etc.). Les réglementations s'appliquent tant aux futures constructions qu'aux constructions existantes dans le but de maîtriser et réduire leur vulnérabilité. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions.

Lien vers le site Internet Cartorisque : <http://cartorisque.prim.net/>

Lien vers le site Internet VisioRisk : <http://www.visiorisk.com>

Le Risque Inondation et le PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation)

Le risque inondation par débordement de rivière est le risque naturel majeur commun à l'ensemble des huit départements de la région Île-de-France. Il concerne plus d'un million de franciliens. En effet, l'Île-de-France est le point de rencontre d'importants cours d'eau, tels que la Seine, la Marne,

l'Oise ou l'Yonne, drainant un bassin versant d'une superficie de 64 000 km² en sa sortie, soit cinq fois la superficie de la région Île-de-France.

Le PPRI a pour objectif de réduire les risques en fixant les règles relatives à l'occupation des sols et à la construction des futurs biens. Il peut également fixer des prescriptions ou des recommandations applicables aux biens existants. Les nouvelles constructions peuvent être interdites, limitées à certaines catégories de biens, ou encore assujetties à l'emploi de matériaux résistant à une immersion prolongée.

En région Île-de-France, l'aléa retenu est la carte des Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) délimitant l'emprise des zones inondables et précisant la hauteur d'eau atteinte par la crue de 1910. Cette carte, réalisée par la DRIEE sert de référence à l'élaboration du zonage réglementaire des PPRI.

Dans le document graphique des zones de différentes couleurs sont délimitées correspondant aux différents enjeux à protéger :

- centre urbain inondable (zone bleue) ;
- zones urbaines denses et autres espaces urbanisés ;
- zones d'expansion des crues (zone rouge).

Le PPRI peut limiter l'implantation des [ICPE](#) dans certaines zones :

- en interdisant les ICPE relevant de certaines rubriques de la nomenclature ;
- en autorisant uniquement les extensions ;
- en autorisant seulement les ICPE soumises à déclaration.

De plus, il peut prescrire la mise en place de mesures permettant de supporter une submersion prolongée, et de garantir l'absence de dommages portés à l'environnement pendant la submersion ; ce qui est susceptible d'impacter le dimensionnement d'une opération de géothermie.

Paris (75)	PPRI Paris
Val-de-Marne (94)	PPRI Val de Marne PPRI Val de Marne
Seine-et-Marne (77)	PPRI Seine et Marne
Hauts-de-Seine (92)	PPRI Hauts de Seine
Seine-Saint-Denis (93)	PPRI Seine Saint Denis PPRI Seine Saint Denis
Yvelines (78)	PPRI Yvelines PPRI Yvelines
Essonne (91)	
Val-d'Oise (95)	PPRI Val d'Oise PPRI Val d'Oise

Liens Internet vers les PPRI par département.

Le risque Mouvement de Terrain et le PPRMT (Plan de Prévision des Risques de Mouvements de Terrain)

Le PPR « mouvements de terrain » (PPRMT) traite de l'ensemble des risques de mouvements de terrain connus et identifiés en région Île-de-France, à savoir :

- les risques de dissolution du gypse ;

- les risques d'effondrement d'anciennes carrières ;
- les risques de retrait-gonflement des sols argileux.

Le PPRMT peut prescrire ou recommander des dispositions constructives, telles que l'adaptation des projets et de leurs fondations au contexte géologique local, des dispositions d'urbanisme ou des dispositions concernant l'usage du sol. Ces recommandations doivent être prises en compte lors du dimensionnement d'un projet de géothermie.

L'aléa « mouvements de terrain » est divisé en plusieurs catégories suivant les caractéristiques de déplacement des masses mises en jeu :

- **les mouvements lents et continus** (les tassements et les affaissements, le retrait-gonflement des argiles et les glissements de terrain) ;
- **les mouvements rapides et discontinus** (les effondrements de cavités souterraines : l'évolution des cavités souterraines naturelles (dissolution de gypse) ou artificielles (carrières et ouvrages souterrains), les écroulements et les chutes de blocs, Les coulées boueuses et torrentielles).

En région parisienne, la plupart des périmètres de carrières ou de dissolution du gypse ont été définis par les préfets en vertu de l'ancien article R111-3 du Code de l'Urbanisme. Ces périmètres de risque valent plans de prévention des risques (PPR).

Lien vers la [base de données Cavité](#)

Lien vers la [base de données Mouvements de Terrains](#)

Paris (75)	-
Val-de-Marne (94)	PPRMNT Val de Marne
Seine-et-Marne (77)	PPRMNT Seine et Marne
Hauts-de-Seine (92)	PPRMNT Hauts de Seine
Seine-Saint-Denis (93)	PPRMNT Seine Saint Denis
Yvelines (78)	PPRMNT Yvelines PPRMNT Yvelines
Essonne (91)	-
Val-d'Oise (95)	PPRMNT Val d'Oise PPRMNT Val d'Oise

Tableau 13 - Liens Internet vers les PPRMNT par département.

Risque Cavités souterraines (PPRMT Carrière) - Gestion du risque dû aux anciennes carrières et à la dissolution du gypse en Île-de-France.

La région Île-de-France est concernée par trois principaux types de cavités souterraines :

- anciennes carrières souterraines ;
- vide karstique dû à la dissolution du gypse ludien ;
- vide karstique dû à la dissolution du gypse antéludien.

Ce risque reste généralement très localisé, unique et généralement non reproductible à l'identique en un point donné. La capitalisation et la diffusion de la connaissance sont donc des enjeux essentiels de la bonne gestion du risque cavité. Les Inspections Générales des Carrières assurent ces missions pour le compte des collectivités sur la quasi-totalité du territoire de la région (exception en Seine-et-Marne).

Les trois types de désordres rencontrés en Île-de-France sont les suivants³⁴ :

- les fontis (ou effondrements localisés) ;
- les décompressions de terrains en surface ;
- les effondrements généralisés.

Les anciennes carrières représentent dans la région (hors Seine-et-Marne) une superficie de près de 5 000 ha et une surface des zonages de risques plus étendue. Les carrières de calcaire grossier et de craie sont situées le long des vallées (92, 75, 94, 78 et 95), les marnières sur les plateaux (78 et 95) et les carrières de gypse sont localisées sur des buttes résiduelles d'un étage géologique particulier (superficie moindre, répartie sur l'ensemble de la région excepté le 91). Il est à noter que le département de l'Essonne présente très peu de carrières souterraines, excepté quelques marnières. Dans le département de Seine-et-Marne, il existe également de nombreuses carrières souterraines : le secteur des anciennes carrières souterraines de gypse au nord, le secteur des anciennes carrières souterraines d'argile au sud-est et le secteur des anciennes carrières souterraines de sables siliceux au sud.

Les zones à risque de dissolution du gypse sont principalement situées au nord de Paris, dans le département de Seine-Saint-Denis et en Seine-et-Marne ; elles représentent une superficie de près de 8 000 ha. Hors des secteurs de carrière, les circulations d'eau non saturées en sulfates entraînent des phénomènes de dissolution qui selon la nature des matériaux de couverture (résistants ou meubles) peuvent entraîner des effondrements localisés (fontis) ou des décompressions et des affaissements en surface.

Le gypse Ludien se présente en bancs superposés appelés masses. Le banc le plus élevé peut atteindre une épaisseur de 20 m. Les autres masses ont des épaisseurs de 2 à 8 m. Le gypse est également présent ponctuellement sous forme de lentilles contenues dans des couches de matériaux différents.

Risque Retrait gonflement des argiles (PPRMTS)

En fonction des conditions météorologiques, les sols argileux superficiels peuvent varier de volume suite à une modification de leur teneur en eau : retrait en période de sécheresse, puis gonflement au retour des pluies. Ces variations de volume des sols argileux, rarement uniformes, entraînent des tassements différentiels de terrain qui se manifestent par des désordres, certes lents donc a priori non dangereux pour l'homme, mais parfois très importants, affectant principalement les constructions d'habitation individuelles (fissurations des sols et des murs, dislocations des cloisons, ruptures des canalisations enterrées...).

La région d'Île-de-France présente de nombreuses couches argileuses (argiles vertes, marne, alluvions, limons, sables argileux...) dont le volume est particulièrement sensible aux variations de teneur en eau du sol.

Depuis plusieurs années, suite aux épisodes de sécheresse (1989/1990, 1996/1997), de canicule (2003), alternant avec des années pluvieuses, ces désordres se sont multipliés de façon préoccupante sur l'ensemble du territoire francilien.

³⁴ Référence : Document réalisé par la Direction régionale de l'Environnement d'Île-de-France - Bassin Seine-Normandie. Document de référence pour la prévention du risque cavités souterraines en Île-de-France. Version 1 validée – juin 2010.

La prévention du risque lié au retrait-gonflement des sols argileux qui n'interdit pas, en tout état de cause, la constructibilité d'un terrain mais implique des règles de construction à adapter en fonction de la nature du sol rencontré, intéresse trois axes particuliers :

- l'adoption de règles de construction simples et efficaces pour le bâti neuf (fondations adaptées, rigidité de la structure, désolidarisation des bâtiments accolés...);
- la gestion de l'eau autour du bâti (récupération des eaux pluviales, réseaux de canalisations d'eaux usées et d'eaux pluviales étanches, drainage à l'écart des fondations du bâti...);
- la gestion des arbres autour du bâti (éloignement des plantations, grillage adapté pour éviter la proximité des racines par rapport au bâti, choix préférentiel de certaines essences...).

Site internet : La carte des aléas : www.argiles.fr

Plan de Prévention de Risques Technologiques (PPRT)

Les PPRT sont un des nouveaux outils introduits par la [loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003](#) relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages en matière de maîtrise de l'urbanisation autour des sites à haut risque. Les PPRT concernent donc les établissements SEVESO à « hauts risques » dits AS. Ils sont régis par les articles [L.515-15 à L.515-25 du Code de l'Environnement](#). Les modalités d'application sont définies par le [décret n° 2005-1130 du 7 septembre 2005](#) relatif aux plans de prévention des risques technologiques. La [circulaire PPRT du 3 octobre 2005](#) définit, quant à elle, le périmètre d'étude et explicite la démarche de caractérisation de l'aléa technologique.

L'objectif de ces plans est de résoudre les situations difficiles en matière d'urbanisme héritées du passé et de mieux encadrer l'urbanisation future autour de ces sites. Ces plans auront pour effet de limiter l'exposition de la population aux conséquences des accidents.

Comme dans le cas des plans de prévention des risques naturels, c'est le Préfet qui prescrit, élabore, et approuve le plan par un arrêté après concertation, consultation des collectivités locales et enquête publique. Cet arrêté détermine le périmètre d'étude du plan, la nature des risques pris en compte, les services instructeurs (DRIEE, DDT) ainsi que la liste des personnes et organismes associés (élu, Comités Locaux d'Information et de Concertation (CLIC), représentants d'association, industriels). De plus, le PPRT vaut servitude d'utilité publique et doit être annexé au Plan Local d'Urbanisme (PLU).

Les PPRT délimitent, autour des installations classées à haut risque, des zones à l'intérieur desquelles des prescriptions peuvent être imposées aux constructions existantes et futures et celles à l'intérieur desquelles les constructions futures peuvent être réglementées. En particulier, à l'intérieur de ce périmètre la construction et l'exploitation des opérations géothermiques sera donc contrainte par les mesures d'interdiction et les prescriptions définies dans le règlement.

Pour rechercher une Installation Classée soumise à autorisation : [Base des Installations Classées](#).

Lien vers le site Internet national de l'[Inspection des Installations Classées](#) du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer.

En Île-de-France grande couronne, il y a 22 PPRT concernant :

- 18 installations classées pour l'environnement (IPCE) ;
- 4 stockages souterrains de gaz.

Départements	Installations	Communes d'implantation	Documents disponibles
Seine-et-Marne	KERAGLASS	Bagneaux-sur-Loing	PPRT
Seine-et-Marne	CCMP et GAZECHIM	Compans et Mitry-Mory	PPRT
Seine-et-Marne	SICA	Gouaix	PPRT
Seine-et-Marne	TOTAL et GPN	Grandpuits-Bailly-Carrois	PPRT
Seine-et-Marne	COGNIS	Meaux	PPRT
Seine-et-Marne	SOGIF	Moissy-Cramayel	PPRT
Seine-et-Marne	BUTAGAZ et YARA FRANCE	Montereau-Fault-Yonne	PPRT
Seine-et-Marne	KUEHNE + NAGEL	Savigny-le-Temple	PPRT
Seine-et-Marne	BRENNTAG	Tournan-en-Brie	PPRT
Yvelines	Raffinerie du Midi et TRAPIL	Coignières	PPRT
Yvelines	Total France	Gargenville	PPRT
Essonne	SMCA	Athis-Mons	PPRT
Essonne	Compagnie Industrielle Maritime et ANTARGAZ	Grigny et Ris-Orangis	PPRT
Essonne	OM GROUP	Saint-Chéron	PPRT
Essonne	SNPE Matériaux Énergétiques et ISOCEM	Vert-le-Petit	PPRT
Val d'Oise	SMCA	Chennevières-les-Louvres	PPRT
Val d'Oise	AMPERE Industries	Saint-Ouen-l'Aumône	PPRT
Val d'Oise	NCS Pyrotechnie et Technologies	Survilliers	PPRT

Tableau 14 - Liste des PPRT concernant des ICPE.

Stockages souterrains de gaz

La technique du stockage en nappe aquifère consiste à reconstituer l'équivalent géologique d'un gisement naturel en injectant le gaz dans une couche souterraine de roche poreuse et perméable contenant à l'origine de l'eau, recouverte d'une couche imperméable formant une couverture étanche, le tout ayant une forme de dôme.

Des périmètres de protection sont institués autour de ces stockages, à l'intérieur duquel la réalisation de tous travaux souterrains peut être interdite ou réglementée. L'exécution de tous travaux (visés ou non par l'article 84 du Code minier), qui seraient de nature à compromettre le réservoir souterrain de gaz ou à troubler son exploitation, peut être réglementée ou interdite par le préfet, même à l'égard du propriétaire des terrains, à l'intérieur du périmètre de stockage et du périmètre de protection. Le décret d'autorisation fixe pour chacun de ces périmètres, la profondeur qu'aucun travail ne peut dépasser sans une autorisation préalable du préfet.

On dénombre six stockages de gaz en Île-de-France : cinq stockages en nappe aquifère de gaz naturel, un stockage de pétrole liquéfié (propane), en cavité minée. L'exploitant de ce stockage, GEOVEXIN, a décidé en 2006 sa fermeture.

NOM/ TITULAIRE	TYPE/ PRODUIT STOCKE	TEXTE D'AUTORISATION	SERVITUDE	COUCHE GEOLOGIQUE DU STOCKAGE
BEYNES Profond/ GDF	Aquifère/ Gaz Naturel	Décret d'autorisation de stockage du 12/08/1992 Renouvellement décret 27/05/2010 - Fin de validité le 31/12/2030	Autorisation préfectorale pour tous travaux excédant 250 m de profondeur dans le périmètre de protection.	SEQUANIEN
BEYNES Supérieur/ GDF	Aquifère/ Gaz Naturel	Décret d'autorisation de stockage du 12/08/1992 Renouvellement décret 27/05/2010 - Fin de validité le 31/12/2030	Autorisation préfectorale pour tous travaux excédant 250 m de profondeur dans le périmètre de protection.	WEALDIEN
SAINT ILLIERS/ GDF	Aquifère/ Gaz naturel	Décret d'autorisation de stockage du 03/10/1969 Renouvellement décret 30/11/1999 - Fin de validité le 12/10/2014	Autorisation préfectoral pour : 1. tous travaux excédant 80 m de profondeur dans le périmètre de stockage. 2. tous travaux excédant 250 m de profondeur dans le périmètre de protection	SEQUANIEN
GARGENVILLE/ GEOVEXIN	Cavité minée/ GPL (Propane)	Décret d'autorisation d'aménagement et d'exploitation de stockage du 23/04/1980 - Fin de validité le 23/04/2000	Autorisation préfectorale pour tous travaux excédant 10 m de profondeur dans le périmètre de protection. Interdiction de tous travaux souterrains dans le périmètre de stockage.	CRAIE DU TURONIEN
GERMIGNY SOUS COULOMBS/ GDF	Aquifère/ Gaz Naturel	Décret d'autorisation de stockage du 13/02/1987 - Fin de validité le 13/02/2017	Autorisation préfectorale pour tous travaux excédant 350 m de profondeur dans le périmètre	WEALDIEN (3niveaux)
SAINT CLAIR SUR EPTE/ GDF	Aquifère/ Gaz Naturel	Décret d'autorisation de stockage du 04/10/1984 - Fin de validité le 04/10/2014	Autorisation préfectoral pour tous travaux excédant 300 m de profondeur dans le périmètre	RAURACIEN SEQUANIEN

Tableau 15 - Descriptions des six stockages de gaz en Île-de-France – Source : DRIEE IF.

Pour en savoir plus : [Site Internet de la DRIEE IDF](#) - Stockage de gaz souterrain

La carte suivante rassemble les PPRI, PPRMT et périmètres de protection de stockages de gaz en Île-de-France.

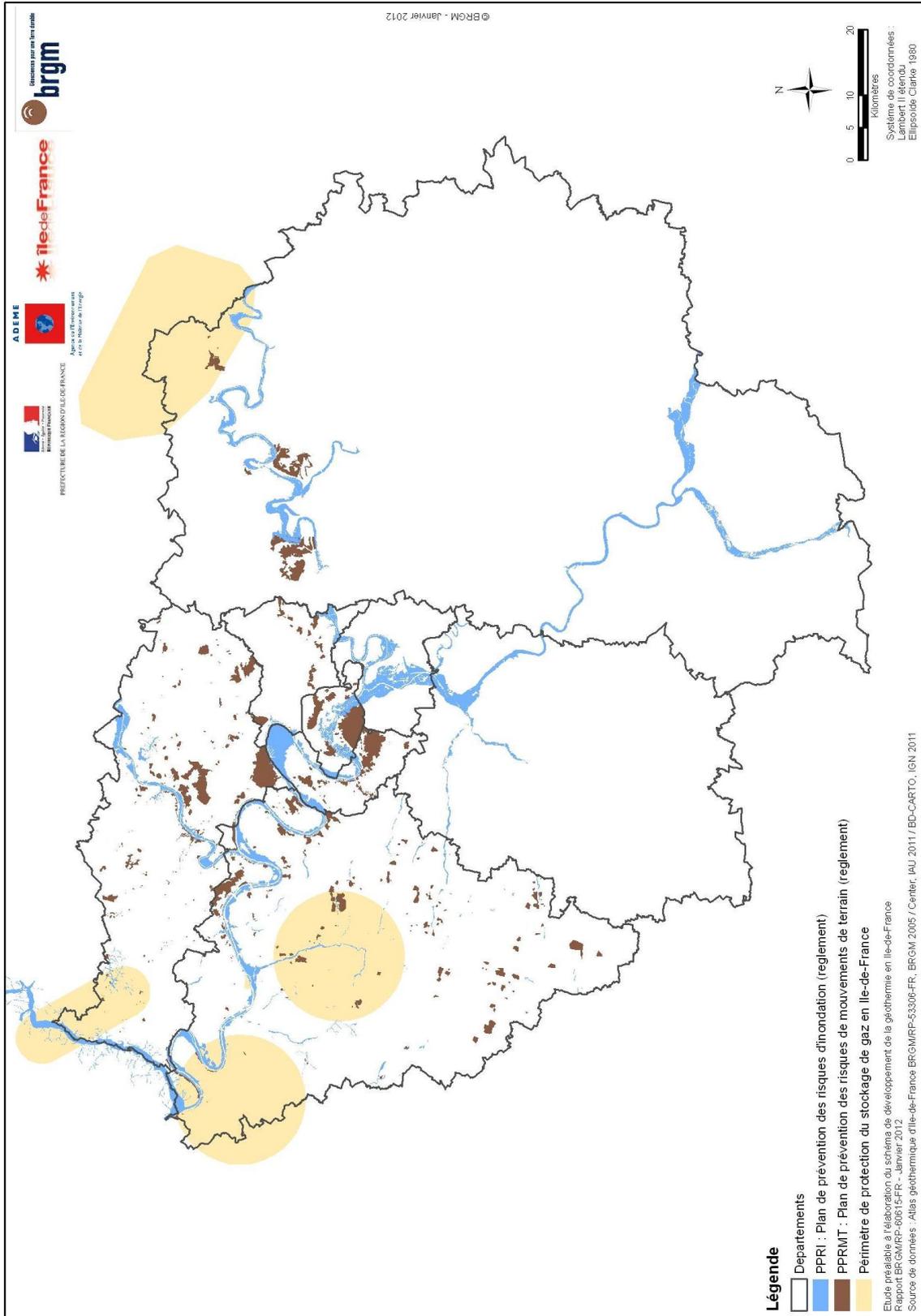


Figure 55 - Carte présentant les zones de PPRi, PPRMT et périmètre de protection de stockages de gaz en Île-de-France.

ZONES DE CONFLITS D'USAGE POTENTIELS

Le choix de l'implantation d'une opération de géothermie et son dimensionnement doivent être fait de façon à prévenir les conflits d'usage dont les principaux identifiés sont :

- concurrence vis-à-vis d'autres opérations de géothermie ;
- concurrence vis-à-vis d'autres usages de la ressource en eau souterraine : alimentation en eau potable (AEP), usage agricole, industriel voire individuel.

Ces éventuels conflits d'usage peuvent et doivent être évalués au cas par cas, au moment du dimensionnement de l'opération géothermique et de l'étude de faisabilité du projet.

Différents paramètres doivent être contrôlés.

• Les incidences piézométriques

Rabattement et déficit quantitatif : dans le cas d'une exploitation des eaux souterraines par puits unique, donc en l'absence de réinjection, les rabattements de nappes provoqués sont susceptibles de perturber les exploitations voisines et ainsi, de provoquer des conflits d'usage.

Par conséquent, tout ouvrage de prélèvement en eau à proximité du lieu d'implantation de l'opération de géothermie sur aquifère, et plus particulièrement à l'intérieur de l'aire d'influence du pompage (rayon d'action ou cône d'influence), doit contraindre techniquement la mise en place d'une opération de géothermie.

Surcôte piézométrique : la réinjection en nappe (cas du doublet géothermique) provoque la formation d'un dôme piézométrique, c'est-à-dire d'une élévation ponctuelle du niveau d'eau autour du forage d'injection susceptible de provoquer des désordres au niveau des aménagements souterrains alentours (ennoisement).

• Les incidences thermiques

Dans le cas d'un dispositif d'exploitation de type doublet géothermique, l'eau prélevée est restituée au milieu souterrain avec une différence de température ($T_{\text{injection}} < T_{\text{prélèvement}}$ dans le cas d'un fonctionnement en chauffage ; $T_{\text{injection}} > T_{\text{prélèvement}}$ dans le cas d'un fonctionnement en climatisation). Cette différence de température implique un risque d'interférence avec les exploitations géothermiques proches, mais peut également impacter la production d'eau potable potentiellement à proximité (risque de dépassement du seuil de potabilité de 25 °C).

Dans le cas d'une exploitation par puits unique, un risque de perturbation du milieu de surface récepteur du rejet d'eau réchauffée ou refroidie, et de surcroît de qualité différente, existe.

PROTECTION DES ESPACES ET MILIEUX NATURELS EN ÎLE-DE FRANCE

Il existe différents type d'espaces naturels protégés : Les espaces protégés par une réglementation (interdisant ou limitant certaines activités humaines), les espaces protégés au moyen de la maîtrise foncière (acquisition, location, convention avec les propriétaires) et les espaces soumis à une certaine obligation de résultats (protection conventionnelle) mais sans contrainte et en privilégiant les incitations, les moyens contractuels. Ces différents outils de

protection des espaces naturels devront être pris en compte lors de l'installation de l'opération de géothermie.

Protection réglementaire

Les Sites Classés

Le classement est une procédure de protection renforcée, instituant un régime d'autorisation spéciale pour toute modification de l'état ou de l'aspect du site (article L.341-10 du Code de l'environnement).

En 2008, l'Île-de-France comportait 257 sites classés. La superficie classée représente un peu plus de 96 000 ha, soit 8 % de la surface régionale. Ces sites correspondent à de vastes entités paysagères de plusieurs milliers d'hectares :

- vallées : Orvanne (77), Loing (77), Epte (95), Juine (91), Aulne (78), vallée de Chevreuse (78), vallée de Chauvry (95), Essonne (91), Renarde (91), vallées de l'Ysieux et de la Thève (95), Grand-Morin (77) ;
- ensembles géographiques : Falaises de la Roche-Guyon et Forêt de Moisson (78), Buttes de Rosnes, Marines et Epiais (95) ;
- forêts : Bois de la Commanderie (77), Forêt de Fontainebleau (77).

Mis à part les travaux d'exploitation courante et l'entretien normal des fonds ruraux, tous les projets de travaux de construction ou de démolition sont soumis à autorisation spéciale. Selon son ampleur, cette autorisation relève de la compétence soit du ministre chargé des sites après avis de la C.D.S.P.P. voire de la commission supérieure, soit du préfet du département qui peut saisir la C.D.S.P.P. mais doit recueillir l'avis de l'Architecte des bâtiments de France.

[Pour en savoir plus : Sites Classés \(Site de la DIREN IDF\) et Site de l'ATEN](#)

Sites inscrits

Il est établi dans chaque département une liste des sites dont la conservation ou la préservation présente, au point de vue artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, un intérêt général (article L.341-1 du Code de l'Environnement).

En 2008, l'Île-de-France comportait 238 sites inscrits. La superficie inscrite représente un peu moins de 152 000 ha, soit presque 13 % de la surface régionale.

Les sites inscrits font l'objet d'une surveillance attentive par l'administration, représentée par l'Architecte des Bâtiments de France (A.B.F.) du Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine (S.D.A.P.). Il est amené à émettre un avis simple au moins quatre mois avant le commencement des travaux qui relèvent d'un régime d'autorisation au titre du Code de l'Urbanisme (permis de construire, permis d'aménager et déclaration préalable).

Deux exemples particuliers de sites inscrits :

- Le site inscrit du *Vexin français* (43 000 ha), le plus grand de France, auquel s'ajoutent les sites de la *Corne nord-est du Vexin français* (9 900 ha), des *Boucles de la Seine de Moisson à Guernes* (4 600 ha) et de la *Partie de la vallée de l'Epte* (140 ha). Ces quatre sites sont en grande partie inclus dans le périmètre du [Parc Naturel Régional \(P.N.R.\) du Vexin français](#). S'y ajoutent, entre autres, le *Massif des trois forêts* et la *Plaine de France* qui forment un très

vaste ensemble inscrit : 56 % de la surface du département du Val-d'Oise sont ainsi protégés.

- Le site inscrit *Ensemble urbain à Paris*, (environ 4 400 ha) qui inclut la quasi totalité des 11 premiers arrondissements, les 16^e et 17^e arrondissements et une partie des autres arrondissements extérieurs.
- Le site inscrit de la *Vallée de Chevreuse* (10 000 ha) encadre les sites classés de la *Vallée de Chevreuse et de ses affluents* (la Mérantaise, le Rhodon). Les espaces urbanisés présentant un intérêt patrimonial et les plateaux agricoles sont dans le site inscrit, alors que les fonds de vallée et les versants boisés sont classés au titre des sites.

Les maîtres d'ouvrages ont l'obligation d'informer l'administration de tous projets de travaux de nature à modifier l'état ou l'aspect du site, quatre mois au moins avant le début de ces travaux. Les travaux d'exploitation courante et l'entretien normal des fonds ruraux échappent à cette obligation.

[Pour en savoir plus : Sites inscrits \(Site de la DIREN IDF\) et Site de l'ATEN](#)

Les réserves naturelles

Les réserves naturelles sont des espaces naturels protégeant un patrimoine naturel remarquable par une réglementation adaptée prenant également en compte le contexte local. En France, elles sont fédérées au sein d'une association nationale : [Réserves naturelles de France](#).

Depuis la loi 2002-276 du 27 février 2002 relative à la démocratie de proximité, on distingue les réserves naturelles nationales (anciennes réserves naturelles) des réserves naturelles régionales (par évolution du statut des réserves naturelles volontaires) qui reviennent à la collectivité régionale.

Par ailleurs, il existe en Île-de-France un autre type de réserve : la réserve de biosphère du Pays de Fontainebleau. Cette appellation correspond à un label délivré par l'UNESCO à un territoire d'enjeu patrimonial international bénéficiant d'une protection réglementaire pérenne : ici, la forêt de Fontainebleau.

Les réserves naturelles nationales

Au titre de l'article L.332-1 du Code de l'Environnement et suivants, des parties du territoire d'une ou plusieurs communes peuvent être classées en réserve naturelle lorsque la conservation de la faune, de la flore, du sol, des eaux, des gisements de minéraux et de fossiles et, en général, du milieu naturel présente une importance particulière ou qu'il convient de les soustraire à toute intervention artificielle susceptible de les dégrader. Cet outil réglementaire est réservé à des enjeux patrimoniaux forts de niveau régional, national ou international. Il concerne des espaces, espèces et objets géologiques rares ou caractéristiques, des milieux naturels fonctionnels et représentatifs.

Les territoires classés en réserves naturelle ou en instance de l'être, en applications des articles L.331-6 et L.332-9 du Code de l'Environnement ne peuvent être ni détruits, ni modifiés dans leur état ou dans leur aspect sauf autorisation spéciale du représentant de l'État et selon les modalités définies à l'article R332-23 du Code de l'Environnement. Ce classement constitue une servitude d'utilité publique.

L'Île-de-France compte quatre réserves naturelles nationales :

- la Bassée ;
- Saint-Quentin-en-Yvelines ;

- sites géologiques de l'Essonne ;
 - les coteaux de la Seine ;
- ... et un projet en cours d'instruction qui a fait l'objet d'une enquête publique :
- extension de la réserve des sites géologiques de l'Essonne.

Pour en savoir plus : [Réserves naturelles nationales \(Site de la DIREN IDF\)](#) et [Site de l'ATEN](#)

Les réserves naturelles régionales

Cette protection est applicable à des territoires d'une ou plusieurs communes dont la faune, la flore, le patrimoine géologique ou paléontologique ou, d'une manière générale, la protection des milieux naturels présentent un intérêt particulier, d'ordre régional.

La région compte 22 RNR :

- bassin de la Bievre ;
- bassin de Saulx-les-Chartreux ;
- boucle de Moisson ;
- colline Saint Martin et des Rougeaux ;
- domaine de Vaulezard ;
- domaine d'Ors ;
- étang du Follet ;
- étangs de Bonnelles ;
- île l'Aumone ;
- îles de Chelles ;
- les Bruyères de Saint-Assise ;
- les Grands Réages ;
- marais de Bernes-sur-Oise ;
- marais de Larchant ;
- marais de Stors ;
- parc Denis le Camus ;
- près du marais et Clos de la Salle ;
- Roger de Vilmorin ;
- Seiglats ;
- sites géologiques de Limay ;
- sites géologiques de Vigny-Longuesse ;
- val et coteaux de Saint-Rémy.

Pour en savoir plus : [Réserves Naturelles Régionales en Île-de-France, site Réserves Naturelles.org](#) et [Site de l'ATEN](#).

Les réserves de la Biosphère

Il existe en Île-de-France un autre type de réserve : la réserve de biosphère du Pays de Fontainebleau. Cette appellation correspond à un label délivré par l'UNESCO à un territoire d'enjeu patrimonial international bénéficiant d'une protection réglementaire pérenne : ici, la forêt de Fontainebleau.

Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope

L'arrêté préfectoral de protection de biotope (APB) pris en application des articles L.411-1 et 2 du Code de l'Environnement et défini dans les articles R.411-15 à 17 de ce même code est une procédure réglementaire mise en œuvre pour faire face de façon rapide et efficace à des menaces de destruction ou de modification sensible d'un biotope. Il se fonde sur la nécessité de prévenir la disparition d'espèces protégées en prévenant celle des biotopes. Il permet d'adapter le règlement à chaque situation particulière.

L'arrêté peut interdire toutes les actions susceptibles de nuire aux espèces et aux milieux à sauvegarder. Il peut également encadrer certaines activités : les soumettre à autorisation ou à limitation.

35 arrêtés préfectoraux de biotope couvrent plus de 1 815 ha du territoire régional. L'Île-de-France compte une trentaine d'arrêtés de protection de biotope, qui concernent des zones humides, des coteaux calcaires, d'anciennes carrières, des milieux boisés, des friches, etc.

Pour en savoir plus : [APPB \(Site de la DIREN IDF\)](#) et [Site de l'ATEN](#)

Les Réserves biologiques domaniales (RBD) et Réserves biologiques forestières (RBF)

Elles sont instituées pour préserver totalement (réserves intégrales) ou pour gérer d'une manière adéquate (réserves dirigées) des peuplements forestiers rares et d'autres milieux naturels (marais, pelouse sèche...) inclus dans les forêts domaniales (réserves biologiques domaniales) ou communales (réserves biologiques forestières).

FR2300049 Baudelut	FR2300086 Mare aux Canets
FR2300002 Belle-Croix	FR2300087 Mare aux Canettes
FR2300081 Bois Boisseau	FR2300085 Mares au Vinaigre
FR2300013 Chêne Brûlé	FR2300100 Mares de Pecqueuse
FR2300005 Cuvier Châtillon	FR2300089 Mares Moussues
FR2300088 Étang de la Tour	FR2300003 Mont de Fays
FR2300079 Étang du Roi	FR2300011 Mont Merle
FR2300092 Étangs de Hollande	FR2300004 Mont Ussy et Butte aux Aires
FR2300083 Fosse du Broux	FR2300078 Parc d'en Haut
FR2300007 Gorge aux Loups	FR2300093 Petit Étang Neuf
FR2300008 Gorge aux Merisiers	FR2300012 Petit Mont Chauvet
FR2300080 Grand Étang Neuf	FR2300095 Petit Produit Nord
FR2300082 La Claye	FR2300009 Platières de Franchard
FR2300091 La Houssine	FR2300096 Pont Granval
FR2300084 Marais du Cerisaie	FR2300019 Tourbière du Nid d'Aigle
FR2300098 Mare aux Buttes	FR2300099 Vallée des Vaux

Tableau 16 - Liste des réserves domaniales en région Île-de-France –
Source : [Site Internet de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel](#)

À noter également les forêts de protection issues de la loi de 1922 visant la protection des sols en montagne et la lutte contre les inondations (forêts rhénanes), et depuis 1992, l'accueil du public près des grandes villes. Elles sont au nombre de 110 et concernent également des forêts privées.

• La forêt de Rambouillet ou forêt d'Yvelines

Située dans le département des [Yvelines](#), elle est réputée être, bien que très [artificialisée](#) et [fragmentée](#) depuis plusieurs siècles, l'une des plus grandes et plus belles forêts de France. Il s'agit d'un espace boisé de 200 km², dont 14 550 ha de [forêt domaniale](#), qui s'étend sur le territoire de 29 communes. Le massif de Rambouillet a été classé « [forêt de protection](#) » par décret en Conseil d'État le 11 septembre 2009.

• La forêt de Sénart

La forêt de Sénart s'étend sur environ 3 000 hectares, à cheval sur les départements de [Seine-et-Marne](#) et de l'[Essonnes](#) entre les vallées de la [Seine](#) et de l'[Yerres](#). C'est à son sous-sol [argileux](#)

et à son absence de relief qu'est due la présence d'environ 800 [mares](#), cause de sa sauvegarde. Par [décret](#) du [15 décembre 1995](#), le massif de Sénart a été classé en [forêt de protection](#) sur une superficie de 3 410,4267 ha (dont 3 325,043 dans l'Essonne et 85,3837 en Seine-et-Marne, soit respectivement 97,5 % et 2,5 %)

Pour en savoir plus : www.onf.fr et [Site de l'ATEN](#)

Protection par la maîtrise foncière

Les espaces naturels sensibles des départements

Les espaces naturels sensibles des départements (ENS) sont un outil de protection des espaces naturels par leur acquisition foncière ou par la signature de conventions avec les propriétaires privés ou publics mis en place dans le droit français et régis par le code de l'urbanisme. En cas de défaillance du Département, le [conservatoire du littoral](#) ou les communes peuvent aussi préempter. Le Département peut réaliser des acquisitions au-delà de son droit de préemption, pour des immeubles n'ayant pas fait l'objet d'une déclaration d'aliéner, ou se situant hors d'une zone de préemption, suite à une déclaration d'utilité publique.

Pour aller plus loin : [Site de l'ATEN](#)

Protection conventionnelle

Les parcs naturels régionaux (PNR)

Les 45 parcs naturels régionaux français couvrent en 2008 environ 75 400 km², soit 12 % du territoire français. Chaque parc naturel s'étend sur un territoire dont les collectivités locales s'engagent dans un projet de développement local et la préservation du milieu naturel au travers de la signature d'une charte commune avec les Régions. La région Île-de-France compte actuellement quatre parcs naturels régionaux.

• PNR du Vexin Français

Le classement a été prononcé par décret le 9 mai 1995, il a été renouvelé par décret le 30 juillet 2008 (jusqu'au 8 mai 2019). Le territoire comprend 99 communes, 79 communes du département du Val d'Oise et 20 communes des Yvelines. La population concernée est d'environ 110 000 habitants pour une superficie de 72 000 ha.

Pour en savoir plus : [PNR Vexin Français](#)

• [PNR de la Haute Vallée de Chevreuse](#)

Le classement a été renouvelé par décret du 19 janvier 1999. Le territoire comprend 21 communes du département des Yvelines. Il concerne environ 48 000 habitants pour une superficie de 25 000 hectares. La Région Île-de-France a décidé le 27 juin 2007 de réviser la charte et de lancer la procédure de renouvellement du classement.

Pour en savoir plus : [PNR Haute Vallée de Chevreuse](#)

• [PNR du Gâtinais Français](#)

Le classement a été prononcé par décret le 4 mai 1999. Le territoire comprend 57 communes, 28 communes du département de l'Essonne et 29 communes de Seine-et-Marne. Il concerne environ 72 000 habitants pour une superficie de 65 000 ha. La région Île-de-France a décidé le 1^{er} février 2007 de réviser la charte et de lancer la procédure de renouvellement du classement.

Pour en savoir plus : [PNR Gâtinais Français](#)

• **PNR Oise Pays de France**

Le parc se situe sur les régions Picardie et Île-de-France. Le classement a été prononcé par décret le 13 janvier 2004. Le territoire comprend 59 communes (44 de l'Oise et 15 du Val d'Oise). Il concerne environ 110 000 habitants pour une superficie de 60 000 ha.

Pour en savoir plus : [PNR Oise Pays de France](#)

La région Île-de-France a décidé le 27 juin 2007 de lancer les études pour la création d'un PNR de la Brie et des deux Morin, sur un périmètre comprenant provisoirement 132 communes du département de Seine-et-Marne. L'objectif de cette étude est de vérifier la faisabilité d'un PNR et de définir un périmètre cohérent.

Pour en savoir plus : [Site de l'ATEN](#)

Le réseau Natura 2000 en Île-de-France

L'Île-de-France se trouve à la croisée de plusieurs influences biogéographiques. L'ouest du territoire (Vexin occidental, Rambouillet) subit une influence biogéographique atlantique, le sud de la Seine-et-Marne et de l'Essonne, une influence méridionale, et la Bassée témoigne d'une zone d'influence médio-européenne en territoire francilien.

Les milieux naturels d'Île-de-France sont rencontrés essentiellement dans les départements des Yvelines (9 sites), de l'Essonne (10 sites), de la Seine-et-Marne (18 sites) et du Val d'Oise (4 sites) et 1 site est localisé en Seine-Saint-Denis.

La superficie totale est de 98 427 ha représentant environ 8 % du territoire. Le dispositif Natura 2000 concerne donc près de 285 communes, soit environ 20 % de l'ensemble des communes d'Île-de-France.

Les programmes ou projets de travaux, d'ouvrage ou d'aménagement soumis à un régime d'autorisation ou d'approbation administrative, et dont la réalisation est de nature à affecter de façon notable un site Natura 2000, font l'objet d'une évaluation de leurs incidences au regard des objectifs de conservation du site.

Pour en savoir plus : [Natura 2000](#), [Le portail du réseau Natura 2000](#) et le [Site de l'ATEN](#)

L'inventaire patrimonial des ZNIEFF

L'inventaire des ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique) constitue un outil de connaissance du patrimoine national de la France. L'inventaire identifie, localise et décrit les territoires d'intérêt patrimonial pour les espèces vivantes et les habitats. Il s'agit d'un secteur du territoire particulièrement intéressant sur le plan écologique, participant au maintien des grands équilibres naturels ou constituant le milieu de vie d'espèces animales et végétales rares, caractéristiques du patrimoine naturel régional. Il ne constitue pas une mesure de protection juridique directe (*beaucoup de ZNIEFF ne bénéficient en fait d'aucune mesure de protection*). Toutefois l'objectif principal est un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire vis à vis du principe de la préservation du patrimoine naturel.

L'actualisation de l'inventaire ZNIEFF d'Île-de-France est actuellement en cours de validation par le CSRPN.

Pour en savoir plus : [Guide méthodologique des ZNIEFF en Île-de-France](#) et [Site de l'ATEN](#)

Annexe 4

Modalités de calcul : Bilan énergétique et climatique – Profondeurs limites d'aquifères

1. DÉFINITION DE TROIS CAS TYPES

Par souci de simplification, et en fonction de la nature des branches présentes sur la maille, il a été choisi de travailler à partir de trois cas représentatifs de consommations en Île-de-France. Les différents calculs énergétiques et économiques se feront sur ces trois cas représentatifs.

Les trois cas sont présentés ci-dessous, avec leurs caractéristiques énergétiques :

- **Cas A** : Valeurs représentatives du Résidentiel étendu (rassemblant les branches : Résidentiel collectif / Sports, Culture, Loisirs/Transports/café, Hôtels, Restaurants/ Habitat Communautaire /Enseignement) ;
- **Cas B** : Valeurs représentatives du Tertiaire (rassemblant les branches : Commerces/ Bureaux/Santé et Action sociale) ;
- **Cas C** : Valeurs représentatives d'un mix Résidentiel étendu et Tertiaire.

La proportion de consommations de chaque branche variant sur toutes les mailles, une pondération a été faite en fonction des consommations régionales pour définir les trois cas représentatifs.

• Fonctionnement

Après pondération, les valeurs suivantes du nombre d'heures à pleine puissance (HPP) ont été retenues :

Cas	Configuration	HPP chaud (HPP _{ch})	HPP froid (HPP _{fr})
A	Résidentiel étendu seul	2 184	
B	Tertiaire seul	1592	385
C	Mix des deux	2009	385

• Nature des solutions de références

Cas	Solutions de référence	Solution géothermique
A	chaudière GN (rendement moyen annuel de 88 %)	COP PAC = 3,5 EER PAC = 3
B	chaudière GN (rendement moyen annuel de 88 %) + un groupe de production de froid avec tour aéroréfrigérante (EER = 2,46)	
C	chaudière GN (rendement moyen annuel de 88 %) + un groupe de production de froid avec tour aéroréfrigérante	

• Taux de couverture des besoins thermiques

Cas	Production de chaud		Production de froid
	TC (Taux de couverture)	TA (Taux d'adéquation)	TC (Taux de couverture)
A	80 %		
B	100 %		100 %
C	86 % ³⁵	65 %	100 %

³⁵ 86 % = Taux de couverture de 80 % et 100 % pondérés par les consommations régionales des secteurs Résidentiel étendu et Tertiaire.

• Détermination des consommations de froid associées (pour les cas B et C)

À l'aide de cet ensemble d'hypothèses, il est possible d'exprimer la consommation énergétique de froid ($B_{NUM250\text{ fr}}$) à partir de la consommation de chaud ($B_{NUM250\text{ ch}}$), en faisant l'hypothèse que la puissance chaud au condenseur égale à celle froide à l'évaporateur de la PAC.

Les besoins assurés par la PAC sont, selon les cas, traduits par les formules suivantes :

Pour le cas B :

- $B_{NUM250\text{ fr}} = RGN \cdot (HPP_{fr} / HPP_{ch}) \cdot B_{NUM250\text{ ch}}$
- $B_{NUM250\text{ fr}} = 0,88 \cdot (385/1592) \cdot B_{NUM250\text{ ch}}$
- $B_{NUM250\text{ fr}} = 0,213 \cdot B_{NUM250\text{ ch}}$

Pour le cas C :

Ce cas C constitue un mix de consommations de cas A (consommations de chauffage et d'ECS uniquement) et de cas B (consommations chauffage, d'ECS et de froid).

Les besoins assurés en froid se déduisent alors de la formule du cas B, en prenant comme valeur de besoins de chaud, les consommations de chaud correspondant uniquement à la part correspondante aux consommations de chaud du tertiaire étendu de la consommation de chaud totale. Or, cette proportion varie pour chaque maille rencontrée. Pour le cas C, il a donc été pris une valeur correspondant à la proportion des consommations globales au niveau régional et égale aux consommations régionales totales des consommations de chaud dans le tertiaire divisée par les consommations totales de chaleur (= 23,52 / 80,71, consommations régionales en TWh)

- $B_{NUM250\text{ fr}} = 0,213 \cdot B_{NUM250\text{ ch}} \times (23,52 / 80,71)$
- $B_{NUM250\text{ fr}} = 0,062 \cdot B_{NUM250\text{ ch}}$

L'ensemble de ces caractéristiques va permettre de définir d'une part, la contrainte économique, et d'autre part, les données nécessaires à la réalisation du bilan énergétique.

2. BILANS ÉNERGÉTIQUES

a. Tep substituées annuellement

Cas	Tep substituées annuellement
A	$= (TC \cdot 0,86 / 10) \cdot B_{NUM250\text{ ch}} = \mathbf{0,069 \cdot B_{NUM250\text{ ch}}}$
B	$= (TC \cdot 0,86 / 10) \cdot B_{NUM250\text{ ch}} = \mathbf{0,086 \cdot B_{NUM250\text{ ch}}}$
C	$= (TC \cdot 0,86 / 10) \cdot B_{NUM250\text{ ch}} = \mathbf{0,074 \cdot B_{NUM250\text{ ch}}}$

b. Gains en énergie primaire (en MWhep)

Consommations électriques de la PAC : C_{PAC}

Et consommations électriques du doublet = 10% * C_{PAC}

Consommations électriques du groupe froid : C_{FROID}

Cas	Consommations d'énergie primaire (MWh _{ep})		Gain en énergie primaire (MWh _{ep})
	Solution de référence	Solution PAC	
A	$= B_{\text{NUM250 ch}}$	$= (1-\text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + C_{\text{PAC}} \cdot 2,58$ $= (1-\text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + (1,1 \cdot \text{RGN} \cdot \text{TC} \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{COP}) \cdot 2,58$ $= 0,771 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,229 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$
B	$= B_{\text{NUM250 ch}} + C_{\text{FROID}} \cdot 2,58$ $= B_{\text{NUM250 ch}} + (0,213 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{EER}) \cdot 2,58$ $= 1,223 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= C_{\text{PAC}} \cdot 2,58$ $= [1,1 \cdot (\text{RGN} \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{COP} + B_{\text{NUM250 fr}} / \text{EER})] \cdot 2,58$ $= 0,915 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,308 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$
C	$= B_{\text{NUM250 ch}} + C_{\text{FROID}} \cdot 2,58$ $= B_{\text{NUM250 ch}} + 0,062 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / 2,46 \cdot 2,58$ $= 1,065 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= (1-\text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + C_{\text{PAC}} \cdot 2,58$ $= (1-\text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + [1,1 \cdot (\text{RGN} \cdot \text{TC} \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / 3,5 + B_{\text{NUM250 fr}} / 3)] \cdot 2,58$ $= 0,813 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,252 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$

c. Tonnes de CO₂ évitées

Les coefficients d'émission CO₂ suivant ont été pris :

- pour le gaz naturel : 0.206 tonnes de CO₂ / MWh primaires consommés ;
- pour l'électricité : 0,180 tonnes de CO₂ / MWh primaires consommés.

Cas	Solution de référence	Solution PAC	Gain (en tonnes de CO ₂)
A	$= 0,206 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,206 \cdot (1 - \text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + 0,180 \cdot 1,1 \cdot 0,88 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{COP}$ $= 0,081 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,125 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$
B	$= 0,206 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + 0,180 \cdot 0,213 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / 2,46$ $= 0,222 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,180 \cdot 1,1 \cdot (\text{RGN} \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{COP} + B_{\text{NUM250 fr}} / \text{EER})$ $= 0,064 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,158 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$
C	$= 0,206 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + 0,180 \cdot 0,062 \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / 2,46$ $= 0,211 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,206 \cdot (1 - \text{TC}) \cdot B_{\text{NUM250 ch}} + 0,180 \cdot 1,1 \cdot [(\text{RGN} \cdot B_{\text{NUM250 ch}} / \text{COP} + B_{\text{NUM250 fr}} / \text{EER})]$ $= 0,076 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$	$= 0,135 \cdot B_{\text{NUM250 ch}}$

d. Détermination de ratios simplifiés

Ce niveau de détails, sur le bilan énergétique et climatique n'étant pas nécessaire à ce stade, il a été convenu de proposer des ratios communs pour les trois cas et égaux à :

	Ensemble des cas
Tep substituées	1
Gain en énergie primaire (MWh _{ep})	3,42
Tonnes de CO ₂ évité /an	1,82

3. CALCUL DE LA CONTRAINTE ÉCONOMIQUE

Le calcul de la rentabilité d'une opération consiste à comparer le coût du MWh géothermique (C_{aqi}) par rapport à celui du gaz naturel GN (C_{GN} , solution de référence). Le coût est un coût de revient global qui intègre les postes : P1 (énergie), P2 (maintenance), P3 (renouvellement), P4 (investissement).

Pour un besoin donné de la maille (B_{NUM250}), il est possible de déterminer une profondeur maximale qui satisfasse $C_{\text{aqi}} = C_{\text{GN}}$.

a. Hypothèses de calculs économiques

Coût des énergies

Compte tenu des nombreuses configurations possibles concernant la nature et le nombre des équipements susceptibles d'être présent sur la maille, il a été pris, pour chaque type d'énergie, les coûts moyens (mix des abonnements et coûts variables) suivants, déterminés sur les plages (tranches de consommation de la maille) de rentabilité des opérations géothermiques : Électricité : 80 € / MWh et Gaz Naturel (GN) : 51 € / MWh.

Dans un premier temps il n'a pas été pris en compte dans les calculs de rentabilité, une dérive de ces coûts par rapport à l'inflation.

Hypothèses financières

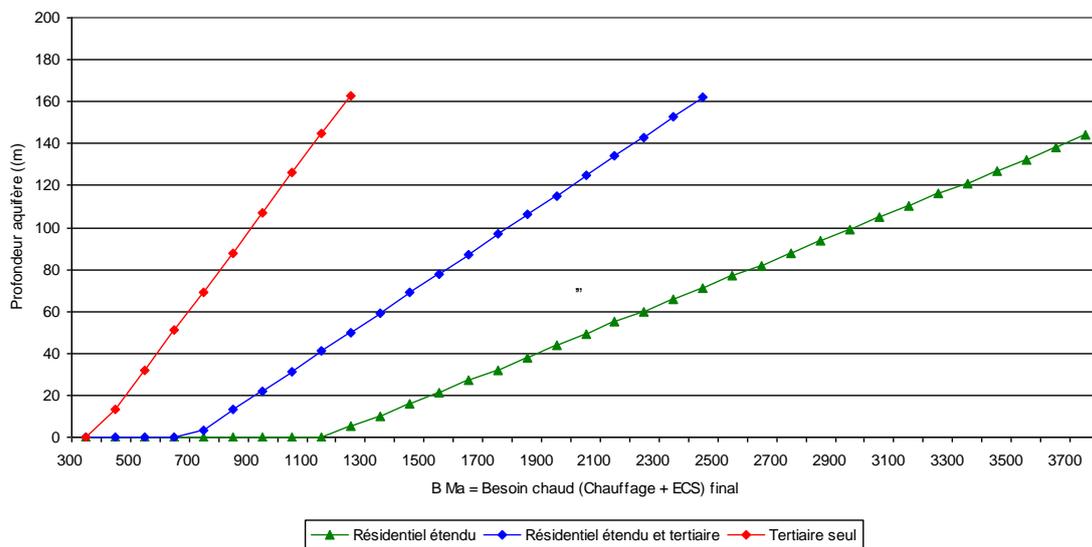
Il est supposé que l'investissement correspond en totalité à un emprunt réalisé à un taux d'intérêt de 4 %, et que celui-ci est remboursé par annuités constantes sur 15 ans.

Aide des pouvoirs publics

Le calcul de rentabilité qui correspond à déterminer la profondeur maximale du doublet, de telle manière que le coût du MWh géothermique soit égal à celui de la solution de référence, a été réalisé sans prise en compte de subvention.

b. Détermination des seuils limites de profondeur des aquifères

Le poste coût du doublet de forage étant prédominant, pour un besoin donné, il a été déterminé une profondeur limite de l'aquifère de telle manière que le coût global du MWh géothermique soit inférieur ou égal à celui du GN (énergie de référence).



Des calculs de rentabilité sont effectués pour les trois cas présentés ci-dessus afin de déterminer une profondeur maximum des forages, de telle manière que le coût du MWh géothermique soit égal à celui de la solution de référence.

Pour chacun des trois cas, il a été défini des courbes : Profondeur limite = $f(B_{NUM250ch})$, puis à partir de droites de régression des formules du type : Profondeur limite = $a B_{NUM250ch} + b$

Cas A	Cas B	Cas C
$0,056 B_{NUM250ch} - 64$	$0,186 B_{NUM250ch} - 61$	$0,092 B_{NUM250ch} - 60$

4. DÉTERMINATION DU POTENTIEL TECHNICO ÉCONOMIQUE

a. Calcul du taux d'adéquation technico-économique

Le taux d'adéquation technico-économique est égal au taux d'adéquation technique lorsqu'il n'y a pas de contrainte économique et est égal à 0 lorsque la contrainte économique existe (profondeur de forage supérieure à la profondeur maximale admissible, définie ci-dessus).

b. Codification

Les taux d'adéquation technico-économiques permettent de classer chaque maille dans l'un des trois cas afin de déterminer les consommations pouvant être couvertes par la géothermie. Les mailles ne satisfaisant pas les conditions de l'un ou l'autre des cas sont alors considérées comme n'ayant pas de potentiel de développement de la géothermie.

Code	Interprétation du calcul de potentiel
1	65 % des besoins totaux en puissance de chaud (Tot) sont satisfaits par au moins un aquifère superficiel (Cas C)
2'	100 % des besoins en puissance de chaud du tertiaire (Ter) sont satisfaits par au moins un aquifère (Cas B)
3'	50 % des besoins en puissance de chaud du résidentiel (Res) sont satisfaits par au moins un aquifère (Cas A)
4'	Les aquifères superficiels ne permettent pas de répondre aux besoins de surface
0	Il n'existe pas d'aquifère superficiel présent au droit de la maille
-9999	La maille ne présente pas de consommations de surface

c. Quantification du potentiel technico-économique en termes d'énergie (MWh)

Les potentiels technico-économique chaud et froid sont calculés à partir du code de la maille, en fonction des trois cas (A, B et C) :

1'	Potentiel chaud = $0.86 * \text{consommations totales de chaud}$ Potentiel de froid = $0.213 * \text{Consommations de chaud du tertiaire (Ter)}$ (Cas C)
2'	Potentiel chaud = consommation de chaud du tertiaire (Ter) Potentiel froid = $0.213 * \text{consommation de chaud du tertiaire (Ter)}$ (Cas B)
3'	Potentiel chaud = $0.8 * \text{consommations de chaud du résidentiel (Res)}$ (Cas A)
4	Les aquifères superficiels ne permettent pas de répondre aux besoins de surface
0	Il n'existe pas d'aquifère superficiel présent au droit de la maille
-9999	La maille ne présente pas de consommations de surface



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

Direction Régionale Île-de-France
7 rue du Théâtre
91884 – Massy – France
Tél. : 01 69 75 10 25