

# Prospectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPOREC)

Rapport final

BRGM/RP-60336-FR

Janvier 2012



# Prospectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPOREC)

Rapport final

BRGM/RP-60336-FR

Janvier 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2011 PSP11CEN60

A. Poux, O. Goyénèche, M. Le Brun, J.C. Martin,  
S. Noel, C. Zammit, D. Salquèbre (BRGM),  
A. Lecomte, S. Fillacier (GEOGREEN)  
D. Marre (EGEE Développement)

**Vérificateur :**

Nom : Alain DESPLAN

Date : 19/07/2012

Signature :

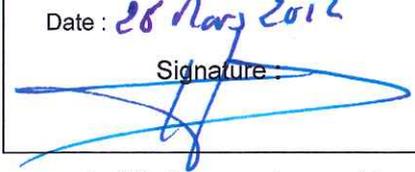


**Approbateur :**

Nom : Michel LECLERCQ

Date : 26 Nov 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** : Région Centre, Prospectives, Géothermie.

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

**Poux A., Goyénèche O., Le Brun M., Martin J.C., S. Noel, Zammit C., Salquère D.** (BRGM), **Lecomte A., Fillacier S.** (GEOGREEN), **Marre D.** (EGEE Développement) (2012) – Prospectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPOREC). Rapport final. BRGM/RP-60336-FR, 97 p., 28 ill., 4 ann.

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

## Synthèse

Le Grenelle de l'Environnement prévoit de porter à au moins 23 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale de la France en 2020. Parmi les différentes énergies renouvelables à usage de chaleur, le Comité Opérationnel « énergies renouvelables » du Grenelle de l'Environnement (COMOP 10) a proposé à l'échelle nationale, une multiplication par 6 de la production de chaleur géothermique. Cela se décline, pour les différentes filières : PAC (pompes à chaleur) individuelles, PAC dans le secteur collectif/tertiaire et usage direct de la chaleur (pour alimenter les réseaux de chaleur).

Pour atteindre ces objectifs, 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 Schémas Régionaux Climat Air Énergie (SRCAE). Ce schéma comprend la réalisation d'un état des lieux et l'évaluation du potentiel énergétique en énergies renouvelables.

C'est dans ce contexte que le Conseil régional du Centre, l'ADEME Centre et le BRGM ont cofinancé l'étude des « Prospectives de développement de la géothermie en région Centre » et ont participé, ainsi que la DREAL Centre, à son Comité de pilotage.

### ***État des lieux de la géothermie en région Centre***

En plus de faire un point sur les ressources géothermales accessibles en région centre et leurs conditions d'accès, la réalisation de l'état des lieux a permis de :

- **Faire un inventaire des opérations de géothermie existantes en région Centre**

À l'heure actuelle, près d'un millier d'opérations de géothermie sur PAC sont en service dont 80 % correspondent à des opérations chez des particuliers. Sur ce nombre, près de 10 % d'opérations sont réalisées sur sondes géothermiques verticales. Ce ratio tend à augmenter ces dernières années.

- **Étudier les ressources géothermales « profondes », que sont les aquifères du Dogger et du Trias**

Ces aquifères sont encore peu exploités en région Centre. L'absence de forages instrumentés en quantité suffisante n'a pas permis de déterminer de façon satisfaisante un potentiel géothermique des aquifères profonds du Dogger et du Trias, reconnus comme potentiellement intéressants pour la production d'énergie géothermique associée à des réseaux de chaleur urbains. En conséquence, l'échelle de restitution n'est en aucun cas comparable à l'échelle des travaux réalisés sur l'atlas des aquifères superficiels.

En première analyse, les données recueillies dans le cadre de la présente étude montrent que le réservoir du Trias est a priori le plus intéressant avec, localement, de fortes perméabilités. Cet aquifère peut cependant être le siège de difficultés de réinjection qui sont à l'origine d'une partie de l'échec de l'opération de Melleray (Saint-Denis-en-Val, dans le département du Loiret), lesquelles devront être résolues en profitant des retours d'expériences réalisées avec succès depuis 20 ans dans diverses formations comparables et tout particulièrement en Allemagne. Le projet « CLASTIQ », cofinancé par le BRGM et l'ADEME depuis mars 2009 et qui s'achèvera au printemps 2012, a permis de réaliser un travail d'investigation de l'exploitabilité de cette ressource qui pourra bénéficier à un programme opérationnel.

### ***Évaluation du potentiel de développement de la géothermie en région Centre***

L'ensemble des technologies de géothermie susceptibles d'être exploitées en région Centre a été considéré pour évaluer le potentiel global. Il s'agit de :

- la géothermie très basse énergie, utilisant des PAC (Pompes à Chaleur), sur aquifères superficiels et sur champs de sondes ;
- la géothermie basse énergie : utilisation des aquifères « profonds » du Dogger et du Trias pour alimenter des réseaux de chaleur urbains.

Une valeur de potentiel est obtenue pour ces trois filières. Cependant, il convient de noter que le niveau de connaissances des diverses ressources est très différent (remarque particulièrement vraie pour les aquifères profonds, par rapport au niveau de connaissance des aquifères superficiels).

L'étude du potentiel de développement de la géothermie est réalisée en comparant, de manière géo localisée, les ressources géothermales aux besoins thermiques des utilisateurs en surface, ce qui permet de définir le potentiel de développement des solutions avec PAC.

Ce potentiel est défini à partir du croisement des données, localisées à une échelle de maille carrée de 250 m sur 250 m, de ressources géothermales (productivité des aquifères superficiels concernés) et de besoins des utilisateurs en surface (principalement chauffage et eau chaude sanitaire). Le travail d'adéquation entre la ressource géothermale et les consommations énergétiques a nécessité l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG). Cet outil est indispensable pour l'étude des ressources aquifères contrairement aux solutions dites en « boucle fermée » (sondes géothermiques verticales notamment) qui peuvent s'adapter aisément aux besoins thermiques (sous réserve de surfaces disponibles suffisantes et d'absence de contraintes techniques et réglementaires). Les données de consommations énergétiques ont été déterminées à partir des surfaces construites.

Le principe de la méthodologie développée est de comparer les ressources géothermales (présence d'aucun, un ou deux aquifères superposés) aux besoins thermiques de surface, à l'échelle de la maille, tout en prenant en compte les différentes contraintes techniques, réglementaires et économiques pouvant limiter la

mise en place d'une opération. L'objectif est ainsi de déterminer quelle part des besoins thermiques peut être satisfaite par un des aquifères superficiels, ce qui permet d'en déduire une valeur de potentiel.

Le potentiel des sondes géothermiques verticales se déduit du potentiel des aquifères superficiels, pour les surfaces chauffées inférieures à 5 000 m<sup>2</sup>, pour les mailles sur lesquelles il n'y a pas de potentiel sur aquifères superficiels (soit parce qu'il n'y a pas d'aquifère, pas d'aquifère qui permettent de satisfaire au moins 50 % des besoins en puissance ou parce que la surface à chauffer est inférieure à 100 m<sup>2</sup>) et également, pour les mailles sur lesquelles il n'y a pas de contraintes techniques ou réglementaires.

Le potentiel des sondes géothermiques peut également, sur la base d'autres hypothèses, être beaucoup plus important puisque dans un certain nombre de zones géographiques, les deux formes de géothermie (sur aquifères et sur sondes géothermiques) sont possibles.

Les résultats, en fonction des différents scénarios (de consommations énergétiques de surface et de valeurs de débit) sont présentés ci-dessous à l'échelle de la région :

Résultats de potentiel géothermique (en ktep)	scénario de consommation énergétique	50 kWh/m <sup>2</sup>	200 kWh/m <sup>2</sup>
Consommations énergétiques totales estimées		1 558	6 232
Sans prise en compte des contraintes	Débit_min	600	1 725
	Débit_max	938	3 090
Avec l'ensemble des contraintes	Débit_min	448	1 558
	Débit_max	758	2 823
Potentiel pour les SGV		206	754
Influence des contraintes	Débit_min	75 %	90 %
	Débit_max	81 %	91 %
Pourcentage global de couverture par géothermie des besoins estimés	Débit_min	29 %	25 %
	Débit_max	49 %	45 %

En ce qui concerne l'identification de réseaux de chaleur, ont été sélectionnés uniquement les réseaux existant actuellement en région Centre sans informations suffisantes sur d'éventuels nouveaux réseaux pouvant être créés.

Parmi l'ensemble des réseaux de chaleur de la région Centre, sont retenus

- dans un *scénario bas* de développement de la géothermie Basse-Energie, deux des trois réseaux de **Montargis**, **Fleury-les-Aubrais**, **Orléans Centre-Ville Nord** qui se trouve sur des zones réputées favorables des aquifères du Dogger et du Trias. Par ailleurs, ces réseaux utilisent 100 % de gaz et de fioul avec au moins 78 % de gaz. Toutefois, ils sont tous les trois dotés d'une centrale de cogénération, ce qui est *a priori* préjudiciable à l'utilisation de la géothermie ;
- dans un *scénario haut* de développement, quatre réseaux correspondant aux trois réseaux précédents auxquels nous avons ajouté le réseau de **Vierzon** qui se trouve sur une zone un peu moins favorable du seul aquifère du Trias. Il utilise également

100 % de gaz et de fuel avec 86 % de gaz. Il est également doté d'une centrale de cogénération.

Les réseaux alimentés à plus de 55 % par de la biomasse ou l'incinération d'ordures ménagères (Blois et Vineuil) ont été systématiquement éliminés.

Le tableau ci-dessous présente le potentiel de développement de la géothermie, en se basant sur les deux scénarios les plus « extrêmes » (prise en compte du scénario 50 kWh/m<sup>2</sup> et débit\_min, dit « scénario bas de valorisation » et du scénario 200 kWh/m<sup>2</sup> et débit\_max « scénario haut de valorisation »).

		Nombre	ktep substituées	Gain en énergie primaire (MWh <sub>ep</sub> )	Tonnes de CO <sub>2</sub> évitées annuellement
<b>Scénario bas de valorisation</b>					
Opérations très basse énergie	Sur nappes		448	1 947 840	815 910
	Sur sondes		206	894 658	374 754
Réseaux de chaleur		2	6	61 600	13 120
<b>Total</b>			<b>660</b>	<b>2 904 097</b>	<b>1 203 784</b>
<b>Scénario haut de valorisation</b>					
Opérations très basse énergie	Sur nappes		2 823	12 276 262	5 142 274
	Sur sondes		754	3 278 099	1 373 128
Réseaux de chaleur		4	12	123 200	26 240
<b>Total</b>			<b>3 589</b>	<b>15 677 561</b>	<b>6 541 642</b>

Enfin, il existe un potentiel difficilement chiffrable encore aujourd'hui pour :

- les micro-réseaux de chaleur, principalement pour les nouveaux aménagements ;
- les corbeilles géothermiques particulièrement adaptées pour le collectif et tertiaire.

*In fine*, cette étude doit permettre de définir des objectifs quantitatifs de développement de la production d'énergie renouvelable à l'échelle de la région Centre.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Contexte et objectifs de l'étude</b> .....	<b>15</b>
2.1. PRÉSENTATION DE LA GÉOTHERMIE .....	15
2.2. LE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE .....	18
2.2.1. Enjeux.....	18
2.2.2. Perspectives de développement de la géothermie.....	19
2.3. LA MISE EN PLACE DES SCHÉMAS RÉGIONAUX CLIMAT AIR ÉNERGIE (SRCAE) .....	22
2.3.1. Contexte .....	22
2.3.2. Enjeux pour l'étude de la géothermie .....	23
<b>3. État des lieux de la géothermie en région Centre</b> .....	<b>25</b>
3.1. LES OPÉRATIONS DE GÉOTHERMIE EN RÉGION CENTRE .....	25
3.1.1. Objectif .....	25
3.1.2. Méthode et Limites .....	25
3.1.3. Géothermie sur nappes superficielles .....	26
3.1.4. Opérations PAC sur sondes géothermiques verticales .....	28
3.2. GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA RÉGION CENTRE .....	30
3.2.1. Contexte géologique général.....	30
3.2.2. Formation géologiques susceptibles de contenir les principaux aquifères en région Centre .....	31
3.2.3. Pour en savoir plus : accès aux données sur les eaux souterraines.....	36
3.3. RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES .....	38
3.3.1. Présentation des ressources géothermales aquifères « superficielles » (0 à 100 m) .....	39
3.3.2. Présentation des ressources géothermales aquifères « profondes » (Dogger et Trias) .....	40
3.4. RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES PROFONDES : COMPLÉMENTS D'ÉTUDE ET CARTOGRAPHIES.....	41
3.4.1. Analyse des Rapports de Fin de Sondage (RFS) .....	41
3.4.2. Limites des données.....	44
3.4.3. Données complémentaires.....	46
3.4.4. Réalisation de cartes uni-critère .....	46

3.4.5. Premiers résultats et conclusions sur le potentiel des aquifères profonds en région Centre .....	48
3.5. PRISE EN COMPTE DE LA RÉGLEMENTATION .....	49
3.5.1. La réglementation nationale.....	49
3.5.2. Les réglementations territorialisées .....	49
<b>4. Détermination des potentiels de développement de la géothermie en région Centre .....</b>	<b>57</b>
4.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE .....	57
4.1.1. Définition du potentiel.....	57
4.1.2. Opérations étudiées dans le cadre de cette étude.....	57
4.1.3. Définition de l'échelle de travail pour l'étude du potentiel très basse énergie .....	57
4.1.4. Cartographie des besoins thermiques de surface.....	58
4.2. LE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS .....	61
4.2.1. Principe général .....	61
4.2.2. Prise en compte de la ressource.....	62
4.2.3. Définition du taux d'adéquation.....	63
4.2.4. Calcul du potentiel à la maille, à partir de la définition de classes .....	64
4.2.5. Prise en compte des contraintes techniques et économiques .....	64
4.2.6. Précisions sur la contrainte économique .....	65
4.2.7. Résultats : potentiel des aquifères superficiels à l'échelle départementale .....	67
4.3. LE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES .....	69
4.3.1. Quantification du potentiel de développement des sondes géothermiques verticales ou autres échangeurs à boucle « fermées » ...	69
4.3.2. Cartographie des zones moins favorables au développement de la géothermie sur sondes géothermiques verticales.....	70
<b>5. Bilan.....</b>	<b>73</b>
5.1. BILAN DU POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT POUR LA GÉOTHERMIE : BILAN ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE .....	73
5.2. DU POTENTIEL À LA DÉFINITION D'OBJECTIFS.....	77
5.2.1. Remarques générales.....	77
5.2.2. Déclinaison d'objectifs pour les PAC dites « individuelles » .....	77
5.2.3. Les éléments structurants du développement de la géothermie.....	79
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>81</b>

**7. Bibliographie.....83**

**Liste des illustrations**

Illustration 1 : Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour la maison individuelle en région Centre. .... 16

Illustration 2 : Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour le résidentiel collectif et le tertiaire en région Centre. .... 17

Illustration 3 : Objectifs de production de chaleur géothermale en ktep (Source : COMOP 10). .... 19

Illustration 4 : Schéma de principe du fonctionnement d'une thermofrigopompe.....21

Illustration 5 : Évolution des opérations déclarées en BSS. ....27

Illustration 6 : Répartition entre particuliers et opérations du collectif/tertiaire. ....27

Illustration 7 : Répartition des projets nappes et sondes.....28

Illustration 8 : Opérations dans le collectif/tertiaire en région Centre. ....29

Illustration 9 : Carte géologique simplifiée du bassin de Paris (*in* Synthèse géologique du bassin de Paris, tome 2, BRGM, 1980)..... 30

Illustration 10 : Coupe n° 1 schématique ouest-est du bassin de Paris (d'après Chantraine, 1996).....31

Illustration 11 : Coupe n° 2 nord-est - sud-ouest, puis est-ouest, en région Centre.....31

Illustration 12 : Extrait de la page d'accueil du site internet sur les eaux souterraines en région Centre (SIGES Centre). ....36

Illustration 13 : Carte régionale des principales entités hydrogéologiques (BD LISA) après regroupement pour la région Centre. ....38

Illustration 14 : Méthodologie employée par GeoGreen pour l'analyse des RFS.....43

Illustration 15 : Structure de la feuille Excel synthétisant les données disponibles.....44

Illustration 16 : Forte variabilité des valeurs de perméabilité (en mD) obtenues sur carotte (en noir) et par test (en rouge) – Niveau Bathonien (Dogger). ....45

Illustration 17 : Communes de la région Centre concernées par un SAGE. ....53

Illustration 18 : Communes de la région Centre sur lesquelles il existe une ZRE.....54

Illustration 19 : Méthode de détermination des consommations thermiques dans l'existant.....59

Illustration 20 : Exemple de cartographie présentant la consommation du bâti existant dans le département du Loiret.....60

Illustration 21 : Schéma de la méthode utilisée pour déterminer le potentiel sur aquifères superficiels.....61

Illustration 22 : Débit de production possible par niveau aquifère (source BRGM/RP-55088-FR). ....63

Illustration 23 : Schéma illustrant la contrainte économique. ....65

Illustration 24 : Calcul de la profondeur de forage. ....	66
Illustration 25 : Tableau présentant le résultats de PMA (Profondeur Maximale Admissible).....	66
Illustration 26 : Première cartographie des zones moins favorables au développement de sondes géothermiques verticales. ....	72
Illustration 27 : Cartographie du potentiel de développement de la géothermie sur aquifères superficiels. ....	74
Illustration 28 : Cartographie du potentiel de développement de la géothermie sur sondes. ....	75

## Liste des annexes

Annexe 1 : Cartes uni-critères des aquifères du Dogger et du Trias en région Centre (Profondeur, Température, Epaisseur utile, Transmissivité) .....	85
Annexe 2 : Précisions sur l'inventaire des opérations et le modèle économique (EGEE Développement).....	87
Annexe 3 : Synthèse de l'étude sur les micro-réseaux de chaleur (Rapport BRGM RP-59967-FR).....	89
Annexe 4 : Réflexions sur les lycées .....	95

# 1. Introduction

L'étude des perspectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPEREC) est une étude cofinancée par le Conseil régional Centre, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Cette étude s'inscrit dans la mise en place du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE) dont l'élaboration est confiée au Conseil régional et à l'État, et dont l'objectif est de définir les orientations et les objectifs régionaux aux horizons 2020 et 2050 en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de maîtrise de la demande énergétique, de développement des énergies renouvelables, de lutte contre la pollution atmosphérique et d'adaptation au changement climatique.

Cette étude a donc pour objet de faire l'état des lieux et de déterminer le potentiel de développement de la géothermie à l'échelle de la région Centre.

La région Centre présente de ce point de vue une situation très favorable. En effet, les ressources en eaux souterraines y sont variées et abondantes. On y compte de nombreux aquifères superficiels et profonds, parmi les plus importants en France, comme la nappe de Beauce, la nappe de la craie du Séno-Turonien, la nappe des sables du Cénomaniens et la nappe des calcaires du Jurassique pour les plus importants de la région. Ces ressources sont propices au développement de la géothermie sur nappes.

Dans un passé récent, la Région Centre a pris de nombreuses dispositions destinées au développement de l'énergie géothermique sur son territoire y compris, pour certaines, par anticipation sur les directives issues du Grenelle de l'Environnement.

Rappelons quelques éléments d'étape :

- dès 2006, initiation de la réalisation, par le BRGM, d'un Atlas des aquifères superficiels susceptibles d'alimenter des opérations de géothermie par pompes à chaleur sur nappe. Cet Atlas, réalisé en partenariat entre la Région Centre, la Délégation Centre de l'ADEME, la Direction régionale d'EDF et le BRGM, disponible au printemps 2007, a été présenté et diffusé aux forces vives régionales au premier semestre de la même année. L'atlas est accessible par Internet sur « [geothermie-perspectives.fr](http://geothermie-perspectives.fr) » ;
- en 2008, annonce d'un plan d'actions régional « Géothermie » et mise en œuvre, dans le cadre d'une action collective de la Région en partenariat avec la DRIRE Centre, de la marque régionale GEOQUAL, destinée à mettre en place un engagement de qualité pour les entreprises de forages d'eau ou de sondes géothermiques verticales pour l'alimentation de pompes à chaleur géothermiques, ainsi que pour les bureaux d'étude sous-sol ;
- en octobre 2010, intégration des forages géothermiques et des pompes à chaleur géothermiques dans le périmètre du prêt à taux zéro régional « Isolaris Centre ».

Dans le cadre de la mise en place de la présente étude prospective, les principales filières de géothermie sont considérées :

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

La spécificité de la production de chaleur géothermique, énergie renouvelable, de base, foncièrement territoriale, nécessite de relier étroitement les besoins énergétiques des utilisateurs en surface et les ressources disponibles en sous-sol au droit de ces besoins.

**En effet, le critère essentiel de performance lors de la mise en place d'une solution de géothermie est l'adéquation des ressources du sous-sol et des besoins en surface.** 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). Cela implique que le potentiel ne peut être défini par une étude des ressources géothermales d'un côté et des besoins de l'autre. La ressource du sous-sol doit correspondre aux besoins de surface, en termes de puissance et d'énergie que ce soit des besoins de chaleur, d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de rafraîchissement.

Cette spécificité de la géothermie servira de principe tout au long de cette étude, pour déterminer son potentiel de développement. Après avoir précisé le contexte et les objectifs de l'étude, ce rapport s'attachera à présenter les différentes filières de la géothermie en région Centre et leur potentiel de développement, quantifié ou non.

## 2. Contexte et objectifs de l'étude

### 2.1. PRÉSENTATION 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 le niveau de température de la ressource géothermale 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 (Illustration 1), ou pour les opérations dans le résidentiel collectif/tertiaire (Illustration 2). 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 tertiaire notamment) ou des besoins simultanés de chaud et de froid (établissements de santé par exemple).

Boucle géothermale	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 <sup>2</sup> d'échangeurs (1)	30 à 45 €/ml (2)	Facilité de mise en œuvre pour les maisons neuves	Grande surface de pose (entre 1 à 2 fois la surface à chauffer, en fonction de la performance)
						Coût d'investissement limité	Limitation de la jouissance du terrain
							Proscriit dans les terrains en pente
	Echangeurs "compacts"		quelques mètres	5 à 7 kW par échangeur	de l'ordre de 6800 € 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
						Coût d'investissement	COP faiblement influencé par le gradient géothermique
	Sonde Géothermique Verticale		jusqu'à 100m	entre 30 et 50 W/mètre linéaire de sondes (3)	30 à 60 €/ml de sonde (4)	Profite de la stabilité de la température du sous-sol et du gradient géothermique	Intervention d'un foreur nécessaire
Technique simple, indépendante de la présence d'eau souterraine							
Espace d'implantation réduit de l'ouvrage en surface (critères de distance à respecter cependant)							
Boucle ouverte : échange avec les eaux souterraines superficielles	Doublet		quelques dizaines de mètres	Une dizaine de kW pour 1 m <sup>3</sup> /h (5)	40-150 €/ml pour le forage (6)	Permet de délivrer de plus fortes puissances	Maintenance plus fréquente
						Excellent rendement pour de	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 m<sup>2</sup> de sol en W/m<sup>2</sup>), 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 85 W/m pour des roches consolidées type gneiss 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 m<sup>3</sup>/h avec un delta T°C de 8°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

*Illustration 1 : Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour la maison individuelle en région Centre.*

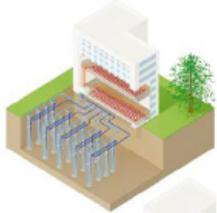
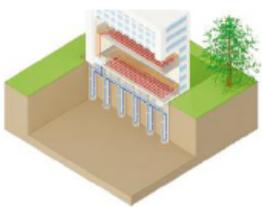
Boucle géothermale	Type d'échangeur		Profondeur	Avantages	Inconvénients
Boucle fermée : échange avec le sol	Champs de sondes		jusqu'à 100m	Profite de la stabilité de la température du sous-sol et du gradient géothermique	Dimensionnement par bureau d'étude spécialisé
				Technique simple, indépendante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

Illustration 2 : Présentation des différentes technologies alimentant une PAC applicables pour le résidentiel collectif et le tertiaire en région Centre.

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.

## **2.2. LE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE**

### **2.2.1. Enjeux**

Selon les analyses de l'ADEME, le secteur du bâtiment est responsable de 21 % des émissions de CO<sub>2</sub> 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.

En région Centre, le bâtiment est responsable de 28 % émissions de CO<sub>2</sub> et l'énergie consacrée au logement et au tertiaire est le principal poste de consommations d'énergie (Méthode Bilan Carbone territoire adaptée par Énergies Demain, dans le cadre du Plan Climat Énergie Régional).

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.

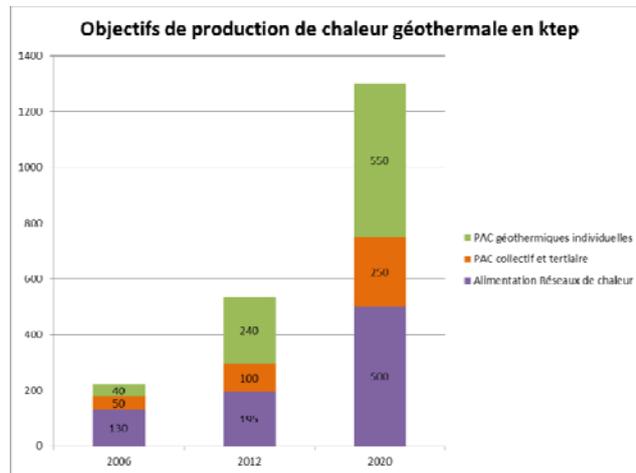


Illustration 3 : Objectifs de production de chaleur géothermale en ktep (source : COMOP 10).

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

	Au 31 décembre 2012	Au 31 décembre 2020
Géothermie profonde (réseaux de chaleur)	195 ktep	500 ktep
Géothermie intermédiaire (pompes à chaleur pour le bâtiment collectif et tertiaire)	100 ktep	250 ktep
Pompes à chaleur individuelles (aérothermie et géothermie)	1 200 ktep	1 600 ktep

## 2.2.2. Perspectives de développement de la géothermie

### *Dans le résidentiel individuel*

S'il est clair que la réglementation thermique 2012 (RT2012) va diminuer drastiquement les besoins de chauffage, cela va entraîner l'augmentation de la part de besoins de chaleur à fournir pour l'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).

De plus, l'amélioration de l'isolation des bâtiments peut générer un excès de chaleur provenant notamment des usages spécifiques et des apports gratuits, ce qui peut engendrer des besoins de rafraîchissement.

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 développé à l'étranger, comme la Suisse et l'Allemagne) devraient permettre de répondre à un besoin de limiter l'encombrement (par rapport aux échangeurs horizontaux) tout en évitant le coût important de forages 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 chaleur géothermiques le développement des pompes à chaleur est attendu dans le Grenelle, et il ne pourra pas reposer uniquement sur les pompes à chaleur aérothermiques qui ont, certes, un coût d'investissement plus limité mais, en contrepartie, un coefficient de performance global plus faible impliquant une augmentation des coûts d'exploitation.

### ***Dans le résidentiel collectif/tertiaire***

Les applications favorables à l'utilisation de pompes à chaleur (PAC) sont classées en trois catégories :

- **Projets avec besoins de chaud et de froid concomitants** : ce sont les applications les plus adaptées à la géothermie très basse énergie : hypermarchés, hôpitaux, cliniques ou autres établissements de santé, certains immeubles de bureaux du secteur tertiaire, groupes sportifs alliant piscines et patinoires.  
Ces opérations utilisent la technologie de la thermo-frigopompe, grâce à laquelle on peut distribuer le chaud et le froid sur deux réseaux distincts et simultanément.
- **Projets avec besoins saisonniers** (besoin de chaud en hiver et de froid en été) : ce sont également des applications très bien adaptées à la géothermie très basse énergie. C'est le cas de certains bâtiments du tertiaire, comme les hôtels, maisons de retraite, immeubles de bureaux.  
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 ».
- **Projets avec besoins uniquement de chaud ou uniquement de froid** : la géothermie très basse énergie peut répondre à ce type d'application, mais, un risque

de déséquilibre des conditions thermiques du sous-sol existe et des solutions complémentaires permettant de maintenir cet équilibre thermique 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).

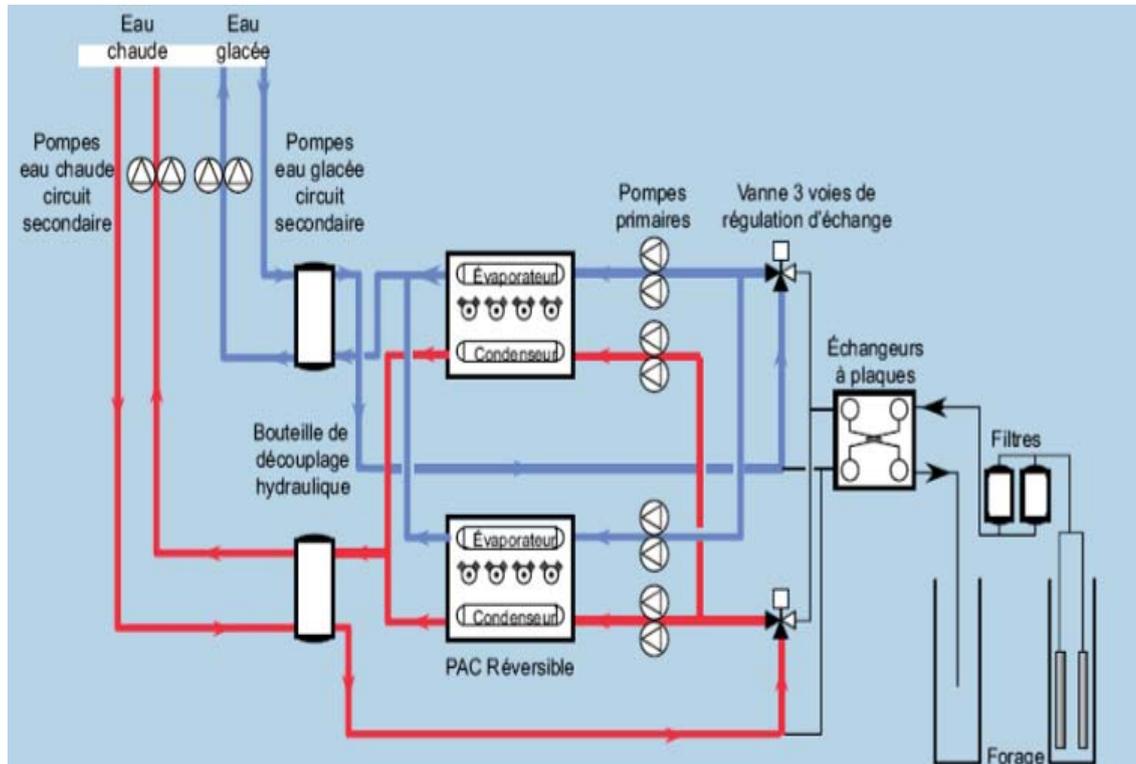


Illustration 4 : Schéma de principe du fonctionnement d'une thermofrigopompe.

Le système 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, elle se pose en rénovation.

L'enjeu en rénovation dans le résidentiel collectif/tertiaire réside à la fois dans la baisse des consommations (labels BBC Rénovation 2009 et Effinergie Rénovation) 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) qui, dans le cas d'une isolation correcte, peut s'avérer très efficace.

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 mais 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, si l'on souhaite alimenter avec de la géothermie, d'opérer une rénovation lourde avec changement des émetteurs et du système de distribution.

Finalement, l'intérêt de la solution de géothermie devra être étudié au cas par cas, et dépend de la bonne adéquation des ressources et des besoins. Les résultats économiques d'une opération de géothermie dépendent de la qualité de sa conception et de sa réalisation et surtout de l'adéquation entre la ressource et les besoins.

L'étude sur les micro-réseaux de chaleur réalisée en collaboration avec ALTO Ingénierie : le développement de la géothermie dans des éco quartiers (rapport BRGM/RP-59967-FR « *Géothermie et échelle de territoire-étude spécifique des micros réseaux de chaleur* ») montre l'intérêt, dans certains cas, de mutualiser les forages dans les aquifères superficiels pour alimenter un micro réseau de chaleur.

## **2.3. LA MISE EN PLACE DES SCHÉMAS RÉGIONAUX CLIMAT AIR ÉNERGIE (SRCAE)**

### **2.3.1. 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, les SRCAE (Schémas Régionaux Climat Air Énergie)

Le décret n° 2011-678 du 16 juin 2011 relatif aux Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) fixe 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.

### **2.3.2. 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 géolocalisation 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.

## 3. État des lieux de la géothermie en région Centre

### 3.1. LES OPÉRATIONS DE GÉOTHERMIE EN RÉGION CENTRE

#### 3.1.1. Objectif

L'inventaire des opérations de géothermie en région Centre est destiné à fournir des repères, tant pour le SRCAE que pour le Plan Climat-Énergie : la pertinence des politiques régionales ainsi que la faisabilité des objectifs quantitatifs retenus dépendent bien évidemment de la base de départ constatée.

Jusqu'ici, cette base installée était très mal connue : le travail d'inventaire, dont découlent les évaluations présentées ici, a permis d'avancer considérablement, même s'il reste des compléments importants à obtenir.

#### 3.1.2. Méthode et Limites

##### *Matériaux utilisés*

Les travaux ont porté sur la compilation, le croisement et la mise en cohérence des données suivantes :

- exploitation de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) : rappelons que tous les travaux sur des forages de plus de 10 m de profondeur doivent y être recensés et décrits. Il a fallu effectuer un dé-doublonnage, une même opération pouvant donner lieu à plusieurs déclarations. Cette base ne contient donc pas les opérations de PAC sur échangeurs horizontaux ou compacts ;
- recensement des opérations soutenues par le Conseil régional Centre et l'ADEME, aussi bien dans le cadre du Fonds Chaleur que dans celui du Plan État-Région<sup>1</sup> ;
- recensement des opérations ayant fait l'objet d'une demande d'assurance AQUAPAC ;
- dépouillement approfondi d'une dizaine des dossiers d'opérations précédents (certains récents, les autres datant de moins de quatre ans) ;
- estimations issues de l'enquête auprès des Foreurs et des BE Sous-sol, réalisée fin 2010 - début 2009 par le bureau d'études EGEE Développement pour évaluer la démarche GEOQUAL.

---

<sup>1</sup> Carte et Tableaux fournis par l'ADEME, figurant en annexe.

### **Champ couvert**

L'inventaire est découpé en trois catégories, qui recouvrent trois types d'opérations de nature très différentes :

- les opérations sur nappes profondes, destinées à alimenter des réseaux de chaleur. Elles datent généralement des années 80, et leur logique de développement est celle des réseaux de chaleur, mono ou bi, et de plus en plus, pluri-énergies. Encore peu nombreuses, elles sont présentées à part ;
- les opérations verticales sur nappes superficielles (moins de 200 m en général), qui le plus souvent utilisent une pompe à chaleur. Leur inventaire est présenté ici avec un certain détail, car elles génèrent le plus d'économies en d'énergie comme en Tonne d'Equivalent CO<sub>2</sub> ;
- les opérations horizontales, à moins d'un mètre. Elles concernent surtout les particuliers qui disposent d'une surface suffisante. Elles sont très difficiles à recenser, car elles ne donnent pas lieu à déclaration dans la BSS. Une évaluation grossière est fournie en fin d'inventaire.

### **Limites**

La BSS n'enregistre les dossiers qu'avec un certain délai, la récente réorganisation ayant visiblement créé des retards : la tendance récente n'est donc pas fiable, probablement depuis le courant de l'année 2010. La poursuite du ralentissement très net de 2009 ne peut donc pas y être confirmée ou infirmée.

Les opérations non déclarées à la BSS ne sont pas prises en compte. Elles ont pu représenter plusieurs dizaines de cas par an dans les années 2005- 2007, chez les particuliers principalement, mais aussi pour de petites opérations collectives.

### **3.1.3. Géothermie sur nappes superficielles**

#### **Résultats globaux (source Banque des données du Sous-Sol - BSS)**

La région Centre compte, à la fin 2011, un millier d'installations en service.

Sur ce total, 78 % (725) ont été réalisées depuis 2005, marquant bien la grande jeunesse de la filière.

Le rythme est parti de 50 en 2005, est monté ensuite à 110 en 2007, et aurait atteint 150 en 2008. Depuis, un ralentissement a eu lieu, avec 130 opérations en 2009, passant à un minimum de 100 par an en 2010 et 2011 selon nos estimations.

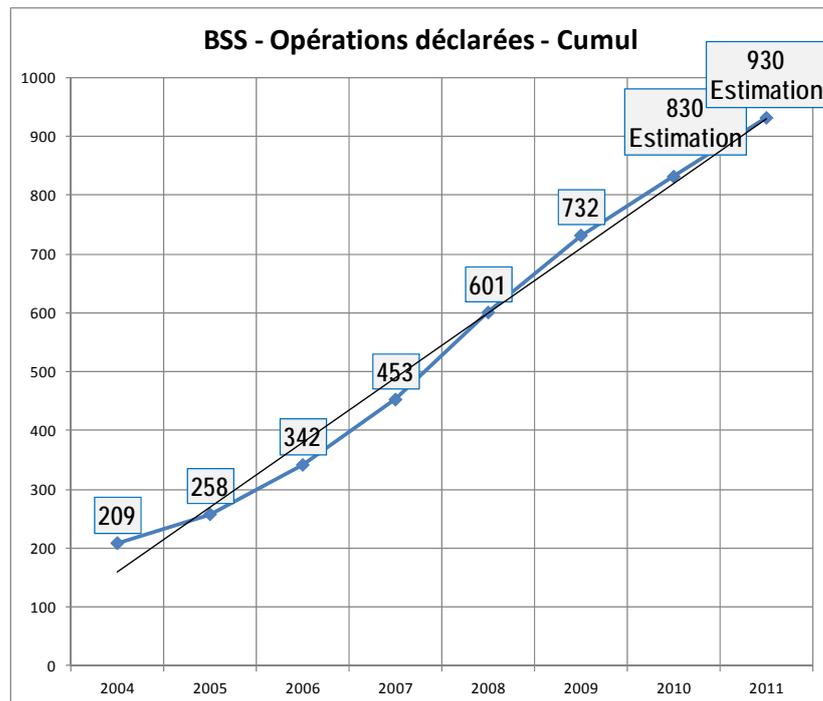


Illustration 5 : Évolution des opérations déclarées en BSS.

### Opérations chez les particuliers et sur le résidentiel et tertiaire

Sur les 800 opérations analysables à mi-2011, les particuliers représentent un peu plus de 8 opérations sur 10.

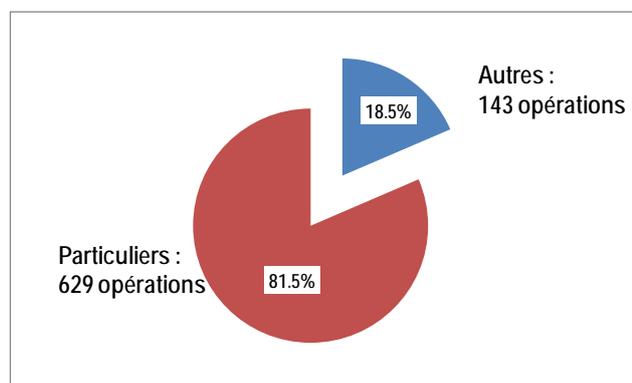


Illustration 6 : Répartition entre particuliers et opérations du collectif/tertiaire.

Ce résultat est significatif pour la politique régionale. Citons par exemple les questions suivantes :

- le soutien de la demande des particuliers étant essentiellement assuré par le crédit d'impôt, la Région n'a encore que peu de moyens d'action sur la plus grande partie de la demande en termes de nombre d'opérations ;

- celles-ci étant dispersées et de taille modeste, un dispositif régional de soutien de la demande requiert des moyens d'instruction lourds et un bon maillage territorial ;
- la politique de développement de la qualité de la filière doit prendre en compte des actions auprès de milliers d'acteurs de la demande (information auprès des particuliers), aussi bien qu'auprès des professionnels (foreurs et installateurs de pompes à chaleur). Parmi ces derniers, il faut prendre en compte, de façon appropriée à leur importance, ceux qui s'adressent aux particuliers.

### 3.1.4. Opérations PAC sur sondes géothermiques verticales

Le détail selon la technologie utilisée a pu être approché. La BSS recense à mi 2011, après dé-doublonnage, une centaine d'opérations sur sondes. Il est intéressant de noter qu'en région Centre :

- les premières opérations sur sondes sont apparues en 2004 ;
- le parc actuel d'installations sur sondes représente d'ores et déjà 13 % du total des installations géothermiques Très Basse Energie (TBE), soit un peu plus d'une installation sur 10 ;
- cette pénétration est la même chez les particuliers et dans le résidentiel et tertiaire ;
- sur les opérations récentes de géothermie TBE, la technique sondes représente 22 % des opérations, soit un peu plus d'une opération sur 5 ;
- la part des sondes augmente donc fortement.

Enfin, la proportion d'opérations sur sondes et sur nappes semble la même chez les particuliers que dans le résidentiel et tertiaire :

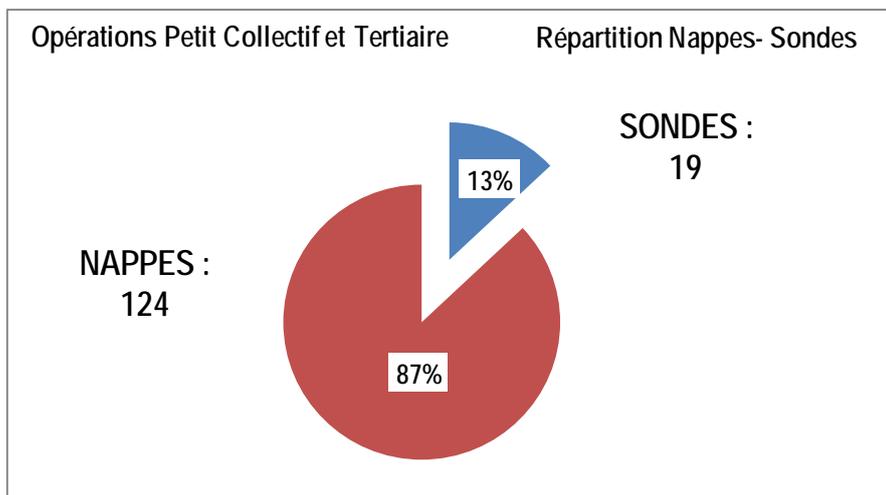


Illustration 7 : Répartition des projets nappes et sondes.

La carte de la page suivante présente le nombre d'opérations par commune dans le collectif et tertiaire de la région Centre.

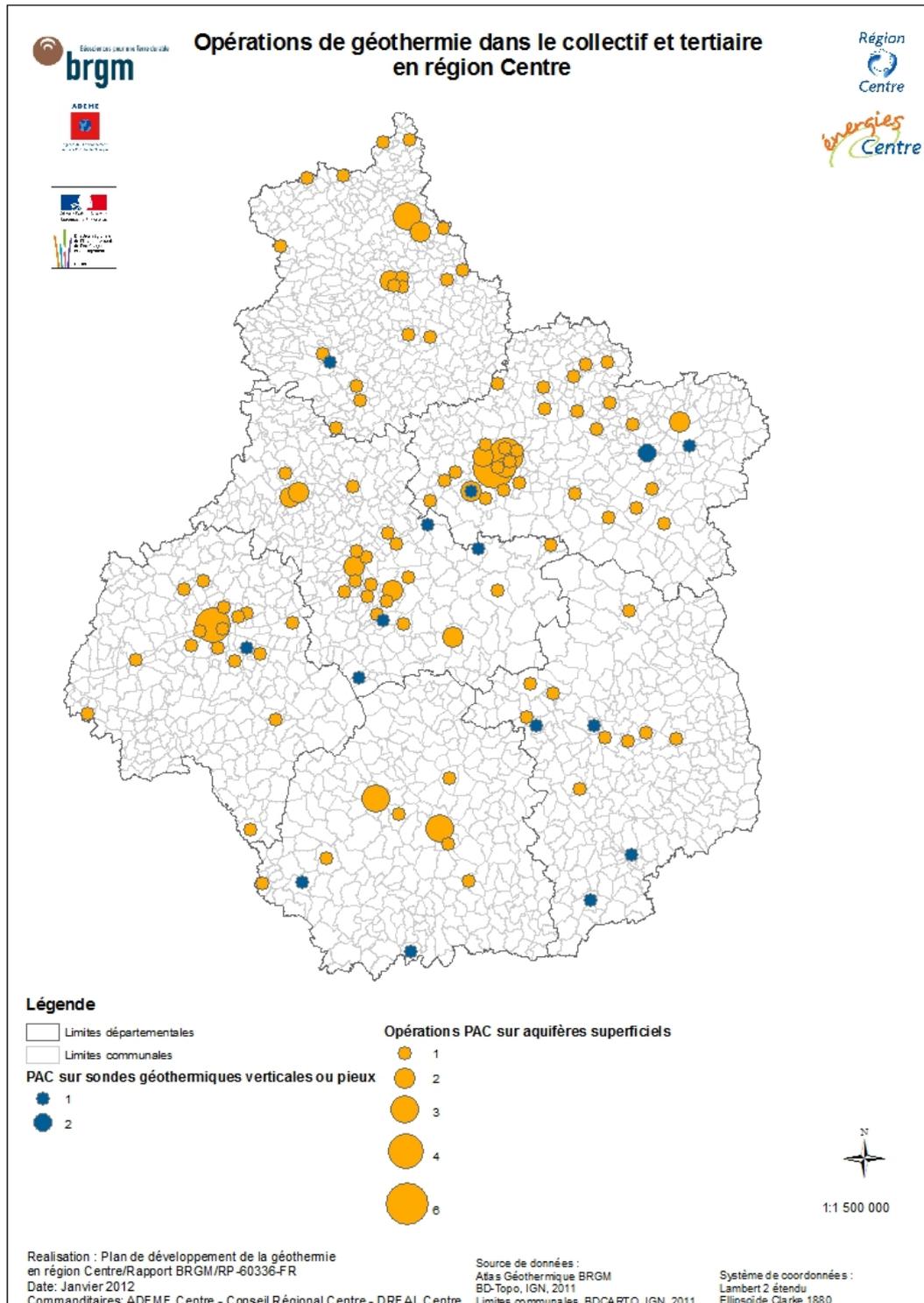


Illustration 8 : Opérations dans le collectif/tertiaire en région Centre.

## 3.2. GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA RÉGION CENTRE

### 3.2.1. Contexte géologique général

La géologie de la région Centre présente de nombreuses formations aquifères, qui se trouvent souvent sous couverture. En effet, la géologie régionale s'inscrit dans le bassin sédimentaire parisien, elle peut être schématisée comme un « empilement » de strates géologiques qui plongent depuis la bordure du bassin parisien (sud et sud-ouest de la région), vers le centre du bassin de Paris (nord-est de la région).

Les formations les plus anciennes (socle, Trias) affleurent en bordure sud et sud-ouest et se trouvent à grande profondeur (plus de 1 000 m) dans la partie nord-est de la région.

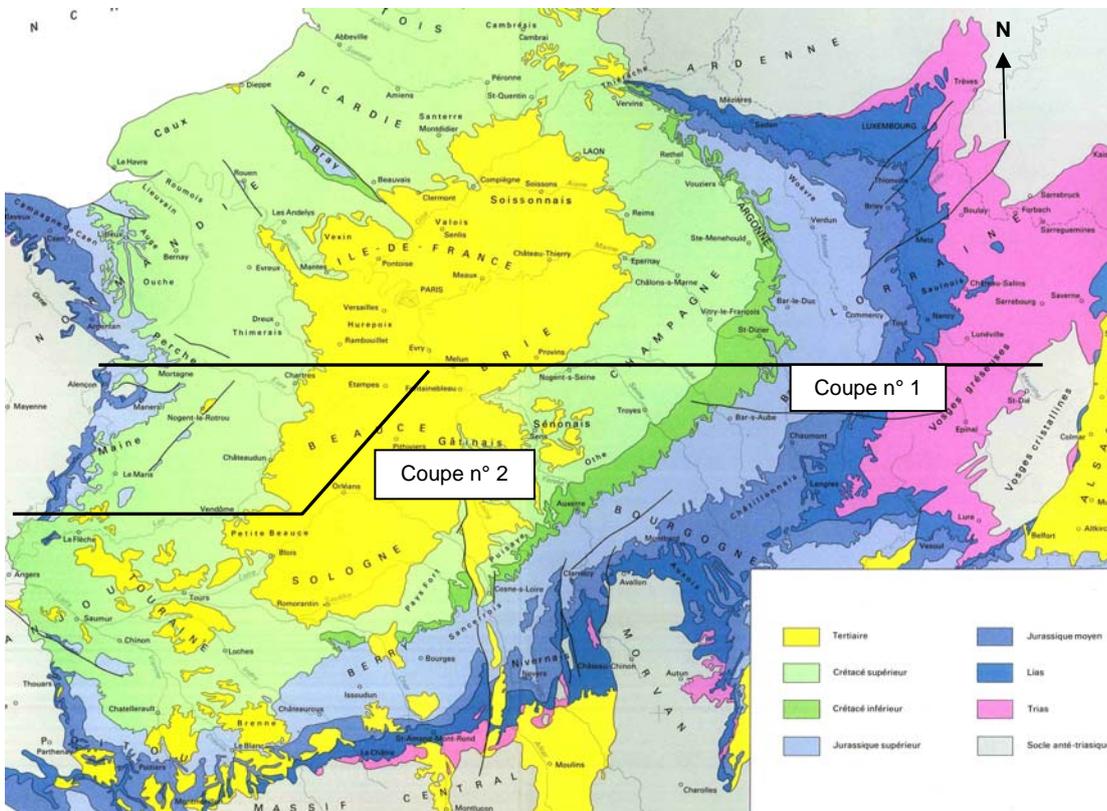


Illustration 9 : Carte géologique simplifiée du bassin de Paris (in Synthèse géologique du bassin de Paris, tome 2, BRGM, 1980).

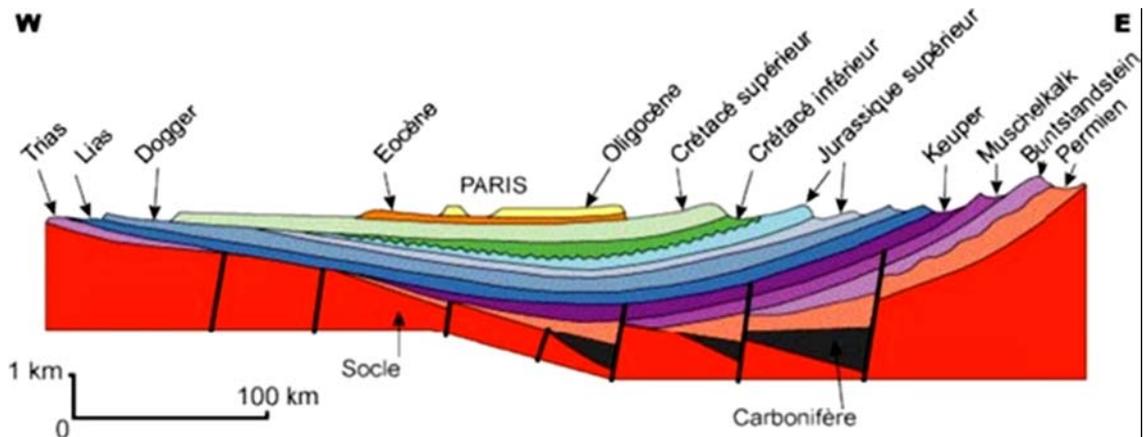


Illustration 10 : Coupe n° 1 schématique ouest-est du bassin de Paris (d'après Chantraine, 1996).

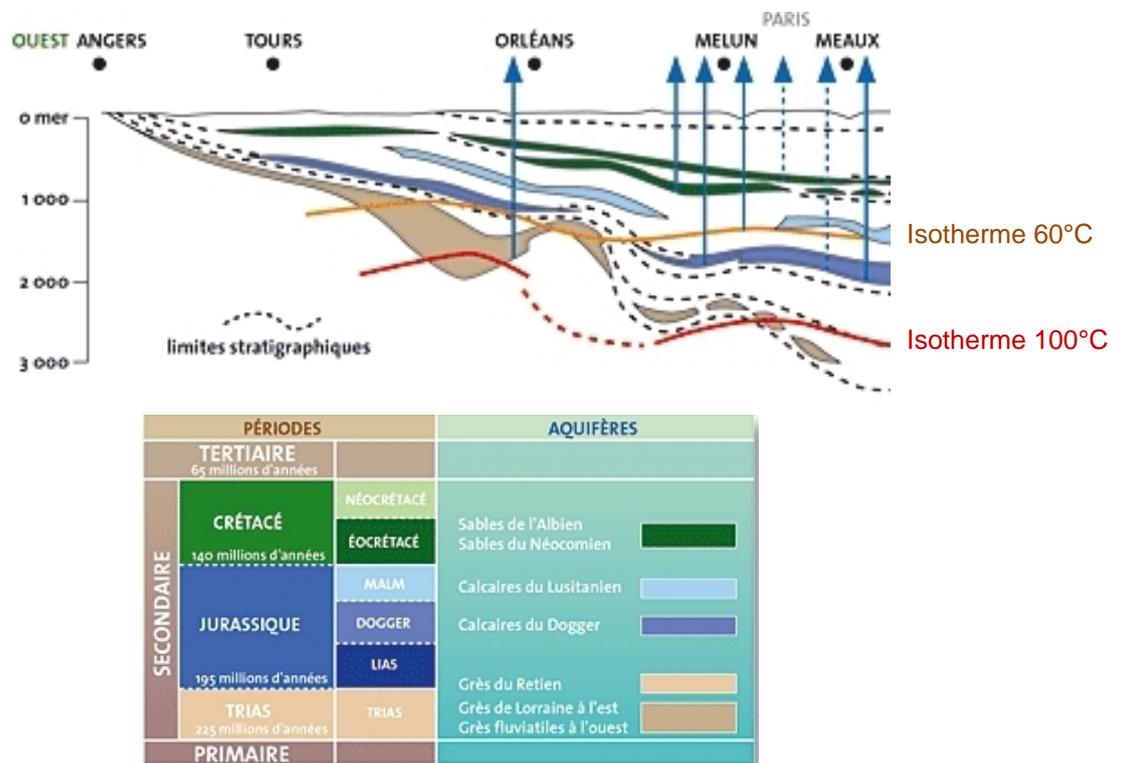


Illustration 11 : Coupe n° 2 nord-est - sud-ouest, puis est-ouest, en région Centre.

### 3.2.2. Formation géologiques susceptibles de contenir les principaux aquifères en région Centre

Habituellement, on peut distinguer deux types de formations aquifères :

- les formations continues : constituées par des sables, de la craie sableuse, des grès, et exceptionnellement par du calcaire à réseau fissuré très dense ;

- les formations discontinues : calcaire, granite... Ces roches sont intrinsèquement compactes ; l'eau ne peut y être contenue que dans des fissures ou des fractures, voire des cavités karstiques. La rencontre de l'eau dans une telle roche est considérée comme « hasardeuse ». De ce fait, on ne peut pas parler de débit moyen pour ce type d'aquifère, mais d'une probabilité de débit avec un risque non négligeable d'être nul.

Les **principales formations aquifères de la région Centre sont présentées ci-dessous** selon un ordre chronologique, en partant des plus récentes, c'est à dire les plus superficielles.

### ***Alluvions***

Elles sont généralement composées de sables et de graviers avec des argiles plus ou moins abondantes. Leur épaisseur n'excède pas 10 m. **Seules les alluvions des grands cours d'eau** offrent une **ressource exploitable** : Loire, Eure, Loir, Indre, Creuse, Cher et Loing.

La ressource se trouve souvent dans des chenaux sableux anastomosés<sup>2</sup> dans des ensembles argileux. De façon générale, les forages situés dans les alluvions traversent la totalité de celles-ci, et captent en même temps l'aquifère sous-jacent qui peut être la Craie du Séno-Turonien ou les Calcaires de Beauce. Ainsi, il n'est pas possible d'isoler les alluvions comme une ressource propre. La ressource en eau étant assurée bien souvent par l'aquifère sous-jacent.

### ***Sables et argiles de Sologne***

Les formations de Sologne sont constituées de sables, silts et argiles d'une épaisseur totale atteignant environ 50 m. Les eaux, localement contenues dans les sables, sont parfois en charge sous les niveaux argileux. Elles peuvent, par drainance, participer à l'alimentation des calcaires de Beauce sous-jacents.

Ce réservoir peut être considéré comme étant un aquifère multicouche, ou d'une multitude de petites nappes (pour la partie superficielle), dont les ressources potentielles sont modestes. La **productivité** des niveaux sableux est variable et **généralement assez faible**.

Les petits captages ne fournissent que des débits réduits (3 à 8 m<sup>3</sup>/h), mais la probabilité d'obtenir un débit plus important augmente avec la profondeur du captage (plus de 50 m<sup>3</sup>/h pour quelques forages profonds).

---

<sup>2</sup> Anastomosés = assemblés et/ou raccordés

### ***Calcaires de Beauce***

Les calcaires de Beauce (Éocène à Aquitanien) constituent l'un des principaux réservoirs aquifères de la région Centre, avec un enjeu économique fort (irrigation, eau potable, etc.).

C'est l'aquifère le **plus productif de la région Centre**, avec des débits possibles supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/h, et un risque géologique faible. En bordure occidentale, les débits peuvent être réduits en raison du dénoyage possible de certains forages en période de basses eaux.

Une baisse exceptionnelle du niveau de la nappe a été constatée durant les quatre années de sécheresse de 1988 à 1992, avec des conséquences sur l'environnement (assèchement de cours d'eau), comme sur l'économie (pompages).

### ***Craie séno-turonienne***

La série stratigraphique allant du Sénonien (plus récent) au Turonien (plus ancien) appartient au Crétacé supérieur. Cette série, formée par une **puissante assise crayeuse** (> 100 m), repose sur les formations du Cénomaniens dont le sommet, constitué par les marnes à Ostracées forment un écran peu perméable aux formations sableuses sous-jacentes du Cénomaniens.

Cette série séno-turonienne couvre la majeure partie de la région Centre, où elle se trouve bien souvent sous couverture (argiles à silex, calcaires de Beauce, sables et argiles de Sologne). Elle affleure très largement sur le pourtour ouest, est et sud de la région Centre.

La craie, bien que poreuse, est généralement peu perméable. Elle constitue cependant un bon aquifère dans sa partie supérieure lorsqu'elle est fissurée et altérée. Cette condition se rencontre aux affleurements, dans les grandes vallées et le long des accidents géologiques. Sur les plateaux et sous recouvrement, elle est moins productive.

La **productivité des forages** est extrêmement variable, fonction du développement des fractures ou de l'altération : la craie est un réservoir discontinu. Lorsque la nappe est libre, les débits peuvent parfois dépasser 150 m<sup>3</sup>/h, comme dans la vallée du Cher. Sur les plateaux, les débits sont modestes (autour de 20 m<sup>3</sup>/h en général) et les échecs en forage sont nombreux. Dès que l'on pénètre sous couverture, la productivité diminue ; en domaine profond, la craie n'est plus considérée comme aquifère.

### ***Sables et grés du Cénomaniens***

Les Sables du Cénomaniens s'étendent sur les deux tiers sud-ouest de la région. Ils affleurent en un arc fin en limite occidentale de la région et au sud, et s'enfoncent sous les formations crayeuses et marneuses autour de la fosse de Sologne.

En région Centre, ils sont désignés par les termes de « **Sables du Perche** » à l'ouest et « **Sables de Vierzon** » au sud. **L'épaisseur de ces sables** est généralement de **plus de 30 m** aux affleurements à l'ouest ; elle se réduit rapidement en profondeur et au sud.

La nappe, captive hors des affleurements, est drainée par la Loire. L'eau est artésienne et jaillissante sur quelques forages profonds. Cependant, suite à une exploitation relativement importante au regard de son alimentation, on assiste à un abaissement progressif de la nappe en domaine captif profond (région de Tours, vallées du Cher et de la Vienne, Sologne...).

La **productivité de l'aquifère** est très importante dans la Sarthe et le Maine-et-Loire où les sables affleurent sur une grande épaisseur (plus de 100 m<sup>3</sup>/h) ; elle est plus modeste dans la région, au fur et à mesure que l'on s'enfonce vers le centre de la fosse où les bancs de sable s'amincissent, se chargent en argile ou se cimentent (grès) ; elle se réduit également rapidement vers l'est et le sud. Des débits de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/h peuvent être obtenus sous la ville de Tours, mais ils ne sont plus que de 10 à 20 m<sup>3</sup>/h sous la Sologne ou en Eure-et-Loir.

### **Sables de l'Albien**

Ces formations apparaissent à l'affleurement uniquement au nord du département du Cher en un fin liseré, et s'étendent sous couverture vers le nord dans les départements du Loiret et de l'Eure-et-Loir.

La productivité est de quelques dizaines de m<sup>3</sup>/h, les débits pouvant atteindre 100 m<sup>3</sup>/h au nord du Loiret. L'eau est de bonne qualité, malgré une teneur en fer souvent excessive. Recouverte par d'épaisses couches argileuses, cette nappe est bien protégée des activités de surface.

Profonde, coûteuse à capter, mais bien protégée naturellement, cette nappe constitue une ressource à **réserver aux besoins en eau potable**. Du fait de la qualité de l'eau et de sa bonne protection naturelle, l'exploitation de cette nappe est très strictement réglementée, avec des prélèvements encadrés sur toute la région qui interdisent pratiquement tout nouveau captage.

Il convient toutefois de noter que cet aquifère, considéré comme intermédiaire entre les aquifères superficiels et les aquifères profonds, est amené à se développer en Île-de-France pour un usage géothermique, l'autorité administrative considérant alors que la géothermie, qui utilise la technologie du doublet de forages (un puits de production et un puits d'injection) ne participe pas au prélèvement d'eau et donc à l'épuisement de la nappe. La réalisation des forages destinés au captage de cet aquifère pour une utilisation strictement géothermique s'accompagne alors d'un cahier des charges de réalisation précis afin d'éviter tout type de pollution de l'aquifère.

## ***Calcaires du Jurassique***

Les formations jurassiques constituent en fait un grand ensemble, caractérisé par une succession de marnes ou argiles et de calcaires. Les réservoirs aquifères correspondent aux bancs calcaires. Ces formations affleurent dans la partie sud de la région (départements de l'Indre et du Cher), plongent globalement vers le nord, et se trouvent en profondeur sous les couvertures sédimentaires d'âge plus récent.

Les principaux niveaux aquifères sont :

- Jurassique supérieur ou Malm : Tithonien inférieur, Oxfordien moyen à Kimméridgien inférieur ;
- Jurassique moyen ou Dogger : Bathonien moyen à Callovien inférieur.
- Jurassique inférieur ou Lias : Hettangien et Sinémurien.

Les bancs calcaires sont presque toujours compacts, intrinsèquement peu perméables. L'eau contenue est liée à une perméabilité de fracture et de fissure, voire de karst.

Certains calcaires présentent un faciès différent, il s'agit de calcaires récifaux, oolithiques, graveleux ou pisolithiques. Le calcaire se présente alors sous la forme de grains, ou de sphérules, avec une porosité semblable à celle d'un sable. Les niveaux géologiques concernés sont ceux de l'Oxfordien supérieur (ancien Séquanien), et le Dogger dans l'Indre.

Les nappes contenues dans les calcaires d'âge jurassique constituent les principales ressources en eau souterraine des départements du Cher et de l'Indre. Ces nappes ont la particularité d'être peu capacitives du fait de leurs caractéristiques physiques (porosité de fissures principalement) et d'être par conséquent très sensibles aux variations climatiques (recharge et vidange rapide). Elles jouent un rôle important dans l'alimentation des rivières notamment en période sèche où, en absence de pluie, l'essentiel de leur débit est assuré par les apports souterrains.

La productivité des forages est très variable et liée à la fracturation.

## ***Grès du Trias***

Au sud de la région, contre le « Socle » du Massif central, affleurent les sables et grès du Trias. Dans l'Indre, ils apparaissent à l'est de Chaillac et affleurent en un fin liseré très peu épais, constituant généralement un aquifère médiocre ; mais cette formation devient de plus en plus sableuse et s'épaissit en plongeant vers le nord où elle constitue un excellent réservoir (Maillet -à 30 km au sud de Châteauroux- et Châteauroux dans l'Indre, Contres dans le Loir-et-Cher).

Dans les Grès, la nappe s'écoule vers le nord ; captive, elle est artésienne sur la plupart des captages profonds. Elle s'abaisse localement sous l'effet de pompages intenses.

La productivité est faible aux affleurements où l'épaisseur des sables est réduite ; mais elle augmente progressivement avec la profondeur : à Maillet, les débits atteignent 70 m<sup>3</sup>/h -avec un débit spécifique de 2 m<sup>3</sup>/hm- et le forage de Châteauroux a fourni 120 m<sup>3</sup>/h en pompage.

## Socle

Le socle est constitué par du granite ou des roches métamorphiques (gneiss, micaschistes). Ces roches sont compactes et l'eau ne peut habituellement y être trouvée qu'en petite quantité dans des fractures, des arènes ou des zones d'altération.

Le BRGM se penche actuellement sur la reconnaissance de ces formations qui, du fait de l'abondance de fracturations naturelles ou de l'altération des roches qui les composent, peuvent former des aquifères parfois non négligeables pour un développement géothermique et d'autant plus que les températures peuvent y être très importantes.

### 3.2.3. Pour en savoir plus : accès aux données sur les eaux souterraines

Parmi les informations disponibles sur les nappes souterraines, on peut distinguer des données de type ponctuel (forages, sources, etc.) et des données à l'échelle d'un « territoire » (cartes, études, etc.). Un grand nombre d'informations est accessible sur des sites internet de mise à disposition des données à l'attention du « public ».

Un site d'information dédié aux eaux souterraines (SIGES<sup>3</sup>) de la région Centre a été réalisé par le BRGM, en partenariat avec les Agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine-Normandie, la DREAL Centre et le Conseil Régional Centre. Il est accessible à l'adresse suivante : <http://sigescen.brgm.fr>.



Illustration 12 : Extrait de la page d'accueil du site internet sur les eaux souterraines en région Centre (SIGES Centre).

<sup>3</sup> Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines

Le site SIGES Centre rassemble et présente de manière structurée les données disponibles sur les eaux souterraines. Selon les thématiques (qualité, législation, géothermie), ce site oriente vers les sites internet correspondants.

### **Données ponctuelles**

Les principales sources d'informations ponctuelles sont :

- site internet <http://infoterre.brgm.fr/> : données issues de la déclaration de forages, rassemblées dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) ; dans le cas de forages d'eau, l'indication du niveau statique de la nappe y est parfois indiqué ;
- site internet <http://www.ades.eaufrance.fr/> : site d'« Accès aux Données sur les Eaux Souterraines » (ADES), il rassemble les données de suivi régulier des nappes d'eau souterraines, que ce soit un suivi quantitatif (niveau piézométrique) ou qualitatif (analyses d'eau).

### **Données à l'échelle d'un territoire**

Les cartes géologiques à 1/50 000, éditées par le BRGM, apportent une information géologique générale. Ces cartes permettent de consulter la nature des formations géologiques affleurantes, ainsi qu'un ensemble d'informations sur le sous-sol. Les notices des cartes géologiques proposent parfois un descriptif succinct des eaux souterraines de la feuille géologique concernée.

Il existe deux référentiels de délimitation et d'identification des aquifères :

- les **entités hydrogéologiques** du Référentiel Hydrogéologique Français **BD LISA**<sup>4</sup>, dont la mise à jour est en cours de finalisation : La BD LISA constitue une cartographie des entités hydrogéologiques (systèmes aquifères et non aquifères). Ainsi, des niveaux cartographiques ont été définis en fonction de l'importance des formations :
  - 14 grands systèmes ou grands domaines de niveau 1 au niveau national (NV1),
  - 36 entités de niveau régional, différenciées en « systèmes aquifères » et « domaines hydrogéologiques » (NV2),
  - 70 entités de niveau local, différenciées en « unités aquifères », « unités semi-perméables » et « unités imperméables » (NV3 selon la terminologie du guide méthodologique national (Schomburgk *et al.*, 2010)) ;
- les **masses d'eaux souterraines** : elles ont été établies suite à la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), et correspondent souvent à un regroupement de plusieurs entités hydrogéologiques du Référentiel Hydrogéologique, ou à une délimitation distincte basée sur les bassins versants hydrologiques. Une mise à jour de ces masses d'eau est en cours de réflexion, en cohérence avec l'actualisation des entités hydrogéologiques.

---

<sup>4</sup> Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères

Pour plus d'informations sur le référentiel BD LISA, il faut se reporter au rapport BRGM/RP-58257-FR (Schomburgk *et al.*, 2010).

L'illustration 13 présente la superposition des principales formations de la BD LISA pour la région Centre.

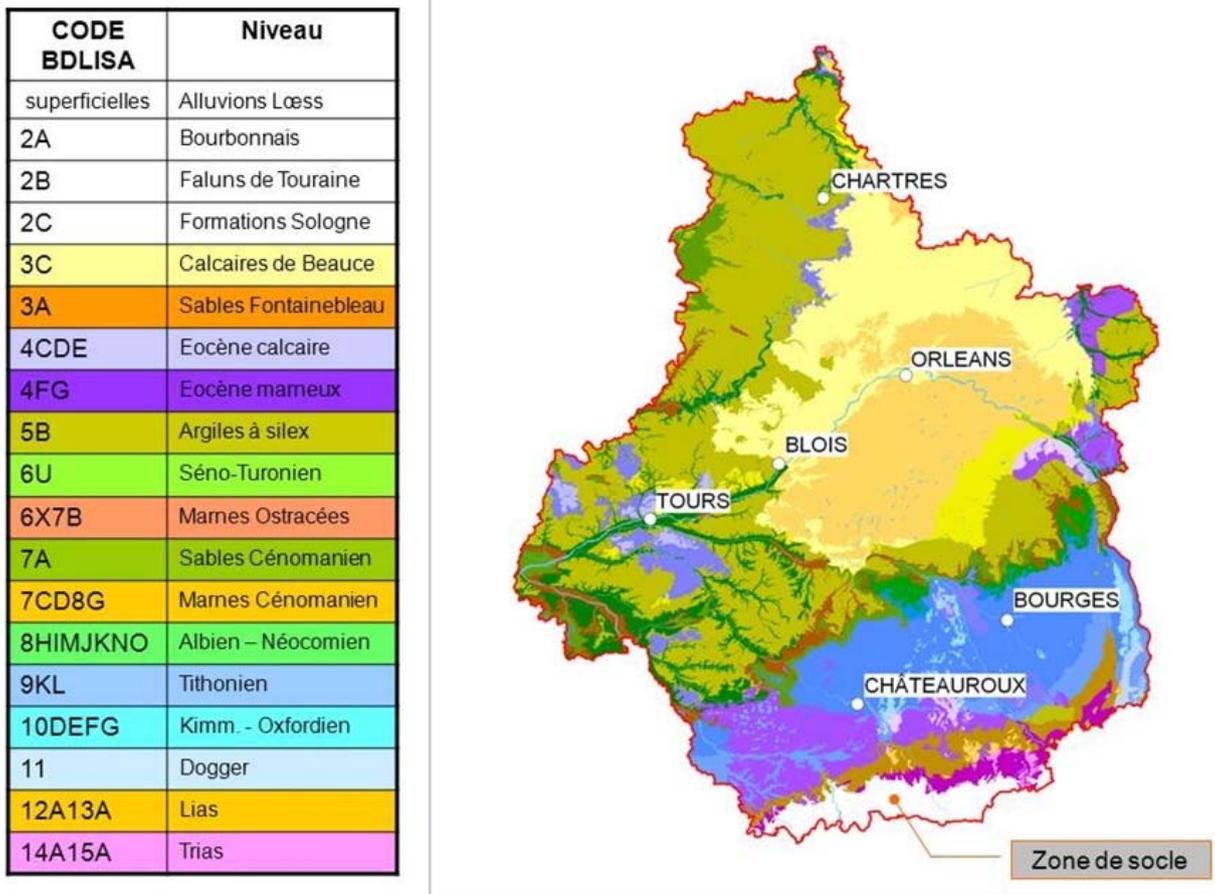


Illustration 13 : Carte régionale des principales entités hydrogéologiques (BD LISA) après regroupement pour la région Centre.

### 3.3. RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES

Le potentiel géothermique des aquifères de la région Centre a fait l'objet de quelques études globales, dont les résultats sont consultables dans les rapports suivants :

- potentiel géothermique du bassin parisien (Housse et Maget, 1976) ;
- étude sur les possibilités d'utilisation de la géothermie en région Centre (Foucher, Maget, Tournaye, 1979) ;
- atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre (Martin *et al.*, 2007).

L'étude réalisée sur **la géothermie très basse énergie** (température < 40 °C), laquelle a conduit à la réalisation d'un atlas des potentialités, porte sur les **ressources aquifères dites « superficielles »**, c'est-à-dire les niveaux aquifères situés à une profondeur comprise entre 0 et 100 m. Une consultation des potentialités géothermiques sur nappe pour le territoire de la région Centre est possible sur le site internet <http://www.geothermie-perspectives.fr/>, dans l'onglet dédié à la géothermie en région.

Il existe également en région Centre des **ressources de basse énergie** (40 à 90 °C), qui correspondent aux **ressources aquifères dites « profondes »**, soit principalement les formations du Dogger et du Trias, qui se trouvent à une profondeur atteignant plus de 1 000 m, notamment dans les parties centrale et nord-est de la région Centre.

Ces ressources aquifères « profondes » ont été étudiées principalement dans les années 1970, sur la base des reconnaissances réalisées par les forages de prospection pétrolière.

Un travail spécifique a été réalisé par le BRGM en 2011 dans le cadre de la présente étude afin de préciser les potentialités géothermales du Dogger et du Trias. Les résultats sont présentés dans le paragraphe 3.4.

### **3.3.1. Présentation des ressources géothermales aquifères « superficielles » (0 à 100 m)**

L'ensemble des formations aquifères listées dans le paragraphe 3.2.2 peuvent être présentes à l'affleurement ou à faible profondeur en région Centre, et constituent de fait des ressources dites « superficielles » permettant de réaliser des opérations de géothermie sur nappe de très basse énergie.

De manière simplifiée, on peut retenir les aquifères suivants pour les principaux secteurs de la région :

- la nappe des calcaires de Beauce (et la craie séno-turonienne sous-jacente) dans la région du même nom, c'est-à-dire dans la partie nord de la région Centre ;
- les sables et argiles de Sologne, qui occupent la partie centrale de la région, constituent en fait en ressource médiocre dont la productivité permet de répondre essentiellement à des projets à usage domestique ;
- la nappe de la craie séno-turonienne en Touraine (partie ouest), dans le Gâtinais (partie est de la région) et en bordure sud de la Sologne ;
- les nappes des formations calcaires du Jurassique (dont le Dogger) dans le secteur du Berry (partie sud de la région), et nappe du Trias en limite sud.

*NB : les nappes du Dogger et du Trias peuvent donc constituer également des ressources superficielles, dans la partie sud de la région où ces formations sont rencontrées à faible profondeur.*

Les nappes du Cénomaniens et de l'Albien, bien que potentiellement exploitables pour un usage géothermique, se trouvent la plupart du temps à une profondeur > 100 m, protégées de la surface par des formations sus-jacentes, et sont généralement considérées comme des ressources à réserver pour l'eau potable.

Les contraintes d'exploitation des aquifères sont précisées dans le paragraphe 3.5.

### **3.3.2. Présentation des ressources géothermales aquifères « profondes » (Dogger et Trias)**

L'aquifère du Dogger (Jurassique moyen) est un aquifère bien connu en Île-de-France car il y est exploité depuis plus de 30 ans (30 réseaux de chaleur géothermiques sont alimentés par cet aquifère profond). Situé entre 1 700 m et 1 900 m de profondeur, sa température varie entre 55 et 80 °C, ce qui permet « un usage direct » de la chaleur (sans utilisation de pompe à chaleur).

La coupe du bassin de Paris présentée par l'illustration 11 montre que les profondeurs du Dogger et du Trias sont moindres en région Centre : les températures seront alors plus faibles, les profondeurs de forage, et donc les coûts associés, le seront également.

Les aquifères profonds de la région Centre, permettant d'envisager le développement d'opérations de géothermie basse énergie (alors que les opérations sur aquifères superficiels sont dites de géothermie très basse énergie), sont représentés principalement par les niveaux perméables du Jurassique (l'aquifère du Dogger, est l'étage moyen du Jurassique) et du Trias.

Les aquifères du Dogger et du Trias sont présents sur la quasi-totalité de la région Centre. Ils se trouvent à grande profondeur sur la majeure partie du territoire, en dehors de la partie sud des départements du Cher et de l'Indre où ces deux niveaux géologiques affleurent. Leur profondeur atteint plus de 1 500 m (Dogger), voire plus de 2 000 m (Trias) à l'extrême nord-est de la région, dans les secteurs de Pithiviers et de Montargis. Compte-tenu de leur température qui peut atteindre 70 °C, et du caractère généralement salé des eaux, elles constituent des ressources adaptées à un usage géothermique de basse énergie.

Quelques opérations valorisent à l'heure actuelle ces aquifères dits « profonds ».

Il existe deux forages géothermiques en région Centre, deux forages à Châteauroux (Indre) auquel il faut ajouter le doublet de Melleray (Loiret) réalisé en 1981 et fermé en 1986.

#### **• Opération de la ZAC Saint-Jean à Châteauroux (Indre) :**

- un forage au Trias, à 670 m de profondeur, équipé jusqu'à 516,5 m. Son objectif est de fournir de l'eau à 34 °C avec un débit de 100 m<sup>3</sup>/h ;
- un forage au Dogger (Jurassique), à 160 m de profondeur. Son objectif est de fournir de l'eau à 16°C pour un débit de 200 m<sup>3</sup>/h maximum.

Au total, environ 440 000 m<sup>3</sup> sont pompés dans ces deux nappes chaque année, avec rejet dans le réseau des eaux de surface, en l'absence de forages de réinjection.

Compte tenu du niveau de température de ces deux aquifères à Châteauroux, la chaleur délivrée aux utilisateurs est relevée par un ensemble de pompe à chaleur. Ces caractéristiques particulières en limite de bassin nécessitent, pour la réalisation d'opérations nouvelles, la prise en compte de l'utilisation de pompes à chaleur, au cours de l'étude de faisabilité.

Toutefois, un avantage est identifié dans les mêmes zones, qui est la faible salinité des fluides exploités dont la conséquence est un gain en coût d'exploitation en matière de lutte contre les dépôts et la corrosion.

• **Opération de Melleray (commune de Saint-Denis-en-Val dans le Loiret)**

- un doublet au Trias mis en service en août 1982 a montré la difficulté de réinjecter dans les grès du Trias et a été fermé en 1986.

Cependant, les deux aquifères ciblés ici, du Dogger et du Trias, sont très mal connus au niveau de la région Centre. Ainsi, il a été proposé dans le cadre de cette étude d'améliorer la caractérisation des ressources géothermiques des aquifères du Jurassique (Dogger) et du Trias en région Centre, en réalisant des cartographies.

### **3.4. RESSOURCES GÉOTHERMALES AQUIFÈRES PROFONDES : COMPLÉMENTS D'ÉTUDE ET CARTOGRAPHIES**

L'objectif est de pouvoir cartographier les caractéristiques des aquifères, et dans l'idéal, d'établir une carte du potentiel géothermique. Le potentiel géothermique se définit principalement à partir des paramètres que sont la température et la transmissivité (qui permettra in fine de déterminer un débit de production).

Dans un premier temps, il s'agit de récupérer des valeurs ponctuelles et mesurées des paramètres pouvant être utiles à la détermination du potentiel. Pour cela, il est nécessaire d'analyser les données issues d'anciens forages (pétroliers ou géothermiques) qui ont atteint les aquifères ciblés.

Dans un second temps, l'objectif est de pouvoir interpoler ces données ponctuelles en complétant des synthèses existantes pour produire des cartes à l'échelle de la région Centre. Les cartographies correspondent tout d'abord à des cartes uni-critères (principalement, profondeur, température, épaisseur, perméabilité) qu'il faut ensuite croiser pour déterminer le potentiel géothermique (épaisseur et perméabilité permettant de déterminer la transmissivité).

#### **3.4.1. Analyse des Rapports de Fin de Sondage (RFS)**

L'analyse des rapports de fin de sondages pétroliers ou géothermiques a pour but la récupération d'un certain nombre de paramètres descriptifs des forages sélectionnés (profondeurs des zones productrices, correspondance avec les niveaux du référentiel

hydrogéologique français, valeurs de perméabilité, porosité, température, pression, salinité...). L'analyse des rapports de fin de sondage a été sous-traitée à la société GeoGreen.

L'étude des nombreux forages réalisés dans le cadre de la recherche pétrolière, du stockage souterrain de gaz, et de la géothermie permet de recenser et de situer les données pertinentes (profondeur, température probable, porosité, perméabilité, salinité, épaisseurs totales et utiles) géographiquement dans un Système d'Information Géologique (SIG).

71 forages ont été étudiés dans le cadre de cette étude. Parmi ces 71 puits, 11 atteignent le Dogger, 32 le Trias, 26 le socle, auxquels s'ajoutent 2 puits géothermiques.

Les informations disponibles sur l'utilisation des 71 puits étudiés, qui sont probablement très partielles, indiquent que :

- 41 (soit environ 58 %) sont bouchés ou abandonnés (les puits abandonnés sont en général ceux référencés comme « secs » au sens des pétroliers) ;
- 7 (soit environ 10 %) sont en exploitation ;
- 23 (soit environ 32 %) ne font l'objet d'aucune indication sur leur situation.

Les départements du Loiret et du Loir-et-Cher sont les mieux couverts par le nombre de ces forages.

Les données sur les aquifères ont été collectées en cohérence avec le cadre hydrogéologique existant (référentiel BD LISA du BRGM), afin de conserver la nomenclature de la base de données existante sur les eaux souterraines de la région Centre. La figure (ill. 14) ci-après présente la méthodologie de travail de GeoGreen pour la récupération des données ponctuelles et la mise en correspondance avec la BD Lisa.

Les données suivantes ont été recherchées pour chaque puits :

- coordonnées XY en Lambert 2 étendu ;
- code BSS, nom forage, codification forage, lithologie simplifiée ;
- cotes foreurs et toit/mur niveaux BdLisa, hauteurs totales et utiles ;
- valeurs de porosité (issues de carottes ou de diagraphies), perméabilité, salinité, température, pression.

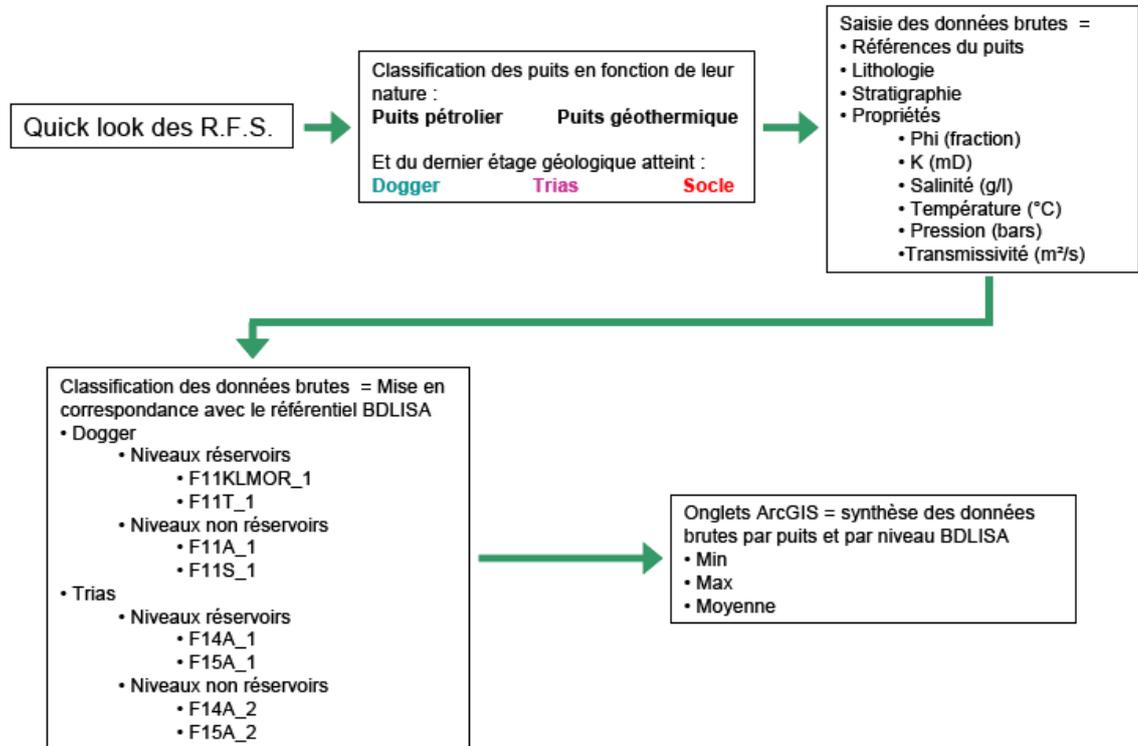


Illustration 14 : Méthodologie employée par GeoGreen pour l'analyse des RFS.

• Divers : commentaires, épaisseurs

Lorsqu'elles étaient disponibles, les transmissivités interprétées (moins de 6 % des 71 forages étudiés) à partir d'essais *in-situ* d'enregistrements de pression<sup>5</sup>. Cette difficulté résulte du type d'objectifs que se fixe un opérateur de forage. L'opérateur pétrolier recherche la présence d'hydrocarbures dans la cible qu'il s'est fixée, tandis que l'opérateur en géothermie recherche la productivité de l'aquifère, c'est-à-dire le débit d'exploitation qu'il pourra en tirer, lequel, avec la température, détermine la puissance thermique de l'opération.

*Pour plus de détails sur la méthodologie, le BRGM dispose d'un rapport technique détaillé qu'il peut mettre à disposition sur simple demande à l'un des auteurs du présent rapport.*

<sup>5</sup> Tests en trou nu : un « tester » est schématiquement constitué par un manchon fixé à la base du train de tiges lors de la foration, et en communication avec le fluide extérieur et les tiges par l'intermédiaire d'obturateurs. Des enregistreurs continus de pression sont placés dans cet ensemble, et permettent un suivi en deux phases, à l'ouverture de l'obturateur extérieur, puis de fermeture de l'obturateur intérieur. L'évaluation de la transmissivité est issue de l'interprétation de la courbe de remontée de pression.

XL2E	YL2E	BSS	NOM PUIITS	Profondeur	Nv Geol1	Nv Geol2	Z t	Z Sol	Stratigraphie	Toit m	Mur m	Toit abs	Mur abs	Litho	BDLisa nv2	BDLisa nv3	Toit BDLISA	Mur BDLISA
500 819.98	2 268 205.10	04588X0	AMBOISE 1	1020	TRIAS	TRIAS	67.5	64.5	DOGGER	700	803	-632.5	-735.5	Calcaire	F11KLMOR	F11KLMOR_1	700	803
633 510.06	2 268 900.98	04637X0	SUBLIGNY 1	1123.3	KEUPER	TRIAS	268.57	268.565	DOGGER	612.5	757	-343.935	-488.435	Calcaire	F11KLMOR	F11KLMOR_1	612.5	687.5
633 510.06	2 268 900.98	04637X0	SUBLIGNY 1	1123.3	KEUPER	TRIAS	268.57	268.565	DOGGER	612.5	757	-343.935	-488.435	Calcaire m	F11A	F11A_1	687.5	725
633 510.06	2 268 900.98	04637X0	SUBLIGNY 1	1123.3	KEUPER	TRIAS	268.57	268.565	DOGGER	612.5	757	-343.935	-488.435	Calcaire	F11T	F11T_1	725	757
562 999.98	2 287 899.93	04305X0	VILLEBOURGE	1596.4	TRIAS	TRIAS	110.56	110.56	DOGGER	1115	1227	-1004.44	-1116.44	Calcaire	F11KLMOR	F11KLMOR_1	1084	1092
562 999.98	2 287 899.93	04305X0	VILLEBOURGE	1596.4	TRIAS	TRIAS	110.56	110.56	DOGGER	1115	1227	-1004.44	-1116.44	Calcaire	F11T	F11T_1	1092	1096

Toit abs1	Mur abs1	Phi min	Phi max	Phi moy	Nb ValPhi1	Type Phi1	Phi min	Phi max	Phi moy	Nb ValPhi1	Type Phi1	HT	HU	K min	K max	K m	Nb ValKCa	Type Kcar	K min	K max
-985.44	-1067.44	0.1	0.14	0.12	2	Carotte								7.1	12	12	12	1		
-1061.19	-1074.47	0.05	0.05	0.05	1	Carotte	0.06	0.08	0.07	2	Diagraphies									
-1081.47	-1146.47	0.05	0.05	0.05	1	Carotte	0.06	0.08	0.07	2	Diagraphies									
-1085.25	-1254.75		0.15	0.07	2	Carotte														
-1322	-1423	0.07	0.16	0.13	3	Carotte								0.57	22.10	3.55	2			
-975.87	-1110.87	0.04	0.07	0.05	3	Carotte								0.1	0.1	0.1	3			

K m	Nb ValKDi	Type Ktest	Sali min	Sali max	Sali m	Nb ValSal	Temp	Nb ValTen	P min	P max	P moy	Nb ValP	Trans min	Trans max	Nb ValTrai	Remarques	Commentai
			10.5	10.5	10.5	1											
			25	25	25	1											
			25	25	25	1											

Illustration 15 : Structure de la feuille Excel synthétisant les données disponibles.

### 3.4.2. Limites des données

Des difficultés ont été rencontrées, notamment dans la mise en correspondance entre les données contenues dans les RFS et le découpage hydrogéologique, mais aussi, et surtout, lors de la synthèse des données et leur interpolation à l'ensemble du territoire régional.

La finalité de l'analyse des rapports de fin de sondage était la collecte de paramètres géolocalisés permettant d'évaluer ou de calculer le potentiel géothermique des aquifères profonds du Dogger et du Trias de la région Centre.

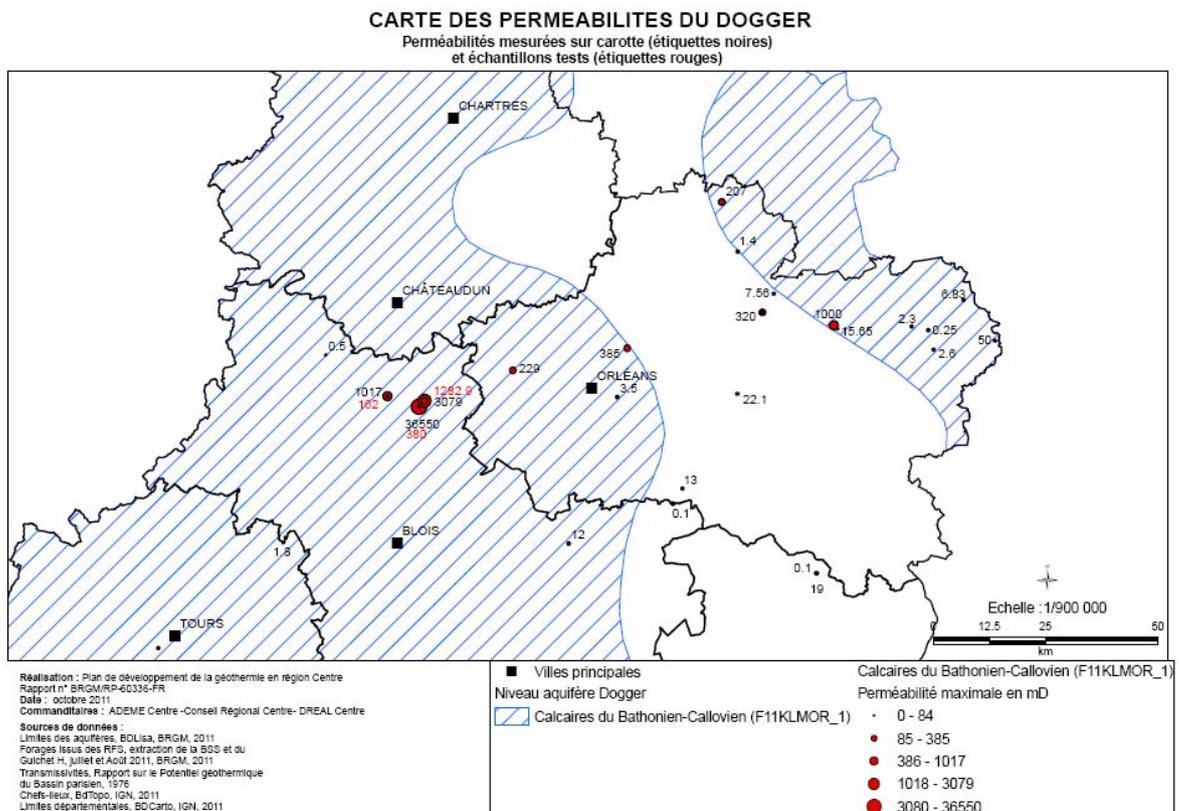
Cette évaluation devait se faire à partir d'un maillage de points (forages) par interpolation des valeurs de perméabilité, salinité, température. Nous souhaitons également calculer les valeurs de transmissivité à partir des valeurs de perméabilité et d'épaisseurs utiles relevées dans les RFS.

Cet objectif s'est heurté à deux difficultés difficiles à contourner :

- nous disposons, d'une part, de peu de données pour les niveaux réservoirs sélectionnés ; d'autre part, la distribution spatiale du jeu de données n'est pas homogène : la plupart des valeurs se trouve dans la partie nord-est de la région, en bordure de la région Île-de-France. Dans les parties sud, nord-ouest et ouest de la région Centre, nous ne disposons que de quelques forages. Dans certains départements (exemple de l'Eure-et-Loir), il n'y a que peu, voire pas du tout, de données ;
- en plus de la mauvaise répartition géographique du jeu de données, il existe une forte variabilité spatiale des paramètres utilisés et donc peu de tendances

permettant une interpolation précise. Par exemple, des forages très proches peuvent avoir des valeurs de perméabilité très différentes.

Ce phénomène concerne notamment la nature géologique d'un aquifère productif au sein de la même formation géologique. On pourrait penser que la perméabilité, mesurée en cours de forage, d'une même formation pourrait être étendue à une formation de même faciès dont la perméabilité n'a pas été mesurée. Cependant, les faciès peuvent changer radicalement dans un faible espace correspondant pourtant à une formation d'âge équivalent. Dans un tel contexte, l'épaisseur utile des aquifères étudiés souffre de la même variabilité que les perméabilités évoquées ci-dessus. Ces travaux, qui relèvent d'une discipline géologique dénommée « Stratigraphie séquentielle », sont actuellement en cours de développement au BRGM.



*Illustration 16 : Forte variabilité des valeurs de perméabilité (en mD) obtenues sur carotte (en noir) et par test (en rouge) – Niveau Bathonien (Dogger).*

Également, l'objectif principal est d'estimer le potentiel aquifère du Dogger et du Trias, c'est-à-dire la productivité potentielle qui peut être attendue d'un forage captant l'une ou l'autre de ces formations. Pour estimer le potentiel aquifère, il s'agit d'estimer la transmissivité des aquifères, qui correspond au produit de la perméabilité par l'épaisseur utile de l'aquifère. Or, les nombreuses données de perméabilité obtenues correspondent à des essais en laboratoire sur des échantillons de carottes prélevées lors des forages. Ces données sont trop ponctuelles et ne reflètent pas l'effet de la

fracturation se contentant de mesurer la perméabilité de la matrice de la roche. Elles fournissent *in fine* des données trop variables et sans doute pessimistes qui ne peuvent être exploitées pour estimer le potentiel aquifère.

Pour compléter ce commentaire, il importe de considérer qu'il n'existe pas aujourd'hui de solution mathématique et physique pour corréliser les valeurs de perméabilité mesurées sur carottes et celles mesurées lors d'un essai de puits, ce qui oblige à rejeter les premières pour ne pas risquer de fournir des informations par trop erronées.

### **3.4.3. Données complémentaires**

Pour pallier ce manque de données exploitables, nous avons décidé de compiler d'autres sources d'information afin d'améliorer la compréhension de ces réservoirs. Deux rapports de la fin des années 1970 ont été consultés (rapport sur le potentiel du Bassin parisien de 1976 et rapport d'étude des possibilités d'utilisation de la géothermie en région Centre de 1979). Ces rapports synthétisent plusieurs années d'études sur différents aquifères (dont le Dogger et le Trias).

### **3.4.4. Réalisation de cartes uni-critère**

La plupart des données de porosité avaient été mesurées sur carottes (valeurs obtenues sur des échantillons restreints de roches prélevés au moyen d'outils spécialisés à l'intérieur du forage, qui sont généralement considérées comme peu fiables du fait de la forte variabilité des mesures et de la non prise en compte du paramètre de viscosité).

Les cartes des transmissivités ne peuvent être réalisées étant donné la variété et les incohérences des données ponctuelles.

En effet, les seules données de transmissivité interprétées obtenues sont insuffisantes pour compléter les travaux réalisés en fin des années 70. On peut citer principalement le doublet géothermique réalisé à Melleray, où les tests en forage ont conduit à une valeur de 0,14 Darcy.mètres pour le Dogger (inférieur à ce qui était escompté) et de 2 à 4,5 Darcy.mètres pour le Trias. Il est à noter que ces tests in-situ, bien que plus représentatifs que les essais de perméabilité sur carottes, doivent être considérés avec précaution : dans le cas de Melleray, un test complémentaire a été réalisé après mise en place du tubage (crépine positionnée au Trias) et nettoyage de l'ouvrage, conduisant à une estimation de 15,5 Darcy.mètres, indiquant une productivité plus élevée que prévue de l'ouvrage.

*NB : pour le forage de Melleray, le débit d'exploitation prévisionnel avait été fixé à 175 m<sup>3</sup>/h, pour un rabattement de 200 m du niveau de la nappe (Cos, Fabris, Herbrich, Rojas, 1980).*

Au final, seules les grilles d'épaisseurs et des températures des réservoirs ont été générées et ont permis la réalisation de cartes.

Ainsi, les cartes concernant les critères suivants, et pour les deux aquifères sont présentés en annexe 1 :

- les profondeurs (toits des aquifères) ;
- les températures :
  - les données brutes de température sont limitées et souvent de nature très diverse (profondeur de mesure, prise en compte d'une correction en fonction de l'état du forage lors de la mesure, tel que présence de boues de forage, mesure avant ou après développement du puits, etc.),
  - de ce fait, la cartographie des températures a été réalisée selon une méthode de calcul utilisée dans le contexte des bassins sédimentaires français pour la création de grilles de température (Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: new data compilation and interpolation, Damien Bonté, Laurent Guillou-Frottier *et al.*, *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2010, n° 4) ;
- les épaisseurs utiles :
  - à dire d'expert, à partir de l'expérience accumulée sur cet aquifère en Ile-de-France, nous avons considéré que l'épaisseur utile du **réservoir du Dogger** est de l'ordre de 20 % de l'épaisseur totale du réservoir. À partir des données en entrée (RFS), nous avons donc additionné les épaisseurs des différents niveaux BdLisa du Dogger et créé une nouvelle colonne avec 20 % de la somme de ces valeurs ;
  - dans le cas de l'épaisseur du **réservoir du Trias**, nous avons retenu une valeur de 35 % de la somme des épaisseurs des différents niveaux aquifères (valeur issue de la littérature).

L'interpolation des grilles d'épaisseur utile a été effectuée avec le logiciel GDM, par krigeage avec un variogramme linéaire sans dérive (à partir d'un filtre permettant d'exclure quelques valeurs anormalement basses) ;

- les transmissivités (produit de la perméabilité par l'épaisseur utile de l'aquifère) :
  - la transmissivité est un paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu, et par unité de gradient hydraulique. Ce paramètre représente le potentiel productif pouvant être attendu d'un forage exploitant une formation aquifère ;
  - comme indiqué précédemment, seules quelques valeurs ponctuelles de transmissivité à l'échelle de la région Centre ont été mesurées lors de la réalisation des forages ;
  - à défaut de pouvoir générer une grille avec des valeurs de transmissivité pour la région Centre, faute de données suffisantes et pertinentes en entrée, nous avons généré des cartes, pour chacun des deux aquifères, permettant de représenter les valeurs brutes de transmissivité (courbes d'iso-transmissivité) issues des rapports de la fin des années 1970.

La connaissance régionale du paramètre transmissivité, qui constitue avec la température du fluide exploitable dans l'aquifère, les deux critères fondamentaux d'estimation de sa productivité, ne permet donc pas une interpolation cartographique

précise susceptible de lever avec certitude les risques d'échec en cas de réalisation de nouveaux forages profonds destinés à une opération de géothermie en région Centre.

Compte-tenu du manque de données *in-situ*, un traitement des données de perméabilité sur carottes a été réalisé. Sur la base de ces résultats et en concertation avec les spécialistes de la société GéoGreen ayant travaillé pour le compte du BRGM sur cette étude, on peut relever quelques grandes tendances de ce paramètre pour les deux aquifères étudiés :

- pour l'aquifère du **Dogger**, les valeurs du paramètre perméabilité, qui intervient dans le calcul de la transmissivité, ont pu être calculées et se situent, pour les plus fortes, dans la fourchette 10 à 100 mD (milliDarcy). Toutefois, une plus grande proportion des valeurs se situe statistiquement dans la fourchette 0.10 à 10 mD. La répartition géographique de ces valeurs de perméabilité est homogène ;
- en ce qui concerne le **Trias**, les valeurs de perméabilité calculées se situent pour les plus fortes d'entre elles dans la fourchette 100 à 1 000 mD avec une plus grosse proportion statistique des valeurs étudiées dans la fourchette 1 à 100 mD. Du point de vue géographique, on note que les valeurs les plus fortes se situent dans le Loir-et-Cher, ainsi que dans l'est du Loiret et le sud de l'Indre-et-Loire.

### 3.4.5. Premiers résultats et conclusions sur le potentiel des aquifères profonds en région Centre

Compte-tenu de ce qui a été écrit ci-avant, on comprendra qu'il reste délicat, du fait de l'absence de forages instrumentés en quantité suffisante, de déterminer un potentiel géothermique des aquifères profonds du Dogger et du Trias

L'échelle de restitution n'est en aucun cas comparable avec l'échelle des travaux réalisés sur l'atlas des aquifères superficiels.

En première analyse, les données recueillies dans la cadre de la présente étude montrent que le réservoir du Trias est *a priori* le plus intéressant avec localement de fortes perméabilités. Cet aquifère peut cependant être le siège de difficultés de réinjection qui sont à l'origine d'une partie de l'échec de l'opération de Melleray et qui devront être résolues en profitant des retours d'expériences réalisées avec succès depuis 20 ans dans diverses formations comparables et tout particulièrement en Allemagne. Le projet « CLASTIQ », cofinancé par le BRGM et l'ADEME depuis mars 2009 et qui s'achèvera au printemps 2012, a permis de réaliser un travail d'investigation de l'exploitabilité de cette ressource qui pourra bénéficier à un programme opérationnel.

Cette situation tient à l'absence de travaux de développement de la géothermie basse énergie en région Centre depuis 25 ans, du fait sans doute de l'impact négatif de l'échec de l'opération de Melleray (Loiret).

Il apparaît évident que la relance de la géothermie profonde en région Centre pourrait être initiée par :

- d'une part, une meilleure connaissance du potentiel des deux aquifères retenus. Le BRGM a établi, à cette fin, des contacts avec des sociétés pétrolières et gazières qui opèrent sur le territoire régional afin de parvenir à terme à affiner les connaissances sur les aquifères profonds en région Centre. Cette approche réciproque de connaissances doit être consolidée et amplifiée afin de disposer, notamment, d'informations supplémentaires susceptibles de permettre une interpolation régionale de la productivité de ces aquifères ;
- d'autre part, la mise en œuvre d'opérations industrielles, couplées à des programmes de recherche et développement et soutenues par des fonds publics.

### **3.5. PRISE EN COMPTE DE LA RÉGLEMENTATION**

#### **3.5.1. La réglementation nationale**

La géothermie est régie par le Code minier en vertu de son article L.112-2 (ancien article 3) qui donne une définition de la géothermie et du régime juridique qui lui est applicable. Ainsi, « *les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent* », sont considérés comme des mines. Une substance minière appartient à l'État et non au propriétaire du sol. L'exploitation d'une ressource minière nécessite donc des autorisations accordées par l'État.

Outre le Code minier, les opérations de géothermie entrent dans le champ d'application du code de l'environnement pour les prélèvements et les réinjections en nappe, le code de la santé publique et le code général des collectivités territoriales qui peuvent s'appliquer dans certains cas particuliers. Les opérations géothermiques peuvent être soumises à différents régimes d'autorisation ou de déclaration qui supposent le montage de dossiers administratifs plus ou moins approfondis selon les cas et des circuits d'approbation administrative plus ou moins long. Les opérations de moins de 100 m de profondeur et de moins de 232 KW de puissance thermique sont considérées comme des opérations de minime importance et ne sont soumises qu'à déclaration. Dans les autres cas, elles sont soumises à autorisation.

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

#### **3.5.2. Les réglementations territorialisées**

Certaines portions du territoire, 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.

## ***Mesures générales de protection de la ressource en eau***

### **• Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des EAUX (SDAGE)**

Le SDAGE est un document de planification décentralisé définissant pour une période de six ans (de 2010 à 2015) les grandes orientations pour une gestion équilibrée de la ressource en eau ainsi que les objectifs de qualité et quantité des eaux à atteindre à l'échelle des grands bassins hydrographiques. Il doit répondre à l'objectif de bon état des masses d'eau fixé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) du 23/10/2000,

La région Centre est concernée par les bassins Loire-Bretagne et Seine-Normandie. Le SDAGE Loire-Bretagne 2010-2015 a été approuvé le 18 novembre 2009. Le SDAGE Seine-Normandie 2010-2015 a été approuvé le 20 novembre 2009.

L'unité d'évaluation de la DCE est la masse d'eau, découpage territorial élémentaire des milieux aquatiques.

Du point de vue quantitatif, le SDAGE Loire-Bretagne identifie les masses d'eau suivantes comme étant en état médiocre : calcaires et marnes du Jurassique supérieur du Bassin Versant (BV) du Cher (n° 4076), calcaires et marnes du Jurassique supérieur du BV Yèvre/Auron (n° 4077), calcaires tertiaires libres de Beauce (n° 4092), les sables et grès du Cénomaniens de l'unité Loir (n° 4080) et les sables et grès captifs du Cénomaniens de l'unité de la Loire (n° 4142).

Par ailleurs, les masses d'eau souterraine de la craie du Gâtinais (n° 3210) et de la craie altérée du Neubourg – Iton – plaine de Saint-André (n° 3211) ont été identifiées par le SDAGE Seine-Normandie, en raison de cours d'eau menacés par un risque de déficit de réalimentation par ces nappes.

L'objectif est d'assurer sur le long terme un équilibre entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe.

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

Le SAGE est un document de planification qui fixe les 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 au 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.

Lorsqu'il est situé à l'intérieur du périmètre d'un SAGE, un prélèvement d'eau à usage géothermique (qu'il soit par ailleurs soumis à déclaration ou à autorisation) doit être compatible avec les objectifs généraux et le règlement de celui-ci (art. L212-5-2 du Code de l'Environnement). Le règlement d'un SAGE peut limiter localement (voire interdire) l'usage géothermique des eaux souterraines.

En région Centre, le seul SAGE portant sur une nappe d'eau souterraine en cours porte sur la nappe de Beauce. Le SAGE Beauce est en phase finale d'élaboration, le rapport de présentation du projet de ce SAGE (consultable sur internet) a été validé par la CLE et doit être soumis à enquête publique en début d'année 2012, pour une approbation par la préfecture prévue au 1<sup>er</sup> semestre 2012 (information orale de la chargée de mission du SAGE, 30/08/11).

Parmi les principales mesures inscrites au projet de SAGE, il est prévu, pour les prélèvements en nappe à usage géothermique, qu'une réinjection des eaux prélevées soit effectuée dans le même horizon aquifère.

On compte 11 SAGE en région Centre. Certaines communes peuvent être concernées par deux SAGE (exemple rive droite d'un cours d'eau traversant une commune dans un SAGE et rive gauche dans un autre).

*Liste des SAGE en région Centre*

CODE_SAGE	NOM_SAGE
AA	ALLIER AVAL
AU	AUTHION
B	NAPPE DE BEAUCE
CAM	CHER AMONT
CAV	CHER AVAL
H	HUISNES
L	LOIR
LT	LOIRET
S	SAULDRE
V	VIENNE
Y	YEVRES-AURON
AAY	ALLIER AVAL & YEVRES-AURON
AUL	AUTHION & LOIR

BL	NAPPE DE BEAUCE & LOIR
BLT	NAPPE DE BEAUCE & LOIRET
CAMCAV	CHER AMONT & CHER AVAL
CAMY	CHER AMONT & YEVRES-AURON
SY	SAULDRE & YEVRES-AURON

Ils sont présentés sur la carte ci-après (ill. 17).

#### • Les prélèvements et réinjections en nappe

On distingue les prélèvements en nappe selon que l'on se trouve ou non dans une zone de répartition (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 des 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 m<sup>3</sup>/an réputés domestiques, sont soumis à autorisation ou déclaration dans les conditions suivantes :

#### • pour les prélèvements :

- hors zone de répartition :
  - entre 10 000 et 200 000 m<sup>3</sup>/an : déclaration,
  - plus de 200 000 m<sup>3</sup>/an : autorisation ;
- en zone de répartition : au-delà de 8 m<sup>3</sup>/h, on passe en régime d'autorisation ;

#### • pour les réinjections (en ZRE ou non) :

- entre 8 et 80 m<sup>3</sup>/h : déclaration ;
- supérieure ou égale à 80 m<sup>3</sup>/h : autorisation.

Les prélèvements en eau réalisés à des fins géothermiques dans une Zone de Répartition des Eaux sont contraints par l'abaissement des seuils. Cette restriction ne s'applique pas aux installations fonctionnant en doublet, avec réinjection dans l'aquifère après prélèvement. Dans ce cas, on considère que les prélèvements sont nuls et par conséquent non concernés par les restrictions réglementaires.

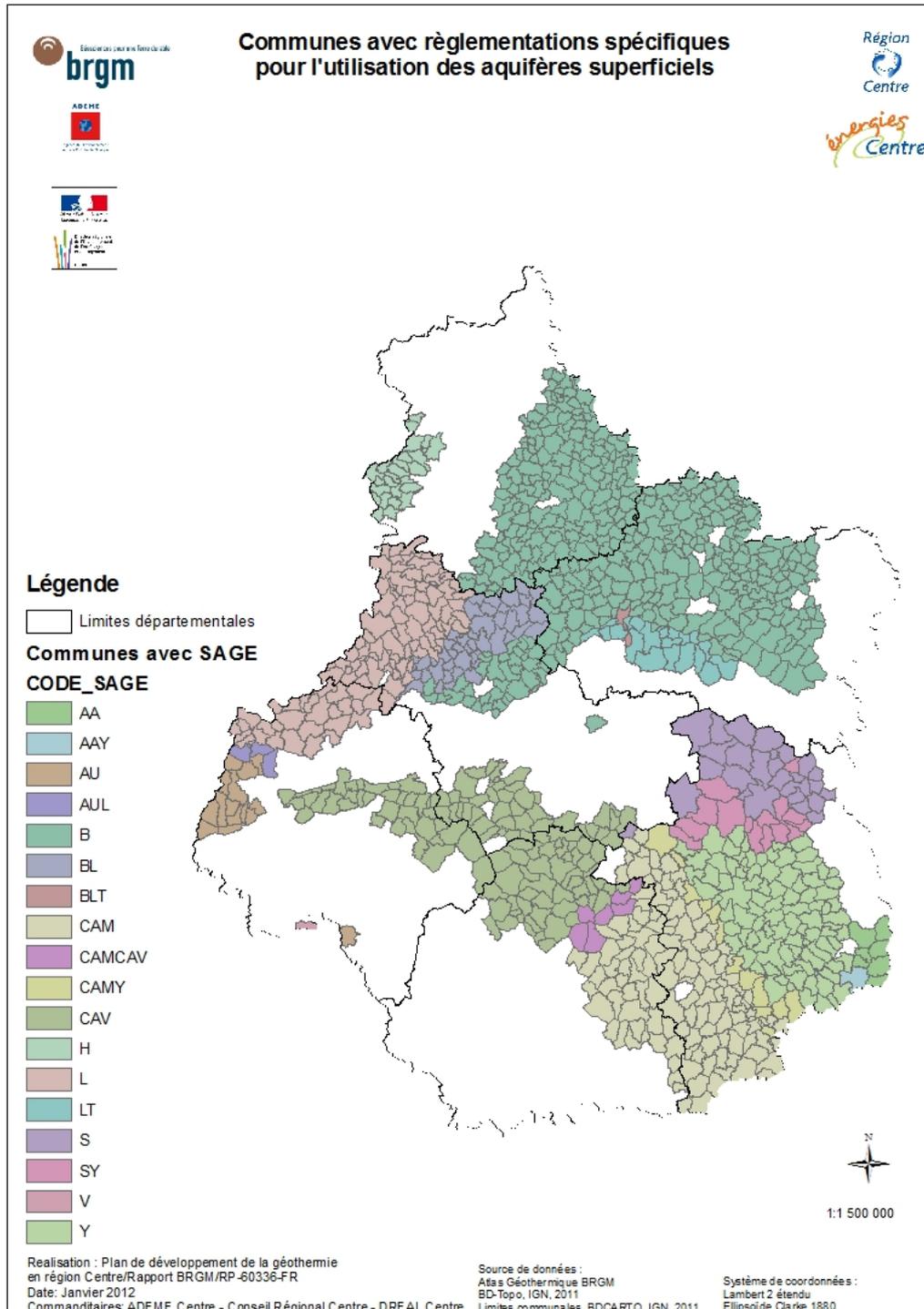


Illustration 17 : Communes de la région Centre concernées par un SAGE.

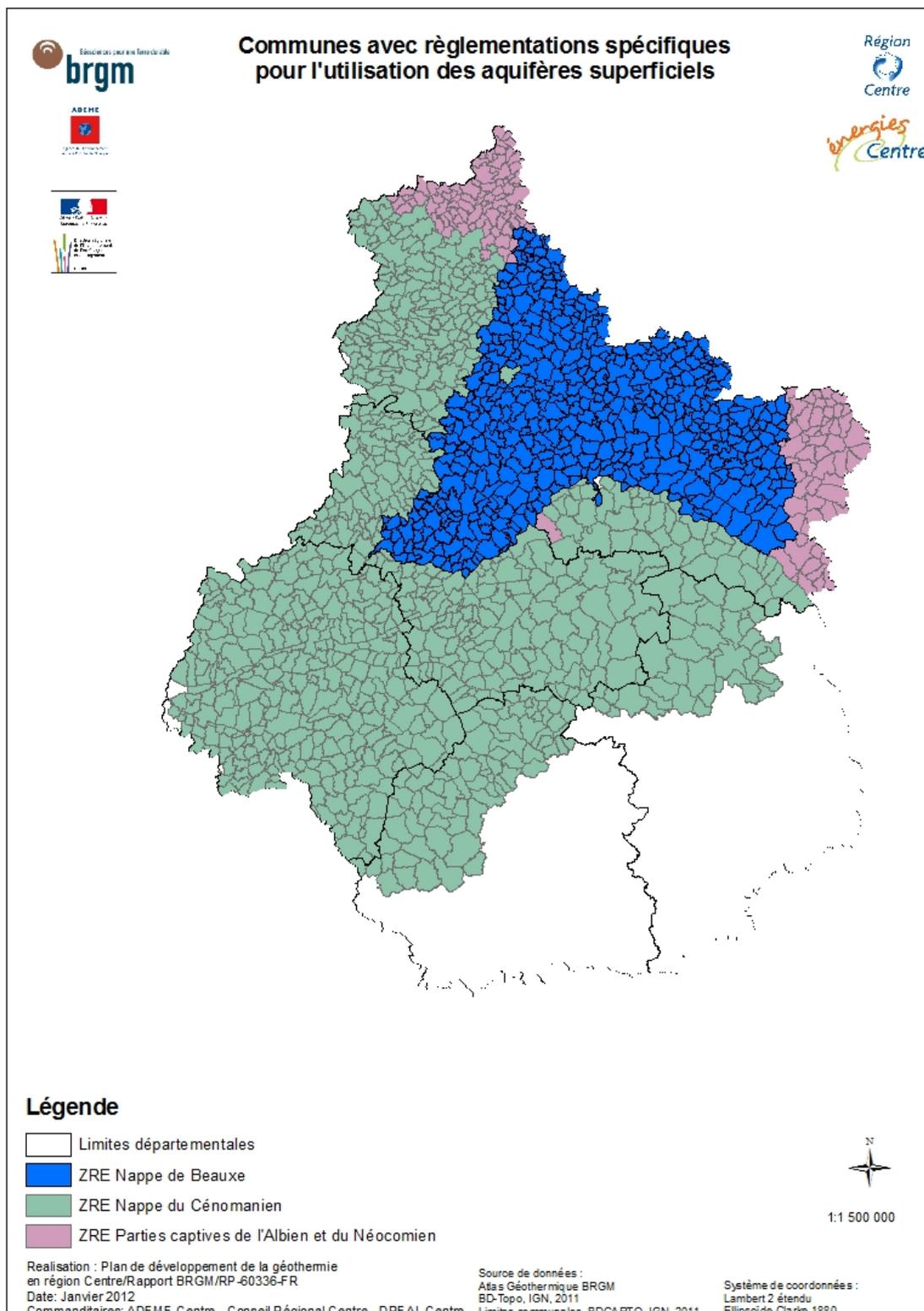


Illustration 18 : Communes de la région Centre sur lesquelles il existe une ZRE.

En région Centre, trois ZRE de type Système Aquifère ont été identifiées :

- la Nappe de Beauce, codée B1, qui s'étend dans les départements du Loiret, Loir-et-Cher et Eure-et-Loir ;
- la Nappe du Cénomaniens, codée B2, qui s'étend dans toute la région Centre ;
- les Nappes de l'Albien et du Néocomien, codée B5, qui s'étend dans les départements du Loiret et de l'Eure-et-Loir.

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

Les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable, dans lesquels les activités sont susceptibles de polluer la ressource en eau souterraine (construction, mise en place d'une opération de géothermie...), sont soumis à prescription particulière. 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.

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.

La réalisation de forages est toujours interdite dans le périmètre de protection immédiat. Il est fréquent que les forages géothermiques soient interdits dans le périmètre de protection rapprochée.

### ***La protection des espaces et milieux naturels***

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 et les moyens contractuels. Les différents outils de protection sont les suivantes :

- outils de protection réglementaire :
  - les Sites Classés,
  - les Sites inscrits,
  - les réserves naturelles (nationales et régionales),
  - arrêté Préfectoral de Protection de Biotope,
  - les Réserves biologiques domaniales (RBD) et Réserves biologiques forestières (RBF) ;
- outils de protection par la maîtrise foncière : les espaces naturels sensibles des départements ;
- outils de protection conventionnelle :
  - les parcs naturels régionaux (PNR),
  - le réseau Natura 2000,
  - l'inventaire patrimonial des ZNIEFF.

*En région Centre, seules les réserves naturelles limitent à l'heure actuelle l'implantation de forages géothermiques. Un outil permettant de préciser les réglementations locales est disponible sur le site [www.géothermie-perspectives.fr](http://www.géothermie-perspectives.fr), dans l'espace consacré à la région Centre.*

## **4. Détermination des potentiels de développement de la géothermie en région Centre**

### **4.1. METHODOLOGIE GENERALE**

#### **4.1.1. Définition du potentiel**

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 potentiels en surface.

Le potentiel se définit en terme de TEP substituées, autrement dit à partir des besoins des consommations en surface. Il n'est ainsi défini qu'au droit des secteurs présentant des besoins de surface (consommations pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire).

#### **4.1.2. Opérations étudiées dans le cadre de cette étude**

L'ensemble des technologies de géothermie susceptibles d'être exploitées en région Centre doit être considéré :

- la géothermie très basse énergie :
  - utilisation des aquifères superficiels couplés avec une Pompe à Chaleur (PAC)
  - développement de champs de sondes géothermiques ;
- la géothermie basse énergie : utilisation des aquifères « profonds » du Dogger et du Trias pour alimenter des réseaux de chaleur urbains.

Une valeur de potentiel sera donnée pour ces trois filières. Cependant, il faudra distinguer le niveau de connaissance des différentes ressources (remarque particulièrement vraie pour les aquifères profonds, par rapport au niveau de connaissance sur les aquifères superficiels) et les contraintes liées au développement d'une méthodologie à l'échelle régionale.

#### **4.1.3. Définition de l'échelle de travail pour l'étude du potentiel très basse énergie**

Il a déjà été évoqué le fait que l'étude du potentiel de développement de la géothermie doit se faire en comparant, de manière géo localisée, les ressources géothermales et les besoins thermiques des utilisateurs en surface. Pour cela, il est nécessaire de construire des cartographies grâce à un Système d'Information Géographique (SIG).

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.

L'échelle de travail doit se trouver entre :

- l'échelle fine au niveau de l'opération/du bâtiment. 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. Nous partirons cependant de données géolocalisées de bâtiments (BD TOPO®) ;
- 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 ressource et besoins thermiques constants à l'échelle de la commune, les densités énergétiques varient (existence de zones à habitat collectif concentré par rapport à des zones pavillonnaires), le potentiel de valorisations 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.

Il s'agit alors 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 500 sur 500 m (rapport BRGM/RP-55088-FR).

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 par 250 m. Elle permet de « croiser » l'ensemble des données cartographiques géo-référencées.

#### **4.1.4. Cartographie des besoins thermiques de surface**

Les besoins des utilisateurs potentiels de géothermie d'ici 2020 sont de deux natures différentes, ce qui nécessite deux approches :

- la consommation dans les bâtiments existants, qui permet de déterminer un potentiel pour le développement de la géothermie, avec des enjeux et des incertitudes sur le niveau de rénovation ;
- la consommation dans les constructions neuves, qui prend en compte la réglementation thermique 2012.

Pour géo localiser **les consommateurs existants**, il a été décidé de travailler avec la BD TOPO® (©IGN2011). Cette base de données permet de cartographier l'emprise

des bâtiments et préciser certaines de leurs caractéristiques (notamment, l'indication de la hauteur). Les bâtiments résidentiels et du tertiaire<sup>6</sup> sont représentés.

L'objectif est de pouvoir déterminer à l'échelle de la maille de travail une consommation énergétique (en puissance et/ou en énergie). Pour cela, il a été fait l'hypothèse que le besoin thermique à l'échelle de la maille est proportionnel à la surface de bâtiment.

Les différents traitements réalisés à partir de la BD Topo ont donc été les suivants :

- calcul d'une surface chauffée par bâtiment : la surface habitable de l'emprise du bâtiment est multipliée par le nombre d'étages (hauteur totale divisée par une valeur moyenne de hauteur sous plafond).  
Pour la majorité des bâtiments, il a été considéré une valeur moyenne de hauteur d'un étage de 2,5 m. Pour les bâtiments commerciaux et sportifs, il a été convenu de mettre un seul étage pour les bâtiments avec quelques exceptions pour les bâtiments dépassant 15 m de haut.  
Pour déterminer une surface habitable (et donc chauffée), il a été considéré 85 % de cette surface totale ;
- attribution d'une surface chauffée de bâtiments à l'échelle de la maille de travail ;
- la surface totale à chauffer (m<sup>2</sup>) par maille est donc déterminée à partir de la BD TOPO®, correspondant à la somme des surfaces chauffées des bâtiments dont les centroïdes sont localisés dans la maille ;
- il s'agit ensuite de multiplier la surface chauffée par un ratio de consommation en kWh/m<sup>2</sup> (ou kW/m<sup>2</sup>).

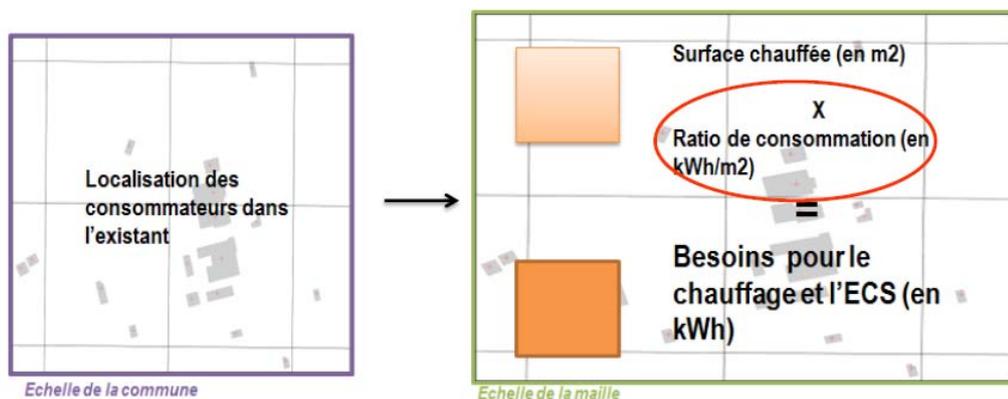


Illustration 19 : Méthode de détermination des consommations thermiques dans l'existant.

6 Dans la table de données BATI\_INDIFFERENCIE, tous les bâtiments sont gardés, car il s'agit principalement d'habitat. Dans la table BATI\_INDUSTRIEL, seule la catégorie « bâtiment commercial » est gardée, les autres (« bâtiment industriel », « bâtiments agricole », « silo » et « serre ») sont écartées. Enfin, dans la table BATI\_REMARQUABLE, les catégories « sous-préfecture », « Préfecture », « Bâtiment sportif » et « Mairie » sont gardées et les autres plus anecdotiques (« Péage », etc.) ne sont pas prises en compte.

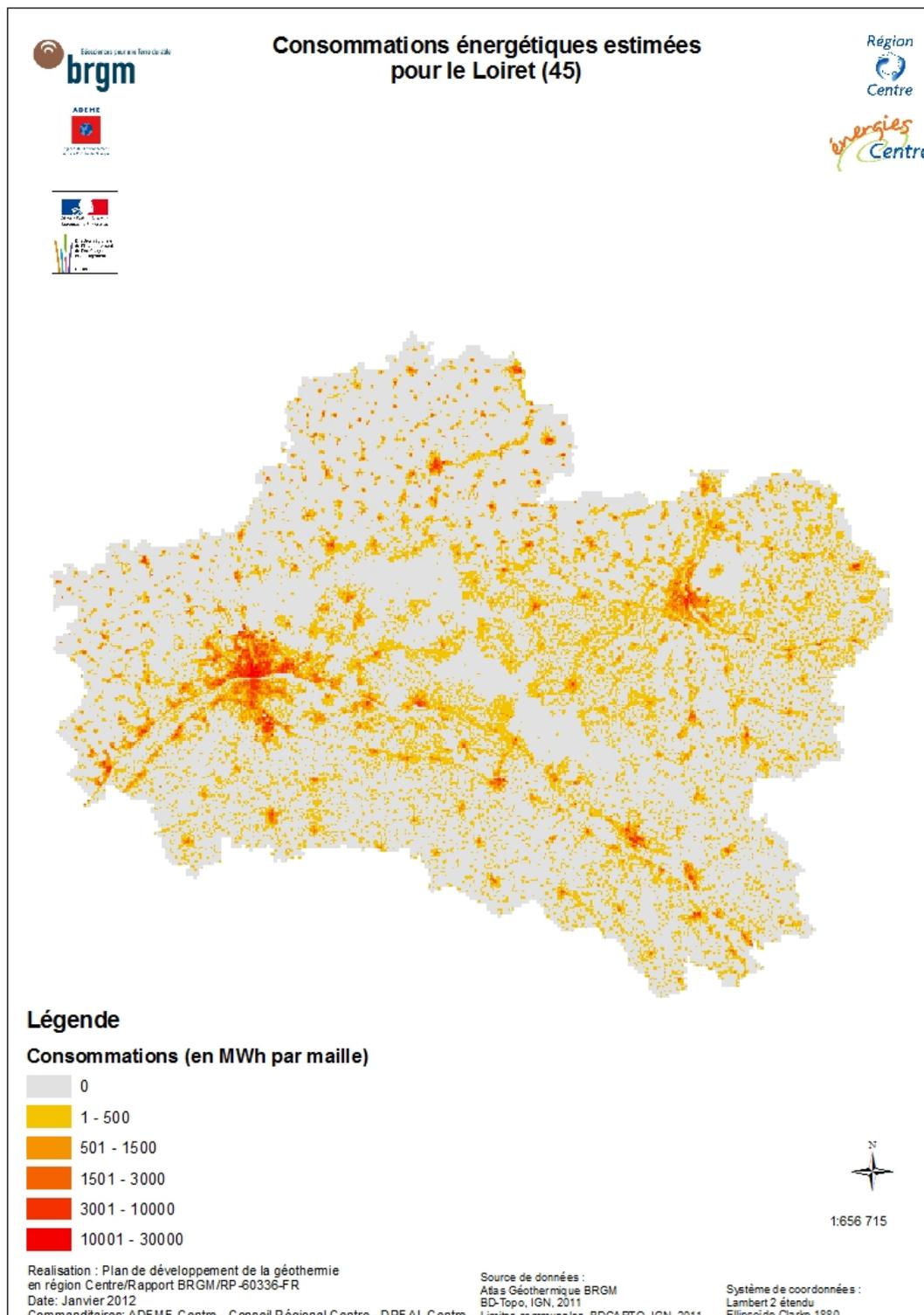


Illustration 20 : Exemple de cartographie présentant la consommation du bâti existant dans le département du Loiret.

Dans le cadre de cette étude, deux scénarios de consommations ont été étudiés :

- **Scénario « haut »** se voulant représentatif des consommations moyennes actuelles, pour le résidentiel et le tertiaire : **200 kWh/m<sup>2</sup>** ;
- **Scénario « bas »** se voulant représentatif des consommations visées à l'horizon 2020 : **50 kWh/m<sup>2</sup>**.

On obtient ainsi une cartographie des besoins thermiques des utilisateurs à l'échelle de la maille. La carte ci-dessous présente un exemple sur le département du Loiret. Les grandes agglomérations sont celles où il y a plus de surfaces, et donc de consommations.

Remarque : cet exercice a ses limites, car il est clair que les consommations énergétiques ne sont pas directement proportionnelles à la surface chauffée. D'autres paramètres, comme l'âge du bâtiment, interviennent dans l'évaluation des consommations énergétiques. Cependant, cela permet de donner un bon ordre de grandeur de la densité de consommation ; de plus, les données prospectives (nouvelles constructions) n'ont pu être cartographiées à cette échelle.

## 4.2. LE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR AQUIFÈRES SUPERFICIELS

### 4.2.1. Principe général

Le principe de base de la méthodologie développée est de comparer les ressources géothermales (présence d'aucun, d'un voire deux aquifères superposés) avec les besoins thermiques de surface, à l'échelle de la maille, tout en prenant en compte les différentes contraintes techniques, règlementaires et économiques pouvant limiter la mise en place d'une opération.

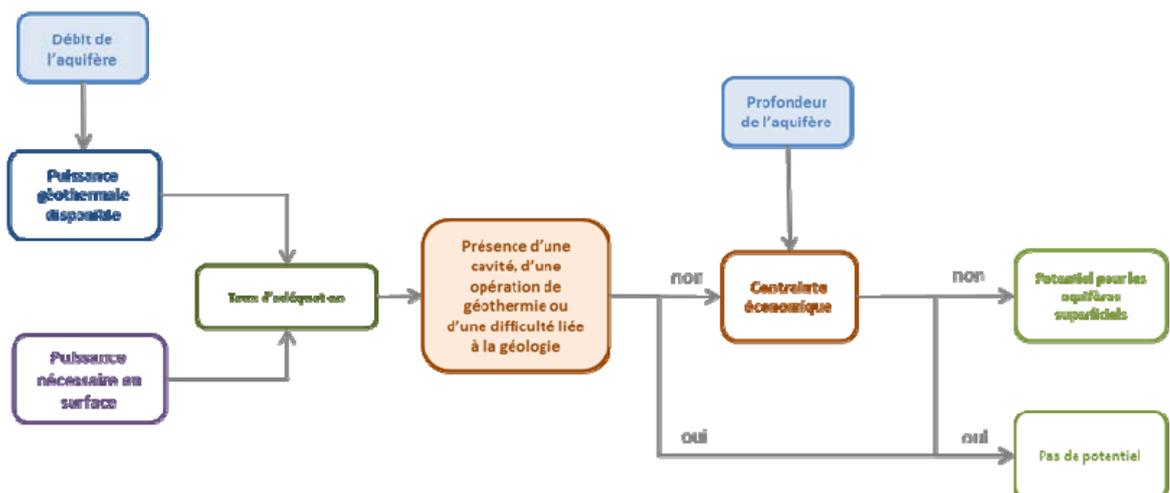


Illustration 21 : Schéma de la méthode utilisée pour déterminer le potentiel sur aquifères superficiels.

L'objectif est ainsi de déterminer quelle part des besoins de chaleur peut être satisfaite par un des aquifères superficiels, et d'en déduire ainsi une valeur de potentiel.

#### 4.2.2. Prise en compte de la ressource

Pour déterminer la puissance extractible à partir d'un aquifère, il est nécessaire de définir un mode de fonctionnement par usage « production de chaleur » et usage « production de fraîcheur ». En effet, le dimensionnement en mode chauffage est différent du dimensionnement en mode rafraîchissement. De plus, pour une puissance donnée de chaud et de froid, la puissance de froid peut être déterminante, et ce d'autant plus que l'on souhaite faire du free-cooling. Cependant, nous nous intéressons ici au potentiel pour les besoins de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

En premier lieu, nous calculons la puissance disponible en prenant les valeurs de débits. Des hypothèses de calcul portent sur le choix d'un  $\Delta T$  de référence (différence entre la température de l'eau prélevée et la température de l'eau rejetée après utilisation par la PAC), et le choix d'un COP (Coefficient de performance) de référence des PAC.

Les calculs de puissance utilisés en mode chauffage sont les suivants :

$$P_{ch} \text{ (kW)} = (Q * 1.16 * \Delta T) / (1 - 1/COP)$$

avec  $Q \text{ (m}^3/\text{h)}$  = débit de l'aquifère ;  $COP = 3,5$  ;  $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

alors  $P_{ch} \text{ (kW)} = Q * 9,744$ .

On détermine ainsi par maille la puissance maximale que peut fournir un doublet géothermique, pour le ou les aquifères rencontrés sur chaque maille.

Pour chaque formation aquifère, des probabilités de dépassement des débits possibles ont été établies. Une fourchette basse, qui correspond à 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, et une fourchette haute, qui correspond à 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, ont été retenus.

Deux scénarios de valorisation de la ressource sont donc calculés : fourchette basse (notée débit\_minimum) et fourchette haute (notée débit\_maximum).

La fourchette basse correspond à 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. La fourchette haute correspond à 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. Les débits présentés supposent un rabattement de 5 m dans l'ouvrage de production.

Aquifère	Débit de production possible (m <sup>3</sup> /h)	
	Fourchette basse	Fourchette haute
Alluvions	Indéterminé	Indéterminé
Sables et argiles de Sologne	3	8
Calcaires de Beauce	44	113
Calcaires de Beauce (sous recouvrement Nord Loire)	33	73
Calcaires de Beauce (sous recouvrement Sud Loire)	16	45
Calcaires de Touraine	6	36
Calcaires du Berry	12	53
Argiles à silex (aquifère)	3	8
Craie séno-turonienne	6	15
Craie séno-turonienne (Nord)	21	55
Craie cénomaniennne	6	15
Sables du Cénomanienn	11	17
Calcaires du Jurassique	20	3
Grès du Trias	1	0
Socle	3	0

Illustration 22 : Débit de production possible par niveau aquifère (source BRGM/RP-55088-FR).

#### 4.2.3. Définition du taux d'adéquation

Le taux d'adéquation, défini maille par maille, correspond au rapport entre les puissances disponibles au niveau de la ressource et les puissances nécessaires en surface, définies pour les deux scénarios de consommations<sup>7</sup>. Sur chaque maille, nous déterminons ainsi un ou deux taux d'adéquation (en fonction de la présence d'un ou deux aquifères superficiels).

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 permet de couvrir entre 80 et 100 % des besoins en énergie. Si l'on était dans le cadre d'une opération, cette dernière pourrait être intéressante, avec un appoint. Le dimensionnement à 50 % de la puissance, 80 % des besoins est d'ailleurs parfois recherché, d'autant plus en rénovation lorsque l'ancienne chaudière permet, sans investissement, de couvrir les pointes.
inférieur à 50 %	La ressource est limitée. Il faudra étudier plus en détails les possibilités de diminuer les besoins ou de considérer que pour une partie de ces besoins (si la maille regroupe un ensemble de petits consommateurs), la ressource pourra éventuellement satisfaire un des utilisateurs. Cela sera à étudier au cas par cas.

<sup>7</sup> Le scénario haut à 200 kWh/m<sup>2</sup> a été considéré équivalent à une puissance de 85 W/m<sup>2</sup> et 2 500 h d'heures à pleine puissance (HPP), le scénario bas à 50 kWh/m<sup>2</sup>, à une puissance de 50 W/m<sup>2</sup> et 1 000 h d'HPP.

#### 4.2.4. Calcul du potentiel à la maille, à partir de la définition de classes

##### ***Pris en compte des deux aquifères : définition de classes***

Des classes ont été définies par maille. Il s'agit en effet de voir si l'un ou l'autre des aquifères permet de couvrir au moins 50 % des besoins en puissance et donc de couvrir au moins 80 % des besoins énergétiques.

1	Il n'y a pas de ressource aquifère superficielle (mais éventuellement des besoins)
2	Il n'y a pas de besoins thermiques en surface (mais de la ressource)
3	Aucun des deux aquifères ne permet de satisfaire plus de 50 % des besoins
4	Il existe un aquifère qui permet de couvrir entre 50 et 100 % des besoins
5	Il existe deux aquifères qui permettent de couvrir entre 50 et 100 % des besoins
6	Il existe au moins un aquifère qui permet de couvrir plus de 100 % des besoins

##### ***Quantification en termes d'énergie (MWh)***

La détermination du potentiel se détermine en fonction de la classe dans laquelle se trouve la maille.

Pour les mailles des classes 4 et 5, la valeur (en MWh) correspond à 80 % des besoins de la maille, et pour les mailles classées 6, à 100 % des besoins énergétiques.

#### 4.2.5. Prise en compte des contraintes techniques et économiques

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

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

- opérations de géothermie existantes (forages déclarés en BSS) ;
- périmètre de protection de captage rapproché (données ARS) ;
- présence d'une cavité, naturelle ou anthropique (données issues de la BD-Cavité, du BRGM).

À cela s'ajoutent, différentes contraintes techniques qui vont impacter la technique de forage ou la possibilité de son implantation (distances à respecter vis-à-vis des décharges, forages en zones inondables...<sup>8</sup>), mais qui ne peuvent être prises en compte à l'échelle régionale et qui doivent être étudiées au cas par cas.

---

<sup>8</sup> A. Bel, S. Bezelgues-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.

Remarque : on élimine le potentiel de l'ensemble de la maille lorsqu'il existe un point BSS alors que l'on pourrait faire deux opérations sur la même maille sur deux aquifères différents (scénario pessimiste).

#### 4.2.6. Précisions sur la contrainte économique

L'indicateur économique retenu est le temps de retour actualisé du surinvestissement par rapport à une énergie fossile : lorsqu'il est supérieur à 30 ans, le surinvestissement n'est plus admissible économiquement.

Une fois fixés le taux d'actualisation et les prix de l'énergie, ce temps de retour dépend de deux paramètres :

- la profondeur de forage, car les investissements sont d'autant plus élevés que les forages sont profonds ;
- la consommation d'énergie, car plus elle est élevée, plus on économise grâce à l'énergie « gratuite » prélevée dans la nappe.

Pour une consommation d'énergie donnée, une Profondeur Maximale Admissible est calculée : au de-là de cette profondeur, l'indicateur est supérieur à 30 ans.

Un exemple est donné sur le schéma ci-dessous :

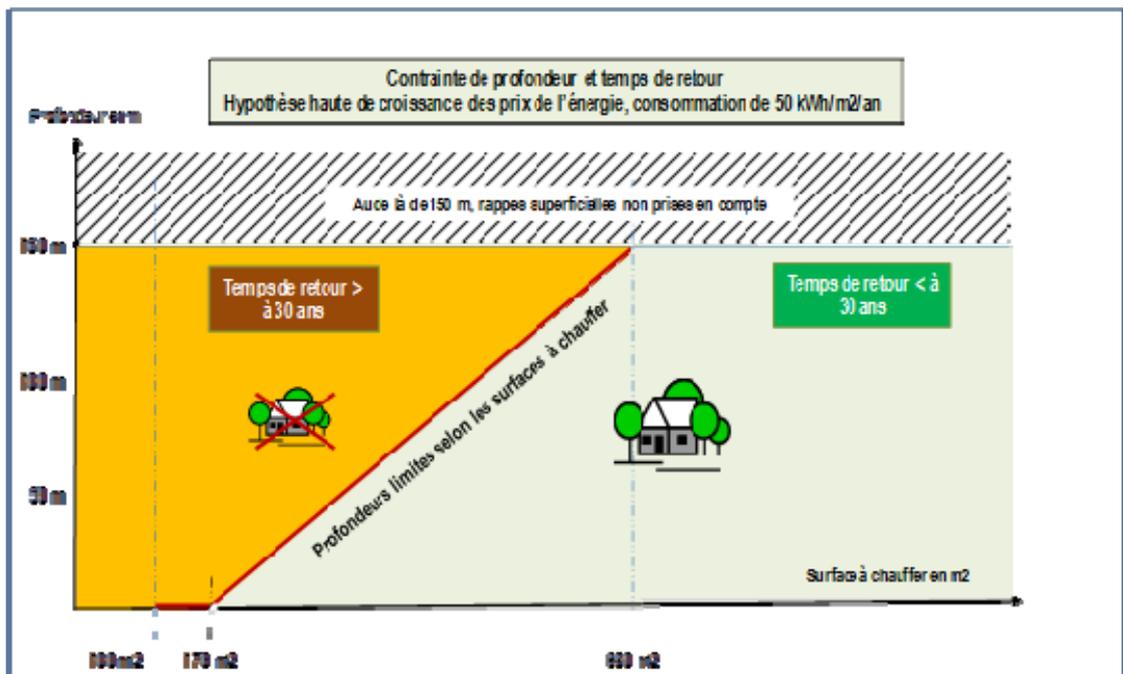


Illustration 23 : Schéma illustrant la contrainte économique.

D'un point de vue méthodologique, le potentiel de la maille est pris égal à 0 lorsque la profondeur à forer pour disposer de la ressource est supérieure à la Profondeur Maximale Admissible.

La profondeur de forage pour atteindre l'aquifère a été déterminée en fonction de sa profondeur (donnée extraite de l'Atlas du potentiel des aquifères superficiels en région Centre).

Détermination de la profondeur de l'ouvrage

**Nappe libre :** 10 m sous le niveau statique de l'eau pour tenir compte du rabattement (5 m) et de la place pour la pompe d'exhaure.

**Nappe captive :** 5 m sous le toit géologique de l'aquifère, et 10 m sous le niveau statique de l'eau pour tenir compte du rabattement (5 m) et de la place pour la pompe d'exhaure.

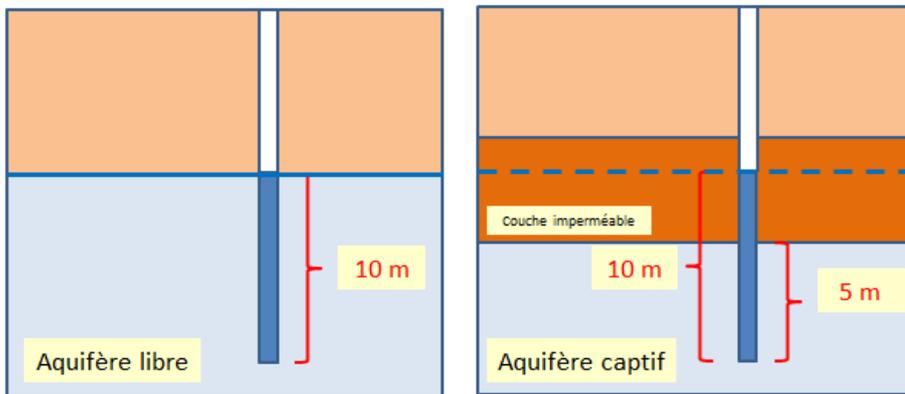


Illustration 24 : Calcul de la profondeur de forage.

Profondeurs Maximales Admissibles (PMA)	
<b>Hyp basse de croissance des prix de l'énergie</b>	
Consommation 200kWh/m2/ an	Consommation 50 kWh/m2/an
Surfaces <212 m2 : Temps de Retour toujours >30 ans	Surface <1000 m2 : Temps de retour toujours > 30 ans
Surfaces entre 200 et 530 m2 : PMA=0.47xSurface - 99.2	Surfaces >= 1000 m2 : Temps de retour toujours <30 ans
Au-delà de 530 m2 : Temps de Retour toujours <30 ans	
<b>Hyp haute de croissance des prix de l'énergie</b>	
Consommation 200kWh/m2/ an	Consommation 50 kWh/m2/an
Surfaces<53 m2 : Temps de Retour toujours >30 ans	Surfaces<178 m2 : TR>30 ans
Surfaces entre 50 m2 et 250 m2 PMA=1.082x Surface - 57.18	Surfaes entre 178 m2 et 250 m2 PMA=0.32x Surface- 57.18
	Surface de 250 à 680 m2 PMA= 0.3 x Surface- 48.48
Au-delà de 190 m2 : Temps de Retour toujours <30 ans	Au-delà de 680 m2 : Temps de Retour toujours <30 ans

Illustration 25 : Tableau présentant le résultats de PMA (Profondeur Maximale Admissible).

Deux hypothèses sur l'évolution du coût des énergies ont été prises : hypothèses haute et basse. Les deux niveaux de consommation ont été étudiés : 200 kWh/m<sup>2</sup> par an et 50 kWh/m<sup>2</sup> par an. Le détail des calculs et l'ensemble des hypothèses prises sont présentés en annexe.

Nous rappelons ici que le potentiel des solutions sur aquifères superficiels n'a pas été calculé pour les surfaces inférieures à 100 m<sup>2</sup>.

La contrainte économique est calculée pour les deux aquifères. Cependant s'il existe une contrainte sur l'aquifère1, cette contrainte existe pour l'aquifère 2 qui est situé en dessous.

Il est à noter qu'il existe un certain nombre de mailles (nombre variable en fonction du département) pour lesquelles la donnée de profondeur n'est pas connue. Dans ce cas, il n'a été retenu aucune contrainte économique

#### 4.2.7. Résultats : potentiel des aquifères superficiels à l'échelle départementale

Les résultats sont présentés pour les deux scénarios sur les besoins thermiques de surface :

- 50 W/m<sup>2</sup> (50 kWh/m<sup>2</sup> et 1 000 h d'utilisation à pleine puissance) ;
- 80 W/m<sup>2</sup> (200 kWh/m<sup>2</sup> et 2 500 h d'utilisation à pleine puissance).

De plus, ces potentiels ont été déterminés pour deux valeurs de débit (fourchette basse, nommé débit\_min, et fourchette haute, nommé débit\_max).

De plus, deux valeurs de potentiel, pour chaque scénario, sont présentés avec ou sans la prise en compte des contraintes.

Enfin, ces résultats prennent en compte l'hypothèse basse de l'évolution des coûts de l'énergie. La prise en compte de l'hypothèse haute donnera une valeur intermédiaire entre la non-prise en compte de la contrainte et la contrainte basse.

Le tableau ci-dessous présente les potentiels de développement de la géothermie sur aquifères superficiels en ktep par département, et, sans prendre en compte les contraintes :

Résultats de potentiel en ktep		Consommations énergétiques totales	Sans prise en compte des contraintes	
scénario	département		Débit_min	Débit_max
50 kWh/m <sup>2</sup>	18	213	86	139
	28	228	98	151
	36	287	96	152
	37	357	82	149
	41	198	96	139
	45	273	141	207
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>1558</b>	<b>600</b>	<b>938</b>

200 kWh/m <sup>2</sup>	18	853	259	468
	28	913	274	493
	36	1149	271	510
	37	1430	215	448
	41	794	286	466
	45	1093	421	705
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>6232</b>	<b>1725</b>	<b>3090</b>

Le tableau ci-dessous présente les potentiels de développement de la géothermie sur aquifères superficiels par département, et en ktep, en prenant en compte les contraintes techniques, réglementaires et économiques, et compare les deux valeurs de potentiel :

Résultats de potentiel en ktep		Consommations énergétiques totales	Avec l'ensemble des contraintes		Influence des contraintes	
scénario	département		Débit_min	Débit_max	Débit_min	Débit_max
50 kWh/m <sup>2</sup>	18	213	65	117	76%	84%
	28	228	78	127	80%	84%
	36	287	78	132	81%	86%
	37	357	53	113	64%	76%
	41	198	71	110	73%	79%
	45	273	103	159	73%	77%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>1558</b>	<b>448</b>	<b>758</b>	<b>75%</b>	<b>81%</b>
200 kWh/m <sup>2</sup>	18	853	245	451	95%	96%
	28	913	247	452	90%	92%
	36	1149	255	484	94%	95%
	37	1430	187	401	87%	89%
	41	794	261	428	91%	92%
	45	1093	362	607	86%	86%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>6232</b>	<b>1558</b>	<b>2823</b>	<b>90%</b>	<b>91%</b>

Le tableau ci-dessous présente enfin les potentiels de développement de la géothermie sur aquifères superficiels par département, et en ktep, avec l'ensemble des contraintes et donne le pourcentage par rapport aux consommations énergétiques totales estimées dans le cadre de cette étude.

Résultats de potentiel en ktep		Consommations énergétiques totales	Avec l'ensemble des contraintes		Pourcentage global de couverture par géothermie des besoins estimés	
scénario	département		Débit_min	Débit_max	Débit_min	Débit_max
50 kWh/m <sup>2</sup>	18	213	65	117	31%	55%
	28	228	78	127	34%	56%
	36	287	78	132	27%	46%
	37	357	53	113	15%	32%
	41	198	71	110	36%	55%
	45	273	103	159	38%	58%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>1558</b>	<b>448</b>	<b>758</b>	<b>29%</b>	<b>49%</b>
200 kWh/m <sup>2</sup>	18	853	245	451	29%	53%
	28	913	247	452	27%	50%
	36	1149	255	484	22%	42%
	37	1430	187	401	13%	28%
	41	794	261	428	33%	54%
	45	1093	362	607	33%	56%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>6232</b>	<b>1558</b>	<b>2823</b>	<b>25%</b>	<b>45%</b>

### 4.3. LE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT D'OPÉRATIONS SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

#### 4.3.1. Quantification du potentiel de développement des sondes géothermiques verticales ou autres échangeurs à boucle « fermées »

La ressource n'étant pas le facteur limitant pour le développement d'opérations sur sondes géothermiques verticales. Si l'aquifère a un débit fixé (et donc une puissance de production qui doit être adaptée aux besoins en surface), le dimensionnement sur sondes est totalement adaptable au projet. Le potentiel est limité par les contraintes techniques et règlementaires.

Ainsi, il n'a pas été réalisé d'étude spécifique sur la ressource dans le cadre de ce projet. Le potentiel pour le développement de sondes géothermiques verticales a été calculé.

Les contraintes prises en comptes dans le cadre de cette étude sont identiques à celles prises en compte pour les aquifères superficiels.

Le potentiel des sondes géothermiques verticales se déduit du potentiel des aquifères superficiels :

- pour les superficies inférieures à 5 000 m<sup>2</sup> ;
- pour les mailles sur lesquelles il n'y a pas de potentiel sur aquifères superficiels (soit parce qu'il n'y a pas d'aquifères, pas d'aquifères qui permettent de satisfaire au moins 50 % des besoins en puissance ou parce que la surface à chauffer est inférieure à 100 m<sup>2</sup>) ;
- pour les mailles sur lesquelles il n'y a pas de contraintes de forages.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après :

Résultats de potentiel en ktep		Potentiel pour les SGV	Potentiel relatif par rapport aux solutions sur aquifères superficiel (potentiel min)
scénario	département		
50 kWh/m <sup>2</sup>	18	31	47%
	28	19	25%
	36	41	52%
	37	54	103%
	41	28	39%
	45	33	32%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>206</b>	<b>46%</b>
200 kWh/m <sup>2</sup>	18	97	40%
	28	69	28%
	36	165	65%
	37	243	130%
	41	89	34%
	45	91	25%
	<b>Ensemble (région)</b>	<b>754</b>	<b>48%</b>

Dans cette valeur de potentiel peuvent être inclus d'autres types d'échangeurs à boucle fermée comme les échangeurs compacts.

Pour ces derniers, le potentiel pourrait être plus important car il n'y a pas de contraintes spécifiques (pas de contraintes liées au forage, notamment dans les zones de périmètre d'Alimentation en Eau potable).

#### **4.3.2. Cartographie des zones moins favorables au développement de la géothermie sur sondes géothermiques verticales**

Certains contextes géologiques sont peu favorables<sup>9</sup> 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 terrains la mise en œuvre de la cimentation du forage présentera d'importantes difficultés et il sera difficile d'obtenir un scellement des sondes efficaces 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 meubles instables (roches volcano-sédimentaires, pouzzolanes) ainsi que des roches présentant des risques de dissolution (évaporites) ou de retrait-gonflement (argiles).

Les zones de contraintes pour l'implantation de sondes géothermiques ont été identifiées en première approche sur la région Centre.

#### ***Les zones karstiques***

La formation des Calcaires de Beauce apparaît comme la plus karstique de la région, même s'il existe des incertitudes sur la partie au sud de la Loire.

À cette formation, a été superposée, à l'échelle de la commune la densité de cavités naturelles<sup>10</sup>. Les communes avec une forte densité de cavités naturelles se recoupent avec la formation citée ci-dessus. Certaines autres communes mériteront également une attention particulière quant à leur densité de cavités.

Limites : des études complémentaires apparaissent nécessaires pour étudier le degré de karstification des formations et donc de l'impact que cela peut avoir pour le développement de sondes.

---

9 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. »

10 Cavités issues de la BD-Cavités.

### ***Les zones avec présence de gypse***

La formation identifiée comme « porteuse » de gypse dans le cadre d'un travail à l'échelle régionale pour le schéma des carrières (rapport BRGM/RP-59248-FR, carte des ressources en matériaux de la région Centre, 2011).

Limites : nécessite un travail de cartographie spécifique pour identifier la présence de gypse et quantifier les impacts (lien également avec les aquifères superficiels)

### ***Les zones avec contraintes techniques liées à l'espace disponible***

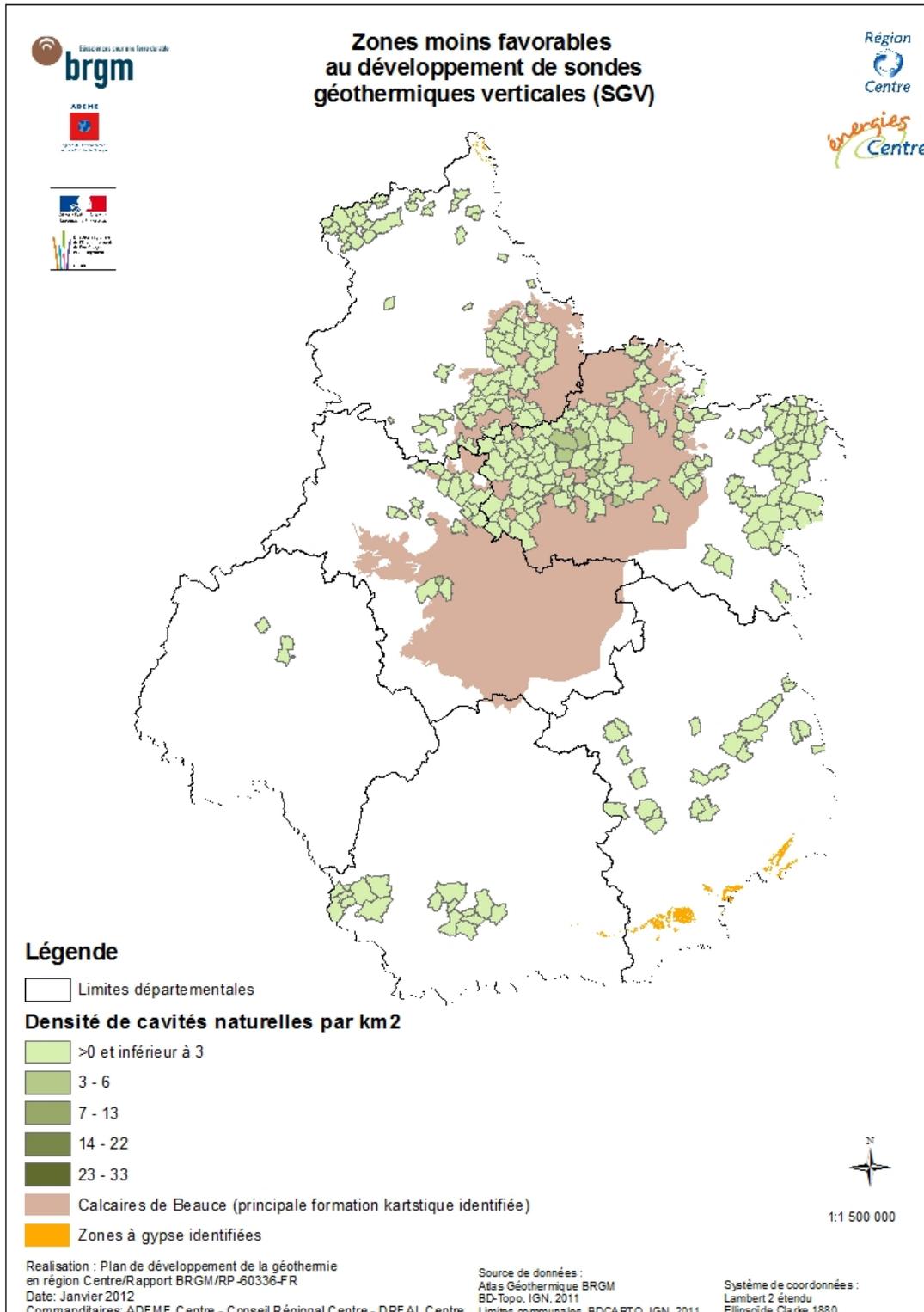
Un exercice a été réalisé pour mettre en avant les zones pour lesquelles la surface disponible pour l'implantation de sondes est trop limitée par rapport aux besoins a été réalisé dans le Loiret. Il montre, à l'échelle de la maille, les zones pour lesquelles l'espace en surface semble trop limité pour l'implantation de sondes (contraintes techniques). Il apparaît que ce sont les centres urbains des villes. La conclusion peut être reproduite pour l'ensemble des autres départements. Les cartographies n'ont pas été réalisées pour l'ensemble des départements.

### ***Les zones avec contraintes réglementaires***

Seuls les périmètres de protection rapprochés sont des contraintes réglementaires pour la mise en place de sondes géothermiques verticales. Si ces périmètres ont été pris en compte dans les calculs à l'échelle de la maille, ils ne peuvent cependant pas être cartographiés.

*Elles ne sont pas cartographiées sur la carte ci-dessous.*

Remarque : Il existe les mêmes contraintes techniques que celles identifiées pour les forages d'eau pour tous types de forages (mais qui ne sont pas cartographiable à cette échelle).



*Illustration 26 : Première cartographie des zones moins favorables au développement de sondes géothermiques verticales.*

## 5. Bilan

### 5.1. BILAN DU POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT POUR LA GÉOTHERMIE : BILAN ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE

Le tableau ci-dessous présente le potentiel de développement de la géothermie, en se basant sur les deux scénarios les plus extrêmes (prise en compte du scénario 50 kWh/m<sup>2</sup> et débit\_min, dit « scénario bas de valorisation » et du scénario 200 kWh/m<sup>2</sup> et débit\_max « scénario haut de valorisation »).

		Nombre	ktep substituées	Gain en énergie primaire (MWh <sub>ep</sub> )	Tonnes de CO <sub>2</sub> évitées annuellement
<b>Scénario bas de valorisation</b>					
Opérations très basse énergie	Sur nappes		448	1 947 840	815 910
	Sur sondes		206	894 658	374 754
Réseaux de chaleur		2	6	61 600	13 120
<b>Total</b>			<b>660</b>	<b>2 904 097</b>	<b>1 203 784</b>
<b>Scénario haut de valorisation</b>					
Opérations très basse énergie	Sur nappes		2 823	12 276 262	5 142 274
	Sur sondes		754	3 278 099	1 373 128
Réseaux de chaleur		4	12	123 200	26 240
<b>Total</b>			<b>3 589</b>	<b>15 677 561</b>	<b>6 541 642</b>

Les cartes suivantes présentent les résultats de potentiel de manière cartographiées, à l'échelle de la commune.

En ce qui concerne l'identification de réseaux de chaleur, nous avons sélectionné uniquement les réseaux existant actuellement en région Centre sans informations suffisantes sur d'éventuels nouveaux réseaux pouvant être créés. Les données sont issues de l'annuaire des réseaux de chaleur publié par l'association Via Sèva ([www.viaseva.org](http://www.viaseva.org)).

Parmi ceux-ci, pour les références 1) et 2) dans le tableau précédent :

- (1) correspond à deux des trois réseaux de **Montargis, Fleury-les-Aubrais, Orléans Centre-Ville Nord** qui se trouvent sur des zones réputées favorables des aquifères du Dogger et du Trias. Par ailleurs, ces réseaux utilisent 100 % de gaz et de fioul avec au moins 78 % de gaz. Toutefois, ils sont tous les trois dotés d'une centrale de cogénération, ce qui est a priori préjudiciable à l'utilisation de la géothermie ;
- (2) correspond aux trois réseaux précédents auxquels nous avons ajouté le réseau de **Vierzon** qui se trouve sur une zone un peu moins favorable du seul aquifère du Trias. Il utilise également 100 % de gaz et de fuel avec 86 % de gaz. Il est également doté d'une centrale de cogénération.

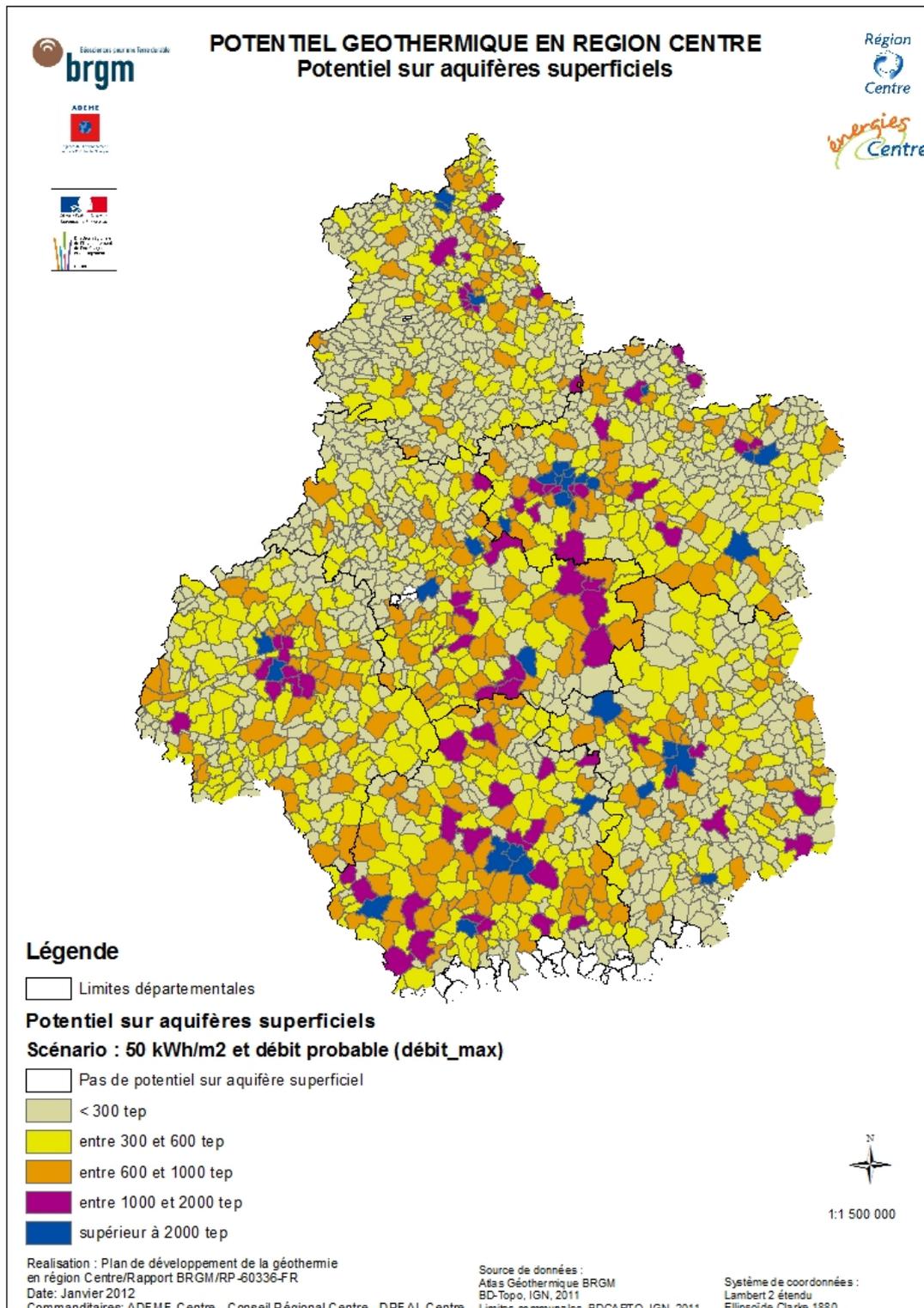


Illustration 27 : Cartographie du potentiel de développement de la géothermie sur aquifères superficiels.

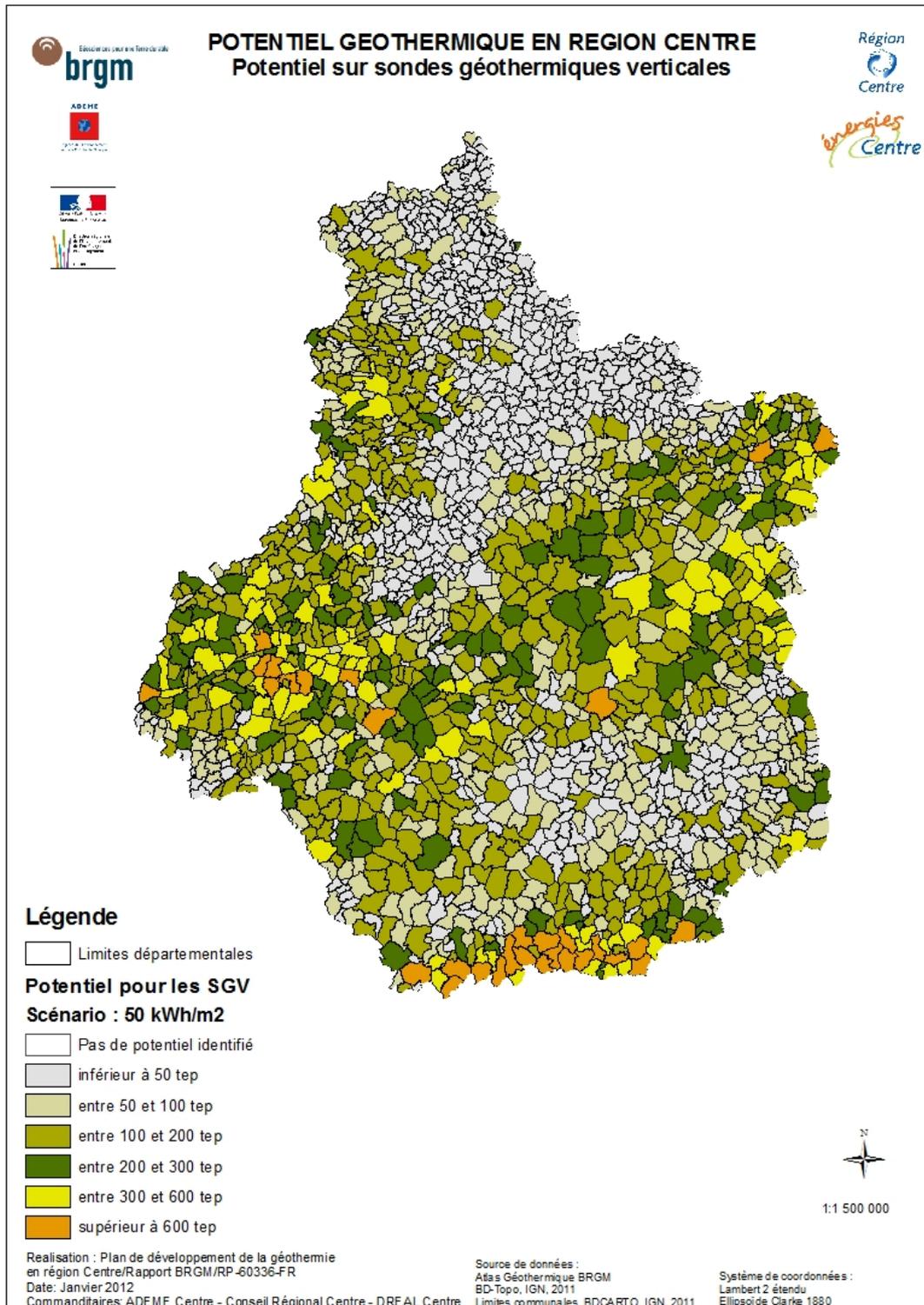


Illustration 28 : Cartographie du potentiel de développement de la géothermie sur sondes.

Nous avons éliminé systématiquement les réseaux alimentés à plus de 55 % par de la biomasse ou l'incinération d'ordures ménagères (Blois et Vineuil).

Les hypothèses des calculs d'économie en énergie primaire et en CO<sub>2</sub> sont présentées ci-dessous :

Base : réglementation sur les DPE

Energie économisée, en kWh Energie Primaire

Rappel : 1kWh électricité  
1 kWh gaz ou fue

2,58 kWhEP  
1 kWhEP

		GWh/an
Sol° Géoth sur PAC	Fourniture en GWhF	1000
	COP	3,5
	Conso élec finale par PAC	286
	Coef	2,58
	EP consommée GWhEP	737
Sol référence	Fourniture en EF	1 000
	rendement	0,9
	EF consommée GWh F	1 111
	Coef EF EP	1
	EP consommée GWhEP	1 111
Gain	EP	374

Contenus CO<sub>2</sub> des combustibles courants

(gCO<sub>2</sub>eq/kWh Pouvoir calorifique inférieur)

Combustibles	Émissions directes	Émissions ACV
Fuel domestique	270	300
Gaz naturel	205	234

Contenus CO<sub>2</sub> de l'électricité\*  
(gCO<sub>2</sub>eq/kWh Pouvoir calorifique inférieur)

Usages	Chauffage	
		180
	En base	40

Sol° Géoth sur PAC	EP consommée GWhEP	737
	coeff	180
	T eq CO <sub>2</sub> /an	132 686
Sol référence**	EP consommée GWhEP	1 111
	coeff	260,4
	T eq CO <sub>2</sub> /an	289 333
Gain	T eq CO <sub>2</sub> /an	156 648

\*note l'ADEME et RTE diffusée en 2007 (gCO<sub>2</sub>eq/kWh)

\*\* mix 60% GN 40% Fuel

Ces éléments permettent de déterminer les ratios suivants utilisés pour la très basse énergie.

tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh <sub>ep</sub> )	Tonnes de CO <sub>2</sub> évitées annuellement
1	4,35	1,82

Concernant les réseaux de chaleur, il a été considéré des valeurs, correspondant à 80 % des valeurs moyennes de réseaux franciliens<sup>11</sup>.

tep substituées annuellement	Gain en énergie primaire (MWh <sub>ep</sub> )	Tonnes de CO <sub>2</sub> évitées annuellement
2 800	30 800	6 560

<sup>11</sup> Valeurs issues du rapport BRGM RP-60615-FR

## **5.2. DU POTENTIEL À LA DÉFINITION D'OBJECTIFS**

### **5.2.1. Remarques générales**

Les éléments présentés dans cette étude montrent le potentiel de développement de la géothermie en région Centre, à partir des solutions sur aquifères ou sur échangeurs enterrés.

On distingue généralement les trois types de filières suivantes, comme présenté en introduction et comme décliné dans les objectifs du Grenelle de l'Environnement :

- PAC « individuelles » ;
- PAC dans le collectif/tertiaire ;
- Réseaux de chaleur.

En effet, ces dernières vont avoir des enjeux de développement différents (types d'aides associées aux maîtres d'ouvrages, structurées différemment notamment).

Cette étude ne calcule pas le potentiel en termes de production de froid, pour les PAC dans le collectif/tertiaire. Il est souligné cependant en introduction les possibilités, pour les solutions avec pompes à chaleur, de produire du chaud et du froid, de manière alternative ou de manière simultanée, et ce avec le même investissement « sous-sol » initial. Ces solutions de rafraîchissement s'accompagnent en outre d'une excellente efficacité énergétique.

L'intérêt de la production de chaud et de froid avec la géothermie se retrouve dans les analyses technico-économiques. Cela va également avoir un impact, notamment thermique, sur la gestion de la ressource. En effet, la production de froid l'été conduit à recharger thermiquement le sous-sol exploité l'hiver.

De plus, ce potentiel est défini par rapport à l'ensemble des surfaces chauffées dans l'existant. Or, les freins au développement d'opérations de géothermie sont plus importants en rénovation que dans le cas de nouvelles constructions.

Cependant, l'impact énergétique et environnemental des nouvelles constructions est faible (inférieure à 2 %) étant donné le taux de nouvelles constructions par rapport au parc de logements, d'une part, et les nouvelles réglementations thermiques (RT 2012) pour les nouvelles constructions, d'autre part.

Ces éléments doivent être pris en compte pour quantifier un objectif de développement en région Centre.

### **5.2.2. Déclinaison d'objectifs pour les PAC dites « individuelles »**

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 présentés en introduction.

Une approche statistique basée sur les objectifs fixés au niveau national est réalisée.

L'hypothèse retenue 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 en région Centre

en France, en 2006	53 510	PAC au niveau français	<i>(données AFPAC)</i>
soit environ	0,34 %	des maisons individuelles équipées	<i>(données INSEE)</i>
en région Centre, en 2005	768 000	maisons individuelles	<i>(données Energie Demain, cela équivaut à environ 5% du parc national)</i>
dont	2 633	équipées de PAC	<i>(si l'on fait l'hypothèse que ce ratio s'applique pour l'ensemble des régions)</i>
L'objectif fixé par le Grenelle de l'Environnement est d'atteindre	600 000	PAC géothermiques en 2020	
soit une multiplication par	11	entre 2006 et 2020	
ce qui correspond à un objectif en 2020 pour la région Centre de	28 962	PAC géothermiques	<i>(données issues des études d'Energie Demain)</i>
ou encore	3 %	des maisons individuelles de la région à l'horizon 2020	
ou encore	32 %	des nouvelles constructions	<i>(données issues des études d'Energie Demain)</i>

Si l'on prend des valeurs moyennes<sup>12</sup>, en considérant que la substitution se fait par rapport au gaz naturel pour des maisons de niveau de consommation BBC, cet objectif peut se traduire en gains énergétiques et climatiques.

<sup>12</sup> Valeurs moyennes issues de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France (Rapport BRGM/RP-60336-FR).

Équiper 28 962 maisons individuelles de PAC géothermiques permet de substituer 22 ktep et d'éviter l'émission de 40 tonnes de CO<sub>2</sub>.

### **5.2.3. Les éléments structurants du développement de la géothermie**

La filière géothermique doit actuellement répondre à deux grands enjeux :

- se développer fortement et conformément aux attentes relayées par la directive européenne sur les énergies renouvelables (2009/28/CE), déclinées au niveau français à travers les lois dites « Grenelle 1 » et « Grenelle 2 » et la PPI Chaleur 2009-2020 (Programmation Pluriannuelle des Investissements de production de chaleur), pour laquelle l'objectif est une multiplication par 6 de la production de chaleur géothermique entre 2006 et 2020 ;
- 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 masse d'opérations attendue.

Les éléments structurants sont distingués en fonction des différentes filières : pour le particulier, le collectif/tertiaire et l'alimentation des réseaux de chaleur.

#### ***Pour le particulier (ou « PAC individuelle »)***

- Pérenniser les mécanismes incitatifs et plus particulièrement le crédit d'impôt : les lois de Finances précédentes ont modifié le crédit d'impôt pour la géothermie. Une première modification intervenue fin 2009 a conduit à ce que l'assiette, qui ne comprenait initialement que le matériel mis en œuvre, inclut la pose de l'échangeur. Une seconde modification a conduit à ramener le taux du crédit d'impôt de 40 % à 36 %, sous l'effet du « coup de rabot » de 10 % appliqué à toutes les niches fiscales et décidé fin 2010. Il faut noter également que certaines régions proposent des aides complémentaires pour les particuliers.
- 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.
- Permettre le développement de nouvelles techniques : le développement de la géothermie pour le particulier sera également lié à l'effort mis sur les solutions d'échangeurs compacts, solutions intermédiaires entre les échangeurs verticaux (sondes géothermiques verticales) et les échangeurs horizontaux et visant un bon compromis encombrement/coût d'investissement.

#### ***Pour le collectif/tertiaire (dites « PAC intermédiaire »)***

- Pérenniser les subventions du Fonds Chaleur.
- Développer les inventaires de la ressource pour permettre la prise en compte de la géothermie au moment des études de préfaisabilité.

- Simplifier la réglementation : des travaux sont en cours au niveau national pour simplifier la réglementation. La géothermie est principalement régie par le code minier et le code de l'environnement, mais également par le code de la santé publique et le code des collectivités territoriales.
- 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 30 kW souscrivant à cette garantie sont assurées contre le risque de ne pas trouver la ressource souhaitée (conforme au projet).
- Recenser les opérations existantes pour étudier le développement et limiter les conflits d'usages.
- Mettre en place une labellisation de qualité des bureaux d'étude sous-sol intervenant sur ces opérations.

### ***Pour les 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 leur alimentation par géothermie, il est important de :

- développer les réseaux de chaleur hors Île-de-France, conformément aux préconisations du rapport « Propositions pour le développement des énergies renouvelables appliquées au bâtiment » issu du Groupe de travail « Énergies renouvelables appliquées au bâtiment » du Plan Bâtiment Grenelle<sup>13</sup>. En effet, 30 réseaux de chaleur franciliens sont alimentés par l'aquifère profond du Dogger, et ce depuis plus de 30 ans pour 29 d'entre eux. Il convient de dupliquer le modèle dans d'autres régions, en s'appuyant sur les collectivités qui en ont la compétence.
- Améliorer le taux de couverture du risque de ces opérations, en dehors de l'Île-de-France. Pour les opérations sur aquifères profonds, la SAF-Environnement propose une garantie court terme (assurance contre le risque d'échec du premier forage) et long terme (garantie sur 20 ans de la pérennité de la ressource). Concernant le court terme, elle assure 65 % du coût de l'investissement sur le premier forage. Certaines régions, comme l'Île-de-France couvrent, en complément, 25 % de plus. Le maître d'ouvrage est alors garanti à 90 % de l'investissement sur son premier forage.

---

<sup>13</sup> « Proposition n° 38 - Développer les réseaux de chaleur géothermiques- et notamment hors Île-de-France en développant la connaissance de la ressource et en mettant en place des **démonstrateurs** permettant de valider le bon fonctionnement de ces installations géothermiques dans d'autres bassins sédimentaires ou dans d'autres aquifères que celle d'Île-de-France ».

## 6. Conclusion

Cette étude montre que le potentiel de développement de la géothermie en région Centre est important et ce, particulièrement pour les solutions sur aquifères superficiels.

En effet, le potentiel estimé varie entre 600 et 3 600 ktep. Cet écart s'explique par le choix des scénarios : hypothèses de valorisation de débits, mais également hypothèses de consommations en surface, qui influent fortement sur le potentiel de valorisation de la géothermie. Exploiter ce potentiel permettrait d'économiser entre 1,2 et 6,5 tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

Ces valeurs prennent en compte trois filières de géothermie : PAC sur aquifères superficiels et sur sondes et réseaux de chaleur sur aquifères « profonds ». Cependant, il faut noter que le niveau de connaissances des différentes ressources est très différent (remarque particulièrement vraie pour les aquifères profonds, par rapport au niveau de connaissance sur les aquifères superficiels). Cette étude a été l'occasion d'approfondir la connaissance sur la ressource aquifère dite « profonde » et a surtout révélé le manque de données de terrain pour valider les tendances mises en avant.

Il faut également prendre en compte les choix méthodologiques faits dans le cadre de cette étude. Notamment il a été étudié la valorisation de la géothermie très basse énergie pour l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires, sans faire de distinction entre les modes de chauffage des bâtiments existants. Or, il est clair que la pénétration de la géothermie dans la rénovation des bâtiments a une limite technique : le niveau de température des émetteurs de chaleur. Cette étude n'a pas évalué le potentiel de développement pour les nouvelles constructions, qui limite la contrainte liée aux émetteurs de température, mais qui a un impact plus faible en terme d'énergie, étant donné le taux de renouvellement du parc (de l'ordre de 1 % par an).

Enfin, l'échelle de travail est fine (infra-communale), mais ne peut en aucun cas se substituer aux études de faisabilité. Ainsi, il ne faut pas comprendre que les communes ayant des faibles potentiels ne pourraient tout de même pas développer ponctuellement des opérations. L'étendue des solutions qu'offre la géothermie fait qu'elle ne peut être exclue à priori. Il faut également considérer les évolutions attendues des contraintes prises en compte dans cette études. D'autres contraintes ne peuvent être estimées à cette échelle mais peuvent apparaître au cas par cas. Ces éléments doivent être pris en compte pour la définition d'objectifs.

Finalement, cette étude a permis de donner des éléments relatifs à l'intégration de la géothermie dans l'évaluation du mix énergétique nécessaire à l'élaboration du Schéma Régional Climat Air Énergie en région Centre. Les résultats pourraient également être valorisés, sous une forme à définir, pour l'élaboration des Plans Climat Énergie Territoriaux (PCET) qui permettront de définir également un plan d'action, à une échelle plus locale.



## 7. Bibliographie

**Cos L., Fabris H., Herbrich B., Rojas J.** (1980) - Forage géothermique de Melleray, rapport de fin de sondage. Rapport BRGM n° 80SGN435GTH.

**Housse B., Maget P.** (1976) - Potentiel géothermique du bassin parisien. Rapport BRGM n° 76-RR-29146.

**Foucher J.C., Maget P., Tournaye D.** (1979) - Étude sur les possibilités d'utilisation de la géothermie en région Centre. Rapport BRGM n° 79SGN365GTH.

**Martin et al.** (2007) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Rapport BRGM/RP-55088-FR.

**Schomburgk S., Lalot E., Marget Ph., Mardhel V., Martin J.C., Robelin C.** (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Bassin Loire-Bretagne Année 3. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveau 3 en région Centre. Rapport d'étape. BRGM/RP-58257-FR.

**Thauvin M., Colin S., Saint-Martin M.** (2011) – Carte des ressources en matériaux de la région Centre, Elaboré dans le cadre de la révision des Schémas Départementaux des Carrières. Rapport BRGM/RP-59248-FR, 121 p., 14 ill., 6 ann, 8 planches hors texte.

**Bonté D., Guillou-Frottier L. et al.** (2010) - Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: new data compilation and interpolation, *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2010, no 4

**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

**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.

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

**BRGM-ADEME** (2012) - Les pompes à chaleur géothermiques sur champs de sondes, Manuel pour la conception et la mise en œuvre. Guide technique BRGM-ADEME.

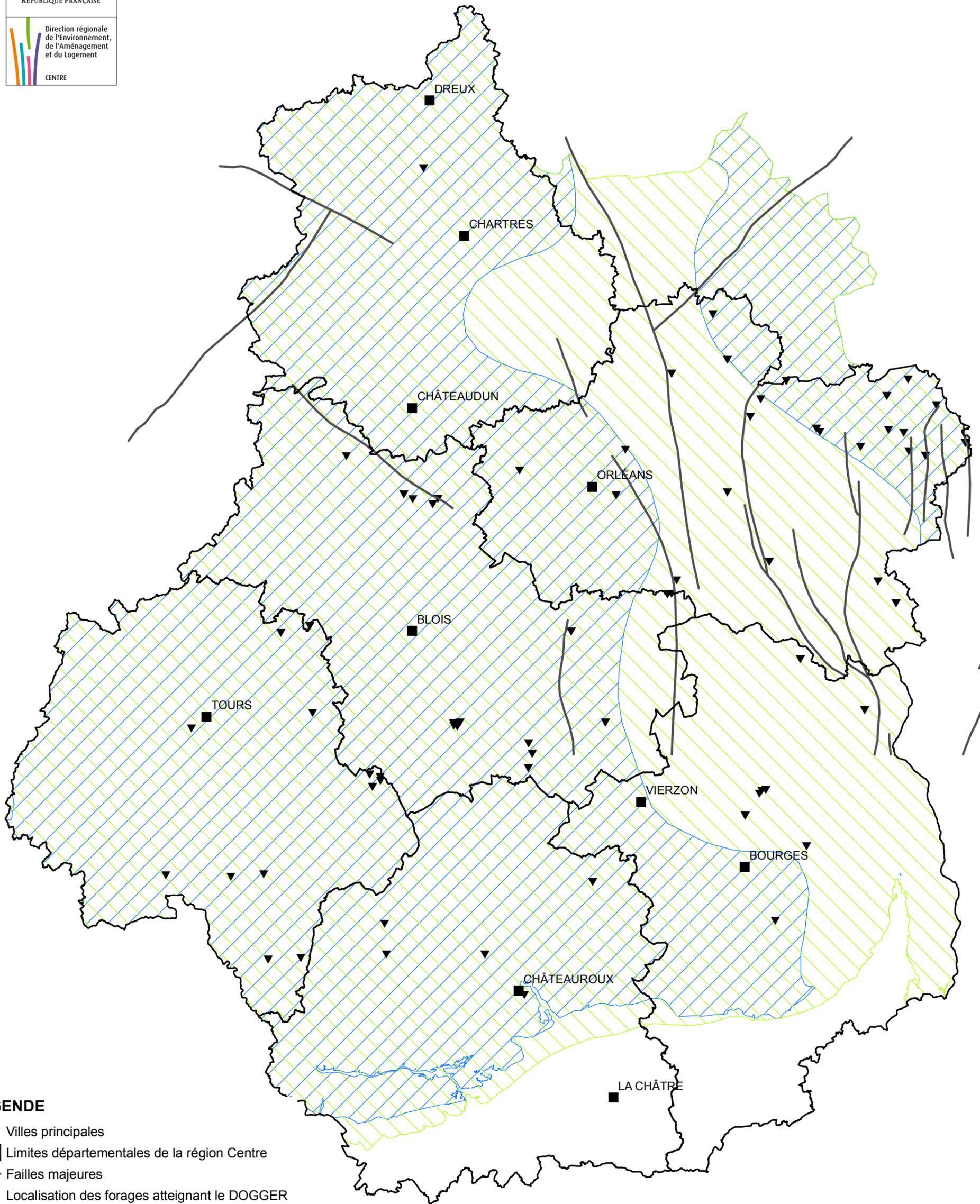
**BRGM-ADEME** (2012) - Les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère. Manuel pour la conception et la mise en œuvre. Guide technique BRGM-ADEME.



## **Annexe 1**

### **Cartes uni-critères des aquifères du Dogger et du Trias en région Centre (profondeur, température, épaisseur utile, transmissivité)**





**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures
- ▼ Localisation des forages atteignant le DOGGER

**BdLisa (référentiel hydrogéologique français)**

**Niveaux aquifères (DOGGER)**

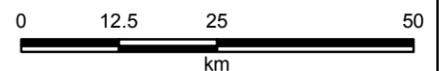
- ▨ Calcaires du Bathonien-Callovien (F11KLMOR\_1)
- ▨ Calcaires de l'Aalénien-Bajocien (F11T\_1)

**Sources de données :**

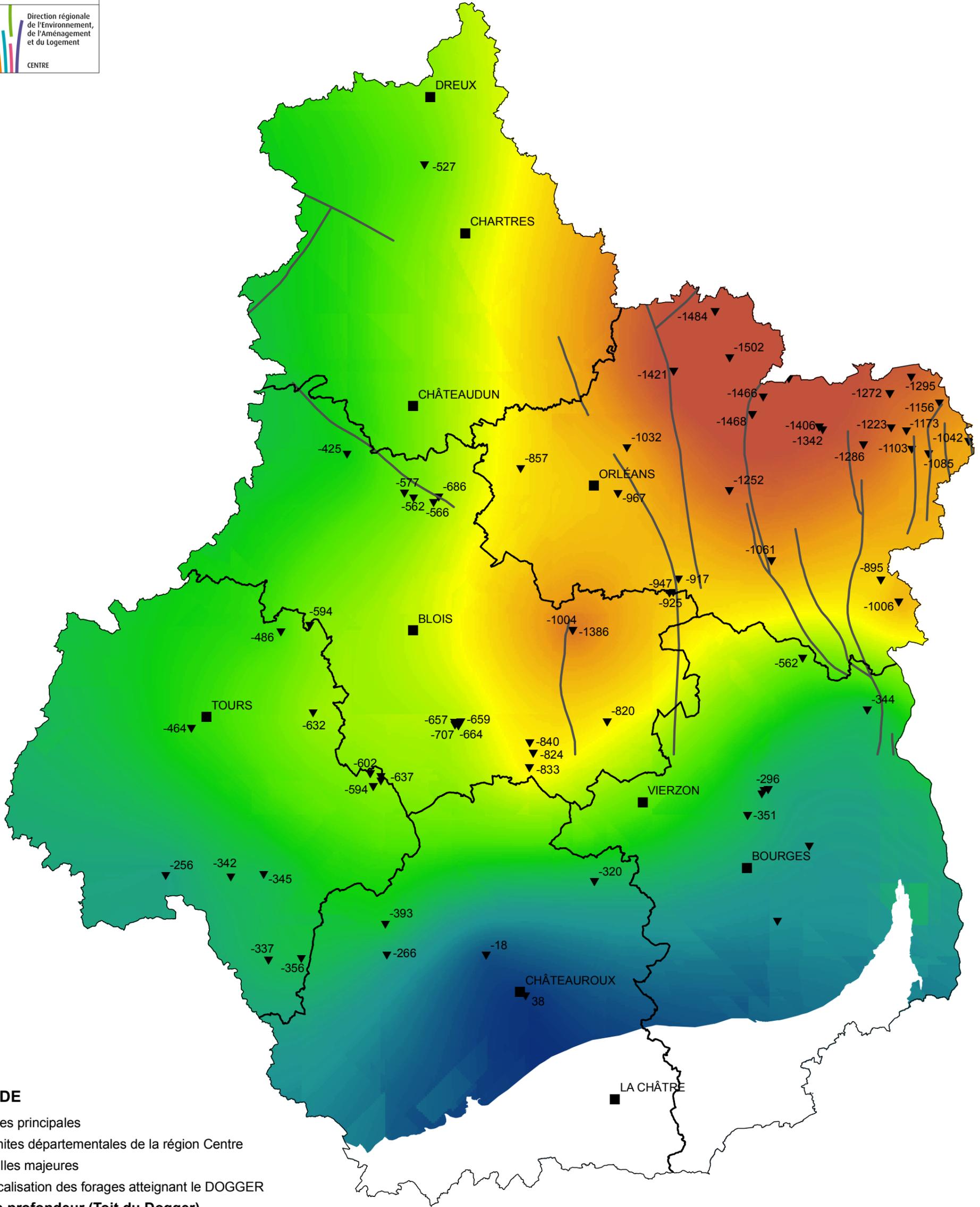
Limites des aquifères, BdLisa, BRGM, 2011  
 Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du  
 Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
 Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
 Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011



Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
 Lambert 2 étendu  
 Ellipsoïde Clarke 1880

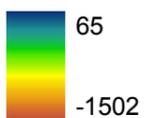


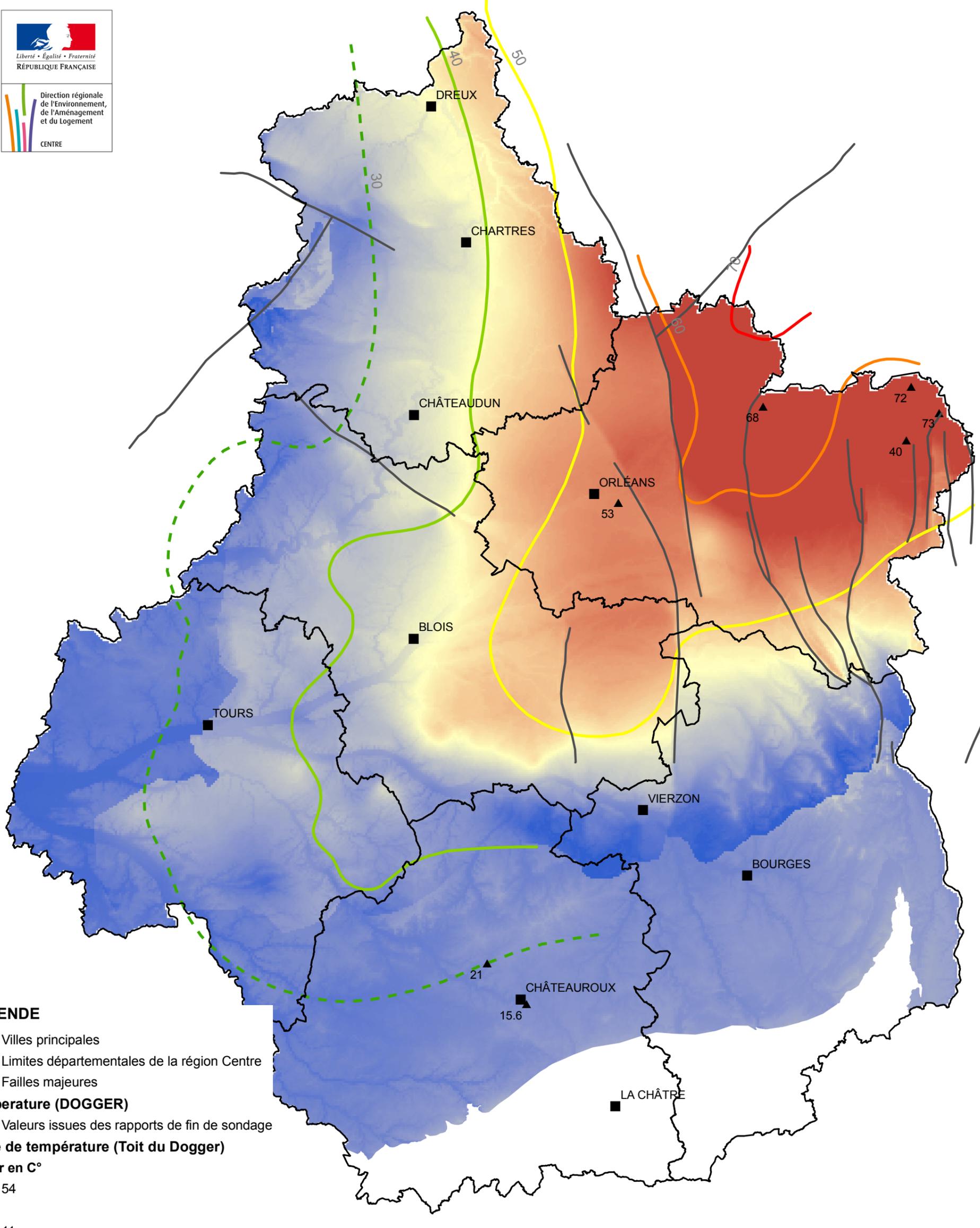
**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures
- ▼ Localisation des forages atteignant le DOGGER

**Grille de profondeur (Toit du Dogger)**

Valeur en m (côte NGF)

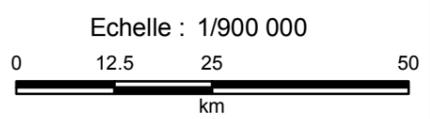




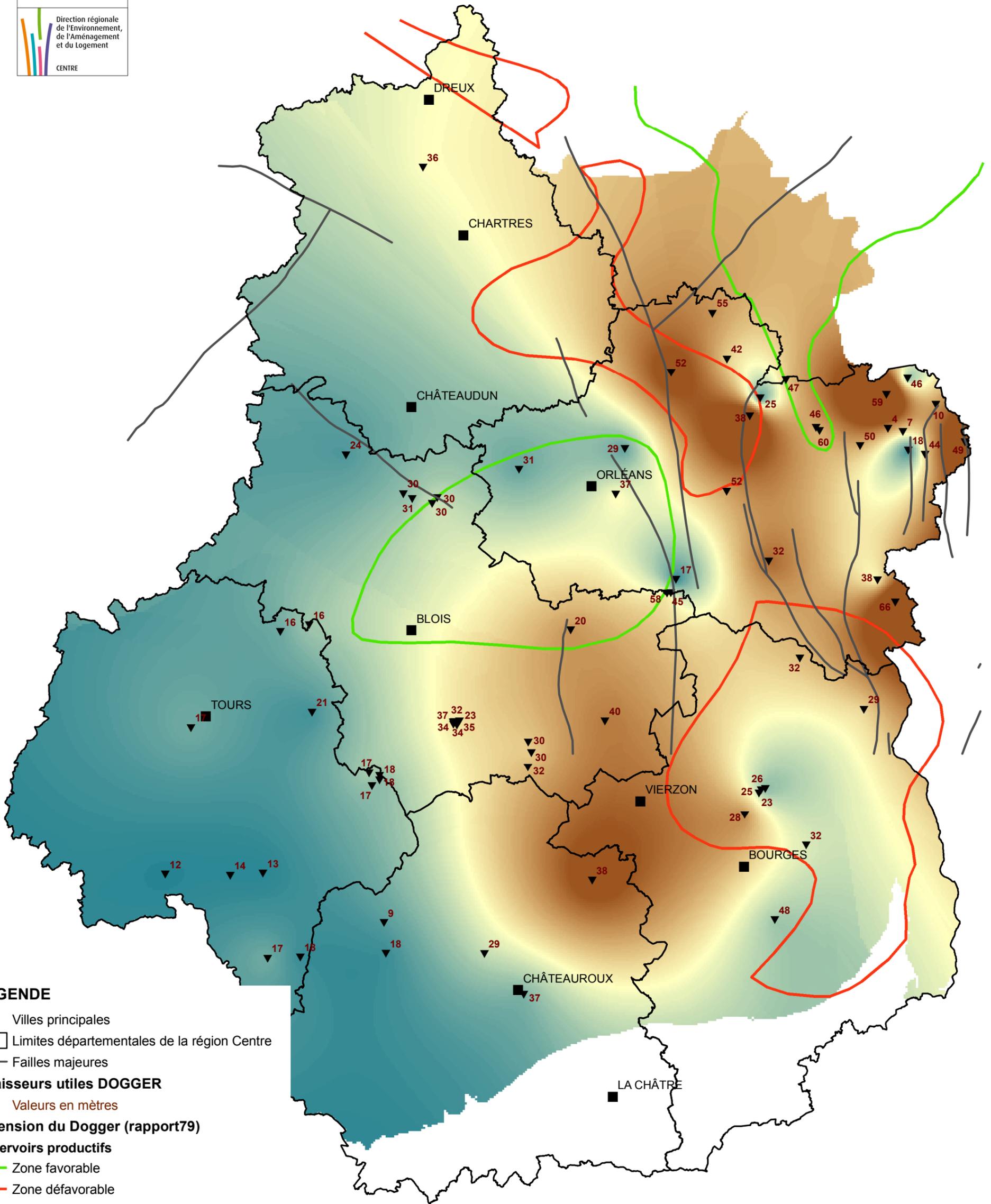
**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures
- Température (DOGGER)**
- ▲ Valeurs issues des rapports de fin de sondage
- Grille de température (Toit du Dogger)**
- Valeur en C°
- 54
- 11
- Courbes de température (Dogger)**
- Température en °C (Rapport 1976)
- 30
- 40
- 50
- 60
- 70

**Sources de données :**  
Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
Courbes de température, Rapport sur le Potentiel géothermique du Bassin parisien, 1976  
Grille température, BRGM, 2011  
Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011



Système de coordonnées :  
Lambert 2 étendu  
Ellipsoïde Clarke 1880 NTF

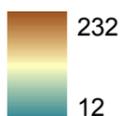


**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures
- Epaisseurs utiles DOGGER**
- ▼ Valeurs en mètres
- Extension du Dogger (rapport79)**
- Réservoirs productifs**
- Zone favorable
- Zone défavorable

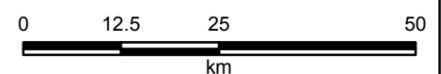
**GRILLE DES EPAISSEURS UTILES (DOGGER)**

Valeur en mètre



**Sources de données :**  
 Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
 Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
 Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011  
 Extension des réservoirs productifs (rapport 1979) : Etude sur les possibilités d'utilisation de la géothermie en région centre, BRGM, 1979

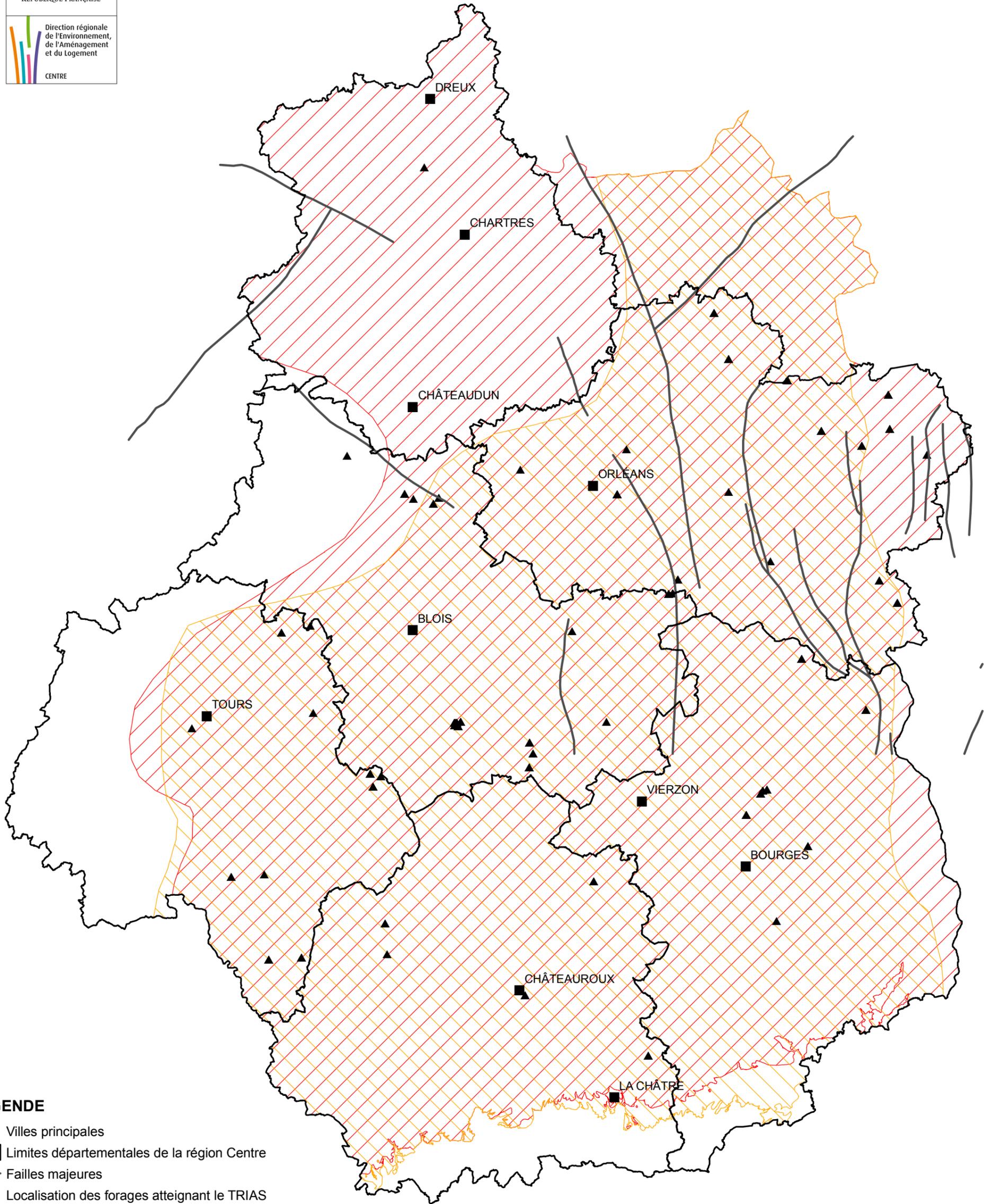
Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
 Lambert 2 étendu  
 Ellipsoïde Clarke 1880 NTF



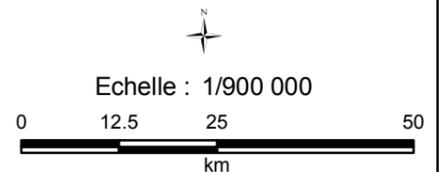
\* pour les forages retenus dans le cadre de cette étude

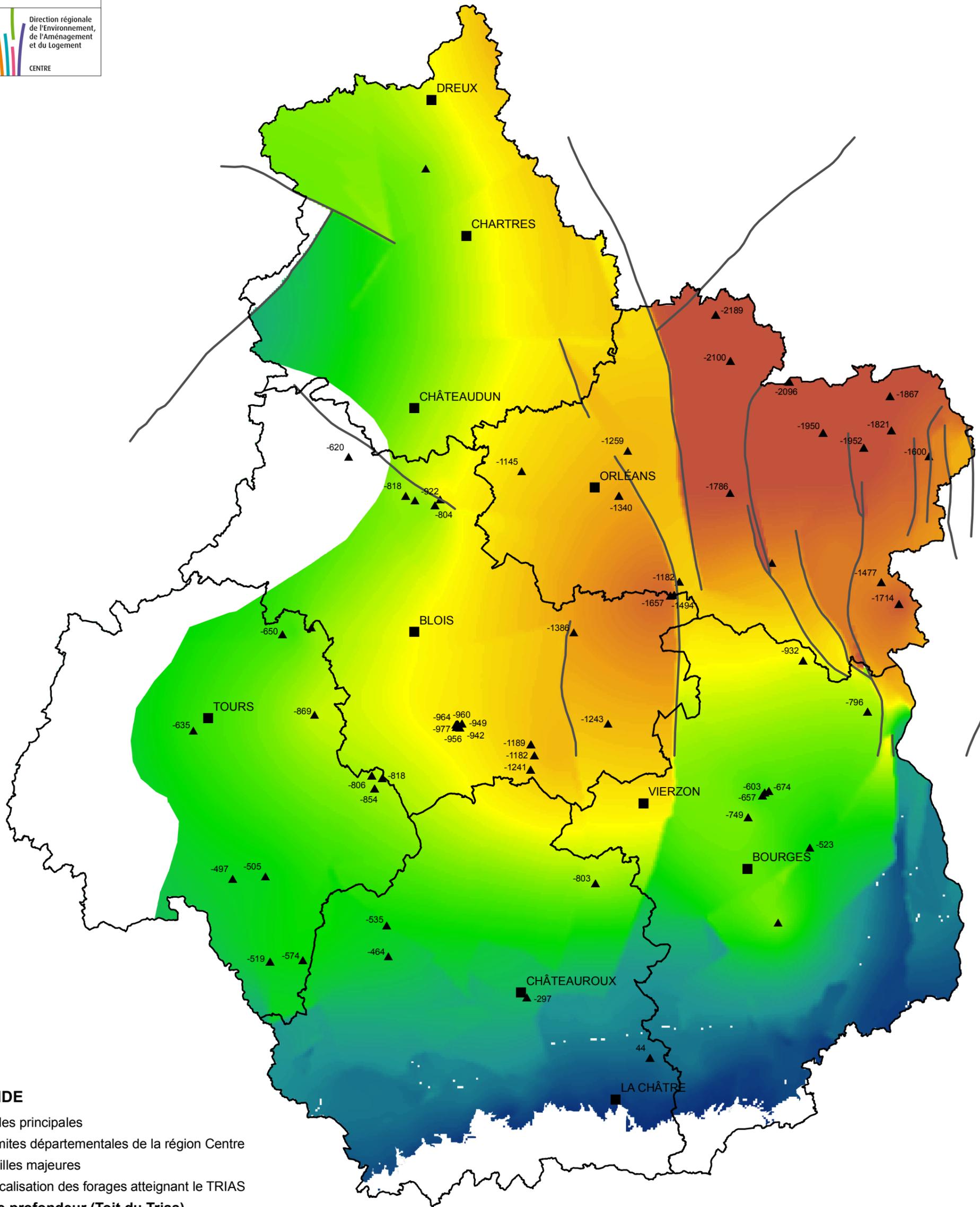


**LÉGENDE**

- Villes principales
  - Limites départementales de la région Centre
  - Failles majeures
  - ▲ Localisation des forages atteignant le TRIAS
- BdLisa (référentiel hydrogéologique français)**  
**Niveaux aquifères (TRIAS)**
- ▨ Grès du Trias sup. (F14A\_1)
  - ▨ Dolomies et grès du Trias moy. à sup. (F15A\_1)

**Sources de données :**  
 Limites des aquifères, BdLisa, BRGM, 2011  
 Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du  
 Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
 Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
 Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011



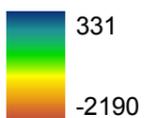


**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures
- ▲ Localisation des forages atteignant le TRIAS

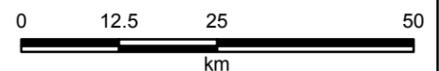
**Grille de profondeur (Toit du Trias)**

Valeur en m (côte NGF)



**Sources de données :**  
Grille Toit Trias, SIGES, BRGM, 2011  
Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du  
Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011

Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
Lambert 2 étendu  
Ellipsoïde Clarke 1880 NTF

# CARTE DE TEMPERATURE AU TOIT DU TRIAS

pour les forages retenus dans le cadre de cette étude



## LÉGENDE

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures

### Température (TRIAS)

- ▲ Valeurs issues des rapports de fin de sondage

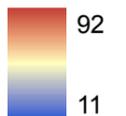
### Courbes de température (Trias)

Température en °C (Rapport 1976)

- 50
- 60
- 70
- 80
- 90
- 100
- 110

### Grille de température (Toit du Trias)

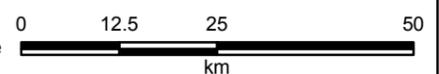
Valeur en °C



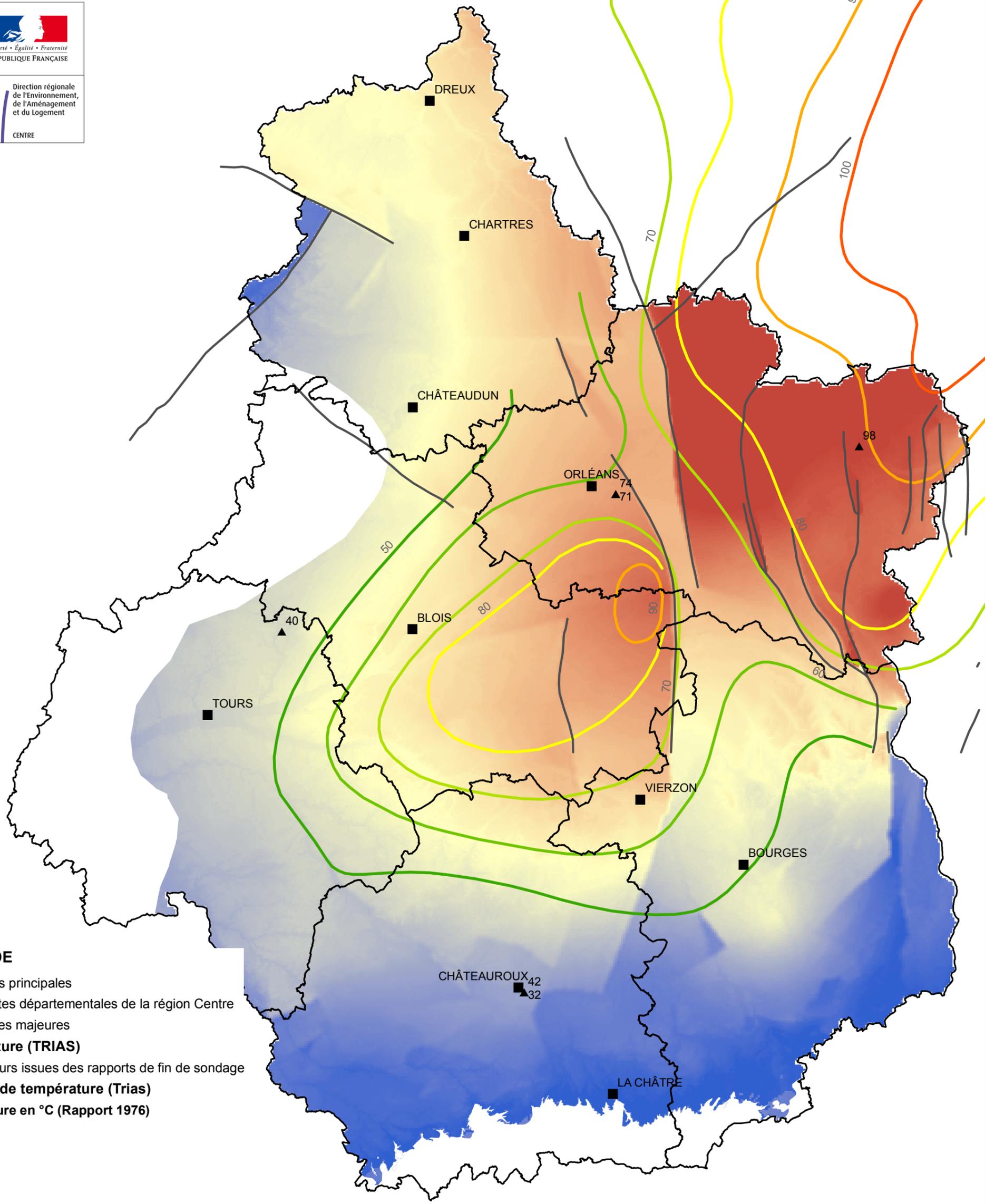
Réalisation : Plan de développement de la géothermie en région Centre / Rapport n° BRGM/RP-60336-FR  
Date : octobre 2011  
Commanditaires : ADEME Centre - Conseil Régional Centre- DREAL Centre

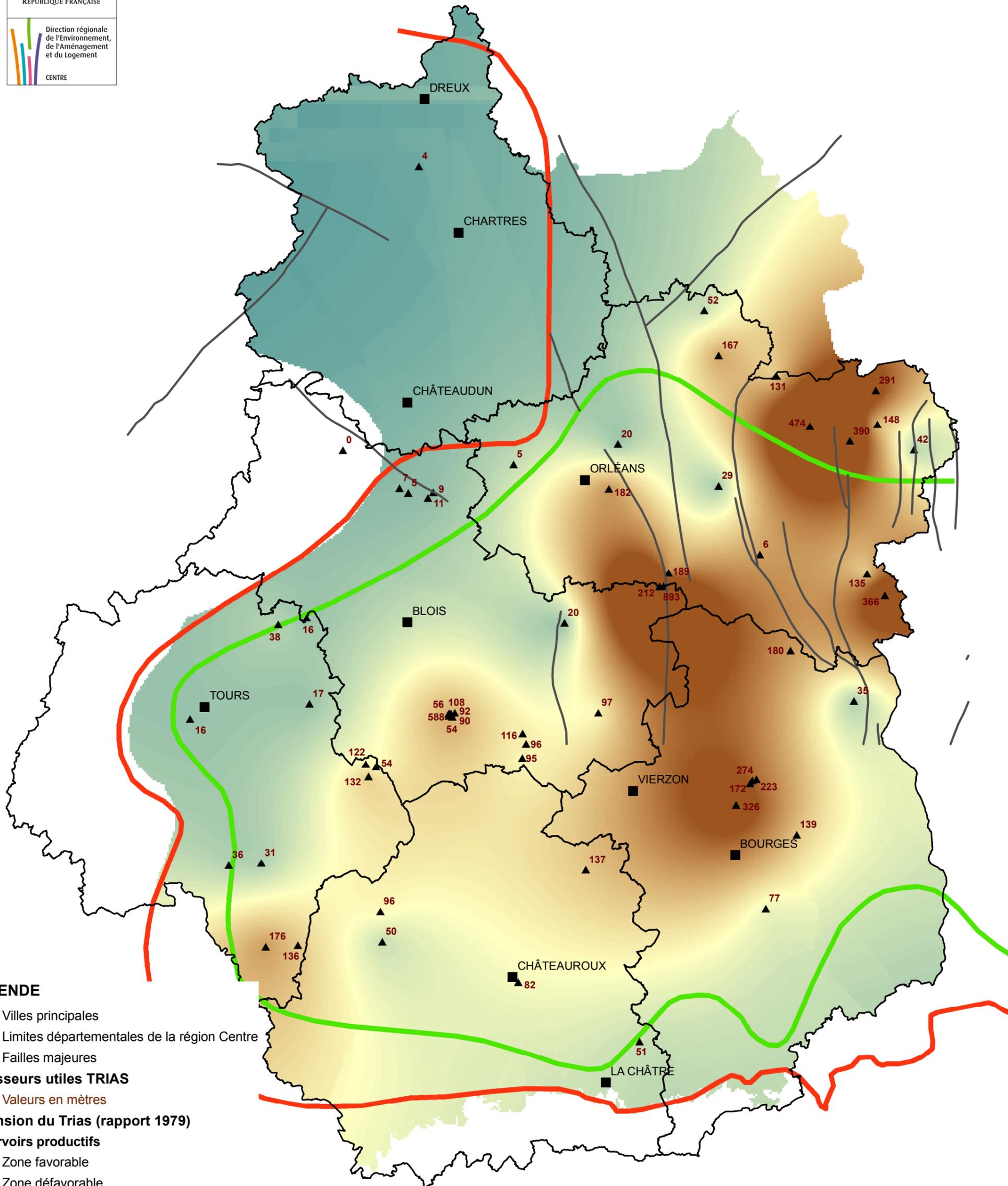
Sources de données :  
Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
Courbes de température, Rapport sur le Potentiel géothermique du Bassin parisien, 1976  
Grille température, BRGM, 2011  
Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011

Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
Lambert 2 étendu  
Ellipsoïde Clarke 1880 NTF





**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites départementales de la région Centre
- Failles majeures

**Epaisseurs utiles TRIAS**

- ▲ Valeurs en mètres

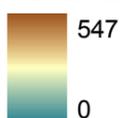
**Extension du Trias (rapport 1979)**

**Réservoirs productifs**

- Zone favorable
- Zone défavorable

**GRILLE DES EPAISSEURS UTILES (TRIAS)**

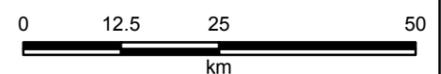
Valeur en mètre



**Sources de données :**

Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011  
Extension des réservoirs productifs (rapport 1979) :  
Etude sur les possibilités d'utilisation de la géothermie en région centre, BRGM, 1979

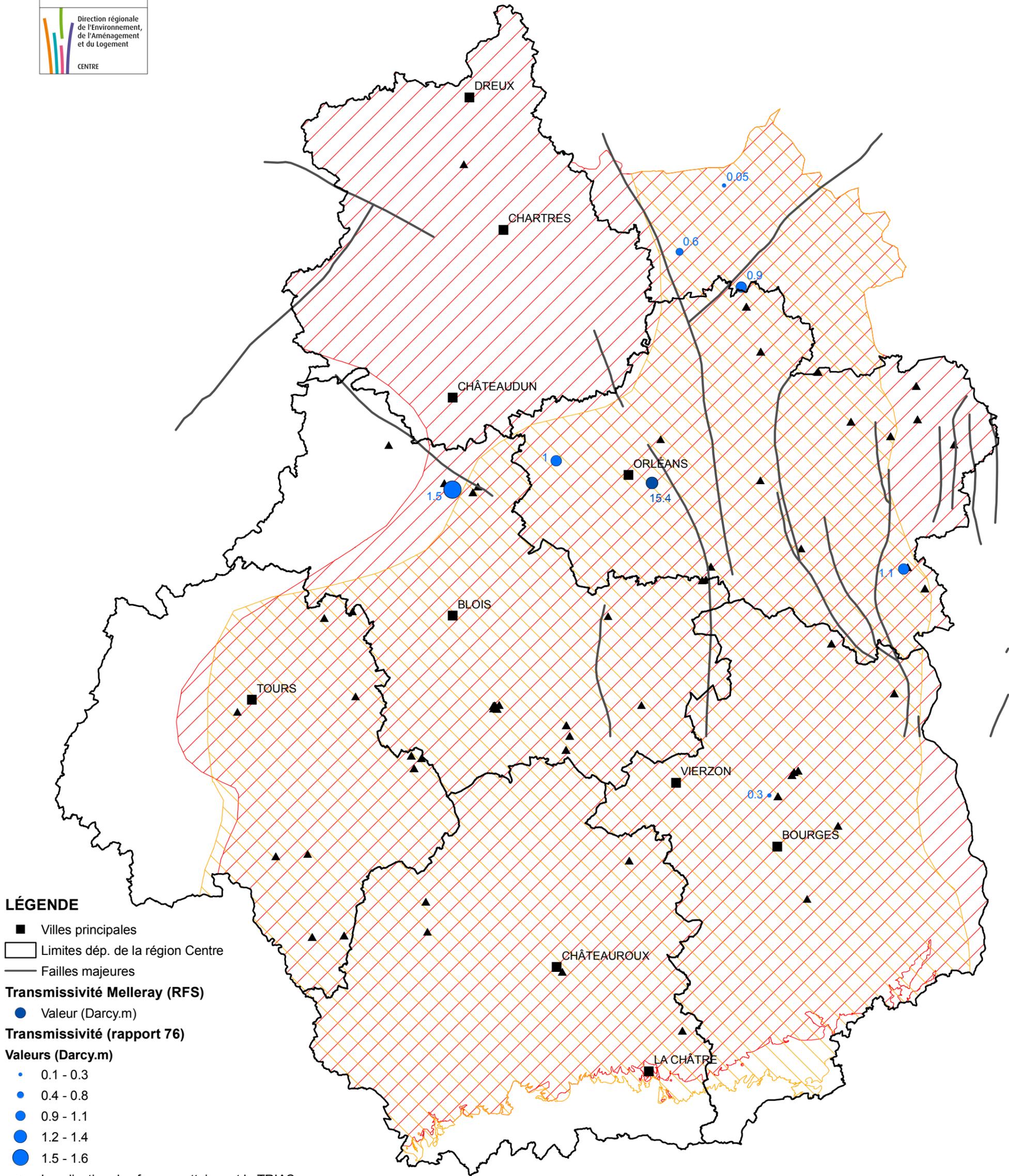
Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
Lambert 2 étendu  
Ellipsoïde Clarke 1880 NTF



1.6



**LÉGENDE**

- Villes principales
- Limites dép. de la région Centre
- Failles majeures

**Transmissivité Melleray (RFS)**

- Valeur (Darcy.m)

**Transmissivité (rapport 76)**

**Valeurs (Darcy.m)**

- 0.1 - 0.3
- 0.4 - 0.8
- 0.9 - 1.1
- 1.2 - 1.4
- 1.5 - 1.6

- ▲ Localisation des forages atteignant le TRIAS

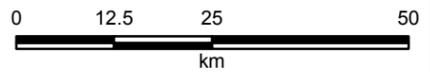
**BdLisa (référentiel hydrogéologique français)**

**Niveaux aquifères (TRIAS)**

- ▨ Grès du Trias sup. (F14A\_1)
- ▨ Dolomies et grès du Trias moy. à sup. (F15A\_1)

**Sources de données :**  
Limites des aquifères, BdLisa, BRGM, 2011  
Forages issus des RFS, extraction de la BSS et du Guichet H, juillet et Août 2011, BRGM, 2011  
Transmissivités, Rapport sur le Potentiel géothermique du Bassin parisien, 1976  
Chefs-lieux, BdTopo, IGN, 2011  
Limites départementales, BDCarto, IGN, 2011

Echelle : 1/900 000



Système de coordonnées :  
Lambert 2 étendu  
Ellipsoïde Clarke 1880 NTF

## **Annexe 2**

### **Précisions sur l'inventaire des opérations et le modèle économique (EGEE Développement)**





## Annexe 1. Inventaire : Données de référence

### A. BSS

Les déclarations comportant la mention « géothermie » ont été extraites. Le fichier a ensuite été traité pour effectuer un dé-doublonnage : une même opération peut donner lieu à plusieurs déclarations (par exemple : déclaration pour forages d'essais, déclaration pour forages d'exploitation).

Départ	<1970	70-79	80-89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010 partiel
18		1	2	1								1							2	3	4	3	17	2
28	2		21			2			1				1	2		1		6	4	3	10	20	13	2
36		1	5				1						1	1	1		3		4	7	11	32	26	11
37			10											2			2	5	19	22	23	48	40	7
41			12	3								1		4	1	5		6	8	23	38	46	38	13
45	5	3	75	1		3		1	1	1	1	1	1	4		2	8	17	15	48	50	79	48	11
<b>Totaux Région</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>125</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>34</b>	<b>52</b>	<b>106</b>	<b>136</b>	<b>228</b>	<b>182</b>	<b>46</b>

## B. SONDES

Parallèlement, il a été possible de distinguer les opérations sur sondes de celles sur nappe, sur le vu des mentions figurant dans les différentes rubriques.

Sondes		
Départ	2008-2010	Total
18	3	3
28	5	11
36	23	25
37	4	8
41	4	23
45	14	32
<b>Région</b>	<b>53</b>	<b>102</b>

## C. OPERATIONS INDIVIDUELLES / AUTRES OPERATIONS

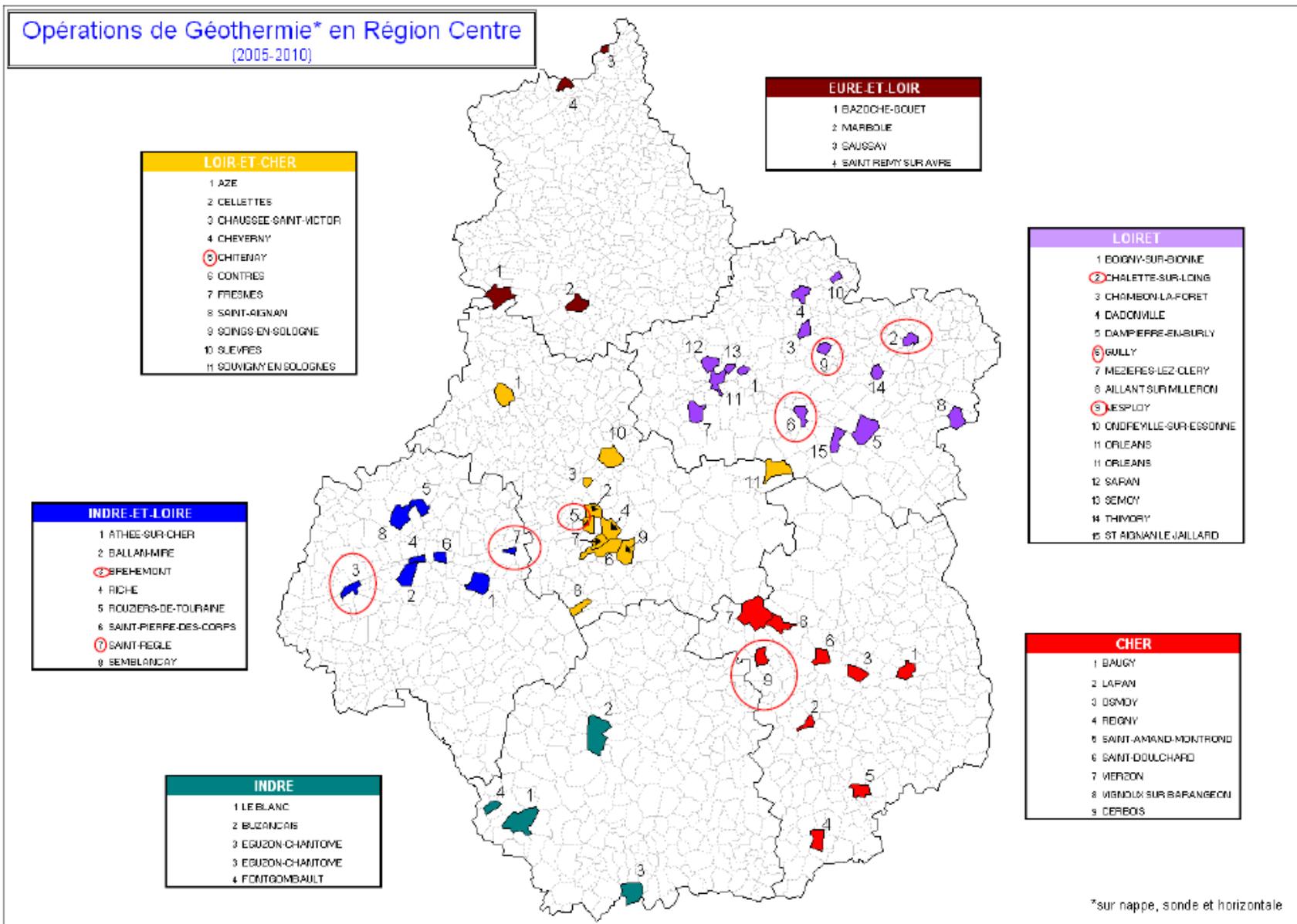
### OPERATIONS INDIVIDUELLES

La BSS a permis une estimation grossière. Celle-ci a été croisée avec l'enquête foreurs effectuée par la CRMA et EGEE pour le Conseil Régional. Sur l'échantillon ayant répondu, 80% des opérations réalisées le sont pour des particuliers.

2008-2010	Foreurs régionaux, opérations en région chez des particuliers								S/Total
	1	2	3	4	5	6*	7	8*	
<b>Nombre</b>	252	41	18	96	60	84	30	100	681
	* estimations à confirmer								

### AUTRES OPERATIONS

Outre la BSS et l'enquête précédente, la Carte ADEME des opérations soutenues en Région depuis 2005 a été utilisée.



Objet du contrat	Noms des bénéficiaires	Commune
<b>CHER</b>		
1 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau sur doublet géothermique sur la maison des solidarités (1073 m²).	CONSEIL GENERAL DU CHER	BAUGY
2 Mise en place d'une PAC géothermique de 6,2 kW à Lapan (18)	LA FONTENILLE SARL	LAPAN
3 Mise en place d'une pompe à chaleur sur doublet (forage) sur divers bâtiments du foyer d'accueil médicalisé à Camoy (18).	SESAME AUTISME CHER	OSMOY
4 Mise en place chauffage dans 3 logements réhabilités par pac géothermiques sur épingles verticales	COMMUNE DE REIGNY	REIGNY
5 Installation d'une pompe à chaleur sur pieux et d'un cœsi dans le cadre de la construction d'un bâtiment bureaux-atelier relais	SAINT AMAND MONTROND	SAINT-AMAND-MONTROND
6 Réalisation d'une pompe à chaleur eau/eau sur sondes géothermiques pour le compte de la société FTS.	FROID THERMO SERVICE	SAINT-DOULCHARD
7 Pompe à Chaleur dans le cadre de la réhabilitation du Stade Chaillot	COMMUNE DE VIERZON	VIERZON
8 Installation géothermique pour la nouvelle halte-garderie	COMMUNE DE VIGNOUX SUR BARA	VIGNOUX SUR BARANGEON
9 Installation d'une PAC de 38 kW avec 7 sondes de 70mètres pour la mairie et l'école	COMMUNE DE CERBOIS	CERBOIS
<b>EURE-ET-LOIR</b>		
1 Mise en place d'une pompe à chaleur sur 5 sondes géothermiques sur la salle polyvalente (200 m² classe B)	COMMUNE DE LA BAZOCHES-GOUJET	BAZOCHES-GOUJET
2 Réalisation d'une pompe à chaleur géothermie sur nappe phréatique pour la halte garderie de Marboué (272 m²)	COMMUNAUTE DE COMMUNES DES PLAINES ET VA	MARBOUE
3 Installation d'une pompe à chaleur eau/eau dans le cadre de la construction du groupe scolaire	MAIRIE DE SAUSSAY	SAUSSAY
4 Installation d'une pompe à chaleur eau/eau pour l'agrandissement du centre culturel	MAIRIE DE SAINT REMY SUR AVRE	SAINT REMY SUR AVRE
<b>INDRE</b>		
1 Mise en place d'une pompe à chaleur sur pieux géothermiques sur une unité territoriale (363 m² Bâtiment Basse Consommation)	CONSEIL GENERAL DE L'INDRE	BLANC
2 Mise en place d'une pompe à chaleur géothermique pour le Centre culturel et la bibliothèque	COMMUNE DE BUZANCAIS	BUZANCAIS
3 Fourniture et pose d'une pompe à chaleur sur pieux pour le centre socio-culturel d'EGUZON - CHANTÔME	MAIRIE EGUZON CHANTOME	EGUZON-CHANTOME
4 Mise en place d'un réseau de chaleur alimenté par des capteurs solaires thermiques (40m²) et une pompe à chaleur eau/eau sur le site du VVF	MAIRIE EGUZON CHANTOME	EGUZON-CHANTOME
5 Installation d'une pompe à chaleur géothermique de surface pour le système de chauffage du centre de loisirs de Fontgombault	COMMUNAUTE COMMUNES BRENNIE VAL DE CREUSE	FONTGOMBAULT
<b>INDRE-ET-LOIRE</b>		
1 Réalisation d'une installation de chauffage par pompe à chaleur sur doublet géothermique pour un gymnase (2100 m²).	MAIRIE ATHEE SUR CHER	ATHEE-SUR-CHER
2 Mise en place d'une pompe à chaleur sur forage géothermique (doublet) et de capteurs solaires pour la production d'eau chaude sanitaire sur un Institut d'Education Motrice de 4900 m² à Ballan Miré (37).	MUTUALITE FRANCAISE INDRE ET LOIRE	BALLAN-MIRE
3 Installation d'une pompe à chaleur eau/eau dans le cadre de la construction de la salle des séminaires de Lohé	COMMUNE DE BREHEMONT	BREHEMONT
4 Installation d'une pompe à chaleur eau/eau réversible pour le centre de loisirs	VILLE DE LA RICHE	RICHE
5 Installation d'une pompe à chaleur géothermique verticale réversible pour la salle culturelle intercommunale située à Rouziers en Touraine	COMMUNAUTE DE COMMUNES BATINE CHOISILLES	ROUZIERES-DE-TOURAINES
6 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau sur doublet pour le chauffage et la climatisation des salles de la Médaille situées 7 avenue de la République à Saint Pierre des Corps	COMMUNE DE SAINT PIERRE DES CORPS	SAINT-PIERRE-DES-CORPS
7 Installation d'un chauffage géothermique dans le cadre de la construction d'une école	COMMUNE DE SAINT-REGLE	SAINT-REGLE
8 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau pour le chauffage de l'école maternelle RT 2005 THPE Err.	COMMUNE DE SEMBLANCAI	SEMBLANCAI

Objet du contrat	Noms des bénéficiaires	Commune
<b>LOIRET</b>		
1 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau avec doublet géothermique dans le cadre de la construction d'un gymnase de 1206 m² à Boigny sur Bonne.	COMMUNE DE BOIGNY SUR BONNE	BOIGNY-SUR-BONNE
2 Installation d'une pac eau/eau et de soins thermique au groupe scolaire P.	VILLE DE CHALETTE SUR LOING	CHALETTE-SUR-LOING
3 Réalisation d'un chauffage par Pompe à Chaleur eau/eau capteur horizontal pour la salle polyvalente de Chambon la forêt (620 m²)	COMMUNE DE CHAMBON LA FORET	CHAMBON-LA-FORET
4 Installation d'une Pompe à Chaleur géothermique de 418 kw.	PLACO	DADONVILLE
5 Installation d'une pac eau/eau	MAIRIE DE DAMPIERE-EN-BURLY	DAMPIERE-EN-BURLY
6 Installation d'une PAC eau/eau réversible pour le restaurant scolaire	MAIRIE DE GUILLY	GUILLY
7 Réalisation d'une géothermie sur sonde verticale pour le groupe scolaire (444 m²)	MEZIERE LEZ CLERY	MEZIERES-LEZ-CLERY
8 Installation d'un système de chauffage par géothermie sur sondes horizontales dans le cadre des travaux de réhabilitation des bâtiments administratifs de la mairie de la commune d'Allant sur Milleron	COMMUNE D'ALLANT SUR MILLERON	ALLANT SUR MILLERON
9 Installation d'un système de production d'eau chaude sanitaire solaire (23 m2 de capteurs solaires) et d'une Pompe à Chaleur eau/eau dans le cadre de la construction d'une Maison d'Accueil Rurale pour Personnes Agées	HABITAT MONTARGIS VAL DE FRANCE	NESPLOY
10 Mise en place de pompes à chaleur eau/eau pour le chauffage du moulin de châtillon à Ondreville sur Essonne (1460 m²)	COMMUNAUTE DE COMMUNES DU CANTON DE PUISEAUX	ONDREVILLE-SUR-ESSONNE
11 Mise en place d'une pompe à chaleur sur nappe phréatique dans le cadre de la construction d'un immeuble de bureaux Bâtiment Basse Consommation (4861 m²) situé en bordure du rond point des Droits de l'Homme à Orléans.	CONSEIL GENERAL DU LOIRET	ORLEANS
12 Mise en place d'une PAC eau/eau sur un bâtiment neuf	CENTRE SCIENCE	ORLEANS
13 Installation d'un système de chauffage / rafraichissement par pompe à chaleur géothermique sur nappe superficielle pour le futur hôpital privé Orléans Nord à Saran (bâtiments THPE de 37 684 m²)	IMMOBILIERE PIERRE ET VICTOIRE II	SARAN
14 Mise en place d'une PAC eau/eau sur bibliothèque Semois (500 m²)	SEMOY	SEMOY
15 Réalisation d'une Pompe à Chaleur eau/eau sur pieux verticaux pour le chauffage de l'école RT 2005 THPE (503 m²).	SIRIS CHAILLY PRESNOY THIMORY	THIMORY
16 Installation d'un système de chauffage par géothermie sur nappe superficielle dans le cadre de la construction du nouveau groupe scolaire et centre culturel	COMMUNE DE ST AIGNAN LE JAILLARD	ST AIGNAN LE JAILLARD
<b>LOIR-ET-CHER</b>		
1 Mise en place d'une pompe à chaleur eau-eau pour la construction de nouveaux bâtiments d'hébergement de personnes handicapées	CENTRE HOSPITALIER DE VENDOMME	AZE
2 Pompe à chaleur géothermique pour des serres horticoles	EARL CLEMENT FRANCOIS	CELLETES
3 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau sur doublet géothermique sur le pôle santé Réglementation Thermique 2005 Très Haute Performance Energétique de la Chaussée St Victor ( 2 bâtiments de 1883 m² chacun) construit par la CCI 41.	CHAMBRE COMMERCE INDUSTRIE LOIR ET CHER	CHAUSSEE-SAINT-VICTOR
4 Pompe à Chaleur géothermique sur serres horticoles	COUPFLOR	CHEVERNY
5 Mise en place d'une pompe à chaleur eau/eau	MAIRIE DE CHITENAY	CHITENAY
6 Installation de deux pompes à chaleur géothermiques sur 30 sondes.	ST MICHEL DEVELOPPEMENT	CONTRES
7 Mise en place d'une pompe à chaleur géothermique de 150 kW th pour le chauffage de 1500 m2 de serres horticoles.	SCEA L'ORCHIDIUM	FRESNES
8 Pompe à chaleur sol/sol et production d'eau chaude sanitaire solaire	HOPITAL LOCAL ST AIGNAN	SAINT-AIGNAN
9 Mise en place d'une pompe à chaleur géothermique de 90 kW sur nappe pour le chauffage de serres de plantes aromatiques et de légumes	EARL LA GITINIERE	SOINGS-EN-SOLOGNE
10 Mise en place d'une pompe à chaleur sur doublet géothermique sur l'école primaire	COMMUNE DE SUEVRES	SUEVRES
11 Mise en place d'une pompe à chaleur sur forage d'eau (2 forages à 50 m) pour un atelier de confection - modéliste artisanal et son logement attenant.	FERLET - POURADIER FRANCIENNE	SOUVIGNY EN SOLOGNES

## Annexe 2. Prix des énergies

### 1. SOURCE AIE ET ADEME

Mme DUPONT-LEROY a transmis les données utilisées par Énergies Demain pour son analyse de la vulnérabilité du territoire régional face à la raréfaction des énergies fossiles. La base source citée est "ADEME et l'Agence Internationale de l'Énergie" (données 2010).

Les hypothèses sur le prix des énergies dans le futur sont issues d'un document commun de l'AIE et de l'ADEME publié en 2010 qui s'intitule « Hypothèses d'évolution des prix de l'énergie ».

En 2010, les prix de l'énergie sont les suivants:

- 5,95 € pour 100 kWh PCI pour le gaz naturel (tarif B1)
- 82 € pour 1 hectolitre de fioul
- 12,12 € pour 100 kWh d'électricité (tarif moyen pour un abonnement « heures creuses », puissance de 12 kVa)
- 116 € pour 1 hectolitre de gazole
- 130 € pour 1 hectolitre de super
- 7 € pour 100 kWh de charbon
- 56,9 € pour 1 stère de bois buche de 50cm

En outre, nous retenons pour le chauffage urbain la valeur cible de 5,89 € pour 100 kWh.

On observe sur ce tableau que la tendance est à la hausse du prix des énergies.

Tableau 1 : Évolution du prix des énergies par rapport à 2010, Source AIE & Ademe 2010

	Pétrole	Fioul	Gaz	Gazole	Super	Electricité	Bois	Charbon
2015	19%	15%	8%	9%	5%	9%	3%	-1%
2020	35%	26%	16%	18%	10%	17%	5%	-2%
2025	49%	37%	22%	25%	14%	26%	7%	-3%
2030	62%	46%	28%	32%	18%	35%	9%	-6%

### 2 DECISION DU COMITE DE PILOTAGE

Deux scénarios ont été élaborés :

- Scénario A (Minimum) : 3% par an pour l'électricité, et 5% par an pour l'énergie fossile,
- Scénario B (Tendanciel Haut long terme) : 5% et 10% par an. pour l'énergie fossile.

### 3. COMBUSTIBLE FOSSILE DE REFERENCE

L'analyse des données énergétiques sur le parc de logement (tableaux ci-dessous) montre que le Gaz de ville représente environ un tiers des logements (pondérés par leur nombre de pièces).

Le prix de l'énergie fossile de référence retenu, lorsque cette dernière n'est pas définie, ou pour les évaluations statistiques, est une moyenne pondérée entre celui du gaz (60%) et celui du fuel (40%).

(en toute rigueur, il faudrait tenir compte des GPL. En pratique, il a été assimilé au Fuel).

<b>Type de logement : Ensemble</b>									
Nbre de pièces par logement	Nombre de pièces chauffée par :						Nbre total de pièces/ taille des logmts	% des pièces par taille de logements	Part du Gaz de ville
	Chauffage urbain	Gaz de ville ou de réseau	Fioul (mazout)	Electricité	Gaz en bouteille ou citerne	Autre			
1	3 424	12 902	1 907	26 809	448	1 468	46 958	1.1%	27.5%
2	13 686	75 580	13 720	95 612	4 252	17 776	220 626	5.0%	34.3%
3	41 772	261 636	90 378	190 503	22 884	70 164	677 340	15.4%	38.6%
4	46 156	427 416	207 864	322 208	46 756	148 144	1 198 544	27.2%	35.7%
5	20 070	350 325	217 920	318 930	46 300	159 405	1 112 950	25.2%	31.5%
6	4 056	339 834	289 194	302 688	52 362	163 608	1 151 742	26.1%	29.5%
<b>Totaux</b>	<b>129 164</b>	<b>1 467 693</b>	<b>820 983</b>	<b>1 256 750</b>	<b>173 002</b>	<b>560 565</b>	<b>4 408 160</b>	<b>100.0%</b>	<b>33.3%</b>
<b>Type de logement : Maisons (représentent 80% du nombre de pièces)</b>									
Nbre de pièces par logement	Nombre de pièces chauffée par :						Nbre total de pièces/ taille des logmts	% des pièces par taille de logements	Part du Gaz de ville
	Chauffage urbain	Gaz de ville ou de réseau	Fioul (mazout)	Electricité	Gaz en bouteille ou citerne	Autre			
1	4	419	260	1 306	77	917	2 982	0.1%	14.1%
2	76	12 454	7 924	25 632	2 926	15 942	64 952	1.8%	19.2%
3	228	101 658	73 251	117 600	19 131	65 094	376 962	10.7%	27.0%
4	524	282 924	188 204	280 764	43 172	143 676	939 260	26.7%	30.1%
5	300	294 625	209 960	303 350	44 865	157 540	1 010 645	28.7%	29.2%
6	192	324 588	286 290	297 300	51 888	162 744	1 122 996	31.9%	28.9%
<b>Totaux</b>	<b>1 324</b>	<b>1 016 668</b>	<b>765 889</b>	<b>1 025 952</b>	<b>162 059</b>	<b>545 913</b>	<b>3 517 797</b>	<b>100.0%</b>	<b>28.9%</b>

## Annexe 3. Analyses d'opérations

### 1. DONNEES SUR UNE TRES GROSSE OPERATION

Etude Micro-réseaux de chaleur BRGM-ALTO mars 2011									
<b>Entretien courant (P2) et gros entretien (P3)</b>									
<u>Chaufferie gaz</u>									
- P2 : 4% du montant d'investissement par an ; 2 à 3 visites annuelles									
- P3 : 9€/kW/an ; changement de brûleur tout les 5 ans									
<u>Pompes à chaleur et groupes frigorifiques</u>									
- P2 : 15% du montant d'investissement correspondant au PAC pour les faibles puissances, 4500€/an pour une puissance comprise entre 100 et 200kW thermiques, 5500€ entre 200 et 400kW thermiques, 7000€/an pour une puissance comprise entre 400 et 600kW thermiques, 10 000€ entre 600 et 800 kW thermiques ; 2 à 4 visites par an									
- P3 : 16€/kW thermique ; pièces et recharge en fluide frigorigène									
<u>Aéro-réfrigérants</u>									
P2 : 4% du montant d'investissement									
P3 : 3,4% du montant d'investissement (provisions pour renouvellement pièces)									
<u>Sous-stations</u>									
P2/P3 : 4% du montant d'investissement par an ; 2 à 3 visites annuelles									
<u>Forages</u>									
P2/P3 : 2200€/forage/an ; 2 visites annuelles et des prestations occasionnelles d'examen endoscopique, de dépose des pompes et des colonnes et éventuellement un détartrage									
<u>Réseau</u>									
- P2 : 5000 € ; contrôles du réseau									
- P3 : 1,8% du montant d'investissement par an ; changement de vannes...									

## 2. ANALYSE D'UN PROJET IMPORTANT EN ZONE DIFFICILE

Le cas étudié est celui de devis reçus de 3 sociétés de forages de taille régionale, en réponse à un appel d'offre établi par ANTEA – donc très complet et conforme aux normes - pour le compte de Spinnove en 2007. L'opération envisagée, en zone karstique, comprenait des sondages de reconnaissance, puis la réalisation du doublet, suivie d'un développement et d'essais très complets.

Nous sommes ainsi, en termes de coûts, dans la situation la plus défavorable

Les réponses obtenues permettent de comparer, dans un cadre strictement identique et très détaillé, les différents coûts unitaires et fixes, pour un projet de taille significative sans être très élevée (besoin d'environ 50 m<sup>3</sup>/h).

Les résultats détaillés semblent extrêmement incohérents :

- a) Le coût fixe de l'aménagement initial (Ligne 23) varie considérablement. Même sans le foreur P<sup>1</sup>, le rapport est **de 1 à 4**.
- b) Les coûts directs au mètre linéaire (Ligne 9) des opérations de forage proprement dit varient du **simple au double**,
- c) Pour la construction de l'ouvrage souterrain une fois les forages réalisés (Ligne 14), on revient vers un écart plus raisonnable (30% autour de la moyenne).
- d) En % du coût de réalisation (Ligne 16), l'écart est encore plus réduit (+ ou – 15% autour de la moyenne).
- e) Pour les développements et les essais, les valeurs sont beaucoup plus proches (15% environ autour de la moyenne)

Par contre, en contradiction avec les incohérences précédentes :

### **Les devis globaux sont relativement proches (Lignes 2 à 4)**

Sur le vu de ces résultats, il paraît exclu de dégager des ratios significatifs.

En fait, en connaissant les entreprises, et avec un ou deux recoupements sur un tarif d'une entreprise plus importante, nous pensons qu'en première approximation, **les ratios et formules suivants peuvent être utilisés POUR UN CAS EXTRÊME :**

- un coût direct de 60 €/ml pour un forage de reconnaissance (diamètre 180),
- un coût direct de 120 à 180 €/ml pour un forage de plus gros diamètre (374),
- un coût fixe pour le développement et les essais de 13 k€,
- un coût de forage + ouvrage souterrain pour le forage de prélèvement de 350 € par mètre linéaire
- un coût fixe pour l'aménagement d'une plate-forme qui pourrait tourner autour de 2 k€<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Sur le Foreur P, venu d'une autre région, il y a une approche globale différente,

<sup>2</sup> Avec un foreur régional

Opération sur zone difficile (Karstique) - Profondeur 80 m - Débit Recherché : 55 m3/h									
N°		Unités	Devis P	Devis V	Devis B	Moyenne	Ecart type	%	
<b>Valeurs globales</b>									
2	Coût global du doublet (2 x 80 ml)	k€	64	58	71	64.3	6.3	9.7%	
3	Coût global au ml du doublet (2 x 80 m)	€/ml	399	364	442	401.7	39.1	9.7%	
4	Coût global au ml de profondeur(1 x 80 m)	€/ml	799	729	885	804.2	78.3	9.7%	
5	Reconnaissance (Aménagements + 3 forages diam 180)	k€	36	17	31	27.9	10.1	36.1%	
6	Réalisation	k€	28	42	39	36.3	7.4	20.3%	
7	Réalisation, rapportée au ml de profondeur	€/ml	349	520	493	453.8	92.0	20.3%	
<b>Forages stricto sensu</b>									
9	Forage MFT diam 180, coût unitaire (240 m)	€/ml	45	57	95	65.7	26.1	39.7%	
10	Forage par alésage MFT diam 273 (150 ml)	€/ml	30						
11	Forage MFT diam 374	€/ml		178	135	156.5			
12	Total des Forages en % du coût global	%	23.9%	26.2%	21.6%	23.9%	2.3%	9.7%	
<b>Construction ouvrage souterrain</b>									
14	Tubages, massif, crépines, tête forage, ....	Montant	k€	9	13	17	13.3	4.0	30.4%
15		/ Profondeur du forage productif (80 ml)	€/ml	116	166	217	166.3	50.5	30.4%
16		en % du coût total de réalisation	%	33.3%	31.8%	44.1%	36.4%	6.7%	18.3%
17		en % du coût global	%	14.6%	22.7%	24.5%	20.6%	5.3%	25.8%
<b>Forage de prélèvement+ construction</b>									
19	Forage+construction	Montant	k€	15	27	28	23.0	7.014	30.5%
20		/ Profondeur du forage productif (80 ml)	€/ml	187	332	344	287.6	87.7	30.5%
21		en % du coût global	%	23.4%	45.6%	38.9%	35.9%	11.4%	31.7%
<b>Coûts fixes</b>									
23	Aménagement plate-forme,	Montant	k€	23	1	5	9.4	11.5	123.2%
24		en % du total des coûts fixes	%	44.9%	3.3%	10.4%	19.6%	22.3%	113.8%
25		en % du coût global	%	35.2%	1.8%	6.4%	14.5%	18.1%	125.3%
26	Développement	Montant	k€	6.04	7.94	5.98	6.7	1.1	16.8%
27		/ Profondeur du forage productif (80 ml)	€/ml	76	99	75	83.2	13.9	16.8%
28		en % du total des coûts fixes	%	12.1%	25.1%	13.8%	17.0%	7.1%	41.6%
29		en % du coût global	%	9.5%	13.6%	8.4%	10.5%	2.7%	26.1%
30	Essais	Montant	€	8.06	7.05	5.95	7.0	1.1	15.0%
31		/ Profondeur du forage productif (80 ml)	€/ml	101	88	74	87.8	13.2	15.0%
32		en % du total des coûts fixes	%	16.1%	22.3%	13.8%	17.4%	4.4%	25.4%
33		en % du coût global	%	12.6%	12.1%	8.4%	11.0%	2.3%	20.8%
<b>Total coûts fixes</b>									
35	Reconnaissance, Développement, Essais	Montant	€	50	32	43	41.6	9.3	22.4%
36		/ Profondeur du forage productif (80 ml)	€/ml	625.75	394.875	539.75	520.1	116.7	22.4%
37		en % du coût global	%	78.3%	54.2%	61.0%	64.5%	12.5%	19.3%



## 4. OPERATIONS SOUTENUES PAR L'ADEME ET LE CONSEIL REGIONAL

Sur une liste d'opérations présentées en CPER pour un soutien ADEME/Conseil régional, les devis résumés dans les fiches de présentation ainsi que des données issues des dossiers de demande, fournissent au minimum :

- Un montant de devis, le plus souvent détaillé entre forage et PAC+ auxiliaires
- La profondeur et le nombre de ml forés
- La surface à chauffer.

L'analyse détecte deux groupes d'opérations sur les coûts de forage :

- les unes avec un cout unitaire de forage compris entre 450 €/ml et 650 €/ml,
- les autres se situant entre 100 et 175 €/ml.

Il est très probable que le premier groupe correspond à des références du type **opérations complètes avec essais lourds**.

Projet			PAC					Forages				Investissements HT				ref gaz ou fuel (k€)	Soutien (k€)	Exploitation		TRI (années)*	
Code postal	Commune	Projet	Surface m2	kW chaud PAC	W/m2	kw élec absorbés PAC	COP	Débit m3/h	Profondeur (ml)	ml totaux	€/ml	Forages (k€)	PAC & aux (k€)	PAC & aux €/kW chaud installés	Total (k€)			PAC (k€/an)	Gaz (k€/an)	avant soutien	après soutien
45600	Guilly	Restaurant scolaire	240	22.3	93	6.1	3.65	6	20	40	161.3	6.45	9.97	447	16.42	7.67	10.176			13.2	5.3
45270	Nesploy	MARPA	1 400	59	42	17.3	3.41	7.9	90	180					37.9	7.8					
45120	Chalette/loing	Groupe scolaire	2 400					20	40	80	175.0	14	28.4		42.4	10	6.3			14.8	7.4
41000	Villebarou	Structure enfance	1 442	121	84		4.4	26	55	110	529.1	58.2	32.5	269	90.7	12	23.6			13	9
41290	Oucques	MARPA	1 261	75	59		2.95	5	42.5	85	642.0	54.57	21.90	292	76.47	12.22	17.4			8	
41120	Chitenay	Groupe scolaire	750	80	107	21	3.5	14.3	75	75	132.0	9.9	19.74	247		19.9	17.5				
37530	St Regle	Ecole	440					6.2	60/70	130	107.4	14.0	37.8			29.9	13.1			6.8	2.7
37130	Bréhémont **	Salles séminaires	567	42	74				20	40	575.0	23	34	810		33	9.6	3.3	4.5	19.4	11.6

\*\* Extraits d'une étude de faisabilité, et non des données réelles

\* Temps de retour du surinvestissement

Sur les coûts des PAC et auxiliaires :

- un groupe de 3 opérations le situent entre 250 € et 300 € / kW chaud installé.
- une opération est à 450 € / kW chaud installé, et l'autre à 810. Dans ce dernier cas, il s'agit certainement de la prise en compte, dans le budget PAC, des équipements de diffusion

## **Annexe 4. Données recueillies**

Les tableaux ci-après fournissent les données brutes rassemblées sur l'ensemble des opérations traitées.

1. Opérations : Liste et m2
2. Chaleur et froid
3. Débits et forages
4. Investissements forage
5. Investissements PAC & Auxiliaires
6. Investissements, exploitation et observations

1. Opérations : Liste et m2

Identification Projet						nature info*	Surface m2
Départ	Commune	Projet	MOA	Année décision	Année install°		
18	Chateaufort sur Cher	PAC eau-eau Maison	M Pichot		2007	Réel	
18	Lapan	renov chbres hôtes	Sarl Fontenille		2010		323
18	Reigny	3 logements	Particuliers	2007			
18	St amand Montrond	Bueaux -atelier relais	Mairie	2007			<b>560</b>
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES DU STA	Mairie	2005			
28	Cloyes sur le Loir	Collège lieux dit Vieilles garenne	Conseil général 28			F	4307
28	Donnemain st Mames	Halte-Garderie MARBOUÉ	CC Plaines et Vallées Dunoises			F	235
28	Donnemain st Mames	Halte-Garderie MARBOUÉ	CC Plaines et Vallées Dunoises		2010	D	272
28	Saint-Rémy sur Avre	PAC eau-eau Centre culturel	Mairie	2006		D	750
28	Saussay	rev groupe scolaire	Mairie	2006			
36	Chareauroux	Lycée devis P	Conseil Régional				
36	Chareauroux	Lycée devis V	Conseil Régional				
36	Chareauroux	Lycée devis B	Conseil Régional				
37	Bossay sur Claise	PAC eau-eau Maison	M Kaltenbach		2005	Réel	
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	Mairie	2007		D	567
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	Mairie	2007		R	491
37	Chambray les Tours	Clinique Montchenin	Cie Générale de Santé			F	5320
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison	M Vincent		2006	Réel	
37	La Riche	Centre de loisirs	Mairie	2006			
37	Ballan mire	Bois Gibert	BE Archambault Aquapac		2008	R	
37	St Regle	Ecole	Mairie	2006			440
37	Tours	Deux Lions - forage, pompage essai	Sté d'équipement de Touraine (AQUAPAC)			D	
37	Varennes	PAC eau-eau Maison	Mme Gauthier		2007	Réel	
37	Villaines les Rochers	groupe scolaire neuf	Mairie	2005			885
41	Cellette	Serres fleurs	Société Coup Flor				
41	Chevemy	Serres fleurs	EARL clément				
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scolaire	Mairie				
41	La Chaussée Saint-Victor	Pôle santé	CCI				
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	CC Beauce et Forêt	2002		D/R	1261
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure enfance	Mairie			F	1442
45	Chalette sur loing	PAC eau eau groupe scolaire	Mairie	2007		D/R	2400
45	DAMPIERRE EN BURL	Eau/Eau Révers salle polyvalente.	Mairie	2006			
45	Dampierre en burly	Salle Polyvalente	Mairie				
45	Guilly	PAC eau-eau restaurant scolaire	Mairie		2007	F	240
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	Hamoval		2009	D	1 400
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	Hamoval				
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	Mairie				500

\* F Faisabilité D Devis R : Réel

2. Chaleur et froid

Identification Projet			Surface m2	Chaleur			Froid			PAC					Mwh Tradi	secours +Pointe chaud kW
Départ	Commune	Projet		nbre jours	heures par jour	nombre heures chaud	nbre jours	h/j froid	Nbre h froid	Mwh	kW thermiques	kWfroid	kw élec absorbés	Mwh fournis		
18	Chateaufort sur Cher	PAC eau-eau Maison														
18	Lapan	renov chbres hôtes	323										12.59			
18	Reigny	3 logements														
18	St armand Montrond	Bueaux -atelier relais	560													
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES STADE								52						
28	Cloyes sur le Loir	Collège lieux dit Vieilles garenne	4307	210	19	3990				194					164	400
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOUé	235							15		4.3	29.7		26.5	
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOUé	272													
28	Saint-Rémy sur Avre	PAC eau-eau Centre culturel	750			187 kWh/m2/an				137.7		31.3		4.39		
28	Saussay	rev groupe scolaire														
36	Chareauroux	Lycée devis P														
36	Chareauroux	Lycée devis V														
36	Chareauroux	Lycée devis B														
37	Bossay sur Claise	PAC eau-eau Maison														
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	567							42						
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	491							40						
37	Chambray les Tours	Clinique Montchenin	5320	210	24	5040	110	12	1320	200	170					8%
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison														
37	La Riche	Centre de loisirs														
37	Ballan mire	Bois Gibert														
37	St Regle	Ecole	440													
37	Tours	Deux Lions - forage,pompage essai		18		4000			1500	70	220	180	198			
37	Varennes	PAC eau-eau Maison														
37	Villaines les Rochers	groupe scolaire neuf	885							78			54		122	
41	Cellette	Serres fleurs														
41	Chevemy	Serres fleurs														
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scolaire														
41	La Chaussée Saint-Victor	Pôle santé														
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	1261							75				2.95		
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure enfance	1442							121				4.4	126	
45	Chalette sur loing	PAC eau eau groupe scolaire	2400													
45	DAMPIERRE EN BURL	Eau/Eau Révers salle polyvalente.														
45	Dampierre en burly	Salle Polyvalente														
45	Gully	PAC eau-eau restaurant scolaire	240							22.3		6.1		3.65		
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	1 400			4500 h				59		17.3		3.41		
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA				104 kW EP/m2										
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	500													

3. Débits et forages

Identification Projet			Surface m2	PAC	Aux	Nappes débits			Forages					€/ml	Invest Forag (k€)	dont		
Départ	Commune	Projet		kW thermiq	kWh	m3/h chaud	m3/ch moyen	m3/h froid	Nbre forages	Profondeur (ml)	ml totaux	Diametre principal	Diametre en tête			Foration	install	dévelop mt &
18	Chateaufort sur Cher	PAC eau-eau Maison						2	29/29	58	126/140 112/125		105.2	6.099				
18	Lapan	renov chbres hôtes	323					1	25									
18	Reigny	3 logements																
18	St amand Montrond	Bueaux -atelier relais	<b>560</b>															
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES DU STADE		52										10.84				
28	Cloyes sur le Loir	Collège lieux dit Vieilles g	4307	194		25	13	1	30					74	30			
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOU	235	15	2.3										14.5			
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOU	272															
28	Saint-Rémy sur Avre	PAC eau-eau Centre cult	750	137.7										existant				
28	Saussay	rev groupe scolaire												7				
36	Chareauroux	Lycée devis P						2	80					27				
36	Chareauroux	Lycée devis V						2	80					41.58				
36	Chareauroux	Lycée devis B						2	80					39.43				
37	Bossay sur Claise	PAC eau-eau Maison						2	40/52	92	126/140 126/140		81.4	7.49				
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de s	567	42				2	20	40			575.0	23				
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de s	491	40				2	20	40	112/125 - 179/200		442.0	17.68				
37	Chambray les Tours	Clinique Montchenin	5320	200		30	27	21	80		374 (50 m)	508 (30m)	300.0	62	44	2	16	
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison						2	46/50	96	126/140 126/140		133.4	12.81				
37	La Riche	Centre de loisirs												36				
37	Ballan mire	Bois Gibert						2	80		219/354 (69.5 m)	72 (sur 11.5 m)	305.0	26.8		1.5		
37	St Regle	Ecole	440			6.2		2	60/70				107.4	14.0				
37	Tours	Deux Lions - forage, pompage essai		220		40		31	50		350 (40 m)		185.0	33		4	11	
37	Varennes	PAC eau-eau Maison						2	38/12	50	126/140 112/125		92.4	4.62				
37	Villaines les Rochers	groupe scolaire neuf	885	78										13.656				
41	Cellette	Serres fleurs																
41	Chevemy	Serres fleurs																
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scc											132.0	9.9				
41	La Chaussée Saint-Victor	Pôle santé																
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	1261	75		5		2		85				54.57				
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure e	1442	121		32 max		2	55	110			529.1	58.2				
45	Chalette sur loing	PAC eau eau groupe scc	2400			20		2	40	80	diam 160		175.0	14				
45	DAMPIERRE EN BURLY	Eau/Eau Révers salle polyvalente.												59.8				
45	Dampierre en burly	Salle Polyvalente												59.8				
45	Guilly	PAC eau-eau restaurant s	240	22.3		6		2	20	40			161.3	6.45				
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	1 400	59		7.9		2	90	180	200mm/150mm							
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA																
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	500															

4. Investissements forage

Identification Projet			Surface m2	Forages				€/ml	Invest Forag (k€)	dont		
Départ	Commune	Projet		Nbre forages	Profondeur (ml)	ml totaux	Diametre principal			Foration	install	dévelopmt & essais
18	Chateaufort sur Cher	PAC eau-eau Maison		2	29/29	58	126/140 112/125	105.2	6.099			
18	Lapan	renov chbres hôtes	323	1	25							
18	Reigny	3 logements										
18	St amand Montrond	Bueaux -atelier relais	560									
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES DU STADE							10.84			
28	Cloyes sur le Loir	Collège lieux dit Vieilles garenne	4307	1	30				74	30		
28	Donnemains	Halte-Garderie MARBOUÉ	235							14.5		
28	Donnemains	Halte-Garderie MARBOUÉ	272									
28	Saint-Rémy sur Avre	PAC eau-eau Centre culturel	750						existant			
28	Saussay	rev groupe scolaire							7			
36	Chareauroux	Lycée devis P		2	80				27			
36	Chareauroux	Lycée devis V		2	80				41.58			
36	Chareauroux	Lycée devis B		2	80				39.43			
37	Bossay sur Claise	PAC eau-eau Maison		2	40/52	92	126/140 126/140	81.4	7.49			
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	567	2	20	40		575.0	23			
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	491	2	20	40	112/125 - 179/200	442.0	17.68			
37	Chambray les Tours	Clinique Montchenin	5320	2	80		374 (50 m)	300.0	62	44	2	16
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison		2	46/50	96	126/140 126/140	133.4	12.81			
37	La Riche	Centre de loisirs							36			
37	Ballan mire	Bois Gibert		2	80		219/354 (69.5 m)	305.0	26.8		1.5	
37	St Regle	Ecole	440	2	60/70			107.4	14.0			
37	Tours	Deux Lions - forage, pompage essai		1	50		350 (40 m)	185.0	33		4	11
37	Varennes	PAC eau-eau Maison		2	38/12	50	126/140 112/125	92.4	4.62			
37	Villaines les Rochers	groupe scolaire neuf	885						13.656			
41	Cellette	Serres fleurs										
41	Chevemy	Serres fleurs										
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scolaire						132.0	9.9			
41	La Chaussée Saint-Victor	Pôle santé										
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	1261	2		85			54.57			
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure enfance	1442	2	55	110		529.1	58.2			
45	Chalette sur loing	PAC eau eau groupe scolaire	2400	2	40	80		175.0	14			
45	DAMPIERRE EN BURLY	Eau/Eau Révers salle polyvalente.							59.8			
45	Dampierre en burly	Salle Polyvalente							59.8			
45	Gully	PAC eau-eau restaurant scolaire	240	2	20	40		161.3	6.45			
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	1 400	2	90	180	200mm/150mm					
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA										
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	500									

5. Investissements Pac & Aux

Identification Projet			Surface m2	PAC			Mwh Tradi	secours +Pointe chaud kW	Aux kWh	Invest Forag (k€)	Invest PAC & aux (k€)	dont PAC nue installée	Invest Tot (k€)	ref gaz ou fuel (k€)	Assiette du soutien (k€)	soutien (k€)
Départ	Commune	Projet		kW thermique	kw élec absorbés	Mwh fournis										
18	Chateaufort sur Cher	PAC eau-eau Maison							6.099							
18	Lapan	renov chbres hôtes	323			12.59							26.9	7.99	18.9	
18	Reigny	3 logements														
18	St amand Montrond	Bueaux-atelier relais	560										40.2	20		8.1
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES DU STADE		52					10.84	19						26.1
28	Cloyes sur le Loir	Collège lieux dit Vieilles garenne	4307	194			164	400	74	64			138			
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOUé	235	15	4.3	29.7	26.5		2.3				12.5			
28	Donnemin st Mames	Halte-Garderie MARBOUé	272										28.7		9.7hT	40%
28	Saint-Rémy sur Avre	PAC eau-eau Centre culturel	750	137.7	31.3				existant	40.3				23		5.37
28	Saussay	rev groupe scolaire							7	99				74		
36	Chareauroux	Lycée devis P							27							
36	Chareauroux	Lycée devis V							41.58							
36	Chareauroux	Lycée devis B							39.43							
37	Bossay sur Claise	PAC eau-eau Maison							7.49							
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	567	42					23	34				33		9.6
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de séminaires	491	40					17.68	14.8						
37	Chambray les Tours	Clinique Montchenin	5320	200					62	36						
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison							12.81							
37	La Riche	Centre de loisirs							36	108				125		
37	Ballan mire	Bois Gibert							26.8							
37	St Regle	Ecole	440						14.0	37.8				29.9		13.1
37	Tours	Deux Lions - forage, pompage essai		220		198			33							
37	Varennes	PAC eau-eau Maison							4.62							
37	Villaines les Rochers	groupe scolaire neuf	885	78		54	122		13.656	21.395						17.5
41	Cellette	Serres fleurs														
41	Chevermy	Serres fleurs														
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scolaire							9.9	44.9				19.9		
41	La Chaussée Saint-Vic	Pôle santé														
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	1261	75					54.57	21.90			76.47	12.225		17.4
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure enfance	1442	121			126		58.2	32.5			90.7	12		23.6
45	Chalette sur loing	PAC eau eau groupe scolaire	2400						14	28.4				10		6.3
45	Dampierre en burly	Eau/Eau Révers salle polyvalente.							59.8	110.5				61.026		76.48
45	Dampierre en burly	Salle Polyvalente							59.8	110.5				61.26		76.5
45	Guilly	PAC eau-eau restaurant scolaire	240	22.3	6.1				6.45	9.97				7.67		10.176
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	1 400	59	17.3								37.9	7.8		
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA														
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	500										36.715	7		11.88

6. Investissements, exploitation & Observations

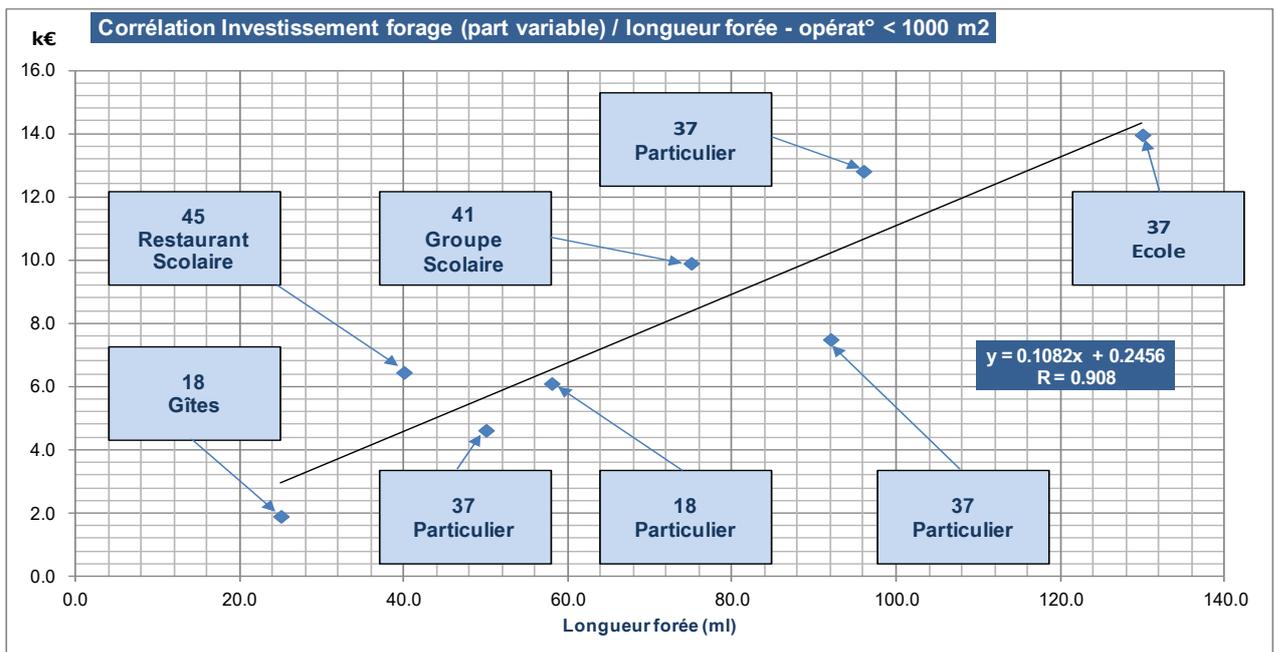
Identification Projet			Surface m2	PAC		Mwh Tradi	Invest Forag (k€)	Invest PAC & aux (k€)	Invest Tot (k€)	ref gaz ou fuel (k€)	Assiette du soutien (k€)	Exploitation		TRI		Observations	
Départ	Commune	Projet		kW therm	kw élec absorbé							PAC (k€/an)	Gaz (k€/an)	avant soutien	après soutien		
18	Chateaufort	PAC eau-eau Maison					6.099										
18	Lapan	renov chbres hôtes	323					26.9	7.99	18.9							conso future 6105 l ful (4580 €/ PAC : 1385 €/an
18	Reigny	3 logements															
18	St amand Montr	Bueaux-atelier relais	560					40.2	20		8.1			13.8	8.3		67 kWh EP/m <sup>2</sup> ECO : 21 Mwh
18	Vierzon	PAC eau-eau VESTIAIRES DU ST		52			10.84	19			26.1						ECS incluse
28	Cloyes sur le L	Collège lieux dit Vieilles ga	4307	194		164	74	64	138								
28	Donnemin st Ma	Halte-Garderie MARBOUÉ	235	15	4.3	26.5											gain 586 €/an
28	Donnemin st Ma	Halte-Garderie MARBOUÉ	272					28.7						19.8	11.9		
28	Saint-Rémy sur	PAC eau-eau Centre cultur	750	137.7	31.3		existant	40.3	23		5.37			9	<4		
28	Saussay	rev groupe scolaire					7	99		74				9	9.6		6.955 à 3.425 cout exploit TTC
36	Chareauroux	Lycée devis P					27										
36	Chareauroux	Lycée devis V					41.58										
36	Chareauroux	Lycée devis B					39.43										
37	Bossay sur Cla	PAC eau-eau Maison					7.49										
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de sér	567	42			23	34		33		9.6	3.3	4.5	19.4	11.6	4.5 3.3 cout exploit HT
37	Bréhémont	PAC eau-eau salles de sér	491	40			17.68	14.8									
37	Chambray les T	Clinique Montchenin	5320	200			62	36									
37	La Guerche	PAC eau-eau Maison					12.81										
37	La Riche	Centre de loisirs					36	108		125				27	11		6.79 à 6.09 cout exploit TTC
37	Ballan mire	Bois Gibert					26.8										
37	St Regle	Ecole	440				14.0	37.8		29.9		13.1		6.8	2.7		
37	Tours	Deux Lions - forage,pompage essai		220			33										
37	Varennes	PAC eau-eau Maison					4.62										
37	Villaines les Ro	groupe scolaire neuf	885	78		122	13.656	21.395			17.5						
41	Cellette	Serres fleurs															
41	Cheverny	Serres fleurs															
41	Chitenay	PAC eau eau groupe scola	750	80	19	100	9.9	44.9		19.9		17.5					maintenance annuelle 1500
41	La Chaussée S	Pôle santé															
41	Oucques	PAC eau-eau MARPA	1261	75			54.57	21.90	76.47	12.225		17.4	Maint 2	8*			*contre électricité DJU 2802 COP 3
41	Villebarou	PAC eau-eau Structure enf	1442	121		126	58.2	32.5	90.7	12		23.6		13	9		20 m crépines, rotary à l'eau t° 14° TEP évitées 20
45	Chalette sur loir	PAC eau eau groupe scola	2400				14	28.4		10		6.3		14.8	7.4		
45	Dampierre en bu	Eau/Eau Révers salle polyvalente.					59.8	110.5		61.026		76.48		19	13.3		Etudes S/ 18.2 29.11 à 22.4 cout exploit TTC
45	Dampierre en bu	Salle Polyvalente					59.8	110.5		61.26		76.5		19	7.6		Faisa 18.2 29.1 à 22.4 ttc
45	Guilly	PAC eau-eau restaurant sc	240	22.3	6.1		6.45	9.97		7.67		10.176		13.2	5.3		aux : 8.2 3.31 2.026 ht
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA	1 400	59	17.3				37.9	7.8							Rotary nappe : calcaire d'étam 2.32 TTC 22 personnes
45	Nesploy	PAC eau-eau MARPA															
45	Semoy	PAC eau-eau Bibliothèque	500					36.715	7		11.88			25	15		économie : 60000 kwh

## Annexe 5. Fonctions de coûts

Les fonctions de coûts ont été établies en référence aux opérations pour lesquelles des données, même très partielles, concernait chaque fonction, en tenant compte du critère « taille ».

### 1. FORAGE : COUTS VARIABLES ET COUTS FIXES

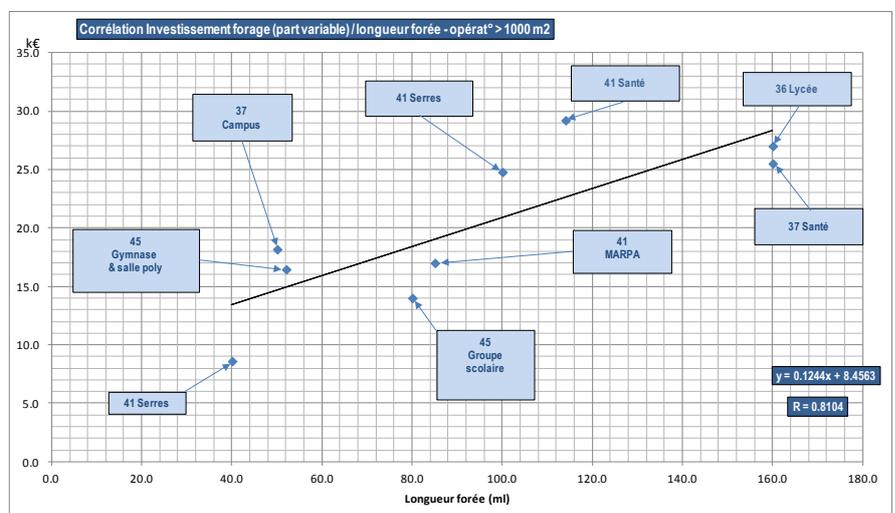
#### COUTS VARIABLES



On constate une corrélation relativement bonne avec la longueur forée. Mais la fonction est différente entre les petites et moyennes opérations (jusqu'à 1000 m2) et les plus grandes. La corrélation est bonne pour les 8 opérations de moins de 1000 m2 prises en compte.

Elle est moins bonne pour les plus grandes, mais reste utilisable.

Pour les opérations concernant des surfaces de 100 à 250 m2, l'analyse des quelques données disponibles nous conduit à retenir un coût variable de 80 €/ml.

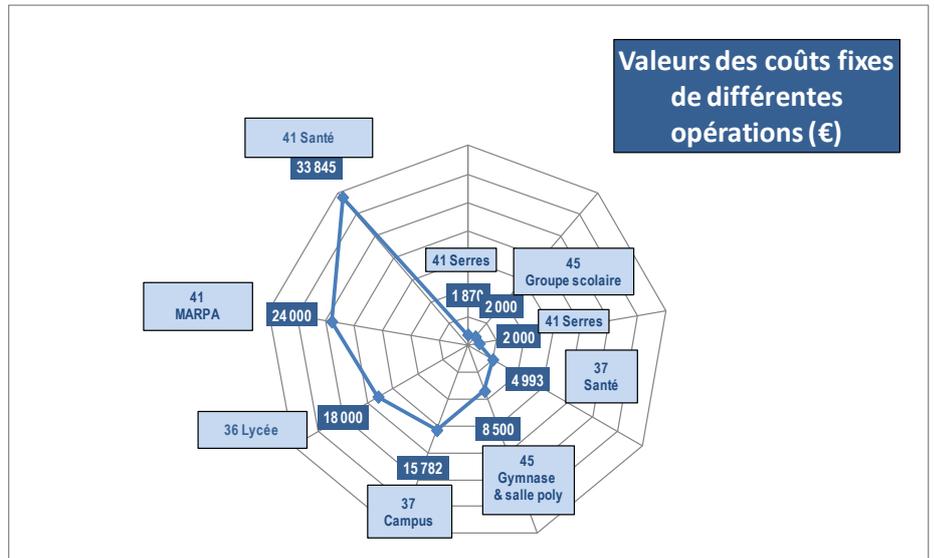


## COÛTS FIXES

Les « coûts fixes », c'est-à-dire indépendants de la profondeur et du débit, ont des valeurs extrêmement dispersées, et ne sont corrélées ni à la surface, ni aux besoins couverts, ni aux dépenses de forage.

Une part nous semble s'expliquer<sup>3</sup> par le statut des opérations :

- Opérations ayant une « envergure » importante, qu'il s'agisse de la présence d'un grand opérateur, ou d'un dossier fonds chaleur, ou d'un dossier Aquapac : les études préliminaires sont lourdes, et les essais très complets
- Opérations moins significatives, mais nécessitant des essais et des documents soignés,
- Opérations vers les particuliers, qui n'isolent pas les essais ni les documents, qui sont généralement réduits.



Nous prenons donc le parti de **construire plusieurs valeurs fixes** à partir des données recueillies, toutes correspondant aux normes, et supposant le recours à des opérateurs locaux pour les opérations de moins de 10 000 m<sup>2</sup> (cf page suivante)

Le tableau suivant simplifie les résultats pour les rendre lisibles (sans impact sur la modélisation) :

Taille des Bâtiments	Coûts variables	Coûts fixes
100 à 250 m <sup>2</sup>	80 €/ml	6 000 €
250 à 500 m <sup>2</sup>	100 €/ml	10 000 €
500 à 1000 m <sup>2</sup>	120 €/ml	15 000 €
1000 à 10 000 m <sup>2</sup>	160 €/ml	25 000 €
> 10 000 m <sup>2</sup>	200 €/ml	50 000 €

<sup>3</sup> Mais ne peut être validée statistiquement

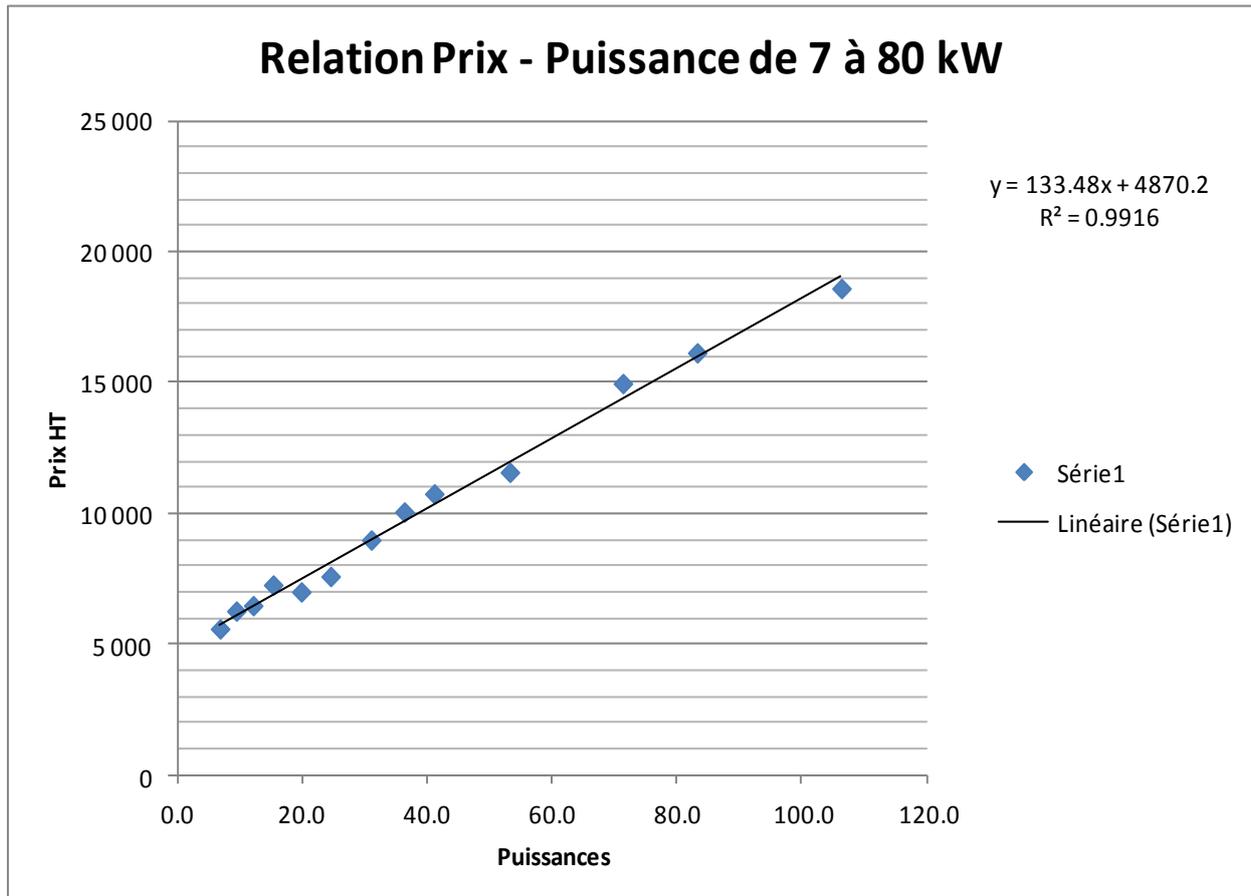


## 2. COÛTS DES POMPES A CHALEUR

### 2.1. PRIX CATALOGUES

Dans la gamme 7 à 80 kW, les prix catalogues croissent linéairement avec la puissance, avec une excellente corrélation (ex : gammes CIAT Auréa2<sup>4</sup> et Dynaciat<sup>5</sup>)

b) Dans les gammes supérieures, il est difficiles de trouver des prix catalogues, car les installateurs, sur de plus grands bâtiments, font définir par les BE des fabricants des solutions en demi-mesure.



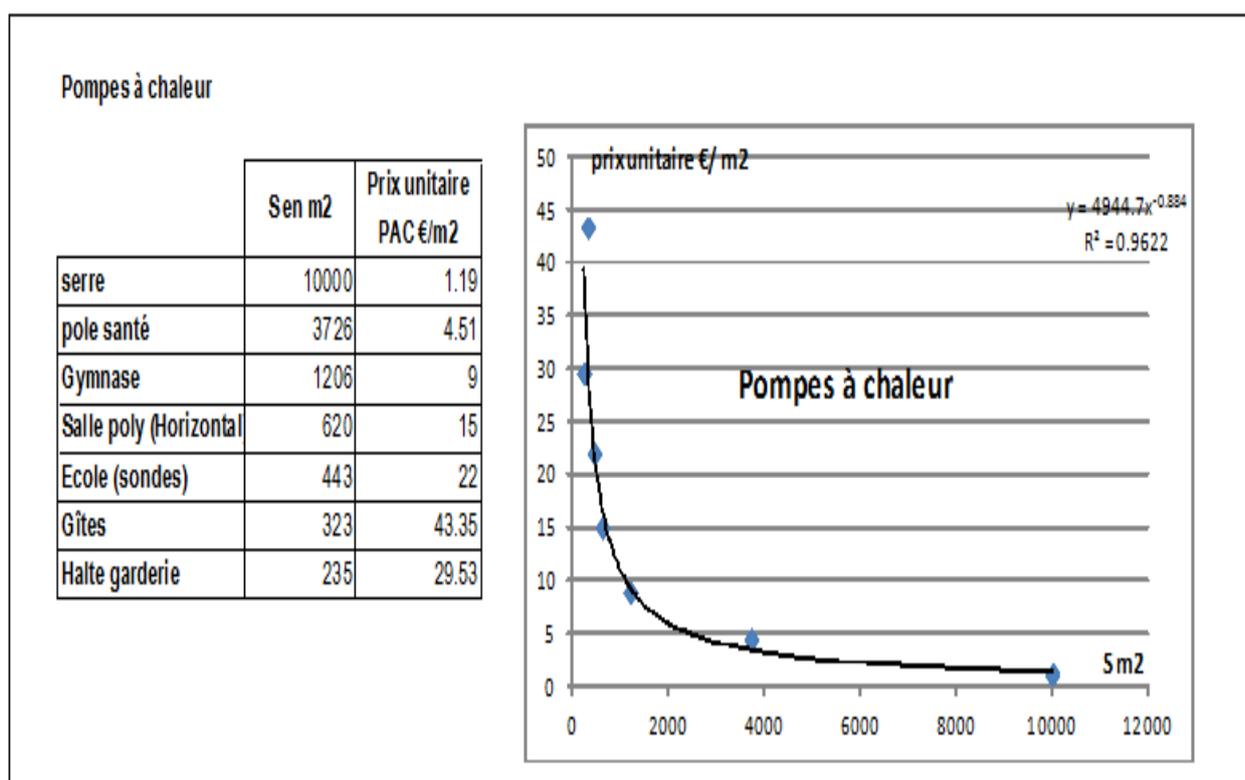
<sup>4</sup> Pompe à chaleur réversible sur eau de nappe ou capteurs enterrés pour le chauffage et le rafraîchissement en habitat individuel ou petit tertiaire. Pour raccord sur tout émetteur de chaleur douce comme radiateur basse température, ventilo-convecteur, plancher chauffant. Possibilité d'installer un ballon d'ECS et de chauffer une piscine en option. Disponible en douze modèles avec puissances de 6 à 36 kW en calorifique et de 5 à 27 kW en frigorifique. Très haute efficacité énergétique avec COP supérieur à 5. Régulation avec terminal de commande déporté à 2 fils (Microconnect). [Source Batiproduit]

<sup>5</sup> PAC eau/eau réversible pour chauffage et/ou refroidissement de bâtiments tertiaires, hospitaliers ou industriels. Déclinée en onze puissances jusqu'à 720 kW (froid) ou 800 kW (chaud) et en trois versions acoustiques (standard, Low Noise, Xtra Low Noise). Largeur de moins d'un mètre pour gain de place. Équipée de quatre ou six compresseurs Scroll hermétiques montés en parallèle sur deux circuits et d'un échangeur à plaques brasées intégré assurant un transfert thermique optimisé par fluide R410A. Plage de température de sortie d'eau de -12 à +55 °C. Régulation à distance par démarrage cadencé des compresseurs anticipant les variations de charges et permettant la gestion de deux machines en parallèle (Connect2). [Source Batiproduit]

## 2.2. PRIX PAC INSTALLEES

Malgré la difficulté de l'exercice, nous avons extrait, sur une série d'opérations significatives, les coûts des PAC installées (hors prix des auxiliaires donc).

La courbe est la suivante :

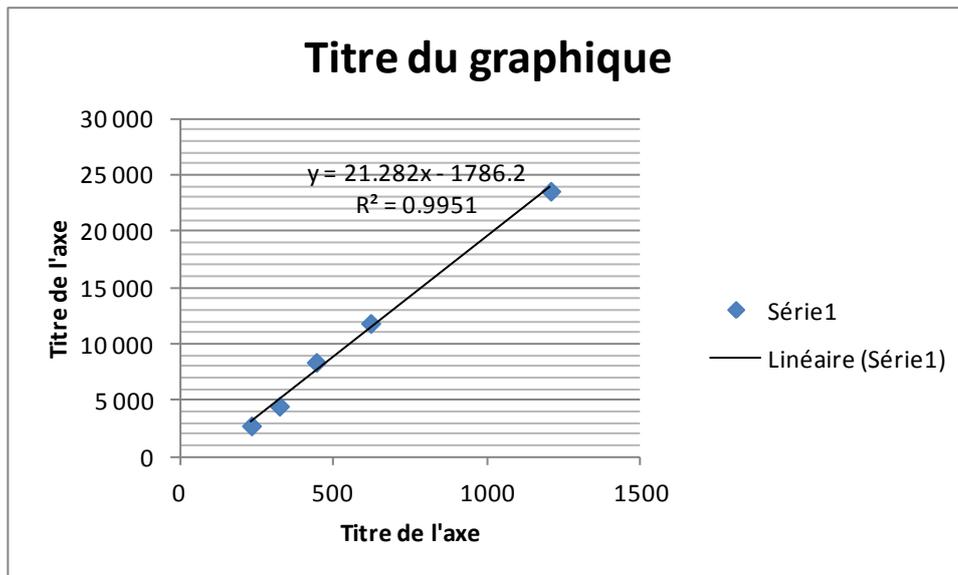


### 3. AUXILIAIRES

Ce poste recouvre, selon les dossiers, des lignes extrêmement variées, aussi bien en contenu qu'en dénomination.

Une analyse fouillée sur 5 dossiers pour lesquels suffisamment de données étaient disponibles et compréhensibles a abouti à une fonction de coût qui semble bien représenter la réalité :

Il ne s'agit pas d'opérations pour les particuliers. (pour ces dernières, les auxiliaires sont inclus dans le prix de la PAC installée)



### 4. POMPE IMMERGEE

Pour les opérations (hors particuliers), sur lesquelles le détail a pu être obtenu (6 opérations), le coût de la pompe immergée installée est bien corrélé avec le coût de l'ensemble PAC & Auxiliaires, et la fonction ainsi obtenue est de 11.1 % de ce coût.

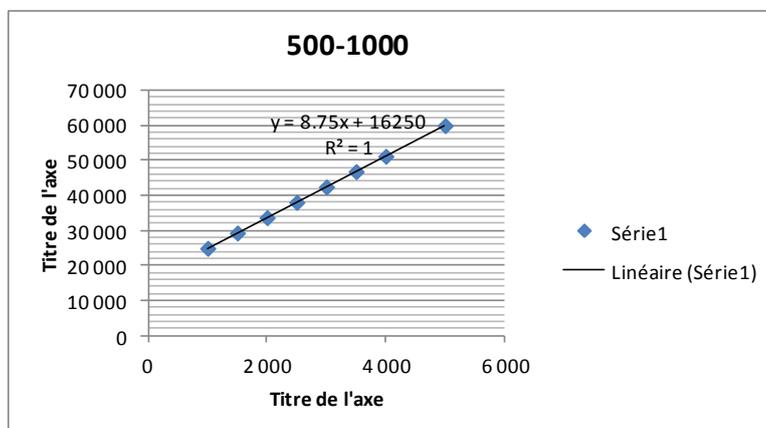
Pour les petites installations, jusqu'à 200/300 m<sup>2</sup> à chauffer, la fonction utilisée provient d'une analyse des catalogues de pompes, et des coefficients d'installation :

$$I = 5.5 \times S + 557 \text{ €}$$

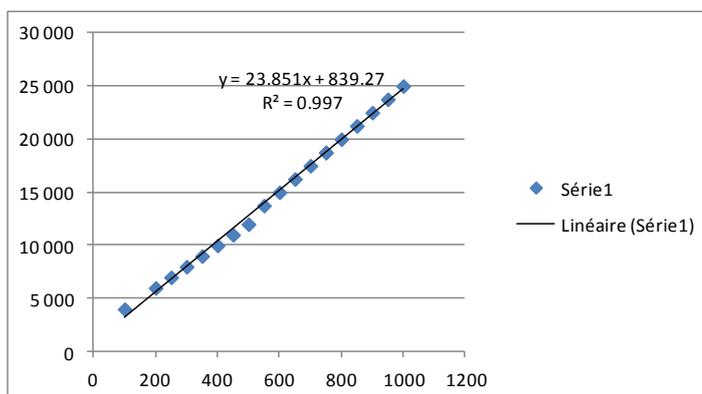
## 5. SOLUTION DE RÉFÉRENCE

Les prix des chaudières installées sont une fonction linéaire des surfaces chauffées. Plusieurs fonctions ont été mises en évidence, selon les plages de surfaces considérées :

### 1. GRANDES SURFACES



### 2. SURFACES MOYENNES



### 3. PETITES SURFACES

La fonction linéaire retenue est la suivante :

$$I = 20 \times \text{Surface} + 2000 \text{ €}$$

## Annexe 6 : Synthèse Enquête BESSOL

Nombre de BE Sous-sol interrogés : 5

Nombre total de salariés pour les 5 BE sous-sol (Région Centre) : 18

Répartition des missions en GTBE : **La totalité des BE sous-sol interrogés réalisent aussi bien des études de faisabilité que d'ingénierie.**

Il s'agit uniquement de clients Petit collectif et tertiaire.

Le taux d'échec des devis d'études émis est très élevé (1/2)

Les réalisations par contre suivent bien : 9/10

TABLEAU 1		GEOQUAL 2010 : ENQUETE auprès des BE sous-sol																		ANNEXE	
		BE ss "A"			BE ss "B"			BE ss "C"			BE ss "D"			BE ss "E"			TOTAL			Général	
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008 à 2010	
E T U D E S	Devis d'étude émis	6	8	15	13	10	20	5	5	10	2	2	10	8	4	3	34	29	58	121	
	Etudes commandées	4	5	10	4	0	2	4	2	5	2	2	6	8	4	3	22	13	26	61	
R E A L I S A T I O N S	Total	3	4	8	4	0	2	4	1	3	2	2	6	8	4	3	21	11	22	54	
	Sondes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Nappe	3	4	8	4	0	2	4	1	3	2	2	6	8	4	3	21	11	22	54	
	Chauffage seul	3	4	8	1	0	1	4	1	2	2	1	2	2	1	1	12	7	14	33	
	Chauffage- Rafraîchissement	0	0	0	3	0	1	0	0	1	0	1	4	6	3	2	9	4	8	21	
	Particulier	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	
	Petit Collectif ou Tertiaire	3	4	8	3	0	1	4	1	3	2	2	6	8	4	3	20	11	21	52	
	BE Thermique	2	3	5	3	0	1	2	0	3	0	0	2	8	4	3	15	7	14	36	
	Architecte seul	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4	

<b>1.1. Cause des échecs des devis :</b>
<b>La plus fréquente :</b>
- 4 BE invoquent un <b>prix trop élevé</b> (en raison, notamment, du poids de la modélisation)
<b>En seconde position :</b>
- 2 BE invoquent une <b>forte concurrence des autres</b> EnR (tout particulièrement de la filière bois)
- <b>Report de décision</b>
<b>1.2. Raisons pour lesquelles les études n'ont pas abouti a une réalisation :</b>
<b>La plus fréquente varie selon le BE interviewé :</b>
- <b>forte concurrence des autres énergies</b> (bois,...)
- <b>contexte hydrogéologique et réglementaire défavorable</b>
- <b>report de décision (du Maître d'ouvrage,...)</b>
- <b>prix de réalisation trop élevé</b>
<b>En seconde position :</b>
- principalement : <b>abandon du projet</b> (coût trop élevé,...)
- <b>productivité de l'aquifère insuffisante</b>
- <b>forte concurrence des autres EnR</b> (bois,...)
<b>1.3. Communication sur les actions :</b>
- 4 BE sous-sol sur 5 BE ont communiqué sur leurs actions ; les modes de communication sont très variables : publications (UFG <sup>[1]</sup> , AICVF <sup>[2]</sup> ,...); site internet de la Société ; oralement ; au niveau national
<b>1.4. Observations complémentaires apportées par les BE sous-sol :</b>
- Sur le site internet « géothermie-perspectives », certains adhérents à la marque GEOQUAL n'apparaissent pas
- Certaines entreprises de forage ne respectent pas les engagements de la marque

## **Annexe 3**

### **Synthèse de l'étude sur les micro-réseaux de chaleur (rapport BRGM/RP-59967-FR)**



Cette annexe reprend les éléments du rapport BRGM/RP-59967-FR : 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.

#### • **Avantages de micro réseaux de chaleur**

En plus des avantages sur les réseaux de chaleur, il y a des intérêts spécifiques à mutualiser la solution de géothermie :

***D'un point de vue technique***, la mutualisation permet :

- de faciliter la gestion de systèmes complexes, comme des systèmes avec stockages de chaleur ou multi-énergies.
- d'optimiser le dimensionnement du système en prenant en compte les besoins de chaud et de froid de différents bâtiments.

***D'un point de vue environnemental***, la mutualisation du système de production facilite la gestion des impacts et des conflits d'usages : si *a priori* la question des impacts est un sujet et un enjeu en soi (études en cours au BRGM), la mutualisation du système géothermique permet de limiter l'impact (sans préjugé positif ou négatif) de l'opération de forage sur le sous-sol, puisque l'on réduit le nombre de puits et que l'on se donne la possibilité de mobiliser des compétences d'ingénierie supérieures.

***D'un point de vue économique***, la mutualisation va influencer le montage du projet : la maîtrise d'ouvrage et donc les types d'aides associées peuvent être différents. La création d'un réseau de chaleur par exemple doit être prise en charge par la collectivité.

Les solutions mutualisées doivent ensuite être comparées d'un point de vue :

- technique (faisabilité) ;
- économique (en coût global, de préférence, même si cela peut entraîner des difficultés pour prendre en compte les évolutions (coût de l'énergie, taux d'actualisation...) ;
- énergétique et climatique (impact en termes de GES, énergie primaire...) ;
- juridique (montage du projet, structure juridique) ;
- gestion de la ressource (modélisation des impacts et vision du développement).

La taille de l'îlot à adopter dépend de différents paramètres qui sont à étudier au cas par cas :

- la ressource géothermale disponible (débit et profondeur, définissant le coût d'accès à la ressource) (à nuancer pour les solutions sur champs de sondes verticales, dont le nombre peut s'adapter) ;
- l'aménagement en surface (espaces disponibles, répartition des besoins de chaud et de froid, phasage des constructions...).

Il existe en suite différentes solutions pour mutualiser la solution de géothermie : boucle d'eau froide ou boucle d'eau chaude, solutions sur aquifères superficiels ou sur champs de sondes.

### • Synthèse de l'étude réalisée par ALTO Ingénierie - Méthodologie

Cette étude visait à donner, en fonction des contextes locaux, des indications sur la pertinence de solutions de type micro-réseau utilisant la géothermie.

Dans ce but ont été comparées, d'une part, pour un éco-quartier typique (50 000 m<sup>2</sup> SHON, regroupant des logements, bureaux et commerces) et, d'autre part, pour une zone de logements rénovés (10 000 m<sup>2</sup> SHON), trois solutions :

- une solution de référence : production par bâtiment utilisant des énergies fossiles (chaudières gaz et groupes froids) ;
- une solution où chaque bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur fonctionnant sur un micro-réseau d'eau de nappe et d'un appoint électrique pour l'eau chaude sanitaire (ECS) ;
- une solution où les bâtiments sont raccordés à des réseaux de chaleur et de froid alimentés par une pompe à chaleur centralisée et, en appoint, une chaudière gaz et des groupes froids ; un appoint électrique au niveau des bâtiments fournit un complément pour l'ECS.

Le niveau de performance considéré est le niveau BBC pour l'éco-quartier et BBC Rénovation pour les logements rénovés. L'analyse du profil global des besoins en chaud et en froid de l'éco-quartier montre la présence de besoins simultanés en été (climatisation et ECS). La pompe à chaleur permet la production simultanée de chaleur et de froid à l'échelle d'un bâtiment (par exemple production d'ECS et refroidissement des commerces).

Dans la deuxième solution, les bâtiments restent relativement indépendants, la présence du réseau d'eau ne sert qu'à diminuer le coût d'accès à la ressource.

Dans la solution 3, les bâtiments sont raccordés à des micro-réseaux de chaleur/froid alimentés par une pompe à chaleur centralisée puisant ses calories/frigoriques sur une nappe superficielle. Cette pompe à chaleur permet la production de chaleur et de froid simultanée à l'échelle de la zone.

Notons que la présence d'un réseau de froid sur toute la zone a été considéré afin d'étudier l'intérêt d'exploiter la simultanéité des besoins de chaleur et de froid sur le plan énergétique. Néanmoins nous avons vu que la densité des besoins de froid était très faible sur l'exemple pris, de telle sorte que dans la réalité la mise en place d'un réseau de froid ne se justifierait que pour les bâtiments proches et ayant des besoins de froid importants (bureaux dans notre exemple), les bâtiments de besoins faibles ne se connecteraient que s'ils sont sur le passage du réseau.

Le dimensionnement des solutions permet de déterminer la juste part d'appoint à mettre en œuvre, et ainsi le nombre de forages nécessaires, qui se déduit du débit

nécessaire et du débit disponible, Il a été nécessaire de faire une hypothèse sur le débit (50 m<sup>3</sup>/h), des analyses de sensibilité ont ensuite été menées.

### • Résultats

***Du point de vue environnemental***, l'exploitation de la géothermie sur nappe permet de réduire très fortement les émissions de CO<sub>2</sub>. La solution PAC par bâtiment sur réseau d'eau (solution 2) est plus intéressante que la solution PAC centralisée avec réseau de chaleur et de froid (solution 3), qui fait appel aux énergies fossiles en appoint.

***Du point de vue énergétique***, en énergie primaire les gains sont moindres ; les bilans sont très proches de la référence, parfois légèrement supérieurs. Seule la solution PAC par bâtiment sur réseau d'eau pour l'éco-quartier permet des gains significatifs (environ 15 % par rapport à la référence). Ces conclusions sont peu sensibles au contexte du projet : la variation de la profondeur de la nappe et la densité énergétique modifient les consommations des auxiliaires mais ont un impact globalement limité sur le bilan énergétique. Pour l'éco-quartier, la solution 2 est d'autant plus intéressante que la proportion de bureaux est élevée, alors que la solution 3 l'est d'autant moins.

***Du point de vue économique***, en coût global sur 25 ans, les solutions géothermie, hors aides, sont plus intéressantes (gain de 10 % environ), pour l'éco quartier.

Pour les *logements rénovés* le coût d'exploitation à l'année 1 est beaucoup plus faible dans la solution de référence, même si l'on tient compte d'aides, mais sur 25 ans l'écart se réduit fortement et, avec aides, le surcoût des solutions géothermie devient acceptable : environ 15 % dans la solution 2, 5 % dans la solution 3.

Ces conclusions sont peu sensibles à l'*évolution du coût des énergies* (dans des limites raisonnables) pour l'éco-quartier. Dans le cas des logements rénovés, l'écart entre le taux d'évolution du coût de l'électricité et celui du gaz est par contre déterminant. ALTO Ingénierie l'a pris égal à l'écart sur les dernières années en base (4 %), et il semble plus probable que l'écart ne se creuse plutôt qu'il ne se réduise, donc que les conclusions évoluent dans un sens favorable.

La *densité énergétique* en chaud modifie peu les conclusions pour l'éco-quartier. Ce n'est que dans des zones très peu denses (densité de besoins de chaud inférieure à 1 MWh/ml) que la solution de référence est la plus intéressante économiquement. Par contre si les besoins de froid du quartier sont essentiellement concentrés dans une zone relativement dense, il peut être plus intéressant d'utiliser la solution 3 (PAC centralisée) que la solution 2 (PAC décentralisées). Les densités considérées en base correspondent à des milieux urbains.

Les *caractéristiques de la ressource hydrogéologique*, plus précisément le coût des forages au regard des besoins thermiques à satisfaire en surface, modifient fortement les résultats de l'analyse économique et sont donc à évaluer avec attention pour chaque projet.

La *proportion de bureaux dans l'éco-quartier* modifie également fortement l'intérêt économique des solutions : les solutions géothermiques (du moins la solution 2) sont toujours préférables à la référence mais pour une proportion faible (inférieure à 30 % environ), la solution 3 est la plus intéressante, tandis qu'au-delà, la solution 2 l'emporte.

Si le projet considéré diffère fortement du cas de base sur plusieurs paramètres, une analyse plus fine peut être nécessaire pour conclure.

#### • **Bilan et discussion**

Cette analyse s'est basée sur un exemple précis, les résultats doivent donc être analysés avec précautions. Les études de sensibilité montrent cependant l'impact de la densité énergétique et de la proportion de bureaux dans l'écoquartier, ce qui souligne l'importance du lien entre choix énergétiques et urbanistiques.

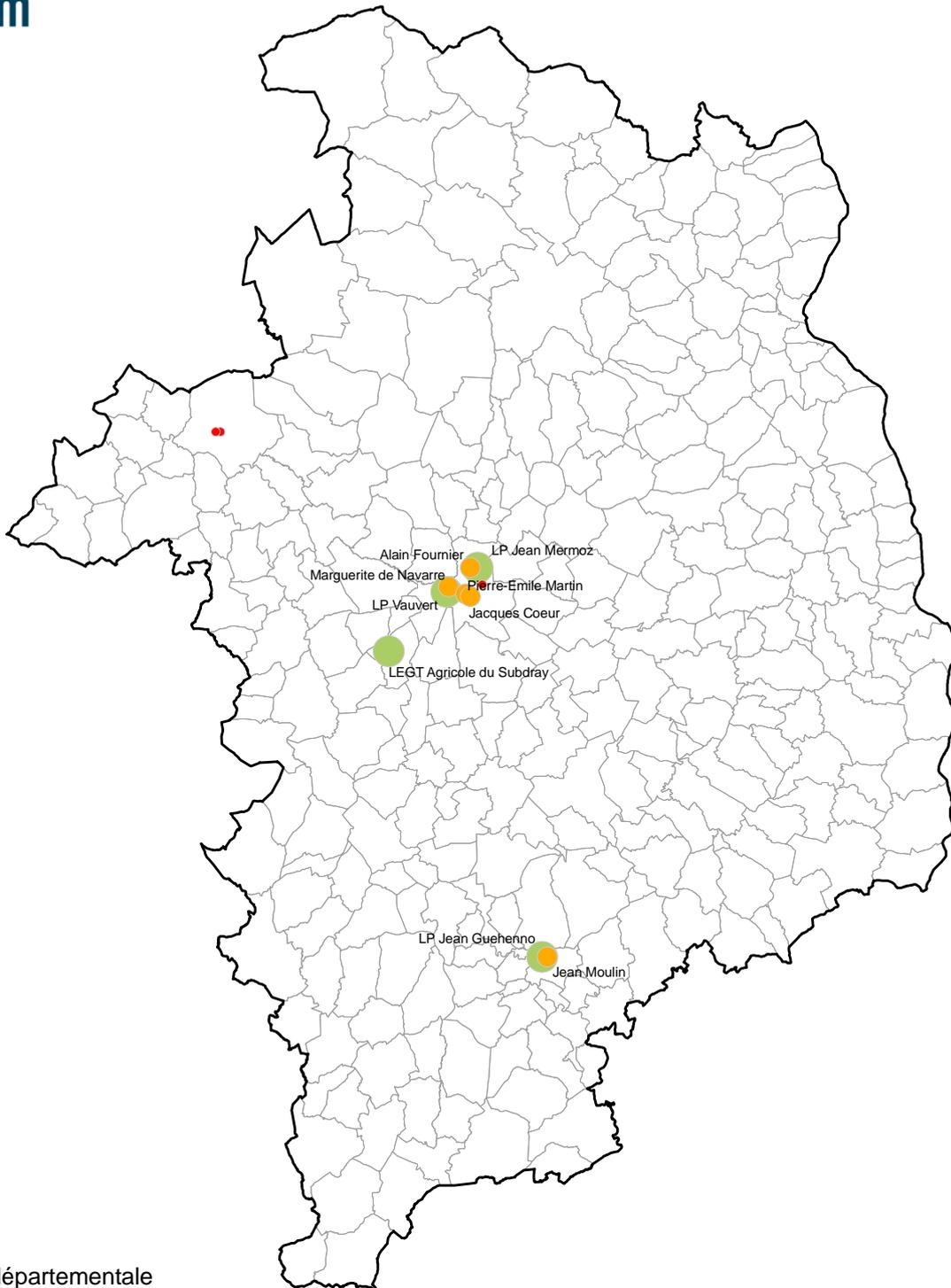
Il est cependant difficile de tirer des conclusions génériques sur les typologies de projet d'aménagement les plus favorables à une solution de géothermie sur micro-réseau de chaleur car cela va dépendre également des ressources géothermales disponibles. Citons notamment l'optimisation possible en faisant appel à des mutualisations à l'échelle d'un îlot de taille adaptée : celui-ci doit être déterminé en recherchant une répartition favorable pour les besoins de chaud et de froid, mais également en tenant compte de la ressource disponible (un îlot serait alors alimenté par un unique doublet). Ceci est particulièrement vrai pour l'utilisation de solutions sur aquifères. Dans le cas de solutions sur sondes, à priori, le nombre de sondes s'adaptera au projet. La question de la mutualisation se voit différemment pour les sondes (qui se multiplient en fonction du besoin du réseau) alors que pour les aquifères, on a intérêt à exploiter au mieux le débit disponible (adaptation de la taille du réseau).

## **Annexe 4**

### **Réflexions sur les lycées**



# Potentiel géothermique des lycées du Cher (18)



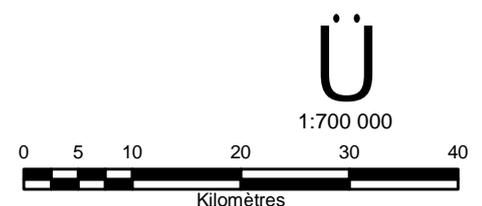
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

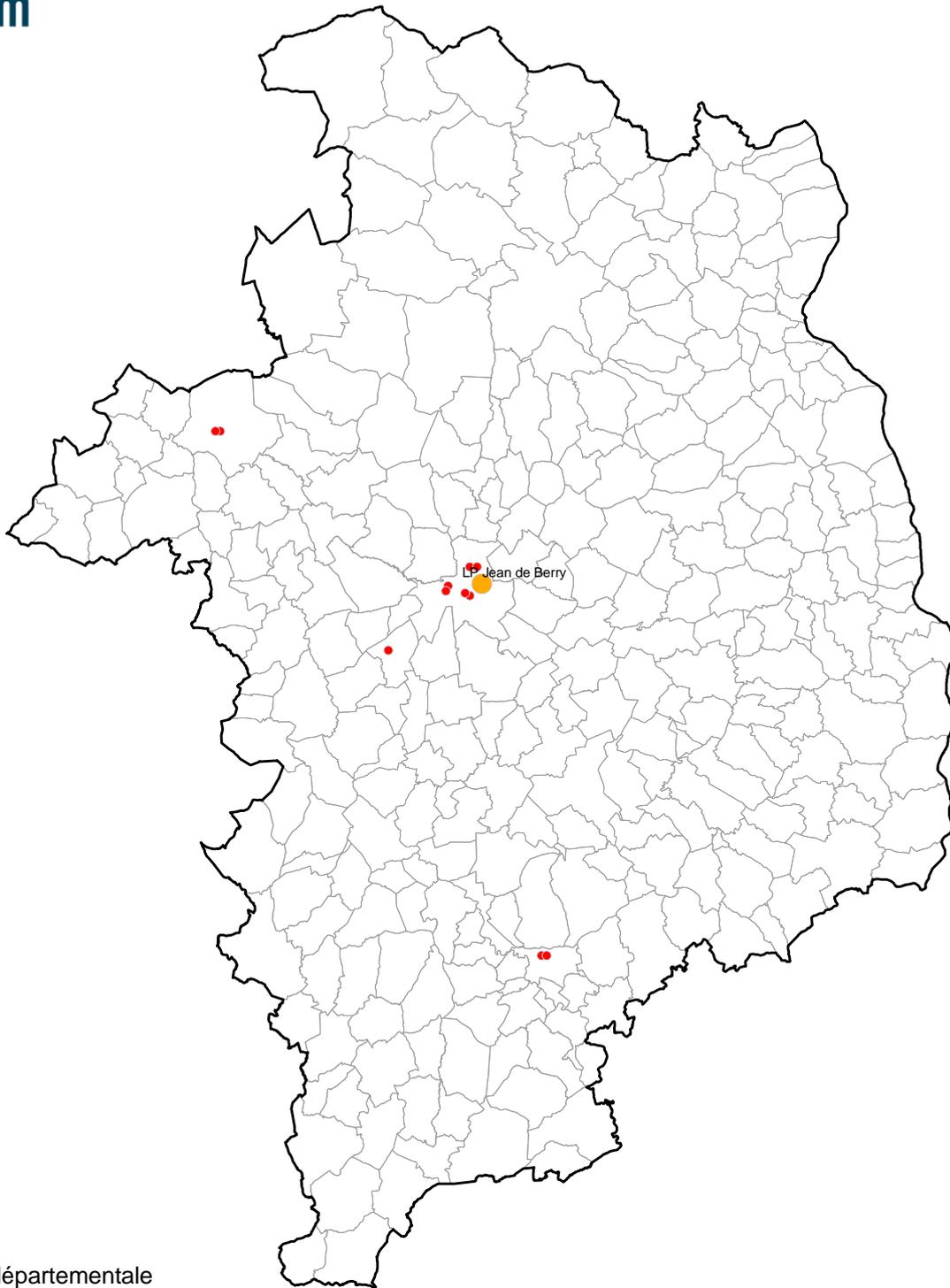
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées du Cher (18)



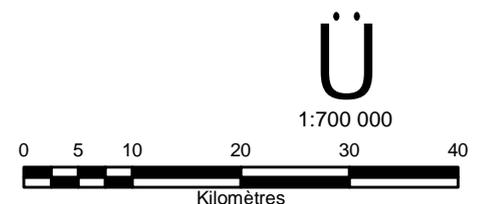
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

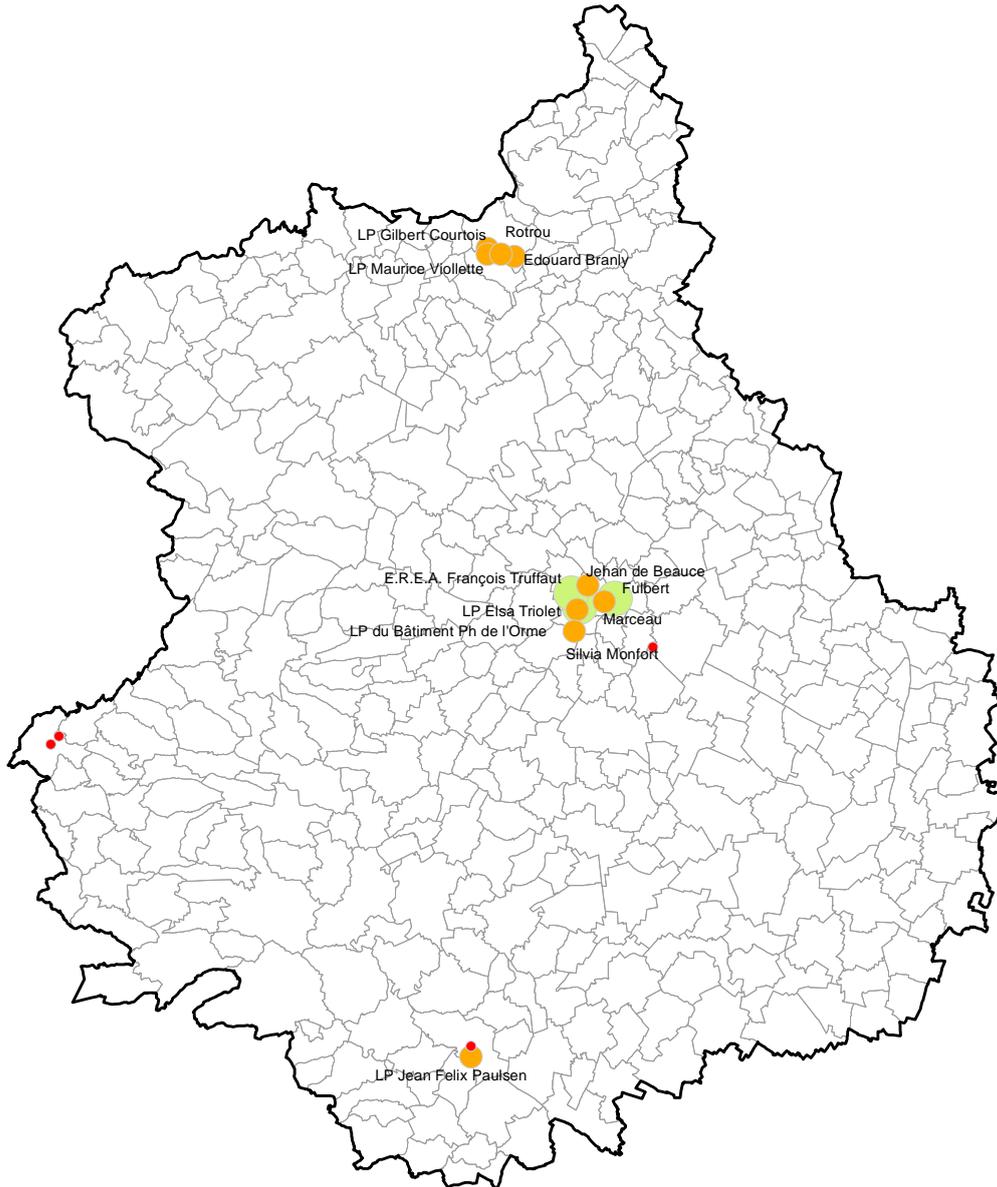
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 2

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées d'Eure-et-Loir (28)



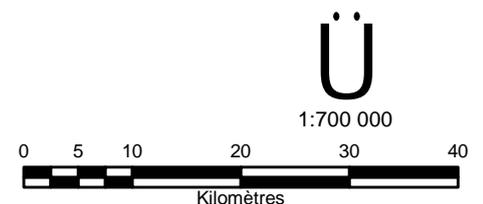
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

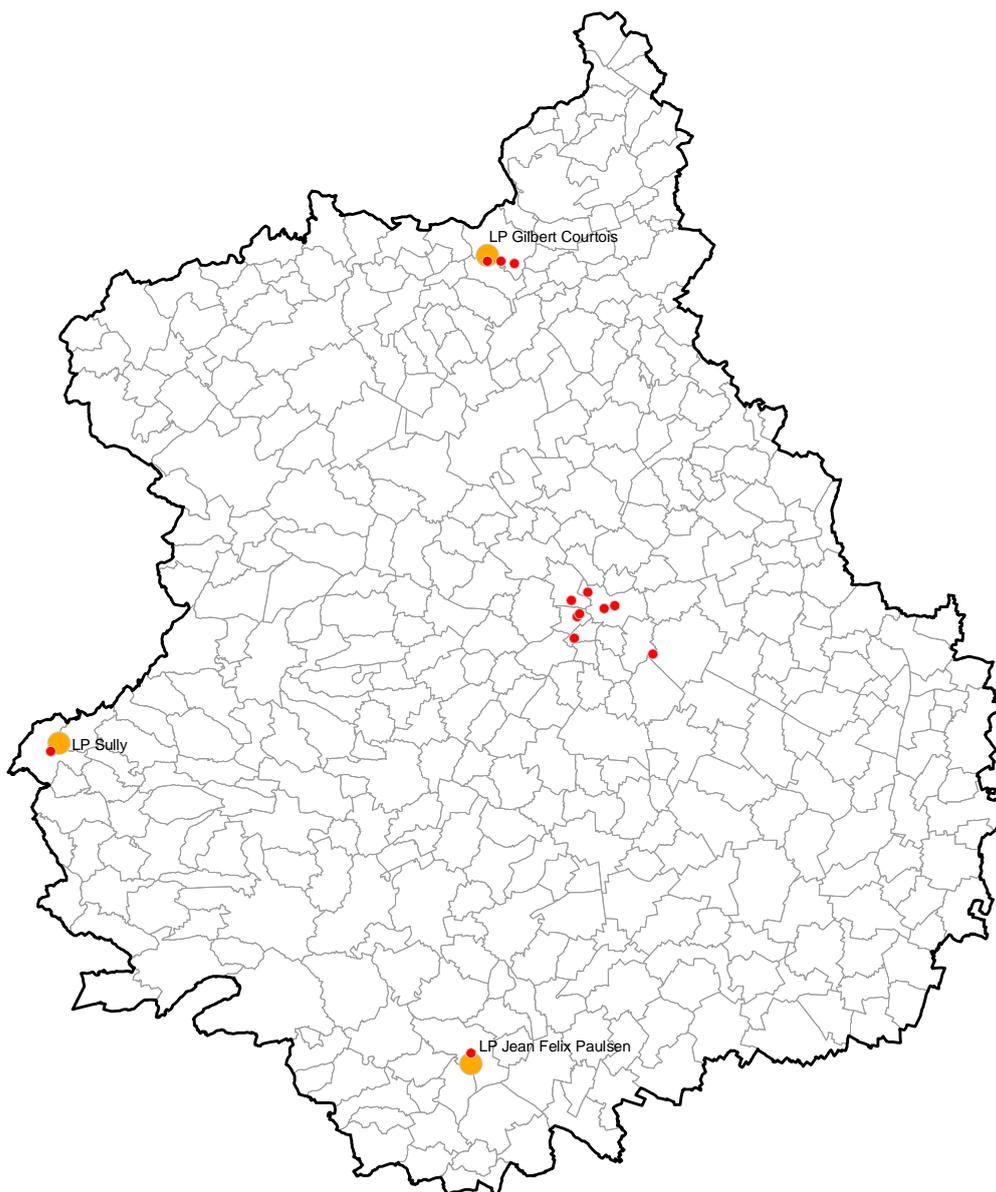
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées d'Eure-et-Loir (28)



## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

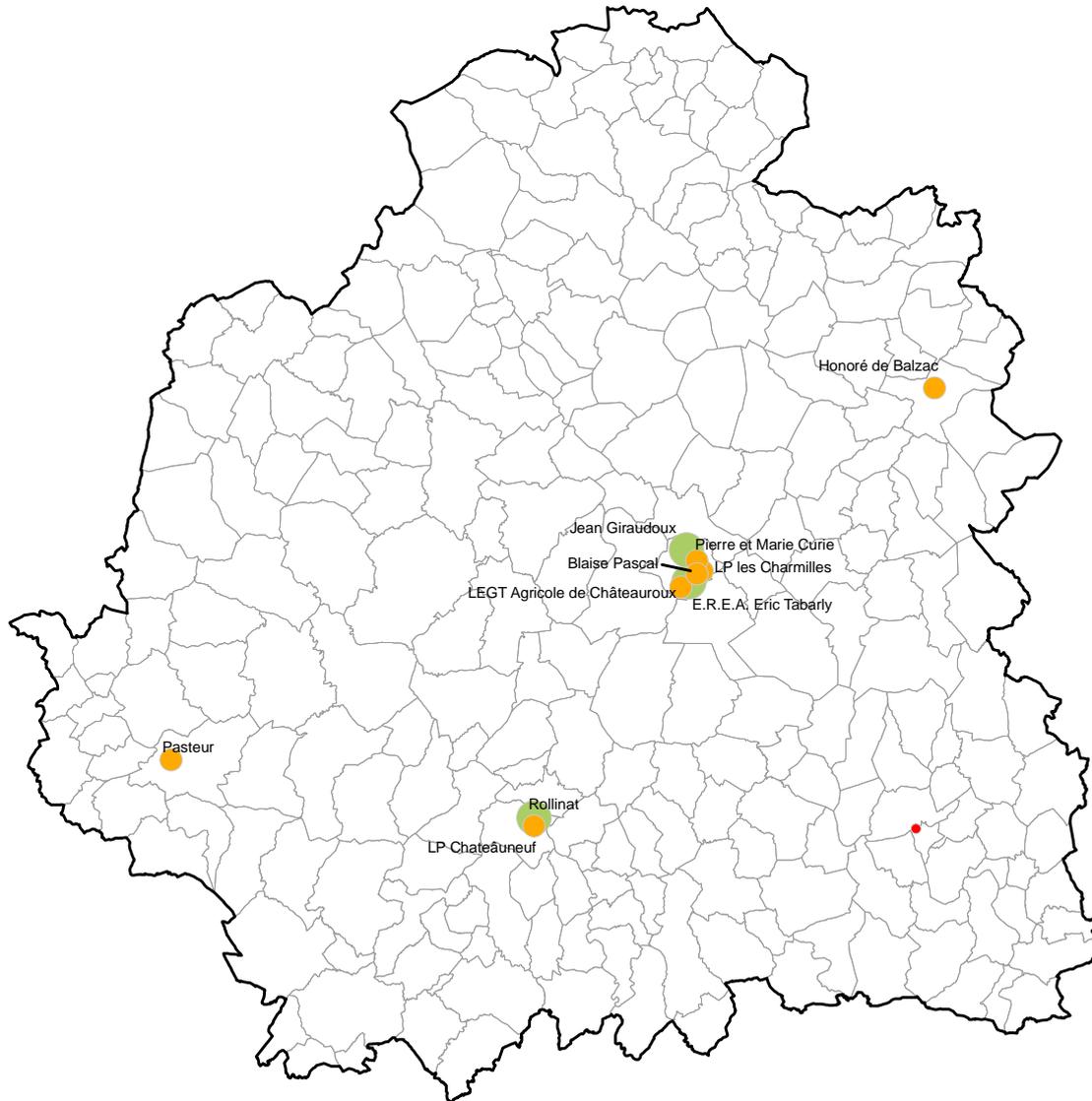
### Aquifère 2

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins

Ü  
1:700 000



# Potentiel géothermique des lycées de l'Indre (36)



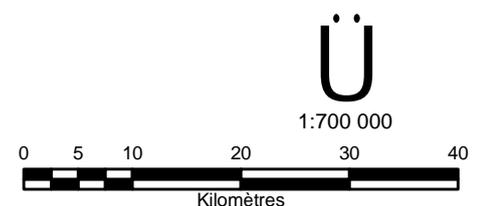
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

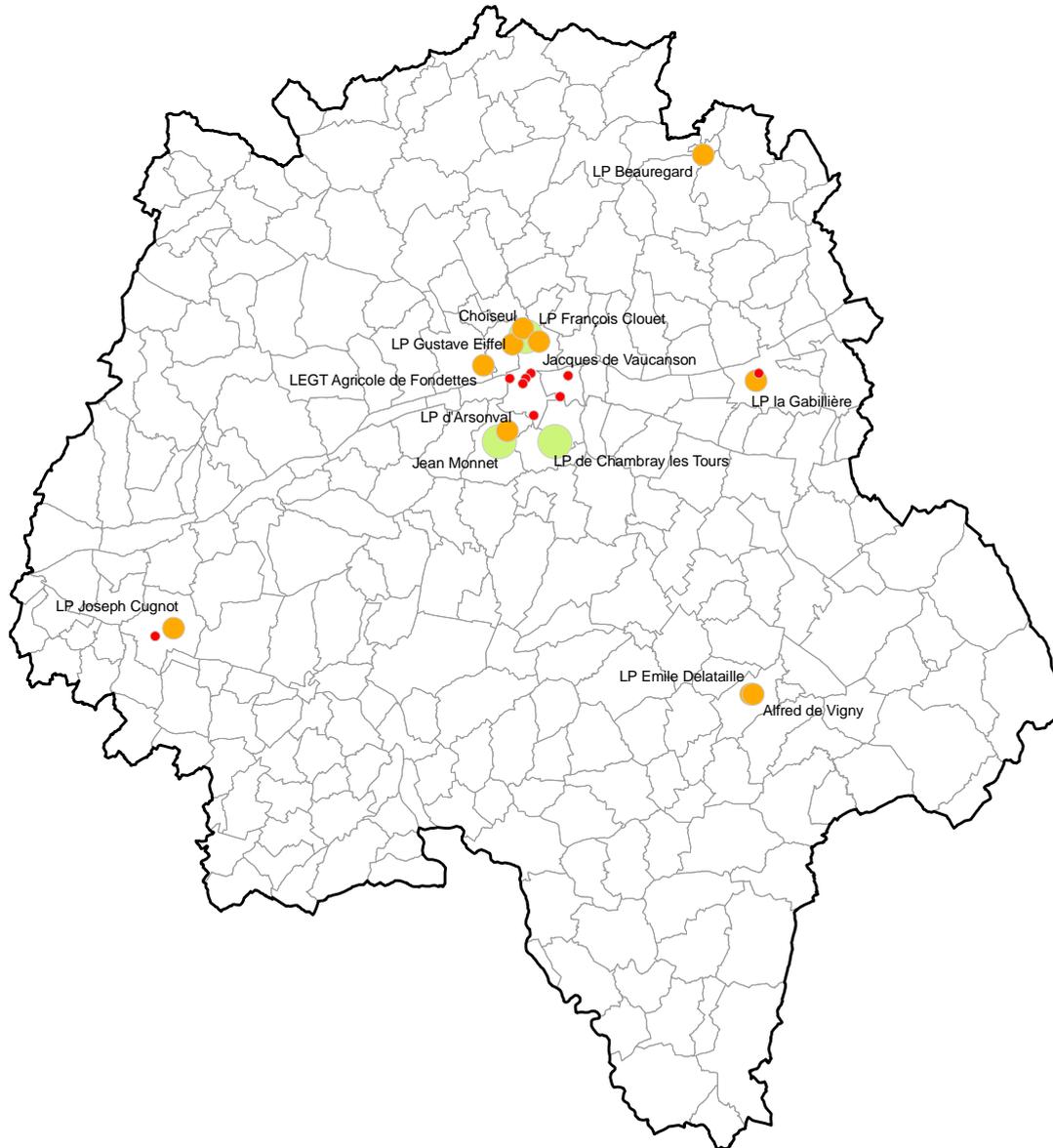
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées d'Indre-et-Loire (37)



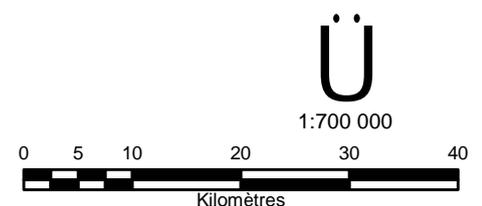
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

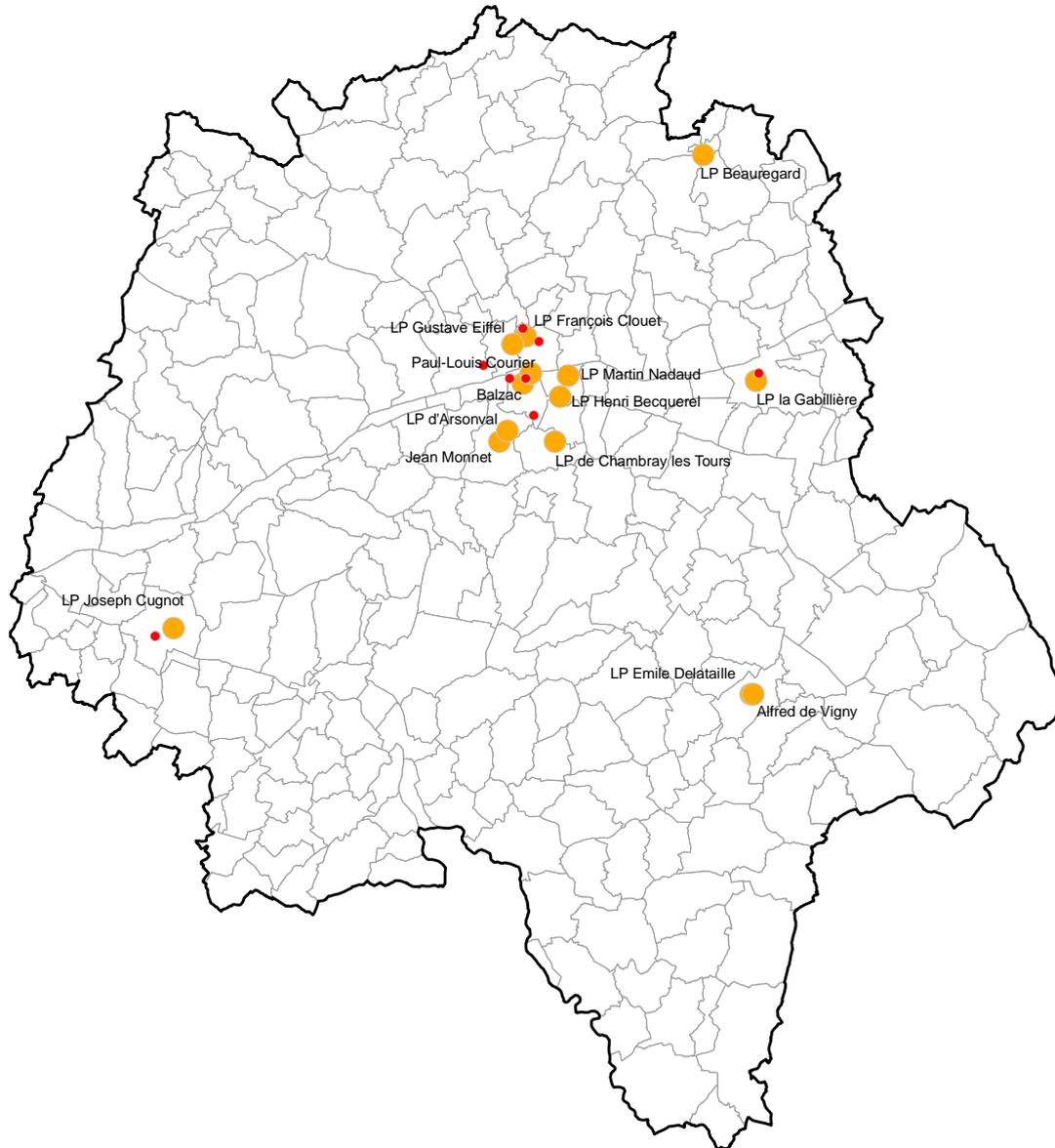
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées d'Indre-et-Loire (37)



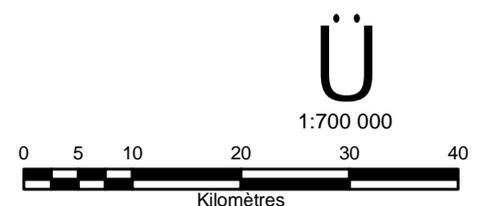
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

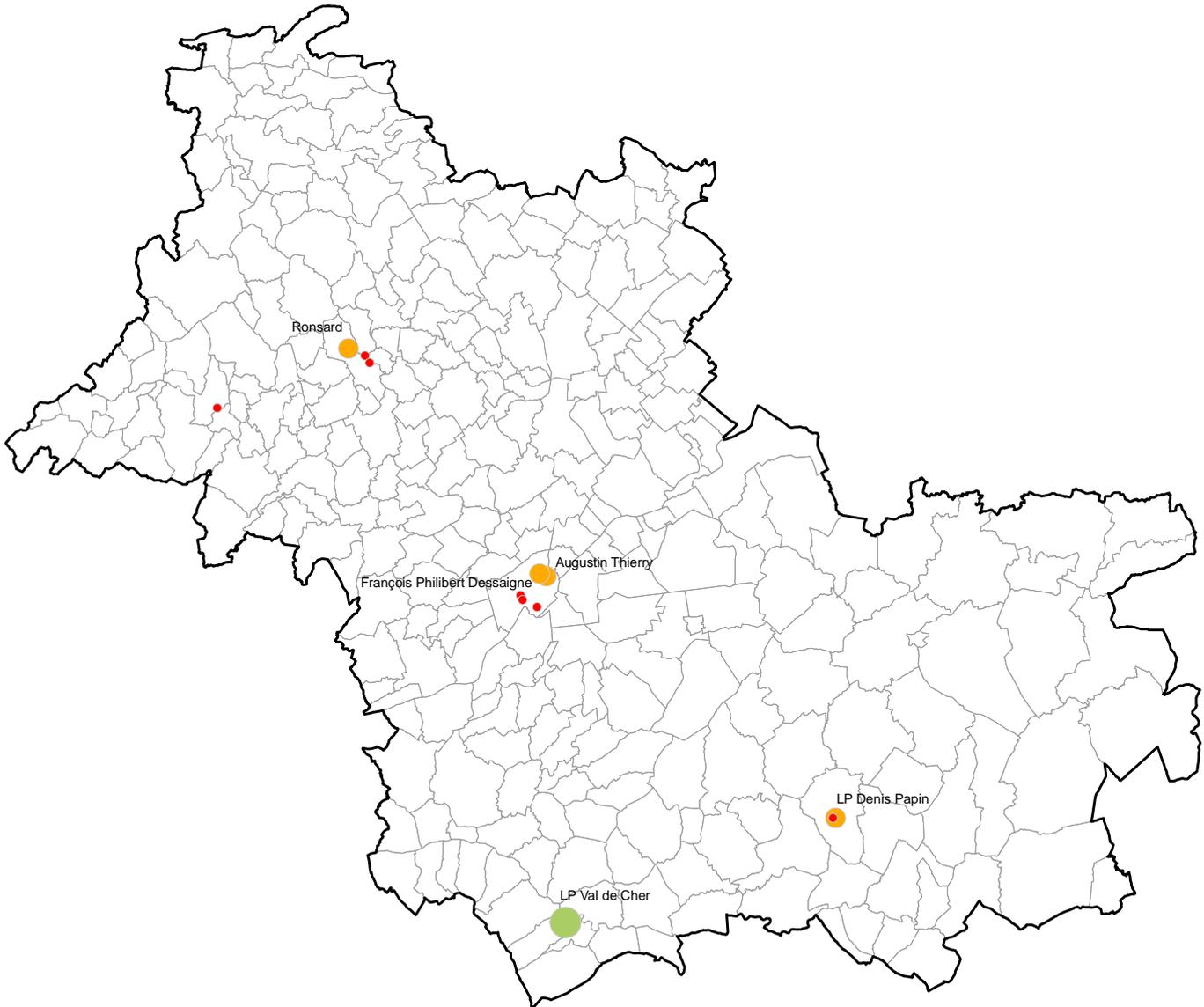
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 2

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées du Loir-et-Cher (41)



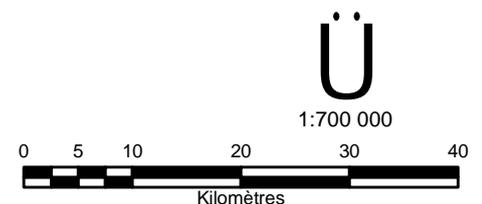
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

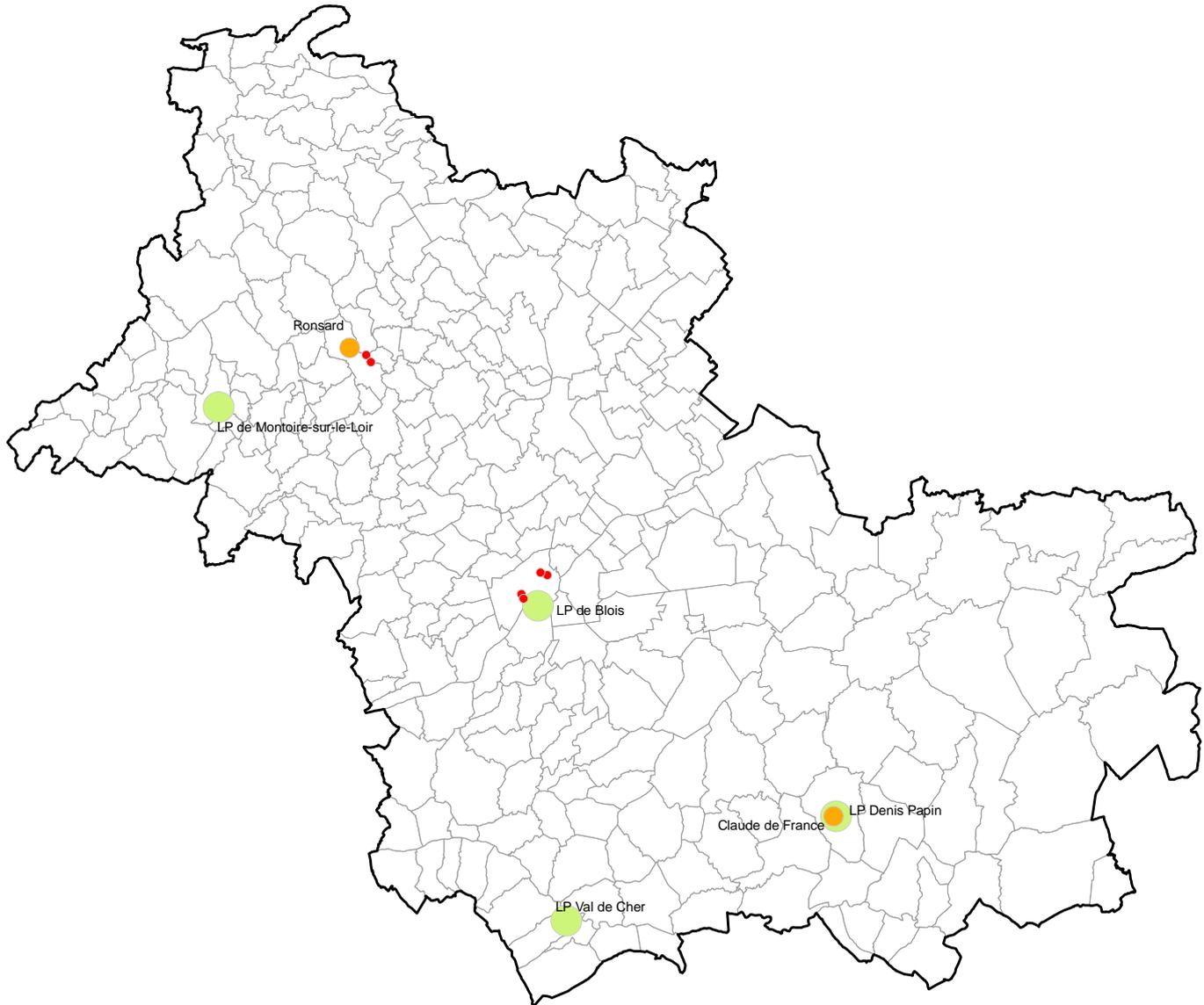
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées du Loir-et-Cher (41)



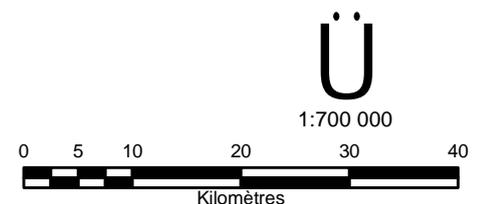
## Légende

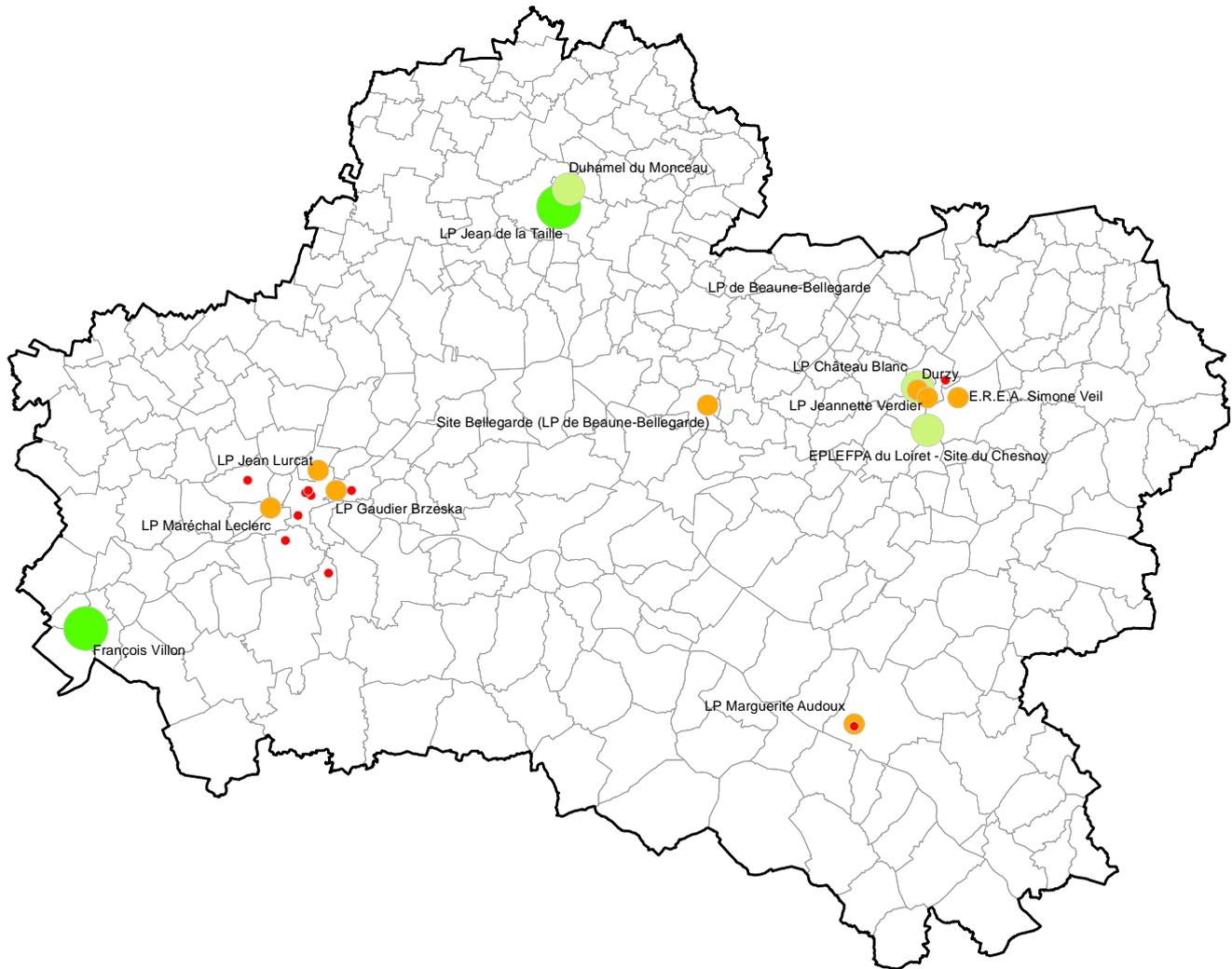
- Limite départementale
- Limites communales

## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 2

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins





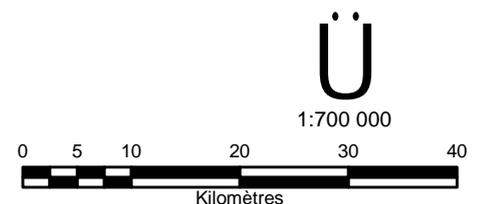
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

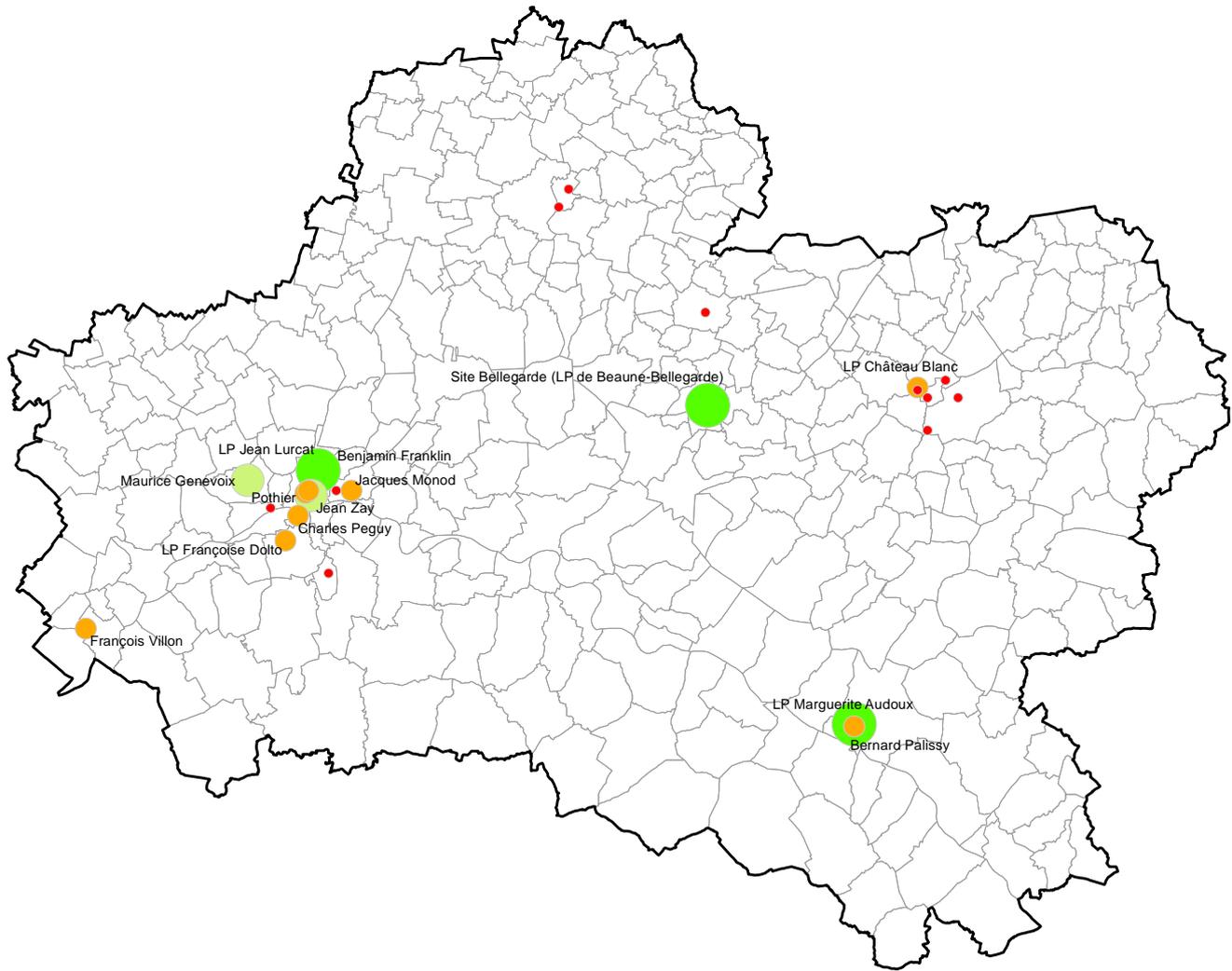
## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 1

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins



# Potentiel géothermique des lycées du Loiret (45)



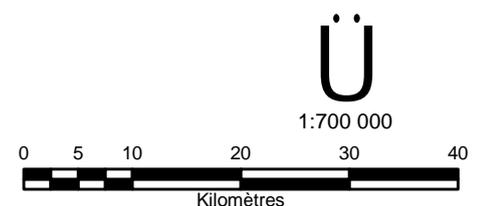
## Légende

- Limite départementale
- Limites communales

## Rapport entre les ressources aquifères et les besoins thermiques des lycées

### Aquifère 2

- Très faible ressource (moins de 10%)
- Faible ressource (moins de 50%)
- Ressource couvrant au moins 50% des besoins
- Ressource couvrant la totalité (et plus) des besoins





Les données concernant les consommations des lycées ont été reçues de la Direction des Lycées de la région Centre.

L'objectif a été de croiser le potentiel des ressources aquifères superficielles et les consommations énergétiques des lycées de la région Centre.

Concernant les lycées, le potentiel de chaque aquifère a été regardé séparément. Le travail a été réalisé avec le débit maximum et nombre d'heures d'utilisation à pleine puissance de l'établissement. La contrainte économique n'a pas été prise en compte.

Lorsque le taux d'adéquation est faible pour les aquifères superficiels, cela ne veut pas dire que la géothermie n'est pas envisageable. D'autres solutions, sur champs de sondes, voire sur aquifères profonds (si les besoins sont importants, et/ou en envisageant un regroupement), pourraient être envisagées et doivent être étudiées au cas par cas.

**Attention ! Ces cartes ne peuvent se substituer à une étude de faisabilité.**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional “Centre”**

3, avenue Claude Guillemain  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : 02 38 64 31 92