

Document public

# Étude d'une méthode nationale d'évaluation du potentiel géothermique sur sonde géothermique verticale de la tranche 0-200 m de profondeur

Rapport final

BRGM/RP-67086-FR

Mars 2017





# Étude d'une méthode nationale d'évaluation du potentiel géothermique sur sonde géothermique verticale de la tranche 0-200 m de profondeur

Rapport final

**BRGM/RP-67086-FR**

Mars 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets  
d'appui aux politiques publiques du BRGM

**J.-C. Martin, V. Baudouin, C. Maragna**

## Vérificateur :

Nom : Mikaël PHILIPPE

Fonction : Responsable scientifique  
du programme « Centre technique  
Géothermie et Bâtiment »

Date : 20/03/2017

Signature :



## Approbateur :

Nom : Philippe ROCHER

Fonction : Directeur adjoint des  
Géoressources

Date : 25/03/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



**Mots-clés** : Sonde géothermique verticale, Géothermie, Test de réponse thermique, Atlas des ressources géothermales.

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

**Martin J.-C., Baudouin V., Maragna C.** (2017) - Étude d'une méthode nationale d'évaluation du potentiel géothermique sur sonde géothermique verticale de la tranche 0-200 m de profondeur. Rapport final. BRGM/RP-67086-FR, 41 p., 22 ill.

## Synthèse

Face au développement constant des installations de Sondes Géothermiques Verticales (SGV), il s'est avéré indispensable de pouvoir disposer de documents cartographiques évaluant le potentiel géothermique pour SGV dans la tranche 0-200 m de profondeur, et fournissant des informations chiffrées, comme la conductivité thermique et la température des terrains, afin de pouvoir dimensionner, au niveau étude de faisabilité, ces installations.

Pour cela, l'ADEME et le BRGM ont décidé de financer et de réaliser, dans le cadre de leur convention nationale commune 2016, l'étude présentée dans ce rapport. Il s'agit, dans un premier temps, de faire le point d'une part sur les données thermiques potentiellement disponibles en France métropolitaine, issues des tests de réponse thermique (TRT) existants mais qui restent à rassembler, et d'autre part sur les méthodes utilisées pour l'élaboration des cartes de potentiel déjà réalisées. À l'issue de ce premier travail d'enquête et de recueil de données, une méthode d'évaluation plus précise du potentiel géothermique nationale pour SGV est proposée. La mise en œuvre de cette méthode pourra faire l'objet d'une suite à ce projet.

Le recueil des données des TRT réalisé auprès des directions régionales de l'ADEME et le recensement des données de la BSS du BRGM a permis de créer une première base de données avec un échantillon de 48 TRT répartis sur l'ensemble du territoire de la France métropolitaine. Ces données ont montré la faisabilité d'associer les valeurs des conductivités thermiques mesurées à la lithologie principale des terrains traversés par les forages. Les résultats obtenus sont cohérents avec les valeurs exprimées dans la norme suisse SIA/384/6 relative aux SGV. Il serait possible de compléter cet échantillon initial avec, d'une part, les données de 97 rapports de fin de travaux récoltés lors de ce recueil de données, mais qui restent à dépouiller, d'autre part en continuant la recherche de documents auprès des 11 bureaux d'études identifiés et équipés pour réaliser des TRT. Il a ainsi été identifié un total de 350 TRT en France métropolitaine potentiellement exploitables pour fournir des données de conductivité et de capacité thermiques des terrains, ainsi que des données de température. Une telle base de données permettrait de préciser, pour le territoire français, les valeurs des propriétés thermiques des roches, disponibles dans la littérature, principalement étrangère.

Les cartes des potentiels géothermiques sur sonde, réalisées en France, présentent toutes des approches différentes, telles qu'il est rappelé ci-après :

- région Pays de la Loire : **carte de puissance** d'échange calculée en utilisant l'abaque établi par B. Sanner (D-35390 Giessen), qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de SGV à une conductivité moyenne du terrain pour une série de conditions d'exploitation bien définies ;
- région Franche Comté : **carte des risques géologiques** associés à la réalisation d'une SGV, sans référence aux propriétés thermiques des terrains traversés ;
- région Rhône-Alpes : **carte des conductivités thermiques** en fonction de la lithologie des terrains à l'affleurement (origine des données utilisées non indiquée dans le rapport d'étude) ;
- région Provence Alpes Côte d'Azur : **carte des puissances extractibles** par mètre en fonction de la lithologie des terrains à l'affleurement (données d'après Pahud - 2002) ;
- région Bourgogne : **carte des puissances extractibles** par mètre en fonction de la lithologie des 100 et 200 m premiers mètres (données d'après Pahud - 2002) ;

- région Centre Val de Loire : **carte des conductivités thermiques** en fonction de la lithologie pour 3 tranches de profondeur (0-50, 0-100 et 0-200 m) (données : norme suisse SIA-384/6 relative aux SGV).

Faute de données disponibles, ces cartes n'ont pas été calées avec des valeurs de TRT. Elles ne prennent en compte ni la température des terrains, ni la typologie du besoin thermique, ni les contraintes réglementaires s'appliquant à la température du fluide caloporteur.

Une amélioration de la précision de ces cartes pourrait être apportée avec, d'une part, un calage de celles-ci avec des données de TRT, d'autre part par l'application d'une méthode plus élaborée d'estimation de l'énergie extractible à l'échelle régionale. Une méthode prenant en compte la température des terrains, la typologie du besoin thermique, les contraintes réglementaires s'appliquant à la température du fluide caloporteur, et le changement climatique conduisant à une augmentation des besoins de rafraîchissement, pourrait être développée et mise en œuvre sur un département ou une région test.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Conductivité thermique des terrains - Les Tests de Réponse Thermique .....</b>	<b>9</b>
2.1. LA MESURE DES CONDUCTIVITÉS THERMIQUES DES TERRAINS.....	9
2.2. RECUEIL DES DONNÉES DISPONIBLES DES TRT EN FRANCE.....	9
2.2.1. Les données des directions régionales de l'ADEME .....	9
2.2.2. Le réseau « animation régionale » de la filière géothermie de l'ADEME .....	10
2.2.3. Les données de la BSS du BRGM .....	10
2.2.4. La base de données des déclarations de forage (Code minier) en Pays de la Loire .....	11
2.2.5. Recueil de données auprès des BET réalisant des TRT .....	11
2.3. BILAN DE L'INVENTAIRE DES DONNÉES DES TRT .....	11
2.4. CONSTITUTION ET EXPLOITATION D'UNE BASE DE DONNÉES DES TRT .....	13
2.5. ANALYSE DES DONNÉES DES TRT .....	16
<b>3. État des lieux de la cartographie des ressources géothermiques pour des installations de sondes géothermiques verticales (SGV) .....</b>	<b>21</b>
3.1. INVENTAIRE DES ATLAS DE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR SGV EN FRANCE .....	21
3.2. RÉGION PAYS DE LA LOIRE : NANTES MÉTROPOLÉ .....	22
3.3. RÉGION FRANCHE-COMTÉ.....	24
3.4. RÉGION RHÔNE-ALPES .....	26
3.5. RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR .....	29
3.6. RÉGION BOURGOGNE .....	32
3.7. RÉGION CENTRE-VAL DE LOIRE.....	34
<b>4. Proposition d'une méthode d'évaluation de l'énergie extractible par une SGV (méthode G.POT) .....</b>	<b>37</b>
<b>5. Bilan et conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>41</b>

## Liste des figures

Illustration 1 - Géolocalisation des 158 TRT en France métropolitaine (état au 15 mai 2017) .....	12
Illustration 2 - Valeurs des conductivités thermiques des terrains en fonction de leur lithologie. Norme SIA-384/6 relatives aux SGV .....	14
Illustration 3 - Valeurs de conductivité thermique de 48 TRT rapportées à une lithologie principale (unité : W/(m.K)).....	15
Illustration 4 - Analyse comparative entre les propriétés thermiques théoriques des roches et substrats (norme suisse SIA-384/6 relatives aux SGV) et des résultats de 48 TRT ....	17
Illustration 5 - Température moyenne sur le sol métropolitain établi par Météo France .....	18
Illustration 6 - Température initiale des terrains et profondeur d'investigation associée .....	19
Illustration 7 - État de publication des atlas régionaux des ressources géothermiques pour installations sur SGV .....	21
Illustration 8 - Carte du potentiel géothermique du territoire de Nantes Métropole pour des sondes géothermiques (profondeur 100 m) .....	23
Illustration 9 - Carte régionale de Franche-Comté du risque géologique pour sondes géothermiques verticales.....	25
Illustration 10 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Franche-Comté).....	25
Illustration 11 - Conductivité thermique et lithologie des terrains (source non communiquée).....	27
Illustration 12 - Carte du potentiel géothermique de la région Rhône-Alpes .....	28
Illustration 13 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Rhône-Alpes).....	28
Illustration 14 - Classe de puissance soutirale par types de roches, d'après Pahud (2002) .....	29
Illustration 15 - Carte du potentiel géothermique de la région PACA.....	30
Illustration 16 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région PACA) .....	31
Illustration 17 - Carte du potentiel géothermique sur SGV de la Bourgogne, lithologies dominantes sur 200 m et classes de favorabilité .....	33
Illustration 18 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Bourgogne) .....	33
Illustration 19 - Illustration de la méthode de calcul de la conductivité thermique moyenne sur la tranche 0-200 m sur un point situé sur la commune de Romorantin (41) .....	34
Illustration 20 - Puissance énergétique prélevable en W.m <sup>-1</sup> d'échangeur (source : norme AFNOR NF X10-970 - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale) .....	35
Illustration 21 - Exemple de carte de conductivité thermique de la région Centre - Val de Loire (profondeur 50 m) .....	36
Illustration 22 - Carte de conductivité thermique (gauche). Quantité annuelle de chaleur pouvant être extraite d'une SGV de 100 m, calculée par la méthode G.POT (à droite). Province de Coni, Italie (d'après Casasso et Sethi, 2016) .....	37

# 1. Introduction

Le secteur de Nantes Métropole, les régions Franche-Comté, Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Bourgogne et Centre-Val de Loire disposent, depuis juin 2017, de cartes des ressources géothermales pour des installations de sondes géothermiques verticales (SGV). Les données utilisées et les méthodes employées lors de la réalisation de ces cartes sont très disparates d'une région à l'autre. Bien souvent ces cartes n'apportent que des informations qualitatives, comme « zone potentiellement favorable » ou non, mais peu souvent des données comme la conductivité thermique des terrains, ce qui permettrait aux aménageurs d'avoir une idée plus précise de la puissance réellement disponible au droit d'un site pour le chauffage ou le rafraîchissement de bâtiments au moyen d'une installation de SGV.

Face au développement constant de cette filière, il s'est avéré indispensable de pouvoir disposer de documents cartographiques évaluant le potentiel géothermique pour SGV dans la tranche 0-200 m de profondeur, et fournissant des informations chiffrées, comme la conductivité thermique et la température des terrains, afin de pouvoir dimensionner, au niveau étude de faisabilité, des installations de SGV.

Pour cela, l'ADEME et le BRGM ont décidé de financer et de réaliser, dans le cadre de leur convention nationale commune 2016, l'étude présentée dans ce rapport. Il s'agit, dans un premier temps, de faire le point, d'une part, sur les données thermiques potentiellement disponibles en France métropolitaine, issues des tests de réponse thermique (TRT) existants mais qui restent à rassembler, d'autre part sur les méthodes utilisées pour l'élaboration des cartes de potentiel déjà réalisées. À l'issue de ce premier travail d'enquête et de recueil de données, une méthode d'évaluation plus précise du potentiel géothermique nationale pour SGV est proposée. La mise en œuvre de cette méthode pourra faire l'objet d'une suite à ce projet.



## **2. Conductivité thermique des terrains - Les Tests de Réponse Thermique**

### **2.1. LA MESURE DES CONDUCTIVITÉS THERMIQUES DES TERRAINS**

La conductivité thermique des terrains peut être évaluée à l'aide des Tests de Réponse Thermique (TRT).

Un Test de Réponse Thermique consiste à mesurer la réponse du sous-sol à un échelon de puissance thermique appliquée à une sonde, typiquement, entre 45 et 55 W/m, pendant une durée d'au moins 60 heures.

Lors de ce test, le sol s'échauffe et les températures, en entrée et en sortie de sonde, augmentent. Un sol conducteur « évacuera » les calories injectées, et la hausse des températures, observée en entrée et en sortie de sonde, sera d'autant plus faible. Inversement, un sol moins conducteur ne pourra pas « évacuer » aussi facilement les calories injectées et la hausse des températures sera plus importante. L'examen de la courbe d'évolution de la température, en entrée et en sortie de sonde au cours du test, permettra la détermination de la conductivité thermique moyenne du terrain.

Exprimée en  $W/(m.K)$ , la conductivité thermique moyenne du terrain va dépendre fortement de la nature géologique des formations traversées par la sonde géothermique verticale (SGV).

Outre la connaissance de la conductivité thermique moyenne du terrain, qui constitue une étape préalable indispensable pour dimensionner une installation de SGV, la résistance thermique de la sonde (notée  $R_b$ ) du forage test est un paramètre de contrôle qualitatif de réalisation, et aussi représentatif de la maîtrise technique pour la réalisation du futur champ de sondes.

### **2.2. RECUEIL DES DONNÉES DISPONIBLES DES TRT EN FRANCE**

La réalisation des TRT est relativement récente sur le territoire métropolitain, puisque les plus anciens tests inventoriés datent d'une dizaine d'années (2006).

On présente ci-après le résultat du recueil des données des TRT, réalisé au cours de cette étude. Ces données proviennent des dossiers Fonds Chaleur instruits par les directions régionales de l'ADEME, ainsi que les dossiers de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) issus des déclarations des ouvrages souterrains faites dans le cadre du Code minier.

#### **2.2.1. Les données des directions régionales de l'ADEME**

Dans le cadre du Fonds Chaleur, qui est un dispositif d'aide financière pour accompagner les projets de production renouvelable de chaleur pour les bâtiments, l'ADEME intègre les différentes technologies de géothermie.

Cet accompagnement s'applique aux opérations avec pompes à chaleur sur champs de sondes géothermiques pour des superficies d'équipements généralement comprises entre 500 et 5 000 m<sup>2</sup>.

Ces opérations concernent le résidentiel collectif ainsi que le petit et moyen tertiaire (maisons de retraite, bâtiments communaux, bâtiments industriels, immeubles de bureaux), avec une production minimum de l'installation de 2 tep EnR/an extraites du sous-sol, soit plus de 23,2 MWh.

Afin d'optimiser le dimensionnement des équipements, les TRT sont exigés pour les installations comprenant une longueur de sonde cumulée supérieure à 1 000 m, tel qu'il est mentionné (p.12) dans le cahier des charges « Étude de faisabilité - Mise en place de pompe(s) à chaleur géothermique(s) sur aquifère superficiel sur champ de sondes », document destiné aux porteurs de projets. L'ADEME a également publié son cahier des charges pour la réalisation d'un TRT. L'ensemble de ces documents est accessible depuis le site internet « DIAGADEME ».

L'enquête menée auprès des directions régionales de l'ADEME a permis de recueillir les résultats de 11 TRT.

À cela s'ajoute la connaissance de 8 opérations supplémentaires ayant fait l'objet d'au moins un TRT, qui figurent dans le livret « Chauffer et rafraîchir avec une énergie renouvelable - Secteurs de la géothermie très basse énergie », publié en mars 2017 par l'ADEME Sophia-Antipolis, mais dont on ne possède pas les données des TRT.

### **2.2.2. Le réseau « animation régionale » de la filière géothermie de l'ADEME**

Pour les besoins de cette enquête, les chargés de mission du réseau d'animation régionale de la filière géothermie de l'ADEME des quatre anciennes régions de Picardie, Centre Val de Loire, Aquitaine et Champagne-Ardenne ont été contactés. Il a ainsi été possible de récupérer les résultats du recensement, mené en 2016 par le bureau d'études GEOTHER pour les départements de l'Aisne, de l'Oise et de la Somme et financé par l'ADEME, des installations géothermiques de minime importance (puissance inférieure à 500 kW). Sur 72 projets géothermiques recensés, 9 installations comportent ou sont susceptibles de comporter un TRT. Un rapprochement auprès des bureaux d'études thermiques (BET) est envisagé et permettra à terme de récupérer de nouvelles données.

### **2.2.3. Les données de la BSS du BRGM**

Plusieurs sources potentielles sont disponibles au BRGM.

Dans un premier temps, le réseau régional des correspondants BSS (Banque de données du Sous-Sol) a été mis à contribution afin de mener localement des recherches dans leurs archives et données enregistrées en BSS, avec l'appui des géologues régionaux. Bien qu'il existe plusieurs dizaines de milliers de SGV enregistrées dans cette base, aucun TRT n'a été collecté et enregistré.

Or cette mesure de terrain rentre bien dans le champ de compétence inhérent à la mission régaliennne du BRGM dans la collecte des données du sous-sol de la France, puisqu'il s'agit d'une mesure d'une propriété du sous-sol (paramètre géophysique) qui s'attache à un ouvrage souterrain (Code minier).

Face à l'absence de ce type de données, un terme spécifique pour les TRT a été ajouté en prévision au lexique « Documentation » de la BSS afin de déverser ultérieurement les tests qui auront été collectés et rattachés à l'ouvrage bancarisé.

La base de données des rapports BRGM et de rapports externes archivés, a été interrogée, à partir d'un ensemble de mots clés permettant de cibler l'ensemble des travaux conduits pouvant contenir ce type d'essai. Trois références ont été trouvées notamment pour le projet de recherche Solargeotherm à Montauriol (66) et un autre projet sur le quartier des Boisses à Tignes (73).

Pour élargir la recherche, un ensemble d'ingénieurs travaillant sur des projets en lien avec la géothermie ont également été mis à contribution, et notamment avec la plateforme géothermie mise en place sur le site du BRGM à Orléans La Source.

Au total, les données de 15 TRT ont pu être récupérées.

#### **2.2.4. La base de données des déclarations de forage (Code minier) en Pays de la Loire**

Une enquête a été faite par la Direction régionale du BRGM des Pays de la Loire auprès des maîtres d'ouvrage sur leurs déclarations préalables aux travaux souterrains et antérieures à la mise en place du site de télédéclaration en juillet 2015, lié au décret relatif à la Géothermie de Minime Importance (GMI).

Pour ces déclarations, une requête spécifique a été réalisée afin de recenser l'ensemble des projets susceptibles de posséder un TRT. Les critères retenus étaient les suivants :

- projet postérieur à 2005 ;
- nombre de sondes installées, au moins égal à 10.

Ce filtre a permis la sélection de 51 projets.

Cette enquête a permis de récupérer 5 TRT auprès des maîtres d'ouvrage et 2 auprès des foreurs.

#### **2.2.5. Recueil de données auprès des BET réalisant des TRT**

Une recherche sur internet auprès des BET qui réalisent des TRT dans le cadre de projets de SGV et qui n'ont pas bénéficié des aides de l'ADEME dans le cadre du « Fonds Chaleur renouvelable » lancé en 2009, a permis de compléter notre inventaire.

Cette enquête complémentaire, suivie d'une compilation de fiches établies par les BET eux-mêmes, a permis d'identifier plus précisément les opérateurs réalisant des TRT. Suite à un certain nombre de recherches et de contacts pris, une liste que l'on pourrait qualifier d'exhaustive a été établie et recense à ce jour 11 BET équipés d'un appareil de test de réponse thermique, dont 3 situés dans des pays étrangers.

Les contacts établis avec ces opérateurs ont permis de récupérer 155 rapports complets de TRT et les résultats de 15 TRT.

D'après les éléments communiqués par ces opérateurs, et en les croisant avec l'inventaire et la collecte précédemment décrite, ce sont plus de 288 TRT qui ont été comptabilisés. Il est probable que le nombre approche 350 en réalité.

### **2.3. BILAN DE L'INVENTAIRE DES DONNÉES DES TRT**

Cet inventaire des données des TRT sur le territoire est une première en France. Les premières mesures de conductivité thermique de terrains réalisées par tests de réponse thermiques ont eu lieu à partir de 2006. Aujourd'hui cette démarche est appliquée pour des projets d'importance relative (> 1 000 m d'échangeurs) à la fois par les BET et les maîtres d'œuvres.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif de la valorisation des TRT est double :

- comparer les valeurs obtenues sur le terrain aux valeurs théoriques (laboratoire) et/ou provenant de la littérature scientifique ;
- servir d'élément de calage pour les futures cartes de conductivité thermique envisagées à l'échelle de la métropole.

À ce stade de notre étude, nous disposons de 158 opérations de TRT géolocalisées : 97 sont sous forme de rapports qu'il reste à dépouiller, 15 comportent uniquement les valeurs de conductivité thermique interprétées, 45 font l'objet d'un complément d'inventaire et 1 est en projet. La localisation géographique de ces TRT figure sur l'illustration 1.

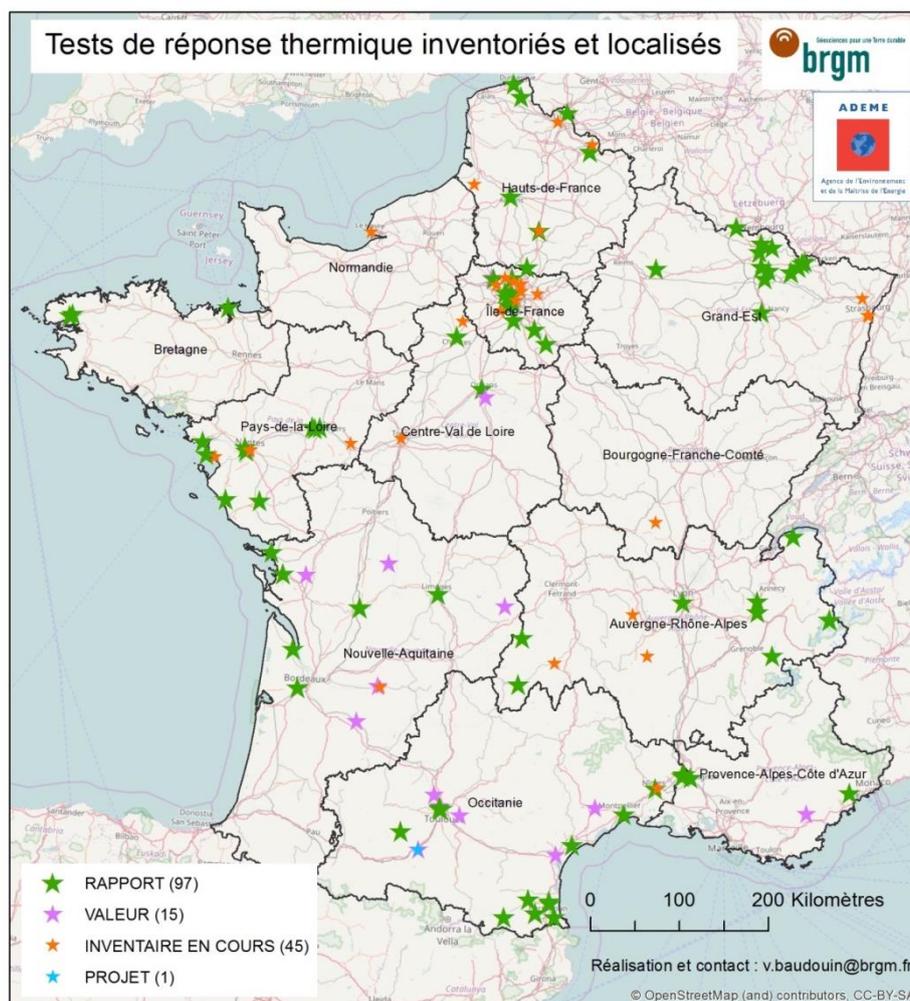


Illustration 1 - Géolocalisation des 158 TRT en France métropolitaine (état au 15 mai 2017).

On rappelle qu'à ce stade, 288 TRT ont été identifiés et listés dans un tableau, sur un potentiel de 350 TRT comptabilisés, suite à l'enquête auprès des différents opérateurs de la filière « géothermie sur sondes ».

La compilation de l'ensemble de ces rapports techniques permettrait la constitution d'une base de données de référence conséquente pour la connaissance et l'exploitation géothermique du sous-sol.

## 2.4. CONSTITUTION ET EXPLOITATION D'UNE BASE DE DONNÉES DES TRT

La constitution de la base de données des TRT comprend au préalable une étape de géolocalisation précise des forages testés, à l'issue de laquelle ils seront rattachés à un point déjà déclaré à la BSS du BRGM. Le cas échéant, il leur sera attribué un nouvel indice BSS.

Ce rattachement à un ouvrage de la BSS induit une connexion à toute une série de données complémentaires : la fiche signalétique de l'ouvrage (foreur, coupe technique, coupe géologique, diamètre de forage, équipement, ...) et les documents scannés transmis par le foreur. Cette valorisation est importante puisqu'il est fréquent que les connaissances sur les caractéristiques de la sonde test figurant dans le rapport du TRT soient partielles, et ainsi les documents contenus dans les dossiers BSS complètent la donnée.

Pour les 15 TRT pour lesquels nous ont été communiqués uniquement les résultats des interprétations, un rattachement partiel a été réalisé avec la BSS. Dans le cas de ceux pour lesquels nous ne disposons pas de coupes, la lithologie dominante a été déterminée avec le contexte local, en consultant notamment les ouvrages voisins. 44 TRT ont été rattachés à une sonde test déjà enregistrée en BSS.

33 rapports collectés ont été dépouillés, et les informations compilées ont été structurées dans une base de données avec les informations suivantes :

- les caractéristiques du sondage et de l'équipement de la sonde test : lithologie dominante, niveau piézométrique, débit au soufflage en fin de forage, nature du coulis, fabricant, conductivité du coulis ( $W/(m.K)$ ), modèle de la sonde et nombre (coaxiale, simple U ou double U) ;
- les conditions de réalisation du test de réponse thermique : profondeur du forage (longueur de la sonde), durée du test, puissance linéaire injectée en  $W/m$ , date de réalisation, incidents, remarques ;
- les paramètres utilisés pour le calcul :  $C_p$  (chaleur spécifique du terrain) en  $MJ/(m^3.K)$  ;
- les résultats obtenus : la température du terrain initiale, la conductivité thermique en  $W/(m.K)$ , et la résistance de la sonde notée  $R_b$  en  $(m.K/W)$ .

Pour les sondes test identifiées, la coupe lithologique a été numérisée dans la mesure du possible en fonction des éléments que nous avons à disposition.

Sur l'ensemble des tests récupérés, nous disposons de 48 valeurs de conductivité thermique moyenne d'un terrain au droit d'un site, avec une lithologie principale déterminée. Il est ainsi possible de comparer les valeurs des conductivités thermiques mesurées en fonction de la lithologie des terrains avec les valeurs tabulées dans la norme suisse SIA-384/6 relatives aux SGV (voir Illustration 2).

On indique sur l'illustration 3 la position des 48 valeurs disponibles de conductivité thermique mesurées et de la lithologie principale des terrains traversés. Celles-ci sont globalement comprises entre 2 et 4  $W/(m.K)$  selon la nature principale des terrains traversés.

	Type de roche	Conductivité thermique $\lambda$ W/(m·K)		Capacité thermique spéc. $\rho c$ MJ/(m <sup>3</sup> ·K)		Densité $\rho$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
		Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	
Terrains meubles	Argile sèche	0,4 – 1,0	0,6	1,5 – 1,6	1,5	1,8 – 2,0
	Argile saturée d'eau	0,9 – 2,3	1,4	2,0 – 2,8	2,3	2,0 – 2,2
	Sable sec	0,3 – 0,8	0,5	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Sable saturé d'eau	1,5 – 4,0	2,3	2,2 – 2,8	2,4	1,9 – 2,3
	Gravier/pierres, sec	0,4 – 0,5	0,4	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Gravier/pierres, saturé d'eau	1,6 – 2,0	1,7	2,2 – 2,6	2,3	1,9 – 2,3
	Moraine compacte	1,7 – 2,4	1,8	1,5 – 2,5	2,0	1,9 – 2,5
	Tourbe	0,2 – 0,7	0,4	0,5 – 3,8	1,6	0,5 – 0,8
Roches sédimentaires	Roche molassique suisse	voir tableau 7		1,8 – 2,6	2,1	2,4 – 2,7
	Argilite	1,1 – 3,5	1,9	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,6
	Grès		2,3	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Conglomérat/brèche	1,3 – 5,1	2,6	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Roche marneuse	1,5 – 3,5	2,1	2,2 – 2,3	2,2	2,3 – 2,6
	Roche calcaire	2,5 – 4,0	2,8	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,7
	Roche sulfatée (anhydrite, gypse)	1,3 – 2,8	1,6		2,0	
Roches de fond magmatiques	Granite	2,1 – 4,1	2,8	2,1 – 3,0	2,4	2,4 – 3,0
	Diorite	2,0 – 2,9	2,3		2,7	2,9 – 3,0
	Gabbro	1,7 – 2,5	2,0		2,6	2,8 – 3,1
Roches de fond métamorphes	Schistes argileux	1,5 – 2,6	1,9	2,2 – 2,5	2,3	2,4 – 2,7
	Marbre	1,3 – 3,1	1,9		2,0	2,5 – 2,8
	Quartzite	5,0 – 6,0	5,3		2,1	2,5 – 2,8
	Micaschistes	1,5 – 3,1	2,0	2,2 – 2,4	2,3	2,4 – 2,7
	Gneiss	1,9 – 4,0	2,6	1,8 – 2,4	2,0	2,4 – 2,7
	Amphibolite	2,1 – 3,6	2,6	2,0 – 2,3	2,1	2,6 – 2,9
Matériaux divers	Mélange de ciment/bentonite (remplissage durci)		0,8		3,0	1,2
	Béton	0,9 – 2,0	1,4		1,8	2,0 – 2,42
	Glace (-10 °C)		2,32		1,87	0,91
	Polyéthylène (PE100)		0,4		1,63	0,96
	Air (0 °C – 20 °C)		0,02		0,0012	0,00124
	Acier		60,0		3,12	7,8
	Eau (10 °C)		0,6		4,15	0,99

Illustration 2 - Valeurs des conductivités thermiques des terrains en fonction de leur lithologie. Norme SIA-384/6 relatives aux SGV.

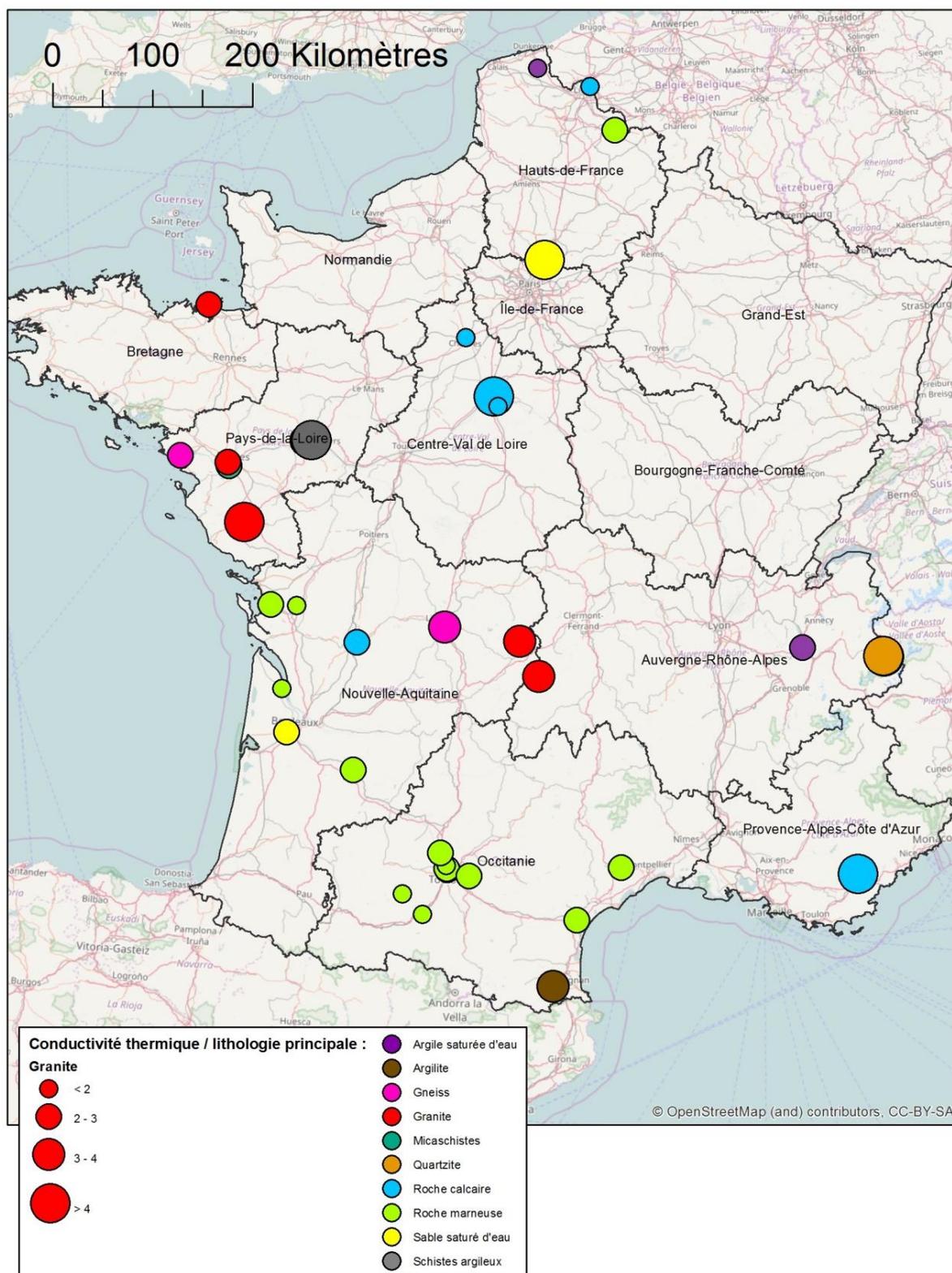


Illustration 3 - Valeurs de conductivité thermique de 48 TRT rapportées à une lithologie principale (unité : W/(m.K)).

## 2.5. ANALYSE DES DONNÉES DES TRT

On présente sur l'illustration 4 les résultats de l'analyse comparative entre les propriétés thermiques théoriques des roches et substrats issues de la norme suisse SIA-384/6 et les résultats de 48 TRT obtenus. Les valeurs indiquées sur le graphique sont les valeurs moyennes de chaque type de lithologie identifiée.

Il ressort de cette analyse que, de manière générale, les valeurs obtenues sur les TRT sont légèrement supérieures à celles de la norme suisse. Pour les marnes et les calcaires, la distribution des valeurs est plus dispersée. Cependant, s'agissant de terrains sédimentaires, pour les TRT, la nature des horizons traversés est variée et peut difficilement être réduite à une seule lithologie.

Il existe d'autres limites qui n'ont pas été prises en compte dans cette première analyse des données et qui peuvent influencer sur le résultat des TRT. Ces limites concernent le contexte géologique et hydrogéologique du site ainsi que le contexte climatique. Elles sont indiquées ci-après.

### Contexte hydrogéologique

Depuis le début des années 2000, et donc depuis le début du développement généralisé des SGV en France, les entreprises de forages spécialisées pour la réalisation des SGV portent de nombreux témoignages, notamment en domaine de socle, sur les bonnes performances d'une installation de pompe à chaleur sur sonde verticale lorsque celles-ci recoupent des arrivées d'eau.

Ces gains de performance sont non quantifiables puisqu'ils n'ont jamais été mesurés ni analysés ou remis dans leur contexte (géologique, hydrogéologique et technique pour la réalisation de la sonde).

Dans son guide pour la mise en place de pompe à chaleur géothermique, l'ADEME souligne le besoin de caractériser le contexte hydrogéologique du site.

D'autre part, la littérature montre bien l'effet positif d'un terrain saturé en eau par rapport à un matériau sec, d'autant plus qu'un écoulement des eaux souterraines favorise la recharge en calories du site. Ainsi, lorsqu'il y a une présence de nappe et que le milieu est saturé en eau, les échanges avec la SGV sont favorisés.

C'est la raison pour laquelle il est primordial de mener une caractérisation hydrogéologique sommaire notamment en approchant :

- les conditions piézométriques : le rapport des épaisseurs entre zone superficielle non saturée et saturée plus profonde (partie de la colonne de forage ennoyée), et plus largement la présence d'un aquifère, le ratio entre la puissance des horizons aquifères et d'une unité d'horizons semi ou imperméables (dit « domaine hydrogéologique ») sont déterminés à partir de la piézométrie moyenne du site et des entités de la BD LISA ;
- le gradient hydrogéologique : ce gradient, qui est proportionnel à la vitesse de circulation des eaux souterraines (loi de Darcy) au droit des échangeurs thermiques, est en général inconnu puisque pour l'obtenir, il faut une étude hydrogéologique. Cependant il peut être grossièrement apprécié ;
- d'autres paramètres hydrogéologiques (coefficient d'emmagasinement, transmissivité) seraient à prendre en compte dans la description du contexte hydrogéologique du site.

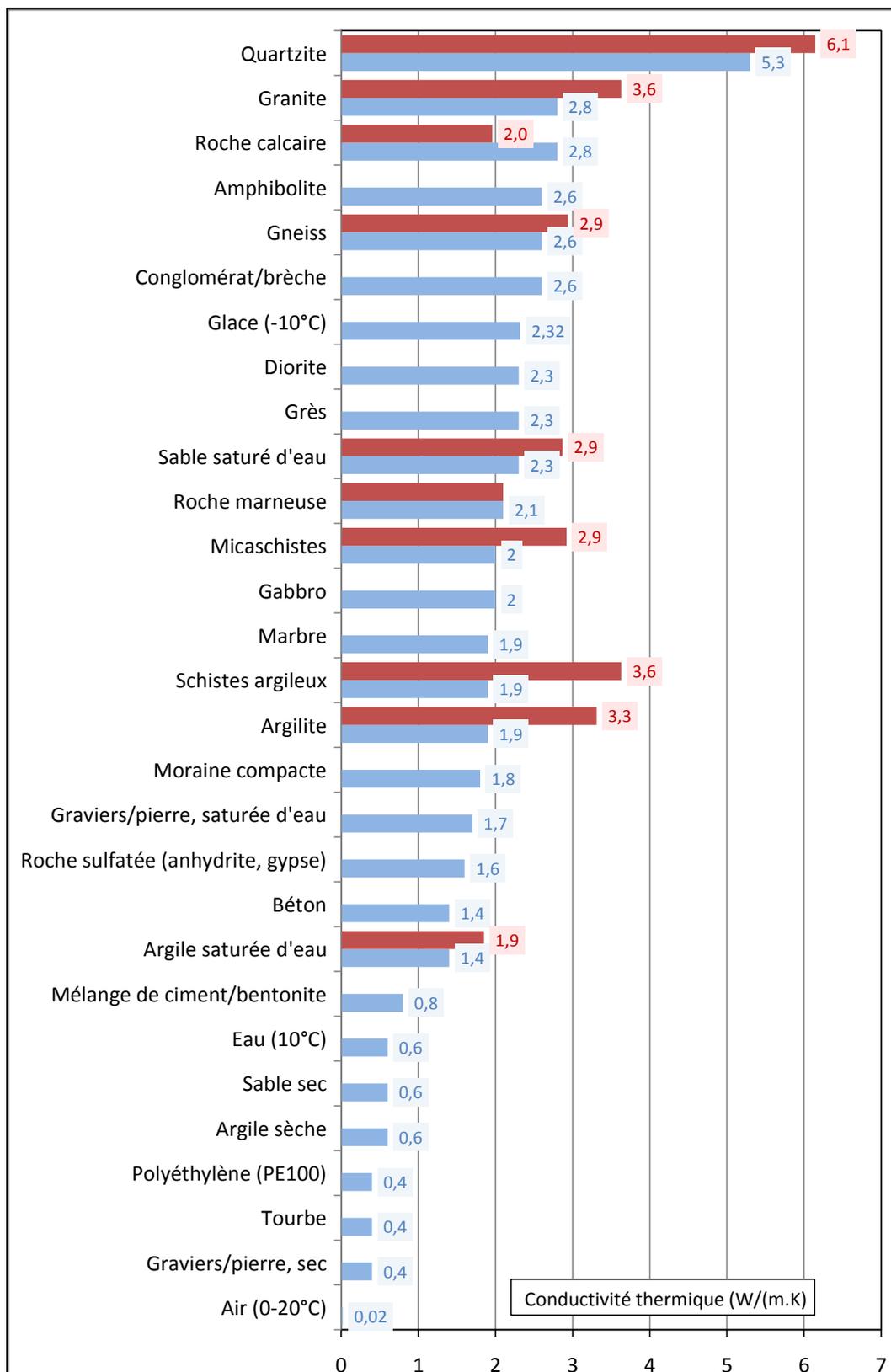


Illustration 4 - Analyse comparative entre les propriétés thermiques théoriques des roches et substrats (norme suisse SIA-384/6 relatives aux SGV) et des résultats de 48 TRT.

### Contexte géologique

Le niveau de connaissance des lithologies rencontrées doit être apprécié pour la validité de la coupe.

Le niveau d'hétérogénéité des formations, pour la représentativité de la valeur, exprimé sous forme d'équations  $(H1 \cdot \text{LithoA} + H2 \cdot \text{LithoB} \dots) / H_{\text{totale}} = K_{th1}$ , doit être mis en perspective pour noter le niveau d'approximation.

La recherche de données diagraphiques de type gamma-ray pourrait être un plus dans l'appréciation des teneurs en argile, notamment lorsqu'il y a présence d'un profil d'altération de la roche bien développé (> 20 ou 30 m).

### Contexte climatique

Bien que les variations saisonnières soient insignifiantes pour la conductivité thermique des roches (les effets des variations de la température extérieure se font ressentir jusqu'à environ 20 m de profondeur, au-delà la température du sous-sol est constante). On conservera toutefois la date de réalisation du TRT à laquelle la température moyenne du terrain a été mesurée.

L'illustration 5 présente la température moyenne sur le sol métropolitain établi par Météo France. L'illustration 6 indique la valeur de la température du terrain mesurée lors du TRT.

Ces quelques valeurs tendent déjà à faire apparaître un lien entre une zone géographique et les températures mesurées (en prenant en compte l'altitude du site, et pour une profondeur donnée).

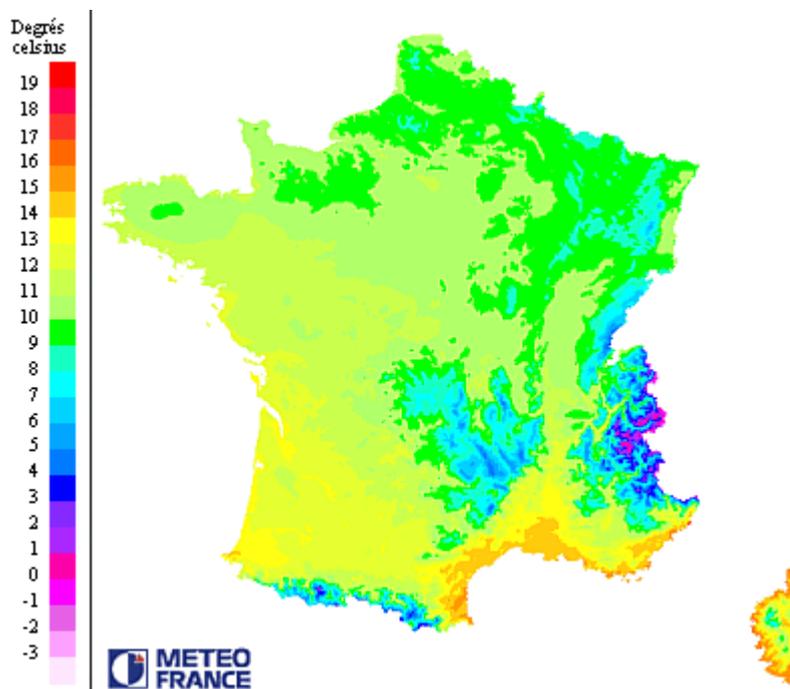


Illustration 5 - Température moyenne sur le sol métropolitain établi par Météo France.

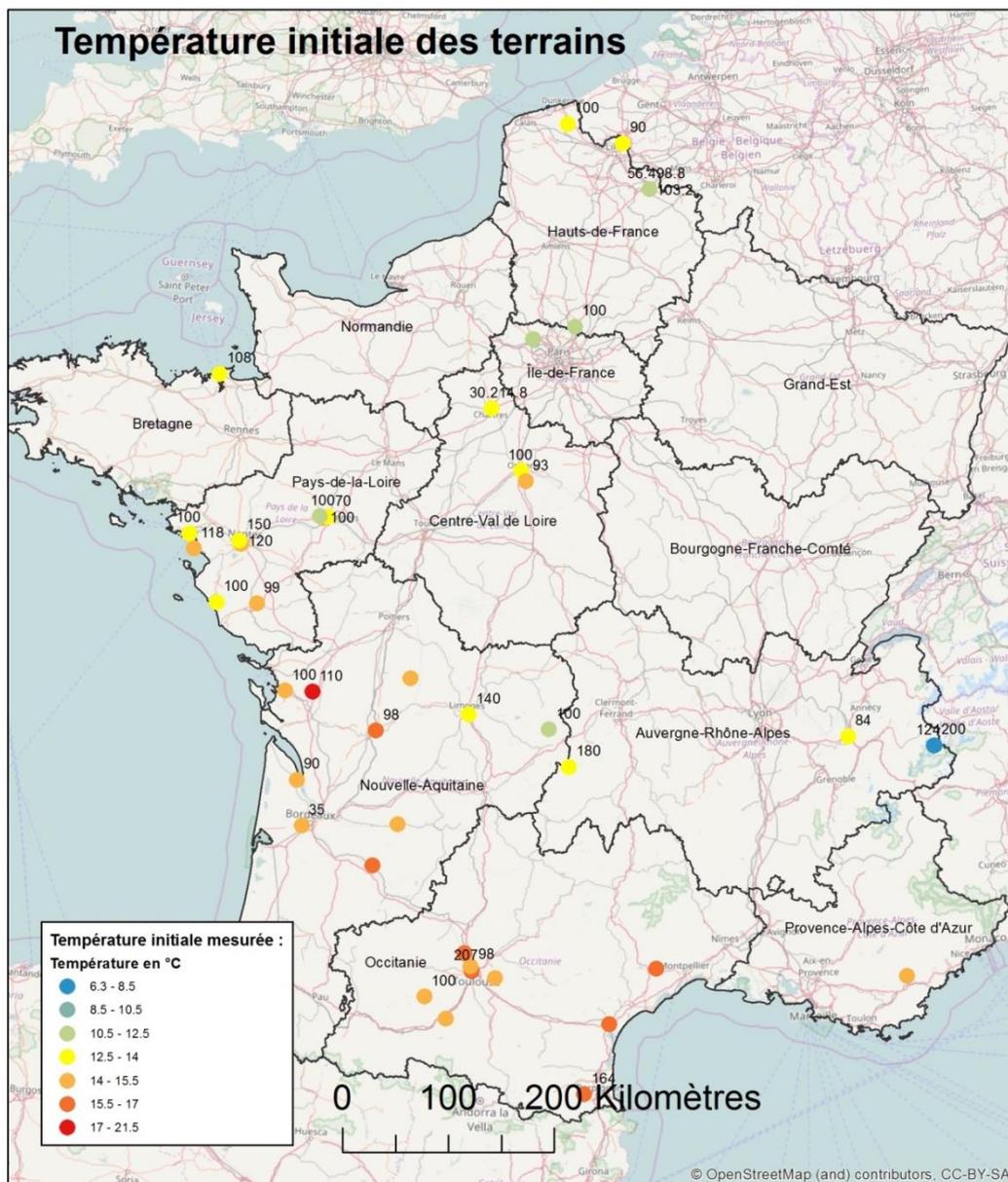


Illustration 6 - Température initiale des terrains et profondeur d'investigation associée.



### 3. État des lieux de la cartographie des ressources géothermiques pour des installations de sondes géothermiques verticales (SGV)

#### 3.1. INVENTAIRE DES ATLAS DE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR SGV EN FRANCE

Un état des lieux a été entrepris afin d'inventorier et d'analyser les études menées pour la connaissance du potentiel des ressources géothermiques pour des installations de Sondes Géothermiques Verticales.

L'atlas du potentiel géothermique pour SGV a déjà été réalisé pour les régions suivantes : le secteur de Nantes Métropole pour la région Pays-de-la-Loire, la Bourgogne-Franche-Comté, la partie Rhône-Alpes de la région Auvergne-Rhône-Alpes, la Provence-Alpes-Côte d'Azur et la région Centre-Val de Loire (voir Illustration 7).

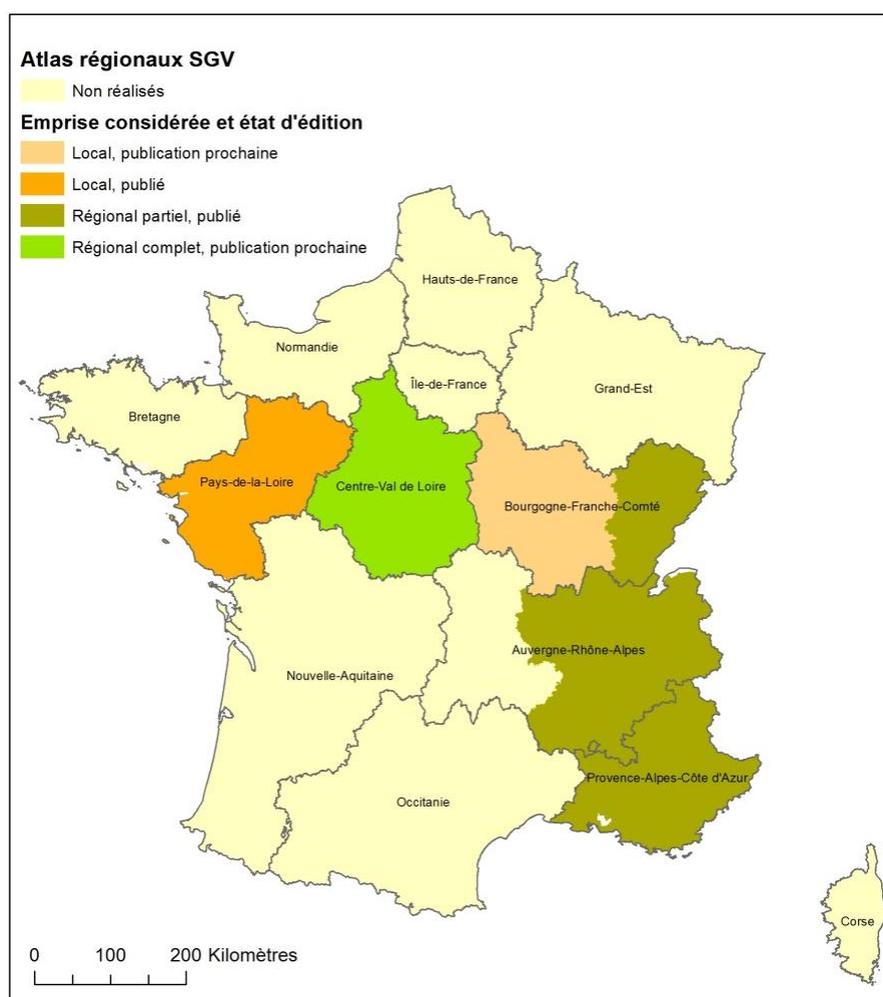


Illustration 7 - État de publication des atlas régionaux des ressources géothermiques pour installations sur SGV.

Les cartes des régions Franche-Comté, Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur sont accessibles sur le site internet <http://www.geothermie-perspectives.fr/>. Les cartes réalisées de Bourgogne et de Centre-Val de Loire seront publiées prochainement. Pour les autres régions, il n'existe pas de calendrier pour la réalisation des cartes de potentiel.

Différentes méthodologies s'appliquent pour exprimer le potentiel d'un territoire en énergie géothermique, en raison des spécificités du territoire. Elles sont exposées dans les chapitres suivants.

Enfin, l'expression du potentiel s'exprime soit en gammes de valeurs (1) d'une puissance spécifique moyenne déterminée (en W/m), (2) d'une conductivité thermique moyenne approchée (en W/(m.K)) ou bien en classes de favorabilité qui découlent soit d'une analyse multicritère, en y intégrant d'autres paramètres et contraintes en fonction du niveau de connaissance locale, soit d'une traduction des valeurs déterminées.

Les classes de profondeur des terrains caractérisés sont variables et/ou multiples tout en étant comprises entre 50 et 200 m.

### **3.2. RÉGION PAYS DE LA LOIRE : NANTES MÉTROPOLE**

Méthode employée : à partir d'un échantillon de 173 forages, pour lesquels on disposait d'un log géologique détaillé, il a été créé une bibliothèque comprenant 11 « lithologies simplifiées » différentes. Il a ensuite été attribué à chacune de ces lithologies simplifiées une conductivité thermique minimale, moyenne et maximale, en se basant sur un abaque tiré du SIA D025 OFEN (Suisse ; Base de dimensionnement de systèmes exploitant la chaleur du sous-sol à basse température - mai 1988). Dans cette approche, il a été distingué le cas d'un terrain sec d'un terrain saturé en eau. La valeur moyenne de la conductivité thermique des lithologies simplifiées rencontrées varie de 0,25 pour de l'argile à 7,7 W/(m.K) pour du quartz en terrain sec. En terrain saturé en eau, les valeurs correspondantes augmentent et passent à 1,4 W/(m.K) pour l'argile, mais restent inchangée pour le quartz. Sur cette base, une conductivité moyenne de chacun des forages a été calculée pour une longueur totale de 100 m. Le résultat final est présenté sous forme d'une carte de puissance d'échange calculée en utilisant l'abaque établi par B. Sanner (D-35390 Giessen), qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain pour une série de conditions d'exploitation bien définies. La carte du potentiel géothermique ainsi défini est présentée sur l'illustration 8. Les puissances extractibles calculées sont comprises entre 4 et 5,5 kW pour des sondes de 100 m de profondeur.

Rapport BRGM/RP-56333-FR : évaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole (janvier 2009).

Maillage : sans. Cartographie par unités fonctionnelles.

Emprise : partielle sur le territoire de Nantes Métropole.

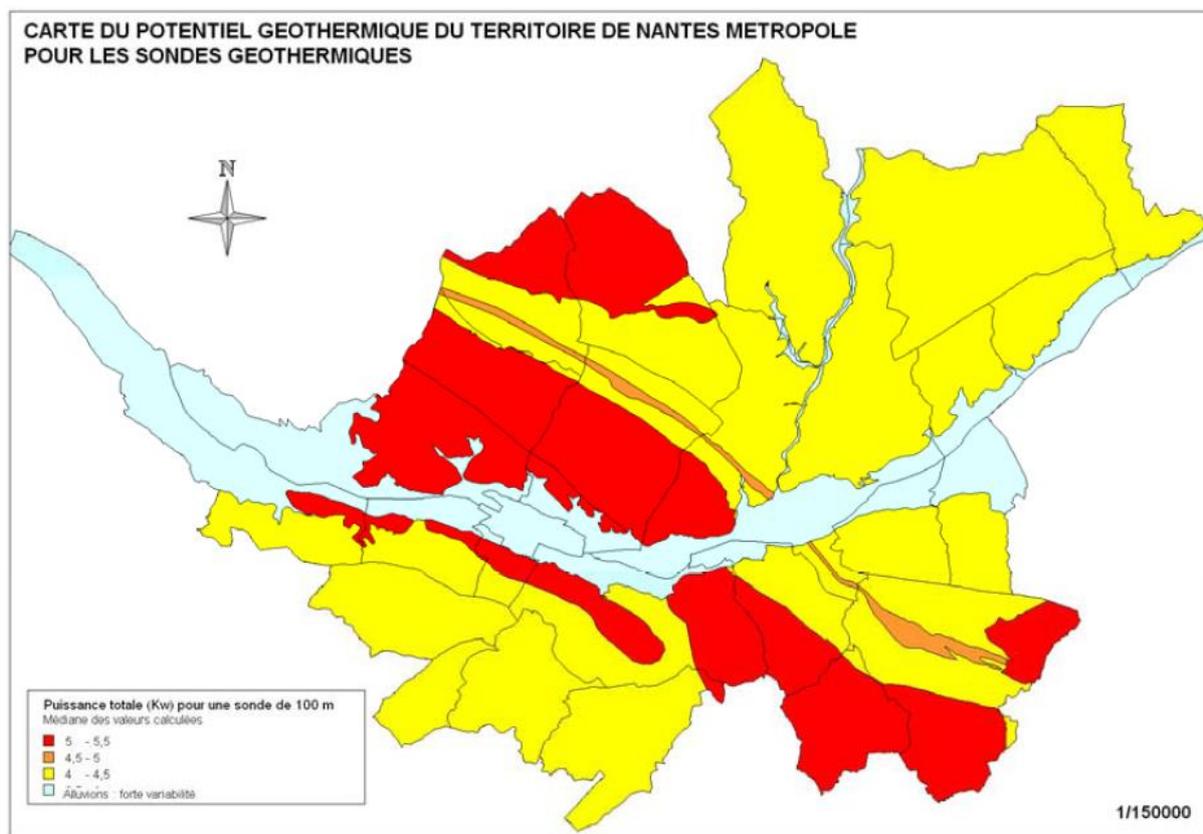
Profondeur représentée : 0-100 m.

Données empiriques de conductivité thermique : approximation des conductivités min-max aux différentes lithologies simplifiées, à partir de la bibliographie (SIA D025 OFEN - Suisse - 05/1988) ; puissances par mètre linéaire à partir de l'abaque B. Sanner (D-35390 Giessen).

Données en entrée : Logs validés de 173 forages et carte géologique harmonisée à 1/50 000.

Classes : Plusieurs expressions de puissances extractibles : (1) puissance linéaire W/m, (2) puissance totale pour une SGV de 100 m en kW.

Résultat cartographique :



*Illustration 8 - Carte du potentiel géothermique du territoire de Nantes Métropole pour des sondes géothermiques (profondeur 100 m).*

Les secteurs recouverts par des alluvions ont été volontairement exclus de l'analyse en raison du faible nombre de logs de forage pour l'approche statistique, et d'une forte variabilité supposée des propriétés thermiques de tels contextes.

Géothermie Perspectives : Atlas non publié sur le site internet.

### 3.3. RÉGION FRANCHE-COMTÉ

Méthode employée : partant du principe que la réalisation d'une sonde géothermique verticale pouvait présenter des inconvénients dans les terrains contenant des roches évaporitiques ou des cavités importantes comme une faille ou un karst, la démarche a consisté à réaliser une carte qui traduit le risque géologique lié à la réalisation de SGV. Ce risque géologique a été évalué à partir des critères suivants : épaisseur du recouvrement au-dessus de l'ensemble karstique, densité des désordres karstiques observés en surface, potentiel de dissolution des formations géologiques, présence de failles. Cette cartographie ne donne par contre aucune indication sur la conductivité thermique des terrains ou la puissance thermique extractible. On aboutit ainsi à une carte avec 5 classes de potentiel allant de « Favorable » à « Très défavorable » (Illustration 9). Il s'agit ici davantage d'une carte de risque géologique que d'une carte du potentiel géothermique de la région.

Rapport BRGM/ RP-58768-FR : inventaire du potentiel géothermique très basse énergie de la région Franche-Comté (août 2010).

Maillage : 500 m.

Emprise : partielle.

Profondeur représentée : 0-200 m.

Données empiriques de conductivité thermique : non utilisée.

Données en entrée : harmonisation régionale des cartes géologiques harmonisées. Réalisation de logs lithostratigraphiques simplifiés par secteurs (paléogéographie) pour évaluer les puissances des formations.

Méthodologie : analyse multicritère. Codage selon les regroupements stratigraphiques avec informations sur la formation à l'affleurement, sa nature et son épaisseur.

Classes : 5 classes de « très défavorable » à « favorable », en fonction du risque géologique des formations géologiques traversées.

Résultat cartographique :

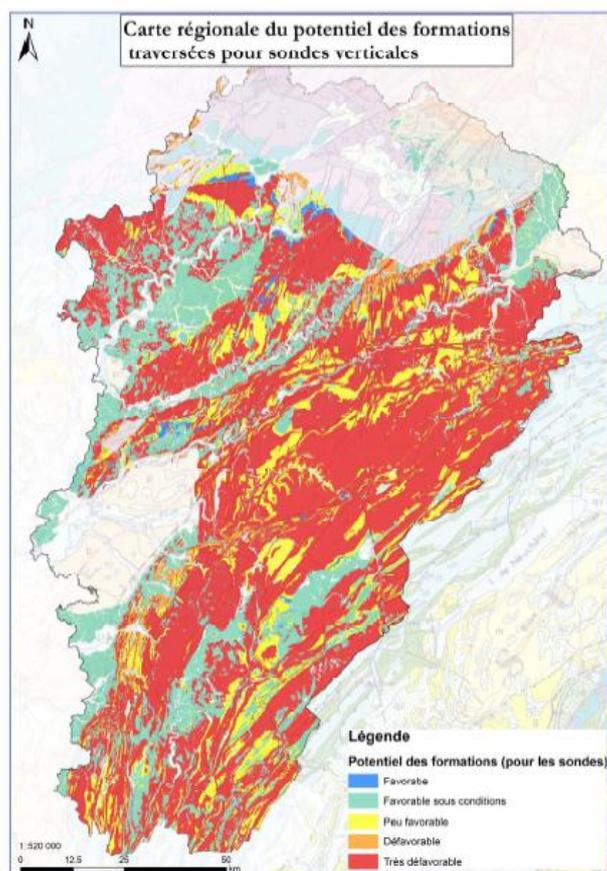


Illustration 9 - Carte régionale de Franche-Comté du risque géologique pour sondes géothermiques verticales.

Géothermie Perspectives : Atlas publié sur l'espace cartographique.

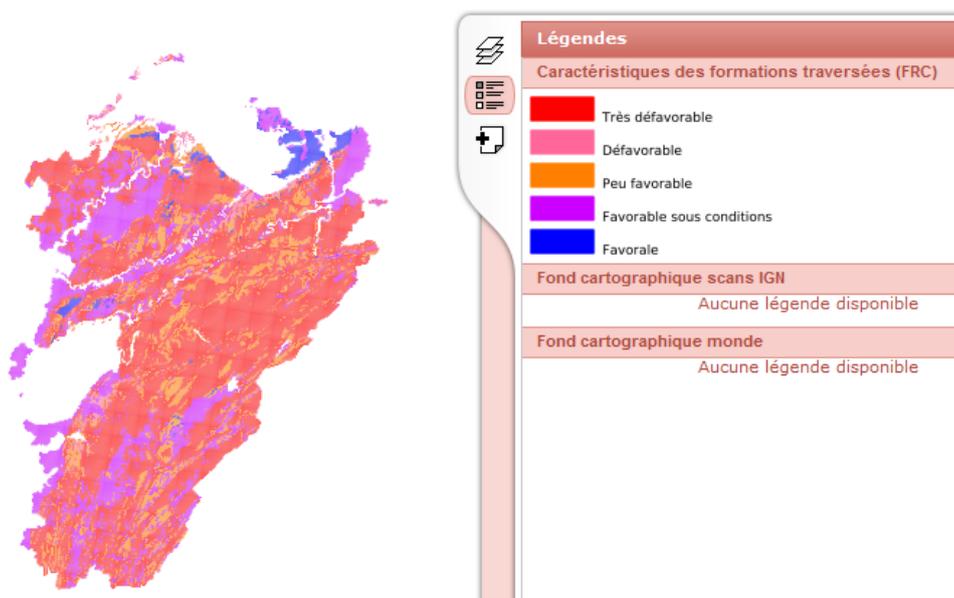


Illustration 10 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Franche-Comté).

### 3.4. RÉGION RHÔNE-ALPES

Méthode employée : la carte du potentiel géothermique pour SGV de la région Rhône-Alpes tient compte d'une part du risque géologique dû à la présence de cavités karstiques ou de formations solubles comme le gypse, et aux terrains sujets à des mouvements de terrain, d'autre part de la conductivité thermique des formations géologiques à l'affleurement. Les zones présentant un risque géologique ont été exclues de la carte du potentiel géothermique. Le rapport d'étude fournit les valeurs des conductivités thermiques retenues pour 70 types de roches différentes. Le tableau de ces données indique les valeurs minimale, moyenne et maximale des conductivités, en présence et en l'absence d'eau. Le rapport ne donne par contre pas la source de ces données (Illustration 11). Cette carte présente l'inconvénient de n'indiquer que la valeur de la conductivité thermique des terrains à l'affleurement (Illustration 12).

Rapport BRGM/RP-60684-FR : inventaire du potentiel géothermique en région Rhône-Alpes (mars 2012).

Maillage : non / Entités des cartes géologiques harmonisées.

Emprise : partielle, les secteurs pour lesquels les SGV ne sont pas recommandées sont exclus.

Profondeur représentée : formations à l'affleurement de la carte harmonisée.

Données empiriques de conductivité thermique : présentées en Annexe 3 du rapport d'étude (p. 175), pas de référence source mentionnée.

Données en entrée : cartes géologiques harmonisées (1/50 000).

Classes : 5 gammes de conductivités thermiques, de 1 à 5, en W/(m.K).

Type de roche	Conductivité thermique W/m <sup>2</sup> /K					
	Sec			Saturé d'eau		
	min	Sec typique	max	min	typique	max
Amphibolite	2.29	2.46	2.69	2.44	2.78	3.07
gneiss (Augen-)	2.92	3.265	3.61	3.72	4.135	4.55
Argile	2	2.7	3.4	2	2.7	3.4
Argile limon	0.4	0.5	1	0.9	1.7	2.3
Bazalte	1.3	1.7	2.3	1.3	1.7	2.3
Bentonite	0.5	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8
Béton	0.9	1.6	2	0.9	1.6	2
Breccia	2.84	3.48	4.34	3.27	3.85	4.31
Calcaire	2	2.97	4.41	2.22	3.18	5.16
Calcaire bioclastique	3.17	3.19	3.21	3.22	3.265	3.31
Calcaire bioclastique siliceux	2.95	3.555	4.16	4.87	5.015	5.16
Calcaire biotritique	3.01	3.14	3.27	3.05	3.235	3.42
Calcaire congloméré?	2.72	2.73	2.74	2.96	3.17	3.38
Calcaire de dune	2.33	2.41	2.49	2.55	2.59	2.63
Calcaire dolomitique	2.71	2.725	2.74	2.76	2.805	2.85
Calcaire (recifs coraliens)	2.7	2.775	2.85	2.77	2.855	2.94
Calcaire marbre	2.46	2.48	2.5	2.86	2.875	2.89
Calcaire marneux	2.27	2.285	2.3	2.49	2.51	2.53
Calcaire micritique	3.02	3.035	3.05	3.08	3.115	3.15
Calcaire pelagique	2.78	2.81	2.84	2.84	2.925	3.01
Calcaire siliceux	3.295	3.33	3.365	3.445	3.4875	3.53
Calcaire sublithographique	3.1	3.11	3.12	3.29	3.305	3.32
Conglomérat	2.51	2.91	3.24	3.49	3.64	3.76
Diorite	2.08	2.23	2.46	2.36	2.61	2.8
Dolomite	4.22	4.71	5.09	4.99	5.26	5.53
Quartz (galet/cailloux)	3.635	3.9	4.165	4.675	4.835	4.995
gabbro	1.7	1.9	2.5	1.7	1.9	2.5
Gneiss	1.48	2.78	3.61	2.84	3.7	4.55
Gneiss granitique	2.32	2.6275	3	3.38	3.605	3.94
Gneiss monzonitique	2.94	3.025	3.11	3.58	3.62	3.66
Granite	2.1	3.4	4.1	2.1	3.4	4.1
Monzonite	2.99	2.99	2.99	3.26	3.305	3.35
Granodiorite	2.12	2.2075	2.46	2.52	2.72	2.8
Gravier sec	0.4	0.4	0.5	1.8	1.8	1.8
Grès	1.56	2.57	3.86	2.34	3.2	4.16
Grès marneux	1.56	1.625	1.69	3.23	3.325	3.42
Grès quartz calcite	3.11	3.11	4.16	4.16	4.16	4.03
Grès rose	1.6	2.26	2.95	2.55	3.2275	4.03
Gypse	1.08	1.24	1.34	1.38	1.81	2.76
Gypse à bande	1.33	1.335	1.34	1.67	2.215	2.76
Kinzigit	2.58	2.71	2.84	3.61	3.96	4.31
Marbre	2.49	3.88	6.03	2.61	4.54	6.08
Marbre à bande	3.93	4.16	4.39	5.33	5.505	5.68
Marbre dolomitique	5.76	5.895	6.03	5.89	5.985	6.08
Marne	1.5	2.1	3.5	1.5	2.1	3.5
Méta-conglomérat	2.51	2.61	2.71	3.62	3.69	3.76
Méta-gabbro	2.61	2.65	2.69	3.01	3.04	3.07

Type de roche	Conductivité thermique W/m <sup>2</sup> /K					
	Sec			Saturé d'eau		
	min	interm	Max.	Min.	Interm.	max
Méta-quartzite	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Micaschiste	3.24	3.415	3.59	3.5	3.735	3.97
Micaschiste albitique	2.17	2.72	3.27	2.96	3.505	4.05
Monzonite	2.99	2.99	2.99	3.26	3.3	3.35
Morsine	1	2	2.5	1	2	2.5
Oolithe calcaire	2.23	2.5325	2.78	2.82	2.845	2.88
Ortho-gneiss mylonitique	2.92	3.08	3.24	3.81	3.835	3.86
Pegmatite	3.69	3.72	3.75	4.62	4.78	4.93
Péridotite	3.8	4	5.3	3.8	4	5.3
Quartzite	2.39	4.71	5.83	3.25	6.17	8.44
Radiolarite	3.99	4.1	4.22	3.91	4.14	4.36
Rhyolithe	3.1	3.3	3.4	3.1	3.3	3.4
Sable	0.3	0.4	0.8	1.7	2.4	5
Roche argileuse limoneuse	1.1	2.2	3.5	1.1	2.2	3.5
Schiste	1.9	3.12	5.2	2.77	3.93	5.87
Schiste argilleux	2.85	2.87	2.89	2.9	2.92	2.94
Schiste quartzeux	2.99	3.715	4.44	3.56	4.22	4.88
Schiste vert	2.04	2.29	2.54	2.77	2.94	3.11
Serpentinite	2.39	2.83	3.24	2.42	3.37	5.89
Sel	5.3	5.4	6.4	5.3	5.4	6.4
Shiste calcique	1.9	3.33	5.20	3.09	4.31	5.87
Siltstone	2.56	2.67	2.78	2.87	2.9	2.93
Tourbe	0.2	0.4	0.7	0.2	0.4	0.7

Illustration 11 - Conductivité thermique et lithologie des terrains (source non communiquée).

Résultat cartographique :

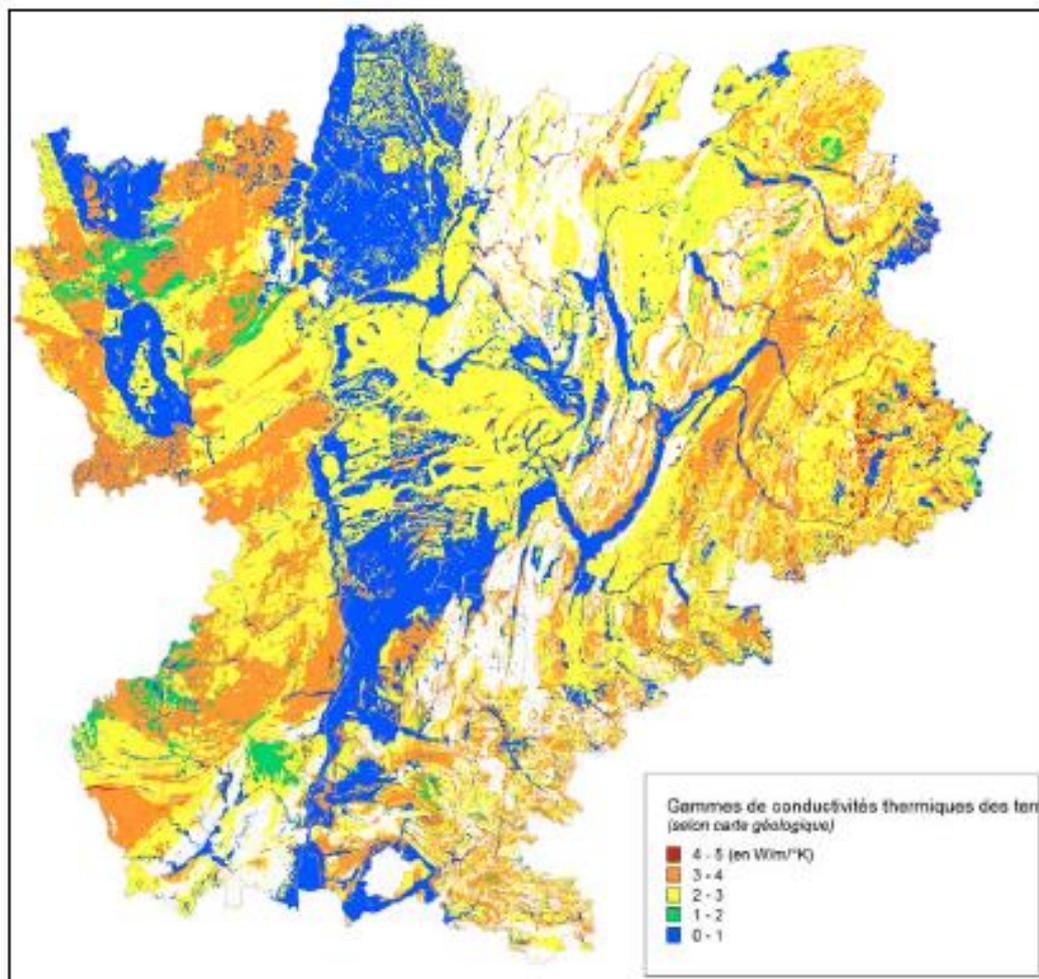


Illustration 12 - Carte du potentiel géothermique de la région Rhône-Alpes.

Géothermie Perspectives : Atlas publié sur l'espace cartographique.

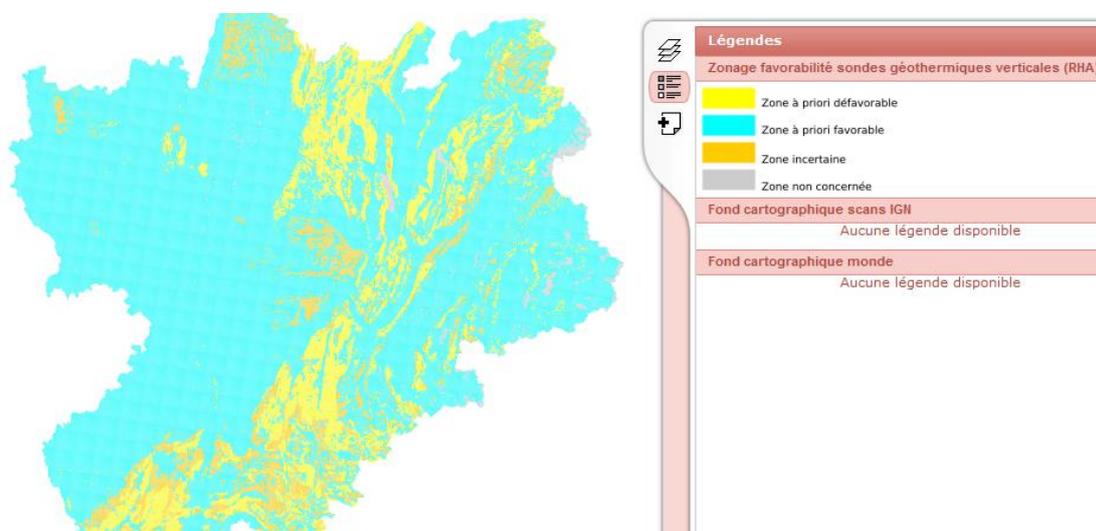


Illustration 13 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Rhône-Alpes).

### 3.5. RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR

Méthode employée : l'étude définit un critère de favorabilité selon quatre classes de puissance thermique soutirable par mètre linéaire de sonde géothermique verticale, exprimée en W/m. Les puissances thermiques soutirables sont issues de l'abaque de Pahud (2002, publié dans la note BRGM-CITEG - Albouy *et al.*, 2005) qui associe une puissance thermique à la nature de la roche. Les quatre classes retenues sont indiquées sur l'illustration 14.

Classe (= note)	1	2	3	4
Critère	défavorable	peu favorable	favorable	très favorable
Gamme Puiss. spec.	<= 25 W/m	25 à 55 W/m	55 à 70 W/m	> 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	12 W/m	40 W/m	62 W/m	75 W/m

CODE	TYPE ROCHES	NOTE	FAMILLE
1	Calcaires massifs ; Calcaires ; Calcaires et dolomies	3	Roches sédimentaires carbonatées
2	Calcaires mameux ; Calcaires et mames ; Calcaires argileux, Calcaires gréseux, Calcaires quartzeux, Calcaires siliceux, Calcaires finement lités, Travertins	2	
3	Mames ; Mamo-calcaire ; Calcaire et mamo-calcaire	2	
4	Dolomies	3	
5	Sables ; Galets ; Dunes marines ; alluvions	1	Roches sédimentaires détritiques non consolidées
6	Grès ; Molasses ; Loess ; Pélites ; Argilites, Calcarénites, Calcaires sableux	3	Roches sédimentaires détritiques consolidées
7	Conglomérats ; Poudingues ; Brèche ; Moraines ; scories et tufs volcaniques ; Cargneules, formations volcano-détritiques ou volcano-sédimentaires	3	
8	Flyschs	3	
9	Granite ; Microgranite ; Aplites ; Pegmatites ; Lamprophyre ; Gabbros ; Diorites	4	Roches magmatiques plutoniques
10	Basalte ; Rhyolite ; coulée de rhyolite et filon de rhyolite ; Laves dacitiques ; Andésites	3	Roches magmatiques volcaniques
11	Gneiss ; Cipolins ; Marbre ; Eclogites, Dolérites, Ophiolites ; Leptynites	4	Roches métamorphiques
12	Schistes ; Micaschistes ; calcschiste ; Quartzites (car souvent intercalés dans schistes et micaschistes) ; Houiller	4	
13	Migmatites ; anatexites ; agmatites	4	
14	Amphibolites	4	Autres
15	Alluvions ; Formations anthropiques ; Eboulis ; Terres noires ; Tourbes récentes ; Gypse ; Moraines	2	
16	Argiles ; Limons	2	

Illustration 14 - Classe de puissance soutirale par types de roches, d'après Pahud (2002).

Cette approche présente deux inconvénients : la carte établie ne tient compte que des roches à l'affleurement, le potentiel des sondes est indiqué uniquement dans les zones en absence d'aquifère. En effet, une telle approche laisse sous-entendre qu'en présence de nappes, une géothermie sur SGV n'aurait aucun intérêt. Ce n'est bien sûr pas le cas, notamment pour les installations géothermiques de faible puissance (< 30 kW par exemple).

Rapport BRGM/RP-61780-FR : atlas des ressources géothermiques en région PACA (décembre 2012).

Maillage : 500 m.

Emprise : partielle.

Profondeur représentée : 0-100 m.

Données empiriques de conductivité thermique : Pahud, 2002 ; Albouy *et al.*, 2005.

Données en entrée : cartes géologiques harmonisées et à dire d'expert.

Méthodologie : regroupement des formations basé sur la lithologie avec 4 notes de classement, moyenne affectée à chaque cellule de 500 m.

Classes : 4 classes de puissance en W/m : < 25 ; 25-55 ; 55-70 ; > 70.

Résultat cartographique :

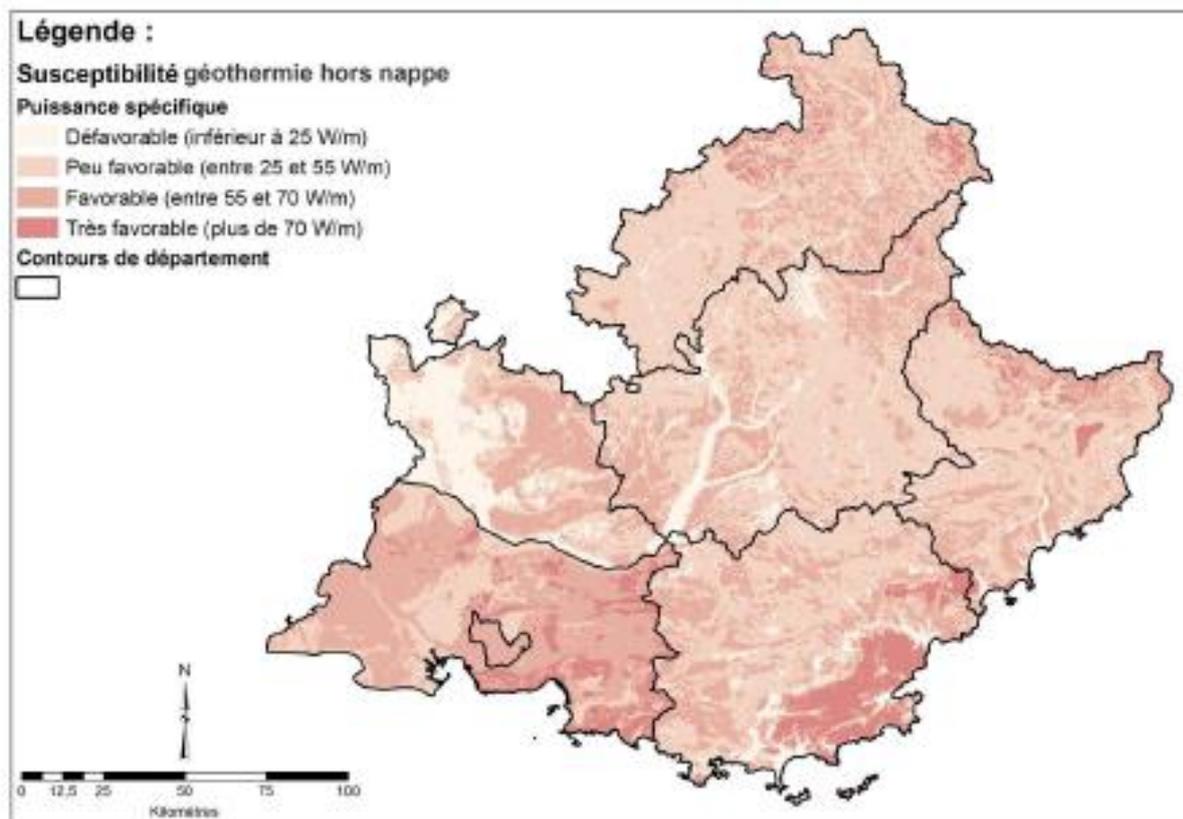
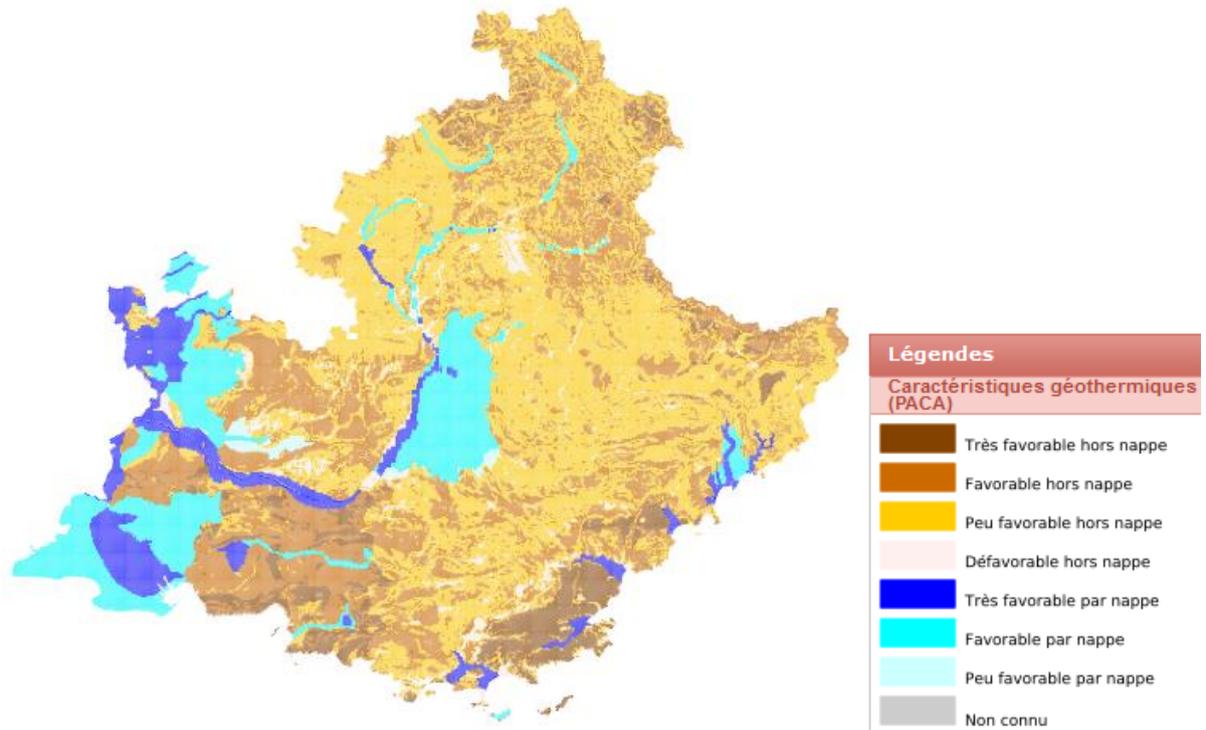


Illustration 15 - Carte du potentiel géothermique de la région PACA.

Géothermie Perspectives :



*Illustration 16 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région PACA).*

### 3.6. RÉGION BOURGOGNE

Méthode employée : les cartes du potentiel géothermique de la région Bourgogne, présentées par tranche de profondeur (0-50 m ; 50-100 m et 100-200 m), s'appuient sur les entités de la carte géologique, découpées puis combinées par type de lithologie dominante, et détaillées sur la verticale à partir de logs géologiques remarquables par tranches de 10 m de 0 à 100 m de profondeur et par tranches de 20 m de 100 à 200 m de profondeur. Au total, 800 logs géologiques de plus de 80 m de profondeur, ont été renseignés dans une base de données qui a servi à l'établissement de cette carte de potentiel. À chaque lithologie dominante a été associée une puissance thermique soutirable, exprimé en W/m, issue de l'abaque de Pahud (2002 ; voir Illustration 14).

Rapport BRGM/RP-66441-FR : atlas du potentiel géothermique très basse énergie du territoire Bourgogne (janvier 2017).

Maillage : 500 m.

Emprise : elle se limite aux principaux bassins de population et d'activité de la Bourgogne.

Type d'atlas et principe de mise en œuvre : cartes du potentiel géothermique régional sur SGV. Etablies à partir des puissances spécifiques en W/m des lithologies dominantes des terrains.

Profondeur représentée : 0-200 m.

Données empiriques de conductivité thermique : données empiriques trouvées dans la littérature (Pahud, 2002).

Données en entrée : cartes géologiques harmonisées ; logs BSS de plus de 80 m de profondeur ; notices des cartes géologiques.

Classes : 5 classes de « modérément favorable » à « très favorable ». Ces classes se basent sur les lithologies dominantes présentes :

Lithologie	Marnes	Zone de transition Marno-calcaire	Calcaires	Grès et schistes	Socle cristallin
Classe (=note)	2	2 à 3	3	3 à 4	4
Potentiel	modérément favorable	de modérément favorable à favorable	favorable	de favorable à très favorable	très favorable
Gamme Puiss. Spec.	25 à 55 W/m	25 à 70 W/m	55 à 70 W/m	55 à >70 W/m	> 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	40 W/m	48 W/m	62 W/m	65 W/m	73 W/m

**Résultat cartographique :**

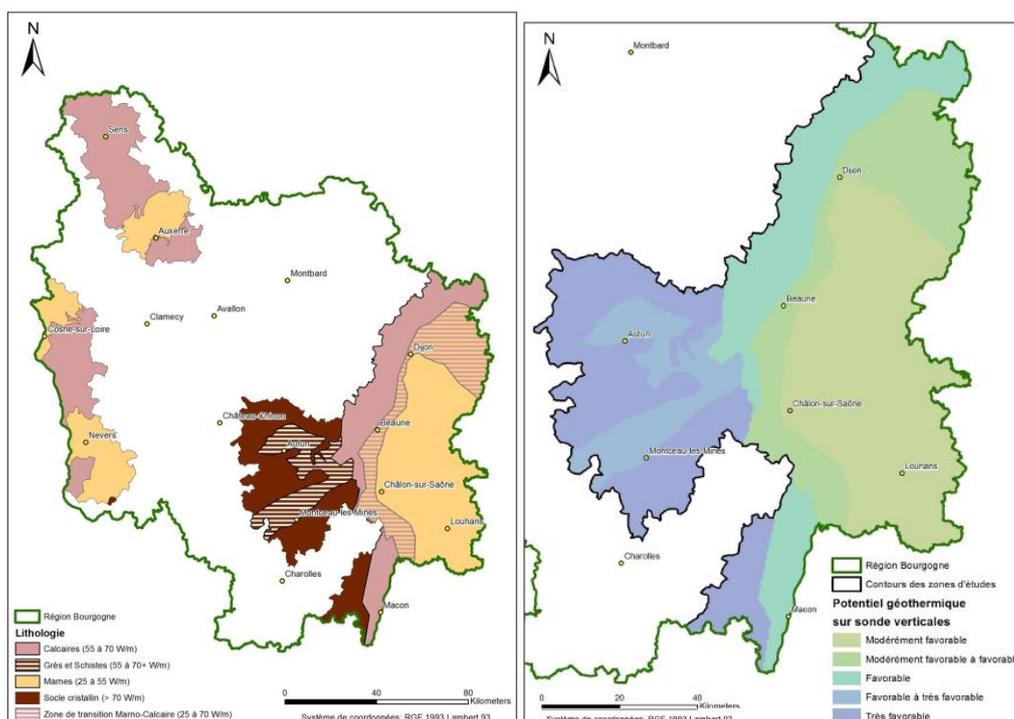


Illustration 17 - Carte du potentiel géothermique sur SGV de la Bourgogne, lithologies dominantes sur 200 m et classes de favorabilité.

**Géothermie Perspectives :**

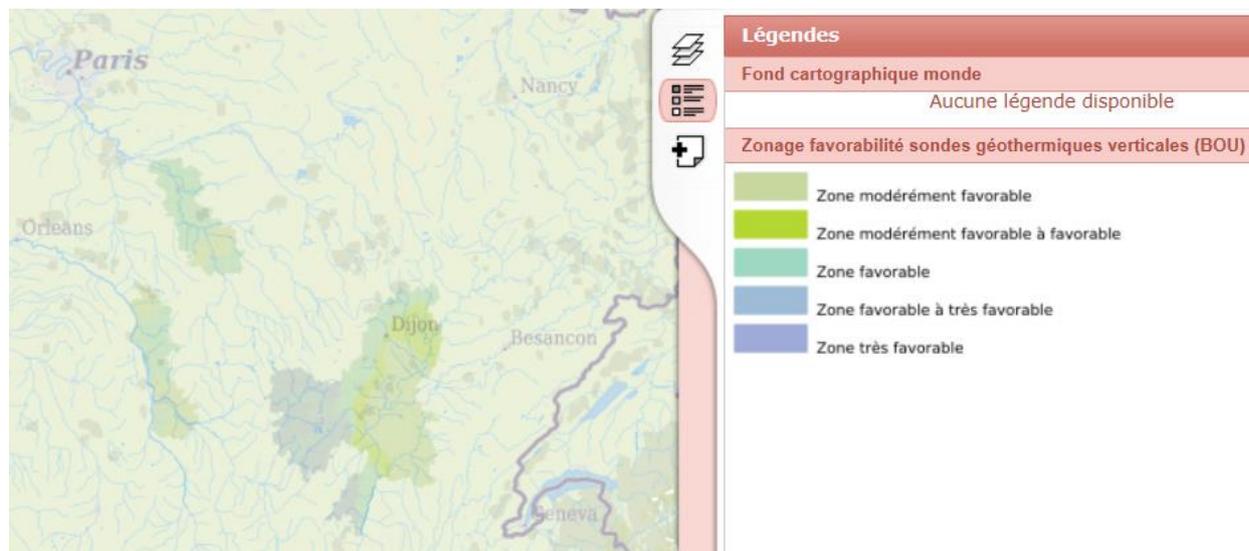


Illustration 18 - Copie d'écran du site géothermie-perspectives (région Bourgogne).

### 3.7. RÉGION CENTRE-VAL DE LOIRE

Méthode employée : la carte du potentiel géothermique de la région s'appuie sur le maillage du système d'information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES) Centre-Val de Loire (mailles de 500 m de côté) pour lequel est défini le log géologique de chacune de ses mailles. Il a ensuite été attribué à chaque niveau géologique une valeur de conductivité thermique selon la lithologie de la formation traversée, permettant le calcul d'une conductivité thermique moyenne selon la profondeur (voir exemple sur l'illustration 19). Trois tranches de profondeur ont été calculées : 0-50 m, 0-100 m et 0-200 m. La correspondance conductivité thermique-lithologie utilisée est issue des données de la norme suisse SIA-384/6 relatives aux SGV (Illustration 2). Cette méthode a été préférée à l'utilisation des données de la norme AFNOR NF X10-970 qui fournit la puissance prélevable par mètre linéaire de sonde (Illustration 20). En effet, la puissance prélevable va dépendre des conditions d'exploitation, en particulier la durée d'exploitation annuelle des sondes géothermiques.

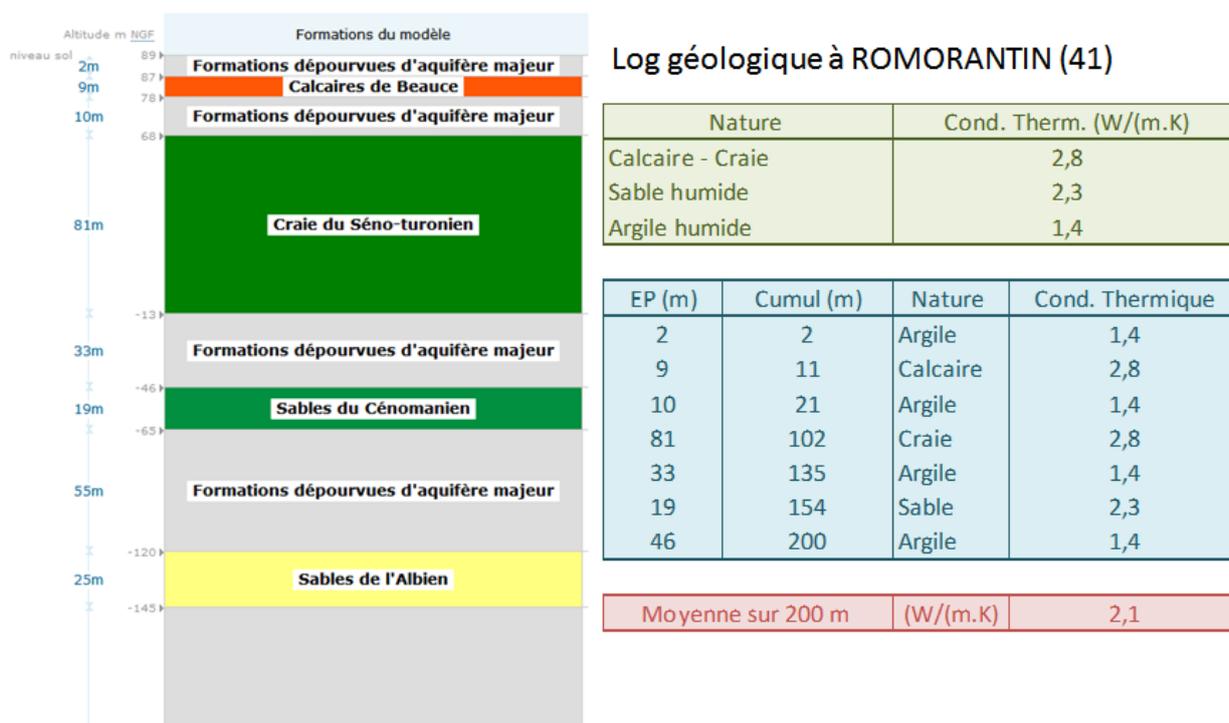


Illustration 19 - Illustration de la méthode de calcul de la conductivité thermique moyenne sur la tranche 0-200 m sur un point situé sur la commune de Romorantin (41).

Type de terrain	Puissance spécifique extraite	
	pour 1 800 h/an (W/m)	pour 2 400 h/an (W/m)
<b>Valeurs générales indicatives</b>		
— sous-sols pauvres (sédiments secs)	25	20
— sous-sols normalement rocheux, sédiments saturés en eau	60	50
— roches consolidées à conductivité thermique élevée	84	70
<b>Roches spécifiques</b>		
— graviers et sables secs	< 25	< 20
— graviers et sables saturés en eau	65 à 80	55 à 65
— argile humide	35 à 50	30 à 40
— calcaire massif	55 à 70	45 à 60
— grès	65 à 80	55 à 65
— granite	65 à 85	55 à 70
— basalte	40 à 65	35 à 55
— gneiss	70 à 85	60 à 70

Illustration 20 - Puissance énergétique prélevable en  $W.m^{-1}$  d'échangeur (source : norme AFNOR NF X10-970 - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale).

Rapport BRGM/RP-66591-FR : mise à jour de l'Atlas des ressources géothermiques sur nappe et carte du potentiel géothermique sur sonde. Région Centre-Val de Loire (février 2017).

Maillage : 500 m.

Emprise : totale.

Type d'atlas et principe de mise en œuvre : carte de conductivité thermique moyenne sur 50, 100 ou 200 m de profondeur, exprimée en  $W/(m.°C)$ . Évaluation du potentiel géothermique sur SGV.

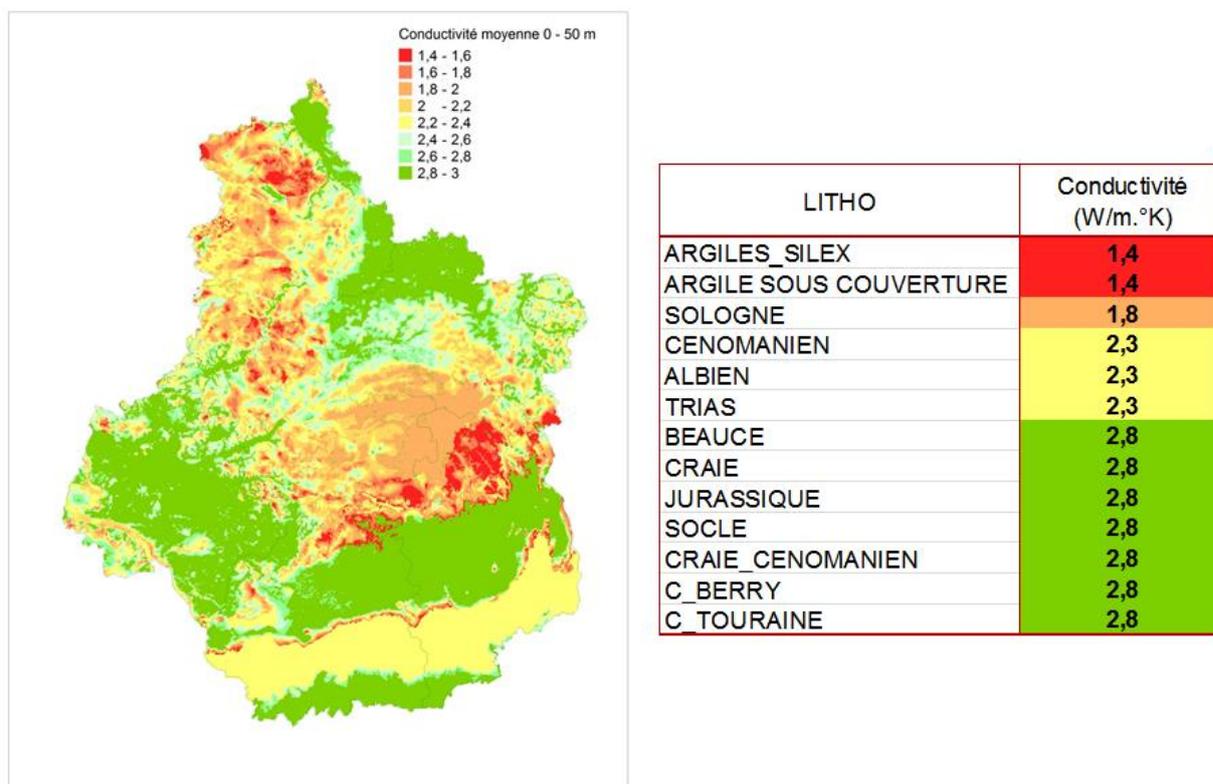
Profondeur représentée : 0-200 m (3 scénarios : 0-50, 0-100, 0-200 m)

Données empiriques de conductivité thermique : norme suisse SIA-384/6 relative aux SGV ; Puissance énergétique prélevable en  $W.m^{-1}$  d'échangeur Pfr (W/ml forage) ; échelle des conductivités thermiques appliquées aux formations géologiques (p. 37).

Données en entrée : modèle du SIGES Centre - Val de Loire (maille 500 x 500 m).

Classes : 8 classes réparties de 1,4 à 3  $W/(m.°C)$ .

Résultat cartographique : Cartes pour les tranches de profondeur 0-50, 0-100 et 0-200 m.



*Illustration 21 - Exemple de carte de conductivité thermique de la région Centre - Val de Loire (profondeur 50 m).*

Géothermie Perspectives : publication de l'atlas prévu courant 2017.

## 4. Proposition d'une méthode d'évaluation de l'énergie extractible par une SGV (méthode G.POT)

Les cartes des puissances extractibles réalisées en Pays de la Loire, en Provence-Alpes-Côte d'Azur et en Bourgogne prennent uniquement en compte la conductivité thermique du terrain. Cette méthode est une première étape, mais certains facteurs impactant les performances de la PAC y sont ignorés :

- la **température initiale du terrain  $T_0$**  (avant exploitation de la sonde). Or une variation de  $T_0$  de l'ordre de  $\approx 1\text{ °C}$  a un impact sur les performances de l'installation similaire à une variation de  $\lambda$  de l'ordre de  $0,5\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,
- les besoins de **rafraîchissement**, le **nombre d'heures de fonctionnement**, l'augmentation des besoins de rafraîchissement et la diminution des besoins de chauffage sur la durée de vie de l'exploitation en réponse au **changement climatique** ;
- le Code minier impose par son **arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance** qu'en phase d'exploitation d'une installation géothermique de minime importance, pour les échangeurs géothermiques fermés, la température du fluide caloporteur qui retourne vers les échangeurs géothermiques fermés doit être comprise entre  $-3\text{ °C}$  et  $+40\text{ °C}$  ;

L'École polytechnique de Turin a développé une méthode, nommée G.POT, qui prend en compte la température initiale du terrain, le nombre d'heures de fonctionnement et les températures extrêmes de fluide (Casasso et Sethi, 2016). Cette méthode calcule la quantité de chaleur pouvant être extraite par une SGV profonde de 100 m. Elle repose sur des modèles physiques simples de conduction de la chaleur à proximité d'une SGV. La méthode a été appliquée dans la Province de Cuneo, un territoire de  $6\,900\text{ km}^2$  dans le nord-ouest de l'Italie, où les besoins de chauffage sont dominants (Illustration 22).

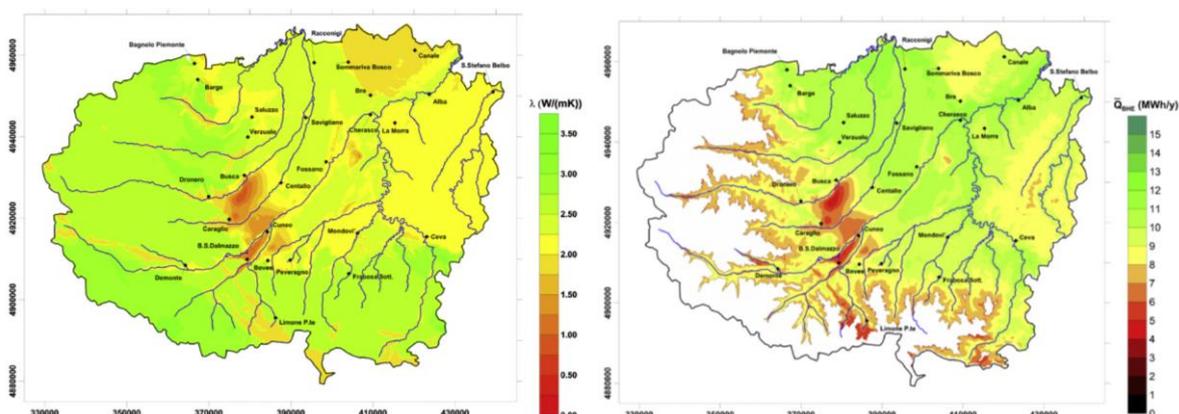


Illustration 22 - Carte de conductivité thermique (gauche). Quantité annuelle de chaleur pouvant être extraite d'une SGV de 100 m, calculée par la méthode G.POT (à droite). Province de Cuneo, Italie (d'après Casasso et Sethi, 2016).

<sup>1</sup> Cf. rapport du projet Interreg Espace Alpin GRETA D3.2.1 - Catalogue of operational criteria and constraints for shallow geothermal systems in the Alpine environment. <http://www.alpine-space.eu/projects/greta/en/project-results/reports/deliverables>



## 5. Bilan et conclusion

Le recueil des données des TRT fait auprès des Directions régionales de l'ADEME et le recensement des données de la BSS du BRGM a permis de commencer à alimenter base de données avec un échantillon de 48 TRT répartis sur l'ensemble du territoire de la France métropolitaine. Ces données ont montré la faisabilité d'associer les valeurs des conductivités thermiques mesurées à la lithologie principale des terrains traversés par les forages. Les résultats obtenus sont conformes à la norme suisse SIA/384/6 relative aux normes. Il serait possible de compléter cet échantillon initial avec d'une part les données de 97 rapports de fin de travaux récoltés lors de ce recueil de données, mais qui restent à dépouiller, d'autre part en continuant la recherche de documents auprès des 11 BE identifiés et équipés pour réaliser des TRT. Il a ainsi été identifié un total de 350 TRT en France métropolitaine potentiellement exploitables pour fournir des données de conductivité et de capacité thermiques des terrains ainsi que des données de température. Une telle base de données permettrait de préciser, pour le territoire français, les valeurs des propriétés thermiques des roches, disponibles dans la littérature, principalement étrangère.

Les cartes des potentiels géothermiques sur sonde, réalisées en France, présentent toutes des approches différentes, rappelées ci-après :

- région Pays de la Loire : **carte de puissance** d'échange calculée en utilisant l'abaque établi par B. Sanner (D-35390 Giessen), qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de SGV à une conductivité moyenne du terrain pour une série de conditions d'exploitation bien définies ;
- région Franche-Comté : **carte des risques géologiques** associés à la réalisation d'une sonde géothermique, sans référence aux propriétés thermiques des terrains traversés ;
- région Rhône-Alpes : **carte des conductivités thermiques** en fonction de la lithologie des terrains à l'affleurement (origine des données utilisées pas indiquée dans le rapport d'étude) ;
- région Provence-Alpes-Côte d'Azur : **carte des puissances extractibles** par mètre en fonction de la lithologie des terrains à l'affleurement (données d'après Pahud - 2002) ;
- région Bourgogne : **carte des puissances extractibles** par mètre en fonction de la lithologie des 100 et 200 premiers mètres (données d'après Pahud - 2002) ;
- région Centre-Val de Loire : **carte des conductivités thermiques** en fonction de la lithologie pour 3 tranches de profondeur (0-50, 0-100 et 0-200 m) ; données : norme suisse SIA-384/6 relatives aux SGV.

Faute de données disponibles, ces cartes n'ont pas été calées avec des valeurs de TRT. Elles ne prennent en compte ni la température des terrains, ni la typologie du besoin thermique, ni les contraintes réglementaires s'appliquant à la température du fluide caloporteur.

Une amélioration de la précision de ces cartes pourrait être apportée avec, d'une part, un calage de celles-ci avec des données de TRT, d'autre part par l'application d'une méthode plus élaborée d'estimation de l'énergie extractible à l'échelle régionale. Une méthode prenant en compte la température des terrains, la typologie du besoin thermique, les contraintes réglementaires s'appliquant à la température de fluide caloporteur, et le changement climatique conduisant à une augmentation des besoins de rafraîchissement, pourrait être développée et mise en œuvre sur un département ou une région test.



## 6. Bibliographie

**Casasso A. et Sethi R.** (2016) - G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765–773.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091>





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

**Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)