

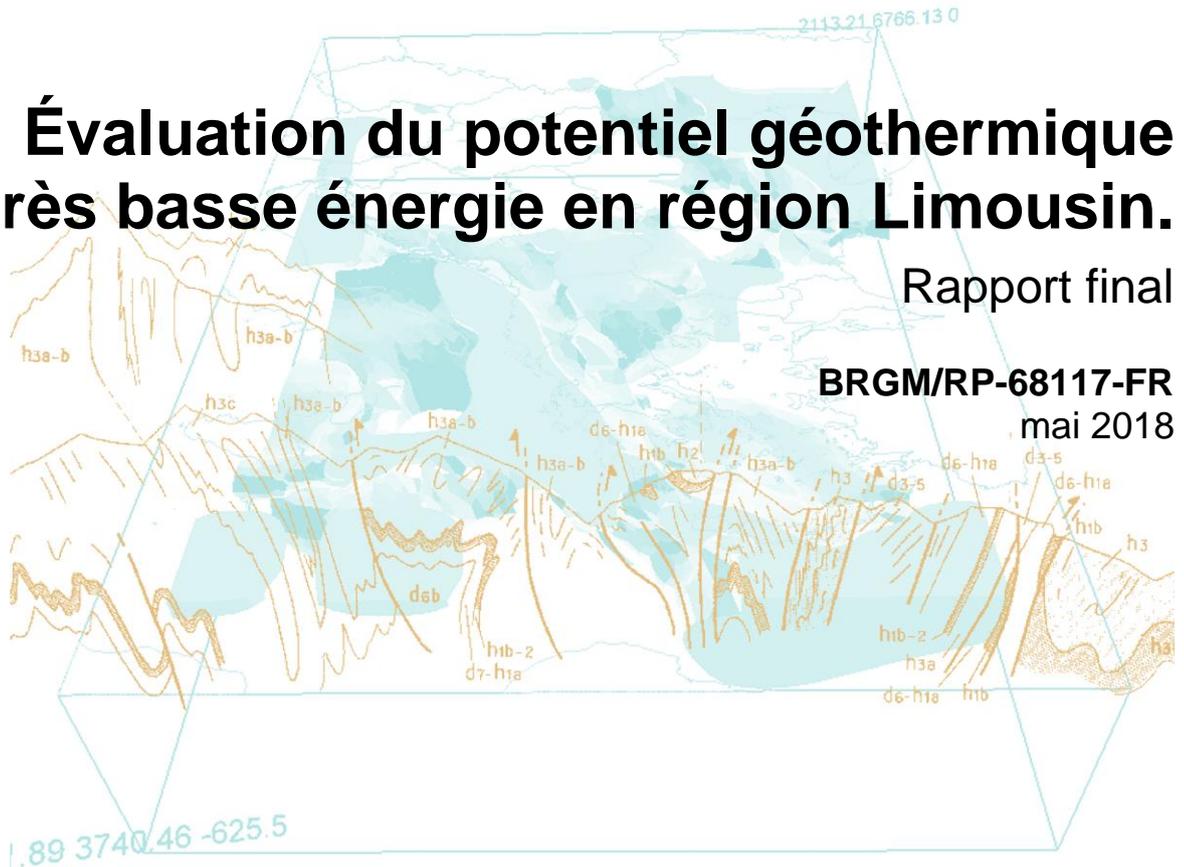


Évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en région Limousin.

Rapport final

BRGM/RP-68117-FR

mai 2018



Évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en région Limousin.

Rapport final

BRGM/RP-68117-FR

Mai 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2018

F. Compère, M. Thinon-Larminach, S. Leconte et L. Abasq

Vérificateur :

Nom : P. Durst

Fonction :

Date : 16/05/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : J.-C. Audru

Fonction : Directeur délégué

Date : 12/07/2018

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : géothermie très basse énergie ; potentiel géothermique ; GMI ; sonde géothermique verticale ; atlas ; adéquation ressources besoins ; Corrèze ; Creuse ; Haute-Vienne ; Limousin ; Nouvelle-Aquitaine

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

Compère F., Thinon-Larminach M., Leconte S. et Abasq L. (2018) – Évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en région Limousin. Rapport final. BRGM/RP-68117-FR, 56 p., 30 fig.

Synthèse

Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, le Conseil Régional Nouvelle-Aquitaine (ex Limousin), l'ADEME (Agence de l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie) et le BRGM ont décidé de réaliser un atlas permettant d'aider à évaluer le potentiel géothermique en région Limousin.

L'atlas du potentiel géothermique (très basse énergie) du Limousin, inclut le gisement exploitable pour les installations de géothermie sur sondes verticales hors nappe (potentiel sur l'ensemble du territoire) et celles concernant les forages géothermiques sur aquifères dans les secteurs où ces derniers sont potentiellement développés (formations sédimentaires).

Dans le cadre de cette étude, l'adéquation ressources / usages a été abordée en comparant :

- les puissances géothermiques exploitables par sondes géothermiques verticales au regard des propriétés thermiques des formations géologiques en présence ;
- les puissances géothermiques qui localement seraient à installer pour satisfaire les besoins thermiques du tissu bâti.

La méthodologie a consisté à ramener à l'unité de surface au sol (W / maille de calcul) toutes les expressions des puissances.

Les calculs des demandes sont effectués bâtiment par bâtiment, logement par logement et les résultats sont restitués dans des mailles carrées de 250 m de côté. La puissance géothermique spécifique représente la puissance géothermique à installer. Elle a été estimée pour le mois le plus froid de l'année (janvier) qui représente une consommation d'énergie égale à environ 18 % de la consommation annuelle.

La solution sondes géothermiques verticales permet, sur près de 100 % des mailles du territoire présentant du bâti, de couvrir les besoins exprimés en puissance géothermique.

Cet atlas doit être vu avant tout comme un outil d'information destiné à aider et orienter les prises de décisions concernant l'adoption de la géothermie comme source de chauffage et/ou de rafraîchissement de bâtiments.

CET ATLAS NE PEUT ET NE DOIT PAS ÊTRE UTILISÉ COMME SEULE SOURCE D'INFORMATION. Il n'a notamment pas vocation à se substituer à une étude préalable à un projet.

Sommaire

1. INTRODUCTION	11
2. Principes généraux de la Géothermie de Minime Importance (GMI)	13
2.1. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE FERMÉ.....	13
2.2. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE OUVERT	14
3. Contextes géologique et hydrogéologique du Limousin	17
3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU LIMOUSIN	17
3.1.1. Les formations géologiques	17
3.1.2. Contexte géodynamique	18
3.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU LIMOUSIN.....	20
3.2.1. En domaine de socle	20
3.2.2. En domaine sédimentaire	23
4. Estimation du potentiel géothermique	25
4.1. POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE SUR AQUIFÈRE SUPERFICIEL EXPLOITÉ PAR LA TECHNIQUE DU DOUBLET GÉOTHERMIQUE.....	25
4.2. POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES (SGV).....	29
4.2.1. Élaboration d'une carte des formations géologiques.....	29
4.2.2. Base de données de conductivités thermiques et de puissances spécifiques	32
4.2.3. Ramener les potentialités géothermiques à l'unité de surface au sol	36
5. Calcul des besoins	37
5.1. BASES DE DONNÉES EXPLOITÉES	38
5.2. DEMANDE THERMIQUE DES BÂTIMENTS ET PUISSANCE GÉOTHERMIQUE À INSTALLER	40
5.2.1. Performances thermiques indicatives pour les bâtiments en fonction de l'année de construction et consommations indicatives d'une PACg.....	40
5.2.2. Puissance thermique installée	41
5.2.3. Puissance électrique et puissance géothermique	42
5.2.4. Consolidation de l'estimation des besoins thermiques avec les bâtiments à usages autres que habitats (chauffage uniquement)	43
5.3. CARTES DES BESOINS EN PUISSANCE GÉOTHERMIQUE SPÉCIFIQUE.....	45

6. Croisement ressources besoins	51
6.1. INDICATEUR DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE SUR SGV : LE TAUX DE COUVERTURE PAR LA MISE EN PLACE DE SGV	51
6.2. CARTOGRAPHIE DU TAUX DE COUVERTURE PAR SGV	52
7. Conclusion	57
8. Bibliographie	59

Liste des figures

Figure 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)	13
Figure 2 : Schéma d'un doublet, puits de production et puits d'injection et échangeur en surface	14
Figure 3 : Échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe)	15
Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Limousin	18
Figure 5 : Schéma structural simplifié du Limousin	19
Figure 6 : Modèle conceptuel d'aquifère de socle en contexte d'altération (d'après R. Wyns).....	20
Figure 7 : 7 % de la surface du territoire limousin est composée de terrains sédimentaires	24
Figure 8 : Débits d'exhaure disponibles (BSS 2015)	26
Figure 9 : Critères de classification des potentialités géothermiques des aquifères (très basse énergie)	27
Figure 10 : Carte du potentiel géothermique sur aquifère	28
Figure 11 : Identification des substrats géologiques (retrait des formations superficielles)	30
Figure 12 : Carte géologique sans les formations de recouvrement.....	31
Figure 13 : Valeurs de conductivités thermiques selon la lithologie des terrains (valeurs moyennes pour des SGV de 200 m de profondeur)	33
Figure 14 : Cartographie à la maille 250 m x 250 m de la conductivité thermique en Limousin	34
Figure 15 : Cartographie à la maille 250 m x 250 m de la puissance spécifique sur SGV en Limousin.	35
Figure 16 : Logigramme suivi pour traiter les données thermiques des bâtiments	37
Figure 17 : Illustration de l'amélioration du géoréférencement de la base de données MAJIC à l'aide de BDParcellaire et BDTopo	39
Figure 18 : Communes du Limousin (en rouge) non couvertes par la BDParcellaire	39
Figure 19 : Demandes thermiques indicatives en fonction de l'année d'achèvement des bâtiments	41
Figure 20 : Demandes en puissance géothermique des logements en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)	42
Figure 21 : Description des entités de la BDTopo	43
Figure 22 : Application du calcul du nombre d'étage et de la puissance	44

Figure 23 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage des bâtiments hors logements selon BD-Topo	46
Figure 24 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS des logements	47
Figure 25 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat individuel – Département de la Haute-Vienne	48
Figure 26 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat résidentiel collectif – Département de la Haute-Vienne.....	49
Figure 27 : Échelle retenue pour la représentation du taux de couverture potentiel par la méthode des SGV	52
Figure 28 : Cartographie du pourcentage de surface bâtie par maille de 500 m x 500 m	54
Figure 29 : Carte du taux de couverture potentiel par la mise en œuvre de SGV de la demande de l'ensemble des bâtiments identifiés (sans prise en compte des surfaces déjà bâties)	55
Figure 30 : Carte du taux de couverture potentiel par la mise en œuvre de SGV de la demande de l'ensemble des bâtiments identifiés (avec prise en compte des surfaces déjà bâties)	56

1. INTRODUCTION

La géothermie présente des avantages spécifiques appréciables qui la distinguent des autres sources d'énergie : indépendance vis-à-vis des éléments climatiques extérieurs, énergie locale, respect de l'environnement, performances énergétique et économique... La filière géothermique a atteint un stade de maturité qui permet depuis plusieurs années sa mise en œuvre dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes sur le territoire national. Les propositions issues des tables rondes du Grenelle de l'Environnement affichent les objectifs suivants : « augmenter de 20 millions de Tep la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique à l'horizon 2020 » afin d'atteindre l'objectif des 23 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique français en 2020. Concernant, la géothermie et les pompes à chaleur, l'objectif est de multiplier par 6 la production d'énergie par géothermie et pompes à chaleur. La déclinaison de ces objectifs effectuée par le comité opérationnel (COMOP 10) propose une multiplication par 4 pour la géothermie profonde.

L'atlas du potentiel géothermique du Limousin, inclut le gisement exploitable pour les installations de géothermie sur sondes verticales hors nappe (potentiel sur l'ensemble du territoire) et celles concernant les forages géothermiques sur aquifère dans les secteurs ou ces derniers sont potentiellement développés (formations sédimentaires).

Cet atlas s'intéresse à la filière de la géothermie très basse énergie qui exploite une ressource d'une température inférieure à 30 °C et nécessite le recours à des pompes à chaleur qui prélèvent cette énergie pour l'augmenter à une température suffisante, pour le chauffage d'habitations et la production d'eau chaude sanitaire. Ces pompes à chaleur fonctionnent à l'électricité et par exemple : pour 1 kWh consommé, elles restituent de l'ordre de 3 à 4 kWh d'énergie, le différentiel provenant de l'énergie puisée dans le milieu naturel. Il est également possible de faire du rafraîchissement sans utiliser la pompe à chaleur. La température moyenne des nappes de faible profondeur ou du milieu cristallin (< 100 m) est en France de l'ordre de 10 à 14 °C et augmente avec la profondeur.

Le potentiel de la ressource géothermale n'est valorisé uniquement si des besoins thermiques sont présents au droit de la ressource. En effet, un des atouts principaux de la géothermie est qu'il s'agit d'une réelle énergie locale (pas de consommations pour le transport notamment), mais le transport de cette énergie nécessitant la mise en œuvre de réseaux, son extension sera nécessairement limitée, que ce soit pour des raisons techniques ou économiques.

Dans le cadre de cette étude réalisée par le BRGM avec le concours financier de la Région et l'ADEME, les concordances possibles entre les ressources géothermales et les besoins thermiques existant en surface sont étudiées. Il s'agit là de quantifier et cartographier un potentiel de développement de la géothermie en région Limousin.

2. Principes généraux de la Géothermie de Minime Importance (GMI)

La géothermie de minime importance, encore appelée géothermie de très basse température, permet d'extraire de l'énergie du sous-sol présente au sein de la terre ou d'une nappe d'eau souterraine afin de la restituer à l'aide d'une pompe à chaleur. L'exploitation de la ressource énergétique, que compose la géothermie, est encadrée réglementairement par le Code minier qui considère « les gîtes renfermés au 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 », comme des mines.

2.1. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE FERMÉ

Les sondes géothermiques verticales (SGV), sont des échangeurs thermiques verticaux qui prélèvent de la chaleur emmagasinée dans le sol par conduction thermique le long d'un ou plusieurs forages (Figure 1). L'ouvrage souterrain constitue l'échangeur thermique où cet échange énergétique avec le sous-sol s'effectue au niveau du forage et de son équipement qui forme un système géothermique. Celui-ci est constitué des éléments de l'espace annulaire, de la sonde permettant la circulation du fluide caloporteur et du fluide en lui-même. Le fluide caloporteur, de composition variable, circule au sein d'une boucle de la sonde (en U ou double U) disposées dans un forage dont l'espace annulaire est comblé par un coulis spécifique (norme NF X-10-970¹).

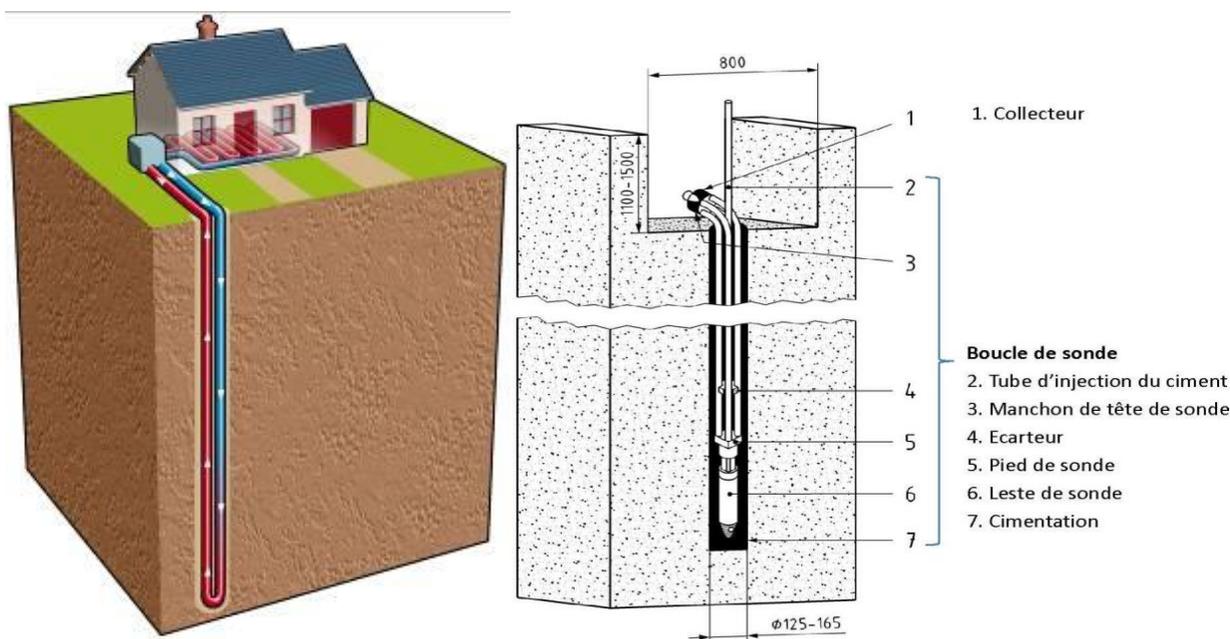


Figure 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)

¹ La norme NF X-10-970 permet de garantir la réalisation d'un ouvrage de capteurs géothermiques verticaux de qualité tout respectant l'environnement. Cette garantie est possible grâce à la définition des règles de l'art, limites de prestation et transferts de responsabilité.

2.2. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE OUVERT

Cette géothermie est aussi appelée géothermie sur aquifère ou doublet géothermique.

Au fluide caloporteur cité précédemment est substituée l'eau pompée dans un aquifère souterrain. Cette eau, prélevée d'une nappe souterraine à partir du puits de prélèvement, circule dans un échangeur thermique en surface, passe ainsi à travers la pompe à chaleur (PAC), puis est réinjectée dans un second puits appelé « puits de réinjection » (Figure 2 & Figure 3). Cet échangeur, composé d'un puits de prélèvement et d'un puits de réinjection, suppose des conditions de productivité (puits de production, d'exhaure) et de rejet (réinjection), dans le milieu souterrain, aptes à des débits de l'ordre de 2 m³/h à 10 m³/h, ou davantage selon la productivité de l'aquifère exploité.

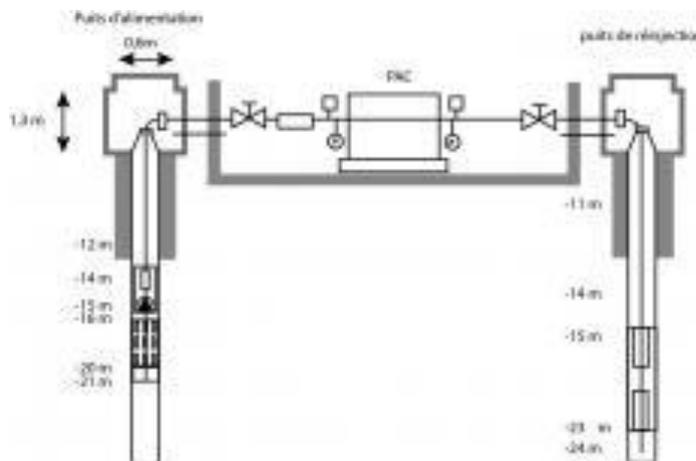


Figure 2 : Schéma d'un doublet, puits de production et puits d'injection et échangeur en surface

Enfin, la réalisation d'un doublet n'est possible qu'en l'absence de recyclage important des eaux réinjectées jusqu'au puits de production :

- soit parce que les deux ouvrages sont suffisamment éloignés pour que le recyclage ne se produise qu'une fois l'installation rentabilisée ;
- soit parce que l'écoulement régional est assez puissant (vitesse d'écoulement de l'ordre de plusieurs mètres par an) pour entraîner par advection les eaux froides (ou chaudes) réinjectées, hors de portée du puits de production. C'est souvent le cas des nappes d'accompagnement des cours d'eau.

L'activité géothermique à l'aide d'un échangeur ouvert induit une variation thermique locale sur la nappe au point de rejet de l'eau dont une part de la « chaleur » a été « pompée » par la PAC.

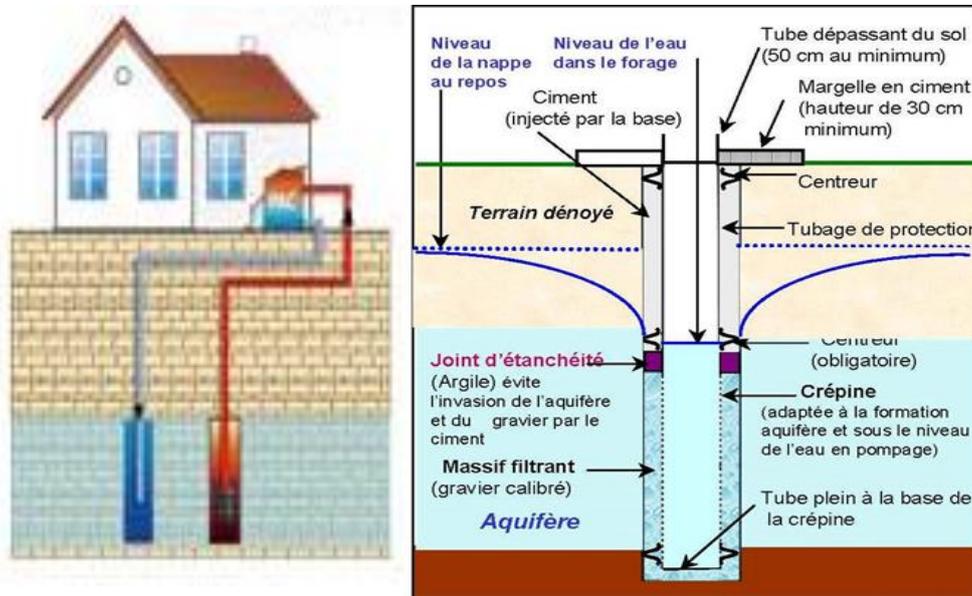


Figure 3 : Échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe)

3. Contextes géologique et hydrogéologique du Limousin

3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU LIMOUSIN

3.1.1. Les formations géologiques

La région Limousin est constituée de deux domaines géologiques fondamentalement différents, le massif cristallin du Massif Central et le bassin sédimentaire d'Aquitaine (Figure 4). Le massif cristallin est largement dominant en superficie. Les formations sédimentaires du bassin Aquitain occupent une petite partie du territoire au Sud-Ouest.

Le socle cristallin est constitué de roches métamorphiques, sédimentaires ou ignées qui recouvrent une large gamme de lithologies. Il s'agit de micaschistes, gneiss et de formations granitiques intrusives, qui couvrent 93 % du territoire limousin. Ces roches sont organisées en grandes unités structurales (Figure 5) qui soulignent cette partie de la chaîne hercynienne d'Europe.

L'unité la plus ancienne, dite « unité autochtone relative », est constituée essentiellement de micaschistes et souligne les grandes zones de failles du Limousin. Viennent ensuite, par-dessus, les unités métamorphiques des gneiss des grands charriages hercyniens, avec l'Unité Inférieure des Gneiss, l'Unité Supérieure des Gneiss et l'Unité de Thiviers. Un complexe leptyno-amphibolique et des roches ultrabasiques soulignent localement les contacts entre unités.

Ce bâti métamorphique hercynien est recoupé par des intrusions granitiques dont les plus importantes sont le complexe de Millevaches, le complexe de Guéret et le complexe de Saint-Sylvestre.

Les premières formations sédimentaires déposées sur le socle hercynien sont les dépôts continentaux des bassins houillers qui soulignent les grands décrochements tardi-hercyniens. Les principaux bassins sont Ahun, Bosmoreau-Les-Mines, Chambon, Argentat, l'Hospital et Lapeau.

Ensuite, viennent les formations de conglomérats, grès et argilites du Permien et du Trias du Sud-Ouest du Limousin, recouvertes par les carbonates de l'ère Secondaire. L'ère Tertiaire est représentée par deux petits bassins sédimentaires du nord du Limousin (Gouzon et Genouillac).

Les formations de l'ère Quaternaire sont représentées, sur l'ensemble du territoire limousin, par des alluvions et des colluvions de versants et de fonds de vallées et par des terrasses anciennes à différentes altitudes.

Notons que diverses phases d'érosion et d'altération, datant principalement de l'ère Secondaire et Tertiaire, ont produit des altérites qui constituent des niveaux argileux ou sableux dans de nombreuses dépressions ou en couverture de reliefs.

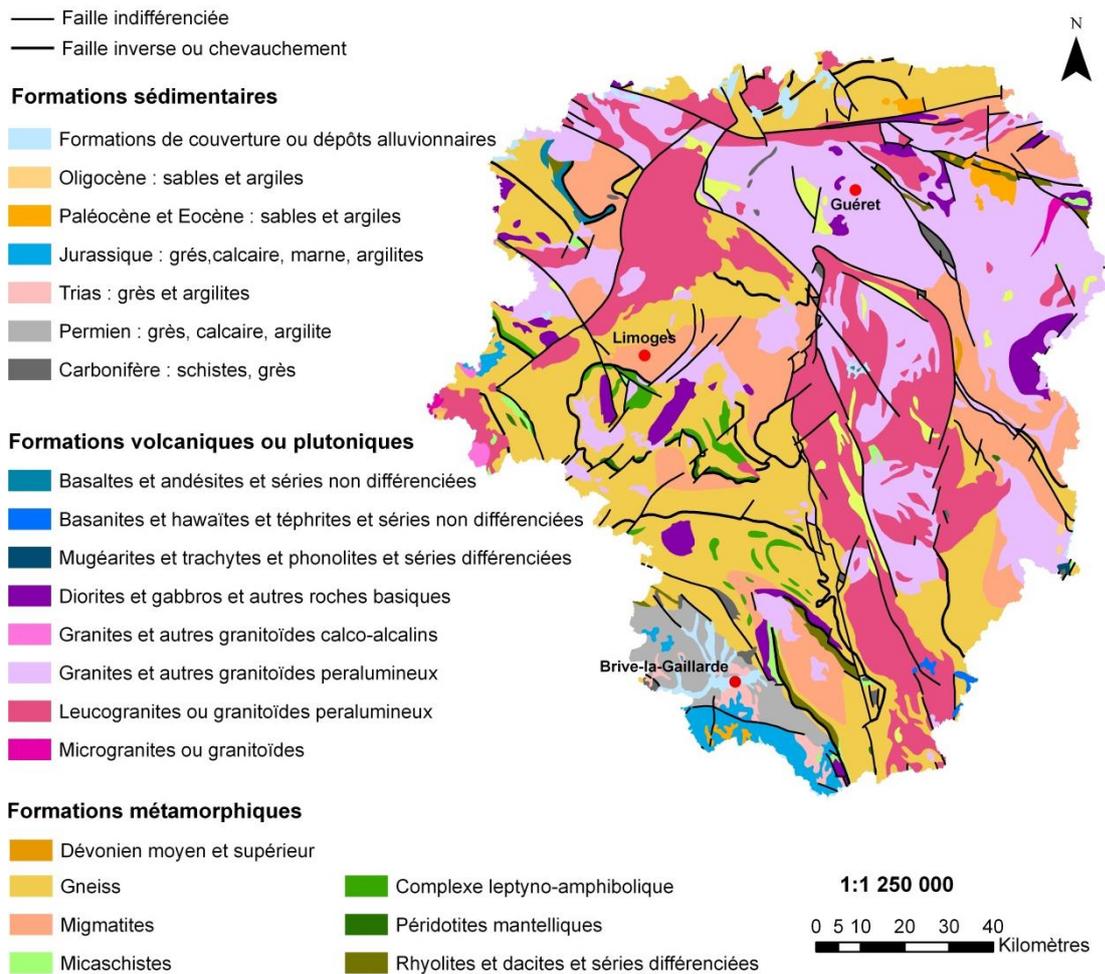


Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Limousin

3.1.2. Contexte géodynamique

Le socle cristallin du Limousin constitue un segment de la chaîne hercynienne d'Europe. Il appartient à un vaste domaine de suture entre le Gondwana et la Laurentia qui va de l'Oural à l'Amérique du Nord.

L'histoire géologique du Massif Central débute au Cambrien. C'est l'âge de mise en place d'un protolithe dont la déformation débutera dès l'Ordovicien. C'est au Carbonifère que les phases de déformation sont les plus intenses. Dans le Limousin, la collision a lieu dans le Dévonien inférieur à moyen (390-380 Ma). L'empilement des nappes gneissiques s'effectue du Dévonien-supérieur au Carbonifère-inférieur (360-340 Ma). Les grands massifs granitiques intrusifs se mettent en place au Carbonifère moyen – Namurien – Westphalien (320-310 Ma). En fin de cycle orogénique, les bassins houillers se creusent le long des grands décrochements tardi-orogéniques (300 Ma).

Un régime tectonique en extension caractérise le Permien avec le dépôt des formations continentales du bassin de Brive. Il se prolonge par une subsidence (affaissement) généralisée au Trias et une transgression sur la bordure sud du Limousin. Il s'agit de la formation du bassin d'Aquitaine. Une sédimentation majoritairement carbonatée se poursuit jusqu'au Jurassique supérieur, marquant la poursuite de la subsidence du bassin Aquitain.

Un calme tectonique apparent caractérise le Crétacé et le début du Tertiaire avec la formation d'altérites de grande extension et un bombement généralisé du Massif Central associé à une phase volcanique qui se poursuit jusque dans le Quaternaire.

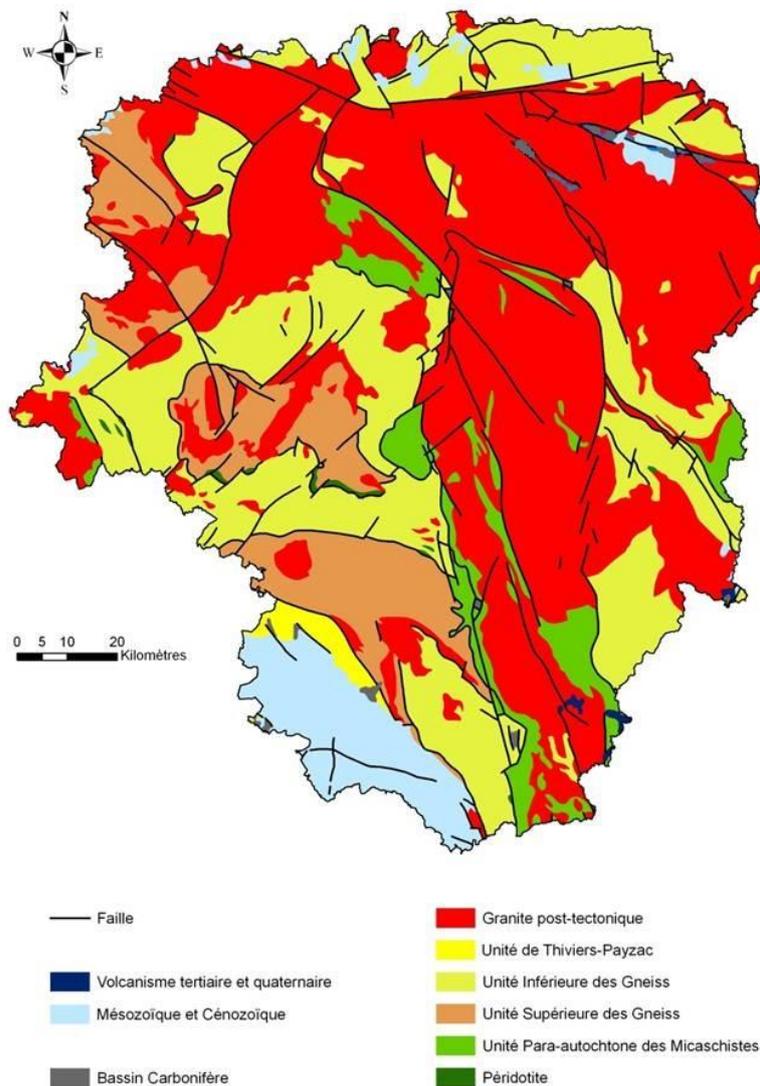


Figure 5 : Schéma structural simplifié du Limousin

3.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU LIMOUSIN

3.2.1. En domaine de socle

Sur le territoire limousin, la connaissance des eaux souterraines résulte d'études menées notamment par le BRGM dans le cadre de ces actions d'appui aux politiques publiques et dans le cadre du suivi d'un réseau de piézomètres.

Le contexte des aquifères du socle est décrit en partie par un modèle conceptuel général récent. Il propose une explication de la mise en place d'aquifères potentiels (Dewandel et al., 2006) illustrée sur la Figure 6.

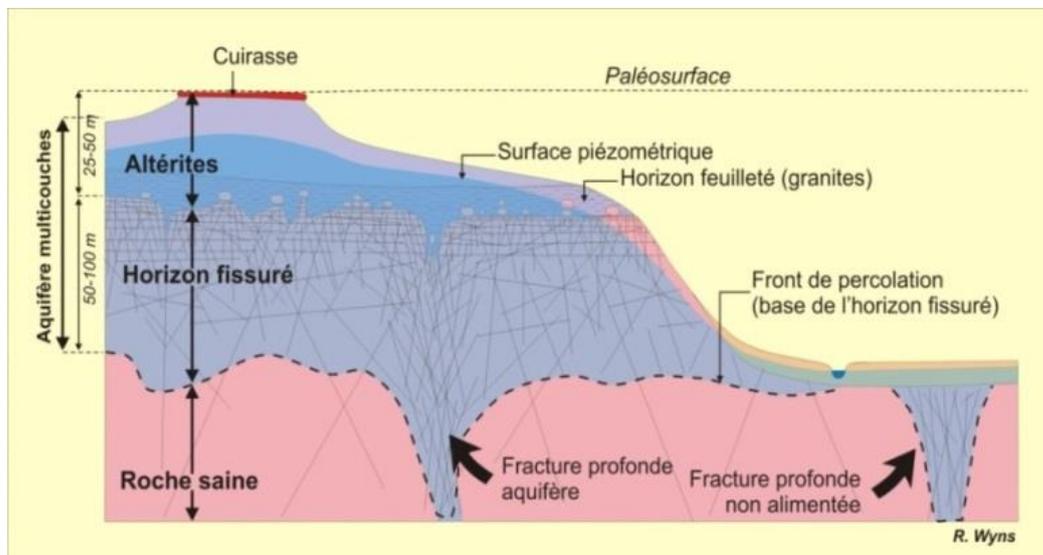


Figure 6 : Modèle conceptuel d'aquifère de socle en contexte d'altération (d'après R. Wyns)

Ce modèle décrit un aquifère 'complexe multicouche' (altérites meubles + horizon fissuré). Il est stratiforme et sa genèse est liée à des processus d'altération météoritique. Ces processus sont encore observés dans des contextes climatiques de type chauds et humides. Ces conditions ont existé au Crétacé pour l'actuel Limousin. La mise en place de ce complexe issu de l'altération des roches suit une progression verticale depuis la surface des terrains naturels et l'intensité des altérations/transformations est décroissante avec la profondeur.

Les altérites : elles sont en surface et composent une matrice meuble, formée de sables et de minéraux argileux en plus ou moins forte proportion. Ces altérites résultent d'une altération très poussée de la roche originelle. La part d'argile est guidée par la nature de la roche mère ; en général plus importante sur des schistes et moins forte sur des granites. Toutes les variantes sont possibles entre ces deux textures qui conditionnent la mobilité de l'eau retenue dans ce type de réservoir.

L'horizon fissuré : Il permet la circulation de l'eau (Lachassagne et al., 2001 ; Wyns et al., 2014). Selon ces auteurs, l'origine de cette fissuration résulte de contraintes engendrées par le gonflement de certains minéraux au cours du processus d'altération. Ce processus qui progresse depuis la surface vers les niveaux plus profonds, engendre une hétérogénéité de la fréquence des fissures qui décroît avec la profondeur. Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré ont fait l'objet de caractérisation de détail (Maréchal et al, 2004). Ainsi par exemple, au sein des granites, seules quelques fissures subhorizontales présentent une perméabilité suffisante pour permettre des venues d'eau significatives.

Plus en profondeur, **la roche est saine** et peu fracturée. Ce massif sain ne présente une capacité à laisser transiter les eaux souterraines que très localement, à la faveur de fractures tectoniques qui, si elles ne sont pas colmatées, vont permettre la circulation de l'eau en profondeur, voire le drainage des aquifères de surface.

Le modèle conceptuel proposé **décrit des réservoirs potentiels**, il ne préjuge pas de la présence effective de l'eau, c'est-à-dire la présence de nappe, ni de ses caractéristiques hydrodynamiques que sont la porosité et la perméabilité.

La porosité est la capacité du milieu à stocker une eau qui peut ensuite être mobilisée :

- la partie supérieure : l'horizon des altérites meubles (fraction meuble de l'altération des formations du socle cristallin) présente une porosité efficace de l'ordre de 2 à 8 % dans les contextes les plus favorables ;
- en-dessous, dans l'horizon fissuré (fraction non meuble de l'altération des formations du socle cristallin où se développent des fissurations horizontales), la porosité varie de moins de 1% à quelques % et diminue vers le bas pour devenir nulle à la base de l'horizon fissuré où disparaissent ces fissures et donc la capacité du milieu à contenir de l'eau.

La perméabilité est la capacité du milieu à laisser circuler l'eau, les deux couches (altérites meubles et milieu fissuré) ont des propriétés distinctes. Elles ont, ou non, la capacité à être réservoirs pour des nappes d'eau souterraines. Il faut en ce cas entendre le terme de nappe² au sens d'une ressource économiquement exploitable, c'est-à-dire ayant capacité à laisser circuler l'eau en quantité et qualité satisfaisante pour l'usage AEP, par exemple :

- dans l'horizon des altérites meubles, la conductivité hydraulique est en moyenne comprise entre 10^{-7} et 5.10^{-6} m/s (Dewandel et al., 2006). Cette faible perméabilité est, au sens général, celle d'un semi-aquifère ou *aquitard*³, réservoir considéré de qualité médiocre en termes de production d'eau. L'épaisseur des altérites meubles varie entre 5 et 30 mètres en Limousin. Une nappe d'eau souterraine réside en général dans ces altérites meubles. Elle y est de très faible productivité ($< 1\text{m}^3/\text{h}$) ;
- l'horizon fissuré est plus généralement le lieu où s'établit la nappe d'eau souterraine. Cette capacité du réservoir fissuré à contenir cette nappe dépend de sa perméabilité et de son épaisseur. En termes de conductivité hydraulique, elle est comprise entre 10^{-6} m/s et 5.10^{-3} m/s. Dans le cas où l'horizon fissuré est caractérisé par des joints horizontaux (granites non déformés et gneiss à foliation verticale), la perméabilité est, en général, anisotrope avec une perméabilité

² D'après le dictionnaire de Castany-Margat, on appelle aquifère un corps de roche perméable comportant une zone saturée - ensemble du milieu solide et de l'eau contenue - suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une *nappe souterraine* et le captage de quantités d'eau *appréciables*.

³ un aquitard représente une formation contenant une quantité non négligeable d'eau, mais peu perméable.

horizontale atteignant en moyenne 10 fois la valeur de la perméabilité verticale (Maréchal et al., 2004). En termes d'épaisseur, l'horizon fissuré peut atteindre une centaine de mètres (Vosges) mais est souvent voisin d'une cinquantaine de mètres (Inde). La productivité moyenne des débits d'exploitation de cet horizon, lorsque les forages parviennent à recouper des fissures productives, est de l'ordre de 4 m³/h à 7 m³/h. Le taux d'échec de la recherche en eau souterraine dans ce contexte est élevé, la probabilité de recouper une fracture productive est faible. Des variations importantes de productivité sont souvent constatées même pour des ouvrages voisins de quelques dizaines de mètres.

Les aquifères potentiels du Limousin, hors domaine sédimentaire, sont ainsi formés d'un réservoir aquifère supérieur composé des altérites meubles et d'un aquifère celui sous-jacent, composé de roches fissurées.

À noter que parfois, un seul des deux aquifères se développe, soit dans les formations meubles proches de la surface (absence de milieu fissuré en dessous), soit dans le milieu fissuré affleurant (sans couverture meuble).

Lorsque le socle sain affleure sans couverture (altérites ou plus généralement régolithe⁴), il peut être massif. Dans ce cas il n'y a pas de développement d'aquifère, tout du moins dans un milieu fissuré tel que décrit dans le modèle conceptuel illustré en Figure 6. Si ce milieu est de perméabilité nulle ou quasi nulle, toute l'eau qui circule sur ces territoires transite par les écoulements de surface (ruisseaux et rivières) ou est stockée dans des zones humides ou des lacs.

L'ensemble multicouche, lorsqu'il est reconnu sur le terrain, présente des interactions qui s'établissent entre les deux nappes sises dans ces deux formations. Ces interactions peuvent être complexes. Ainsi, en Limousin, dans la grande majorité des points du réseau de suivi piézométrique suivi par le BRGM, la surface piézométrique de l'aquifère du fissuré s'établit dans les formations d'altérites meubles lorsque celles-ci sont présentes. Le mode de gisement de cet aquifère est alors soit libre, soit captif selon la perméabilité ou le contraste de perméabilité entre ces formations. En fonction du différentiel de charge hydraulique entre les deux formations, le milieu fissuré peut soit alimenter par drainance verticale les altérites meubles peu perméables, soit se voir alimenté par les formations des altérites.

⁴ Le terme régolithe (1897 de rêghos, signifiant couverture, et lithos, signifiant roche) désigne tout matériel d'origine continentale, quel qu'en soit l'âge, recouvrant les roches saines et dures ("bedrock") et incluant parfois des roches saines interstratifiées ou incluses dans du matériel meuble ou altéré. Le régolithe est formé d'un ensemble de roches le plus souvent meubles formées in situ (altérites ou régolithe autochtone) ou d'origine sédimentaire et transportées constituant le régolithe allochtone (unités alluviales, colluviales, éoliennes, lacustres, glaciaires, gravitaires).

3.2.2. En domaine sédimentaire

Comme précisé dans le contexte géologique, les terrains sédimentaires, qui couvrent environ 7 % de la surface du territoire limousin (Figure 7), sont principalement représentés sur 2 secteurs, caractérisés par un contexte hydrogéologique distinct.

Bassin de Gouzon (Creuse) - Aquifère des sables et argiles tertiaires

Cet aquifère est localisé au niveau du secteur de Gouzon en Creuse sur une superficie de 50 km². Il correspond à un bassin de sédiments détritiques tertiaire, limités au nord par des gneiss et au sud par des lambeaux de coulées rhyolitiques (BRGM/RR-30197-FR). Les niveaux aquifères sont attribués aux formations détritiques où alternent des niveaux d'argiles, de sable et de galets à stratifications entrecroisées. Il s'agit d'un aquifère complexe, hétérogène avec superposition de plusieurs réservoirs séparés par des niveaux argileux de plusieurs mètres d'épaisseurs. Au regard de la productivité, plusieurs recherches d'eau ont été menées sur le bassin qui ont abouti à l'exploitation de captages à un débit de l'ordre de 60 m³/h : captage de VarennesB (06432X0018/HY)

Bassin de Brive-la-Gaillarde (Corrèze) : Aquifères contenus dans les formations du Jurassique, localisées en bordure nord du bassin aquitain

Ces aquifères sont inclus dans 3 entités hydrogéologiques locales, chacune caractérisée par une double porosité : matricielle et karstique. Il s'agit des entités⁵ : 358AE07, 358AE03 et 362AA03. Au niveau de l'exploitation de ces aquifères, l'examen des bases de données SISEEAU et BSSEAU met en évidence, au droits de ce secteur, un nombre limité d'ouvrages (sources et forages). Les profondeurs atteintes n'excèdent pas 100 mètres.

⁵ Codification BDLISA v0

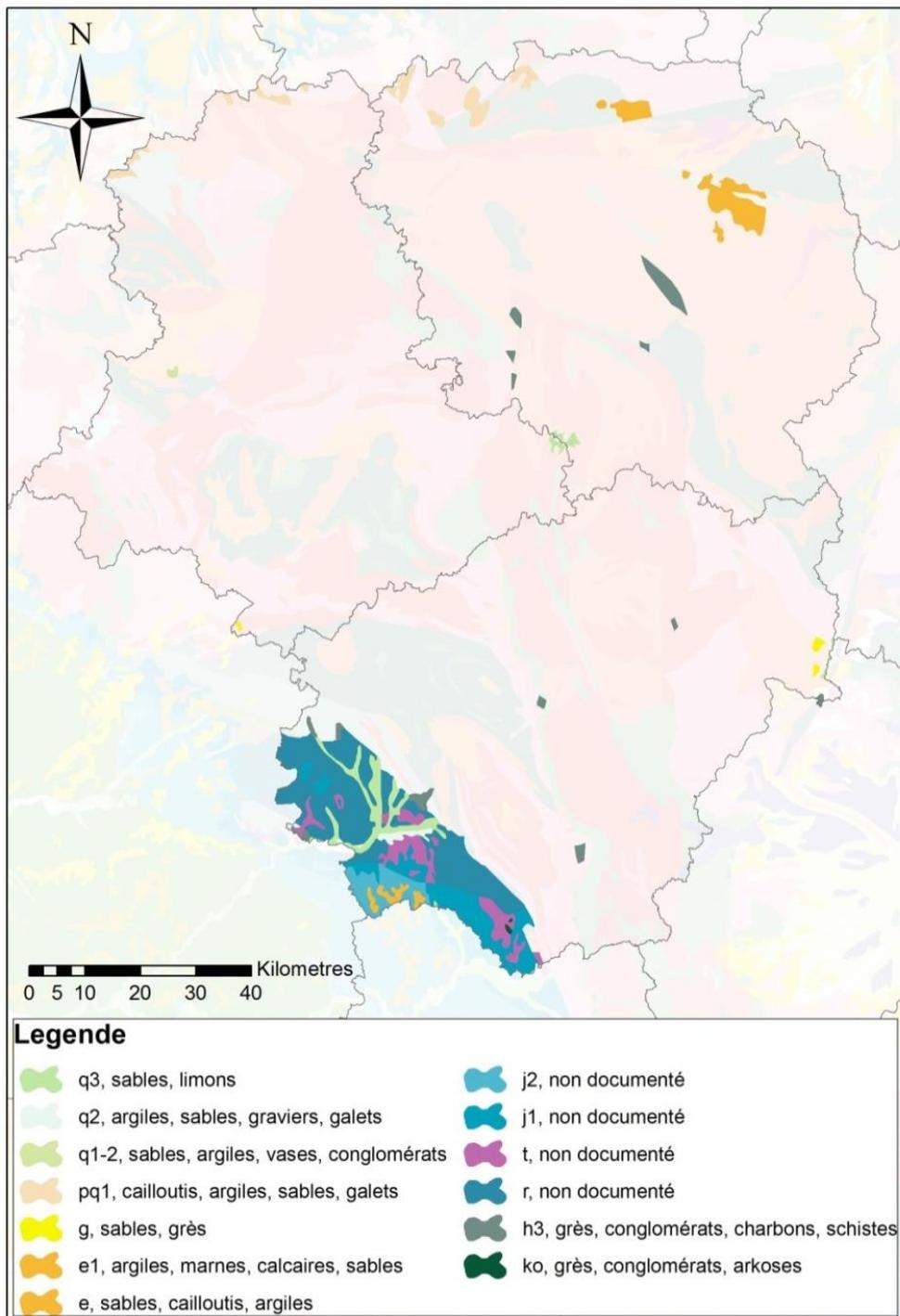


Figure 7 : 7 % de la surface du territoire limousin est composée de terrains sédimentaires

4. Estimation du potentiel géothermique

4.1. POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE SUR AQUIFÈRE SUPERFICIEL EXPLOITÉ PAR LA TECHNIQUE DU DOUBLET GÉOTHERMIQUE

Dans le cadre du module 1 du projet SILURES en Limousin, une carte des potentialités en eaux souterraines a été établie en croisant l'aptitude des formations géologiques à l'affleurement à développer un horizon fissuré lors de l'altération et l'âge de cette dernière. Toutefois, l'évaluation qualitative du potentiel hydrogéologique ne traduit pas la présence assurée d'un aquifère au droit de chaque ouvrage foré mais la potentialité qu'existe, au sein des formations considérées, le développement d'un aquifère stratiforme d'extension suffisante pour que des objets géologiques tels que des failles ou un horizon fracturé transmissif développé, drainent et concentrent les eaux souterraines. Transformer ce potentiel en un volume d'eau intéressant en terme de volume et de qualité requiert l'acquisition de données de terrain complémentaires et l'étude de chaque contexte de recherche en eau.

En effet, en l'absence d'aquifère largement développé et de productivité conséquente, le potentiel géothermique sur le domaine du socle en Limousin sur les eaux souterraines est grevé *de facto* par les coûts engendrés par les études complémentaires nécessaires à la recherche de la ressource en eau en quantité, productivité, suffisante au regard des usages.

Un autre constat est lié à la faible productivité, en règle générale, des ouvrages (Figure 8). Les 1863 ouvrages d'alimentation en eau potable du territoire (AEP – ADES⁶ 2015) limousin ont un débit moyen de 2 m³/h et une valeur médiane de 1 m³/h. En dehors des prélèvements pour l'AEP, l'inventaire des bases de données BSS et BSS_EAU donne un ensemble de 400 points pour lequel la moyenne des débits est de 7.08 m³/h et la médiane de 4 m³/h. Rapportés à l'épaisseur estimée de l'aquifère capté, les **débits spécifiques** des ouvrages sont de 0.25 m³/h/m en moyenne et la médiane de 0.13 m³/h/m.

⁶ Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines : <http://www.adeseaufrance.fr/>

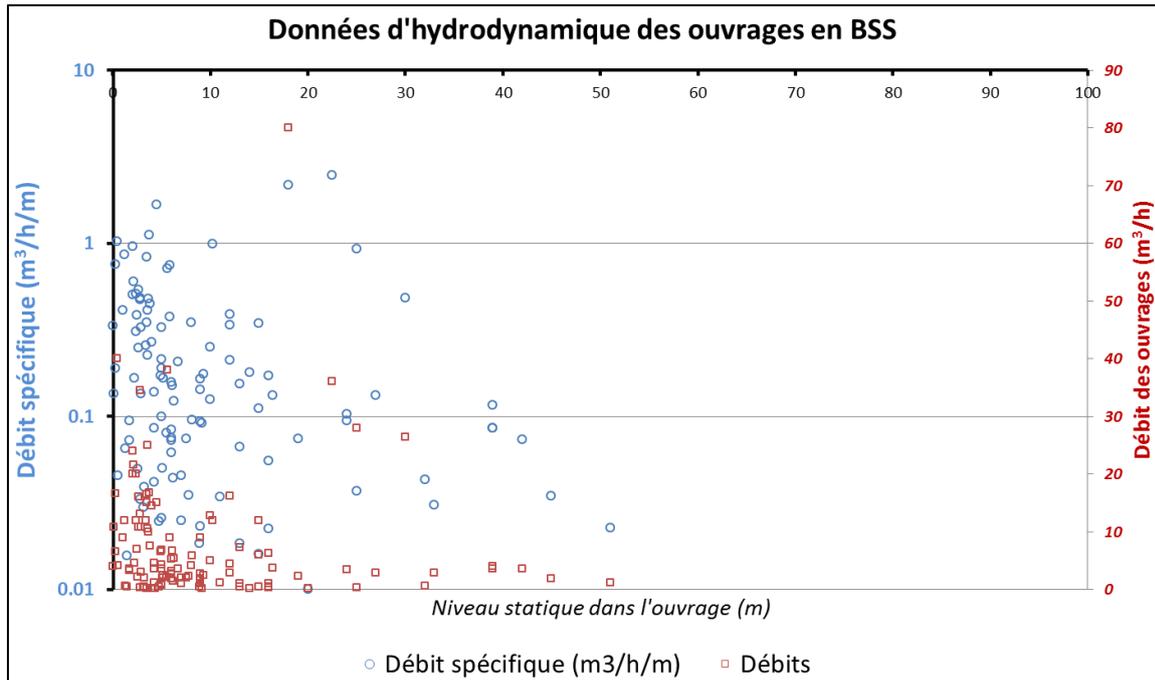


Figure 8 : Débits d'exhaure disponibles (BSS 2015)

Enfin, au regard de la perméabilité de l'aquifère espérée et de la discontinuité intrinsèque du milieu, le système des doublets de pompage et d'injection augmente le risque d'échec des forages au regard des « performances » hydrodynamiques du milieu recherchées.

Le potentiel régional en géothermie sur eau souterraine en domaine de socle sera donc décrit selon des critères de faible poids au regard du milieu, des enjeux et des coûts. Cependant ce potentiel existe dans le milieu sédimentaire représenté par 7% du territoire régional et notamment dans le bassin de Brive où peuvent se superposer plusieurs aquifères dont le potentiel est toutefois mal connu.

La Figure 9 présente le détail du calcul permettant d'attribuer une notation au potentiel géothermique sur aquifère, en fonction des trois critères que sont la productivité de l'aquifère, la température de la ressource et la profondeur d'accès à la ressource. Cette méthode de calcul a été fixée nationalement, afin d'homogénéiser les rendus des atlas des diverses régions.

En domaine de socle, la couverture d'altérites, lorsqu'elle est présente, constitue un réservoir médiocre en termes de productivité, de par sa très faible conductivité hydraulique. Considérant les très faibles débits mobilisables, et les potentielles difficultés liées à la réinjection dans un aquitard où les niveaux d'eau sont très proches de la surface, seules les formations géologiques correspondant au socle fissuré et au milieu sédimentaire ont fait l'objet d'un calcul de potentiel géothermique.

Critère de potentialité géothermique	Classification de critères	Indexation des classes
Productivité de l'aquifère	$Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$	1
	$5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$	2
	$10 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$	3
	$50 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 100 \text{ m}^3/\text{h}$	4
	$Q > 100 \text{ m}^3/\text{h}$	5
Température de la ressource	$T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$	2
	$10 \text{ }^\circ\text{C} < T < 15 \text{ }^\circ\text{C}$	4
	$T > 15 \text{ }^\circ\text{C}$	3
Profondeur d'accès à la ressource	$0 < \text{Prof} < 5 \text{ m}$	1
	$5 \text{ m} < \text{Prof} < 15 \text{ m}$	4
	$15 \text{ m} < \text{Prof} < 30 \text{ m}$	3
	$30 \text{ m} < \text{Prof} < 100 \text{ m}$	2
	$100 \text{ m} < \text{Prof} < 250 \text{ m}$	1
	$\text{Prof} > 250 \text{ m}$	0

<p>Potentiel géothermique =</p> <p>$2 \times (\text{Productivité de l'aquifère}) + 1 \times (\text{Température}) + 1 \times (\text{Profondeur d'accès})$</p>

Figure 9 : Critères de classification des potentialités géothermiques des aquifères (très basse énergie)

Les critères de notation pour les domaines représentés sur la Figure 10 sont les suivants :

- socle fissuré :
 - o critère débit = 2 ($5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$) ;
 - o critère température = 4 ($10 \text{ }^\circ\text{C} < T < 15 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
 - o critère profondeur = 3 ($15 \text{ m} < \text{Prof} < 30 \text{ m}$) ;
- sédimentaire :
 - o critère débit = 3 ($10 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$) ;
 - o critère température = 4 ($10 \text{ }^\circ\text{C} < T < 15 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
 - o critère profondeur = 4 ($5 \text{ m} < \text{Prof} < 15 \text{ m}$) pour le Bassin de Gouzon ;
 - o critère profondeur = 3 ($15 \text{ m} < \text{Prof} < 30 \text{ m}$) pour le Bassin de Brive.

Pour le socle fissuré, la gamme de débits retenue ne permet d'envisager que le chauffage de logements individuels, alors qu'en milieu sédimentaire le chauffage de bâtiments de $1\ 000 \text{ m}^2$ à $5\ 000 \text{ m}^2$ pourrait être envisagée.

La gamme des températures est quant à elle très favorable au fonctionnement d'une PAC en mode chauffage et rafraîchissement par free-cooling (via un échangeur passif).

Le contexte hydrogéologique entraîne un aléa quant au débit exploitable et aux caractéristiques hydrodynamiques (aquifère de socle ou sédimentaire). De fait, une très grande incertitude serait associée à un calcul systématique visant à caractériser la « sphère » d'influence d'un doublet de forages, et par conséquent le nombre de doublets susceptibles d'être implantés sans engendrer d'interactions pénalisantes. Développée dans le cas des sondes géothermiques verticales (paragraphe 4.2.3), l'approche consistant à ramener les potentialités géothermiques à l'unité de surface au sol n'a pas été réalisée pour les doublets de forages.

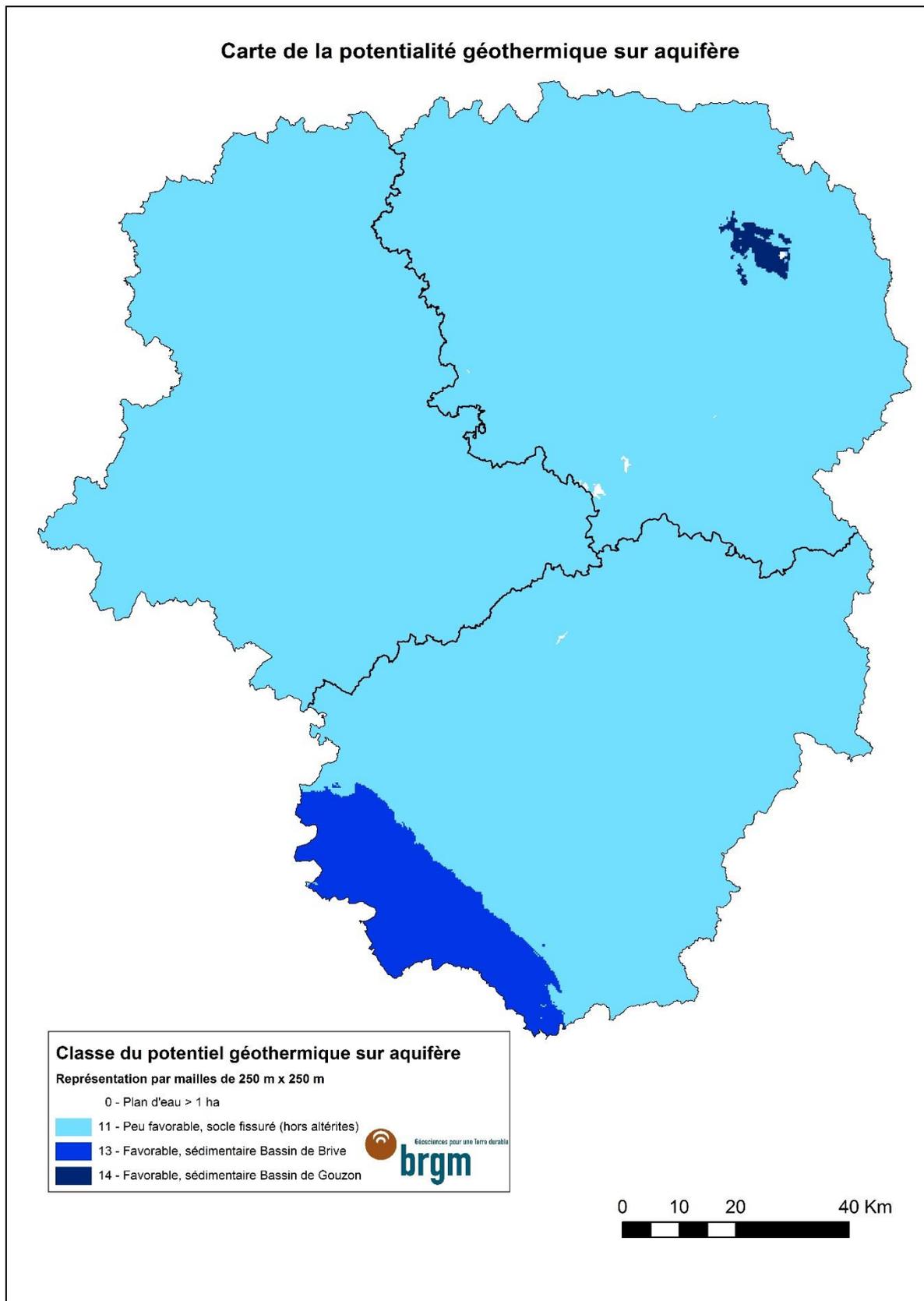


Figure 10 : Carte du potentiel géothermique sur aquifère

4.2. POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES (SGV)

En Limousin, au regard du faible potentiel en eau souterraine pour réaliser des doublets pompage/injection, le potentiel géothermique peut être exploité à l'aide d'échangeurs thermiques enterrés, systèmes dits « fermés », comme les sondes géothermiques verticales (SGV).

Cette solution de Pompe A Chaleur Géothermique (PACg) sur champs de sondes est en plein développement en Limousin et permet de produire des calories et des frigories par géothermie dans les zones où il n'y a pas de ressources aquifères.

Afin d'exprimer le potentiel de la solution sur SGV, qui peut être mise en œuvre dans tout le Limousin du fait du contexte géologique, une cartographie indicative de la conductivité thermique (exprimée en W/m/K) et de la puissance spécifique (exprimée en W/m) a été réalisée. Ce travail a nécessité dans un premier temps la réalisation d'une cartographie de synthèse des « substrats géologiques » à l'échelle d'un maillage de 250 m x 250 m, où les formations les plus superficielles, de faible épaisseur, n'ont pas été prises en compte dans l'estimation du potentiel que l'on est susceptible d'obtenir à partir de SGV de 200 m de profondeur.

4.2.1. Élaboration d'une carte des formations géologiques

Dans un premier temps, la carte géologique harmonisée de chaque département a été simplifiée en grandes familles lithologiques : dépôts superficiels, alluvions, leucogranite, micaschiste, grès argileux, calcaire micritique, etc. (Figure 11-A). Cette carte géologique simplifiée est ensuite utilisée pour définir la formation majoritaire dans chaque maille de 250 m x 250 m de la grille de résultats (Figure 11-B-C).

La carte géologique harmonisée comporte des formations superficielles (de recouvrement) telles que les alluvions, les colluvions ou les dépôts quaternaires. Ces formations sont généralement peu épaisses et ne sont pas prises en compte pour la mise en place de sondes géothermiques ; elles ont été retirées de la carte géologique, en réalisant une « érosion sélective » afin d'identifier les terrains sous-jacents.

Un algorithme simple d'érosion est appliqué aux formations superficielles sur le maillage géologique simplifié en suivant le principe suivant :

- à une maille « formation superficielle » est affectée la formation majoritaire présente dans les quatre mailles nord, sud, est et ouest autour d'elle ;
- en cas d'égalité, les huit mailles voisines de la maille « formation superficielle » sont prises en compte. En cas de nouvelle égalité, un tirage aléatoire est effectué pour choisir la formation attribuée à la maille « formation superficielle » ;
- une maille « formation superficielle » entourée de 2 mailles « formation superficielle » ou plus n'est pas modifiée dans l'itération courante ;

- afin d'éviter les effets indésirables liés à l'ordre de traitement des mailles, l'érosion est effectuée par itérations successives, l'affectation définitive d'une formation n'étant effectuée qu'à la fin d'une itération.

Cette érosion simplifiée permet d'obtenir une grille géologique sans formations superficielles (Figure 11-D). Les formations attribuées aux mailles présentant initialement des « formations superficielles » sont des extrapolations réalisées à l'aide d'un algorithme simple et ne prétendent pas représenter la formation réellement présente sous les alluvions ou autres. Cependant, au vu de l'échelle de travail, l'approximation est valable, surtout pour les alluvions ou colluvions qui sont généralement peu étendues.

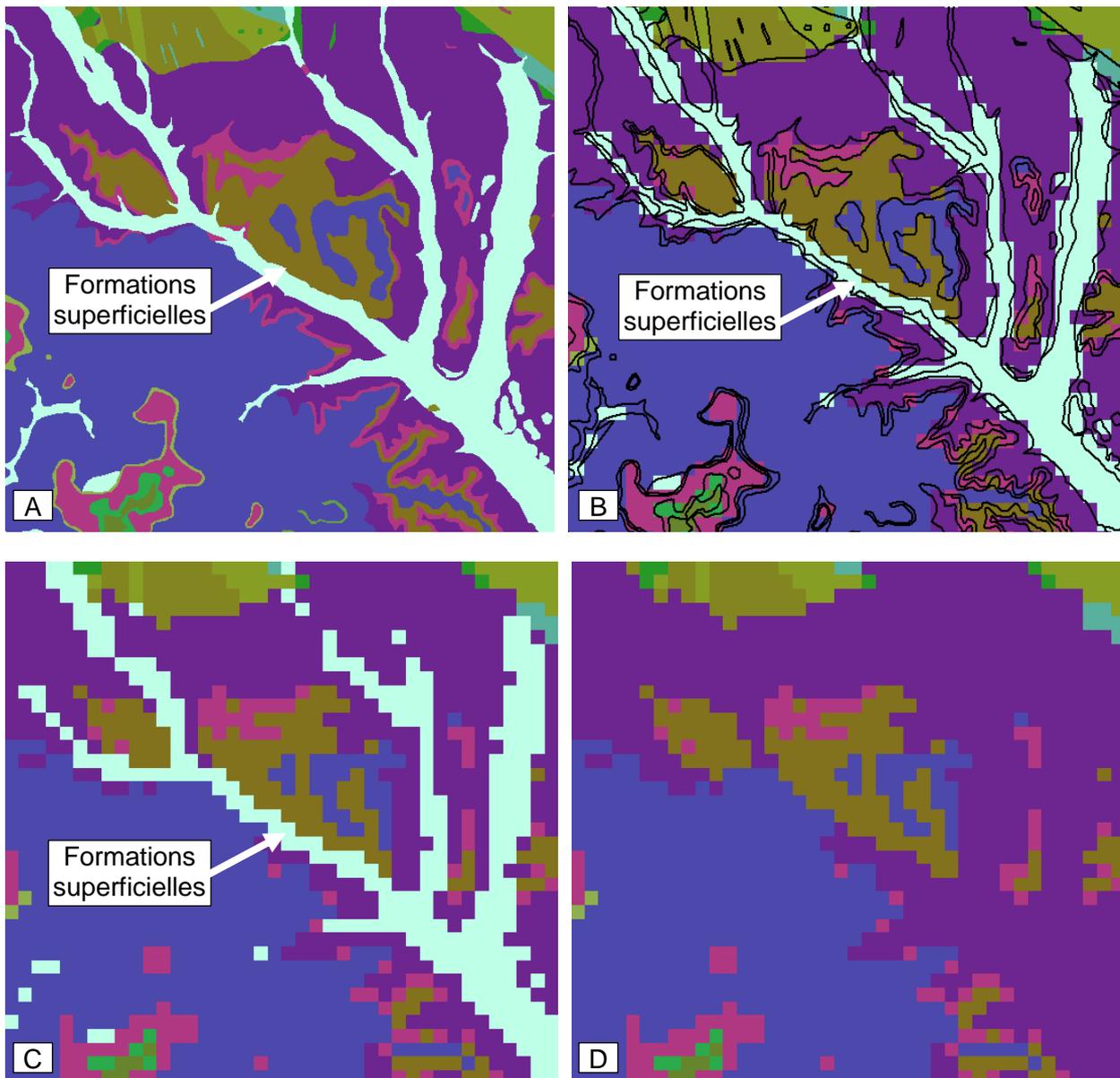


Figure 11 : Identification des substrats géologiques (retrait des formations superficielles)

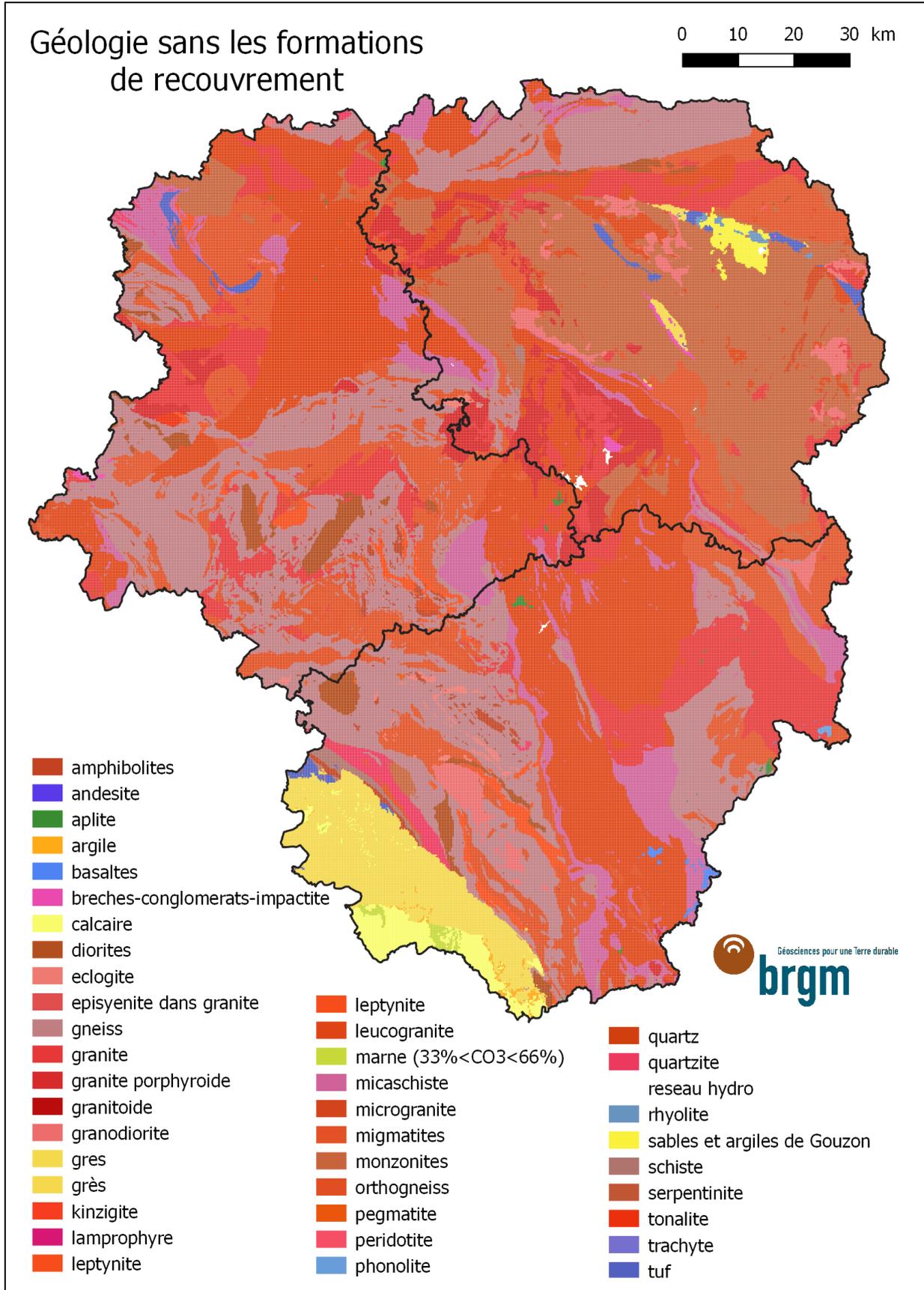


Figure 12 : Carte géologique sans les formations de recouvrement

4.2.2. Base de données de conductivités thermiques et de puissances spécifiques

Afin de caractériser le potentiel sur SGV, il est nécessaire d'attribuer à chaque formation géologique une valeur de conductivité thermique et de puissance thermique spécifique.

Les valeurs de conductivité thermique retenues correspondent à des valeurs théoriques issues de la norme suisse SIA-384/6 relative aux SGV. Elles varient entre 1,7 W/m/K (basaltes) et 5,4 W/m/K (quartzites).

Les valeurs de puissance thermique par mètre linéaire (puissance spécifique) en fonction de la lithologie des terrains sont issues de la norme AFNOR NF X10-970 (Forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale), et correspondent à une durée d'exploitation limitée à 1800 h/an. Les valeurs finales retenues appartiennent à deux gammes de valeurs, soit entre 55 W/m et 70 W/m (valeur moyenne fixée à 62 W/m) et supérieures à 70 W/m (valeur moyenne fixée à 75 W/m).

Sur la majeure partie du territoire Limousin couverte par des formations de socle, des valeurs uniformes de conductivité thermique et de puissance spécifique ont été imposées sur la tranche des 0 - 200 m d'épaisseur.

En domaine sédimentaire, les valeurs de la Figure 13 représentent une valeur moyenne des propriétés des roches rencontrées pour des SGV de 200 m de profondeur :

- sur le Bassin de Brive-la-Gaillarde, trois secteurs ont été considérés :
 - o superposition : argiles (10 m) / calcaires dolomitiques (40 m) / grès (150 m) ;
 - o superposition : calcaires dolomitiques (50 m) / grès (150 m) ;
 - o superposition : marnes (10 m) / calcaires dolomitiques (40 m) / grès (150 m) ;
- sur le Bassin de Gouzon, afin de prendre en compte les formations sédimentaires détritiques du tertiaire, une alternance de sables (50 %) et argiles (50 %) a été fixée sur les 40 premiers mètres de profondeur ; sur l'intervalle 40 m – 100 m de profondeur, le socle cristallin est représenté par du granite.

Les cartes des conductivités thermiques et de puissances spécifiques sur un maillage de 250 m x 250 m sont présentées respectivement en Figure 14 et Figure 15.

TYPE DE ROCHE	CONDUCTIVITE THERMIQUE (W/m/K)	PUISSANCE SPECIFIQUE (W/ml)
amphibolites	2.6	75
andesite	2.3	62
aplite	3	75
basaltes	1.7	62
breches-conglomerats-impactite	3	75
diorites	2.3	75
eclogite	3	75
episyenite dans granite	3	75
gneiss	3	75
granite	3	75
granite porphyroide	3.5	75
granitoide	2.7	75
granodiorite	2.7	75
gres	3.4	62
kinzigite	4	75
lamprophyre	2.6	75
leptynite	3	75
leucogranite	3	75
micaschiste	3.5	75
microgranite	3	75
migmatites	3	75
monzonites	3.2	75
orthogneiss	3.5	75
pegmatite	4.2	75
peridotite	4	75
phonolite	2.6	68
quartz	5.4	75
quartzite	5.4	75
reseau hydro	0	0
rhyolite	2.3	62
schiste	2.55	75
serpentinite	3.1	75
tonalite	2.3	75
trachyte	2.3	62
tuf	2.5	62
grès	3.7	62
Bassin de Brive-la-Gaillarde : superposition argile / calcaire dolomitique / grès	3.2	62
Bassin de Brive-la-Gaillarde : superposition calcaire dolomitique / grès	2.8	62
Bassin de Brive-la-Gaillarde : superposition marne / calcaire dolomitique / grès	3.2	62
Bassin de Gouzon : alternance de sables et argiles sur granite	2.8	65.5

Figure 13 : Valeurs de conductivités thermiques selon la lithologie des terrains (valeurs moyennes pour des SGV de 200 m de profondeur)

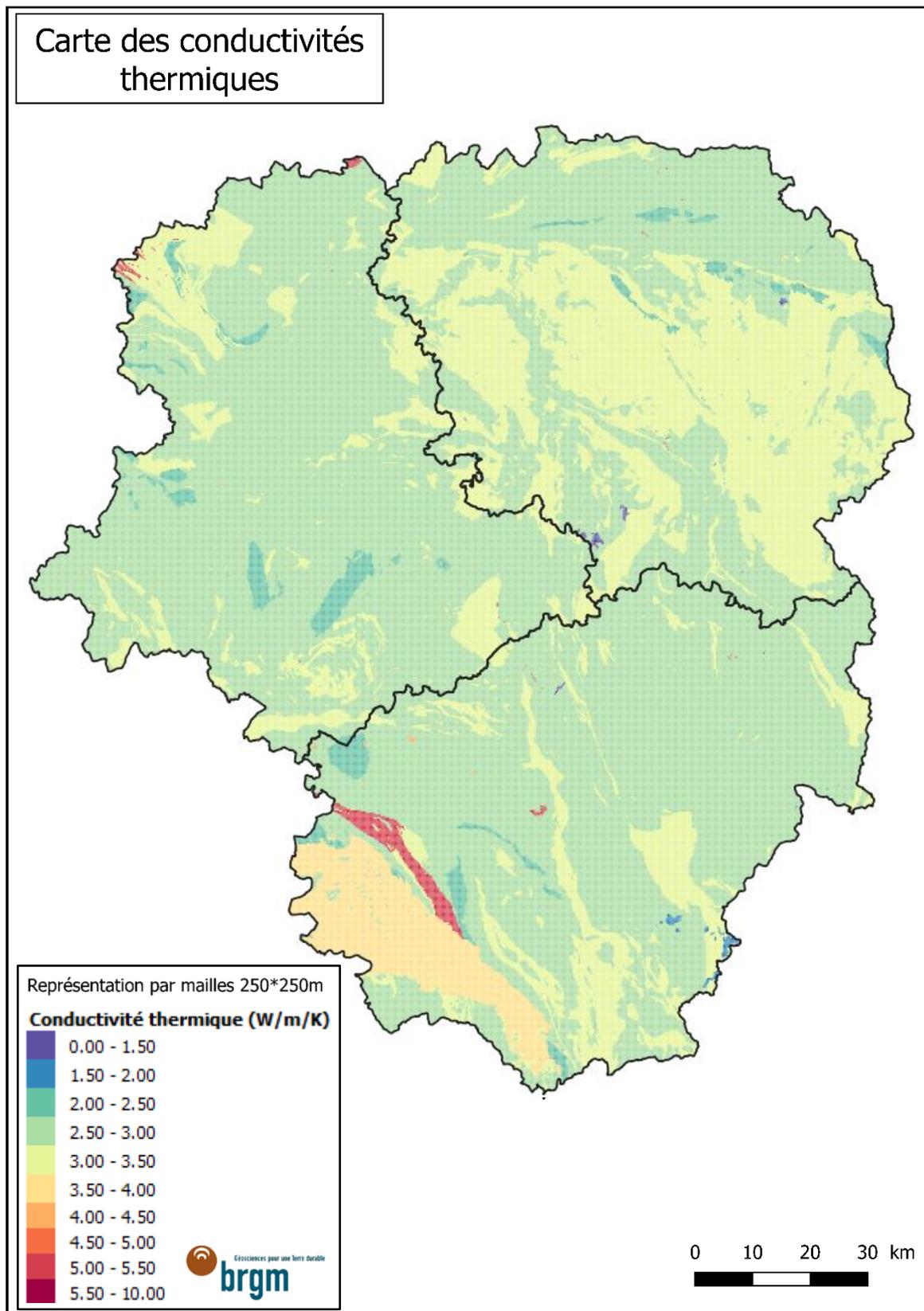


Figure 14 : Cartographie à la maille 250 m x 250 m de la conductivité thermique en Limousin

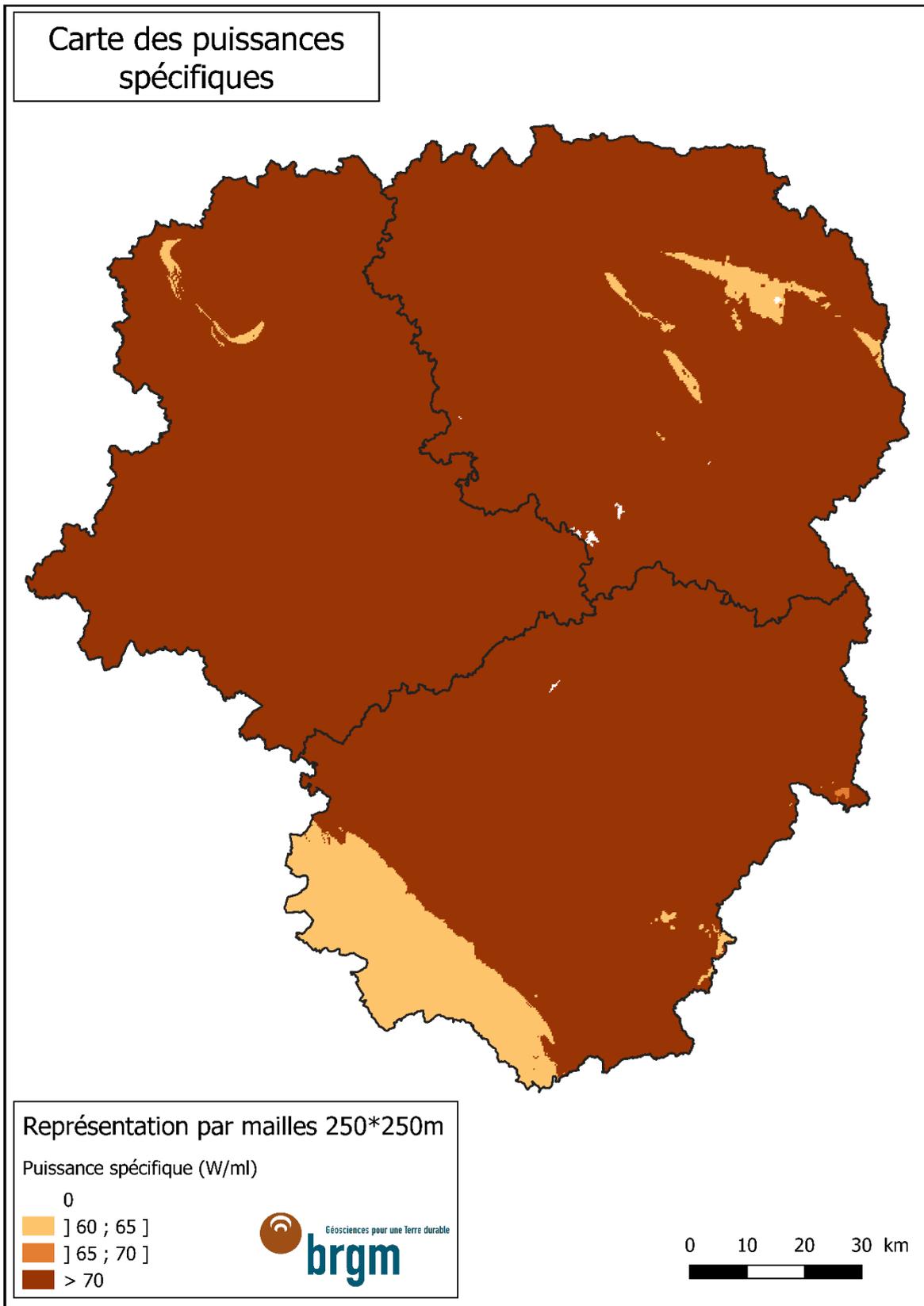


Figure 15 : Cartographie à la maille 250 m x 250 m de la puissance spécifique sur SGV en Limousin

4.2.3. Ramener les potentialités géothermiques à l'unité de surface au sol

Dans la présente étude, l'expression des potentialités géothermiques est basée sur des sondes géothermiques verticales (SGV) indépendantes. Les techniques de stockage thermique en champ de sondes ne sont pas prises en considération.

Une profondeur de 200 m est retenue pour les SGV, ce qui correspond à la profondeur maximale admise dans le cadre du régime de la Géothermie de Minime Importance (GMI). Le volume influencé autour de chaque SGV indépendante est de forme cylindrique, avec un rayon d'influence R de l'ordre de 10 m, ce qui, ramené à la surface au sol représente une surface d'incidence d'environ 314 m².

La grille de calcul support de la comparaison besoins/ressources de l'étude comporte des mailles élémentaires carrées de dimension 250 m x 250 m, d'une surface de 62 500 m². En considérant la surface d'incidence d'une sonde, il est envisageable d'installer 200 SGV par maille.

Afin de permettre une comparaison directe avec les demandes thermiques des bâtiments, le potentiel géothermique disponible en utilisant des SGV est ramené à la surface d'une maille.

De par les faciès géologiques présents en Limousin, les puissances spécifiques mobilisables par SGV (sous couvert d'un fonctionnement inférieur à 2 000 h/an) sont comprises entre 62 W/m et 75 W/m. Appliquées à des sondes de 200 m de profondeur ayant une surface d'incidence de 314 m², **la puissance géothermique disponible** est donc comprise :

- entre 39,5 W/m² et 47,8 W/m², ramenée à l'unité de surface au sol ;
- entre 2 468 kW/maille et 2 985 kW/maille, exprimée par maille d'une taille de 250 m x 250 m.

5. Calcul des besoins

Le calcul de la demande énergétique du bâti en Limousin (Figure 16), a nécessité l'analyse et le croisement de plusieurs bases de données (BD-MAJIC, BD-PARCELLAIRE et BD-TOPO). Dans la mesure du possible, les données issues de la base MAJIC ont été utilisées en priorité. Pour les bâtiments identifiés mais pour lesquels la base MAJIC est inopérante (bâtiments non soumis à l'impôt), la BD-TOPO est employée pour estimer les demandes thermiques.

Chaque bâtiment a été affecté à la maille de dimension 250 m x 250 m où est situé le barycentre de la sa projection au sol.

L'estimation de la demande énergétique a été adaptée en fonction du type de chaque bâtiment. Le résultat final consiste en des cartes sommant les puissances géothermiques spécifiques à installer (exprimées en W/m^2 au sol), en fonction du type de bâti : hors logements, logement individuel ou résidentiel collectif.

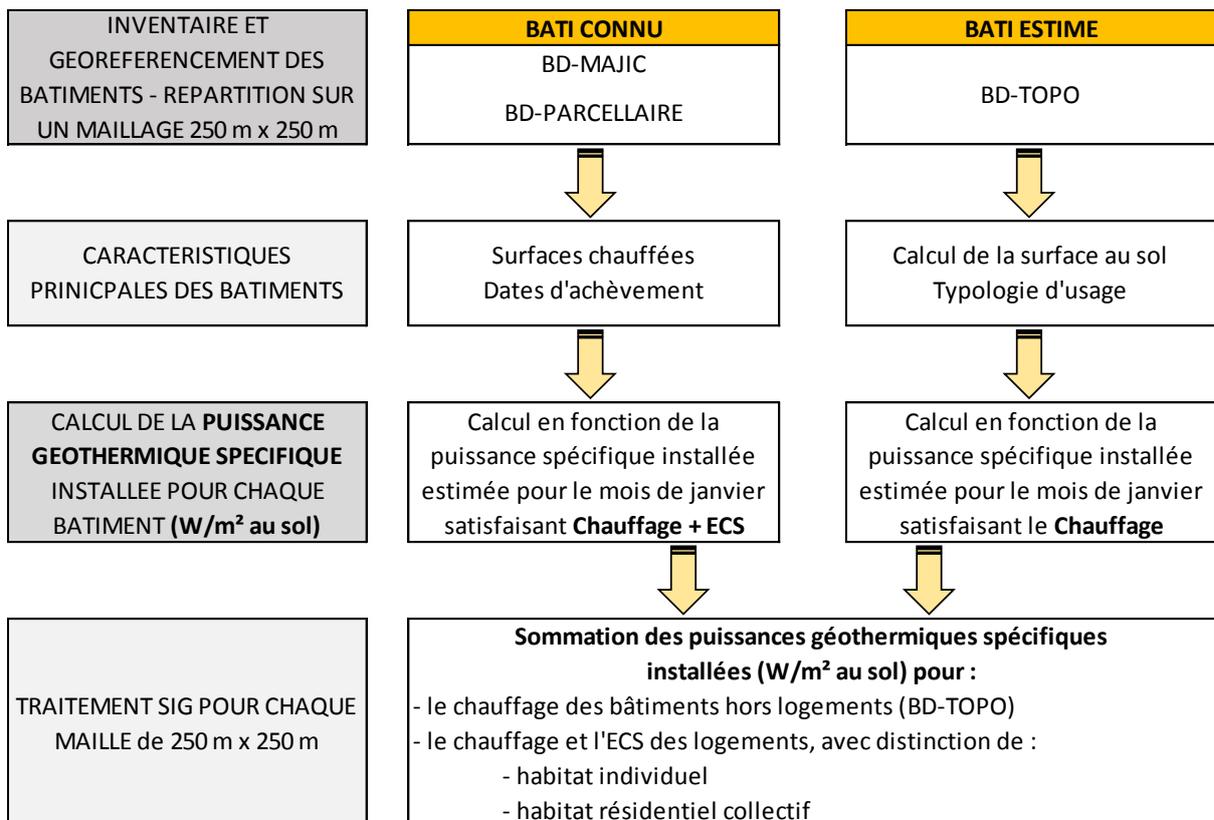


Figure 16 : Logigramme suivi pour traiter les données thermiques des bâtiments

5.1. BASES DE DONNÉES EXPLOITÉES

La base de données **MAJIC** utilisée dans cette étude correspond aux Fichiers fonciers anonymisés délivrés par la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et la Nature (DGALN), actualisés au 1^{er} janvier 2014.

Les fichiers MAJIC sont partitionnés par département. La table SIG des parcelles bâties a été utilisée ; ses informations sont localisées sur le centroïde de chaque parcelle.

La base MAJIC contient une multitude d'informations à vocation fiscale sur les bâtiments assujettis à la taxe d'habitation. Elle est donc exclusive au bâtiments à usages d'habitation. Son exhaustivité et sa précision font qu'elle sera l'unique source de données pour l'estimation des besoins thermiques. La base MAJIC est constituée de 5 composantes principales :

- avec une mise à jour annuelle :
 - o propriétaires d'immeubles (FP) ;
 - o propriétés bâties (FPB) : c'est essentiellement ce fichier qui est employé. Il renseigne : le type de local (maison, appartement, dépendances, local commercial ou industriel), la nature d'occupation (propriétaire, location, vacant...) et le descriptif de la partie principale (surfaces, équipements, date d'achèvement, ...) ;
 - o propriétés non bâties ;
 - o propriétés divisées en lots ;
- avec une mise à jour mensuelle :
 - o annuaire topographique initialisé réduit (FANTOIR).

Les informations de la base MAJIC sont employées pour déterminer les surfaces à chauffer puis, en fonction de l'année d'achèvement et de l'usage, estimer la demande thermique. Pour les bâtiments non renseignés dans la base MAJIC, la BD-TOPO est employée pour produire une estimation qui repose non pas sur la somme des surfaces à chauffer mais sur le seul volume de la construction affecté à différents usages référencés.

Les données de la base MAJIC sont affectées au centroïde de parcelles, et ne constituent pas une localisation exacte. Afin d'améliorer le géo-référencement des données MAJIC, un traitement de recollement avec la BDParcellaire et la BDTopo a été nécessaire, illustré en Figure 17. Dans le cas spécifique des communes non couvertes par la BDParcellaire, il s'est avéré impossible d'améliorer la localisation des données MAJIC.

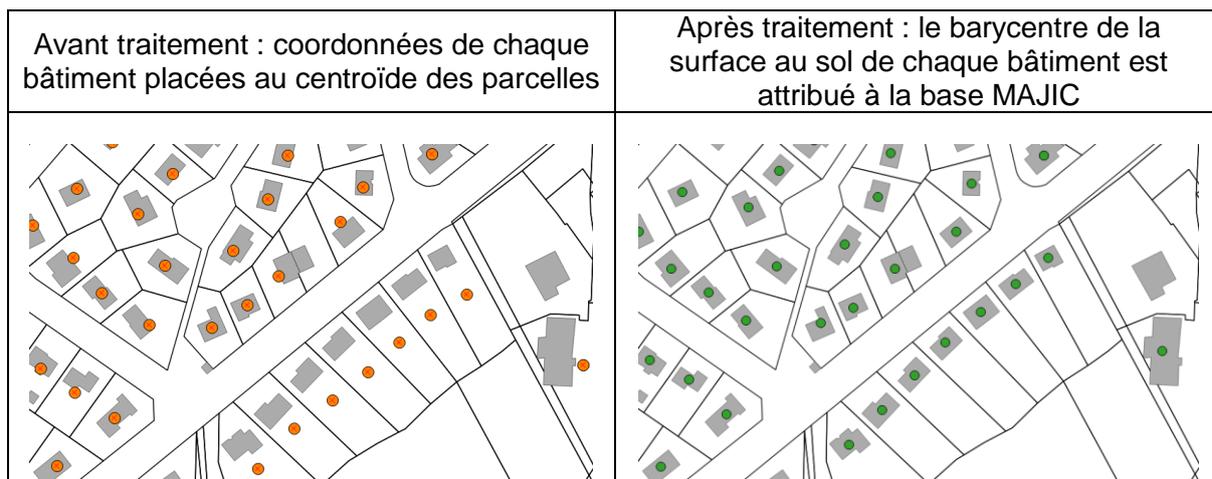


Figure 17 : Illustration de l'amélioration du géoréférencement de la base de données MAJIC à l'aide de BDPCellulaire et BDTopo.

La **BDParcelle** fournit l'information cadastrale numérique, géoréférencée et continue sur l'ensemble du territoire français. Elle est réalisée à partir de l'assemblage du plan cadastral dématérialisé. Elle permet de fiabiliser le lien entre la BD-TOPO et la base MAJIC, les méthodes de projection n'étant nécessairement pas harmonisées.

Les fichiers de la BDPCellulaire sont partitionnés par département. Deux tables sont disponibles, une intéressant les parcelles et une autre les bâtiments. Les bâtiments sont classés soit « bâtiment en dur » soit « construction légère ». Cette dernière classification étant majoritairement la traduction d'une surface à usage annexe (garage, terrasse, abris de jardin...), aucune des constructions légères n'a pas été prise en compte pour les calculs.

Il est à noter que 122 communes du département de la Corrèze ne sont pas couvertes par la BDPCellulaire (Figure 18).

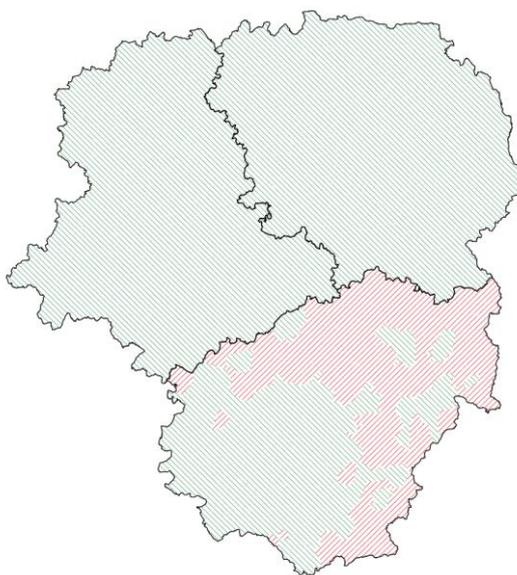


Figure 18 : Communes du Limousin (en rouge) non couvertes par la BDPCellulaire

La **BDTopo** est un produit de l'Institut Géographique National (IGN). Elle présente des fichiers partitionnés par département et couvre un large ensemble de thématiques, notamment celle du bâti qui a été utilisée dans le cadre de cette étude.

Plusieurs tables SIG ont été traitées :

- bâti indifférencié (habitation, bureau, enseignement, santé...);
- bâti remarquable (administration, religieux, sportif, transport...);
- bâti industriel (industriel, commercial ou agricole).

La BDTopo contient une description vectorielle (précision métrique) en 3D des éléments du territoire et de ses infrastructures. Les bâtiments existants sont connus par leur surface projetée au sol et l'altitude des gouttières. Les données utilisables pour estimer les besoins thermiques des bâtiments sont donc la surface globale (SB) et la hauteur (HB) à l'égout (altitude des gouttières). Tous les bâtiments existants de plus de 50 m² sont représentés et certains de plus de 20 m². Sont donc indisponibles : les bâtiments les plus récents et les petits bâtiments de moins de 20 m².

5.2. DEMANDE THERMIQUE DES BÂTIMENTS ET PUISSANCE GÉOTHERMIQUE À INSTALLER

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse à l'énergie utile pour le chauffage et pour l'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Il s'agit d'une énergie strictement thermique, étant entendu que l'on considère qu'une installation géothermique est apte à satisfaire l'intégralité des besoins thermiques. Aucun recours à un appoint n'est envisagé, dans un contexte où les bâtiments sont de mieux en mieux isolés.

Par soucis de simplification et comme recommandé dans les estimations d'un pré-dimensionnement de Pompe A Chaleur Géothermique (PACg), le COP de cette dernière sera fixé à 4. Ceci signifie que 1/4 de l'énergie thermique utile provient de l'électricité consommée pour entraîner le compresseur et que l'autre partie (3/4) provient du sous-sol, et représente l'énergie géothermique échangée avec les formations souterraines.

L'estimation du besoin énergie géothermique nécessite de préciser en premier lieu les performances énergétiques de chaque bâtiment selon son année de construction.

5.2.1. Performances thermiques indicatives pour les bâtiments en fonction de l'année de construction et consommations indicatives d'une PACg

En conformité avec des estimations de la DREAL sur le secteur géographique à l'étude, le tableau de la Figure 19 présente des ordres de grandeur pour les performances énergétiques des bâtiments d'habitation selon leur année d'achèvement. Les besoins pour le chauffage et l'ECS sont dissociés, le second n'étant pris en considération que pour les habitations. Enfin le tableau précise, sur la base d'un COP machine de 4, la part de l'énergie à délivrer consommée sur le réseau électrique pour faire fonctionner le compresseur et la part de l'énergie provenant du sous-sol (énergie géothermique). L'énergie pour la production d'ECS est fixée comme identique pour tous les types de logements et invariante sur l'année, soit 26 kWh/m²/an).

Demandes thermiques utiles - Cas du COP machine de la PACg égale à 4					
Année d'achèvement	ECS kWh/an/m ²	Chauffage kWh/an/m ²	Total Chaud kWh/an/m ²	Electricité kWh/an/m ²	Géothermie kWh/an/m ²
après 2012	26	6	32	8.0	24.0
2000-2012	26	28	54	13.5	40.5
1989-2000	26	58	84	21.0	63.0
1974-1989	26	94	120	30.0	90.0
1949-1974	26	152	178	44.5	133.5
avant 1949	26	210	236	59.0	177.0

Figure 19 : Demandes thermiques indicatives en fonction de l'année d'achèvement des bâtiments

5.2.2. Puissance thermique installée

Pour passer de la demande énergétique annuelle, exprimée en kWh/m²/an, à la puissance géothermique installée, il est considéré que le système géothermique est calculé pour satisfaire l'intégralité de la demande durant la période la plus exigeante qui est en hiver.

Les diverses hypothèses posées et étapes de calcul sont les suivants :

- le mois le plus froid de l'année est le mois de janvier : c'est la demande moyenne pour ce mois qui permet de produire un dimensionnement de l'installation géothermique ;
- la répartition des dépenses énergétiques annuelle de chauffage (kWh/m²/an) en fonction des mois de l'année a été obtenue au prorata des Degrés Jours Unifiés (DJU) mensuels fournis par Météo-France. Ainsi le mois de janvier représente environ 18 % de la consommation énergétique pour le chauffage ; il s'agit là d'une moyenne, sachant qu'en région Limousin ce pourcentage est compris entre environ 17 % (Ussel, Limoges) et 19 % (Brive). En prenant 18 % de la dépense énergétique annuelle (kWh/m²/an), on obtient pour le mois de janvier une énergie consommée exprimée en kWh/m² ;
- le temps de fonctionnement de la PACg sera pris égal à 360 heures pour le mois de janvier, soit 50% du temps ; de ce fait, il est admis que l'installation peut fonctionner sans appoint thermique pendant les périodes les plus froides durant lesquelles la PACg peut fonctionner à 100% du temps. Le fait d'attribuer une quantité d'énergie à une période donnée correspond à la définition de la puissance thermique (quantité d'énergie divisée par le temps). Sur cette base l'énergie consommée au mois de janvier pour le chauffage (kWh/m²) divisée par la durée de fonctionnement de 360 h est égale à la puissance installée en kW/m² ;
- pour la prise en considération de l'ECS, on admettra que cette demande viendra s'additionner à celle du mois de janvier pour le chauffage. La demande typique pour l'ECS est de 26 kWh/m²/an, soit une demande de 2,67 kWh/m² pour le mois de janvier. En restant sur le principe d'un fonctionnement de 360 h/mois, alors la puissance installée pour l'ECS est de $6,02 \cdot 10^{-3}$ kW/m².

5.2.3. Puissance électrique et puissance géothermique

En application du processus décrit au chapitre 5.2.2, on obtient le tableau ci-après (Figure 20) qui restitue les valeurs des puissances utiles installées spécifiques (par m² de bâti) et des puissances géothermiques et puissances électriques correspondantes. Les grandeurs spécifiques pour l'ECS (pour les habitations) sont constantes et indépendantes de l'année d'achèvement des travaux renseignée dans la base MAJIC.

Le graphique de la Figure 20 représente la puissance géothermique spécifique à installer pour satisfaire aux besoins thermiques des bâtiments en fonction de leur année d'achèvement. Des valeurs constantes ont été appliquées avant 1925 et au-delà de 2012. Pour les valeurs intermédiaires, les puissances reportées au tableau ont été appliquées à l'année moyenne de chaque créneau (ex : les 10,45 W/m² pour le chauffage seul du créneau 2001-2011 ont été imposés sur l'année 2006). La courbe a été obtenue par calage d'une fonction mathématique (polynôme du 3^{ème} degré).

Puissances installées - Cas du COP machine de la PAC égal à 4						
Année d'achèvement	Puissance utile (W/m ²)		Puissance électrique (W/m ²)		Puissance géothermique (Wgeo/m ²)	
	Chauffage + ECS	Chauffage	Chauffage + ECS	Chauffage	Chauffage + ECS	Chauffage
après 2012	9.00	2.99	2.25	0.75	6.75	2.24
2001-2011	19.95	13.94	4.99	3.48	14.96	10.45
1990-2000	34.87	28.86	8.72	7.22	26.16	21.65
1975-1989	52.78	46.77	13.20	11.69	39.59	35.08
1950-1974	81.64	75.63	20.41	18.91	61.23	56.72
1900-1949	110.49	104.48	27.62	26.12	82.87	78.36

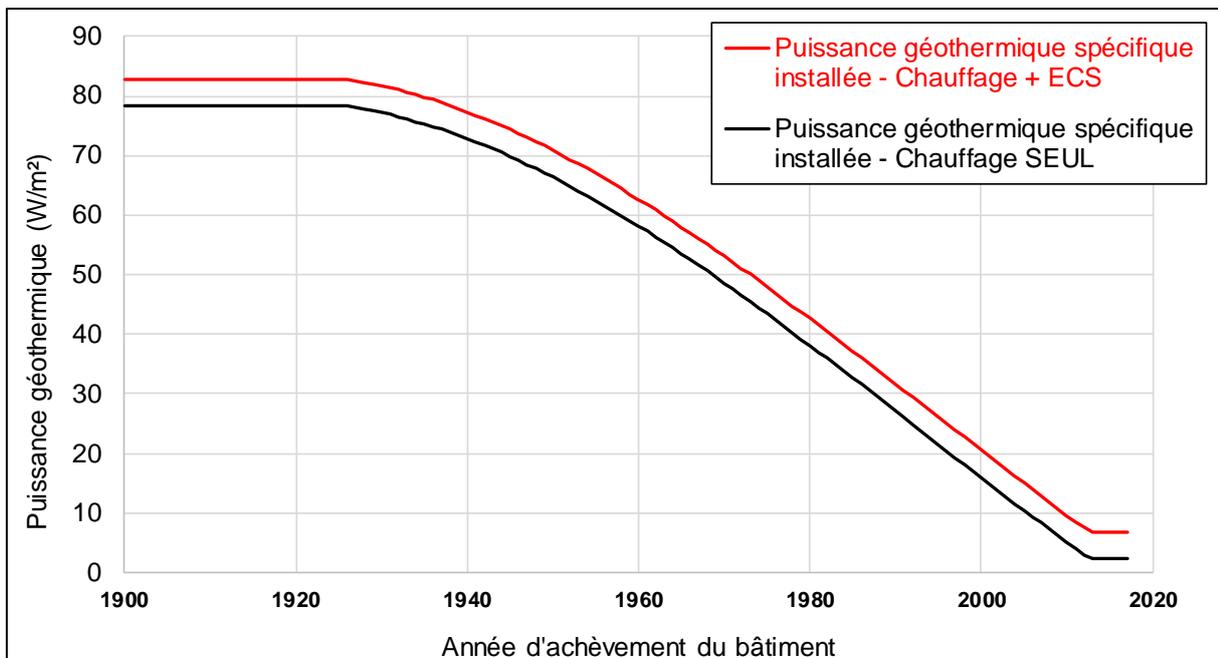


Figure 20 : Demandes en puissance géothermique des logements en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)

5.2.4. Consolidation de l'estimation des besoins thermiques avec les bâtiments à usages autres que habitats (chauffage uniquement)

En l'absence d'équivalent de la base MAJIC pour les locaux à autres usages que l'habitation (tertiaire, commerce, industrie...), les besoins en chauffage de ces bâtiments ont été estimés à partir de la BDTopo (chapitre 5.1).

Trois tables SIG de la BDTopo ont été utilisées, référencées : BATI_INDIFFERENCIE, BATI_INDUSTRIEL et BATI_REMARQUABLE. Les entités comprises dans les tables sont présentées dans le tableau de la Figure 21.

Bâti indifférencié	Maison		Doublon MAJIC
	Appartement		Doublon MAJIC
	Autres	Parcelle avec entité MAJIC	Non comptabilisé
		Parcelle sans entité MAJIC	Bâtiment annexes non pris en compte
Bâti industriel	Bâtiment agricole, bâtiment commercial, bâtiment industriel, serre, silo		= BD Topo tertiaire
Bâti remarquable	Château, chapelle, préfecture, tribune, gare, mairie, péage, monument, ...		= BD Topo tertiaire

Figure 21 : Description des entités de la BDTopo

Concernant la table BATI_INDIFFERENCIE, outre les doublons avec la base MAJIC (catégories « Maison » et « Appartement »), les entités « annexes » correspondent pour une grande majorité à des bâtiments ne nécessitant pas d'être chauffés (garages, granges, abris, toits divers...).

Croisant différentes sources d'information, la DREAL Auvergne a étudié « le potentiel d'économies d'énergie », des bâtiments résidentiels et tertiaires" sur le territoire de Clermont Communauté. La climatologie moyenne du Limousin étant sensiblement la même que celle de l'agglomération de Clermont-Ferrand, les résultats de cette étude ont été repris pour produire les ratios de consommation thermique à affecter aux bâtiments non renseignés dans la base MAJIC et dont les surfaces au sol et volumes d'enveloppe sont obtenus via la BD-Topo et la BD-Parcellaire.

Les consommations spécifiques (kWh/m²/an) de locaux (bureaux, commerces, enseignement, habitat communautaire, santé/social, sport/loisirs/culture, locaux de transport) autres que les logements se sont avérés peu différenciées. Une valeur moyenne globale de 181 kWh/m²/an est retenue, affectée dans cette étude aux bâtiments non-enseignés dans la base MAJIC. Le mois de janvier présentant la plus forte consommation énergétique (environ 18 % de la consommation annuelle), l'énergie consommée est y estimée à 32,4 kWh/m². Si on admet que le dispositif thermodynamique (PAC) fonctionne 360 heures sur le mois, alors la puissance spécifique installée (en janvier) sera de 32.4 kWh divisé par 360 heures, ce qui donne 0.09 kW/m² ou 90 W/m². Sur la base d'un COP machine de 4, la puissance géothermique spécifique à installer pour satisfaire les besoins est de 67,5 W/m².

Les limites de la BD-TOPO concernent l'absence de renseignements relatifs aux années d'achèvement et aux surfaces utilisables. Pour estimer les surfaces utilisées dans un bâtiment du type industriel ou remarquable, on peut appliquer la méthode suivante :

- pour tous les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 4 ou 5 m, on considère qu'il ne sont composés que d'un unique niveau dont la surface sera égale à la surface au sol ;
- pour les autres bâtiments, on comptabilise un niveau supplémentaire par tranche de hauteur de 2,5 m à 3,0 m au-dessus de 4 à 5 m (rez-de-chaussée). La surface utilisée, donc chauffée, est la somme de tous les niveaux.

Comme précisé dans le tableau de la Figure 22, le calcul du nombre d'étages et de la puissance spécifique installée est également fonction de la nature du bâti.

	Calcul du nombre d'étages ?	Puissance installée (W/m ²)
Serre	1	67,5
Silo	1	0
Bâtiment agricole	1	67,5
Bâtiment commercial	1	67,5
Bâtiment industriel	1	67,5
Chapelle	1	0
Château	OUI	67,5
Eglise	1	0
Tour, donjon, moulin	1	67,5
Monument	1	67,5
Tribune	1	0
Aérogare	OUI	67,5
Gare	1	67,5
Mairie	OUI	67,5
Péage	1	67,5
Préfecture	OUI	67,5
Bâtiment religieux divers	1	67,5
Sous-préfecture	OUI	67,5
Bâtiment sportif	1	67,5
Arc de triomphe	1	0

Figure 22 : Application du calcul du nombre d'étage et de la puissance

5.3. CARTES DES BESOINS EN PUISSANCE GÉOTHERMIQUE SPÉCIFIQUE

Les estimations des besoins étant calculées par bâtiment, elles ont été attribuées et sommées sur un réseau de mailles de taille 250 m x 250 m.

Les cartes suivantes présentent les cartes des puissances géothermiques spécifiques à installer (en kW/maille) pour satisfaire les besoins de divers types de bâtiments :

- Figure 23 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage des bâtiments hors logements selon BD-Topo ;
- Figure 24 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS des logements ;
- afin d'appuyer l'analyse du développement possible de réseau de chaleur, deux cartographies complémentaires (composantes de la cartographie de la Figure 24) ont été établies, avec comme exemple sur le département de la Haute-Vienne :
 - o Figure 25 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat individuel ;
 - o Figure 26 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat résidentiel collectif.

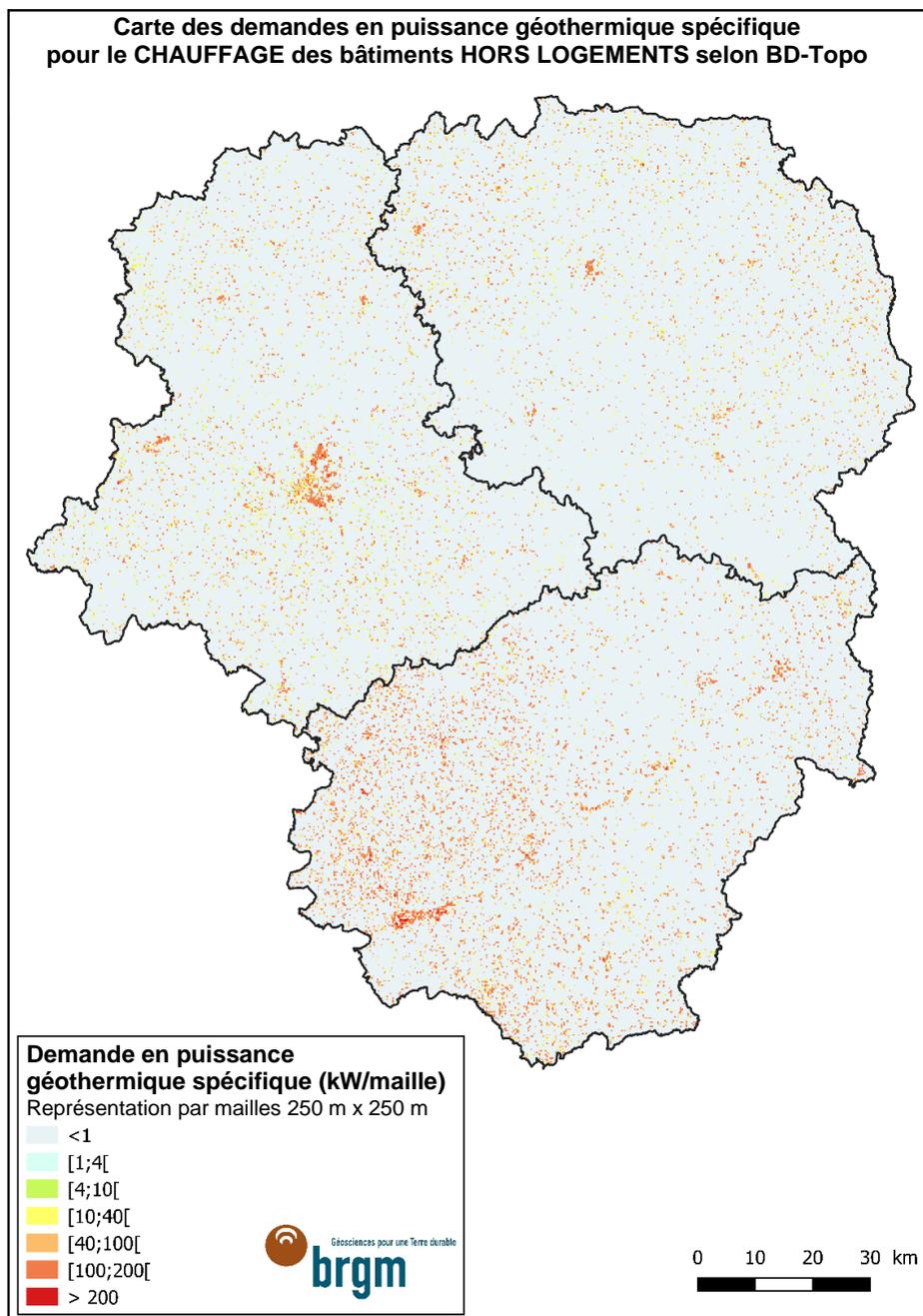


Figure 23 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage des bâtiments hors logements selon BD-Topo

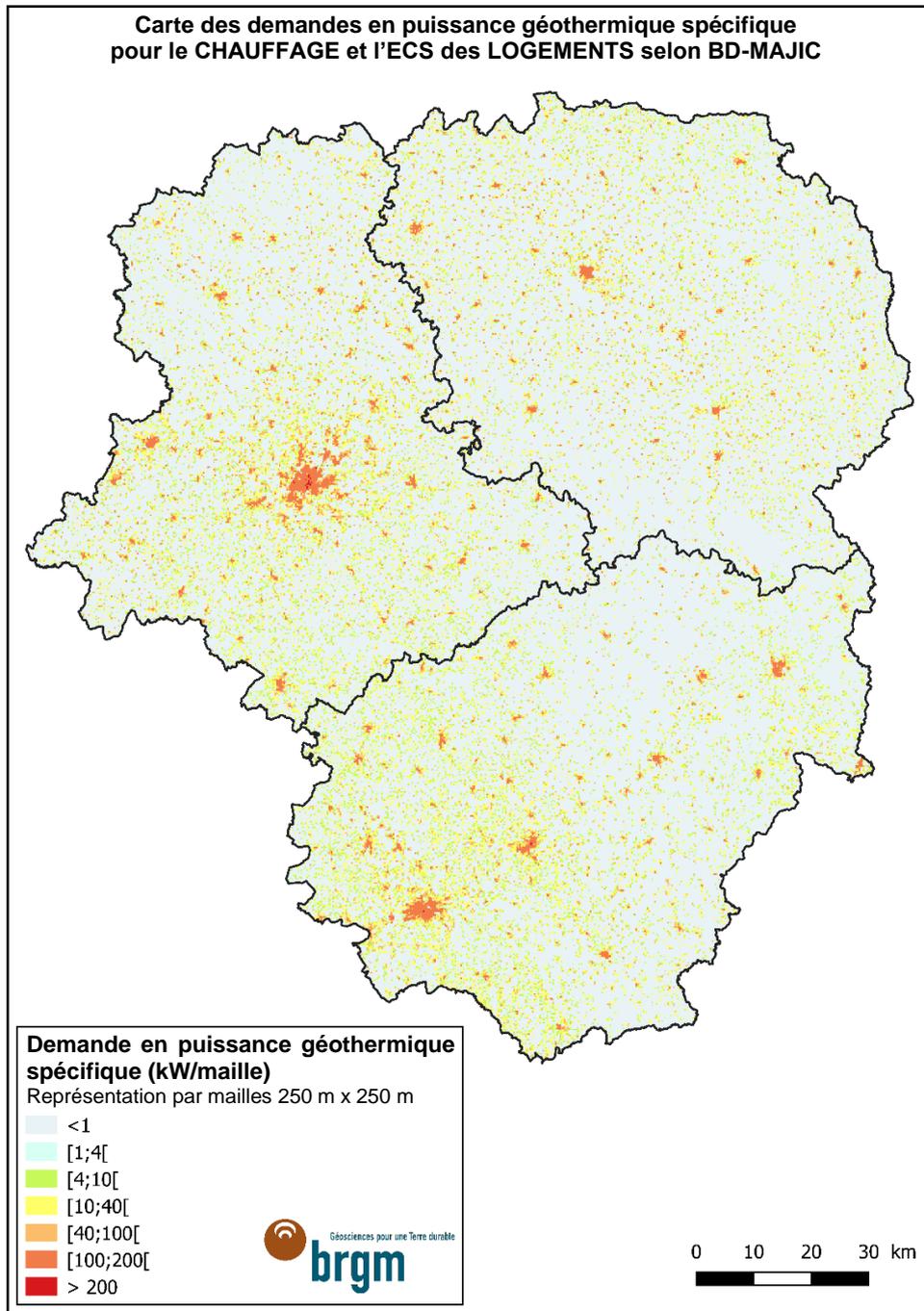


Figure 24 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS des logements

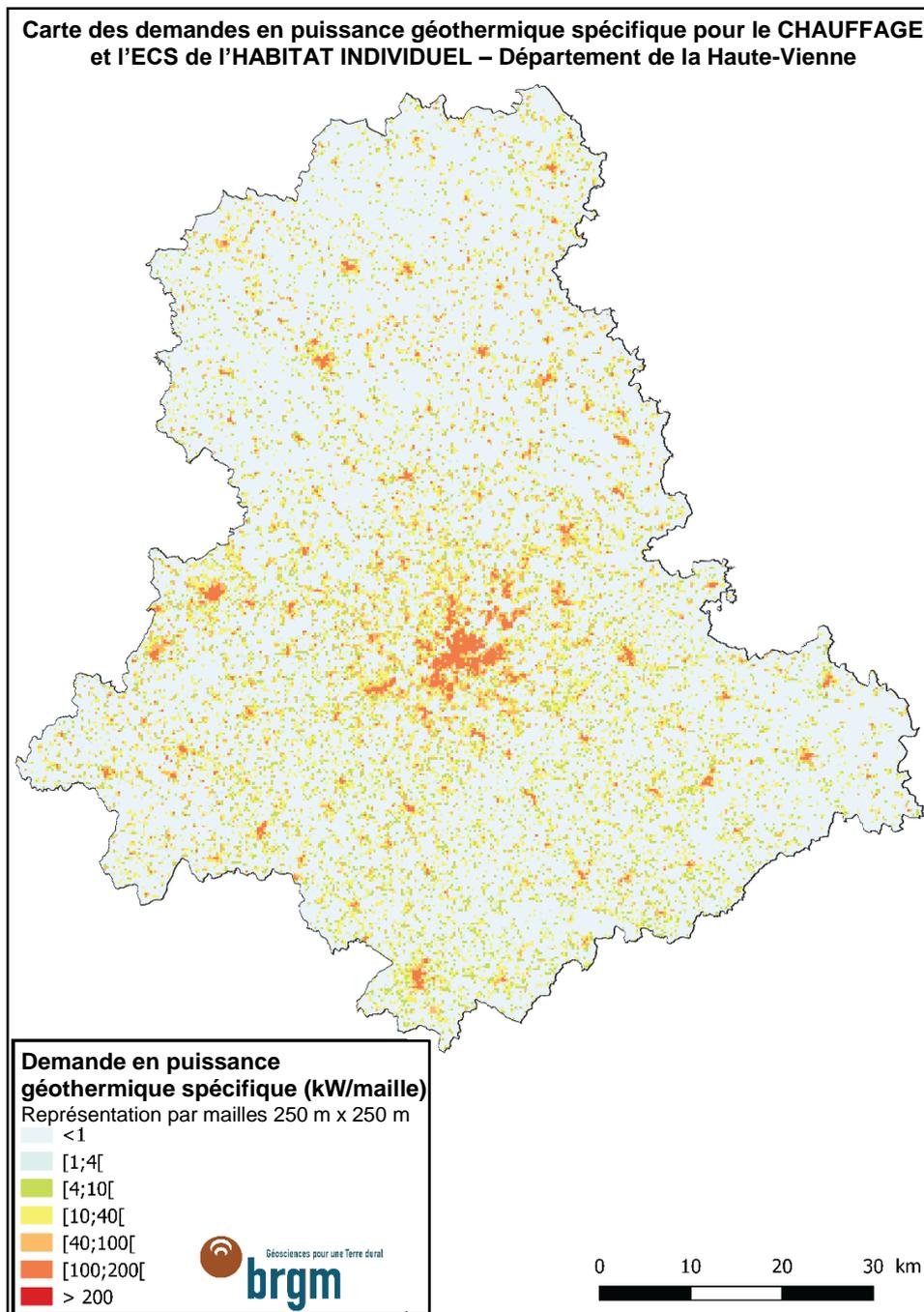


Figure 25 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat individuel – Département de la Haute-Vienne

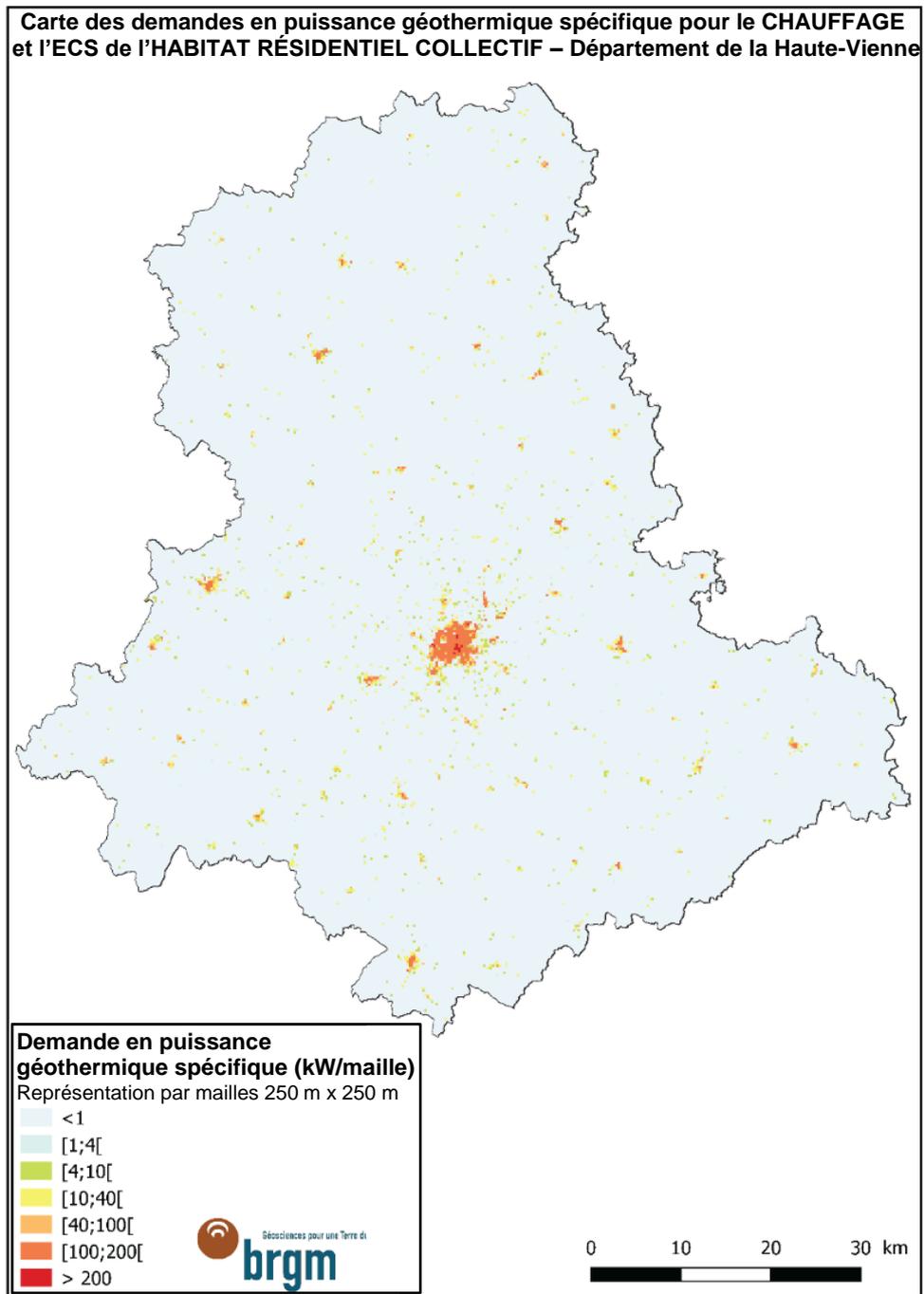


Figure 26 : Demande en puissance géothermique spécifique pour le chauffage et l'ECS de l'habitat résidentiel collectif – Département de la Haute-Vienne

6. Croisement ressources besoins

6.1. INDICATEUR DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE SUR SGV : LE TAUX DE COUVERTURE PAR LA MISE EN PLACE DE SGV

Eu égard aux contextes géologique et hydrogéologique de la région Limousin, seule la solution sur SGV a été retenue pour calculer le taux de couverture des besoins. **La méthode par SGV présente une disponibilité répartie de façon uniforme sur l'ensemble de la région Limousin. En considérant des SGV indépendantes, suffisamment espacées les unes des autres pour que la régénération thermique des sols s'opère naturellement sans difficulté, il a été possible d'associer à chaque sonde une surface d'incidence (paragraphe 4.2.3). Cette approche a permis de ramener à l'unité de surface au sol les puissances spécifiques (exprimées en W/m linéaire de sonde) susceptibles d'être exploitées en fonction des formations géologiques en présence.**

Par convention, le potentiel géothermique est défini comme étant la quantité d'énergie géothermique pouvant être employée pour répondre à une demande en énergie thermique. Avec cette définition, on voit bien que si la demande thermique est nulle alors le potentiel est nul. Le potentiel géothermique exprime donc une grandeur qui qualifie l'usage d'une ressource géothermique et non pas la seule ressource.

Le potentiel est exprimé pour la période de l'année la plus exigeante, à savoir la période la plus froide de l'année, car cela renseigne sur la capacité des ressources à satisfaire sans appoint thermique l'ensemble des besoins en énergies thermiques. Puisque les énergies en question se rapportent à une période donnée, cela revient à exprimer des puissances.

Le taux de couverture potentiel se définit comme étant la part de la demande pouvant être potentiellement satisfaite par la géothermie.

Ce taux de couverture se rapporte à une aire donnée, soit la maille de 250 m x 250 m dans cette étude. Les puissances géothermiques mobilisables (potentialités) sont rapportées aux puissances géothermiques installées (demandes thermiques du tissu bâti desquelles on déduit les puissances électriques des PACg en fonction du COP).

Plus précisément, le taux de couverture (sans dimension) compare, maille par maille, la puissance géothermique mobilisable à la puissance géothermique appelée (celle qui est ou sera installée).

$$\text{Taux de couverture} = \frac{\text{Puissance géothermique mobilisable}}{\text{Puissance géothermique demandée (installée)}}$$

La

Figure 27 présente l'échelle retenue afin de représenter le taux de couverture potentiel

Échelle	Taux de couverture potentiel par SGV
Pas de besoin	/
Très faible	Inférieur à 5% de la demande
Assez faible	De 5% à 10% de la demande
Faible	De 10% à 25% de la demande
Moyen	De 25% à 50% de la demande
Intéressant	De 50% à 75% de la demande
Bon	De 75% à 100% de la demande
Excédentaire	Supérieur à 100% de la demande

Figure 27 : Échelle retenue pour la représentation du taux de couverture potentiel par la méthode des SGV

6.2. CARTOGRAPHIE DU TAUX DE COUVERTURE PAR SGV

Afin de prendre en compte le bâti existant, limitant les surfaces d'implantation potentielles de SGV et donc la puissance géothermique disponible, une cartographie à l'échelle des mailles de 250 m x 250 m du pourcentage de surface bâtie au sol a été élaborée (Figure 28).

Les Figure 29 et Figure 30 présentent respectivement le taux de couverture respectivement sans et avec prise en compte des surfaces bâties.

Si l'on s'intéresse à l'ensemble des mailles présentant une demande en puissance géothermique, plus de 99 % d'entre elles présentent un taux de couverture supérieur à 100 %, que l'on prenne ou non en considération les surface déjà bâties pour l'implantation de SGV.

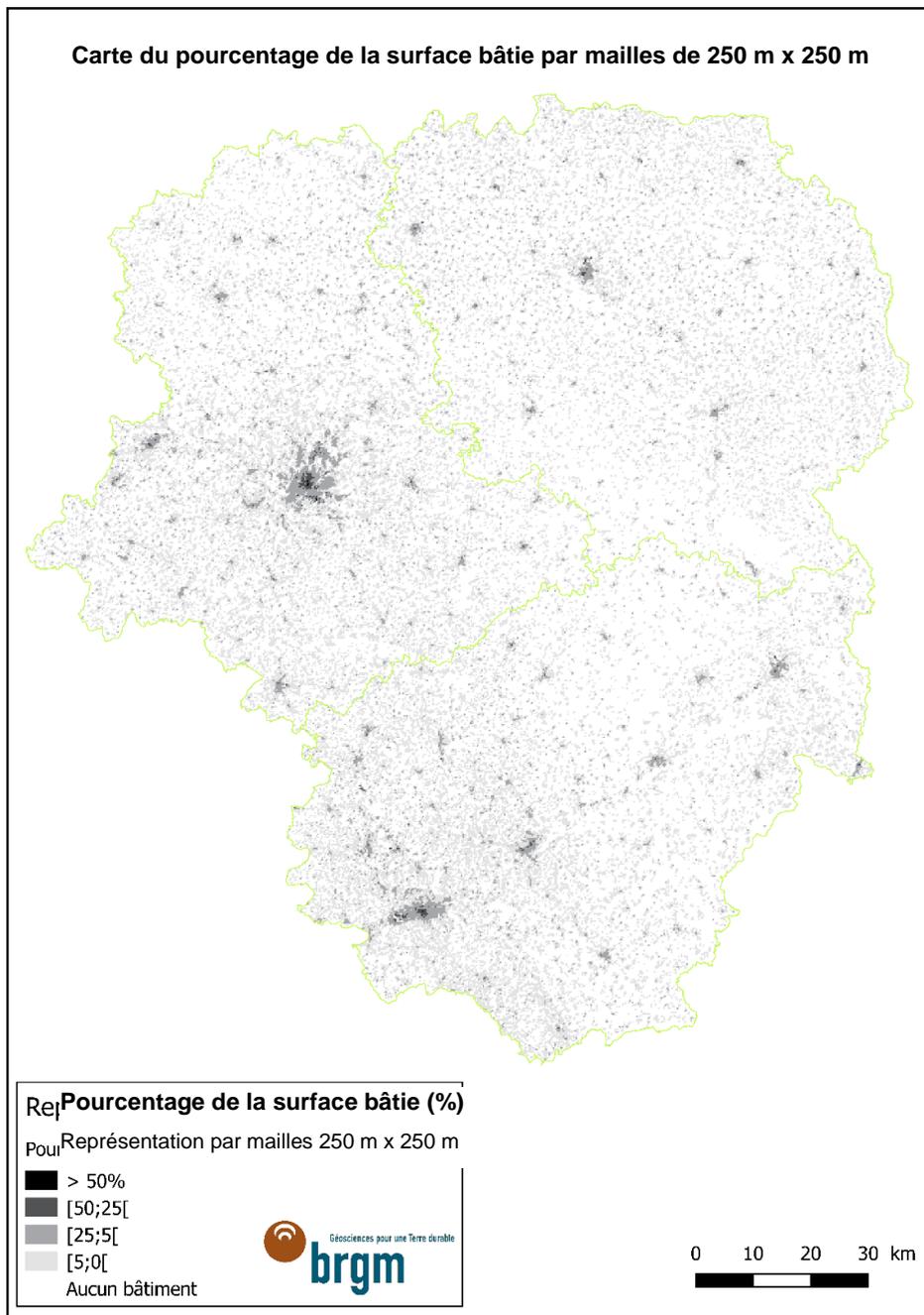


Figure 28 : Cartographie du pourcentage de surface bâtie par maille de 500 m x 500 m

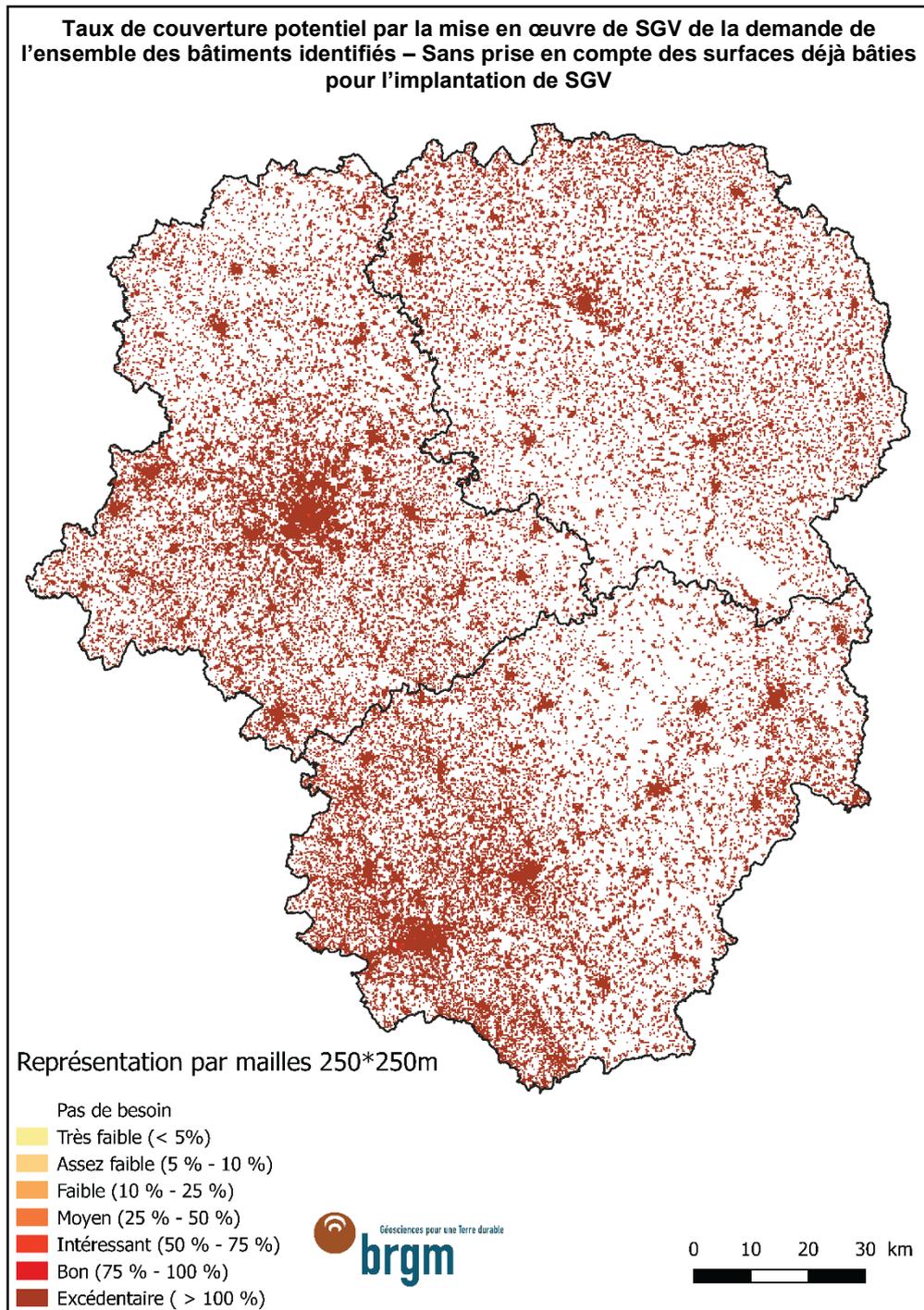


Figure 29 : Carte du taux de couverture potentiel par la mise en œuvre de SGV de la demande de l'ensemble des bâtiments identifiés (sans prise en compte des surfaces déjà bâties)

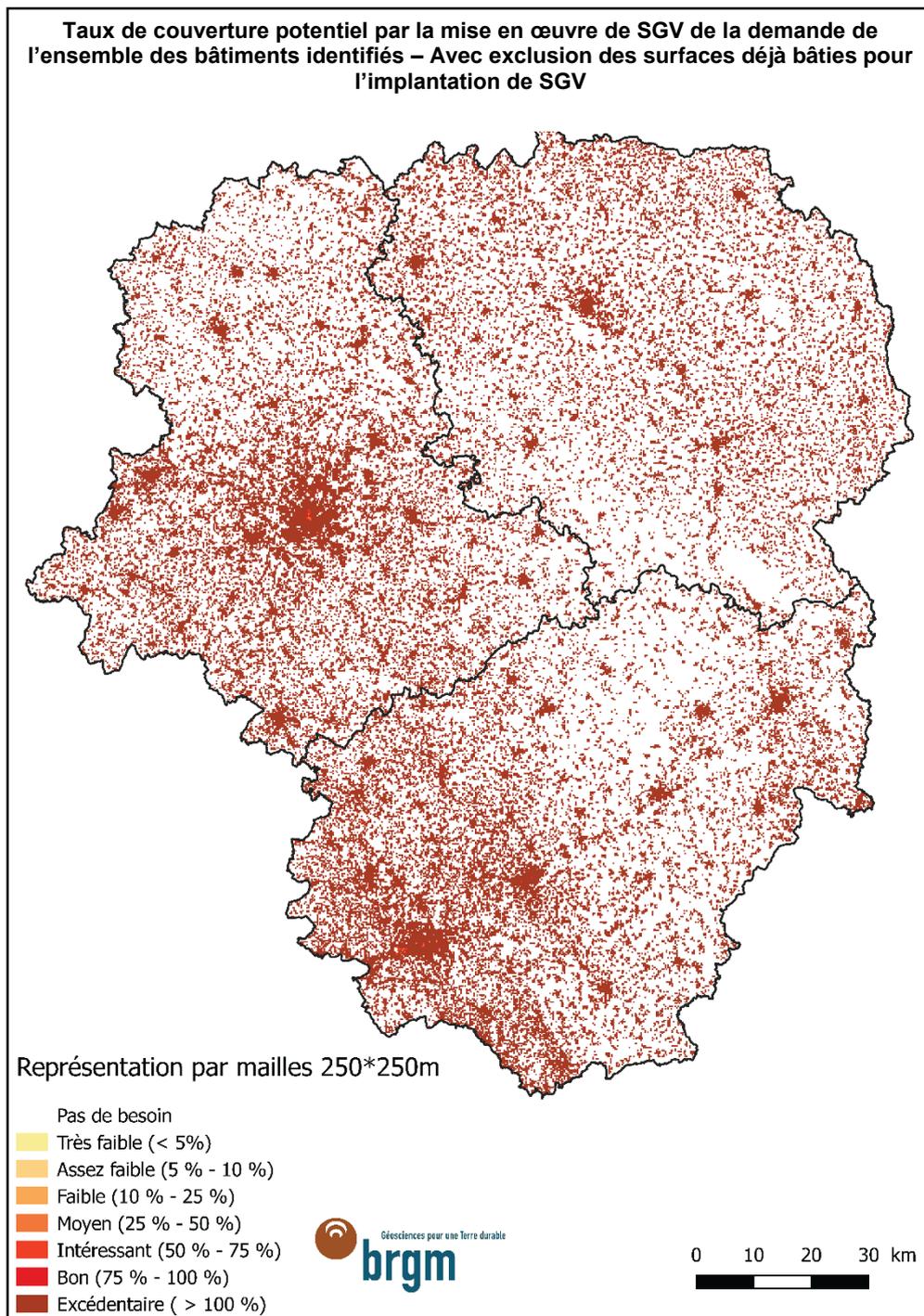


Figure 30 : Carte du taux de couverture potentiel par la mise en œuvre de SGV de la demande de l'ensemble des bâtiments identifiés (avec prise en compte des surfaces déjà bâties)

7. Conclusion

Les contextes géologique et hydrogéologique de la région Limousin (avec 93 % de la surface en domaine de socle) sont favorables au développement de la géothermie par la technique des sondes géothermiques verticales.

Les cartes produites dans le présent rapport ne donnent qu'un aperçu des résultats de cette étude qui couvre l'ensemble de la région Limousin, et la mise à disposition des données numériques (mise en ligne et fourniture de documents SIG) permettra de zoomer sur les secteurs à investiguer.

Les résultats de cette étude sous forme de document cartographique en format numérique seront mises à disposition par le BRGM sous la forme d'une table compatible Arc Gis et QGis, en RGF93 et accompagnée de sa légende. La table finale comportera les champs suivants :

- Id : identifiant ;
- Xmin : abscisse du côté le plus à l'Ouest de la maille ;
- Ymin : ordonnée du côté le plus au Sud de la maille ;
- Xmax : abscisse du côté le plus à l'Est de la maille ;
- Ymax : ordonnée du côté le plus au Nord de la maille ;
- Xcentre : abscisse du centre de la maille ;
- Ycentre : ordonnée du centre de la maille ;
- SurfaceBati : surface de la maille, en mètre carré, occupé par du bâti (croisement avec la BDTopo) ;
- SurfaceNonBati : surface de la maille, en mètre carré, qui n'est pas occupé par la bâti (croisement avec la BDTopo) ;
- ParNonBati : part de la maille, qui reste vierge de bâti (croisement avec la BDTopo) où l'on peut réaliser une SGV, cela inclut donc la voirie ;
- Puissmajic : Demande en puissance géothermique pour ECS + chauffage, en W, pour l'ensemble des bâtiments à fonction d'habitation (BDMAJIC) dont le centroïde est dans la maille ;
- PuissmajicCollectif : Part de Puissmajic correspondant à de l'habitat collectif ;
- PuissmajicIndividuel : Part de Puissmajic correspondant à de l'habitat individuel ;
- Puissestertiaire : Demande en puissance géothermique pour le chauffage, en W, pour l'ensemble des bâtiments à fonction autre qu'habitation (bâti industrielle + bâti remarquable de la BDTopo) dont le centroïde est dans la maille ;
- Consolidation : Somme des demandes en puissance géothermique estimées pour l'ensemble des bâtiments dont le centroïde est dans la maille (=Puissmajic + Puissestertiaire) ;
- Geol : géologie majoritaire sur la maille. Issue du travail de simplification de la carte géologique harmonisée du département ;
- Conduct_therm : conductivité thermique, en W/m/K, pour la formation géologique majoritaire ;
- PuissSpec : puissance spécifique, en W/m, pour la formation géologique majoritaire ;
- GTH_SGV_tot : Puissance maximale géothermique estimée extractible par SGV, en W, en ne tenant pas compte de la surface bâtie sur la maille ;
- GTH_SGV_reel : Puissance maximale géothermique estimée extractible par SGV, en W, en prenant en compte que la surface bâtie ne peut être forée ;
- GTH_SGV_Couv_tot : Pourcentage des demandes en puissance géothermique (Consolidation) qui peut être couverte par la GTH sur SGV (=GTH_SGV_tot/Consolidation) sans tenir compte de la surface bâtie ;

- GTH_SGV_Couv_reel : Pourcentage des demandes en puissance géothermique (Consolidation) qui peut être couverte par la GTH sur SGV ($=\text{GTH_SGV_reel}/\text{Consolidation}$) en prenant en compte la surface bâtie.

Toutes les couches du SIG relevant des contextes géologique et hydrogéologique (cartes de conductivité thermique, de puissance spécifique et potentiel sur aquifère) seront intégrées à l'atlas limousin des potentialités géothermiques très faible énergie et mis en ligne sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr/>.

L'ensemble de ces documents permettra d'orienter la décision pour des prescripteurs intéressés par des projets de géothermie très basse énergie, lorsque se posera la question du choix énergétique.

8. Bibliographie

Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, 260-284.

Lachassagne P, Wyns R, Bérard P, Bruel T, Chéry L, Coutand T, Desprats J-F, Le Strat P. (2001). Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *GroundWater*, Vol.39, n°4, 568-581.

Maréchal J.C., B. Dewandel et K. Subrahmanyam (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fissured layer of a hard rock aquifer. *Water Resour. Res.*, 40, DOI: 10.1029/2004WR003137

Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J. and Mathieu F. (2004). Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bull. Soc. Géol. France*, 175 (1), 21-34.



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

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine
Site de Poitiers
5 rue de la Goélette
86280 – Saint-Benoît - France
Tél. : 05 49 38 15 38