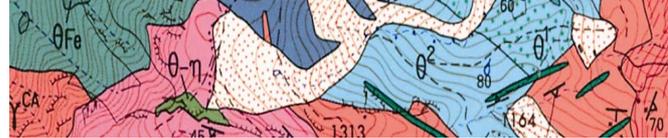


Document public



Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Région Limousin.

Rapport final

BRGM/RP-65706-FR

mai 2018



Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Région Limousin.

Rapport final

BRGM/RP-65706-FR

mai 2018

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

V. Mardhel, A. Genna et F. Touchard
avec la collaboration de **F. Compère et M. Thinon-Larminach**

Vérificateur :

Nom : J.-C. MARTIN

Fonction : Hydrogéologue

Date : 27 mai 2016

Signature :

p.o. B. SANJUAN



Approbateur :

Nom : J.-C. AUDRU

Fonction : Directeur délégué

Date : 13 mars 2018

Signature :



Mots-clés : Géothermie très basse énergie ; risque ; cartographie ; Limousin ; Corrèze ; Creuse ; Haute-Vienne, France.

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

V. Mardhel, A. Genna, F. Touchard avec la collaboration de F. Compère et M. Thinon-Larminach (2018) – Caractérisation du potentiel géothermique très basse énergie en région Limousin, volet 1 cartographie des risques. Rapport final. BRGM/RP-65706-FR, 88 p., 47 fig.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La région Limousin et l'ADEME Limousin, avec le concours financier du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM) et du BRGM, ont décidé de réaliser une carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance régionale en Limousin, qui précise la carte nationale existante.

Ce rapport présente les modalités utilisées pour la réalisation de cette carte. Le recours à la géothermie de minime importance à usage domestique comme source alternative d'énergie est en progression ces dernières années en Limousin où le secteur des sondes géothermiques verticales s'est rapidement développé entre les années 2007/2011. 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.

Rapportés en Limousin, les objectifs en matière de développement des énergies renouvelables exprimés dans le SRCAE incluent la filière géothermique.

La cartographie des zones réglementaires relatives à la Géothermie de Minime Importance (GMI) est basée sur une analyse cartographique multicritère. Elle conduit à la réalisation de cartes à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Chacun des aléas, identifié par une méthodologie nationale proposée en juillet 2015, est représenté par une couche spécifique. Pour ces aléas, le phénomène redouté est décrit et accompagné d'une qualification de son niveau (faible, moyen, fort) et d'une quantification numérique. Un facteur de pondération est ensuite attribué à chaque niveau. Il représente un facteur aggravant appliqué selon les modes d'usages de la GMI (sondes géothermiques verticales ou doublets sur nappe) et est appliqué à l'intensité des phénomènes redoutés (affaissement, effondrement, pollution...).

Ces aléas sont intrinsèques au contexte géologique du Limousin, qui offre des contextes géologiques variés mais majoritairement composés de formations cristallines de socle. Cette diversité de sous-sol, si elle rend utile le développement cartographique à une échelle régionale, suppose pour répondre au contexte régional certaines adaptations nécessaires par rapport à la méthodologie développée et présentée dans le rapport BRGM/RP-61768-FR, ainsi que du guide méthodologique (Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance, juillet 2015). C'est le cas notamment dans le « socle » limousin (93 % du territoire) où il est impossible de réaliser des cartes distinctes selon la profondeur des ouvrages.

La réalisation de la cartographie du potentiel géothermique a été menée à partir des connaissances acquises au travers des différents programmes de recherches du BRGM, dans le domaine de la géologie et des risques, dans le domaine de l'eau. Les aléas qui sont étudiés en Limousin sont :

- 1 - Aléa « affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques » ;
- 2 - Aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » ;
- 3 - Aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière » ;
- 4 - Aléa « glissement de terrain » ;
- 5 - Aléa « pollution des sols et des nappes souterraines » ;
- 6 - Aléa « artésianisme potentiel » ;
- 7 - Aléa « mise en communication d'aquifères » ;
- 8 - Aléa « remontée de nappe ».

L'analyse combinatoire des critères et poids relatifs à ces huit aléas produit trois zones où s'appliquent des règles distinctes.

- zone **verte** : zone qui nécessite uniquement la présence d'un foreur qualifié ;
- zone **orange** : zone qui nécessite un foreur qualifié et l'avis d'un expert (hydrogéologue et/ou géologue) ;
- zone **rouge** : zone où les forages géothermiques de minime importance sont interdits.

À ce jeu de données à caractère géologique et hydrogéologique, les contraintes réglementaires régionales ou suprarégionales se surimposent et la présence d'une zone réglementée ou de prescriptions particulières (**nommée « couche administrative »**) s'impose à la carte d'aléas réalisée.

Les zones réglementées retenues sont celles concernant le sous-sol : périmètre de protection AEP et eaux minérales, anciennes zones d'activités minières, stockage de gaz, ZRE...

Tous les projets géothermiques sur nappe ou par sondes géothermiques verticales devront prendre en compte l'existence de ces contraintes réglementaires ou naturelles. Certaines portions du territoire, du fait de particularités naturelles, font ainsi l'objet de mesures de protection susceptibles d'impacter le dimensionnement d'un projet de géothermie, voire de l'interdire.

Sommaire

1. Principes généraux de la Géothermie de Minime Importance (GMI)	9
1.1. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE FERMÉ.....	9
1.2. ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE OUVERT	10
2. Contexte en Limousin	11
2.1. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE	11
2.1.1. Le Code minier	12
2.1.2. Les réglementations territorialisées à prendre en considération	13
2.2. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL	18
2.2.1. Contexte géologique du Limousin	20
2.2.2. Contexte hydrogéologique en Limousin	24
3. Cartographie des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance en Limousin	37
3.1. HÉRITAGE DE L'ALÉA LE PLUS ÉLEVÉ DEPUIS LE NIVEAU DE PROFONDEUR RECONNU VERS LA SURFACE	38
3.2. CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES ET NATURELLES.....	39
3.3. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS LIÉS AUX OUVRAGES GÉOTHERMAUX	40
3.3.1. Aléa « affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » :.....	41
3.3.2. Aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) »	44
3.3.3. Aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités d'origine minière ».....	50
3.3.4. Aléa « glissement de terrain »	52
3.3.5. Aléa « pollution des sols et des nappes souterraines »	55
3.3.6. Aléa « artésianisme potentiel »	59
3.3.7. Aléa « mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères »	61
3.3.8. Aléa « inondation par remontée de nappe »	65
3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA FINAL.....	67
3.5. RESTITUTION NATIONALE DE LA CARTE TERRITORIALE	69
4. Conclusion	71
5. Définitions	75
6. Acronymes	77

7. Bibliographie 79**Liste des figures**

Figure 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)	9
Figure 2 : Schéma d'un doublet, puits de production et puits d'injection et échangeur en surface	10
Figure 3 : Échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe),	10
Figure 4 : Distinctions règlementaires et pratiques entre Périmètres de Protection et Aire d'Alimentation.....	15
Figure 5 : Carte géologique simplifiée du Limousin	22
Figure 6 : Schéma structural simplifié du Limousin.....	23
Figure 7 : Le socle compose 93 % de la surface totale du territoire limousin	24
Figure 8 : Modèle conceptuel d'aquifère de socle en contexte d'altération	25
Figure 9 : Nappe des granites fissurés en charge (captivité de 4 m) sous la nappe des altérites meubles (Site Javerdat)	28
Figure 10 : Phénomène d'artésianisme en limousin, (conductivité des eaux à l'émergence 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - conductivité des eaux du ruisseau voisin 56 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mars 2016)	28
Figure 11 : Schéma de mise en place d'un phénomène d'artésianisme.....	29
Figure 12 : Débits d'exhaures disponibles (BSS 2015).....	31
Figure 13 : Évolution probable du modèle conceptuel depuis le Crétacé	32
Figure 14 : Le concept anté-2006 d'aquifère de socle	33
Figure 15 : 7 % de la surface totale du territoire limousin est composée de terrains sédimentaires	34
Figure 16 : Points d'eau en niveau statiques dans le domaine sédimentaire du bassin de Gouzon	35
Figure 17 : Points d'eau en niveau statiques dans le domaine sédimentaire du bassin de Brive	36
Figure 18 : Périmètres des SAGE en territoire Limousin	40
Figure 19 : Liste des aléas retenus en Limousin.....	41
Figure 20 : Localisation des ouvrages avec logs géologiques validés dans les formations sédimentaires du Bassin de Brive	43
Figure 21 : Extrait du serveur http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines	45
Figure 22 : Démonstrateur BDLisa (http://www.reseau.eaufrance.fr/geotraitements/viewer/bdlisa) - Commune de Nespouls	47
Figure 23 : fiche d'identification BDLISA http://reseau.eaufrance.fr/geotraitements/bdlisa/files/entite/358AE03.pdf	47
Figure 24: Identification des zones endoréïques.....	48
Figure 25 : Représentation des zones endoréïques ou dépressions IGN SCAN 25® version 3	49
Figure 26 : Extrait de la cartographie de l'aléa «affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines)» et tableau de répartition des surfaces en Limousin	50
Figure 27 : Extrait de la cartographie de l'aléa «affaissement / effondrement lié aux cavités d'origine minière» et tableau de répartition des surfaces en Limousin	52

Figure 28 : Éléments constitutifs de la définition de la carte d'aléa mouvements de terrains pour la GMI	53
Figure 29 : Blocs en pied de falaise de grès et sur le glacis (source BRGM janvier 2016) - Effondrement d'anciennes ardoisères (source BRGM juillet 2014).....	54
Figure 30 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Glissement de terrain" et tableau de répartition des surfaces en Limousin.....	55
Figure 31 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Pollution des sols et des nappes souterraines" et tableau de répartition des surfaces en Limousin.....	57
Figure 32 : Extrait BASOL pour le territoire Limousin, actualisation avril 2016	58
Figure 33 : Zones en Limousin où IDPR \leq 800 et pentes <8%.....	59
Figure 34 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Artésianisme potentiel" et tableau de répartition des surfaces en Limousin.....	60
Figure 35 : BdLisaV1 (découpage local et ordre relatif 1) en Limousin	62
Figure 36 : BdLisaV1 (découpage local et empilement des ordres relatifs) en Limousin	63
Figure 37 : Tableau de repartition des valeurs du niveau d'éléade mise en communication des aquifères	64
Figure 38 : Extrait de la cartographie de l'aléa de mise en communication des aquifères.....	64
Figure 39 : Exemple de répartition du niveau d'aléa du phénomène remontée de nappe aux alentours de Limoges.	65
Figure 40 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Remontée de nappe"	66
Figure 41 : Niveaux d'aléas et surfaces impactées pour la remontée de nappe	66
Figure 42 : Niveaux d'aléa et facteurs de pondération pour les solutions doublet sur nappe et SGV.	67
Figure 43 : Valeurs d'aléas obtenues en fonction de la surface impactée en Limousin	69
Figure 44 : Simplification des résultats de l'analyse aux mailles de 100m	70
Figure 45 : Corine©LandCover (2008) en Limousin	71
Figure 46 : Qualification du territoire Limousin en fonction de la qualification des terres (Corine LandCover) et de la classification GMI pour les doublets géothermiques	72
Figure 47 : Qualification du territoire Limousin en fonction de la qualification des terres (Corine LandCover) et de la classification GMI pour les sondes géothermiques verticales	73

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes d'aléas	81
-------------------------------	----

1. 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.

1.1. 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 forage. 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) disposée dans un forage dont l'espace annulaire est comblé par un coulis spécifique (norme NF X-10-970¹).

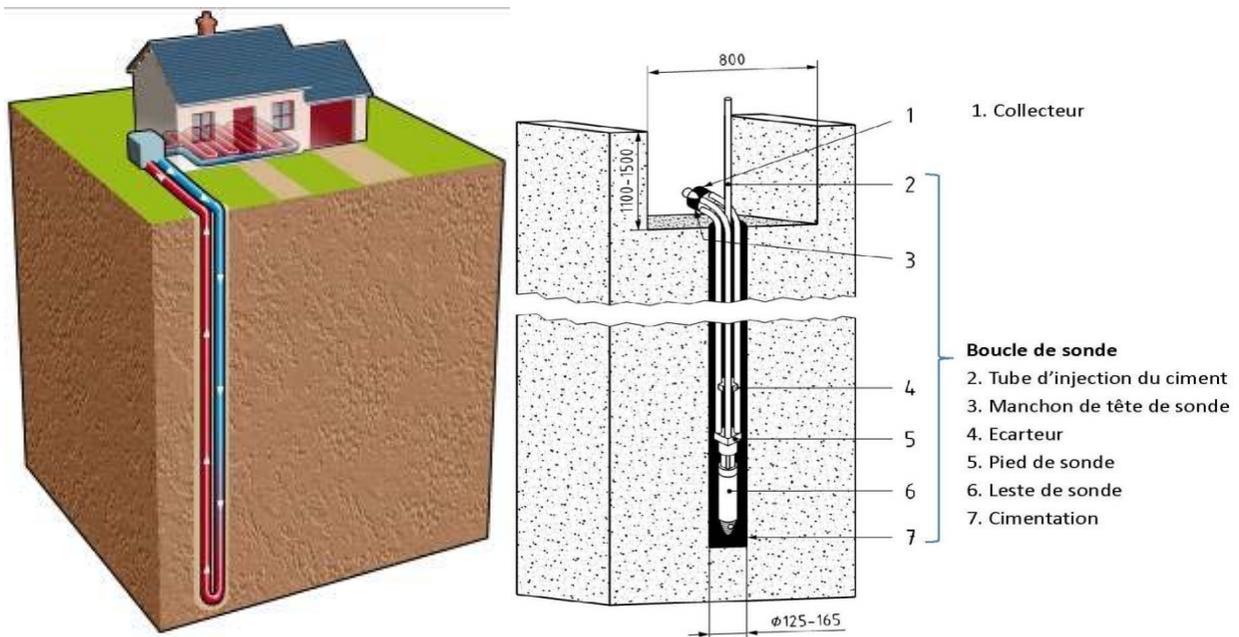


Figure 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)

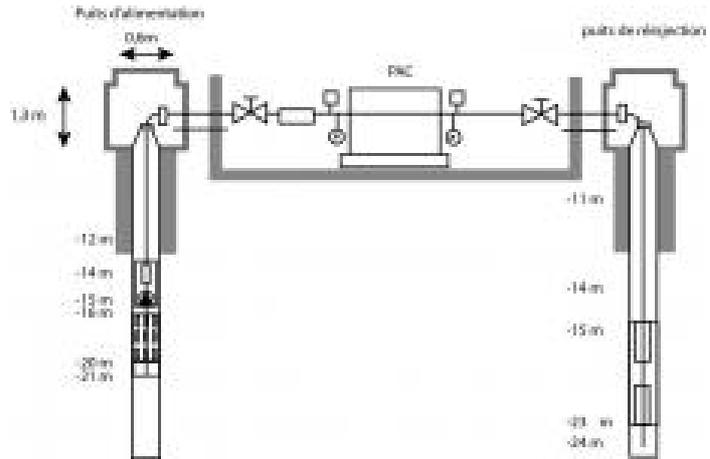
¹ La norme NF X-10-970 permet de garantir la réalisation d'un ouvrage de capteurs géothermiques verticaux de qualité tout en respectant l'environnement. Cette garantie est possible grâce à la définition des règles de l'art, limites de prestation et transferts de responsabilité.

1.2. 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 d'un 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 ». 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 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

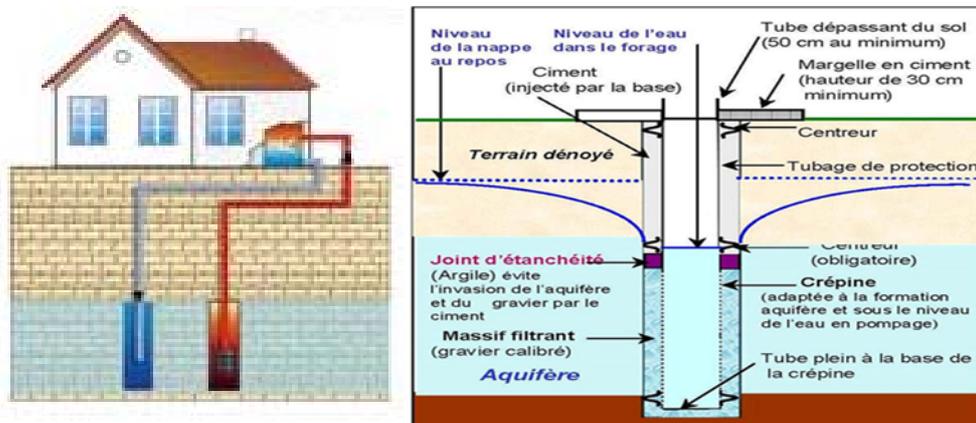


Enfin, la réalisation d'un doublet n'est possible qu'en l'absence de recyclage important des eaux réinjectées jusqu'au puits de production :

- 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),



2. Contexte en Limousin

2.1. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Le recours à la géothermie de minime importance à usage domestique comme source alternative d'énergie est en progression. En Limousin, le secteur des sondes géothermiques verticales s'est ainsi développé pendant les années 2007/2011. Les raisons de ce développement sont à relier à diverses incitations réglementaires en vigueur à l'échelle nationale ou régionale qui ont été, depuis 2011, réduites.

Le gisement énergétique que compose le sous-sol est supposé « quasi illimité », et il est composé d'unités de chaleurs présentes dans le milieu souterrain appelées encore communément thermies². En revanche, à l'échelle des territoires, cette exploitation des « thermies » présentes, dans les formations géologiques superficielles, est susceptible d'avoir des conséquences sur le milieu naturel, sur les eaux souterraines et sur la structure des terrains par les ouvrages qui en permettent l'accès. Si ces impacts potentiels peuvent être liés à la qualité de la réalisation des ouvrages, ils dépendent en premier lieu de facteurs géologiques et hydrogéologiques propres aux différents secteurs d'implantation.

Les zones de contraintes à l'échelle du territoire national ont été répertoriées et cartographiées à partir de travaux déjà réalisés dans le cadre des études « Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique (ADEME, ONEMA, BRGM, 2011) », « Méthodologie d'une cartographie des contraintes et des risques géologiques liés aux forages géothermiques de minime importance (*rapport BRGM/RP-61768-FR, mars 2013*) » et du guide méthodologique final (*Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance, juillet 2015*³). Leur déclinaison au territoire Limousin impose un changement d'échelle et une adaptation régionale de la méthode nationale.

Par ailleurs, dans le cadre de l'évolution de la réglementation de la géothermie de minime importance pour laquelle un décret est paru au début de l'année 2015, le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) souhaite que soit élaboré l'outil décisionnel cartographique proposé par le guide méthodologique susmentionné. Cet outil cartographique est en lien avec un dispositif de télé-déclaration des ouvrages géothermiques, déclenchant le recours éventuel à un expert agréé ou l'imposition d'une interdiction de toute projet de GMI. Il permet aux services de l'État (DREAL/DDT) d'évaluer l'opportunité d'instruire les dossiers de déclarations d'activités géothermiques de minime importance (10 m - 200 m) en fonction des risques identifiés sur leur territoire.

² Symbole **th**, la **thermie** est une ancienne unité de quantité de chaleur. C'est un multiple de la calorie. Cette unité est encore parfois utilisée par les thermiciens

³ Guide pris en application de l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance. Entrée en application le 1er juillet 2015. Rapport réalisé conjointement entre le BRGM et le CEREMA : CEREMA : Margaret Herbaux, Charles Kreziak ; BRGM : Pierre Durst, Dominique Midot, Susanne Schomburgk, Jean-Claude Martin, Romain Cochery, Guy Fourniguet, Anne-Valerie Barras

2.1.1. Le Code minier

La géothermie est classée par le Code minier sous quatre catégories dites :

- **géothermie de haute température** : il s'agit de l'exploitation des gîtes dont la température de leurs eaux, mesurée en surface, est supérieure à 150 °C ;
- **géothermie de basse température** : il s'agit de l'exploitation des gîtes dont la température de leurs eaux, mesurée en surface, est inférieure ou égale à 150 °C ;
- **géothermie de minime importance** fait partie de la géothermie basse température mais dispose d'une dérogation pour les forages de moins de 200 m de profondeur. Les critères de la géothermie de minime importance sont définis dans le paragraphe II de l'article 3 du décret n° 78498 du 28 mars 1978 modifié ;
- **géothermie de surface**, située à moins de 10 mètres de profondeur. Ces installations ne sont pas régies par le Code minier.

Les installations de géothermie de minime importance ne sont soumises qu'à une simple déclaration, tandis que toutes les autres installations sont soumises à autorisation préalable à la recherche et à l'exploitation de l'énergie du sous-sol.

Les critères qui encadrent les techniques dites de géothermie de minime importance, se définissent de la manière suivante selon les moyens techniques mis en œuvre :

- pour les échangeurs géothermiques fermés :
 - o la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres ;
 - o la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
 - o les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone d'interdiction :
 - liée à des données administratives (zone réglementée ou imposant des prescriptions particulières, périmètre de protection AEP et eaux minérales, stockage de gaz, ZRE, emprise minière...) ;
 - où le contexte géologique ou hydrogéologique présente des aléas susceptibles de provoquer des désordres non remédiables ;
- pour les échangeurs géothermiques ouverts :
 - o la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres ;
 - o la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
 - o la température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement est inférieure à 25 °C ;
 - o les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle ;
 - o les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement ;
 - o les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone d'interdiction :
 - liée à des données administratives (zone réglementée ou imposant des prescriptions particulières, périmètre de protection AEP et eaux minérales, stockage de gaz, ZRE, emprise minière...) ;
 - où le contexte géologique ou hydrogéologique présente des aléas susceptibles de provoquer des désordres non remédiables.

La réalisation des travaux de forages pour l'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance (aussi dénommés ouverture de travaux d'exploitation d'un gîte géothermique) est encadré comme suit :

- préalablement aux travaux de forage : l'activité géothermique répondant aux critères de la géothermie de la minime importance doit être déclarée. Cette démarche peut être réalisée par voie dématérialisée ;
- les forages doivent être réalisés par une entreprise qualifiée selon les conditions techniques prévues par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance ;
- la localisation d'un échangeur doit répondre aux prescriptions définies par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables. En outre, selon la localisation de l'échangeur au regard de la **carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance**, une attestation de compatibilité est jointe à la déclaration ;
- l'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance et sa cessation d'exploitation doivent être mises en œuvre conformément à l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance. Les travaux de cessation d'exploitation et le changement d'exploitant de la ressource sont à déclarer. Ces démarches peuvent être réalisées par voie dématérialisée.

L'ensemble des informations nécessaires à ces démarches est disponible sur le site internet : www.geothermie-perspectives.fr.

La localisation de l'échangeur, ou de la pompe d'exhaure, au sein de l'intervalle de profondeur de 10 à 200 mètres conditionne également les moyens techniques mis en œuvre pour la réalisation des ouvrages. La méthodologie nationale décline ainsi les critères des zones réglementaires encadrant la GMI selon trois intervalles de profondeur :

- de 10 à 50 mètres ;
- de 10 à 100 mètres ;
- de 10 à 200 mètres.

L'interdépendance de ces niveaux, plus ou moins forte selon les régions du territoire national, revêt un caractère particulier en domaine de socle. Cela sera décrit au sein du chapitre relatif aux contextes géologiques et hydrogéologiques.

2.1.2. Les réglementations territorialisées à prendre en considération

Les forations envisagées dans le cadre de la géothermie de très basse température puis l'exploitation de l'ouvrage induisent la prise en compte de certaines précautions au regard des enjeux et des risques présents dans le sous-sol. Les réglementations, notamment sur certaines zones du territoire, sont à prendre en compte. Il s'agit, en particulier, de respecter les prescriptions sur les zones à proximité de captages d'eau potable, d'eau minérale, les zones mentionnées dans les SDAGE et les SAGE ainsi que les périmètres qui disposent de servitudes d'utilité publique encadrant l'utilisation du sol et du sous-sol.

Les réglementations, non exhaustives, décrites ici sont indépendantes de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Elles devront être prises en compte lors de la réalisation d'un forage de géothermie.

Protection des captages d'alimentation en eau potable

a) Afin de préserver la ressource en eau potable, des périmètres de protection sont définis autour de ces captages d'alimentation. Des prescriptions particulières sont requises pour encadrer les activités susceptibles d'altérer la ressource. L'objectif est de réduire les risques de pollutions ponctuelles et accidentelles. Les différents périmètres de protection de captage sont définis par l'article L-1321-2 du code de la santé publique et ont été rendus obligatoires pour tous les ouvrages de prélèvement d'eau d'alimentation depuis la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

Sur la base d'une étude du contexte hydrogéologique (et/ou hydrologique) fournie par la collectivité, les périmètres de protection sont délimités après l'avis d'un hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique. La délimitation de ces périmètres et les prescriptions adoptées, afférentes aux différents périmètres, sont fixées après une enquête publique par un arrêté préfectoral de déclaration d'utilité publique. L'instruction administrative de cette procédure est assurée par les Agences Régionales de Santé (ARS). Les périmètres sont définis à trois échelles correspondant à trois niveaux de protection :

- **le périmètre de protection immédiate** : site clôturé - proche du captage appartenant à une collectivité publique, dans la majorité des cas. Tous travaux, installations, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols y sont interdits hormis les prescriptions relatives à l'exploitation, l'entretien de l'ouvrage de prélèvement de l'eau, au périmètre lui-même. Elles sont précisées explicitement dans la déclaration d'utilité publique ;
- **le périmètre de protection rapprochée** : secteur plus vaste pour lequel toute activité susceptible de provoquer une pollution y est interdite ou réglementée (soumise à prescription particulière : construction, dépôts, rejets...). Son objectif est de prévenir la migration des polluants vers l'ouvrage de captage ;
- **le périmètre de protection éloignée** : facultatif - ce périmètre est créé si certaines activités sont susceptibles d'être à l'origine de pollutions importantes. Ce secteur correspond généralement à la zone d'alimentation du point de captage, voire à l'ensemble du bassin versant. En janvier 2014, 68,8 % des captages bénéficiaient d'une protection formalisée par une Déclaration d'Utilité Publique (DUP) soit 80,2 % du volume d'eau prélevé à l'échelle nationale.

L'arrêté préfectoral d'autorisation de prélèvement et d'institution des périmètres de protection fixe les servitudes de protection opposables au tiers par DUP. Il conviendra donc de se reporter aux arrêtés de mise en place des périmètres de protection de captage pour identifier d'éventuelles contraintes à la réalisation de dispositifs géothermiques. La réalisation de forages est toujours interdite dans le périmètre de protection immédiat. Il est fréquent que les forages géothermiques soient interdits dans le périmètre de protection rapprochée.

b) Depuis la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, la prise en compte des problématiques de pollutions diffuses s'est traduite par un dispositif complémentaire à celui précité. L'Aire d'Alimentation du Captage (AAC), correspondant aux surfaces contribuant à l'alimentation du captage par infiltration ou par ruissellement, est définie et délimitée. Elle inclut à minima les différents périmètres précités. Les dispositifs de protection de la ressource

complémentaires s'articulent avec ceux déjà existants et de manière cohérente. Ce dispositif est posé et encadré par les articles L.211-1 et suivants du code de l'environnement.

	Périmètre de protection immédiate et rapprochée	Aire d'alimentation
Base juridique	Article L. 1321-2 et R. 1321-13 du code de la santé publique	Article L.211-3-5 de la loi sur l'eau et les Milieux Aquatiques / Article R. 114-1 et R. 144-5 du code rural
Etendue	Généralement quelques hectares	Généralement plus vaste que celle du PPC
But	Protection contre les pollutions ponctuelles et accidentelles	Lutte contre les pollutions diffuses
Moyens d'action	Prescriptions et indemnisations	Programme d'actions (financé au besoin les premières années)
Application	Systématique et obligatoire pour tous les captages	A l'initiative du préfet qui à la possibilité de rendre les mesures de protection obligatoires dans le cadre d'un dispositif ZSCE

Figure 4 : Distinctions réglementaires et pratiques entre Périmètres de Protection et Aire d'Alimentation.

La réalisation de forages géothermiques devra tenir compte également de ces zones et des arrêtés associés.

Protection des eaux minérales

Le périmètre de protection est institué en vertu des articles L. 1322-3 à L. 1322-13 du Code de la Santé Publique autour d'une source d'eau minérale déclarée d'intérêt public en vue d'éviter toute altération ou diminution de cette source. Il s'agit d'un périmètre à l'intérieur duquel :

- aucun sondage, aucun travail souterrain ne peuvent être pratiqués dans le périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public sans autorisation préalable délivrée par le représentant de l'État dans le département ;
- à l'égard des fouilles, tranchées pour extraction de matériaux ou tout autre objet, fondations de maisons, caves ou autres travaux à ciel ouvert, le décret mentionné à l'article L.1322-13 qui fixe le périmètre de protection peut exceptionnellement imposer aux propriétaires l'obligation de faire, au moins un mois à l'avance, une déclaration au représentant de l'État dans le département qui en délivre récépissé ;
- les autres activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux peuvent également être soumis à autorisation ou à déclaration par le décret mentionné à l'article L 1322-13 instituant le périmètre de protection ;
- les travaux, activités, dépôts ou installations précités et entrepris, soit en vertu d'une autorisation régulière, soit après une déclaration préalable, peuvent, sur la demande du propriétaire de la source, être interdits par le représentant de l'État dans le département.

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

Le territoire Limousin est concerné par deux Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), documents de planification décentralisés définissant, pour une période de six ans, les grandes orientations pour une gestion équilibrée de la ressource en eau ainsi que les objectifs de qualité et quantité des eaux à atteindre à l'échelle des grands bassins hydrographiques.

Les SDAGE actuels Loire-Bretagne et Adour-Garonne s'étendent de 2016 à 2021. Ces documents ont une portée juridique qui s'impose aux décisions administratives en matière de police des eaux, notamment, l'instruction des déclarations et des autorisations administratives (rejets, urbanisme...). De plus, plusieurs autres documents de planification (schémas de cohérence territoriale, plans locaux d'urbanisme, schémas départementaux des carrières...) doivent leur être compatible ou rendus compatibles dans les 3 ans.

L'un des objectifs généraux des SDAGE consiste en l'atteinte d'un « bon état » fixé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), sauf exemptions (reports de délai, objectifs moins stricts) ou procédures particulières (masses d'eau artificielles ou fortement modifiées, projets répondant à des motifs d'intérêt général) dûment motivées dans les SDAGE.

Les SDAGE déterminent aussi les aménagements et les dispositions nécessaires pour prévenir la détérioration et assurer la protection et l'amélioration de l'état des eaux et des milieux aquatiques, afin de réaliser les objectifs environnementaux, ainsi que les sous-bassins hydrographiques pour lesquels un SAGE doit être réalisé.

Un certain nombre de documents d'accompagnement complètent, à titre informatif, le SDAGE et permettent notamment de replacer celui-ci dans le cycle de gestion :

- une présentation synthétique relative à la gestion de l'eau à l'échelle du bassin ;
- une présentation des dispositions prises en matière de tarification de l'eau et de récupération des coûts afin de contribuer à la réalisation des objectifs du SDAGE ;
- le résumé du programme de mesures ;
- le résumé du programme de surveillance ;
- le dispositif de suivi destiné à évaluer la mise en œuvre du SDAGE ;
- un résumé des dispositions prises pour l'information et la consultation du public ainsi que la déclaration environnementale prévue à l'article L.122-10 du code de l'environnement ;
- une note d'évaluation du potentiel hydroélectrique à l'échelle du bassin hydrographique ;
- un document relatif aux eaux souterraines.

Les SDAGEs sont plus ou moins précis selon les cas, mais tous demandent de porter une attention particulière d'une part à l'équilibre entre les prélèvements et les capacités de renouvellement des masses d'eau souterraines, et/ou d'autre part, à l'absence d'introduction de polluants et de préserver l'isolation des nappes traversées entre elles et vis-à-vis notamment des inondations et des ruissellements de surface. Ainsi, que ce soit dans le cadre de préoccupations quantitatives ou qualitatives, les SDAGEs donnent des recommandations qui, avec leur traduction dans les SAGEs, impacteront les possibilités ou pas d'implantation de forages géothermiques.

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

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est un document de planification de la gestion de l'eau à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente (bassin versant, aquifère...). Il fixe des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau et doit être compatible avec le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.

Le SAGE est un document élaboré par les acteurs locaux (élus, usagers, associations, représentants de l'État...) réunis au sein de la Commission Locale de l'Eau (CLE). Ces acteurs locaux établissent un projet pour une gestion concertée et collective de l'eau.

Dans le prolongement du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), il décline au niveau d'un bassin versant (eaux superficielles) ou d'une nappe d'eau souterraine, les actions et moyens à mettre en œuvre pour gérer et garantir au mieux les usages de l'eau.

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

- il est opposable à l'administration (État, collectivités locales, établissements publics...) ;
- il est également opposable aux tiers, depuis la nouvelle Loi sur l'eau adoptée le 30 décembre 2006. Cela signifie que les modes de gestion, les projets ou les installations d'un tiers doivent être conformes au règlement du SAGE. En cas de non-respect, les contrevenants pourront être verbalisés ;
- il ne crée pas de droit, mais fixe des objectifs généraux en terme de qualité des eaux, de gestion de la ressource (aspect quantitatifs), de préservation des milieux naturels et de gestion du risque d'inondation, ainsi que des priorités pour les atteindre ;
- ses objectifs généraux s'imposent à l'administration de manière plus ou moins forte selon que celle-ci intervient dans le domaine de l'eau et de l'aménagement du territoire ou non. Lorsqu'il est situé à l'intérieur du périmètre d'un SAGE, un prélèvement d'eau à usage géothermique doit être compatible avec les objectifs généraux et le règlement de celui-ci (art. L212-5-2 du Code de l'Environnement). Le règlement d'un SAGE peut limiter localement (voire interdire) l'usage géothermique des eaux souterraines.

Les documents en lien avec les SAGE sont consultables sur le site internet : www.gesteau.eaufrance.fr.

Périmètres de protection des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux

Certains secteurs font l'objet de contraintes réglementaires en raison de structures souterraines particulières comme les stockages souterrains de gaz ou des installations souterraines et devront donc être pris en compte. Des servitudes d'utilité publique relatives à l'usage du sol et du sous-sol sont instaurées à proximité de ces stockages souterrains.

Servitudes d'utilité publique prévue par l'article L.515-12 du code de l'environnement

Des servitudes peuvent être instituées au titre du L.515-12 du code de l'environnement concernant l'utilisation du sol et du sous-sol. Ces servitudes peuvent être instituées sur des terrains pollués par l'exploitation d'une installation, sur l'emprise des sites de stockage de déchets ou dans une bande de 200 mètres autour de la zone d'exploitation, ou sur l'emprise des sites d'anciennes carrières ou autour de ces sites sur des surfaces dont l'intégrité conditionne le respect de la sécurité et de la salubrité publique ou dans le voisinage d'un site de stockage géologique de dioxyde de carbone.

Ces servitudes peuvent comporter la limitation ou l'interdiction des modifications de l'état du sol ou du sous-sol, la limitation des usages faits du sol et du sous-sol. Des prescriptions particulières pouvant aller jusqu'à l'interdiction de réaliser un forage sur un terrain donné peuvent être posées. Les périmètres des sites miniers du Limousin s'inscrivent dans ce cadre.

2.2. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Au-delà du contexte réglementaire, la méthodologie nationale a réalisé l'inventaire des phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation d'ouvrages de géothermie. Ces phénomènes d'ordre géologique, hydrogéologique et environnemental, peuvent apparaître suite à la réalisation d'un forage géothermique de très basse température. Ils sont recensés dans le guide méthodologique national et ont permis d'établir la méthodologie d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Ces phénomènes identifiés par la méthodologie nationale, pour la première cartographie proposée à l'échelle nationale, sont présentés dans le tableau suivant. Le biseau salé a été identifié par la méthodologie nationale mais n'est décliné, s'il y a lieu, qu'à l'échelle régionale.

Phénomène redouté	Définition du phénomène
1 Affaissement / surrection lié aux niveaux évaporitiques	Affaissement voire effondrement ou surrection des terrains de surface lié soit à la dissolution d'un niveau d'évaporite, soit au gonflement de ce niveau en cas de présence d'anhydrite. Ces phénomènes sont provoqués par la mise en communication d'aquifères superficiels ou profonds avec les horizons évaporitiques à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.
2 Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines)	Ces phénomènes pourraient être provoqués soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit sur toute la durée de vie du dispositif souterrain, soit par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.
3 Affaissement / effondrement liés aux cavités minières : effondrements localisés (fontis) et généralisés et affaissements	De par leur brutalité, les effondrements localisés et généralisés sont susceptibles de mettre en péril la sécurité des personnes. Ils généreront donc un phénomène plus fort que les affaissements qui sont des phénomènes plus lents et qui n'induisent généralement qu'un risque économique en affectant les constructions. Dans le cadre d'un projet de géothermie basse température, la foration peut avoir des conséquences sur la tenue des terrains et ainsi provoquer des phénomènes d'affaissement/effondrement dans les zones concernées par des cavités minières. Ce phénomène pourrait donc être provoqué soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit sur toute la durée de vie de l'ouvrage, soit par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.
4 Mouvements de terrain (ou glissements de terrain)	Les zones présentant les conditions géométriques et lithologiques favorables au glissement de terrain peuvent rester stables en l'absence de déclencheur. En revanche, la foration au cours de la mise en place du dispositif de géothermie peut être un déclencheur de ce type de phénomène. Il en est de même pour la mise en communication avec des eaux superficielles, souterraines ou le fluide caloporteur. Un tel phénomène est donc susceptible d'être initié par la foration ou l'exploitation géothermique.
5 Pollution des sols et des nappes	Pollution des sols et des nappes par infiltration de polluants depuis la surface ou mise en contact d'aquifères plus profonds avec des aquifères plus superficiels potentiellement pollués. Ce phénomène pourrait être provoqué soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit en cas de défaut d'étanchéité du trou de forage sur toute la durée de vie de l'ouvrage par l'infiltration de polluants depuis la surface ou la mise en communication de nappes polluées avec des nappes plus profondes.
6 Phénomène d'artésianisme	Remontée non maîtrisée de l'eau en surface pouvant entraîner des inondations.

7	Mise en communication d'aquifères	<p>Écoulement de l'eau d'un aquifère dans un autre pouvant entraîner :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une dégradation de la qualité de l'eau dans un des aquifères si l'autre est pollué ou se caractérisant par une eau avec un faciès chimique différent ; - la baisse du niveau piézométrique d'une nappe pouvant entraîner des assèchements au sein des captages voisins, voire des désordres géotechniques ; - l'augmentation du niveau piézométrique d'une nappe superficielle pouvant entraîner une remontée d'eau à la surface.
8	Remontée de nappe	Lorsque le niveau piézométrique d'une nappe superficielle est proche de la surface, la réinjection d'eau est susceptible de provoquer localement une surcote pouvant entraîner une inondation des terrains en surface, voire une déstabilisation géotechnique.
9	Biseau salé	Un « biseau salé » ou « intrusion salée » est une intrusion d'eau saumâtre ou salée dans une masse d'eau. Ainsi, en zone côtière, il peut être généré par un pompage local de la nappe d'eau douce dont la base repose parfois sur une lame d'eau plus salée en relation avec l'eau de l'océan. Cela provoque alors une remontée de cette interface eau-douce/eau-salée qui compense ainsi la baisse de pression de l'aquifère d'eau douce sur la partie salée de l'aquifère sous-jacent et une remontée de l'eau salée sous le simple principe de l'équilibre des pressions d'Archimède. Il s'agit, en général, d'un phénomène difficilement réversible.

Ces neuf phénomènes sont associés aux contextes géologique et hydrogéologique des territoires étudiés et les variations de ces contextes justifient la déclinaison régionale de la cartographie.

2.2.1. Contexte géologique du Limousin

Les formations géologiques

La région Limousin est constituée de deux entités géologiques fondamentalement différentes, le massif cristallin du Massif Central et le bassin sédimentaire d'Aquitaine (figure 5). 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. Ces roches sont organisées en grandes unités structurales (figure 6) 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 Lapleau.

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.

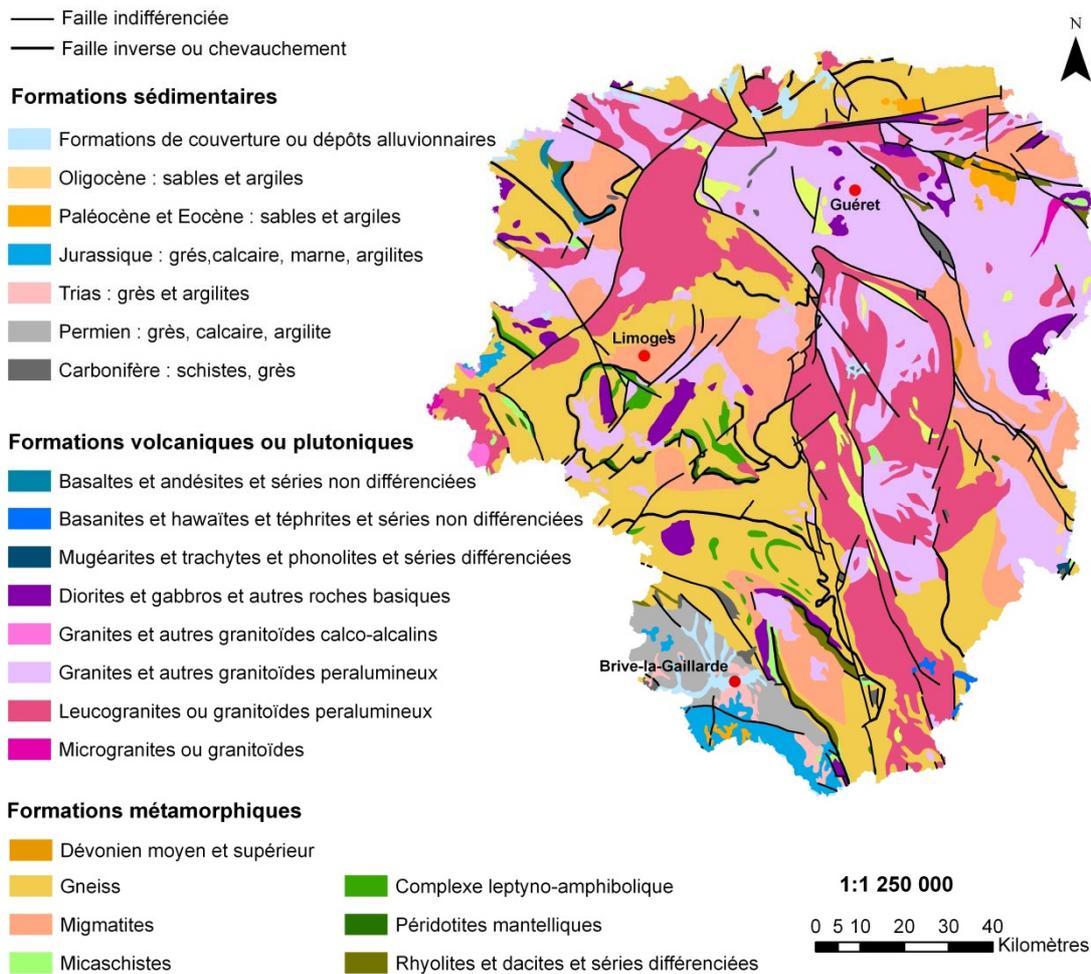


Figure 5 : Carte géologique simplifiée du Limousin

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.

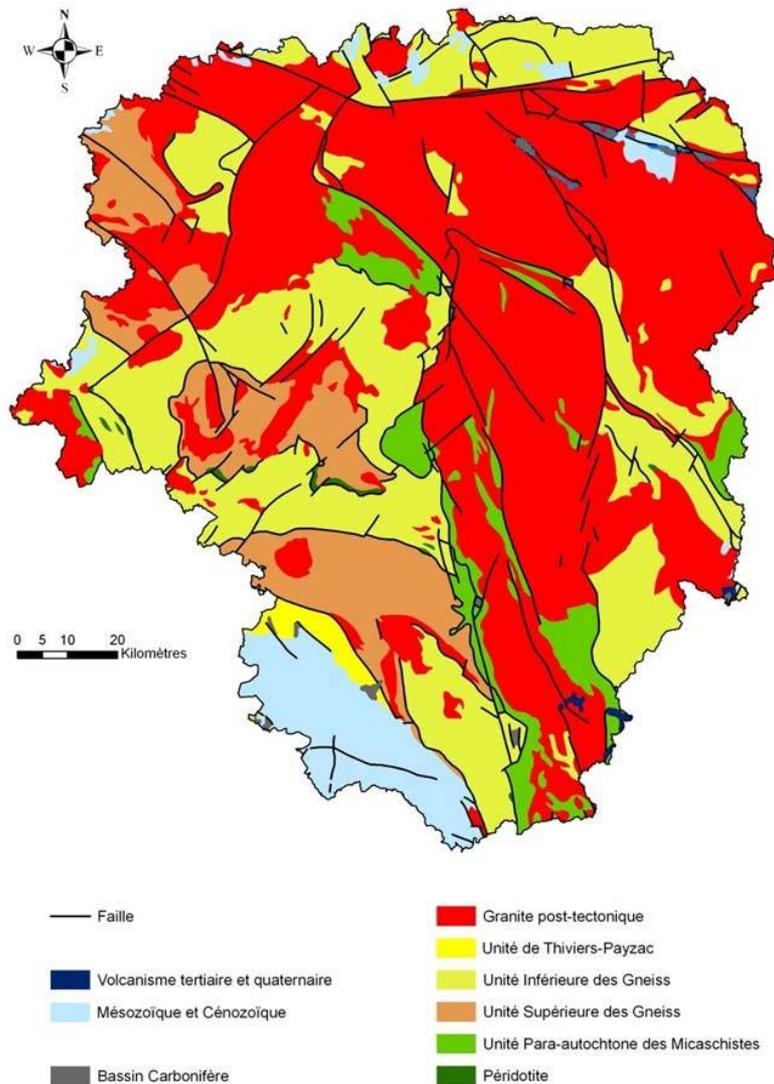


Figure 6 : Schéma structural simplifié du Limousin

2.2.2. Contexte hydrogéologique en Limousin

EN DOMAINE DE SOCLE

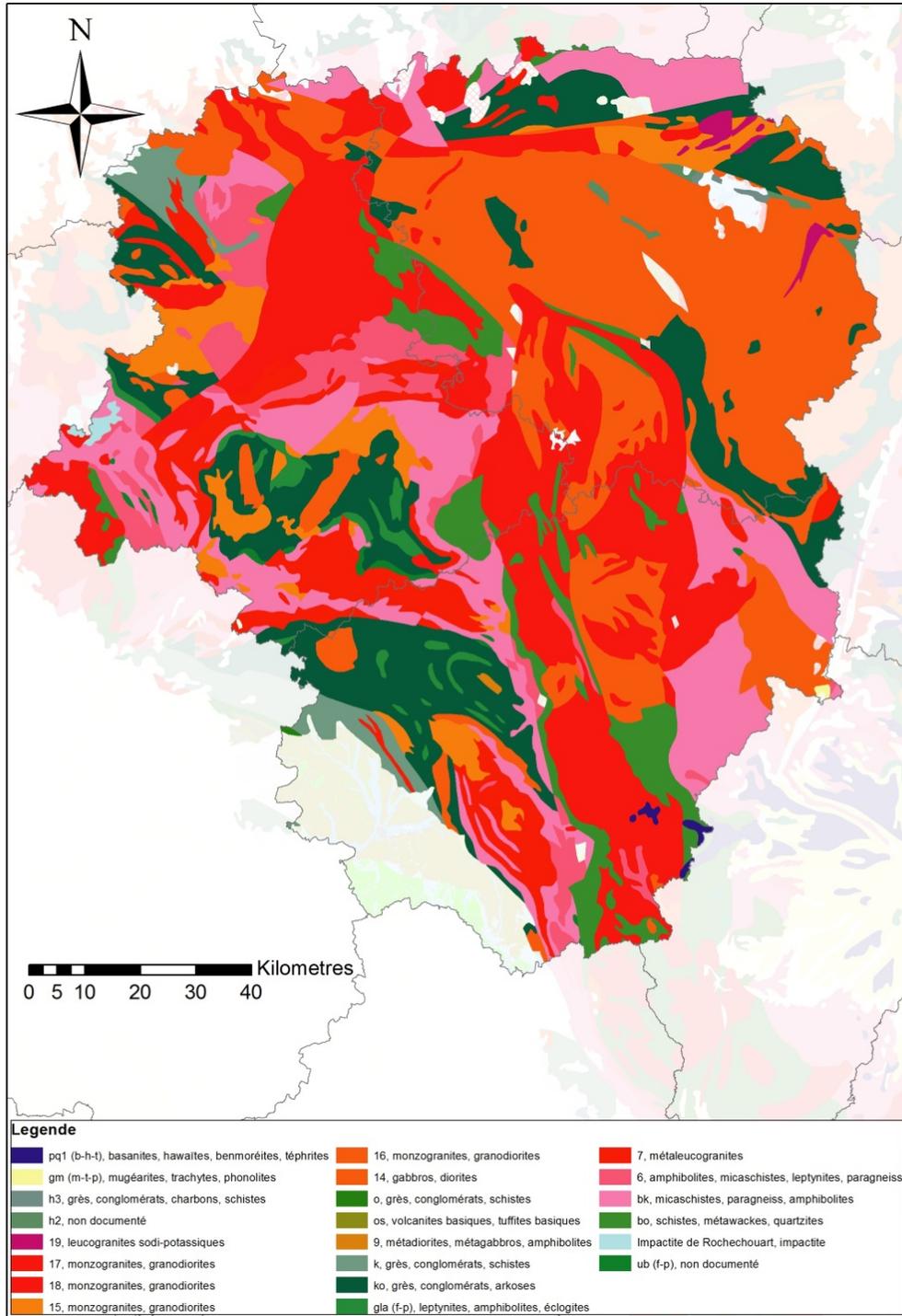


Figure 7: Le socle compose 93 % de la surface totale du territoire limousin

Sur le territoire limousin, la connaissance des eaux souterraines résulte d'études menées par le BRGM dans le cadre de ces actions d'appui aux politiques publiques et dans le cadre du suivi de piézomètres. Trnte-trois piézomètres sont en place dans le socle Limousin avec un résumé de l'état actuel des connaissances, fondé sur ces réseaux de mesures et études récentes, proposé pour esquisser le contexte de l'hydrogéologie régionale et les phénomènes d'artésianisme observés en Limousin. 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 potentiels⁴ illustrée sur la figure 8.

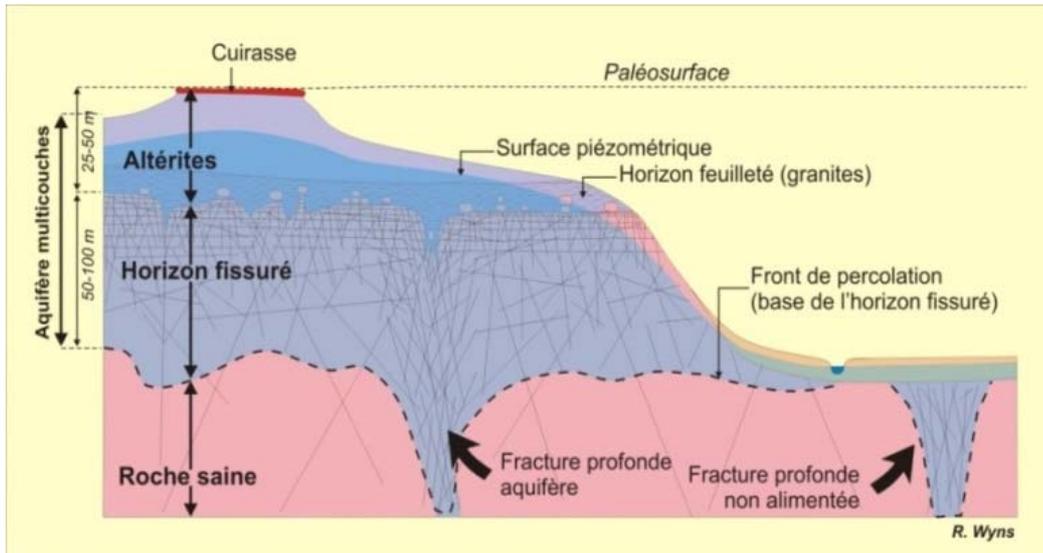


Figure 8 : Modèle conceptuel d'aquifère de socle en contexte d'altération

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 .

⁴ 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.

+ 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.

L'horizon fissuré : il a été mis en évidence dans de nombreux sites (cf. travaux de recherche menés au BRGM depuis la fin des années 90). Cet horizon fissuré permet la circulation de l'eau (Lachassagne, Wyns 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, 2005). 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 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. Celle-ci au sein d'un aquifère dépend de son aptitude à stocker et restituer l'eau qu'il reçoit. Cette aptitude est conditionnée par la porosité efficace et la perméabilité du milieu, ces deux propriétés gouvernant le stockage et la restitution (ou de circulation) de l'eau. Elles sont nécessaires pour qualifier la présence ou non d'une nappe souterraine :

- un milieu qui ne fait que stocker (par exemple une formation argileuse ou une formation massive fracturée dans laquelle les plans de fracture ne communiquent pas entre eux) n'est pas une nappe ;
- une formation massive fissurée dans laquelle l'eau ne fait que circuler par les fissures n'en est pas une non plus.

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 ;
- 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 nappe⁵ 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, cette perméabilité est en moyenne comprise entre **10^{-7} m/s et 5.10^{-6} m/s** (*Dewandel et al., 2006*). Cette faible perméabilité est, au sens général, celle d'un semi-aquifère ou *aquitard*⁶, 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. La perméabilité 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 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 $4\text{ m}^3/\text{h}$ à $7\text{ m}^3/\text{h}$. 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. Cet 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.

En Limousin, dans la grande majorité des points du réseau de suivi piézométrique géré 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.

⁵ 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*.

⁶ un aquitard représente une formation contenant une quantité non négligeable d'eau, mais peu perméable.

En dehors des périodes extrêmes, étiages sévères ou de pleine recharge, pour les points de suivi où sont mesurés distinctement les niveaux d'eau de la nappe des altérites meubles et celle du milieu fissuré, les niveaux d'eau de l'aquifère du **milieu fissuré sont localement en captivité ou semi captivité sous les eaux du milieu des altérites meubles**. Les niveaux piézométriques sont alors, sur les ouvrages doubles suivis (un piézomètre dans les altérites et un piézomètre dans le milieu fissuré), plus élevés dans le milieu fissuré que dans le milieu des altérites (Figure 9). Ce fonctionnement exclut un transfert 'per descendum' de l'eau depuis les altérites vers le milieu fissuré. Au contraire, le milieu fissuré dans ces cas précis, alimente par drainance verticale 'per ascendum' les altérites meubles peu perméables qui le surmontent. Ce comportement produit en de nombreux endroits du limousin, des zones de "mouillères" ou prairies humides.

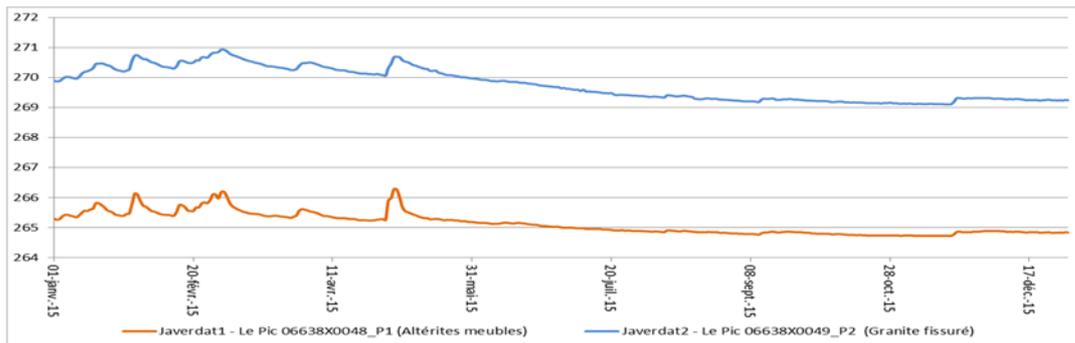


Figure 9 : Nappe des granites fissurés en charge (captivité de 4 m) sous la nappe des altérites meubles (Site Javerdat)

Dans des cas de forte recharge hivernale, **des phénomènes d'artésianisme vrai sont observés**. Pour les constater sur le terrain, il faut qu'existe un forage ou un puits permettant à l'eau de l'aquifère fissuré de rejoindre la surface au travers de ces altérites peu perméables. Il faut enfin que la pression piézométrique de l'aquifère profond soit supérieure à la pression atmosphérique à la cote de l'ouvrage.



Figure 10 : Phénomène d'artésianisme en limousin, (conductivité des eaux à l'émergence 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - conductivité des eaux du ruisseau voisin 56 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mars 2016)

Dans l'illustration précédente, le phénomène d'artésianisme peut se schématiser succinctement de la manière suivante.

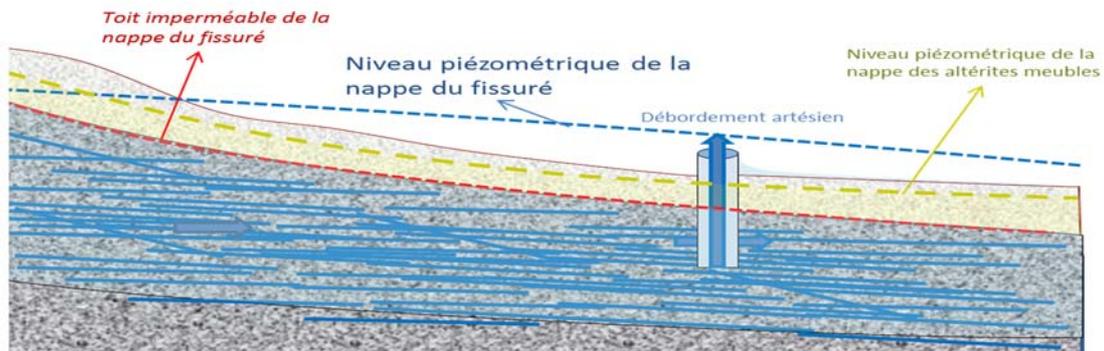


Figure 11 : Schéma de mise en place d'un phénomène d'artésianisme

Les phénomènes d'artésianisme, en période hivernale ou de nappe d'eau dans les altérites proche de la surface, sont courants sur des territoires du socle où la pente n'excède pas 7 % ou de qualification IDPR⁷ ≤ 1000 (chapitre à suivre : 3.3.6).

Parfois, un seul des deux aquifères se développe, soit dans les formations meubles proches de la surface et le milieu fissuré est absent en dessous. Soit le milieu fissuré affleure sans couverture meuble. Lorsque le socle sain affleure sans couverture (altérites ou plus généralement régolithe⁸), 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 présenté en introduction.

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.

Parfois une fracturation en surface de ce socle peut exister, d'origine tectonique ou par l'action des variations climatiques et des phénomènes de thermoclastie et/ou cryoclastie. Cette partie fracturée de proche surface est souvent très perméable et l'eau y circule rapidement dans le réseau de fractures connectées si la pente naturelle des terrains l'entraîne. Ce contexte correspond au secteur du Longy.

Il résulte de ces observations, de l'état actuel des connaissances des bases de données du Limousin, trois contextes hydrogéologiques.

⁷ Indice de développement et persistance des réseaux (Mardhel 2004)

⁸ 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).

- **Des ressources de faible productivité et de faible réserve**

En comparaison avec des milieux sédimentaires, dotés d'une inertie parfois pluriannuelle⁹, les remontées d'eau, dans le milieu fissuré en Limousin, à la suite des épisodes d'étiage, sont toutes extrêmement rapides. Elles caractérisent une très forte résilience de ces aquifères qui retrouvent leurs niveaux de charge maximum en peu de semaines voire quelques jours. Pour que ces nappes se recomposent rapidement, l'impluvium des réservoirs qui les contiennent est :

- soit associé à des territoires libres de couverture imperméable où l'eau peut s'infiltrer rapidement dans les fissures de la roche ;
- soit associé à une alimentation par les cours d'eau des têtes de bassins qui circulent sur ce substratum libre d'altérites et collectent les eaux de pluies pour les amener au milieu souterrain.

Le suivi piézométrique de ces aquifères, montre qu'ils atteignent rapidement leurs cotes de débordement. Ces aquifères contiennent un faible stock d'eau qui forme la réserve souterraine, c'est-à-dire celle qui est renouvelée tous les ans sur un cycle hydrogéologique normal et dont le faible volume mobilisable engendre des baisses rapides des niveaux piézométriques. Ces étiages entraînent des « assecs » dans les cours d'eau qui forment l'exutoire de ces aquifères quand aucun relai régulier de la pluie ne vient soutenir les mois d'étiages. La culture populaire en Limousin identifie ainsi ces périodes « à risque » à l'absence de pluie sur 5 semaines consécutives.

Dans les cas extrêmes, ces milieux peuvent réagir si rapidement que l'écoulement des eaux souterraines est assimilé, en termes de vitesses de concentration et de transfert aux exutoires, à la dynamique des eaux de surface. Si la géométrie du réservoir ne permet pas le 'piégeage' de ces eaux (zones de faible pentes, seuils naturels) la présence d'une nappe n'existe que le temps de transfert des eaux infiltrées vers leurs exutoires. On ne parle pas de nappe en ce cas car elles sont très peu pérennes. Ce comportement se retrouve dans des milieux fracturés où le pendage (l'inclinaison du massif fracturé, sa pente) crée un gradient important. Il est ainsi observé dans les aquifères au flanc des édifices volcaniques où l'eau circule rapidement au travers des formations laviques (coulées et tunnels de lave).

Un autre constat est lié à la faible productivité, en règle générale, des ouvrages captant les eaux souterraines. Les 1863 ouvrages d'alimentation en eau potable du territoire (AEP – ADES 2015) Limousin ont un débit moyen de 2 m³/h et une valeur médiane de 1 m³/h. Hors de 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 7,1 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 (Figure 12).

⁹ Les effets d'une sécheresse ou d'une recharge exceptionnelle peuvent être conservés au-delà du cycle hydrogéologique annuel.

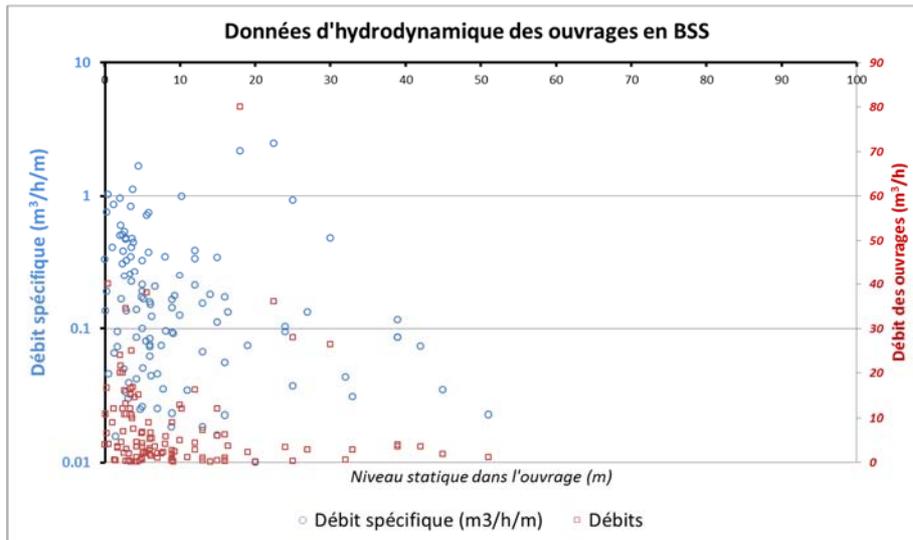


Figure 12 : Débits d'exhaures disponibles (BSS 2015)

- **Des aquifères en situation de captivité ou semi captivité proche de la surface des terrains naturels.**

Lorsqu'au-dessus de la formation aquifère, les formations de couverture existent (altérites meubles ou régolithe), elles composent un recouvrement, qui est en général peu perméable. Les eaux souterraines des nappes du milieu fissuré y sont alors captives ou semi-captives. Comparé au cas précédent, elles sont plutôt protégées d'une éventuelle pollution de surface. En revanche elles peuvent localement provoquer des phénomènes de remontée de nappe au travers de cette couverture peu perméable.

Ces altérites sont souvent maintenues humides par la charge qu'exerce à sa base l'aquifère du fissuré. Dans ce contexte la part de l'eau liée à l'infiltration directe par la pluie (dans ces contextes de faible perméabilité) peut être faible comparativement à la fraction d'eau issue du milieu fissuré captif.

Dans certains cas, les couvertures d'altérites peu perméables présentent des variations piézométriques importantes qui ne sont pas associées à des pluies localisées sur leur propre territoire. Ces variations s'associent à des pluies qui ont alimenté l'impluvium du granite fissuré, hors de l'extension spatiale de la couverture d'altérites. La variation de niveau piézométrique ne peut s'expliquer que par un transfert de pression de l'aquifère captif ou semi-captif sous-jacent.

- **Des réservoirs difficiles à localiser/mobiliser**

L'aquifère du milieu fissuré, celui que composent les processus d'altérations types du module conceptuel de la Figure 8, n'est pas présent partout en Limousin. S'il s'est probablement mis en place sur toutes les formations cristallines émergées au Crétacé par un processus complexe d'altération, cette partie altérée a subi l'érosion naturelle du Tertiaire et les alternances glaciaires du Quaternaire. Dans certains territoires, les altérites ont pu être remaniées, voire totalement érodées jusqu'à la disparition non seulement des altérites meubles mais également du milieu fissuré (exemple des piézomètres de Grand Bourg).

Ainsi le modèle conceptuel initial ne prend pas en compte l'impact des processus liés aux périodes glaciaires du Quaternaire. Cela est particulièrement vrai au niveau du plateau des Millevaches dont le maximum culmine à + 970 m d'altitude. Il est constaté à partir de l'examen des données issues de la banque de données du sous-sol, ainsi que des observations de terrain, que les altérites sont peu épaisses voir absentes dans l'hydrosystème. Depuis la phase initiale d'altération (estimé au Crétacé) des formations du socle cristallin, la couverture d'arènes se réduit. La mise en œuvre de l'érosion des territoires s'est poursuivie au cours de la surrection tertiaire et quaternaire du Massif Central. La reprise de ces formations, la poursuite de leur altération par des processus liés aux périodes glaciaires du Quaternaire ainsi que leur remobilisation ont influé sur la distribution spatiale des unités initiales.

Le schéma suivant (Figure 13) illustre, par le simple phénomène d'érosion, au cours du bombement à grand rayon de courbure progressif, le devenir possible des éléments du modèle conceptuel dans le paysage limousin, du Crétacé à l'actuel.

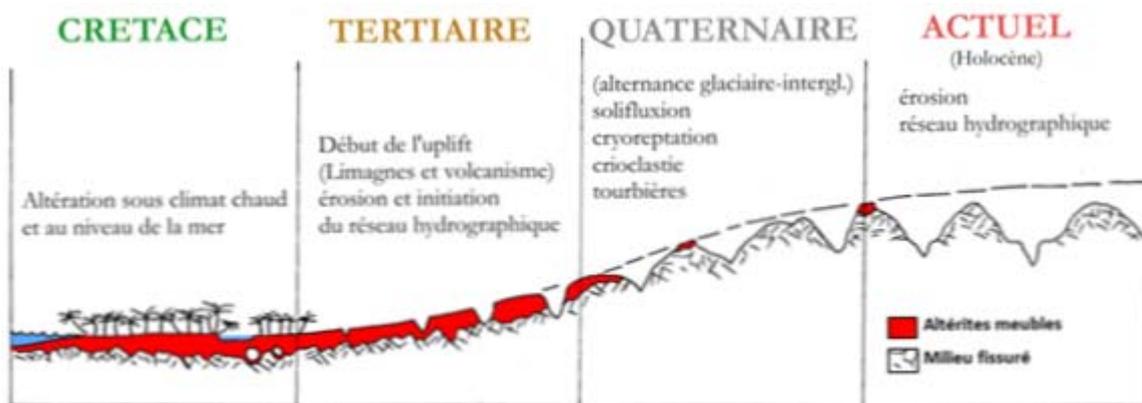


Figure 13 : Évolution probable du modèle conceptuel depuis le Crétacé

Dans ce schéma, la disparition de la couverture d'altérites formée au Crétacé et la réduction de l'horizon fissuré au profit d'un affleurement important du socle sain peu perméable, illustre des fonctionnements contrastés des différents territoires géologiques du Limousin. Il ne rend pas compte d'une réalité observée sur le terrain ou, pour l'extrême majorité des points d'eau du réseau de suivi, le niveau statique s'établit dans des formations meubles du régolithe.

Lorsque les aquifères du « bicouche », altérites meubles et milieu fissuré sont absents du domaine de socle, le modèle ancien de l'organisation des aquifères de socle peut être invoqué.

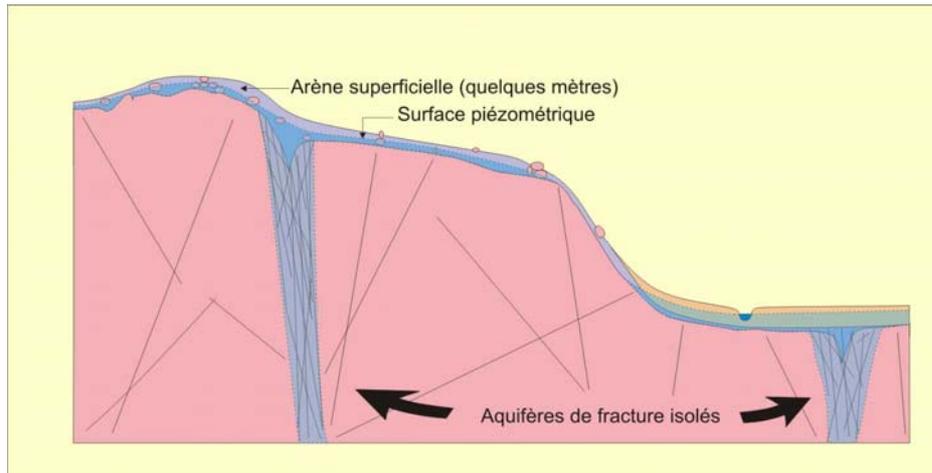


Figure 14 : Le concept anti-2006 d'aquifère de socle

Ce modèle (Figure 14) s'appuie, lorsqu'elles existent, sur des fractures plus ou moins profondes. Il considère que les eaux souterraines sont contenues dans des couloirs de fracturation sub-verticaux d'origine tectonique ou des horizons fracturés de proche surface (thermoclastie et/ou cryoclastie) plus ou moins épais. Ces discontinuités permettent aux eaux de pluie de s'infiltrer. Les aquifères y sont alors souvent considérés comme *isolés* les uns des autres avec absence de nappe vraie entre ces grands accidents. En contexte fracturé, les réservoirs souterrains sont à faible profondeur, peu pérennes et tributaire de la morphologie des territoires

En l'absence d'altérites meubles, l'horizon fracturé de proche surface est le lieu où peut s'établir une nappe d'eau. Le fonctionnement de cette nappe est toujours tributaire de la perméabilité du milieu et de son épaisseur. La porosité des formations fracturées reste en règle générale comprise entre 3 % et 6 % et la perméabilité est en général élevée (10^{-3} m/s ou plus). Dans ces conditions la pérennité de la nappe est conditionnée par la pente des terrains qui entraîne plus ou moins rapidement la vidange des eaux souterraines vers les exutoires que forme le réseau des eaux de surface.

En Limousin, la connaissance empirique des usages de l'eau du plateau de Millevache mentionne que les aquifères se vidangent rapidement, l'absence de pluie pendant un épisode de 4 semaines ou plus, provoque des étiages sévères et des 'assecs' en tête de bassin. Ces assecs signent la vidange complète de ces aquifères dont l'eau parcourt rapidement les réservoirs souterrains, se minéralisant peu ou pas et présentant des conductivités très faibles, de l'ordre de 40 μ S/cm ou moins.

Intervalles de profondeur en domaine de socle

Le territoire limousin présente, en domaine de socle et en termes de ressource en eau souterraine, un aquifère potentiel dont le niveau statique s'établit à faible profondeur. Parfois composé de deux couches lorsque la couverture d'altérite ou celle du régolithe est présente, les formations superficielles sont considérées dans ce dernier cas comme « *aquitardes* » c'est-à-dire de faible perméabilité et considérées comme des réservoirs médiocres en termes de productivité. Il n'a jamais été mis en évidence d'aquifères superposés à plus grande profondeur permettant d'envisager un ou des réservoirs aquifères distincts entre 10 m et 100 m ou entre 10 m et 200 m. Lorsque des venues d'eau ont été observées, elles s'associent à des filons (quartz ou

pegmatiques qui forment des drains permettant de mobiliser des ressources en eaux qui se distribuent sur l'ensemble de l'épaisseur des terrains recoupés par ces filons).

La partie des terrains comprise entre 10 et 200 mètres en domaine de socle est donc considérée comme homogène. En revanche, l'impératif de maintenir une cohérence avec la méthodologie mise en place à l'échelle nationale impose de composer des intervalles à 10-50 mètres, 10-100 mètres, 10-200 mètres. Ils ont été artificiellement créés mais ils ne diffèrent pas les uns des autres en termes d'aléa.

EN DOMAINE SEDIMENTAIRE

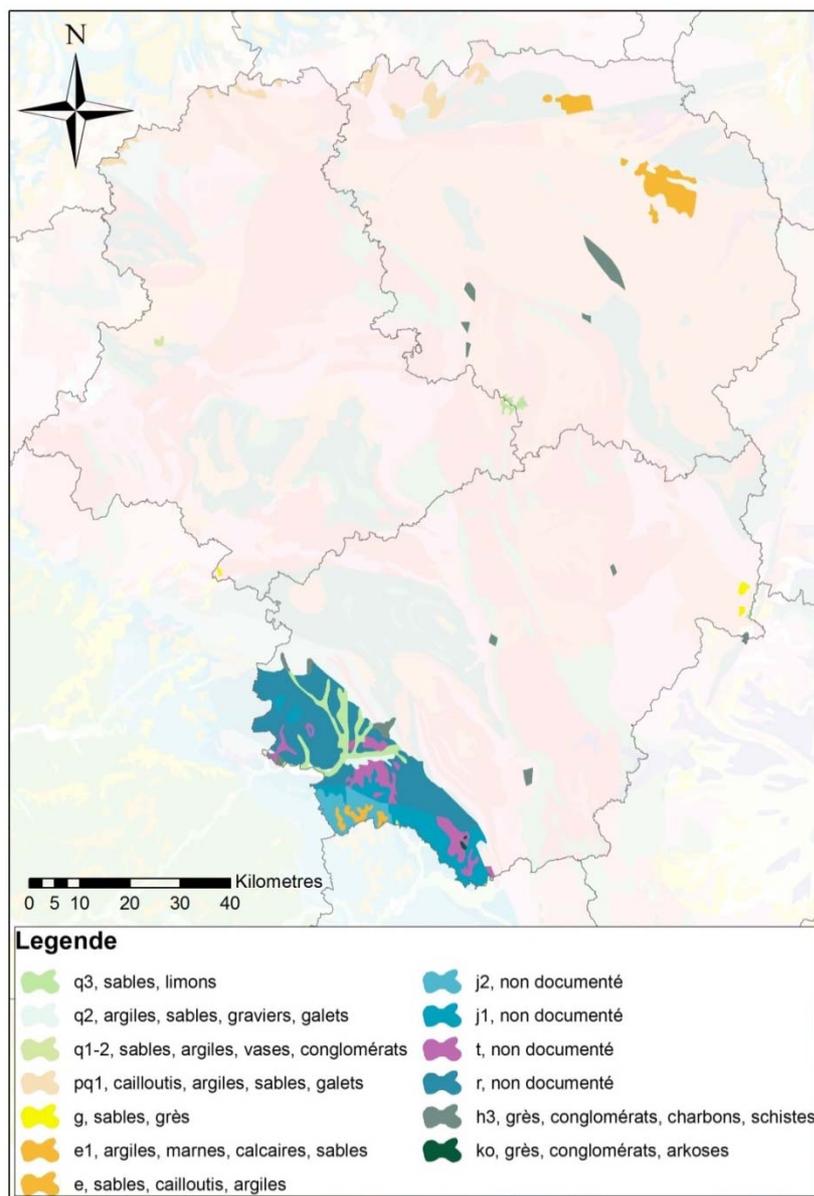


Figure 15 : 7 % de la surface totale du territoire limousin est composée de terrains sédimentaires

Comme précisé dans le contexte géologique, les terrains sédimentaires sont identifiés sur deux secteurs, caractérisés par un contexte hydrogéologique distinct : le bassin de Gouzon et le bassin de Brive-la-Gaillarde.

Bassin de Gouzon (23) : Aquifère des sables et argiles tertiaires.

Cet aquifère est localisé au niveau du secteur de Gouzon en Creuse sur une superficie de 50 km² (Figure 16). Il correspond à un bassin de sédiments détritiques tertiaires, limités au nord par des gneiss et au sud par des lambeaux de coulées rhyolitiques (BRGM – 30197 – FR). Les niveaux aquifères sont attribués aux formations détritiques où alternent des niveaux d'argiles, de sables 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 Varennes B (06432X0018/HY).

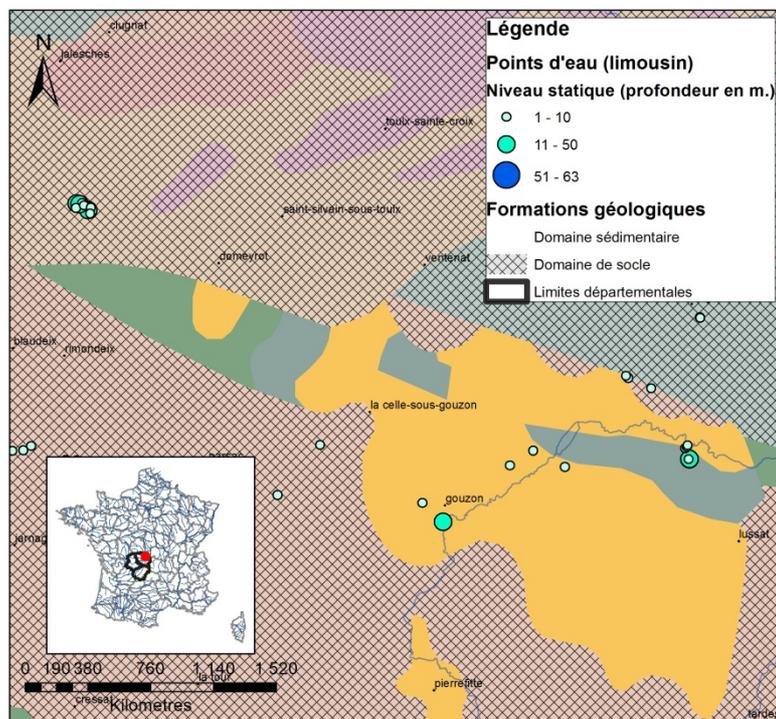


Figure 16 : Points d'eau en niveau statiques dans le domaine sédimentaire du bassin de Gouzon

Bassin de Brive-la-Gaillarde (19) : 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 entités : 358AE07, 358AE03 et 362AA03. Au niveau de l'exploitation de ces aquifères, l'examen des bases de données SISEAU et BSSEAU (Figure 17) met en évidence, au droit de ce secteur, un nombre limité d'ouvrages (sources et forages). Les profondeurs atteintes n'excèdent pas 100 m.

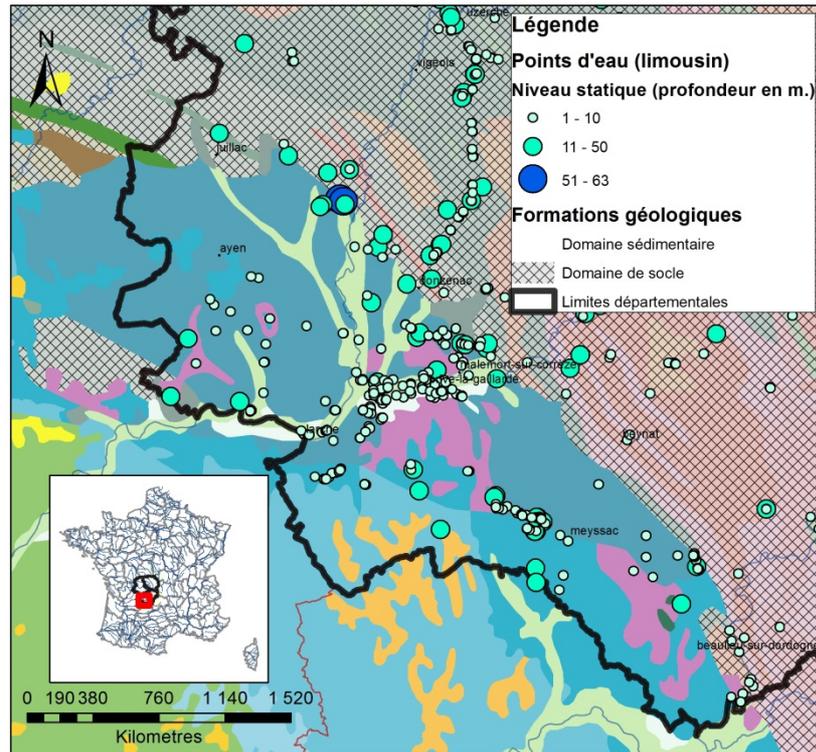


Figure 17 : Points d'eau en niveau statiques dans le domaine sédimentaire du bassin de Brive

Intervalles de profondeur en domaine sédimentaire

En domaine sédimentaire, la composition des intervalles de 10 m - 50 m puis 10 m - 100 m et 10 m – 200 m se justifie différemment de celle du domaine de socle.

Sur le secteur de Gouzon, l'intervalle 10 m -50 m intéresse les formations sédimentaires détritiques du Tertiaire. Au delà de 50 mètres, le socle cristallin est présent et il est considéré en l'état des connaissances actuelles, homogène sur la tranche 50 à 100 mètres. Les niveaux 10-100 et 10-200 mètres au droit du bassin sédimentaire de Gouzon seront artificiellement distingués mais ne diffèrent pas l'un de l'autre en termes d'aléa.

Sur le secteur de Bassin de Brive, vers l'ouest et au-delà des premiers affleurements des formations du Séphano-Permien (Grès), l'empilement des unités sédimentaires et des aquifères carbonatés est régulière. Une distinction des couches 10 m -50 m, 10 m – 100 m et 10 m – 200 m peut avoir une justification en termes de réservoirs aquifères. Cependant, en termes d'aléas, elles ne se justifient pas comme il sera présenté dans le chapitre de la cartographie des aléas liés aux ouvrages de la GMI.

3. Cartographie des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance en Limousin

La cartographie des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance est basée sur une analyse multicritère et sur la réalisation de cartes à l'aide d'un SIG. Chacun des aléas identifiés ainsi que les contraintes réglementaires sont représentées par une couche spécifique. Dans un premier temps, un inventaire des contraintes réglementaires et de leur effet sur le montage d'une opération géothermique (interdiction, précautions particulières...) a été effectué.

Dans un deuxième temps, les aléas géologiques et hydrogéologiques ont été identifiés pour chacun des intervalles d'épaisseur définis au chapitre précédent. Pour chaque aléa :

- le phénomène redouté est décrit et est accompagné d'une qualification de son niveau (faible, moyen, fort) ;
- un facteur de pondération est ensuite attribué à chaque niveau ;
- un facteur aggravant est appliqué en fonction de l'intensité des phénomènes redoutés (affaissement, effondrement, pollution...), sa valeur pouvant être différente selon qu'il s'agisse de sondes géothermiques verticales (SGV) ou de doublets sur nappe.

La région Limousin offre un ensemble de contextes géologiques variés mais majoritairement composé de formations cristallines du domaine du socle. Cette diversité du sous-sol suppose pour répondre au contexte régional certaines adaptations nécessaires par rapport à la méthodologie développée et présentée dans le rapport BRGM/RP-61768-FR (mars 2013) et dans le guide méthodologique final (*Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance, juillet 2015*). C'est le cas notamment dans les secteurs plissés et de « socle », où il est difficile de réaliser des cartes distinctes selon la profondeur des ouvrages. En conséquence, pour ces zones, la même cartographie a été reproduite pour les trois gammes de profondeur retenues comme décrit au chapitre : Intervalles de profondeur en domaine de socle .

L'étude des aléas géologiques et hydrogéologiques et la fusion de l'ensemble des couches permet d'obtenir une cartographie de l'aléa composée de trois zones pour chaque intervalle considéré :

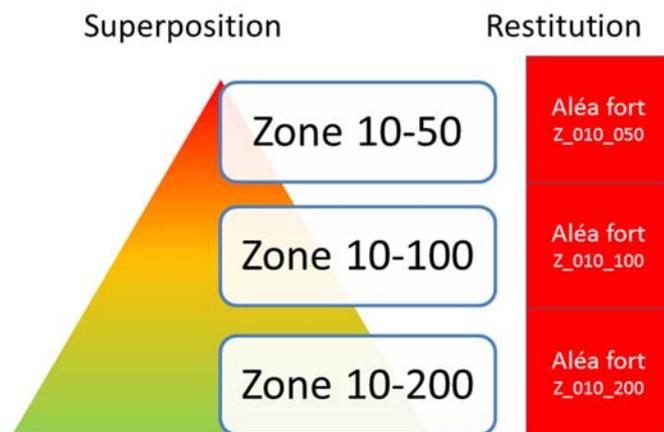
- aléa faible - zone **verte** : zone qui nécessite uniquement la présence d'un foreur qualifié ;
- aléa moyen - zone **orange** : zone qui nécessite un foreur qualifié et l'avis d'un expert (hydrogéologue et/ou géologue) ;
- aléa fort - zone **rouge** : zone où les forages géothermiques de minime importance sont interdits.

La présence d'une zone réglementée ou imposant des prescriptions particulières en un point s'impose à la valeur de l'aléa calculé. Les zones réglementées retenues sont celles concernant le sous-sol : périmètre de protection des ouvrages d'alimentation en eau potable (AEP) et eaux minérales, stockage de gaz, ZRE... décrites au chapitre 2.1

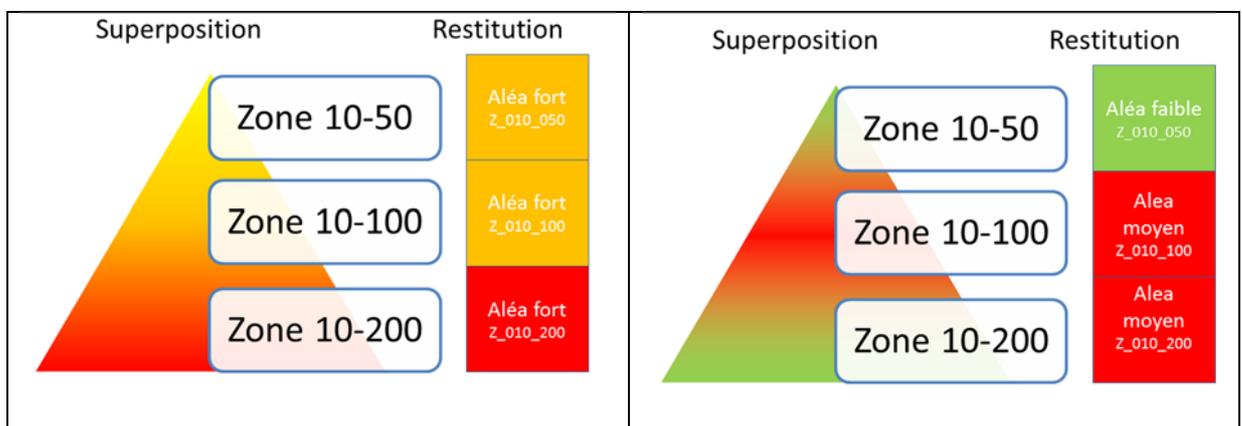
3.1. HÉRITAGE DE L'ALÉA LE PLUS ÉLEVÉ DEPUIS LE NIVEAU DE PROFONDEUR RECONNU VERS LA SURFACE

Ce classement en zones verte, orange ou rouge est effectué pour les trois niveaux de profondeur décrits précédemment avec une règle d'héritage de l'aléa de la zone sus-jacente lorsque celui-ci est plus élevé. Il est convenu en termes de représentation, qu'un aléa élevé, présent en surface, c'est-à-dire dans le niveau de 10 m à 50 m de profondeur, décrit un risque pour la réalisation d'un ouvrage de GMI dans cette tranche d'épaisseur. Tout ouvrage qui traverse cette tranche d'épaisseur, c'est-à-dire les niveaux 10 m -100 m et 10 m - 200 m est soumis à l'aléa de la première zone. Cette règle d'héritage de l'aléa le plus élevé de la couche sus-jacente pour la restitution finale de la carte finale des zones peut se schématiser de la manière suivante.

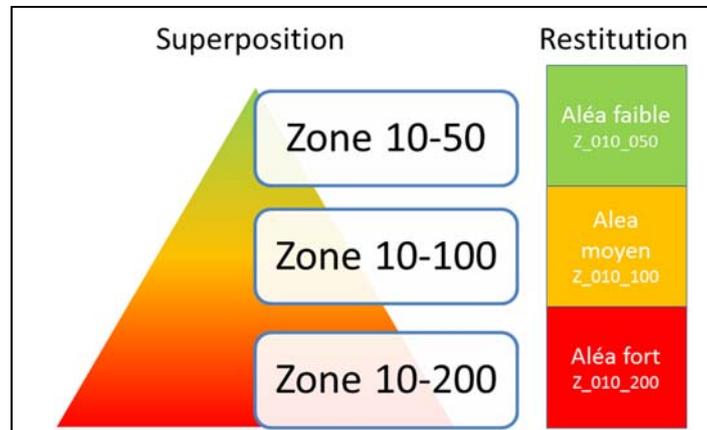
Si l'aléa de la zone 10 m - 50 m est supérieur aux aléas des zones suivantes, alors il s'impose aux zones plus profondes et les cartes d'aléas sont identiques.



De la même manière si l'aléa de la zone 10 m - 100 m est supérieur à l'aléa de la zone 10 m – 50 m et 10 m - 200 m, alors il s'impose et les cartes d'aléas 10 m - 100 m et 10 m -200 m sont identiques



En revanche, si l'aléa est croissant avec la profondeur et les trois zones d'épaisseurs superposées, alors la valeur de l'aléa attribuée à la zone d'épaisseur considérée est inchangée et la cartographie de la GMI produira une réponse en termes de risques adaptée à la profondeur envisagée pour l'ouvrage.



3.2. CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES ET NATURELLES

Tous les projets géothermiques sur nappe ou par sondes géothermiques verticales doivent prendre en compte l'existence de certaines contraintes réglementaires ou naturelles. Les forages envisagés dans le cadre de la géothermie puis l'exploitation de l'ouvrage induisent la prise en compte de certaines précautions. Certaines portions du territoire, du fait de particularités naturelles, font l'objet de mesures de protection susceptibles d'impacter le dimensionnement d'un projet de géothermie, voire de l'interdire.

À l'échelle régionale, les principaux dispositifs de protection pris en compte seront :

- le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Adour-Garonne pour la partie concernée du Limousin ;
- le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Loire-Bretagne pour la partie concernée du Limousin ;
- les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) : en Limousin, trois SAGE (Figure 18) sont mis en œuvre (Vienne, Cher amont et Dordogne amont) et un en cours d'élaboration (la Vézère). Aucun n'est totalement dédié aux eaux souterraines ;
- la nomenclature Loi sur l'Eau et les Zones de Répartition des Eaux (ZRE) ;
- les périmètres de protection des captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP) ;
- les périmètres sanitaires d'urgence et les éventuels périmètres de protection des établissements thermaux ;
- le zonage et la géolocalisation précise des sites miniers du Limousin.

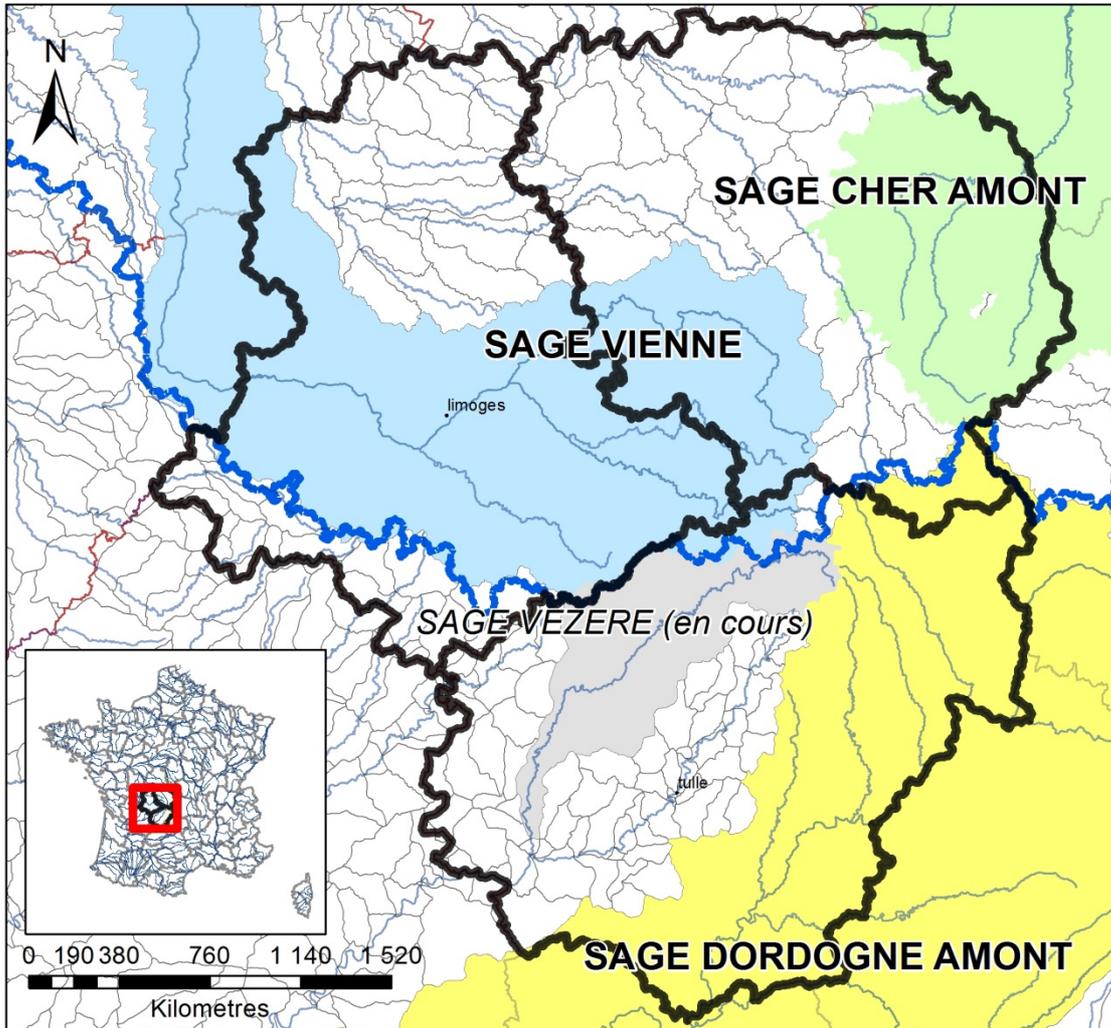


Figure 18 : Périmètres des SAGE en territoire Limousin

3.3. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS LIÉS AUX OUVRAGES GÉOTHERMAUX

L'analyse multicritère est menée à l'aide d'un logiciel dédié aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Il permet de superposer puis additionner en tout point du territoire un ensemble de poids et pondérations associées à chacun des aléas retenus par la méthodologie nationale. Ceux-ci sont identifiés par une couche géographique spécifique, documentée selon la nature de l'aléa recensé et la date à laquelle les informations ont été produites. Les aléas identifiés vont permettre de sommer, en tout point du territoire d'étude, les poids et pondérations qui s'y imposent afin de composer une couche unique issue de cette analyse combinatoire. Cette couche contient la valeur finale déterminant le niveau de risque associé aux travaux de géothermie de minime importance. Sur cette carte se superposent les contraintes réglementaires.

La méthodologie nationale retient neufs aléas pour cette analyse multicritère régionale, huit sont décrits en Limousin au regard de sa situation (Figure 19).

Les poids relatifs de ces aléas sont proposés par la méthodologie nationale puis adaptés au contexte régional. L'aléa relatif au biseau salé proposé dans le guide national n'a pas de sens et ne sera pas traité régionalement, les 8 aléas restants sont résumés dans le tableau suivant.

	Aléas retenus (doublet sur nappe)	Facteur aggravant (Doublet sur nappe)	Facteur aggravant (Sonde Géothermique Verticale)
1	Affaissement / surrection lié aux niveaux évaporitiques	6	10
2	Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines)	2	2
3	Affaissement / effondrement lié aux cavités minières	2	2
4	Mouvements de terrain (ou glissement de terrain)	2	2
5	Pollution des sols et/ou des nappes souterraines	3	3
6	Artésianisme	2	4
7	Mise en communication d'aquifères	4	4
8	Remontée de nappe	2	0

Figure 19 : Liste des aléas retenus en Limousin

Un facteur aggravant permet de considérer un aléa de manière distincte selon qu'il s'impose à une technique de doublet géothermique (système ouvert) ou de sonde géothermique verticale (système fermé).

L'analyse combinatoire finale qui calculera le niveau total d'aléas par maille régulière de **100 mètres de côté** sera produite au terme de l'inventaire de ces aléas afin de conserver le plus longtemps possible, les données sources dans leur format originel (points, cercles, polygones...).

3.3.1. Aléa « affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » :

Description du phénomène

Il s'agit d'un affaissement voire d'un effondrement ou une surrection des terrains de surface lié soit à la dissolution d'un niveau d'évaporite, soit au gonflement de ce niveau en cas de présence d'anhydrite. Ces phénomènes sont provoqués par la mise en communication d'aquifères

superficiels ou profonds avec les horizons évaporitiques à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.

Il n'existe pas de cartographie des aléas liés à ce phénomène actuellement en France.

Qualification de l'aléa

La qualification de cet aléa identifié dans le cadre de la méthodologie nationale est la suivante :

- **aléa nul** : formation ne pouvant pas contenir d'horizons évaporitiques ;
- **aléa faible** : pas d'horizons évaporitiques connus mais formation susceptible d'en contenir sans aquifère connu ;
- **aléa moyen** : présence d'un ou plusieurs horizons évaporitiques sans aquifère connu ou aquifère connu dans une formation susceptible de contenir un ou plusieurs niveaux évaporitiques ;
- **aléa fort** : présence simultanée d'un ou plusieurs horizons évaporitiques et d'un ou plusieurs aquifères dans la tranche de terrain considérée.

Généralement, les formations géologiques susceptibles de contenir des horizons évaporitiques (sels et gypse) se présentent soit sous forme de dépôt en diapir ou dans des failles ou des filons. Dans le Bassin aquitain, seules les formations datées du Trias sont susceptibles de contenir du gypse. Elles sont présentes dans le département de la Corrèze mais en revanche la légende de la carte harmonisée ne mentionne que des grès (Trias, conglomérats et grès blancs) qui ne possèdent pas de formations évaporitiques franches.

La carte géologique de Brive (N° 785) décrit les terrains du Trias de la manière suivante : t : Grès blancs et bariolés. Cet ensemble, de 50 m à 80 m d'épaisseur, est uniquement gréseux.

Enfin, il n'est pas fait mention dans les coupes numérisées ou les logs géologiques validés des ouvrages disponibles dans la banque de données du sous-sol de tels horizons (Figure 20).

Il n'y a donc pas, en territoire limousin, de faciès géologique connu présentant l'aléa associé aux évaporites. À ce titre l'ensemble du territoire présente un niveau d'aléa égal à 0.

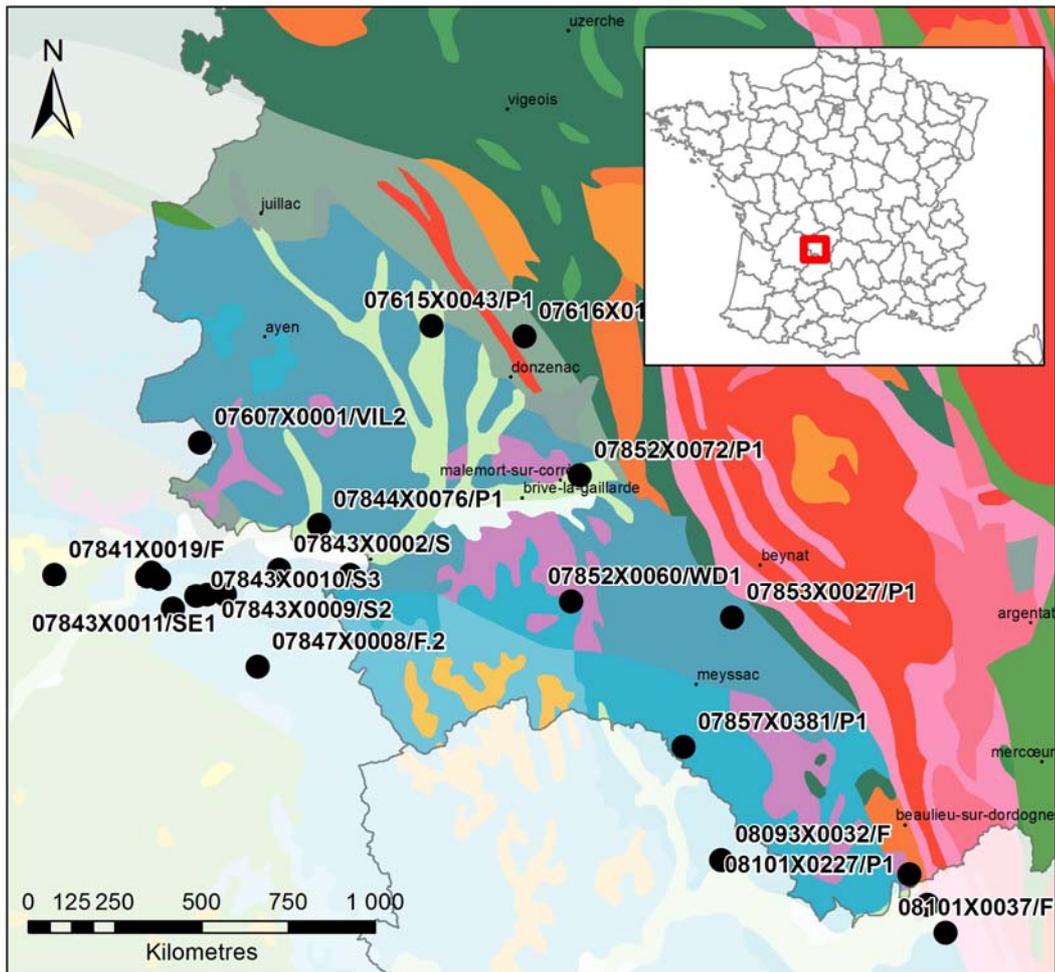


Figure 20 : Localisation des ouvrages avec logs géologiques validés dans les formations sédimentaires du Bassin de Brive

Remarque sur la distribution des aléas sur les zones de profondeurs 10 m - 50 m, 10 m - 100 m et 10 m - 200 m

Au regard des critères restants pour l'étude de l'aléa régional, le critère d'affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques est le seul critère qui aurait pu affecter différemment les zones de profondeur comprises entre 10 m et 100 m ou entre 10 m et 200 m. En effet, en Alsace à titre d'exemple, des formations évaporitiques sont présentes en profondeur.

Pour le reste des aléas à décrire sur le territoire limousin, la zone de profondeur 10 m - 50 m est systématiquement impactée. Les zones de profondeurs plus importantes peuvent être ou non impactées, la carte de la GMI pour ces zones retiendra la valeur maximale rencontrée sur la tranche 10 m – 50 m et la distribuera sur l'ensemble des trois niveaux de profondeurs.

- l'aléa affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) affecte la zone de 10 m - 50 m puis les zones sous-jacentes de facto. Il n'y a pas de cavité recensées à des profondeurs supérieures à 50 m et qui n'aient pas un impact aux profondeurs inférieures à 50 m (cf. 3.3.2) ;

- l'aléa affaissement / effondrement lié aux cavités minières s'établit depuis la surface des terrains naturels sans distinction de la profondeur atteinte par les travaux miniers souterrains (cf. 3.3.3) ;
- l'aléa mouvements de terrain (ou glissements de terrain) s'établit depuis la surface des terrains naturels. Il existe des phénomènes dit de glissement profonds en Corrèze mais leur impact affecte la totalité des terrains jusqu'à la surface (cf. 3.3.4) ;
- l'aléa pollution des sols et/ou des nappes souterraines, compte tenu de la faible épaisseur des terrains non saturés en Limousin : dans le domaine du socle (< 5m) , dans le bassin sédimentaire de Gouzon (< 5m) et de Brive (< 15m), existe dès la zone des 10 m -50 m (cf. 3.3.5) ;
- l'aléa lié à l'artésianisme, en domaine de socle, impacte la zone de 10 m à 50 m de profondeur (cf. 3.3.6) ;
- l'aléa de mise en communication d'aquifères, n'existe qu'en domaine sédimentaire et il impacte la zone de 10 m à 50 m (cf. 3.3.7) ;
- l'aléa remontée de nappe n'a de sens que pour la zone de 10 m à 50 m et donc l'aléa décrit impacte les ouvrages atteignant les zones plus profondes (cf. 3.3.8).

3.3.2. Aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) »

Description du phénomène et occurrences

Ces phénomènes d'affaissement ou d'effondrement pourraient être provoqués, soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte. Les cavités de dissolution des réseaux anciens (paléokarsts), potentiellement remplies de matériaux sans cohérence, sont aussi concernés (phénomène d'infiltration et de soutirage). Il n'existe pas de carte de ce phénomène à l'échelle régionale actuellement en Limousin.

La base de données « BD Cavités » recense de façon homogène l'ensemble des cavités souterraines abandonnées « hors mines » en France métropolitaine. Elle a été utilisée pour réaliser cette carte, ainsi que les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} pour les formations géologiques susceptibles de contenir des cavités karstiques. Ces formations géologiques sont les formations carbonatées du Bassin aquitain, dans le département de la Corrèze.

Qualification de l'aléa depuis la base de données BdCavités

La qualification de cet aléa est la suivante :

- **aléa nul (0)** : nombre de cavités recensées entre 0 et 4 au km² et pas de formation géologique susceptible d'en contenir ;
- **aléa faible (1)** : nombre de cavités recensées entre 4 et 16 au km² ou présence d'une formation géologique susceptible d'en contenir ;
- **aléa moyen (2)** : nombre de cavités recensées entre 16 et 32 au km² ;
- **aléa fort (3)** : nombre de cavités recensées supérieur à 32 au km².

Une carte de densité des cavités a été établie. Les données ont été extraites de la base de données nationale « Cavités souterraines » (<http://www.bdcavite.net/> - Figure 21). L'extrait a été réalisé en février 2016. Elles ont été complétées par celles répertoriées dans le cadre d'autres études et en cours d'intégration dans la base nationale (en Corrèze et Haute-Vienne notamment).

Une zone tampon (cercle de rayon égal à l'imprécision de la donnée + zone d'influence de 50 m) a été réalisée autour de chaque cavité recensée afin de tenir compte des incertitudes de localisation. Le nombre de cavités comptabilisées au sein de chaque maille correspond à un niveau d'aléa après croisement avec la présence de formation géologique susceptible de contenir des cavités karstiques.

The screenshot shows the 'Géorisques' website interface. At the top, there is a search bar and the logo 'Géorisques' with the tagline 'Mieux connaître les risques sur le territoire'. Below the logo, the page title is 'Cavités souterraines'. A navigation menu includes 'Accueil', 'Ma maison / Mes risques', 'Cartes interactives', 'Dossiers thématiques', 'Téléchargement', 'Glossaire', and 'Aide'. The main content area features a sidebar with links like 'Contexte', 'Acteurs', and 'Accès aux données'. The central part of the page has a heading 'Bienvenue sur le nouvel espace Cavités souterraines du site Géorisques' and a large image of a cave entrance. To the right of the image, it says 'Banque de données nationale des cavités souterraines abandonnées en France métropolitaine "hors mines"' and 'Mise à jour des données : 02/03/2015'. Below this is a section titled 'Accès rapide aux données' with dropdown menus for 'Sélectionner un département...', 'Sélectionner une commune...', and 'Sélectionner un mode d'affichage', followed by a 'VALIDER' button. At the bottom, there is an 'Avertissement' box with a warning icon and text: 'L'ensemble des cavités inventoriées sur ce site peut présenter des dangers liés à leur instabilité, à la présence possible de "poches" de gaz ainsi qu'à la montée très rapide des eaux lorsqu'il s'agit de cavités naturelles. Y pénétrer, comme s'en approcher, peut être grave de conséquence.' Logos for 'brgm', 'Fédération Française de Speleologie', and 'IFSTAR INERIS' are visible at the bottom of the page.

Figure 21 : Extrait du serveur <http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines>

Qualification de l'aléa depuis l'analyse de la carte géologique et des formations potentiellement karstifiées

La cartographie des formations géologiques susceptibles de contenir des cavités, a été établie dans les limites des formations sédimentaires représentées dans la carte géologique harmonisée du Limousin à échelle de 1/50 000 ainsi qu'au sein du référentiel national des systèmes aquifères BDLisa (version 1, 2015).

Les indices permettant d'identifier des zones de karstification ou des indices de mise en place d'un karst par la formation de dolines et/ou zones endoréiques proviennent d'études géomorphologiques dont l'IDPR (version 2015, pas de 25 mètres calculé à partir de la BDAlti IGN© et BDTopo IGN©).

BDLisa est un référentiel géographique qui propose un découpage du territoire national en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non). À l'échelle locale il existe un découpage des entités hydrogéologiques et chaque partie de l'espace du territoire limousin est ainsi décrit en systèmes aquifères. BDLisa qualifie le type de formation géologique (thème), ses potentialités aquifères (nature) et le type de porosité (qui permet de distinguer les principaux modes de circulation de l'eau (milieu)) et enfin caractérise la présence ou non d'une nappe, qui peut être libre et/ou captive (état).

Dans le cadre de cette étude, la recherche des cavités de type karstique s'est donc portée sur le périmètre des entités susceptibles de présenter ce type de formations et la « surcouche karst » du référentiel. Pour affiner cette analyse, le traitement géomorphologique utilisé pour le calcul de l'Indice de Développement et Persistance des Réseaux (IDPR) a été employé afin de détecter, au sein des formations supposées karstiques, la mise en place des indices de cavités souterraines formées par la dissolution des carbonates. Ces indices, en contexte karstique, sont essentiellement les « dolines », « aven » ou « mardelles » qui signent des aires endoréiques locales d'extension relativement faible.

À titre d'illustration (Figure 22), la commune de Nespouls en Corrèze est située sur des formations potentiellement karstiques (BDLisa et sur-couche Karst).

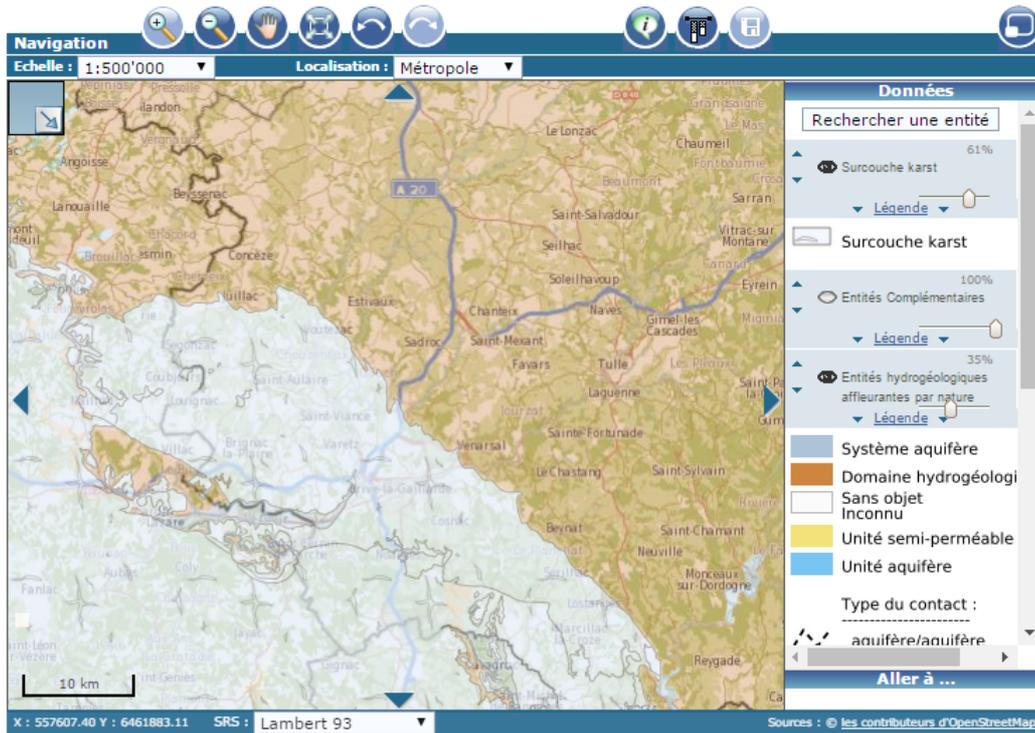


Figure 22 : Démonstrateur BDLisa (<http://www.reseau.eaufrance.fr/geotraitement/viewer/bdlisa>) - Commune de Nespouls

L'entité BDLisa affleurante (358AE03) est formée des Calcaires micritiques et bioclastiques du Bathonien moyen à Oxfordien du nord du Bassin aquitain.

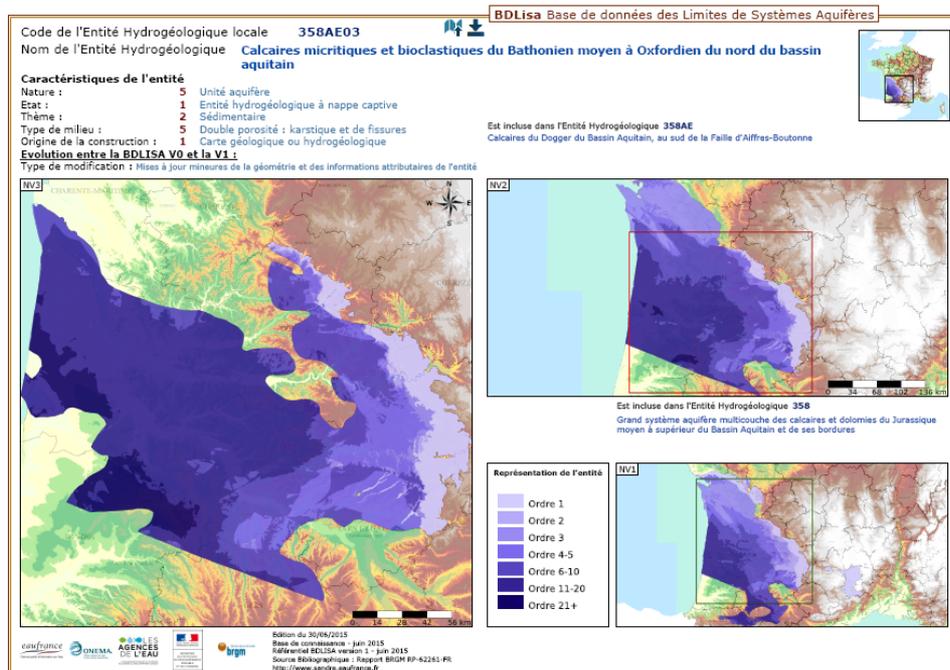


Figure 23 : fiche d'identification BDLISA
<http://reseau.eaufrance.fr/geotraitement/bdlisa/files/entite/358AE03.pdf>

Elle se caractérise par une double porosité de type karstique et de fissures. À ce titre dans la GMI elle va être considérée comme présentant un risque potentiel de structure karstique à l'affleurement et qualifiée en aléa faible (1).

À plus grande échelle, le traitement géomorphologique de l'IDPR révèle la présence de dolines (zones endoréiques) que la carte IGN à l'échelle du 1/25000 met parfois en exergue. C'est l'objet des deux illustrations suivantes qui présentent :

- en première partie (Figure 24), le traitement IDPR et les zones endoréiques mises en évidence par l'analyse du modèle numérique de terrain ;
- en seconde partie (Figure 25), le contour des zones identifiées et leur mention dans la sémiologie (flèches orientées) de la carte topographique à l'échelle de 1/25 000 de la carte IGN.

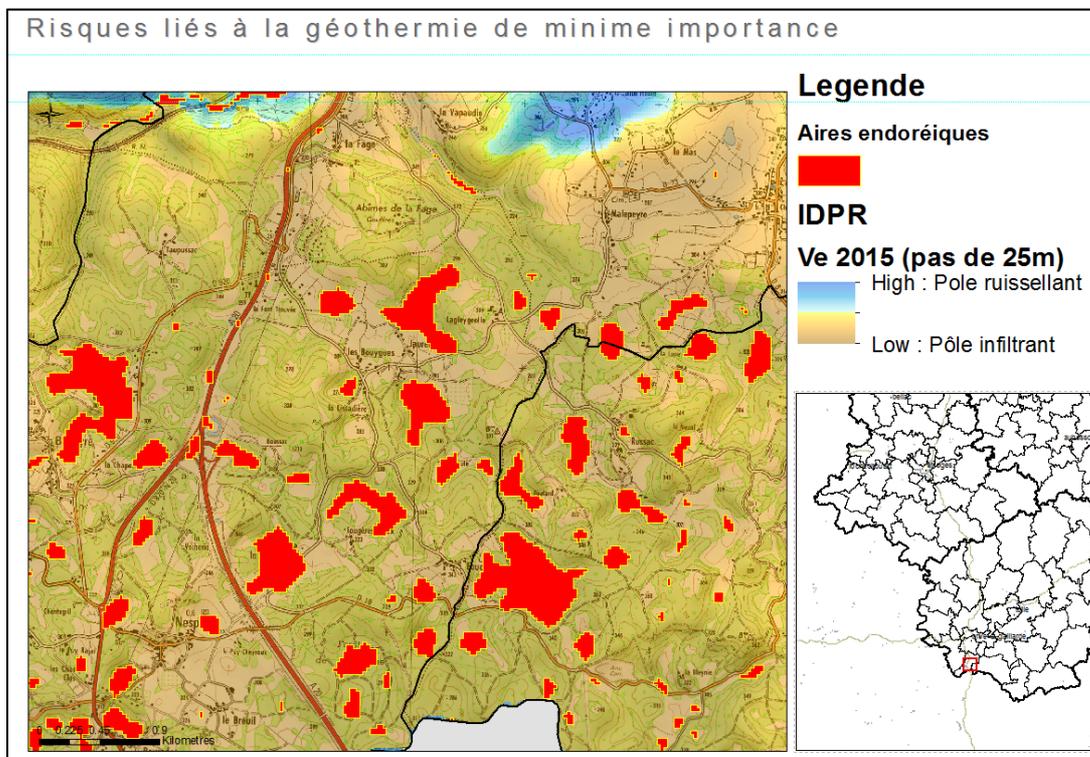


Figure 24: Identification des zones endoréiques

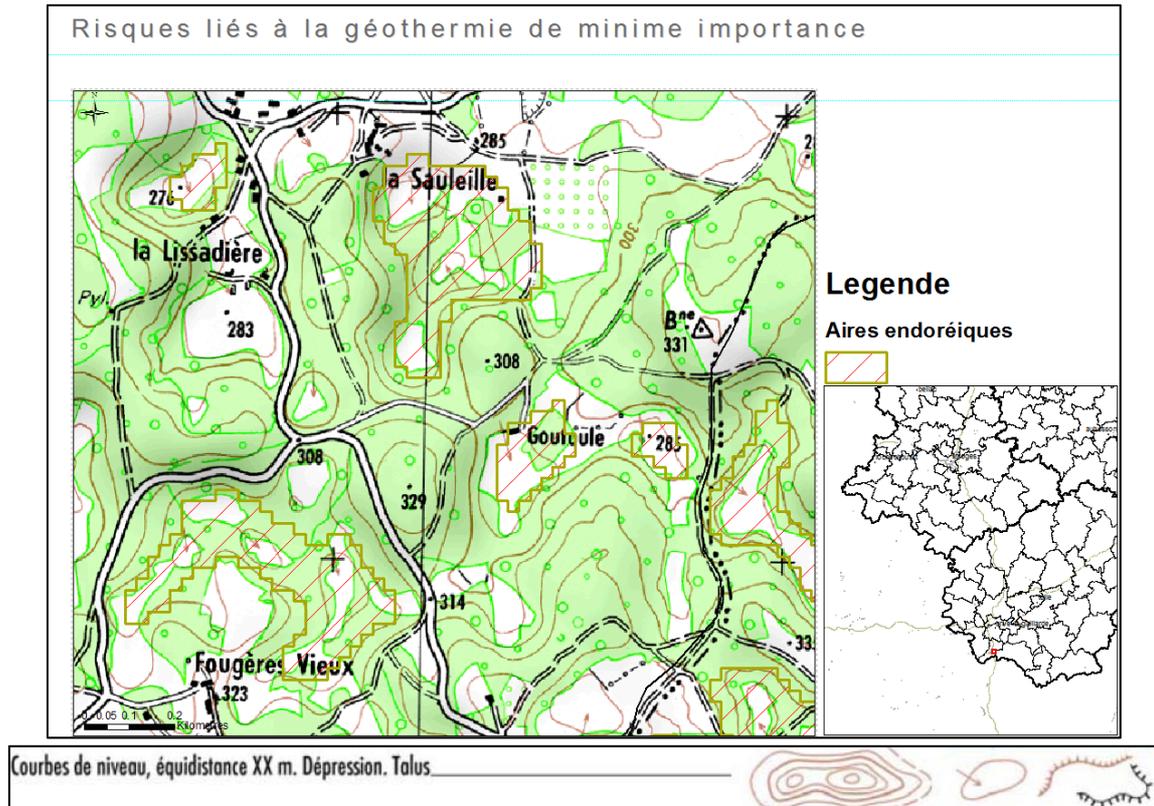


Figure 25 : Représentation des zones endoréiques ou dépressions IGN SCAN 25@ version 3

Qualification de l'aléa

La carte de densité des cavités a été utilisée selon l'approche de densité décrite dans le cadre de la méthode nationale et à cet inventaire ont donc été ajoutées deux classes d'aléas spécifiques à la mise en place d'une karstification des formations sédimentaires des carbonates (calcaires et dolomies) :

- un **aléa de valeur 1** pour les zones de karst potentiel (unités hydrogéologiques et géomorphologiques, polygones des contours issus de BDLisa) ;
- un **aléa de valeur 2** pour les zones de karst potentiel où des phénomènes karstiques en surface se sont manifestés avec la présence de dolines et zones endoréiques (unités hydrogéologiques et polygones des contours issus des traitements géomorphologiques).

La combinaison des grilles de densité et des cartes de contours sus-citées a conduit à retenir, lorsque ces territoires se superposent, la pondération la plus défavorable et non la somme des pondérations en un point (Figure 26).

Risques liés à la géothermie de minime importance

Aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)"

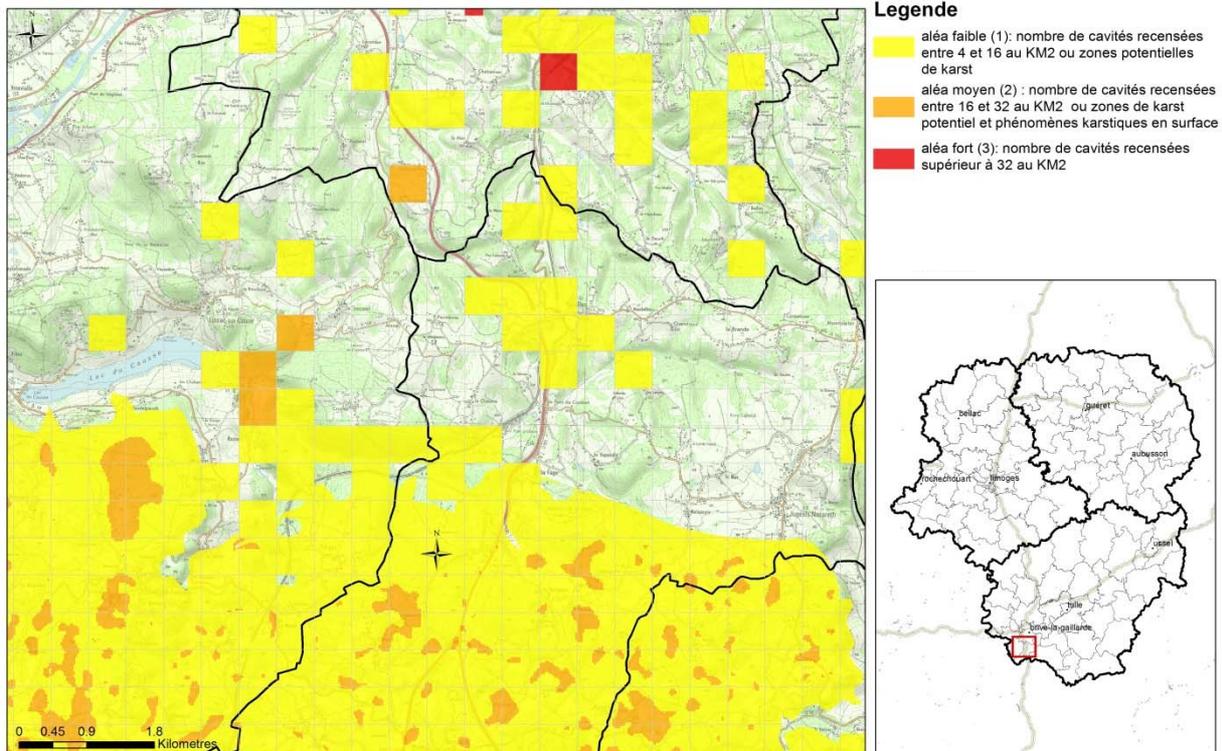


Figure 26 : Extrait de la cartographie de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) » et tableau de répartition des surfaces en Limousin

Critère de qualification	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	16 628	97.54 %
1	405	2.38 %
2	12	0.07 %
3	2	0.01 %

3.3.3. Aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités d'origine minière »

Description du phénomène

Il s'agit ici d'effondrements localisés (de type « fontis ») et/ou généralisés ainsi que d'affaissements.

De par leur brutalité, les effondrements localisés et généralisés sont susceptibles de mettre en péril la sécurité des personnes. Ils génèrent un impact plus fort que celui associé aux affaissements (phénomènes plus lents) qui n'induisent qu'un risque économique « en ne mettant en péril que » les constructions.

Dans le cadre d'un projet de géothermie basse température, la foration (sondes ou doublets) peut avoir des conséquences sur la tenue des terrains et ainsi provoquer des phénomènes

d'affaissement/effondrement dans les zones concernées par des cavités minières. Ces phénomènes pourraient donc être provoqués soit par la rotation de l'outil de forage au cours de la mise en place du dispositif soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifère superficiels ou profonds avec les cavités, à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.

Il n'existe pas de carte décrivant ce phénomène à l'échelle régionale. Une cartographie de l'emprise des travaux miniers existe en revanche. Elle est produite par les services de l'État. Elle s'appuie sur des études qui ont pu être menées sur l'aléa mouvement de terrain lié aux cavités minières au niveau des bassins et concessions minières ou au niveau communal (PPRM).

L'ensemble de ces études, effectué par le GIP Geoderis, concourent à l'information associée à la cartographie de l'emprise des travaux miniers disponible auprès de la DREAL Limousin via le serveur géographique du GéoLimousin. L'extraction de ces données a été réalisée en février 2016.

La carte nationale qui présentait les différents sites avec présence d'une exploitation minière sous forme d'un polygone englobant l'ensemble des travaux miniers est donc remplacée par la carte régionale de l'emprise détaillée des travaux miniers du territoire Limousin.

À la demande des services de l'État (Comité de Pilotage de l'étude de mars 2016), elle est intégrée dans la méthodologie d'élaboration de la carte régionale de la GMI comme zone d'aléa d'affaissement potentiel. Dans ce cas une **zone tampon de sécurité de 300 m** a été ajoutée à l'extension de ces périmètres pour permettre une analyse spécifique des projets tenant compte d'une éventuelle imprécision des tracés. La valeur du critère pour cet aléa est portée à 7. Le facteur aggravant lié à la typologie des usages de la géothermie de minime importance est de 2 pour les doublets et les sondes verticales. Le résultat est de 14 ce qui impose à ces territoires *de facto*, la production de l'attestation prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié pour réaliser toute opération de géothermie.

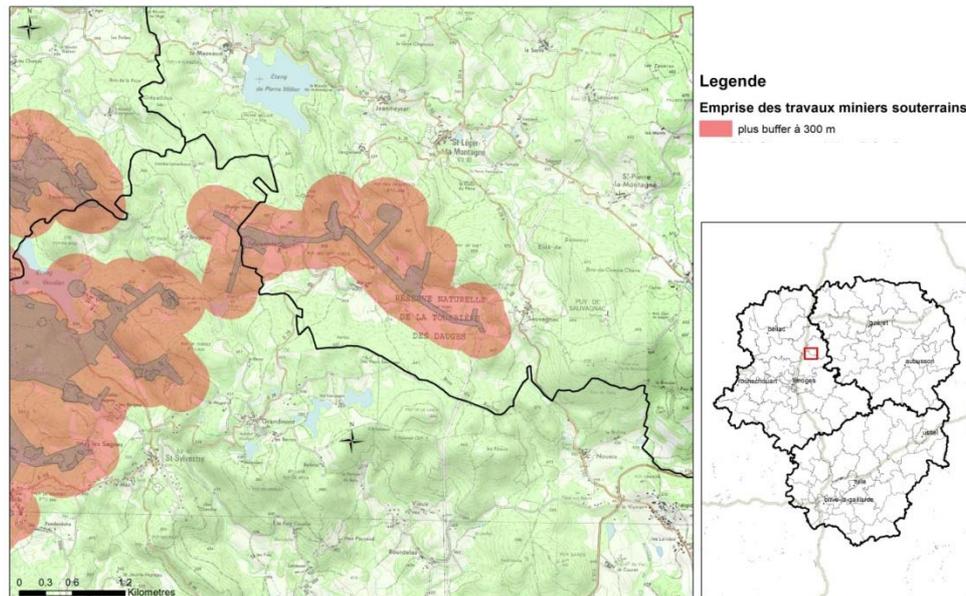
Qualification de l'aléa

La qualification de cet aléa est fixée à 7 quelque soient les techniques employées pour la mise en œuvre d'une GMI (Doublets ou Sondes verticales) ; le facteur aggravant, selon les filières d'usage, est de 2.

Les territoires correspondants aux zones de buffer (Figure 27) seront donc affectés *in fine* **d'un aléa de 14 à minima** ce qui les qualifie *de facto* **en zones dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves mais dans ces zones, est exigée la production d'une attestation d'un expert agréé (par les ministres chargés des mines et de l'environnement).**

Celui-ci constate la compatibilité du projet au regard du contexte géologique de la zone d'implantation et de l'absence de dangers et inconvénients graves pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier. « Cette déclaration vaut accomplissement des procédures prévues par le II de l'article L. 214-3 du code de l'environnement et par l'article L. 411-1 du code minier ».

Risques liés à la géothermie de minime importance
Aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière"



Valeur de qualification du critère	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	16 808	98.60 %
7	240	1.40 %

Figure 27 : Extrait de la cartographie de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités d'origine minière » et tableau de répartition des surfaces en Limousin

3.3.4. Aléa « glissement de terrain »

Description du phénomène

Le phénomène décrit ici correspond à un glissement de terrain. Les zones présentant les conditions géométriques et lithologiques nécessaires au déplacement d'un phénomène de type glissement de terrain peuvent rester stables, en l'absence d'un déclencheur du processus. En revanche, la foration au cours de la mise en place d'un dispositif de géothermie peut être un déclencheur de ce type de phénomène. Un tel phénomène est donc susceptible de se produire durant la foration ou durant l'exploitation géothermique.

En présence d'une nappe captive, un phénomène de glissement de terrain peut se produire en cas de percement non contrôlé de l'aquifère, avec un processus de saturation d'une couche supérieure qui ne l'était pas, ce qui, selon les couches lithologiques affectées et la géométrie de celles-ci pourrait être très défavorable à la tenue des terrains. En dehors de la présence d'une nappe captive, le phénomène est réduit, car les volumes potentiellement infiltrés sont moins importants. Cela ne signifie pas qu'il n'y ait pas de phénomène naturel de glissement de terrain, mais que l'impact de la géothermie sur ce phénomène est limité.

Carte initiale

La qualification du phénomène est basée sur les données de la Base de données des mouvements de terrain (BdMVT), disponible sur le portail Géorisques (www.georisques.gouv.fr/dossiers/mouvements-de-terrain). La base de données BDMVT gérée par le BRGM mémorise de façon homogène, l'ensemble des informations disponibles en France, sur des situations récentes et sur des événements passés et permet de porter à connaissance des phénomènes.

À l'échelle territoriale (Figure 28), il a été tenu compte :

- des PPRMT mis en œuvre sur le département de la Corrèze (Noailiac – approuvé le 09/08/2005, Saint-Viance – approuvé le 03/11/2009, Vallée de la Couze – approuvé le 07/02/2011 Ligneyrac – approuvé le 08/11/2001) ;
- de cartes d'aléas mouvements de terrains disponibles : Objat (2015) et Allasac (2015).

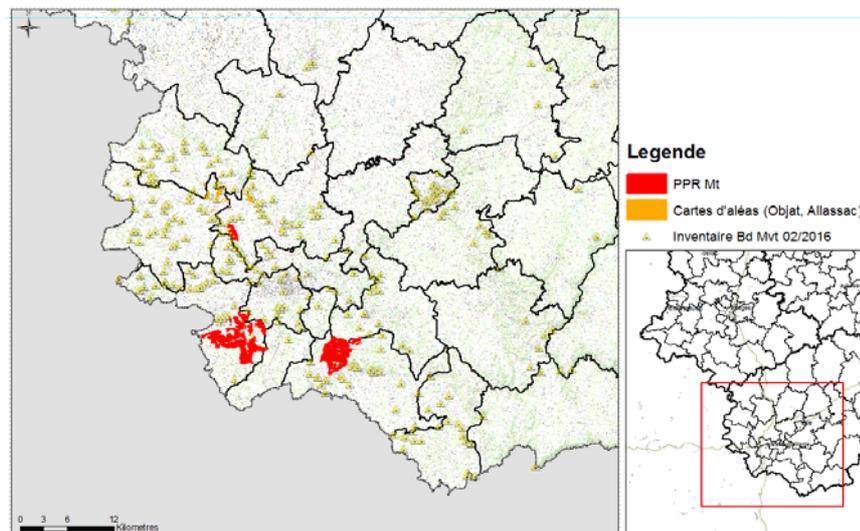


Figure 28 : Éléments constitutifs de la définition de la carte d'aléa mouvements de terrains pour la GMI

Qualification de l'aléa

Dans les communes disposant d'un plan de prévention des risques naturels PPRMt - Mouvements de terrains ou d'une carte d'aléa, la qualification est la suivante :

- **3** : Aléa moyen des cartes d'aléa MVT
- **5** : Aléa fort des cartes d'aléa MVT
- **7** : Aléa élevé/très élevé des cartes d'aléa MVT

En l'absence de cartographie (PPR ou carte d'aléa), la qualification de l'aléa est fondée sur les données d'inventaire des phénomènes déclarés dans la BdMvt (<http://www.bdmvt.net/>). Le nombre de mouvements de terrain comptabilisés au sein de chaque maille (500 m x 500 m) correspond à un niveau d'aléa.

Les critères utilisés pour la qualification des niveaux d'aléa sont les suivants (Figure 30) :

- **aléa nul (0)** : pas de mouvements de terrain recensés par km² ;

- **aléa faible (1)** : un glissement recensé par km² ;
- **aléa moyen (3)** : deux à quatre glissements recensés par km² ;
- **aléa fort (5)** : cinq à huit glissements recensés par km² ;
- **aléa très fort (7)** : plus de huit glissements recensés par km².



Figure 29 : Blocs en pied de falaise de grès et sur le glacis (source BRGM janvier 2016) - Effondrement d'anciennes ardoisères (source BRGM juillet 2014)

Risques liés à la géothermie de minime importance
Aléa « glissement de terrain »

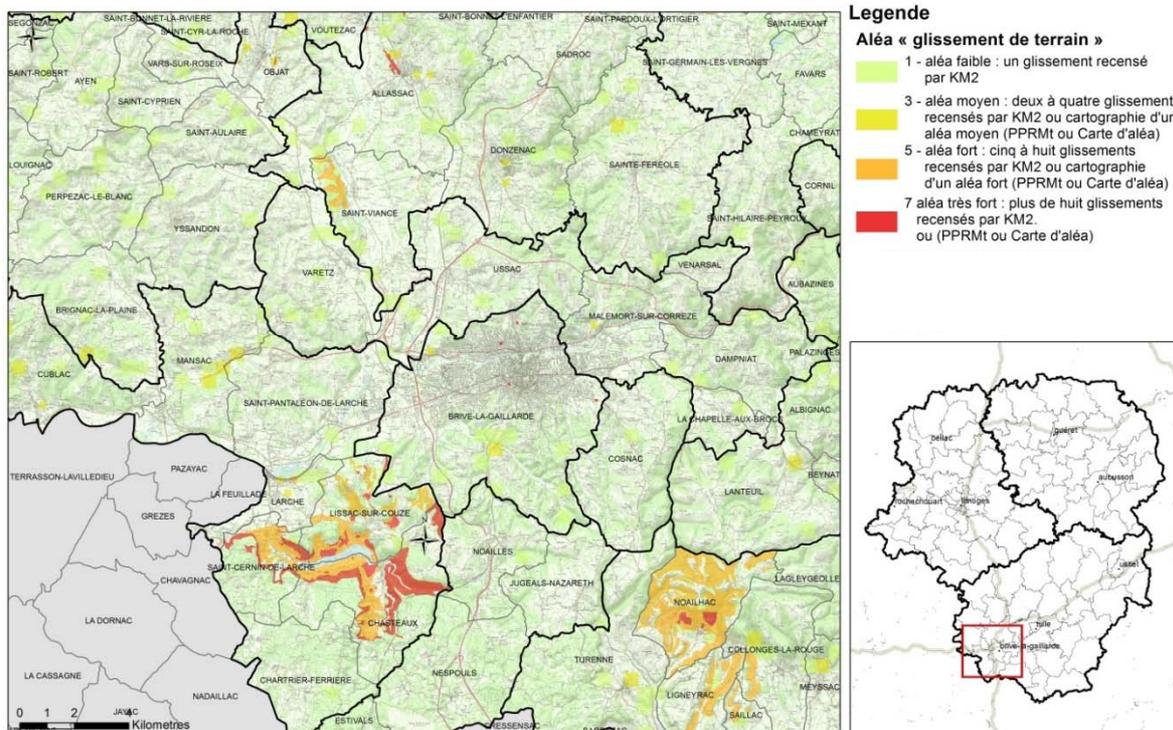


Figure 30 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Glissement de terrain" et tableau de répartition des surfaces en Limousin

Valeur de qualification du critère	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	16 882	99.03 %
1	142	0.84 %
3	16	0.09 %
5	16	0.10 %
7	7	0.04 %

3.3.5. Aléa « pollution des sols et des nappes souterraines »

Phénomène redouté

Le phénomène décrit est une « Pollution des sols et des nappes par infiltration de polluants depuis la surface ou mise en contact d'aquifères avec des nappes polluées ». Ce phénomène pourrait être provoqué soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif géothermique, soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par l'infiltration de polluants depuis la surface ou la mise en communication de nappes superficielles polluées avec des aquifères plus profonds, notamment, en cas de défaut d'étanchéité du trou de forage.

Les sites et sols pollués issus de la base de données BASOL¹⁰ ont été utilisés pour la carte. Les pondérations propres à caractériser le niveau d'aléa sont définies selon différentes informations obtenues par la base BASOL transmise par le ministère en charge de l'environnement. Pour établir ce niveau d'aléa, une distinction a été faite sur le type de polluant en considérant de façon plus importante les sites avec des polluants non métalliques à l'exception du mercure. Les pollutions listées dans quatorze colonnes respectives « polluants sols et nappes » et « polluants nappes » sont :

- Hg (mercure) ;
- sulfates, chlorures, ammonium ;
- BTEX, Hydrocarbures, TCE, HAP, PCB, PCT ;
- solvants halogénés et Solvants non halogénés ;
- produits phytosanitaires.

Au total 56 sites BASOL sont recensés et ont été extraits pour le territoire Limousin. Les sites classés comme « banalisables » (pour un usage donné), pas de contrainte particulière après diagnostic, ne nécessitant pas de surveillance ou libres de toute restriction, travaux réalisés, aucune restriction, pas de surveillance nécessaire, n'ont pas été extraits ni portés sur la carte. Les sites restant ont été classés en classe moyenne (niveau 4) ou en classe forte (niveau 6) selon qu'un impact direct a été constaté dans les eaux souterraines (6) ou dans les sols (4). Les sites où seuls des polluants de type métallique ont été inventoriés sont classés en niveau 1.

¹⁰ Base de données Basol sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif (<http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>).

Qualification de l'aléa

Au regard de la précision des localisations associées au point (rue, parcelle...) et de la possibilité qu'ait été dispersée une pollution dans les eaux souterraines et/ou les sols, un « buffer » de 500 m a été porté pour chacun des sites retenus. Ces aires d'influence peuvent être amenées à se superposer et le cas échéant, seule l'aire affectée de la qualification la plus forte est retenue (Figure 31) :

- **aléa nul (0)** : pas de sites BASOL répertoriés ou présence d'un site BASOL classé comme traité et libre de toute restriction ;
- **aléa faible (1)** : présence d'un site BASOL présentant une pollution d'origine métallique ;
- **aléa moyen (4)** : présence d'un site BASOL présentant une pollution d'origine non métallique (ou mercure) ;
- **aléa fort (6)** : présence d'un site BASOL et pollution avérée de la nappe.

Il existe quelques sites où la précision de la localisation est incertaine et le site a été rapporté au centre de la commune (au centroïde géographique). Dans ce cas particulier et pour les seuls sites d'aléa fort, afin de ne pas impacter trop fortement l'ensemble de la commune tout en conservant l'information de la présence de ce site, la totalité du territoire communal a été affectée d'un niveau de susceptibilité faible (1) et cela quel que soit le niveau du site.

En pratique, seules les communes de Saint-Yrieix-la-Perche et Limoges ont été traitées de la sorte pour quelques-uns des sites qui les concernent. Il existe un site BASOL sur la commune de Meymac qui impacte les eaux souterraines. La base BASOL le définit par erreur comme associé au centroïde de la commune, le buffer de 500 m a été conservé dans ce cas particulier.

Risques liés à la géothermie de minime importance
Aléa "Pollution des sols et des nappes souterraines"

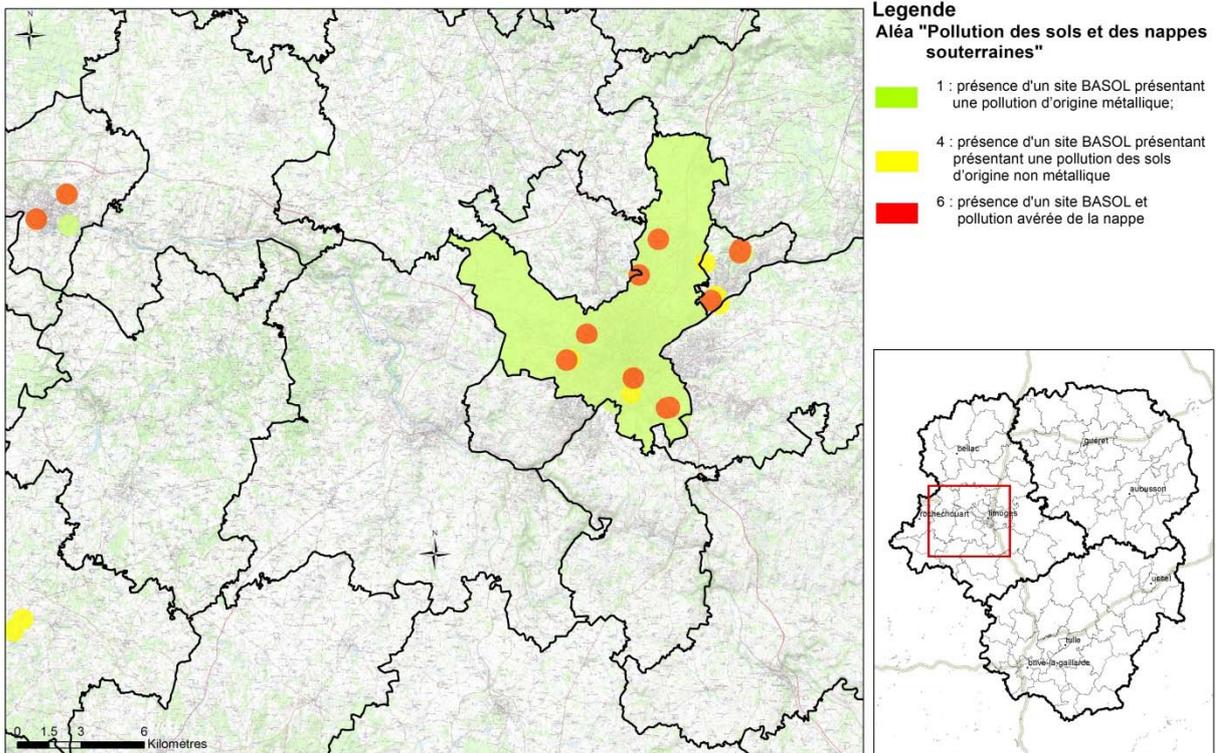


Figure 31 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Pollution des sols et des nappes souterraines" et tableau de répartition des surfaces en Limousin

Critère de qualification	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	16 920	99.26 %
1	108	0.63 %
4	1	0.01 %
6	18	0.11 %

3.3.6. Aléa « artésianisme potentiel »

Phénomène redouté

L'artésianisme est l'aptitude d'un aquifère captif à permettre la remontée d'eau spontanée par des ouvrages (puits, forages). Cette remontée d'eau en surface peut ainsi entraîner des écoulements d'eau sur le sol, et/ou une déstabilisation d'une formation superficielle. L'aquifère concerné a ainsi une surface piézométrique située au-dessus de la surface du sol. Il n'existe pas de carte à l'échelle nationale ou régionale de ce phénomène. En revanche, en l'état des connaissances de l'hydrogéologie limousine, ce phénomène ne peut être écarté, soit en période hivernale et donc de recharge des aquifères, soit dans un contexte de réinjection « forcée » des eaux d'un doublet géothermique dans certains contextes géologiques spécifiques au Limousin et notamment le contexte où le milieu fissuré, potentiel ressource en eau en quantité suffisante, est captif sous une couverture d'altérites meubles peu perméables et relativement peu épaisses.

Cette caractéristique est particulièrement importante à souligner au regard de la technique d'exploitation de géothermie mise en œuvre avec des doublets (pompage et injection) sur nappe. En effet avec des cotes piézométriques proches de la surface, notamment en période de hautes eaux et des perméabilités relativement faibles (10^{-7} m/s à 5.10^{-6} m/s en fonction de la teneur en argile), des risques de débordement de nappe peuvent être observés au droit du piézomètre de réinjection.

Qualification de l'aléa d'artésianisme

En Limousin, en domaine sédimentaire (bassin mésozoïque aquitain, bassin permien de Brive, bassin tertiaire de Gouzon) il n'y a pas d'artésianisme pérenne connu, les premières sources artésiennes pérennes apparaissent à l'ouest de la Corrèze dans les formations karstiques du Jurassique moyen (sources du Blâme par exemple). En domaine de socle il n'y a pas d'avantage de cartographie des zones artésiennes identifiée, en revanche il apparaît des phénomènes d'artésianisme saisonnier.

La qualification du phénomène en domaine de socle est basée sur le retour d'expérience (carte de pente et IDPR) et sur la comparaison entre le niveau piézométrique des nappes et la cote altimétrique du sol mesurés dans les piézomètres suivis.

Le traitement des données géomorphologiques permet d'établir la carte suivante (Figure 33). Elle résulte de la sélection des mailles de 100 m de côté dont au moins 80 % de la surface est occupée par des terrains où l'IDPR est ≤ 800 et la pente est $< 8\%$

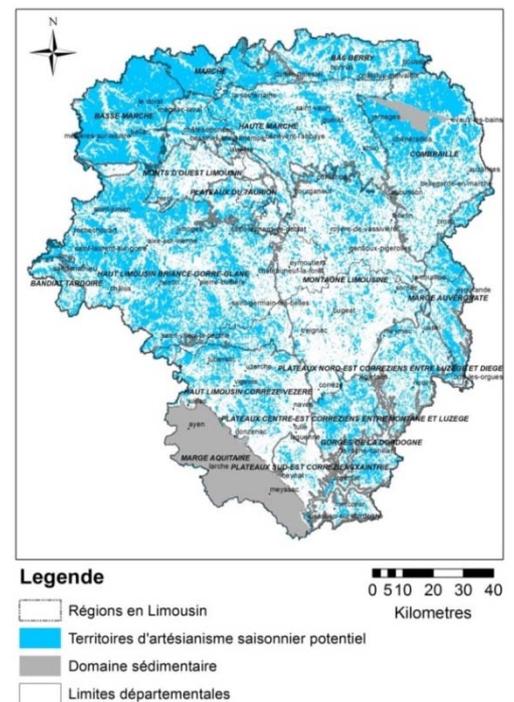


Figure 33 : Zones en Limousin où IDPR ≤ 800 et pentes $< 8\%$

Qualification de l'aléa

La qualification du phénomène d'artésianisme a été établie comme suit (Figure 34) :

- **aléa nul (0)** : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée ;
- **aléa faible (1)** : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique connu pour être supérieur en période hivernal à la surface du sol dans la tranche de terrain considérée.

Concernant le facteur aggravant, lié au phénomène d'artésianisme, un niveau faible a été attribué pour les doublets sur nappe et moyen pour les sondes géothermiques verticales.

Le niveau d'aléa retenu pour l'artésianisme varie entre 0 (nul) et 1 (faible). 6 496 km² sont concernés par l'aléa de niveau faible soit 38 % de la surface du territoire (17 026 km²).

Risques liés à la géothermie de minime importance

Aléa « artésianisme potentiel »

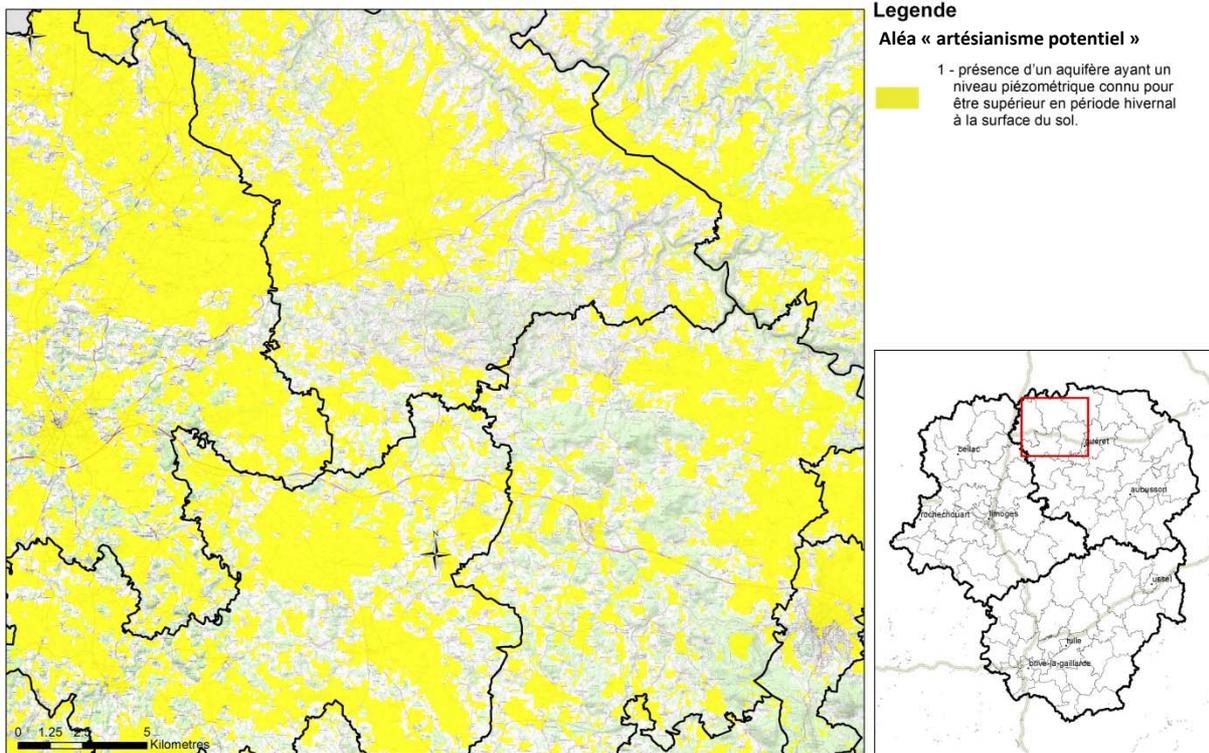


Figure 34 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Artésianisme potentiel" et tableau de répartition des surfaces en Limousin

Critère de qualification	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	10 532	61.78 %
1	6 496	38.11 %

3.3.7. Aléa « mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères »

Phénomène redouté

Le phénomène redouté est une mise en communication verticale entre deux aquifères suivie d'un écoulement de l'eau d'un aquifère dans un autre pouvant entraîner :

- une dégradation de la qualité de l'eau dans un des aquifères si l'autre est pollué ou se caractérise par une eau présentant un faciès géochimique différent ;
- la baisse du niveau piézométrique dans un aquifère pouvant entraîner des assèchements de captages voisins, voire des désordres géotechniques ;
- l'augmentation du niveau piézométrique d'un aquifère superficiel pouvant entraîner une remontée d'eau à la surface et une inondation potentielle.

Le phénomène est d'autant plus fort que la différence de niveau piézométrique entre les aquifères est importante.

Il n'existe pas de carte régionale du phénomène de mise en communication entre aquifères. La qualification du phénomène est donc basée sur la probabilité d'avoir un ou plusieurs aquifères dans l'intervalle de profondeur considéré et sur l'usage des aquifères qui pourraient être mis en connexion (alimentation en eau potable...). En Limousin, en domaine de socle, seul le bassin de Gouzon présente une superposition d'aquifères dans la BDLISA.

En domaine sédimentaire, dans le mésozoïque du bassin Aquitain, la superposition d'aquifères existe et forme un empilement qui peut superposer plus de 4 nappes.

Enfin au sein d'un même aquifère, deux nappes d'eau souterraines peuvent se présenter et leurs relations sont parfois complexes et peuvent provoquer l'augmentation du niveau piézométrique d'une nappe superficielle pouvant entraîner une remontée d'eau à la surface et une inondation locale potentielle. Ce phénomène a été traité dans le cadre de l'aléa d'artésianisme potentiel car le référentiel national des limites de systèmes aquifères (BDLISA version 1, 2015) ne distingue pas plusieurs aquifères au sein des formations de socle.

Qualification de l'aléa mise en communication d'aquifère

La qualification de l'aléa « mise en communication d'aquifère » s'est appuyée sur une extraction des données issues du référentiel hydrogéologique BDLISA¹¹ dans sa version V1 disponible depuis août 2015. Ce référentiel national répertorie les entités hydrogéologiques (formations aquifères ou non aquifères) selon trois échelles territoriales (nationale, régionale et locale) et regroupées dans cinq thèmes, selon des règles élaborées dans le cadre d'une méthodologie nationale.

¹¹ La construction sur référentiel repose sur les principes de bases énoncés dans le guide méthodologique établi en 2003 (rapport BRGM/RP-52261-FR, 2003).

BDLISA regroupe des entités hydrogéologiques. Ces entités composent une partie de l'espace géologique aquifère ou non aquifère qui correspond à un système physique caractérisé au regard de son état et de ses caractéristiques hydrogéologiques. Une entité hydrogéologique est :

- de niveau local, régional ou national ;
- rattachée à un type de formation géologique : thème (sédimentaire, socle, alluvial, volcanisme, formations intensément plissées) ;
- définie par ses potentialités aquifères (nature) et la présence ou non d'une nappe libre ou captive (un état) ;
- caractérisée par un type de porosité (un milieu).

BDLISA présente les entités suivant un ordre croissant depuis la surface vers les niveaux les plus profonds (ordre 1 pour les entités affleurantes, ordre 2 pour les entités situées juste au-dessous...). Ce numéro d'ordre qui est affecté aux entités permet de connaître l'empilement local des unités. Les épaisseurs ne sont pas prises en compte. Pour le Limousin, dont 93 % du territoire est composé de roches assimilées au socle cristallin, le découpage des entités nationales, régionales et locales a été effectué selon l'organisation du réseau hydrographique de surface et donc des bassins versants (Figure 35).



Figure 35 : BdLisaV1 (découpage local et ordre relatif 1) en Limousin

En termes d'aléa de mise en communication de nappe, le niveau d'ordre de recouvrement des couches aquifères défini dans BDLISA a été utilisé (Figure 36). Ainsi, si au moins deux aquifères peuvent se superposer, une communication entre nappes est potentiellement possible et un niveau d'aléa égal à 1 est attribué.

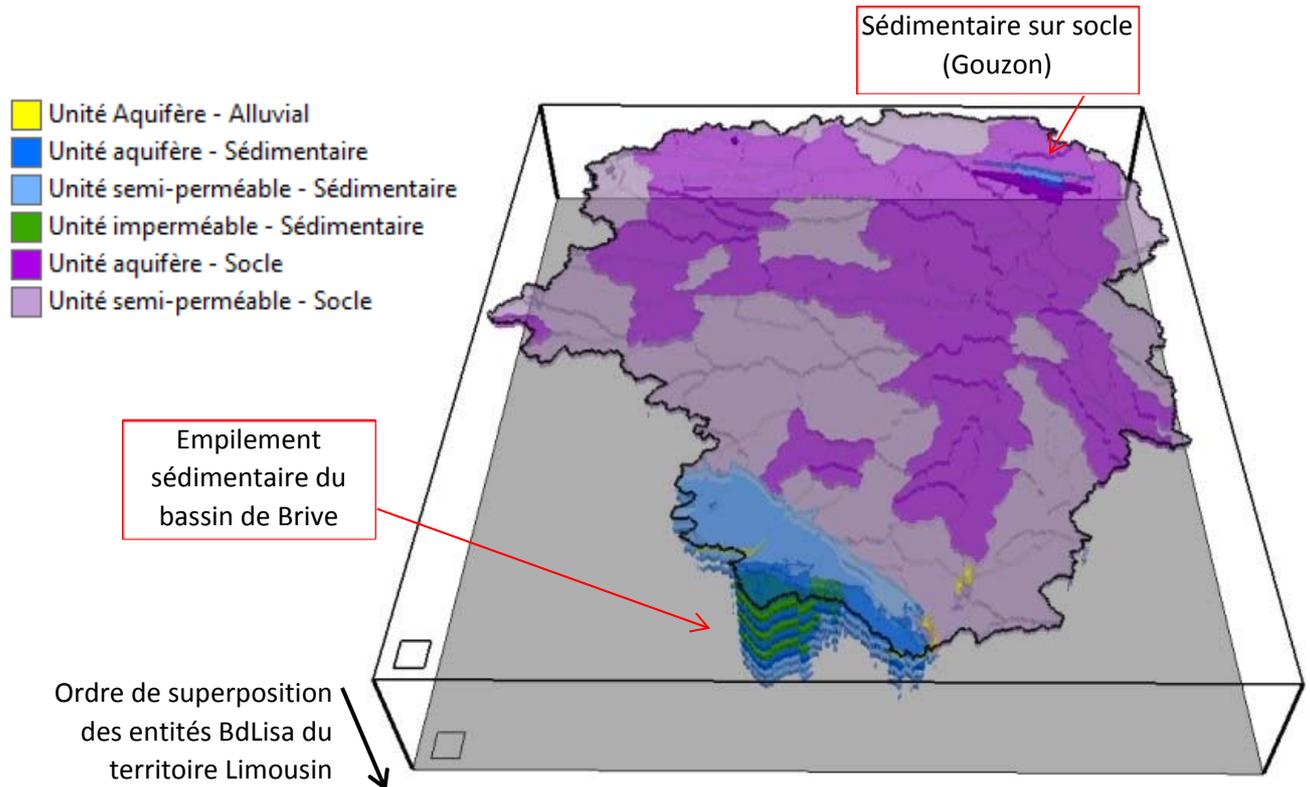


Figure 36 : BdLisaV1 (découpage local et empilement des ordres relatifs) en Limousin

Concernant le thème sédimentaire, le domaine sédimentaire du bassin de Brive est caractérisé par un empilement de plusieurs entités hydrogéologiques. L'absence d'éléments suffisant permettant d'estimer la profondeur effective des aquifères a conduit à cartographier un aléa unique de mise en communication de nappes pour l'intervalle de profondeur 10 m - 200 m.

L'aléa a été établi de la manière suivante (Figures 37 et 38) :

- **aléa nul (0)** : absence d'aquifère ou présence d'un seul aquifère dans l'intervalle de profondeur considéré sans risque de remontée d'eau à la surface ;
- **aléa faible (1)** : présence de nappes superposées au sein d'un seul aquifère dans l'intervalle considéré ;
- **aléa moyen (4)** : présence de nappes superposées au sein de plusieurs aquifères.

Figure 37 : Tableau de repartition des valeurs du niveau d'aléa de mise en communication des aquifères

Critère de qualification	Surface en km ² du territoire	Ratio
Nul - 0	16 718	98.3 %
Faible - 1	107	0.6 %
Moyen - 4	201	1.1 %

Conformément à la méthodologie générale pour la construction des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance, un facteur aggravant a été attribué en fonction de son impact potentiel, fonction du type d'échangeur utilisé : échangeur fermé ou échangeur ouvert. Pour le phénomène de mise en communication d'aquifères, un facteur aggravant égale à 4 a été attribué, respectivement au doublet sur aquifère et à la sonde géothermique verticale.

Pour mémoire, il n'a pas été identifié de Nappes à réserver à l'Alimentation en Eau Potable (NAEP) en Limousin, ces NAEP peuvent, en d'autres territoires, augmenter ce critère d'aléa.

Risques liés à la géothermie de minime importance

Aléa « mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères » ;

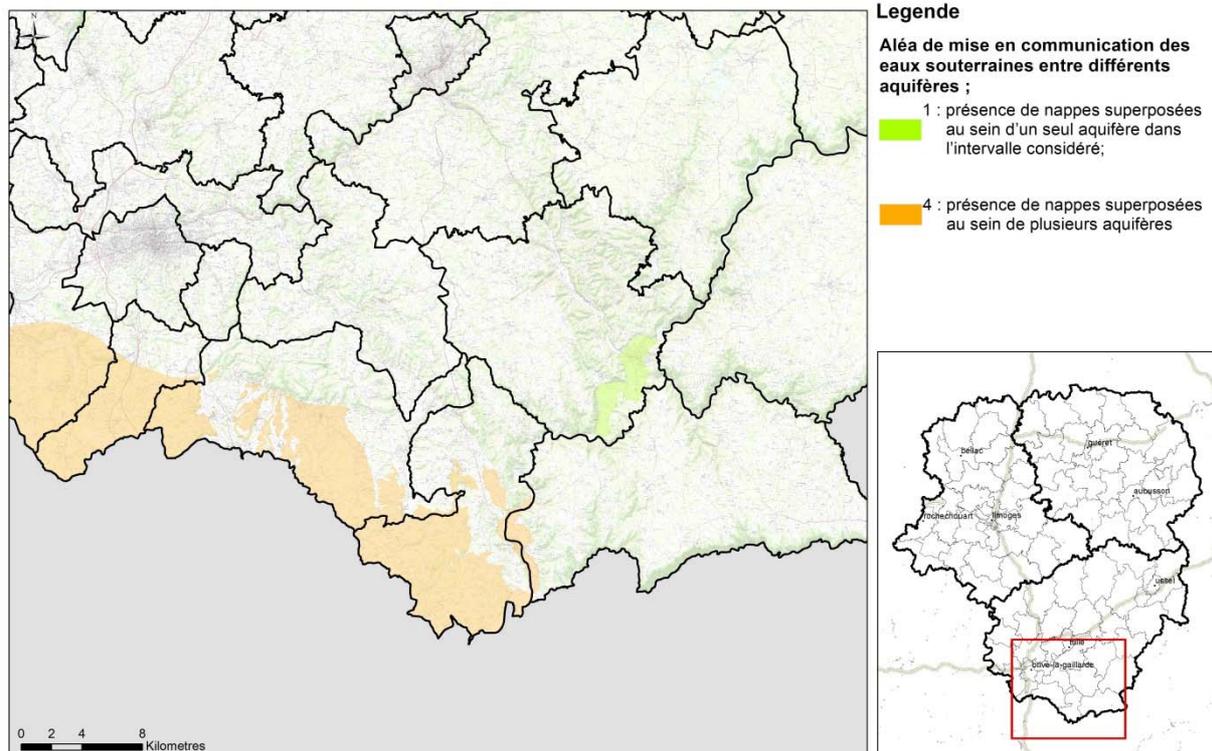


Figure 38 : Extrait de la cartographie de l'aléa de mise en communication des aquifères

3.3.8. Aléa « inondation par remontée de nappe »

Phénomène redouté

Le phénomène d'inondation par remontée de nappe correspond à une remontée de nappe due à une surcote provoquée potentiellement par la réinjection d'eau dans le cadre du fonctionnement d'un doublet géothermique. Ce phénomène est susceptible de provoquer une inondation des terrains en surface, voire une déstabilisation géotechnique.

Dans le cadre des travaux cartographiques de l'aléa risque d'inondation par remontée de nappe, la création de deux classes a été réalisée à partir de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS), calculée pour des mailles de 100 m x 100 m.

La qualification du phénomène d'inondation par remontée de nappe à l'échelle régionale est la même qu'à l'échelle nationale. Elle est basée sur les données du site Internet <http://www.inondationsnappes.fr>.

Pour le socle limousin les données utilisées sont celles issues de l'étude nationale concernant les risques d'inondation par remontée de nappe en France. Elles sont extraites du site <http://www.inondationsnappes.fr>. On dispose alors d'une cartographie avec 5 niveaux (+ 1) de sensibilité : très faible, faible, moyenne, forte, très forte et nappe sub-affleurante (Figure 39).

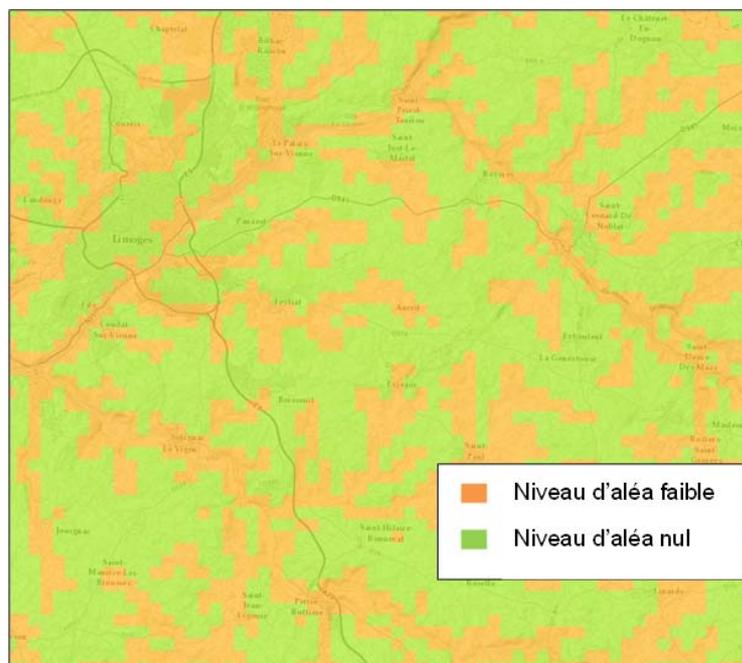


Figure 39 : Exemple de répartition du niveau d'aléa du phénomène remontée de nappe aux alentours de Limoges.

Qualification de l'aléa

La qualification de l'aléa est la suivante (Figures 40 et 41) :

- **aléa nul (0)** : pas d'aquifère ayant un niveau piézométrique déjà observé à moins de 5 m sous la surface du sol en hautes eaux ;
- **aléa faible (1)** : présence d'un aquifère où un niveau piézométrique a déjà été observé entre 0 et 5 m sous la surface du sol en hautes eaux.

L'inondation par remontée de nappe est un phénomène superficiel qui apparaît à des profondeurs inférieures à 50 m. Compte tenu des phénomènes potentiels liés à ce type de phénomène, un facteur aggravant a été attribué fonction du type d'échangeur. Ce facteur aggravant est estimé à 0 pour les sondes géothermiques verticales et 2 pour les doublets sur nappe.

Risques liés à la géothermie de minime importance

Aléa « Remontée de nappe »

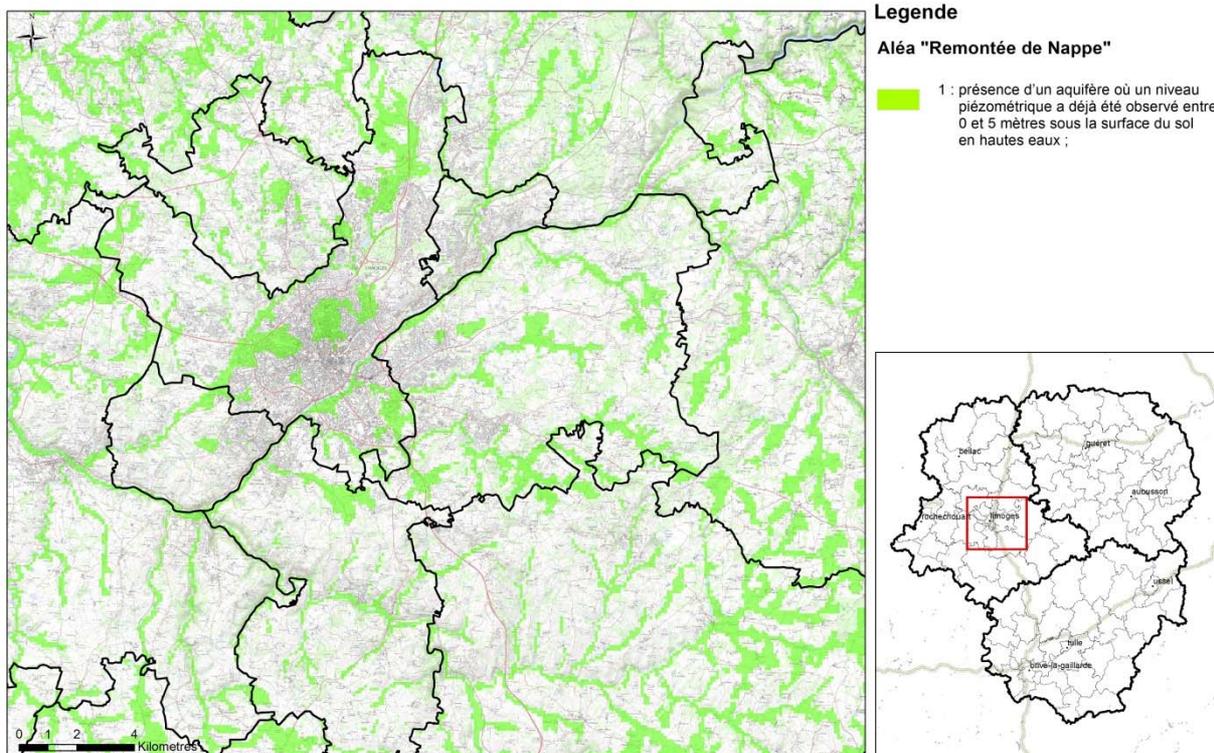


Figure 40 : Extrait de la cartographie de l'aléa "Remontée de nappe"

Critère de qualification	Surface en km ² du territoire	Ratio
0	13 128	77.01 %
1	3 919	22.99 %

Figure 41 : Niveaux d'aléas et surfaces impactées pour la remontée de nappe

3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA FINAL

Pour obtenir l'aléa final le calcul combinant les valeurs de facteur aggravant et l'intensité des phénomènes redoutés (affaissement, effondrement, pollution...) a été produit par le SIG et pour chaque type d'usage (doublet sur nappe ou sondes géothermiques verticales). Le tableau suivant (Figure 42) synthétise les éléments du calcul. La somme de chaque ligne, correspondant à un niveau d'aléa multiplié par le facteur propre à la filière retenue.

Phénomènes redoutés	Niveaux aléa / susceptibilité du phénomène	Facteur aggravant (doublet sur nappe)	Facteur aggravant (SGV)	Niveau final (doublet sur nappe)	Niveau final (SGV)
Affaissement / surrection lié aux niveaux évaporitiques	0	6	10	0	0
Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines)	0/1/2/3	2	2	[0 ; 6]	[0 ; 6]
Affaissement / effondrement lié aux cavités minières	0/7	2	2	[0 ; 14]	[0 ; 14]
Mouvements de terrains (ou glissements de terrains)	0/1/3/5/7	2	2	[0 ; 14]	[0 ; 14]
Pollution des sols et des nappes souterraines	0/1/4/6	3	3	[0 ; 18]	[0 ; 18]
Artésianisme	1	2	4	[0 ; 2]	[0 ; 4]
Mise en communication d'aquifères	0/1/4	4	4	[0 ; 16]	[0 ; 16]
Remontée de nappe	0/1	2	0	[0 ; 2]	0
La gamme de valeurs possibles s'établit au final entre 0 et 72 sur le territoire limousin					

Figure 42 : Niveaux d'aléa et facteurs de pondération pour les solutions doublet sur nappe et SGV.

La cotation des différentes zones, verte, orange ou rouge est fonction des sommes obtenues avec :

- pour la zone **verte** une valeur comprise dans l'intervalle [0 – 14[, (14 exclu), elle correspond aux zones dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves ;
- pour la zone **orange** une valeur comprise dans l'intervalle [14 – 42[, (42 exclu), elle correspond aux zones dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves et dans lesquelles est exigée la production de l'attestation prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- pour la zone **rouge** une valeur supérieure ou égale à [42 – 72], qui identifie les zones dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des

dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance.

Les tableaux suivants (Figure 43) présentent les différentes valeurs obtenues en fonction de la surface impactée du territoire limousin (17 047 km² au total).

Valeur de l'analyse combinatoire pour la filière doublets de forages sur nappe	Surface concernée (en km ²)	Part du territoire en %	Analyse combinatoire pour la filière des sondes géothermiques verticales	Surface concernée (en km ²)	Part du territoire en %
0	3224	18.9%	0	9673	56.7%
2	11214	65.8%	2	287	1.7%
4	2001	11.7%	4	6365	37.3%
6	121	0.7%	6	132	0.78%
8	12	0.1%	8	109	0.64%
10	15	0.1%	10	16	0.09%
12	8.56	0.1%	12	0.66	0.004%
14	126	0.7%	14	136	0.80%
16	169	1.0%	16	131	0.77%
18	117	0.7%	18	133	0.78%
20	17	0.1%	20	19	0.11%
22	2.41	0.0141%	22	7.07	0.04%
24	1.07	0.0063%	24	12.47	0.07%
26	4.25	0.0249%	26	4.56	0.03%
28	1.91	0.0112%	28	7.85	0.05%
30	2.11	0.0124%	30	2.14	0.01%
32	7.20	0.0422%	32	7.23	0.04%
34	1.75	0.0102%	34	1.75	0.01%
36	0.05	0.0003%	36		
38			38	0.37	0.002%
42			42	0.40	0.002%

	Analyse combinatoire pour la filière doublets		Analyse combinatoire pour la filière des sondes géologiques verticales	
	Surface concernée (en km ²)	Part du territoire en %	Surface concernée (en km ²)	Part du territoire en %
les zones «vertes» dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves	16596	97.4%	16584	97.3%
les zones «orange» dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves et dans lesquelles est exigée la production de l'attestation prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;	451	2.6%	463	2.72%
les zones «rouges» dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance.			0.40	0.002%

Figure 43 : Valeurs d'aléas obtenues en fonction de la surface impactée en Limousin

3.5. RESTITUTION NATIONALE DE LA CARTE TERRITORIALE

La restitution au format numérique de la carte GMI doit être faite par « mailles » régulières imposées par la méthodologie nationale associée au serveur cartographique mis en place.

Cela signifie que l'information qui, dans certains cas, peut-être d'une précision plus fine que le « carré », est ramenée à la maille qui l'intersecte soit, *in fine*, une précision que l'on peut arrêter à la maille de 500 m, 250 m ou 100 m.

Le Comité de suivi du projet en Limousin a choisi que soit produit un document final fondé sur une résolution de mailles à 100 m. La valeur retenue de l'analyse combinatoire portée pour chaque maille est la valeur maximale de l'aléa intersecté.

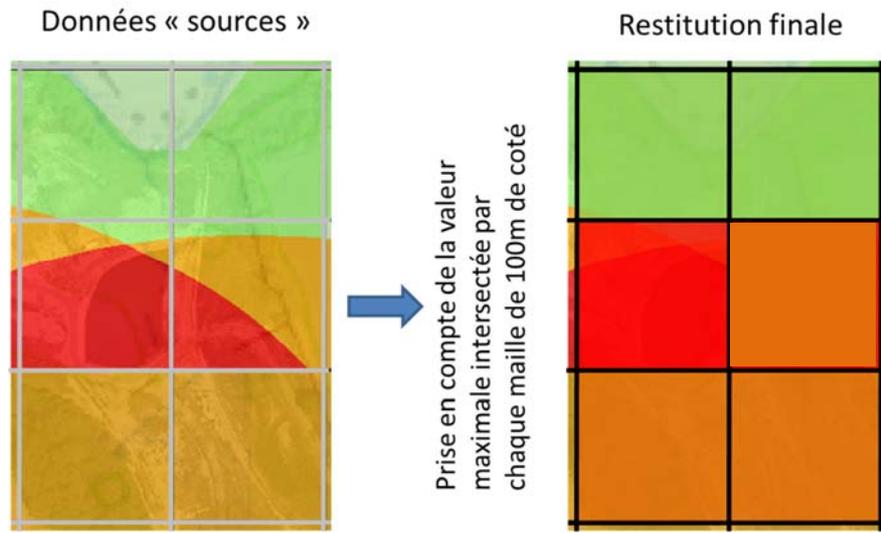


Figure 44 : Simplification des résultats de l'analyse aux mailles de 100m

4. Conclusion

La cartographie des risques liés à la géothermie de minime importance sur le territoire limousin apporte peu de contraintes au développement des usages de cette énergie renouvelable.

En effet, pour 97.3 % de la surface du territoire les activités de la GMI, en l'état des connaissances actuelles, ne présentent ni dangers ni inconvénients graves. Les cartes de la GMI pour les doublets et les sondes géologiques verticales au format A3 sont disponibles en annexe.

En termes d'occupation du territoire (Figure 45), la distribution du risque est un peu plus contrastée avec 5 % des zones urbanisées en zone orange. À titre d'illustration, la GMI calculée précédemment a été redistribuée selon la codification des terres de Corine©Land-Cover au sein des deux tableaux des Figures 46 et 47.

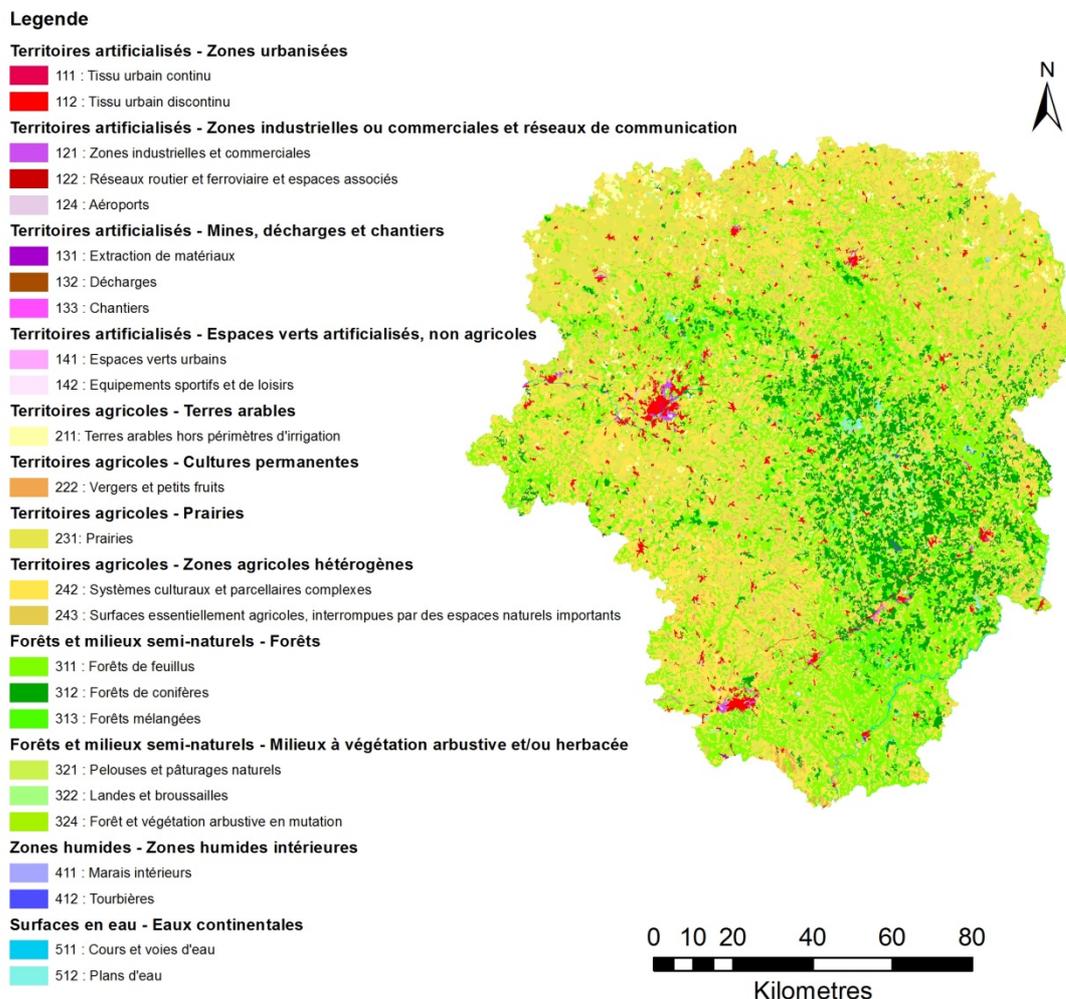


Figure 45 : Corine©LandCover (2008) en Limousin

				Part relative par catégorie		
Nomenclature Corine© Land-Cover			Part relative du territoire	Vert	Orange	Rouge
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Tissu urbain continu	0.02 %	93.96 %	6.04 %	0.00 %
		Tissu urbain discontinu	1.82 %	96.52 %	3.48 %	0.00 %
	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	Zones industrielles et commerciales	0.24 %	86.91 %	13.09 %	0.00 %
		Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	0.09 %	94.61 %	5.39 %	0.00 %
		Aéroports	0.02 %	99.79 %	0.21 %	0.00 %
	Mines, décharges et chantiers	Extraction de matériaux	0.06 %	63.95 %	36.05 %	0.00 %
		Décharges	0.01 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
		Chantiers	0.05 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
	Espaces verts artificialisés, non agricoles	Espaces verts urbains	0.00 %	93.75 %	6.25 %	0.00 %
		Équipements sportifs et de loisirs	0.07 %	92.27 %	7.73 %	0.00 %
Territoires agricoles	Terres arables	Terres arables hors périmètres d'irrigation	1.89 %	98.56 %	1.44 %	0.00 %
	Cultures permanentes	Vergers et petits fruits	0.19 %	48.02 %	51.98 %	0.00 %
	Prairies	Prairies	36.83 %	98.34 %	1.66 %	0.00 %
	Zones agricoles hétérogènes	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	17.23 %	97.30 %	2.70 %	0.00 %
		Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	4.85 %	97.60 %	2.40 %	0.00 %
Forêts et milieux semi-naturels	Forêts	Forêts de feuillus	19.41 %	96.11 %	3.89 %	0.00 %
		Forêts de conifères	8.53 %	97.98 %	2.02 %	0.00 %
		Forêts mélangées	5.45 %	97.73 %	2.27 %	0.00 %
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Pelouses et pâturages naturels	0.01 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
		Landes et broussailles	0.77 %	99.35 %	0.65 %	0.00 %
		Forêt et végétation arbustive en mutation	1.82 %	97.03 %	2.97 %	0.00 %
Zones humides	Zones humides intérieures	Marais intérieurs	0.01 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
		Tourbières	0.03 %	90.83 %	9.17 %	0.00 %
Surfaces en eau	Eaux continentales	Cours et voies d'eau	0.19 %	89.42 %	10.58 %	0.00 %
		Plans d'eau	0.41 %	91.66 %	8.34 %	0.00 %
TOTAL RELATIF				97.377 %	2.623 %	0.000 %

Figure 46 : Qualification du territoire Limousin en fonction de la qualification des terres (Corine LandCover) et de la classification GMI pour les doublets géothermiques

Nomenclature Corine© Land-Cover				Part relative par catégorie		
				Vert	Orange	Rouge
Territoires artificialisés	Zones urbanisées	Tissu urbain continu	0.02 %	93.96 %	6.04 %	0.00 %
		Tissu urbain discontinu	1.82 %	96.52 %	3.48 %	0.00 %
	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	Zones industrielles et commerciales	0.24 %	86.91 %	13.09 %	0.00 %
		Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	0.09 %	94.61 %	5.39 %	0.00 %
	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	Aéroports	0.02 %	99.79 %	0.21 %	0.00 %
	Mines, décharges et chantiers	Extraction de matériaux	0.06 %	63.95 %	36.05 %	0.00 %
		Décharges	0.01 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
		Chantiers	0.05 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
	Espaces verts artificialisés, non agricoles	Espaces verts urbains	0.00 %	93.75 %	6.25 %	0.00 %
		Équipements sportifs et de loisirs	0.07 %	92.27 %	7.73 %	0.00 %
Territoires agricoles	Terres arables	Terres arables hors périmètres d'irrigation	1.89 %	98.56 %	1.44 %	0.00 %
	Cultures permanentes	Vergers et petits fruits	0.19 %	48.02 %	51.98 %	0.00 %
	Prairies	Prairies	36.83 %	98.34 %	1.66 %	0.00 %
	Zones agricoles hétérogènes	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	17.23 %	97.30 %	2.69 %	0.01 %
		Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	4.85 %	97.60 %	2.40 %	0.01 %
Forêts et milieux semi-naturels	Forêts	Forêts de feuillus	19.41 %	96.11 %	3.89 %	0.00 %
		Forêts de conifères	8.53 %	97.98 %	2.02 %	0.00 %
		Forêts mélangées	5.45 %	97.73 %	2.26 %	0.01 %
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Pelouses et pâturages naturels	0.01 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
		Landes et broussailles	0.77 %	99.35 %	0.65 %	0.00 %
		Forêt et végétation arbustive en mutation	1.82 %	97.03 %	2.97 %	0.00 %
Zones humides	Zones humides intérieures	Marais intérieurs	0.01 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
Tourbières		0.03 %	90.83 %	9.17 %	0.00 %	
Surfaces en eau	Eaux continentales	Cours et voies d'eau	0.19 %	89.42 %	10.58 %	0.00 %
		Plans d'eau	0.41 %	91.66 %	8.34 %	0.00 %
TOTAL RELATIF				97.377 %	2.621 %	0.002 %

Figure 47 : Qualification du territoire Limousin en fonction de la qualification des terres (Corine LandCover) et de la classification GMI pour les sondes géothermiques verticales

5. Définitions

Aquifère : Milieu souterrain, constitué de roches perméables et/ou fissurées ou fracturées. Ce milieu est suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

Affaissement (progressif) : phénomène correspondant à une déformation souple, lente et progressive des terrains pour former, en surface, une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette.

Aléa : l'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise au cours d'une période de référence en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose sur le croisement entre une intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

Doublet géothermique : système d'exploitation géothermique sur nappe associant un puits de pompage et un puits de réinjection. L'eau sortant de la pompe à chaleur est réinjectée à une température inférieure (cas d'un système de chauffage) ou supérieure (refroidissement – climatisation) à celle de l'aquifère.

Échangeur géothermique ouvert : échangeur géothermique dont le fluide caloporteur circule en circuit ouvert avec les aquifères du sous-sol.

Échangeur géothermique fermé : échangeur géothermique horizontal, vertical ou hybride fonctionnant en circuit fermé. Un fluide caloporteur circule à l'intérieur des tubes, pour prélever ou restituer l'énergie du sous-sol par conduction.

Effondrement localisé (ou fontis) : phénomène qui se traduit en surface par l'apparition soudaine d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

Effondrement généralisé (ou effondrement en masse) : phénomène qui se manifeste par la rupture souvent dynamique (brutale) de la surface sur une superficie pouvant atteindre plusieurs hectares. La surface effondrée est souvent bordée de failles verticales.

Évaporites : appelées aussi roches évaporitiques. Ce sont des roches sédimentaires constituées de minéraux ayant précipité à la suite d'une augmentation de leurs concentrations dans une saumure ; par exemple : gypse, anhydrite, sel gemme, potasse etc.

Fluide caloporteur : un fluide caloporteur est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est généralement composé d'un mélange Eau-Antigel.

Géothermie de minime importance : exploitation de l'énergie géothermique destinée au chauffage par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur. Cette géothermie peut aussi être dénommée « Géothermie de très basse énergie ».

Géothermie basse température : exploitation de l'énergie géothermique destinée au réseau de chauffage urbain par transfert de chaleur direct.

Géothermie haute température : exploitation de l'énergie géothermique destinée à la production d'électricité par alimentation d'une turbine par de la vapeur.

Nappe : volume d'eau contenu dans une formation rocheuse.

PAC (Pompe à chaleur) : dispositif thermodynamique qui prélève la chaleur présente dans un milieu (air, eau ou terre) pour la transférer vers un autre (ex : un logement à chauffer).

Piézométrie : surface de la nappe pour une nappe libre et pression hydraulique pour une nappe captive (s'exprime en mètres comme une cote).

Sonde géothermique verticale (SGV) : échangeur géothermique vertical très basse énergie qui prélève, par conduction, de la chaleur emmagasinée dans le sous-sol et la restitue aux locaux au moyen d'une PAC.

Susceptibilité (ou probabilité d'occurrence) : désigne la possibilité, éventuellement quantifiée sous la forme d'une probabilité, d'occurrence d'un phénomène donné.

6. Acronymes

AEP : Alimentation en Eau Potable.

BASOL : Base de données sur les Sites et sols pollués ou potentiellement pollués, appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

BASIAS : Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service.

BDCavités : Base de données nationale sur les cavités souterraines.

BDLisa : Base de Données sur les Limites des Systèmes Aquifères.

BDmvt : Base de données nationale sur les mouvements de terrain.

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

BSS : Banque de données du Sous-Sol.

DDT : Direction Départementale des Territoires.

CEREMA : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.

MEDDE : Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie.

NAEP : Nappes à Réserver pour l'Alimentation en Eau Potable.

PAC : Pompe à Chaleur (voir également lexique).

PPR : Plan de Prévention des Risques.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

SGV : Sonde Géothermique Verticale (voir également lexique).

SIG : Système d'Information Géographique.

SUP : Servitude d'Utilité Publique.

7. Bibliographie

Analy M. (2013) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères de la région Picardie : Étude du potentiel de développement de la géothermie en région Picardie. BRGM/RP-62381-FR, 83 p., 24 ill., 9 tabl., 3 ann., 1 CD.

Bertin C., Analy M, Bouzit M., Graveline N., Lesueur H, Poux A., Prognon F. avec la collaboration de Leconte S. (2013) - Etude sur la connaissance et la gestion des ressources en eaux souterraines de l'agglomération de Vichy - Projet Avenir. Rapport final. BRGM/RP-62447-FR, 157 p., 89 ill., 1 ann.

Bel A., Poux A., Goyeneche O., Allier D., Darricau G., Lemale J. (2012) – Etude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Ile-de-France. Rapport final – BRGM/RP-61325-FR. 165 p., 56 ill., 16 tab., 4 ann.

Bézèlques-Courtade S., Durst P., avec la collaboration de F. Garnier et T. Demutrecy (2012) - Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les aquifères – Synthèse bibliographique. Rapport final BRGM/RP-59837-FR. Décembre 2012.

Bézèlques-Courtade S., Mardhel V. Outil d'évaluation de l'impact hydraulique et thermique de l'exploitation géothermique de très basse énergie des aquifères superficiels. Présentation des prototypes développés en 2009-2011. Rapport final. BRGM/RP-61345-FR. Septembre 2012, 65 p., 3 ann.

Durst P., Ayache B., Saltel M., Abou Akar A. avec la collaboration de Platel J.P. (2011) - Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse et basse énergie en région Aquitaine – Atlas du potentiel géothermique des aquifères – Rapport final. BRGM/RP-59761-FR. 175 p., 87 fig., 11 ann.

Herbaux M., Kreziak C., Durst P., Martin J.C., Cochery R., Midot D. (2013) – Méthodologie d'une cartographie des contraintes et des risques géologiques liés aux forages géothermiques de minime importance. Rapport final. BRGM/RP-61768-FR, 41 p., 14 fig., 11 tab.

Maton D., Analy M., Durst P., Goyeneche O., Zammit C. avec la collaboration de R. Pissy (2012) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères de la région Picardie. Tome 2 : État des lieux et perspectives de développement de la filière géothermie. Rapport final. BRGM/RP-61365-FR, 247 p., 54 fig., 19 tabl., 13 annexes, 1 Dvd.

Moulin M., avec la coll. de Bauer-Cauneille H., Faure M., Percheval J. & Lyant V. (2013) - Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Atlas Géothermique et évaluation du potentiel géothermique mobilisable. Rapport final. BRGM/RP- 62255 -FR, 96 p., 43 ill., 5 ann., 1 CD.

Poux A., Goyeneche O., LeBrun M., Martin J.C., Noel S., Zammit C., Salquebre D (2012) - Prospectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPOREC). Rapport final BRGM/RP-60336-FR. 97 p., 4 ann.

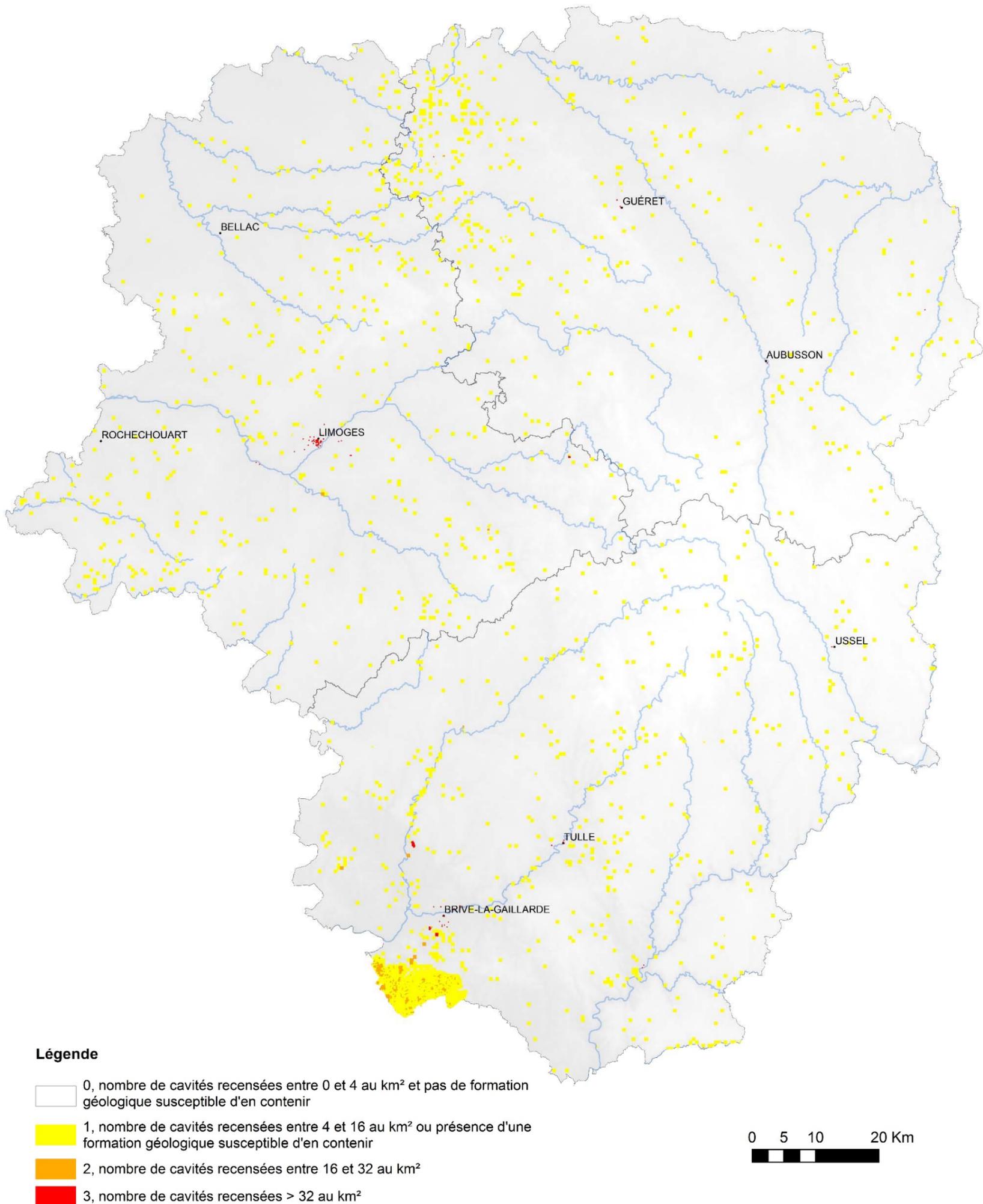
Poux A., Philippe M., Chery C. (2012) - La géothermie dans les documents de planification territoriale - Rapport final. BRGM/RP-60967-FR, 112 p., 18 fig., 4 ann.

Annexe 1

Cartes d'aléas

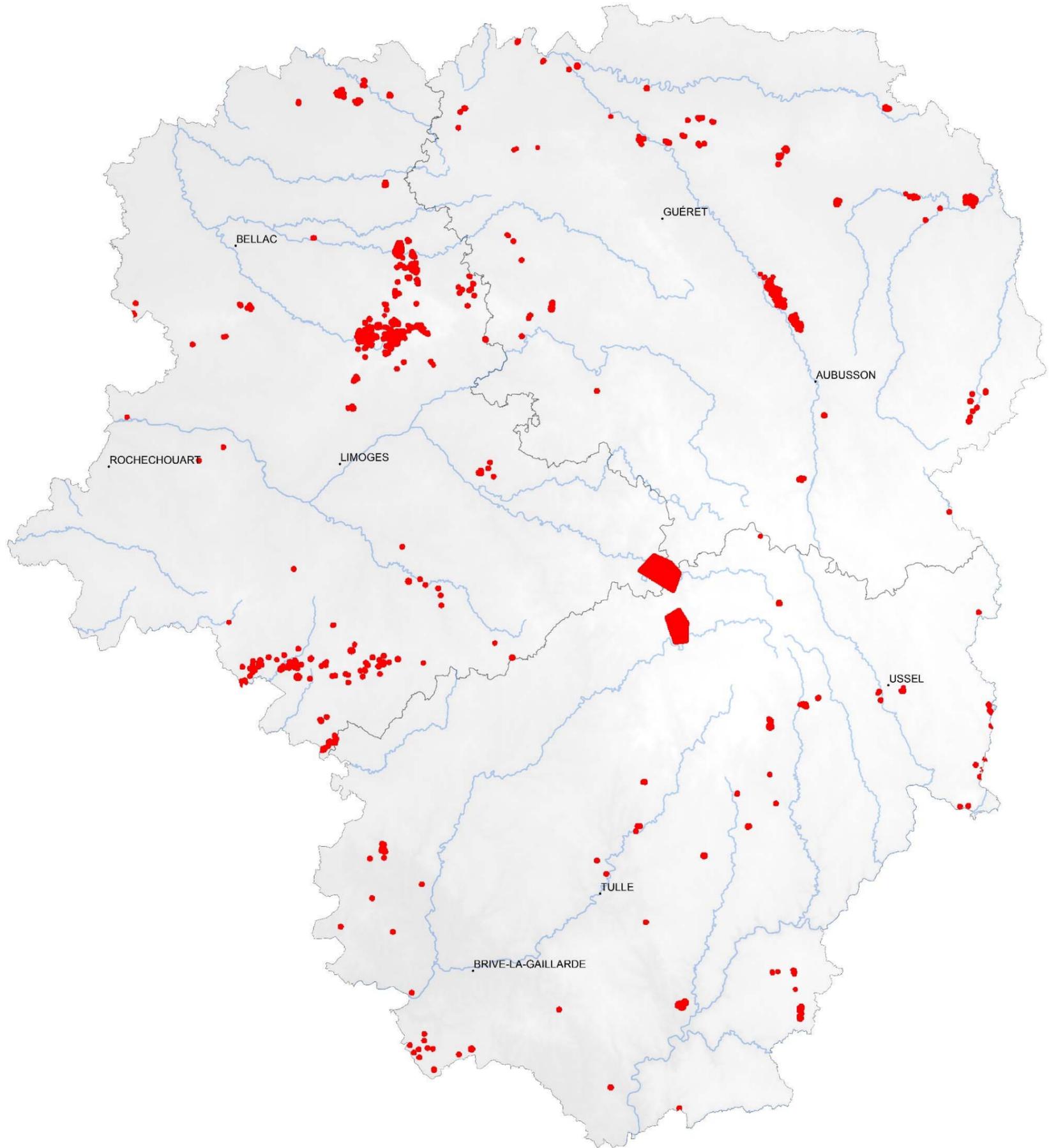
Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Affaissement/Effondrement lié aux cavités (Hors mines) »



Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Affaissement/Effondrement lié aux cavités minières »



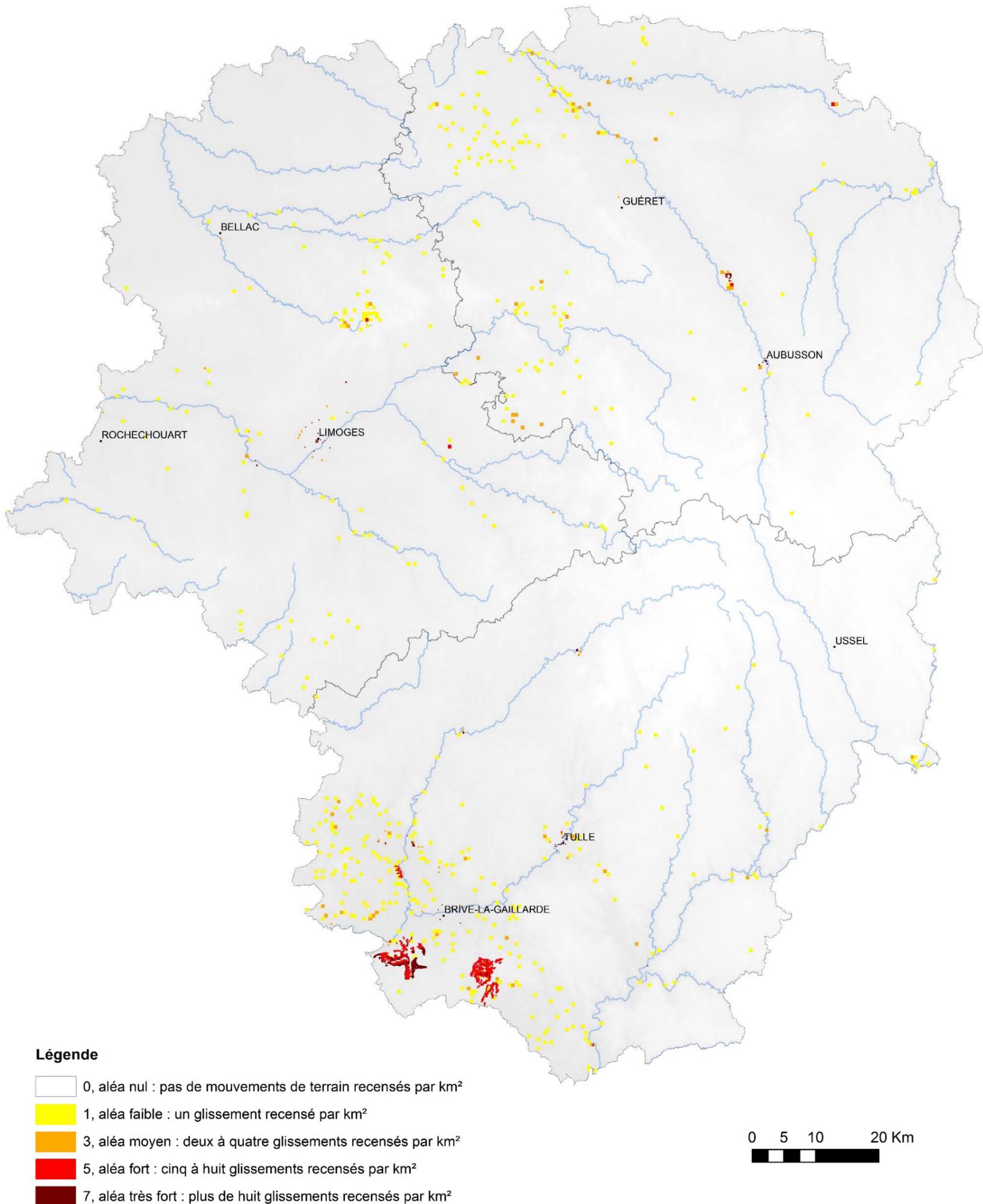
Légende

- 0, zone potentiellement non concernée par des phénomènes d'effondrements en lien avec une exploitation minière
- 7, zone potentiellement concernée par des phénomènes d'effondrements localisés et généralisés en lien avec une exploitation minière passée ou actuelle.



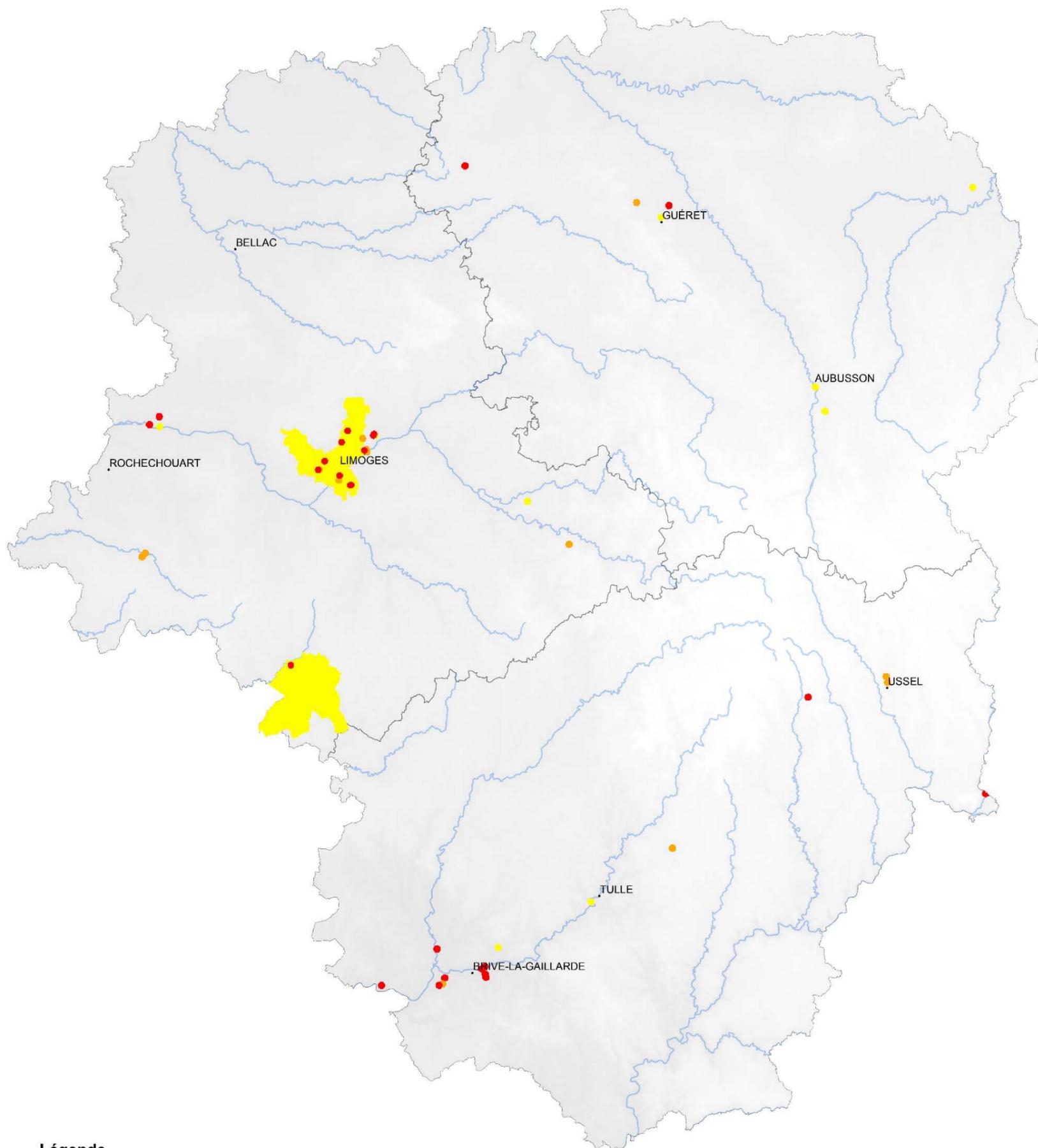
Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Mouvements de terrains de type glissement »



Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »



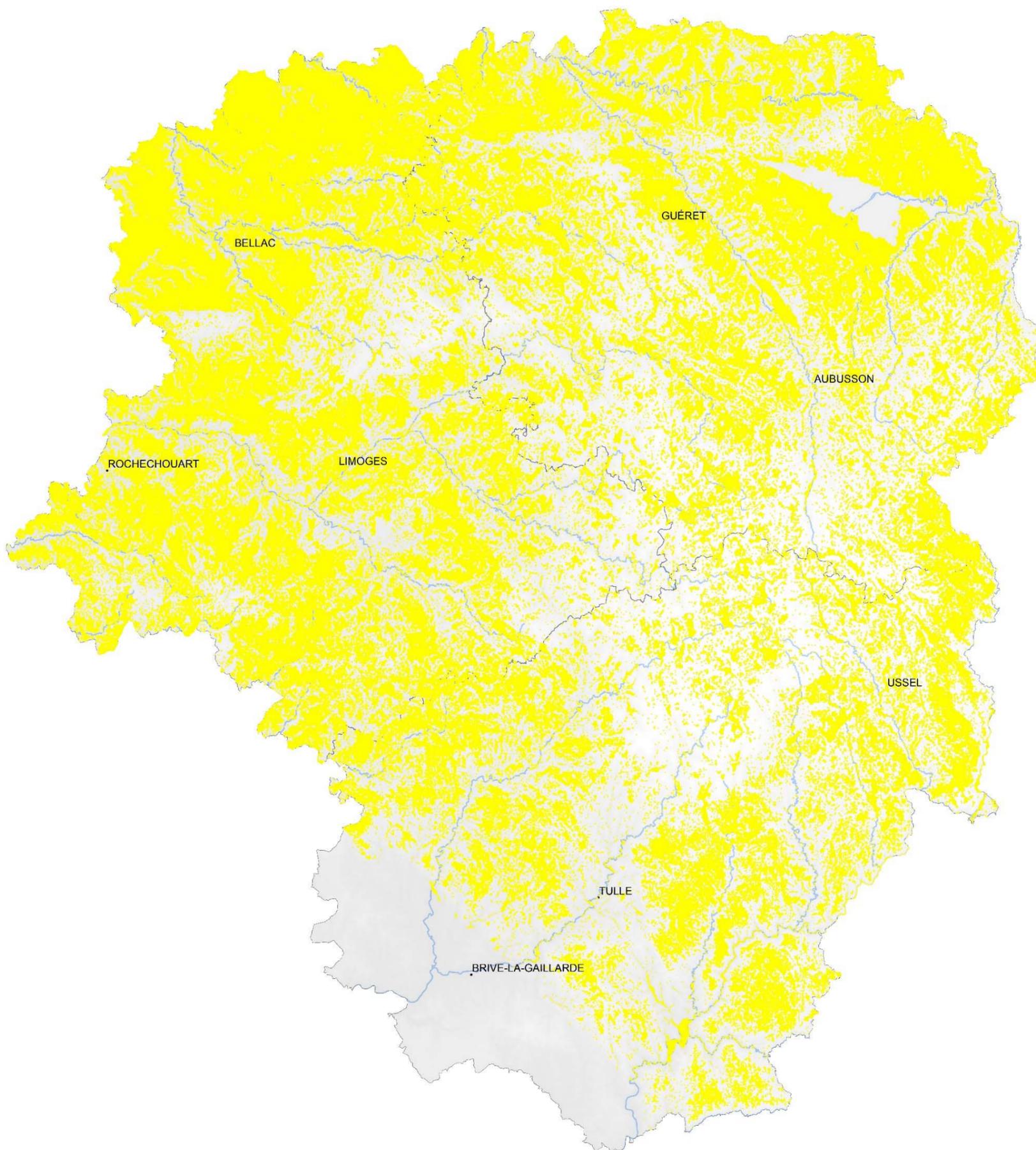
Légende

- 0, aléa nul
- 1, aléa faible : présence d'un site identifié dans BASOL
- 4, aléa moyen : présence d'un site identifié dans BASOL et impact sol
- 6, aléa fort : présence d'un site identifié dans BASOL et impact dans l'aquifère



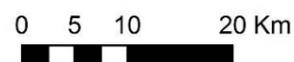
Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Artésianisme potentiel »



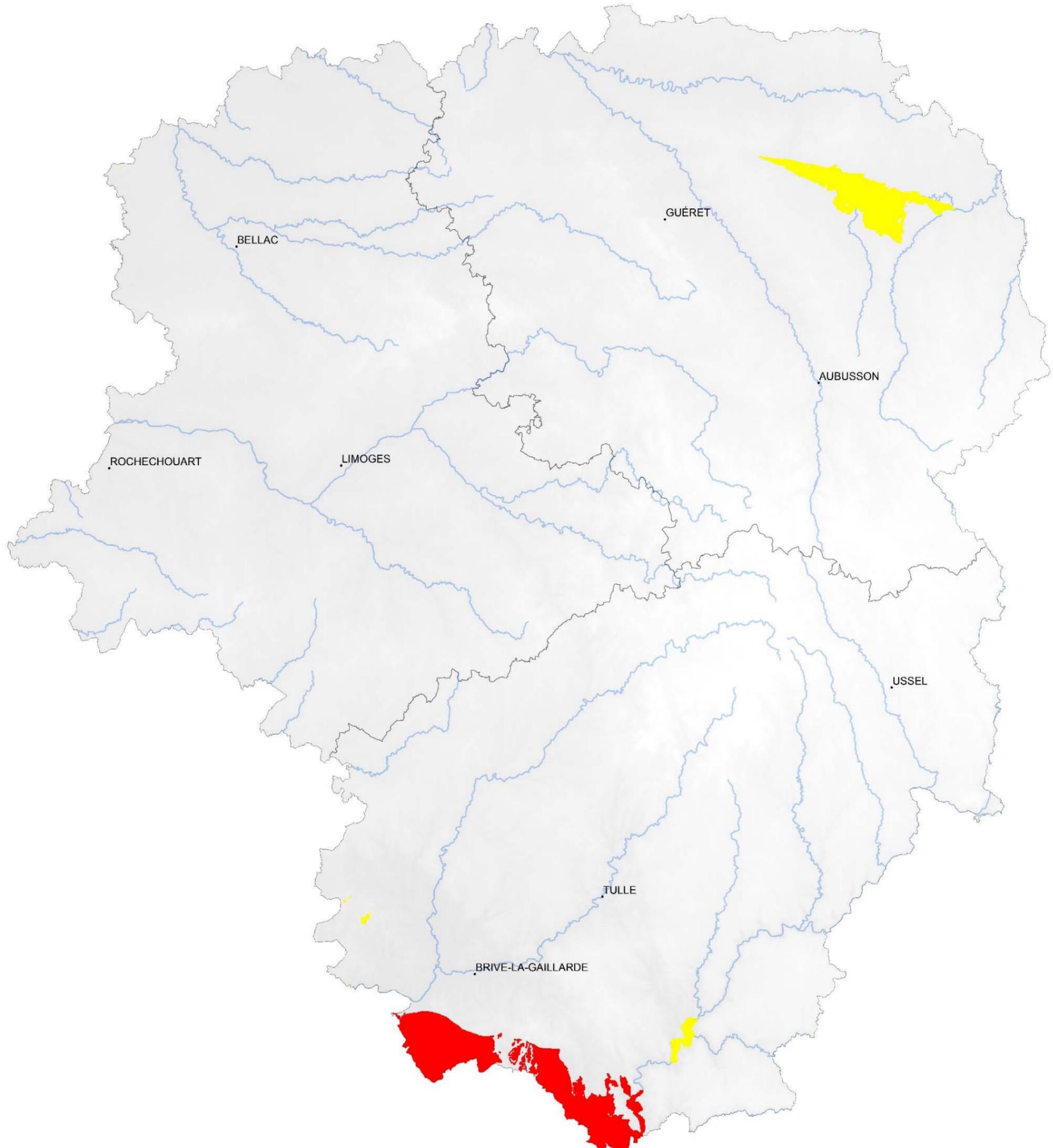
Légende

- 0, aléa nul : pas d'aquifère artésien
- 1, aléa faible : artésianisme potentiel en période hivernale



Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères »



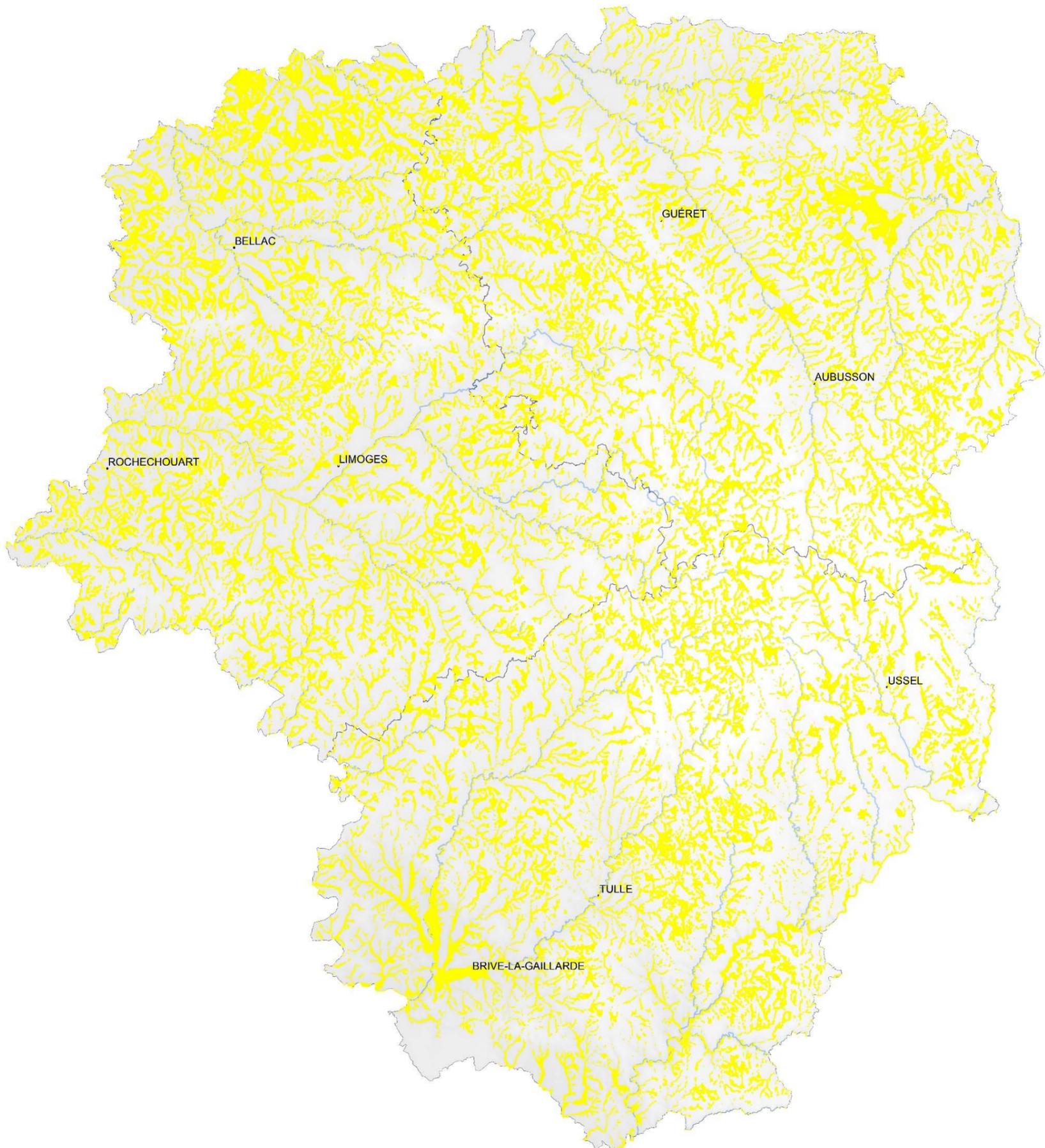
Légende

- 0, aléa nul
- 1, aléa faible : présence de nappes superposées au sein d'un seul aquifère
- 4, aléa moyen : présence de nappes superposées au sein de plusieurs aquifères



Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa « Inondation par remontée de nappe »



Légende

- 0, aléa nul
- 1, aléa faible : présence d'un aquifère où un niveau piézométrique a déjà été observé entre 0 et 5 mètres sous la surface du sol en hautes eaux



Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa final pour les échangeurs géothermiques ouverts

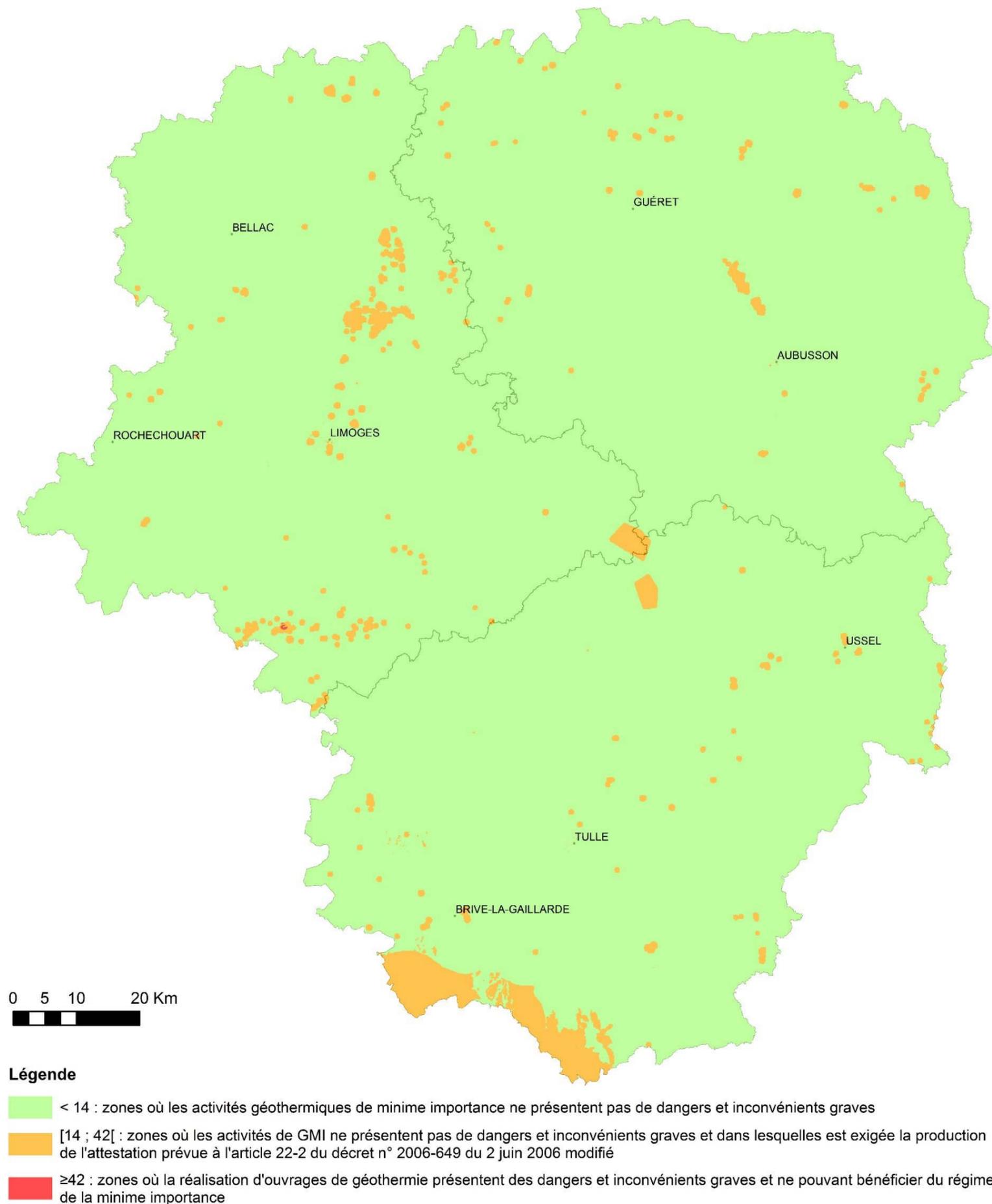


Légende

- < 14 : zones où les activités géothermiques de minime importance ne présentent pas de dangers et inconvénients graves
- [14 ; 42] : zones où les activités de GMI ne présentent pas de dangers et inconvénients graves et dans lesquelles est exigée la production de l'attestation prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié

Cartographie des zonages réglementaires liés à la Géothermie de Minime Importance sur le Limousin

Aléa final pour les sondes géothermiques verticales





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