



Cartographie des zonages réglementaires de géothermie de minime importance vis-à-vis des risques géologiques et compléments à l'atlas du potentiel géothermique de l'Aquitaine

Rapport final

BRGM/RP-67708-FR

Mars 2018



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Cartographie des zonages réglementaires de géothermie de minime importance vis-à-vis des risques géologiques et compléments à l'atlas du potentiel géothermique de l'Aquitaine

Rapport final

BRGM/RP-67708-FR

Mars 2018

Étude réalisée dans le cadre du projet de Service public du BRGM PSP14AQI30

J. Barrière, B. Ayache, P. Bourbon, P. Corbier

Vérificateur :

Nom : P. DURST

Fonction :

Date : 02/03/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : N. PEDRON

Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine

Date : 02/03/2018

Signature :



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

Mots-clés :

Géothermie, carte aléa, potentiel géothermique, Aquitaine, Dordogne, Gironde, Landes, Lot-et-Garonne, Pyrénées-Atlantiques.

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

Barrière J., Ayache B., Compère F., Corbier P. (2018) - Cartographie des zonages réglementaires de géothermie de minime importance vis-à-vis des risques géologiques et compléments à l'atlas du potentiel géothermique de l'Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-67708-FR, 80 p., 34 ill., 5 tabl.

Synthèse

Consécutivement à l'évolution de la réglementation sur la géothermie de minime importance en 2015, et à l'entrée en vigueur des cartes réglementaires nationales, la Direction régionale du BRGM Aquitaine (maintenant direction Nouvelle-Aquitaine) a procédé à la déclinaison de ces cartes à une échelle affinée sur la région Aquitaine. Cette déclinaison, prévue par la réglementation, a fait l'objet d'un financement par l'Ademe, le Conseil Régional, la DGPR et le BRGM. Elle visait une meilleure prise en compte des spécificités régionales et permettait de décliner les contraintes selon trois gammes de profondeur d'investigation : 0-50°m, 0-100 m, 0-200 m.

Conformément au guide méthodologique, neuf types d'aléas ont été évalués sur l'emprise de l'ancienne région Aquitaine. Pour chacun d'eux, les bases de données nationales ont été complétées par une valorisation des données locales et/ou une sollicitation et une concertation des services de l'Etat :

- affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques : prise en compte de la bibliographie disponible sur la géométrie des diapirs au sud du Bassin aquitain, intégration des zones connues d'exploitation sur la région, individualisation des formations potentiellement concernées par le géologue régional ;
- affaissement / effondrement, lié aux cavités (hors mines) : intégration des cartographies des aléas liées aux PPRN, prise en compte des bases de données locales sur les dolines, intégration des plans relatifs aux carrières et aux réseaux karstiques, individualisation des formations potentiellement karstifiées à dire d'expert ;
- affaissement / effondrement lié aux cavités minières : intégration des études d'aléas fournies par la DREAL, mise à jour des recensements des sites miniers au regard des modalités d'exploitation connues ; concertation avec la DREAL sur la fiabilité des données et l'incertitude associée, permettant l'application d'une zone tampon appropriée autour des sites ;
- glissement de terrain : intégration des cartographies d'aléas issues des PPRN approuvés et des données de sites miniers et de carrières, prise en compte des glissements de terrain ayant fait l'objet d'expertises spécifiques ;
- pollution des sols et des nappes souterraines : déclinaison des aléas en fonction des polluants potentiels ;
- artésianisme potentiel : prise en compte des travaux de modélisation récents, notamment sur le Modèle Nord-Aquitain ;
- mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères : prise en compte des travaux de modélisation récents, notamment sur le Modèle Nord-Aquitain ;
- remontée de nappe : prise en compte des travaux de modélisation et des cartes piézométriques de référence sur l'ensemble du triangle landais, secteur sur lequel cet aléa est particulièrement prégnant ;
- biseau salé : intégration des zones à risques identifiées dans le cadre du SAGE Nappes Profondes de Gironde ; recherche de données locales sur la façade littorale, amenant au constat de la non-pertinence de l'affectation d'un aléa significatif.

Au-delà de cette redéfinition des contours pour chacun de ces aléas, l'adaptation de zones tampons adaptées à l'état des connaissances et à leur fiabilité a fait l'objet d'un important travail de concertation en comité de pilotage et avec les services de l'Etat concernés.

Sur cette base, les facteurs de pondération et les facteurs aggravants ont été appliqués à chacun des aléas conformément à la méthodologie homogénéisée au niveau national, pour aboutir aux cartes définitives, par classes de profondeur et par filière (systèmes ouverts "sur nappe" et systèmes fermés "sur sondes"). Il est à noter que cette révision induit une modification significative des zonages réglementaires, liée à la fois à la meilleure pertinence des données utilisées et à l'application des classes imposée par la méthodologie. Le déroulement de la procédure de révision des cartes réglementaires suivra ensuite l'arrêté du 25 juin 2015.

Ce projet a permis, en outre, une mise à jour de l'atlas des potentialités géothermiques sur nappes, édité en 2011 (rapport BRGM/RP-59761-FR), sur la base des connaissances récentes acquises sur les nappes alluviales de l'Adour, de la Garonne et de la Dordogne, ainsi que sur les calcaires à astéries de l'Oligocène dans l'Entre-Deux-Mers. Les données quantitatives notamment permettront de prendre en compte ces aquifères dans de potentiels projets de géothermie très basse énergie, pour lesquels ils peuvent présenter un intérêt significatif.

Sommaire

1. Contexte	9
1.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI).....	9
1.1.1. Échangeur géothermique fermé.....	9
1.1.2. Échangeur géothermique ouvert.....	10
1.1.3. Contexte réglementaire de la géothermie de minime importance.....	11
1.2. CONTEXTE LOCAL - OBJECTIFS.....	12
2. Contexte géologique et hydrogéologique	15
2.1. GENERALITES ET GEODYNAMIQUE	15
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	17
2.2.1. Réservoirs du Plio-Quaternaire.....	17
2.2.2. Réservoirs tertiaires.....	18
3. Potentiels géothermiques d'aquifères superficiels	19
3.1. PRINCIPE GENERAL DE CONCEPTION.....	19
3.2. AQUIFERES DES ALLUVIONS DE LA DORDOGNE, DE LA GARONNE ET DE L'ADOUR.....	20
3.2.1. Alluvions de l'Adour	20
3.2.2. Alluvions de la Garonne et de la Dordogne.....	20
3.3. AQUIFERE DES CALCAIRES A ASTERIES DE L'ENTRE-DEUX-MERS.....	21
4. Cartographie des risques liés à la géothermie de minime importance	23
4.1. PRINCIPE METHODOLOGIQUE.....	23
4.1.1. Qualification et pondération des aléas	23
4.1.2. Gammes de profondeur	24
4.1.3. Héritage de l'aléa le plus élevé depuis le niveau de profondeur reconnu vers la surface.....	24
4.2. INTEGRATION DES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES	25
4.2.1. Protection des captages d'alimentation en eau potable	25
4.2.2. Protection des eaux minérales naturelles.....	27
4.2.3. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE)	27
4.2.4. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE).....	29
4.2.5. Périmètres de protection des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux.....	30

4.3. CARTOGRAPHIE DES ALEAS LIES AUX OUVRAGES GEOTHERMAUX.....	31
4.3.1. Aléa "affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques"	31
4.3.2. Aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)"	43
4.3.3. Aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière"	49
4.3.4. Aléa "glissement de terrain"	52
4.3.5. Aléa "pollution des sols et des nappes souterraines"	56
4.3.6. Aléa "artésianisme potentiel"	58
4.3.7. Aléa "mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" ..	61
4.3.8. Aléa "remontée de nappe"	65
4.3.9. Aléa "biseau salé"	67
4.4. TRAITEMENT FINAL ET EDITION DES CARTES REGLEMENTAIRES.....	70
4.5. COHERENCE REGIONALE	73
5. Bilan.....	77
6. Bibliographie.....	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)	9
Illustration 2 : Schéma d'un doublet, puits de production et puits d'injection et échangeur en surface	10
Illustration 3 : Échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe)	11
Illustration 4 : Vue en 3D du bassin d'Aquitaine (source : BRGM, 1986).....	16
Illustration 5 : Coupe nord-sud du bassin d'Aquitaine, le long du littoral (source : Serrano et al., 2006)...	16
Illustration 6 : Principe d'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional	19
Illustration 7 : Attribution des gammes de débits aux aquifères alluviaux de la Garonne et de la Dordogne, ajoutées à l'atlas du potentiel géothermique des aquifères	21
Illustration 8 : Emprise de l'aquifère des calcaires à astéries de l'Entre-Deux-Mers ajouté à l'atlas du potentiel géothermique des aquifères.....	22
Illustration 9 : Carte paléogéographique de l'Eocène supérieur, à l'est de Bordeaux, Notice 805 p 36	34
Illustration 10 : Carte paléogéographique de l'Eocène supérieur, au sud-est de Bordeaux, Notice 854 p 36	34
Illustration 11 : Carte de l'Aquitaine représentant les formations géologiques affleurantes identifiées comme pouvant renfermer des minéralisations de type évaporitiques	37
Illustration 12 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°805 de Sainte-Foy-La-Grande	38
Illustration 13 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°829 de Duras	39
Illustration 14 : Coupe géologique dans le secteur de la carte de Thenon - (CG783 - C ₅ At).....	39
Illustration 15 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°758 de Périgueux-ouest.....	40
Illustration 16 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°758 de Périgueux-ouest.....	40

Illustration 17 : Tracé de l'emprise classée en aléa fort pour l'affaissement / surrection liés aux niveaux d'évaporites" (en rouge) sur le secteur de Dax / Saint-Pandelon, au regard de la carte géologique et des données de forages	41
Illustration 18 : Aperçu de la carte de l'aléa "affaissement/surrection lié aux niveaux évaporitiques"	42
Illustration 19 : Extrait du serveur http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines	44
Illustration 20 : Exemple de plan de réseau karstique - grotte de Lascaux	45
Illustration 21 : Recensement des cavités souterraines et des formations géologiques potentiellement karstifiées	46
Illustration 22 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)"	48
Illustration 23 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités minières"	51
Illustration 24 : PPRN et zonages des aléas pris en compte pour l'aléa "glissement de terrain"	53
Illustration 25 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "mouvements de terrain de type glissement"	55
Illustration 26 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "pollution des sols et des nappes d'eau souterraine"	57
Illustration 27 : Aperçu des cartographies de l'aléa "artésianisme potentiel"	59
Illustration 28 : Aperçu des cartographies de l'aléa "mise en communication des eaux souterraines"	63
Illustration 29 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "remontée de nappe"	66
Illustration 30 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "biseau salé"	69
Illustration 31 : Aperçu des zonages finaux pour les échangeurs ouverts	71
Illustration 32 : Aperçu des zonages finaux pour les échangeurs fermés	72
Illustration 33 : Zonages réglementaires finaux à la limite entre les ex-régions Aquitaine et Limousin pour les systèmes fermés	74
Illustration 34 : Zonages réglementaires finaux à la limite entre les ex-régions Aquitaine et Limousin pour les systèmes ouverts	75

Liste des tableaux

Tableau 1 : Formations géologiques identifiées, contenant des épaisseurs de gypse plurimétriques (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)	32
Tableau 2 : Formations géologiques susceptibles de contenir des horizons décimétriques à métriques (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)	33
Tableau 3 : Formations géologiques susceptibles de contenir des évaporites (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)	36
Tableau 4 : Facteurs de pondération et facteurs aggravants appliqués par type d'aléa	70
Tableau 5 : Taux de couverture des zonages réglementaires finaux, par filière et par gamme de profondeur	77

1. Contexte

1.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI)

La géothermie de minime importance, est une géothermie de très basse température permettant 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.

1.1.1. Échangeur géothermique fermé

Les capteurs géothermiques, corbeilles ou 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) disposées dans un forage dont l'espace annulaire est comblé par un coulis spécifique (norme NF X-10-970¹).

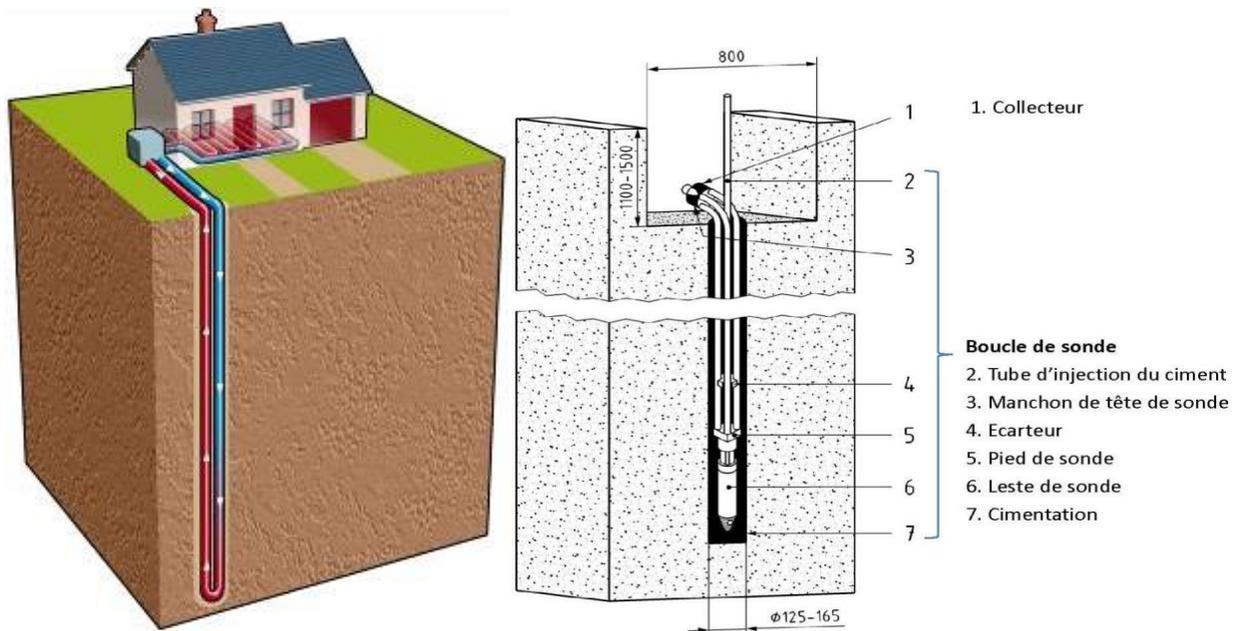


Illustration 1 : Échangeur géothermique fermé (sondes géothermiques verticales)

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

1.1.2. 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 du puits de prélèvement, circule dans un échangeur thermique en surface, passe ainsi à travers la pompe à chaleur (PAC), puis est réinjectée dans un second puits appelé « puits de réinjection ». Cet échangeur, composé d'un puits de 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 10m³/h.

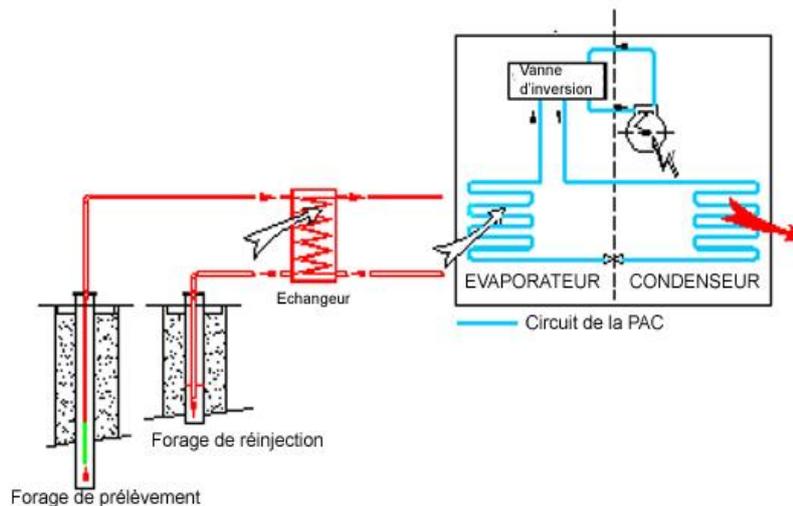


Illustration 2 : Schéma d'un doublet, puits de production et puits d'injection et échangeur en surface

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.

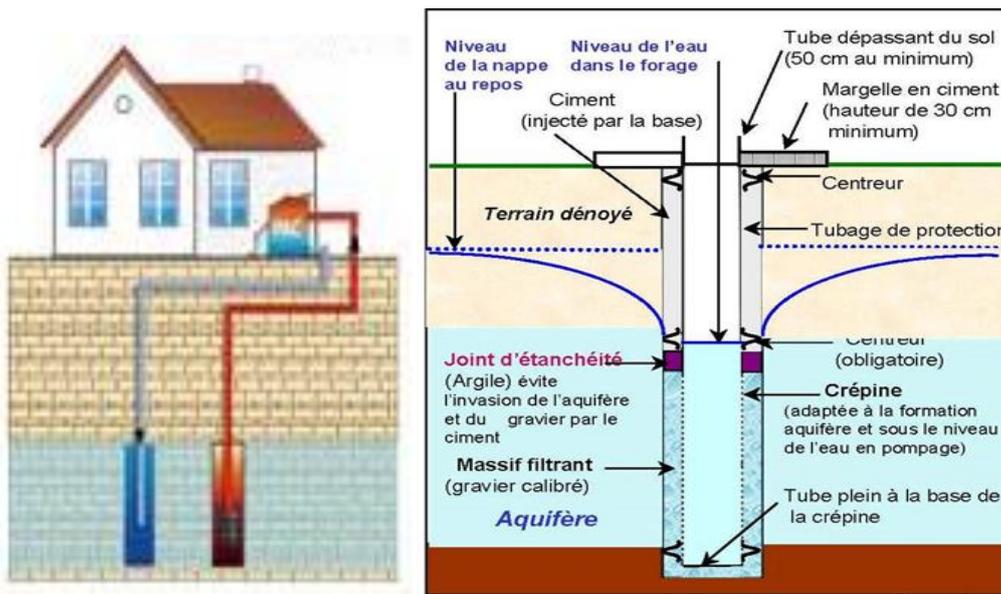


Illustration 3 : Échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe)

1.1.3. Contexte réglementaire de la géothermie de minime importance

Le décret n°78-498 du 28 mars 1978 (modifié par le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015) relatif aux titres de recherche et d'exploitation de géothermie définit les gîtes géothermiques à basse température relevant du régime de « minime importance » comme suit :

- pour les activités ne recourant qu'à des échangeurs fermés :
 - profondeur de forage inférieure à 200 m,
 - puissance thermique maximale échangée avec le sous-sol inférieure à 500 kW ;
- pour les activités recourant au moins à un échangeur géothermique ouvert :
 - température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement inférieure à 25°C,
 - profondeur de forage inférieure à 200 m,
 - puissance thermique maximale échangée avec le sous-sol inférieure à 500 kW,
 - eaux prélevées réinjectées dans le même aquifère (bilan quantitatif nul),
 - débits prélevés / réinjectés inférieurs au seuil d'autorisation (rubrique 5.1.1.0 de l'article R.214-1 du Code de l'Environnement).

L'ouverture de travaux d'exploitation des gîtes relevant du régime de la minime importance bénéficie d'un régime réglementaire déclaratoire, simplifié par rapport aux autres gîtes géothermiques. La procédure, définie par le décret n°2006-649 du 2 juillet 2006 modifié, dépendra des dangers et inconvénients potentiels associés au site d'exploitation. A cette fin, un outil décisionnel cartographique a été mis en place à l'échelle nationale sur le site <http://www.geothermieperspectives.fr/>.

La cartographie des zones de contraintes et la construction de cet outil sont basés sur les guides méthodologiques suivants :

- Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines - Synthèse bibliographique - ADEME, ONEMA, BRGM (Bézègues-Courtade et al., 2012) ;
- Méthodologie d'une cartographie des contraintes et des risques géologiques liés aux forages géothermiques de minime importance - Rapport BRGM/RP-61768-FR (Herbaux et al., 2013) ;
- Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance - Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, ADEME, BRGM, CEREMA (Herbaux et al., 2015).

Cette carte initiale est en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2015, avec un zonage par mailles de 500 m. Il est prévu dans un second temps de réviser cette carte, à échelle régionale, afin d'apporter une meilleure précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes.

Il est en outre à noter que d'autres contraintes réglementaires, liées à des dispositifs de protection, peuvent s'imposer à ces installations :

- les Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE),
- la nomenclature « Loi sur l'Eau » (Code de l'Environnement) et les Zones de Répartition des Eaux (ZRE),
- les périmètres de protection des captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP),
- les périmètres sanitaires d'émergence et les éventuels périmètres de protection des sources d'eau minérale naturelle,
- les stockages souterrains de gaz.

1.2. CONTEXTE LOCAL - OBJECTIFS

Un atlas du potentiel géothermique des aquifères d'Aquitaine a été développé par le BRGM avec le partenariat financier de l'ADEME, la région Aquitaine et le FEDER (rapport BRGM/RP-59761-FR, Durst et al., 2011). Depuis 2011, il est en ligne sur le site internet <http://www.geothermieperspectives.fr/>. Principalement destiné aux installations de géothermie sur nappe, il n'inclut pas de notion de potentiel concernant les sondes géothermiques verticales. Cet atlas intègre l'ensemble des aquifères présents dans les modèles hydrodynamiques (modèle géologique du Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc, Modèle Nord-Aquitain (MONA) et Modèle Sud Adour Garonne (MSAG)). Afin de pouvoir mieux répondre aux besoins d'informations, notamment en matière de géothermie très basse énergie, il apparaît pertinent de compléter la carte de potentialité afférente, en y ajoutant d'autres aquifères superficiels disposant d'un potentiel reconnu et pour lesquels les données disponibles sont aujourd'hui suffisantes et permettent de l'évaluer. Une première phase du projet consistait donc en une évaluation des potentiels géothermiques de ces formations : alluvions de la Dordogne, de la Garonne et de l'Adour, ainsi que la nappe des calcaires à astéries de l'Oligocène de l'Entre-Deux-Mers.

Par ailleurs, il apparaît judicieux de développer une offre d'informations accessibles relatives aux risques géologiques, naturels, de pollution, hydrogéologiques identifiés sur les 200 premiers mètres du sous-sol, pouvant créer des désordres et de ce fait limiter l'implantation des échangeurs géothermiques (qu'ils soient ouverts ou fermés). En effet, le recours à la géothermie de minime importance à usage domestique comme source alternative d'énergie est en forte progression ces dernières années. En particulier, le secteur des sondes géothermiques verticales

s'est rapidement développé en Aquitaine, en lien avec diverses incitations réglementaires en vigueur.

L'exploitation énergétique des formations géologiques superficielles est susceptible d'avoir des conséquences sur le milieu naturel, sur les eaux souterraines et sur la structure des terrains. 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. Sur la base des documents-guides disponibles, la seconde phase du projet consistait donc en une évaluation des risques géologiques associés à la géothermie de minime importance, sur le territoire régional. La finalité est la révision de la carte réglementaire nationale à une échelle affinée, pour une meilleure prise en compte des spécificités locales.

2. Contexte géologique et hydrogéologique

2.1. GENERALITES ET GEODYNAMIQUE

Le bassin d'Aquitaine, qui comprend actuellement la majorité de la Région Aquitaine, est un bassin péri-atlantique sur croûte continentale qui a fonctionné du Permien (275 millions d'années -Ma- env.) à nos jours. Il est ouvert sur le golfe de Gascogne où il se prolonge par un large plateau continental. Intensément étudié par les compagnies pétrolières, ce bassin a fait l'objet de plusieurs synthèses (BRGM, ELF-Re, ESSO-Rep et SNPA, 1974 ; Curnelle et Dubois, 1986 ; Serrano et al., 2006).

Les bordures actuelles du bassin, qui ne traduisent pas ses limites au cours des temps géologiques, sont très différentes. Au nord et à l'est, il s'appuie sur le socle du Massif Armoricain et du Massif Central, structurés durant l'ère Paléozoïque (ou Primaire). A l'ouest, sa limite date du Crétacé inférieur, pour le Golfe de Gascogne et au sud, sa bordure actuelle est constituée par la chaîne des Pyrénées, dont les phases orogéniques beaucoup plus jeunes datent du milieu du Tertiaire.

Massif Central et Massif Armoricain sont les restes des puissants reliefs montagneux qui couvraient une partie de l'Europe, un peu avant la fin du Paléozoïque. Ces terrains paléozoïques sont hérités de gigantesques soulèvements montagneux (orogénèses anciennes), dont le plus récent s'est produit pendant la phase varisque (hercynienne), au cours du Carbonifère, il y a plus de 300 Ma. Encore visibles aujourd'hui dans ces massifs périphériques, ils sont maintenant recouverts par les sédiments du bassin dont ils forment le soubassement (Illustration 4).

C'est l'enfoncement (subsidence) de ce soubassement, particulièrement actif pendant une partie des ères Mésozoïque - ou Secondaire, et Cénozoïque - ou Tertiaire (Brunet, 1984), qui a permis aux sédiments alimentés par l'altération et l'érosion des reliefs de bordure de s'accumuler et de se conserver dans le bassin. La distribution actuelle de ces sédiments, aujourd'hui transformés en roches (ou terrains et formations géologiques), de plus en plus récents en allant du Massif Central à la région landaise, atteste de la distinction au cours des temps géologiques d'un domaine septentrional de plate-forme, relativement stable et faiblement subsident, et d'un domaine méridional très fortement subsident.

Ainsi la puissance totale des formations sédimentaires (depuis le Permo-Trias jusqu'au Quaternaire) s'accroît de 1 000 m environ en Dordogne et en Lot-et-Garonne, pour atteindre 2 000 m sous la Gironde, 3 000 à 4 000 m sous les Landes et dépasse 8 000, voire localement 10 000 m au pied de la chaîne pyrénéenne.

Le bassin enregistre depuis le Trias les mouvements relatifs des plaques Ibérie et Eurasie et son évolution est fortement contrôlée par les structures héritées de l'histoire hercynienne.

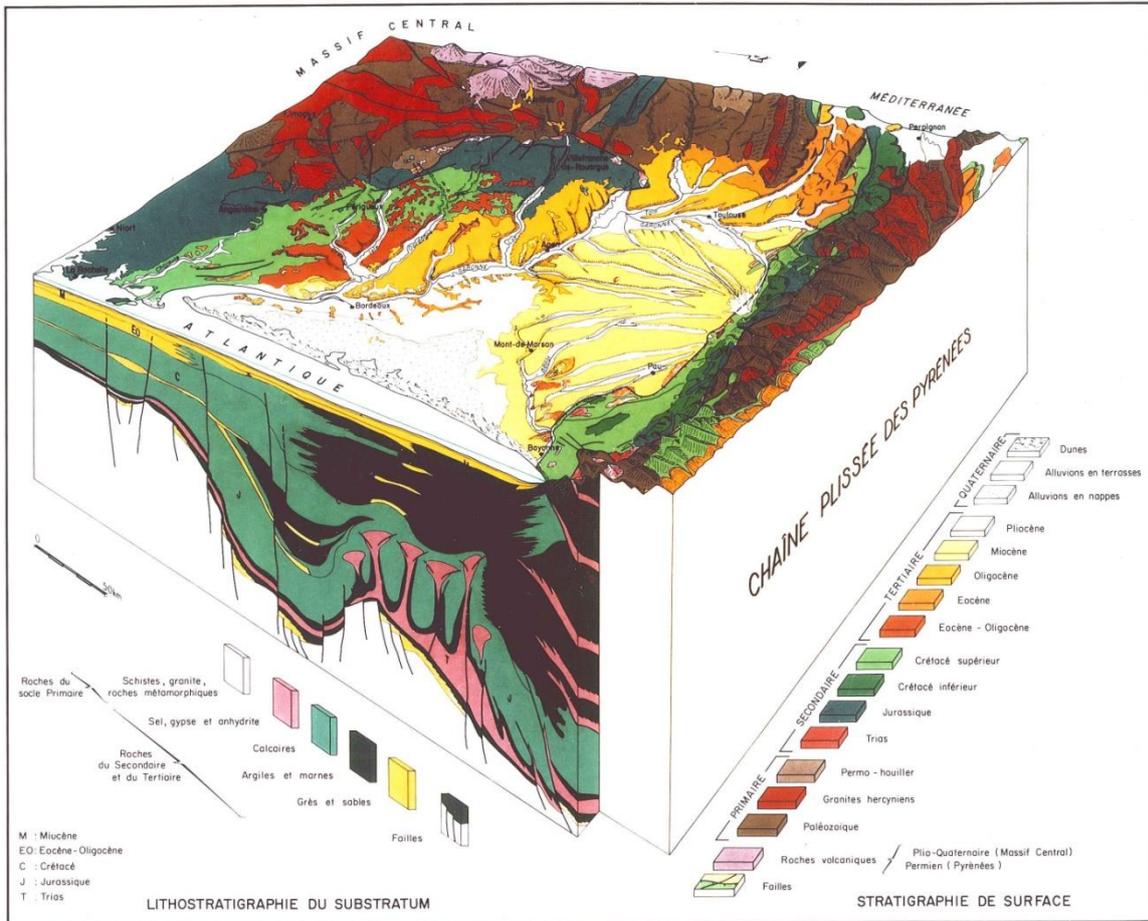


Illustration 4 : Vue en 3D du bassin d'Aquitaine (source : BRGM, 1986)

Il est assujéti à l'évolution successive de deux domaines océaniques, Téthys et Océan Atlantique, et a évolué globalement d'un stade extensif (Trias au Crétacé inférieur) à un stade compressif (Crétacé supérieur au Tertiaire). L'histoire du bassin a été une suite de tentatives de rifting, dans le contexte de l'ouverture progressive du golfe de Gascogne.

Ce sont les contrecoups de la distension qui s'installe au Permien dans le substratum paléozoïque, qui vont induire les premières structures subsidentes où sont piégés les dépôts évaporitiques du Trias.

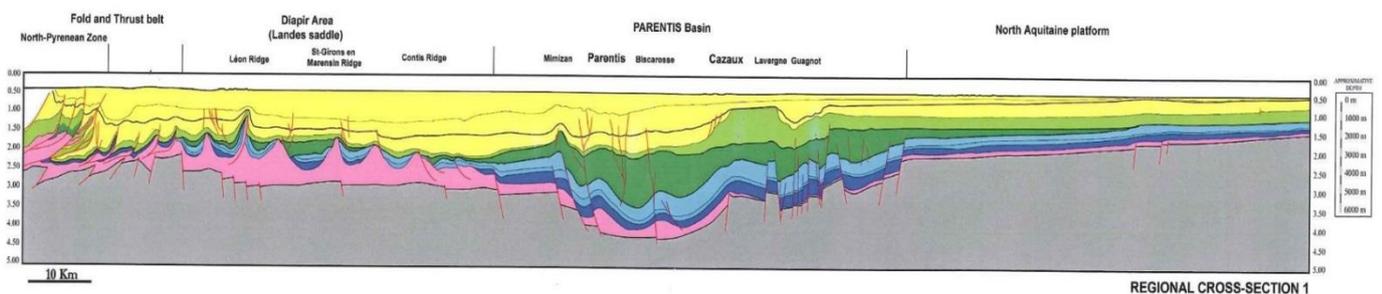


Illustration 5 : Coupe nord-sud du bassin d'Aquitaine, le long du littoral (source : Serrano et al., 2006)

La progression vers le nord de l'ouverture de l'Atlantique, à partir de l'Atlantique central, est d'abord responsable de l'orientation nord-sud des domaines sédimentaires marins, lors de la première grande transgression marine au Jurassique qui dépose des formations sédimentaires à dominante carbonatée.

En atteignant le golfe de Gascogne, au Crétacé inférieur, l'ouverture océanique provoque la rotation du bloc ibérique vers l'est le long d'un réseau de failles parallèles aux futures Pyrénées ("faille nord-pyrénéenne", de direction dominante est-ouest). A partir de ce moment et jusqu'aux ultimes phases post-orogéniques pyrénéennes de l'Oligocène, cette nouvelle direction est-ouest gouverne de plus en plus l'histoire du domaine méridional aquitain (subsidence des grandes fosses et siège du diapirisme des masses salifères du Trias, Illustration 5).

C'est au cours du Crétacé supérieur, alors que l'Atlantique nord est en pleine ouverture, que se produit la deuxième et dernière grande transgression marine dans le bassin, contemporaine d'une élévation du niveau des mers à l'échelle mondiale (eustatisme).

Avec le Tertiaire, alors que se structurent, surgissent puis s'érodent les Pyrénées, commence une longue période globalement régressive de la mer ; la continentalisation du bassin va progresser et s'achever pour l'essentiel au début du Quaternaire par le comblement définitif de la dépression landaise.

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les aquifères identifiés sur le territoire d'étude ont fait l'objet de descriptions détaillées dans le rapport BRGM/RP-59761-FR relatif à l'atlas des ressources géothermiques en Aquitaine (Durst et al., 2011). Seul un bref descriptif des réservoirs qui ont fait l'objet d'un complément dans le cadre du présent projet (cf. 3.) est donné ci-dessous.

2.2.1. Réservoirs du Plio-Quaternaire

En Aquitaine, le Pliocène inférieur à moyen (Brunssumien à Reuvérien) est marqué par une régression marine. Le triangle landais-médocain se comble ensuite progressivement selon un mouvement en éventail balayant l'ouest, puis le nord-ouest de la région nord-aquitaine.

Il en résulte un comblement par des matériaux détritiques sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, marqué par de fortes variations latérales de faciès (alternances de graviers, sables et argiles). Le Quaternaire affleurant est essentiellement représenté par la formation dite du Sable des Landes et la formation de Castets. Il s'agit d'un revêtement superficiel éolien et hydro-éolien très étendu et relativement homogène, qui marque la fin du comblement du Bassin aquitain. Deux autres faciès appartenant aux épisodes quaternaires sont remarquables :

- les accumulations éoliennes détritiques sableuses holocènes : elles constituent, à l'ouest, un cordon dunaire côtier d'environ 6 km de large ;
- les alluvions récentes constituées de dépôts détritiques (sables et argiles silteuses grises) : elles représentent l'ultime comblement des chenaux creusés lors de la dernière phase glaciaire wurmienne.

L'aquifère du Plio-Quaternaire est constitué à la faveur de la perméabilité d'interstices dans les horizons sableux et graveleux de ces remplissages hétérogènes. Il constitue un réservoir régional, fortement vulnérable, en liaison hydraulique avec le réseau hydrographique, et exploité essentiellement pour des besoins agricoles.

2.2.2. Réservoirs tertiaires

Ces réservoirs sont en majorité constitués par des formations silicoclastiques, notamment dans le nord du bassin, plus proche des apports détritiques en provenance des massifs paléozoïques. Leurs puissances sont généralement très variables et les changements de faciès y sont fréquents et parfois rapides, car les transgressions et régressions se sont succédées fréquemment. La mer ouverte correspondait à l'océan atlantique actuel et en s'éloignant du domaine margino-littoral, toujours situé à l'est, des formations calcaires de plate-forme proximale à moyenne se développent. Plus au sud-ouest, en bordure de la côte actuelle, les réservoirs disparaissent plus ou moins rapidement dans des marnes imperméables de faciès de bassin semi-profond.

Les principaux réservoirs sont, par profondeur croissante :

- les grès et sables du Miocène moyen (Langhien-Serravallien), "aquifère de l'Helvétien", qui n'existent qu'à l'ouest de la Garonne ;
- les grès coquilliers et grès calcaires du Miocène inférieur (Aquitaniens-Burdigaliens), qui correspondent en particulier aux faluns de Saucats et de Léognan ;
- les calcaires bioclastiques et grès de l'Oligocène (formation du calcaire à astéries principalement), bien développé dans l'Entre-Deux-Mers, le Bourgeais et le Bordelais ;
- les calcaires, grès et sables de l'Eocène inférieur à moyen, et plus rarement supérieur ;
- les calcaires, dolomies, grès et sables du Paléocène, existant seulement dans le sud du bassin.

Ces réservoirs sont souvent des multicouches qui sont localement subdivisés en "sous-réservoirs".

3. Potentiels géothermiques d'aquifères superficiels

3.1. PRINCIPE GENERAL DE CONCEPTION

L'atlas du potentiel géothermique des aquifères a été réalisé et mis à disposition en 2011 (Durst et al., 2011). La méthodologie détaillée est décrite dans le rapport correspondant BRGM/RP-59761-FR.

Le principe général de conception de l'atlas repose sur une méthode de cartographie à index avec pondération de critères. Cette méthode est basée sur la combinaison pondérée de cartes de paramètres (dites cartes unicritères) intervenant dans l'évaluation d'une propriété régionale (ici, le potentiel géothermique des aquifères).

Cette méthode permet la prise en compte relative de chaque critère influençant le potentiel général d'un aquifère. La difficulté lors de sa mise en œuvre réside essentiellement dans le choix des critères, leur notation et le poids qu'on leur attribue.

La cartographie et la combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement cartographique (SIG) ; les données sont traitées sous forme de polygones correspondant aux contours des aquifères issus de la BD Lisa (référentiel hydrogéologique français dans sa version 2), puis intégrées dans une grille avec des mailles de 500 m de côté. Toutes les cartes produites sont géo-référencées.

L'illustration 6 synthétise la méthodologie de cartographie du potentiel géothermique régional appliquée.

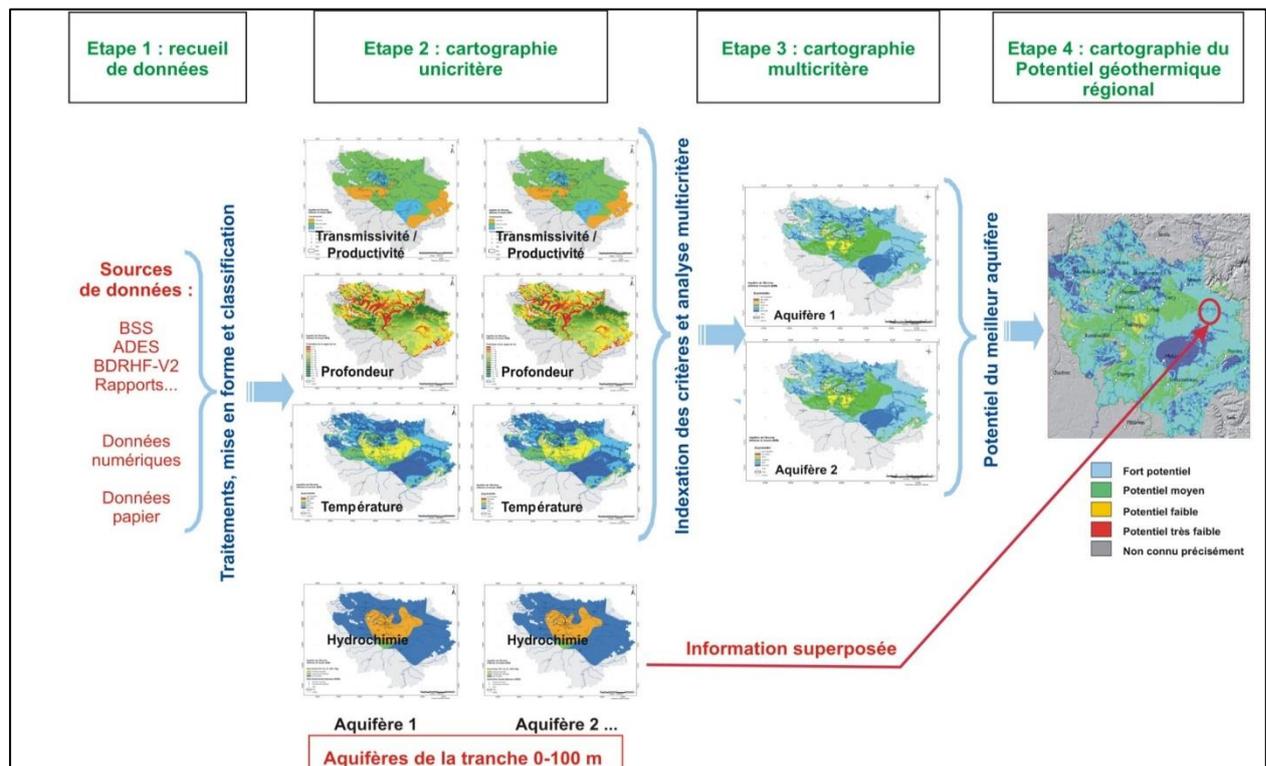


Illustration 6 : Principe d'élaboration des cartes du potentiel géothermique régional

A l'occasion du présent projet, certains aquifères qui étaient peu ou pas renseignés en 2011 (du fait d'un déficit de connaissances) ont fait l'objet d'amendements. Ceux-ci portaient sur les débits potentiels, qui constituent un des trois critères majeurs d'appréciation du potentiel et ont donc généré une mise à jour de l'atlas du meilleur aquifère. Les aquifères concernés sont listés ci-dessous.

3.2. AQUIFERES DES ALLUVIONS DE LA DORDOGNE, DE LA GARONNE ET DE L'ADOUR

La difficulté majeure dans l'intégration des aquifères alluviaux, pour l'atlas considéré, est la prise en compte des variations latérales de faciès inhérentes aux dépôts chenalisés : les débits exploitables peuvent être extrêmement fluctuants dans un même secteur, en fonction de l'implantation des forages et des formations traversées. Afin d'intégrer ces incertitudes, propres à ces formations géologiques, les débits exploitables ont été volontairement minimisés par rapport aux maxima connus.

3.2.1. Alluvions de l'Adour

Les premières synthèses BRGM (1975) sur les ressources en eau souterraine du bassin de l'Adour faisaient état d'une bonne perméabilité des alluvions de l'Adour, sauf dans la basse vallée, entre Dax et la zone littorale. Ceci a été confirmé par les études ultérieures ; seules les alluvions à l'amont de Dax ont par conséquent été considérés.

Une modélisation a été conduite par Burgeap, depuis l'amont de Tarbes (Momères) jusqu'à l'aval immédiat de Dax (Angoumé). Les calages faisaient état de conductivités hydrauliques variées, de 0,00026 à 0,0021 m/s. Les débits exploités dans les principaux captages dépassent significativement 50 m³/h. Au vu de ces constats et conformément à la méthodologie fixée pour l'atlas, un débit potentiel de 50 à 100 m³/h a été affecté à l'ensemble de l'entité.

3.2.2. Alluvions de la Garonne et de la Dordogne

Elles correspondent aux entités hydrogéologiques 942AA et 946AA.

Une synthèse détaillée sur les alluvions de la Garonne, dans le département du Lot-et-Garonne (Pedron et al., 2003), fait état de transmissivités comprises entre 2×10^{-3} et 5×10^{-2} m²/s pour la basse terrasse, et entre 3×10^{-2} et 8×10^{-2} m²/s pour la moyenne terrasse. Localement, les débits exploités peuvent aller jusqu'à 100, voire 150 m³/h. Il apparaît que les transmissivités restent élevées, plus en aval jusqu'à Langon. Au-delà, la nappe alluviale est moins significativement exploitée, notamment sous les dépôts flandriens, et les données sont plus éparées ; quelques ouvrages font état de productivités de plusieurs dizaines de m³/h. Conformément à ces constats, les débits exploitables suivants ont été attribués aux alluvions de la Garonne :

- 50 à 100 m³/h à l'amont de Langon ;
- 10 à 50 m³/h à l'aval de Langon.

Une synthèse détaillée sur les alluvions de la Dordogne (Saplaïroles et al., 2005) fait état d'une épaisseur majoritairement comprise entre 4 et 8 m, mais inférieure à 5 m à l'amont de Lalinde. Les perméabilités sont de 5×10^{-3} à 10^{-5} m/s ; les transmissivités comprises entre 1×10^{-2} et 1×10^{-4} . Les données sur les paramètres hydrodynamiques sont très éparées et ne permettent pas une vision complète des débits potentiellement exploitables. Dans les secteurs les plus favorables, notamment à l'aval de Lalinde, ceux-ci peuvent atteindre, voire dépasser, 50 m³/h. Les débits exploitables suivants ont été attribués aux alluvions de la Dordogne :

- 5 à 10 m³/h à l'amont de Lalinde ;
- 10 à 50 m³/h à l'aval de Lalinde.

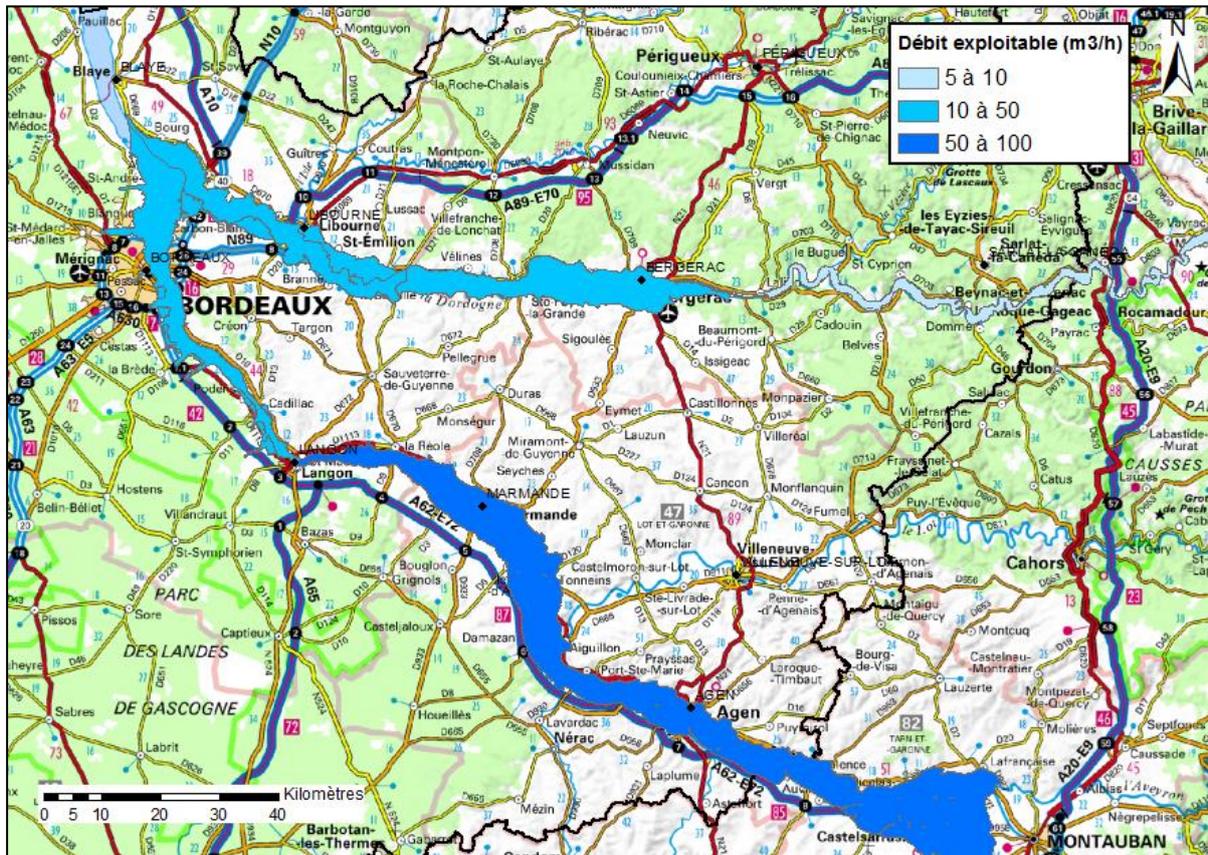


Illustration 7 : Attribution des gammes de débits aux aquifères alluviaux de la Garonne et de la Dordogne, ajoutées à l'atlas du potentiel géothermique des aquifères

3.3. AQUIFERE DES CALCAIRES A ASTERIES DE L'ENTRE-DEUX-MERS

Il correspond à l'entité hydrogéologique BD Lisa 324AA03 (calcaires à astéries de l'Oligocène de l'Entre-Deux-Mers, du Bourgeois et du Libournais).

Un bilan hydrologique a été effectué sur cet aquifère, dans le cadre du projet portant sur les zones à enjeu aval du SAGE Nappes Profondes de Gironde (Cabaret et al., 2016). Pour cela, un état des lieux des prélèvements a été établi. Il apparaît de fortes disparités dans les volumes et débits prélevés, mais sans organisation géographique établie. Les débits exploités sont contraints d'une part par les usages, et d'autre part par l'aléa géologique associé à la karstification.

Au vu des retours d'expérience récoltés, un débit exploitable de 10 à 50 m³/h a été affecté à l'ensemble de l'entité (Illustration 8).

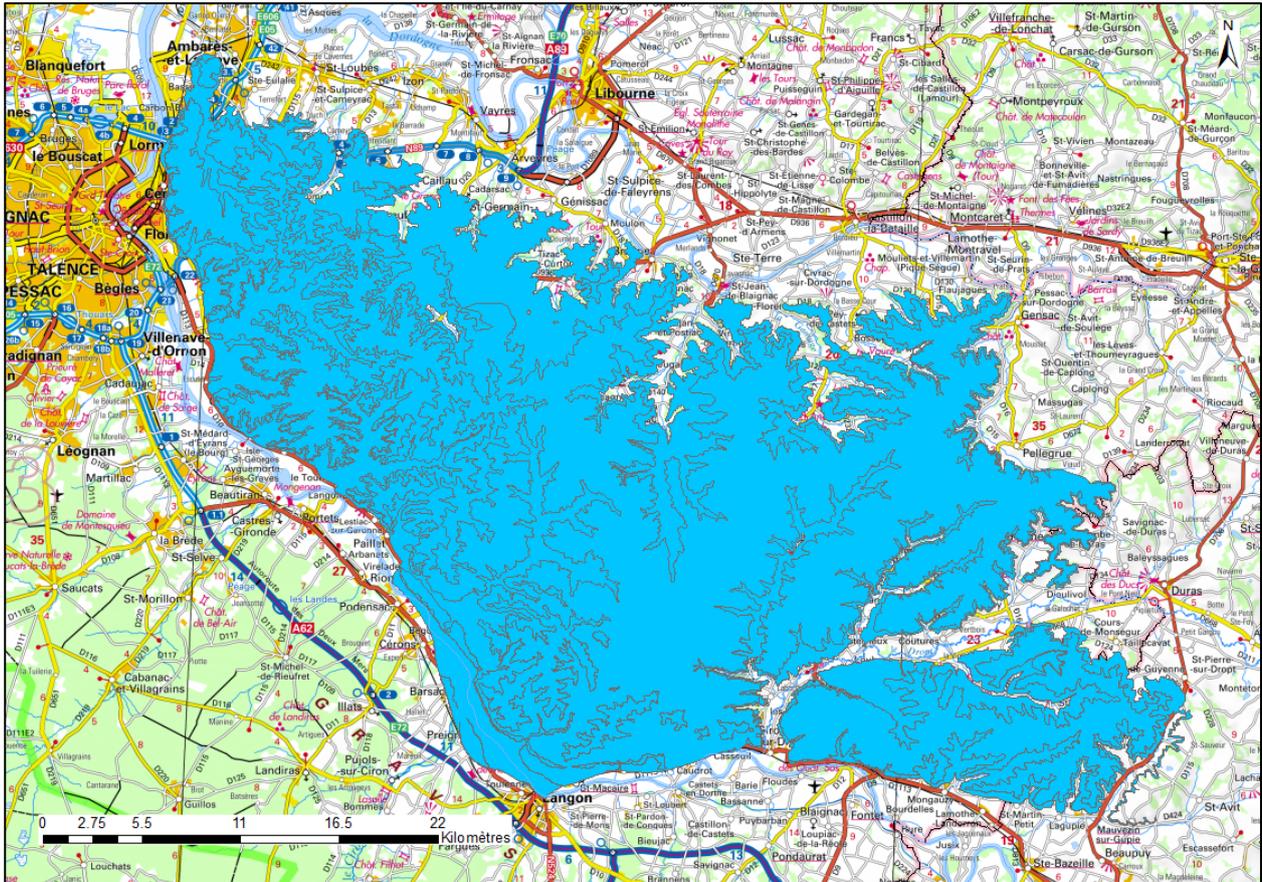


Illustration 8 : Emprise de l'aquifère des calcaires à astéries de l'Entre-Deux-Mers ajouté à l'atlas du potentiel géothermique des aquifères

4. Cartographie des risques liés à la géothermie de minime importance

4.1. PRINCIPE METHODOLOGIQUE

4.1.1. Qualification et pondération des aléas

La méthodologie appliquée se conforme à celle développée et présentée dans le rapport BRGM/RP-61768-FR (Herbaux et al., 2013) et dans le Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (Herbaux et al., 2015).

La cartographie des risques liés à la géothermie de minime importance est basée sur une analyse multicritère et sur la réalisation de cartes à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Chacun des aléas identifiés, ainsi que les contraintes réglementaires, sont représentés par une couche spécifique. La grille de base, servant à l'ensemble des cartographies, est celle de l'atlas aquitain des potentialités géothermiques.

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 (cf. 4.1.2). Pour chaque aléa :

- le phénomène redouté est décrit et affecté 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 Aquitaine présente une très forte hétérogénéité géologique et hydrogéologique, avec des contextes fortement variés. Pour une meilleure cohérence, cette diversité du sous-sol impose certaines adaptations par rapport aux documents-guides (cf. 1.2).

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

- Aléa faible - **zone verte** : zone qui nécessite uniquement l'intervention d'un foreur qualifié ;
- Aléa moyen - **zone orange** : zone qui nécessite l'avis préalable d'un expert qualifié, puis l'intervention d'un foreur qualifié ;
- Aléa fort - **zone rouge** : zone où la réglementation relative à la minime importance n'est pas applicable.

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, stockages de gaz, etc... décrites au chapitre 4.2.

4.1.2. Gammes de profondeur

La méthodologie générale préconise la réalisation de cartes selon trois gammes de profondeur pour chaque type d'échangeur :

- de 10 à 50 m,
- de 10 à 100 m,
- de 10 à 200 m.

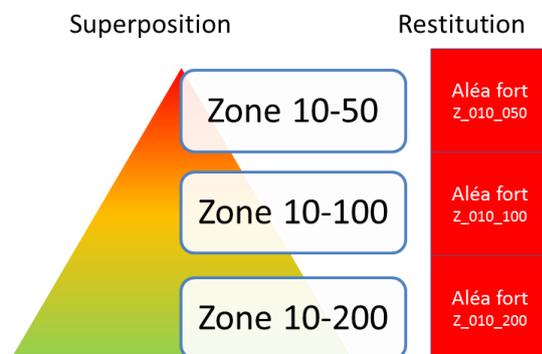
Cette déclinaison par gammes de profondeurs est particulièrement pertinente en domaine sédimentaire. Elle se justifie pleinement dans le Bassin aquitain, pour appréhender au plus près l'hétérogénéité des successions lithologiques.

Cela aboutira à la réalisation de six cartes distinctes sur le territoire.

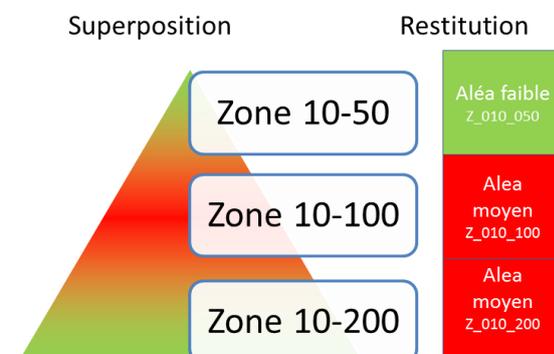
4.1.3. Héritage de l'aléa le plus élevé depuis le niveau de profondeur reconnu vers la surface

Ce classement en zones verte, orange ou rouge est effectué pour les trois niveaux de profondeur 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 à 50 mètres 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 10-100 mètres et 10-200 mètres, 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 :

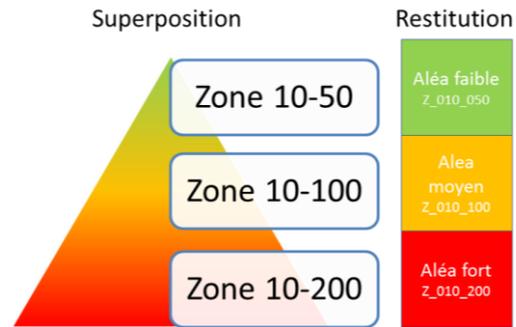
Si l'aléa de la zone 10-50 mètres est supérieur aux aléas des zones suivantes, alors il s'impose aux zones plus profondes et les cartes d'aléas sont identiques.



De la même manière si l'aléa de la zone 10-100 mètres est supérieur à l'aléa de la zone 10-200, alors il s'impose et les cartes d'aléas suivantes 10-100 et 10-200 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.



4.2. INTEGRATION DES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES

Comme tout autre projet de travaux souterrains, les projets géothermiques doivent prendre en compte l'existence de contraintes réglementaires. Les réglementations, non exhaustives, décrites ci-après 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.

Pour le porté à connaissance de ces zones, une couche informative « administration » est intégrée à la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Elle rassemble les territoires faisant l'objet de réglementations particulières à la date de réalisation de l'inventaire. Elle intègre les périmètres de travaux miniers, les zones de périmètres de protection des captages d'eau potable, d'eau minérale naturelle, 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.

Il est important de souligner que ces contraintes ne sont pas figées dans le temps. Il incombe par conséquent au maître d'ouvrage ou à son représentant de s'informer et le cas échéant de se conformer à la réglementation spécifique applicable sur la zone, préalablement à la mise en œuvre de tout projet géothermique.

4.2.1. Protection des captages d'alimentation en eau potable

Périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable

Afin de limiter les risques de pollutions ponctuelles et accidentelles des ressources en eau potable, des périmètres de protection sont imposés autour des captages, dans lesquels des prescriptions spécifiques encadrent les activités susceptibles d'altérer la ressource. Les différents périmètres de protection de captage sont définis à l'article L-1321-2 du code de la santé publique.

Sur la base d'une étude du contexte 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 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). Ils sont définis à trois échelles correspondant à trois niveaux de protection :

- le périmètre de protection immédiate : site clôturé autour du captage dont les terrains sont à acquérir en pleine propriété par la collectivité publique ; 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 à l'intérieur duquel peuvent être interdits ou réglementés toutes sortes d'installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux ;
- le périmètre de protection éloignée : périmètre facultatif à l'intérieur duquel peuvent être réglementés les installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols et dépôts sols de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux ; dans certains cas, son emprise correspond à la zone d'alimentation du point de captage.

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 par nature interdite dans le périmètre de protection immédiate. Il est fréquent que les forages géothermiques soient interdits dans le périmètre de protection rapprochée.

Pour cela, la représentation des périmètres de protection des captages AEP sera assurée par le futur SIG Cart'eau. Par une instruction DGS/EA4/2015/295 du 28 septembre 2015 adressée aux ARS, il a été indiqué que l'outil de télé-déclaration des ouvrages de géothermie de minime importance devra être alimenté, pour ces périmètres de protection, par les données issues de Cart'eau. Cette alimentation sera traitée de façon automatique au niveau national et ne sera pas réalisée par les structures régionales ARS.

Aires d'Alimentation de Captages

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. Théoriquement, elle inclut a minima les différents périmètres précités.

Ce dispositif est défini par l'article L.211-3 du code de l'environnement. Le dispositif associé est encadré par les articles R114-1 à 10 du code rural et de la pêche maritime. Contrairement aux périmètres de protection, il n'est ni obligatoire ni systématique, et répond à une initiative préfectorale. Dans le périmètre de l'AAC, des programmes d'actions volontaires sont mis en œuvre pour protéger la ressource contre les pollutions diffuses. Si les résultats sont insuffisants au regard des objectifs fixés, certaines mesures des programmes peuvent être imposées par le Préfet.

Ces dispositifs complémentaires de protection de la ressource doivent s'articuler avec ceux déjà existants, et de manière cohérente. La réalisation de forages géothermiques devra tenir compte également de ces zones et des arrêtés associés.

4.2.2. Protection des eaux minérales naturelles

L'arrêté d'autorisation d'exploiter une source d'eau minérale naturelle instaure systématiquement un périmètre sanitaire d'urgence, aux abords immédiats de l'ouvrage (article R1322-16 du code de la santé publique). Dans ce périmètre clôturé, le propriétaire doit disposer de la pleine propriété ou acquérir les servitudes garantissant sa protection contre les pollutions ponctuelles ou accidentelles. Ce périmètre est comparable au périmètre de protection immédiate des captages d'alimentation en eau potable.

Un second périmètre plus vaste peut lui être assigné, dans le cadre d'une Déclaration d'Intérêt Public (DIP), conformément aux articles L. 1322-3 à L. 1322-13 du code de la santé publique. A l'intérieur de ce périmètre, peuvent être interdits ou réglementés toutes activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux. La réglementation prévoit notamment les restrictions suivantes :

- aucun sondage, aucun travail souterrain ne peut être pratiqué 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 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 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.

Il est cependant à noter qu'une forte minorité de sources d'eau minérale naturelle disposent d'un périmètre de protection (sur 706 sources recensées en 1998 à l'échelle nationale, 158 bénéficiaient d'une DIP). Au total, seuls 39 sites français bénéficient d'un périmètre de protection (Vigouroux, 2015), et aucun ne se situe en Aquitaine.

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

Le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et son programme de mesures (PDM) sont des documents de planification décentralisée 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. Ce document a 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 compatibles ou rendus compatibles dans les 3 ans.

Le SDAGE et le PDM répondent à l'obligation de la Directive Cadre européenne sur l'Eau pour atteindre le bon état des cours d'eau, lacs, nappes souterraines, estuaires et du littoral en 3 cycles de gestion de 6 ans chacun : 2010-2015, 2016-2021, 2022-2027.

A l'échelle locale, l'Aquitaine est intégralement incluse dans le bassin Adour-Garonne. Les objectifs environnementaux du SDAGE Adour-Garonne au sens de la Directive Cadre sur l'Eau sont les suivants :

- non-détérioration de l'état des masses d'eau (définie comme objectif prioritaire) ;
- atteinte du bon état des eaux ;
- prévention et limitation de l'introduction de polluants dans les eaux souterraines ;
- inversion de toute tendance à la hausse, significative et durable, de la concentration de polluants dans les eaux souterraines ;
- réduction progressive ou, selon les cas, suppression des émissions, rejets et pertes de substances prioritaires, pour les eaux de surface ;
- atteinte des objectifs liés aux zones protégées.

Pour ce faire, quatre orientations majeures ont été retenues :

- orientation A : créer les conditions de gouvernance favorables à l'atteinte des objectifs du SDAGE ;
- orientation B : réduire les pollutions ;
- orientation C : améliorer la gestion quantitative ;
- orientation D : préserver et restaurer les fonctionnalités des milieux aquatiques.

Parmi les dispositions associées, seules deux mentionnent explicitement la géothermie :

- disposition B28 - maîtriser l'impact de la géothermie sur la qualité de l'eau :
- vérification de la bonne isolation des nappes traversées, de l'absence de fuite de fluide caloporteur,
- étude de l'impact cumulé des forages géothermiques, notamment thermique ;
- disposition C12 - maîtriser l'impact de la géothermie sur le plan quantitatif : pour tous les forages géothermiques, les eaux prélevées doivent être restituées dans leur réservoir d'origine, sauf cas exceptionnel dûment étayé.

Cependant, plusieurs autres dispositions, à caractère quantitatif ou qualitatif plus général, peuvent impacter les opportunités d'implantation de forages géothermiques.

Plusieurs documents d'accompagnement complètent, à titre informatif, le SDAGE et le PDM Adour-Garonne :

- la présentation synthétique de l'état des lieux de la gestion de l'eau ;
- l'analyse de la récupération des coûts des services liés à l'utilisation de l'eau ;
- le résumé du programme de mesures ;
- le résumé du programme de surveillance ;
- le tableau de bord du SDAGE ;
- le résumé des dispositions de la consultation du public et des partenaires - déclaration environnementale ;
- la synthèse des méthodes et critères servant à l'élaboration du SDAGE.

4.2.4. 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 (aspects 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.

Les SAGE recensés actuellement sur le territoire régional sont les suivants :

- Périmètres basés sur un bassin hydrographique :
 - Adour amont - mis en œuvre en mars 2015,
 - Adour aval - en élaboration, CLE constituée en septembre 2015,
 - Charente - en élaboration, stratégie adoptée en juillet 2016,
 - Ciron - mis en œuvre en juillet 2014,
 - Côtiers basques - mis en œuvre en décembre 2015,
 - Dordogne amont - en élaboration, état initial validé en juin 2016,
 - Dordogne Atlantique - en instruction, périmètre arrêté en juin 2015,
 - Dropt - en élaboration, CLE constituée en mai 2015,

- Etangs littoraux Born et Buch - mis en œuvre en juin 2016,
 - Estuaire de la Gironde et milieux associés - mis en œuvre en août 2013,
 - Isle-Dronne - en élaboration, état des lieux validé en octobre 2015,
 - Lacs médocains - mis en œuvre en octobre 2007, révisé en mars 2013,
 - Leyre, cours d'eau côtiers et milieux associés - mis en œuvre en février 2008, révisé en février 2013,
 - Midouze - mis en œuvre en janvier 2013,
 - Vallée de la Garonne - en élaboration, diagnostic validé en juillet 2015,
 - Vézère-Corrèze - en instruction, périmètre arrêté en juillet 2015
- Périmètre basé sur un bassin hydrogéologique : Nappes profondes de Gironde - mis en œuvre en novembre 2003, révisé en juin 2013.

4.2.5. 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.

Sur le territoire de l'Aquitaine, deux sites de stockage en aquifère sont en activité, à des profondeurs de l'ordre de 500 à 700 m, et distants de 10 km environ :

- Lussagnet (40) : mis en service en 1957 ; le décret du 9 avril 2008 prévoit une augmentation du volume total de stockage autorisé de 2,4 à 3,5 GNm³ ;
- Izaute (32, à proximité de la limite régionale) : mis en service en 1981, pour un volume total de stockage autorisé de 3,0 GNm³.

En 2015, les deux sites de Lussagnet et Izaute représentaient environ 24% des capacités françaises de stockage de gaz naturel.

Autour de chacun de ces sites est institué un périmètre de protection (58,4 km² pour Lussagnet, 118,5 km² pour Izaute). Dans ce périmètre, la réalisation de travaux souterrains profonds (> 300 / 350 m) est réglementée.

Dans la région Aquitaine, le site de stockage en cavité saline de Carresse-Cassaber (64) a également été exploité jusqu'en 2002, il a ensuite été l'objet d'expérimentations d'abandon.

D'autres projets de stockage ont été évoqués par le passé, sans aboutissement concret.

4.3. CARTOGRAPHIE DES ALEAS LIES AUX OUVRAGES GEOTHERMAUX

4.3.1. Aléa "affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques"

Phénomène redouté

Il s'agit d'un affaissement, voire d'un effondrement ou d'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.

Données disponibles

Une recherche documentaire préliminaire sur les données géologiques du territoire a été menée, et les données cartographiques existantes ont été étudiées. Plusieurs bases de données sont à disposition :

- les cartes géologiques au 1/50 000ème qui recouvrent l'ensemble de l'ex-région Aquitaine ainsi que les notices associées ;
- les cartes géologiques harmonisées et/ou homogénéisées à l'échelle de l'étude ;
- les données de la BSS (Banque du sous-sol) ;
- la base de données Infoterre (documentation du BRGM, rapports, etc.).

La carte géologique numérique homogénéisée de l'Aquitaine a été utilisée comme donnée cartographique de base. Elle a été réalisée à partir des cartes vecteur harmonisées des 5 départements de l'ex-Aquitaine, elles-mêmes issues des cartes géologiques au 1/50 000ème digitalisées. Cependant, il est à noter que cette donnée géologique numérique homogénéisée a fait l'objet de simplifications et de regroupements qui peuvent entraîner des conséquences sur la répartition et l'extension des unités géologiques qui ont été considérées.

Par ailleurs, les bases de données géologiques actuelles ne permettent pas d'obtenir une vision détaillée du sous-sol en trois dimensions sur l'ensemble du territoire de l'Aquitaine. En l'état actuel des connaissances, l'approche intégrée selon les trois tranches de profondeur ne sera donc pas envisageable.

Dans le but d'identifier les formations géologiques pouvant renfermer des minéralisations de type évaporitique sur la région, des indices ont été recherchés dans les notices des cartes géologiques et dans la bibliographie.

Dans un premier temps, les formations sédimentaires comportant du gypse, de l'anhydrite ou des évaporites, même en faible quantité, ont été répertoriées. Puis les dépôts équivalents aux mêmes conditions paléoenvironnementales et aux mêmes périodes temporelles ont également été identifiés comme formations géologiques susceptibles de renfermer des minéralisations évaporitiques, sans pour autant que de tels minéraux n'y aient été formellement identifiés (dans la notice principalement).

Formations contenant des horizons évaporitiques plurimétriques

Les dépôts de sel et d'anhydrite sont connus dès le Trias moyen, mais dans la majeure partie de l'Aquitaine, les dépôts d'évaporites se cantonnent dans le Trias supérieur (Keuper). Le Trias supérieur est caractérisé par une épaisse série salifère qui a commencé à migrer, dès la fin du Jurassique, vers les structures anticlinales (diapirisme). Le tableau suivant synthétise les formations correspondantes sur la carte homogénéisée de l'Aquitaine.

CODE_LEG	LITHO	FORM	AGE	TYPE_GEOL
2001	Argiles à évaporites (gypse, sel)	Argiles Bariolées	Keuper	Trias
2002	Marnes bariolées, argiles gypsifères, calcaires et dolomies, cargneules		Trias supérieur - Keuper	Trias

Tableau 1 : Formations géologiques identifiées, contenant des épaisseurs de gypse plurimétriques (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)

Formations contenant des horizons évaporitiques décimétriques à métriques

Sur la bordure du bassin molassique, au cours de la période assez courte du Priabonien (3 Ma environ - Eocène supérieur), le climat à saisons sèches plus marquées favorise, au sein de la série détritique (Argiles à Paléothérium et Molasses du Fronsadais), le développement de petites étendues lacustres où se sédimentent des calcaires micritiques (lac des Ondes, lac de Saint-Cernin, lac d'Issigeac) et se créent les conditions pour l'évolution diagénétique des argiles.

Certaines zones, présentant des environnements favorables à la sédimentation évaporitique, voient le dépôt de niveaux de gypse qui ont fait l'objet d'exploitations localisées : c'est le cas du "gypse de Sainte-Sabine", près de Villereal (24). Outre ce secteur exploité, des horizons francs de gypse ont été identifiés par sondage plus à l'ouest, vers Malromé et Pardaillan (entre Duras et Eymet - 47).

Le tableau suivant synthétise les formations correspondantes sur la carte homogénéisée de l'Aquitaine.

CODE_LEG	LITHO	FORM	AGE	TYPE_GEOL
227	Argiles silteuses micacées carbonatées sableux à argilo-sableux localement	Molasse du Fronsadais	Priabonien sup. à Rupélien basal	Bassin Molassique Tertiaire
228	Argiles silteuses carbonatées gris- et nombreux chenaux de sables feldspathiques gris et grés carbonatée	Molasse du Fronsadais sup.	Priabonien terminal - Rupélien basal	Bassin Molassique Tertiaire
229	Argiles silteuses carbonatées et sables feldspathiques gris et grés carbonatée	Molasse du Fronsadais sup.	Priabonien terminal - Rupélien basal	Bassin Molassique Tertiaire
230	Argiles silteuses carbonatées	Molasse du Fronsadais moy.	Priabonien sup.	Bassin Molassique Tertiaire
231	Calcaires lacustres blancs à roses à meulières éparses	Calcaire d'Issigeac	Priabonien sup.	Bassin Molassique Tertiaire
232	Sables argileux feldspathiques, argiles silteuses micacées carbonatées à chenaux sableux à argilo-sableux	Molasse du Fronsadais inf.	Priabonien sup.	Bassin Molassique Tertiaire
233	Calcaires et argiles lacustres blancs localement meuliérisés	Formation des Ondes ; Calcaire de St Cernin ; Calcaire de Ste Croix de Beaumont	Priabonien moy.	Bassin Molassique Tertiaire
234	Argiles carbonatées jaunes à vertes silteuses	Argiles à Paléothérium	Priabonien inf. à Rupélien basal	Bassin Molassique Tertiaire

Tableau 2 : Formations géologiques susceptibles de contenir des horizons décimétriques à métriques (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)

Pour illustrer les phénomènes observés à l'époque, les cartes ci-dessous présentent deux exemples de paléoenvironnements à l'Eocène supérieur.

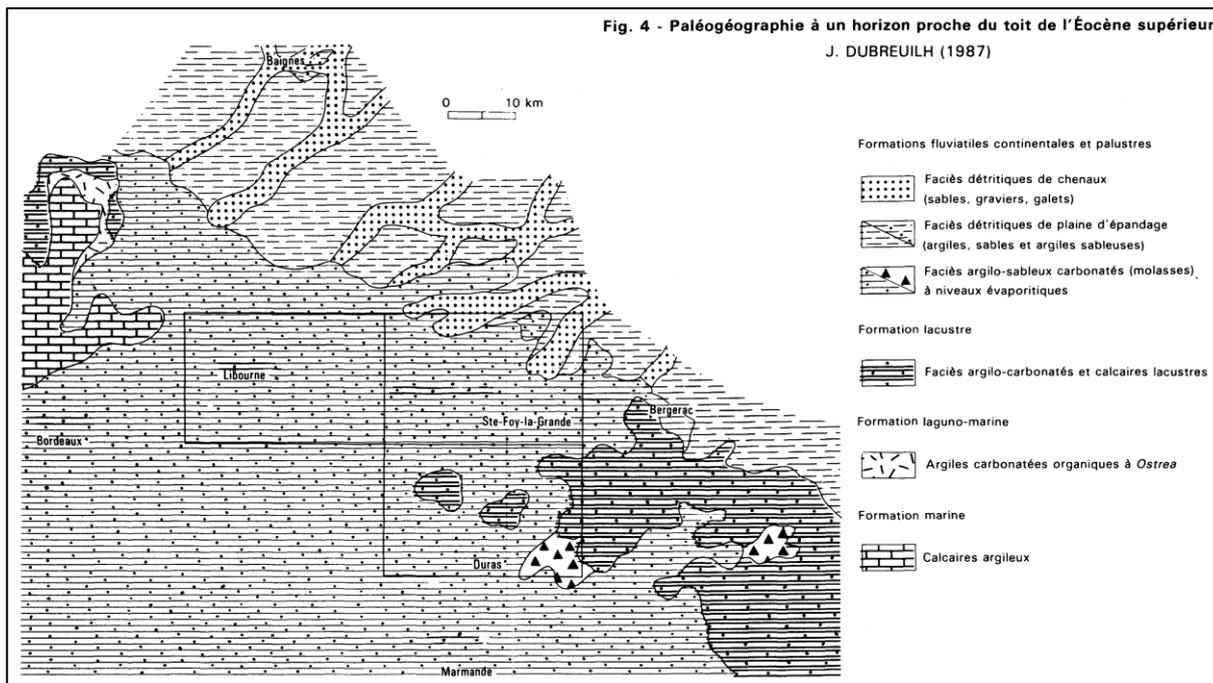


Illustration 9 : Carte paléogéographique de l'Éocène supérieur, à l'est de Bordeaux, Notice 805 p 36

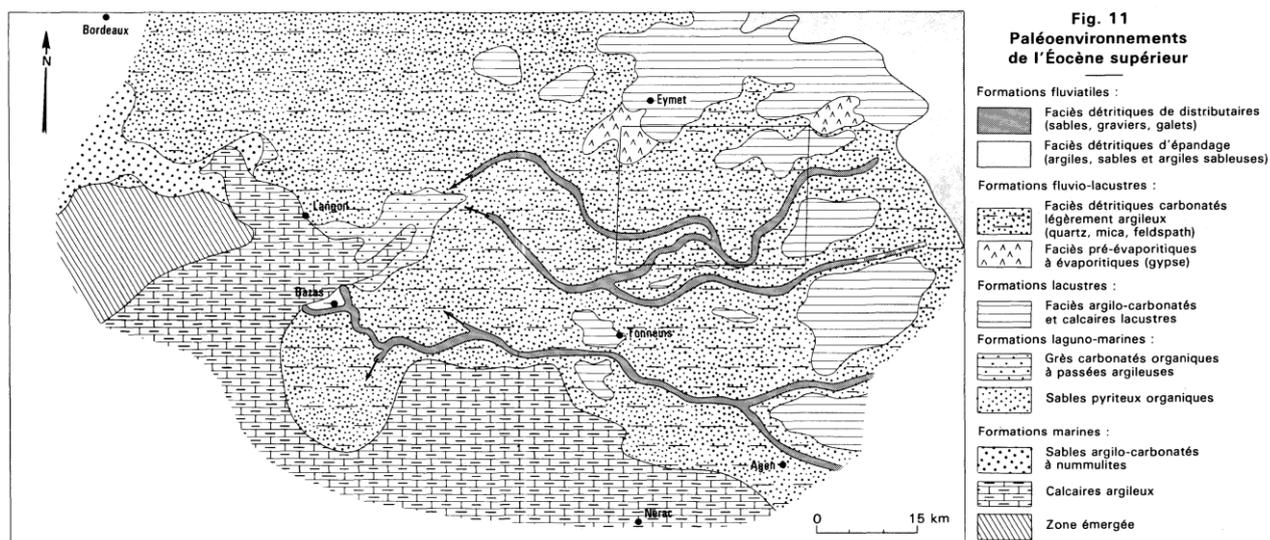


Illustration 10 : Carte paléogéographique de l'Éocène supérieur, au sud-est de Bordeaux, Notice 854 p 36

Il est important de souligner que ces cartes illustrent une interprétation des paléoenvironnements pour un instant donné de l'histoire géologique de la région concernée. Elles ne figurent pas strictement les seuls secteurs où des minéralisations évaporitiques peuvent être rencontrées sur une plus vaste période.

Argiles gypsifères, pseudomorphoses de gypse ou cristallisations gypseuses

Plusieurs étages sont susceptibles de contenir des horizons évaporitiques :

- Eocène (Paléogène) : durant cette période, se développent localement des milieux de sédimentation protégés à tendance endoréique, permettant la concentration, puis le dépôt de carbonates ou même de gypse ;
- Campanien (Crétacé supérieur terminal) : un calcaire blanc à alvéolines est notifié avec des indices de présence de gypse (formation d'Atur) ;
- Cénomaniens (Crétacé supérieur) : une sédimentation plus ou moins confinée (avec cristallisation de pyrite, de gypse, etc.), s'opère dans des lagunes présentes dans le Médoc et le Bordelais, pendant la grande transgression cénomaniens, sur des niveaux appartenant au Cénomaniens inférieur (toutefois, ces niveaux ne sont pas clairement décrits)°; au Cénomaniens supérieur, certaines zones lagunaires moins ouvertes font l'objet de concentration de saumures sulfatées, caractérisées par la présence de petits cristaux de gypse et de pyrite (formation de Dantou : banc calcaire de 5 m avec pseudomorphose de gypse, argiles gypsifères, lignites, marnes à lamellibranches, calcaires à simplalvéolines (0 à 30 m), argiles gris-vert à cristallisations gypseuse) ;
- Portlandien (Malm, Jurassique à Néocomien, Crétacé inférieur) : dans l'ouest de la région charentaise, le Tithonien se termine par les faciès évaporitiques du Purbeckien qui correspondent à plus de 200 m de dépôts argileux à gypse, typiques du Pays-Bas charentais (secteur de Matha). Ces dépôts n'ont pas existé ou ont été totalement érodés sur l'ensemble de la région de Ribérac et ne concernent donc pas a priori l'ex-Aquitaine ; toutefois, on peut noter la présence de niveaux micritiques montrant de belles pseudomorphoses de cristaux de gypse et des niveaux d'anhydrites gypsifères (Portlandien supérieur - formation de Cazals) ;
- Bathonien terminal à Callovien (Dogger, Jurassique) : un calcaire beige clair à fines oolites et gravelles, à foraminifères abondants est décrit dans l'est de la Dordogne ; il est parfois caractérisé par des pseudomorphoses possibles de cristaux d'évaporites et à ciment cristallin (alternance de calcaires cryptocristallins et de calcaires oolithiques et bioclastiques) ;
- Bathonien inférieur (Dogger, Jurassique) : dépôts sur une épaisseur d'environ 55 mètres avec alternance marno-calcaires et présence de pseudomorphoses de gypse au sommet (formation d'Ajat).

Le tableau suivant synthétise les formations correspondantes sur la carte homogénéisée de l'Aquitaine.

CODE LEG	LITHO	FORM	AGE	TYPE_GEOL
235	Argiles carbonatées silteuses plus ou moins sableuses, indurées, à chenaux sableux à argilo-sableux	Molasses Inferieures	Bartonien sup. à Priabonien inf.	Bassin Molassique Tertiaire
236	Argiles carbonatées silteuses plus ou moins sableuses, à chenaux sableux à argilo-sableux	Molasses Inferieures et Argiles à Paléothérium	Bartonien sup. à Rupélien basal	Bassin Molassique Tertiaire
306	Marnes à huitres (<i>Ostrea bernonensis</i>) à niveaux gypseux	Groupe de St Estèphe : Marnes à Bernonensis Inf.	Priabonien Inf. (Sommet)	Bordure littorale tertiaire
307	Marnes	Groupe de St Estèphe : Marnes Intermédiaires	Priabonien Inf. (moyen)	Bordure littorale tertiaire
310	Calcaire lacustre durs à pate fine et argiles	Formation de Plassac	Priabonien inf.	Bordure littorale tertiaire
311	Argiles grises à nodules et concrétions carbonatées et huitres (<i>Ostrea cucularis</i>)	Argiles à Cucularis	Priabonien inf. (base)	Bordure littorale tertiaire
611	Calcaire crayeux blanc à rares silex	Formation d'Atur, Gimeux et Trémolat p.p.	Campanien inf.	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Crétacé Sup
640	Sables fins à grossiers ; Marnes vertes ; Calcaires ; Argiles à lignite	Quinsac ; Simeyols ; Dantou ; Boulvé	Cénomaniens	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Crétacé Sup
1001	Dolomicrite laminées ; Calcaire micritique	Formation de Cazals et de Berbiguières	Malm : Tithonien moy.	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Jurassique
1013	Alternance de calcaires micritiques et de calcaires oolithiques et bioclastiques	Calcaire à Trocholines	Dogger : Callovien	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Jurassique
1014	Alternance calcaire micritique / bioclastiques à pellets		Dogger : Bathonien sup.	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Jurassique
1015	Alternance Calcaires micritiques / bioclastiques et niveaux d'argiles plus ou moins ligniteuses		Dogger : Bathonien inf. à moy.	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Jurassique
1016	Calcaires micritiques laminés et marnes noires ligniteuses	Formation d'Ajat	Dogger : Bathonien inf.	Plate-forme carbonatée et marno-calcaire du Jurassique

Tableau 3 : Formations géologiques susceptibles de contenir des évaporites (extrait de la table attributaire de la carte homogénéisée de l'Aquitaine)

Qualification de l'aléa

Parmi les formations géologiques citées dans les chapitres précédents, l'attribution de l'aléa sera faite comme suit, conformément à la méthodologie nationale :

- formations contenant des horizons évaporitiques plurimétriques : aléa fort ;
- formations contenant des horizons évaporitiques décimétriques ou métriques : aléa moyen°;
- formations susceptibles de contenir des horizons évaporitiques (argiles gypsifères, pseudomorphoses de gypse ou cristallisations gypseuses) : aléa faible.

La carte suivante présente ces formations géologiques identifiées à l'affleurement sur le territoire de l'Aquitaine.

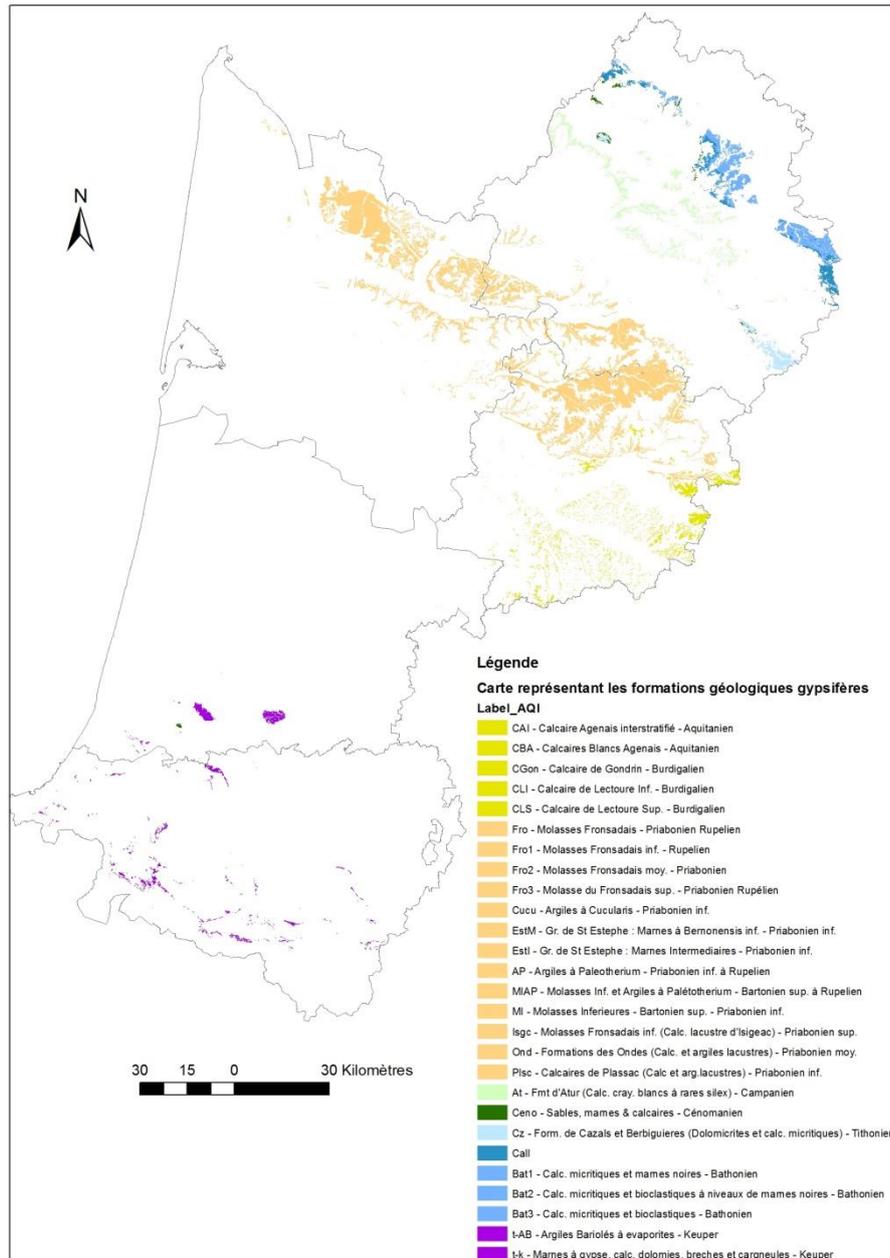


Illustration 11 : Carte de l'Aquitaine représentant les formations géologiques affleurantes identifiées comme pouvant renfermer des minéralisations de type évaporitiques (en orange : paléogène ; en vert : crétacé ; en bleu : jurassique ; en violet : trias)

Mais au-delà de la seule reconnaissance de ces formations à l'affleurement, le principal enjeu pour la qualification de l'aléa reste la prise en compte de leur géométrie jusqu'à 200 m de profondeur, dont la connaissance sera partielle, et fonction notamment du nombre de forages identifiés et disposant de coupes fiables.

La nature et la précision des données disponibles ne permettant pas de décliner de manière fiable la cartographie sur les 3 gammes de profondeur (0-50 m, 0-100 m, 0-200 m). Une seule carte a été établie pour l'aléa associé aux formations évaporitiques. La cartographie a été adaptée à chaque étage géologique, comme décrit ci-dessous.

Paléogène : molasse inférieure, molasse du Fronsadais et formations associées

Ce regroupement contient la molasse inférieure, argile à paléothérium, formations des Ondes et de Saint-Cernin et la molasse du Fronsadais. L'épaisseur de ces formations peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.

L'existence d'horizons de gypse avérés mais localisés, identifiés à Sainte-Sabine et vers Malromé et Pardaillan, justifie le classement de ces deux secteurs en aléa moyen. Cependant il est à noter qu'ils correspondent à des environnements de dépôts particuliers, dont les contours sur les cartes paléogéographiques ont été repris (Dubreuilh, 1987). Du fait de l'incertitude forte concernant leur extension, une zone tampon de 2 km a été affectée à ces entités.

Le reste de l'emprise de cette formation du Paléogène, en l'absence d'horizons connus, a été classé en aléa faible. D'après les coupes (Illustration 12, Illustration 13), elle peut être rencontrée à moins de 200 mètres de profondeur sur les plateaux de l'Entre-Deux-Mers (secteur de Sainte-Foy-La-Grande et secteur de Duras), mais également dans les fonds de vallées.

Dans ce secteur, outre une zone tampon de 1°000 mètres ajoutée aux zones d'affleurements, justifiée par les pentages faibles, une extension manuelle des polygones a été faite pour considérer au mieux ces observations.

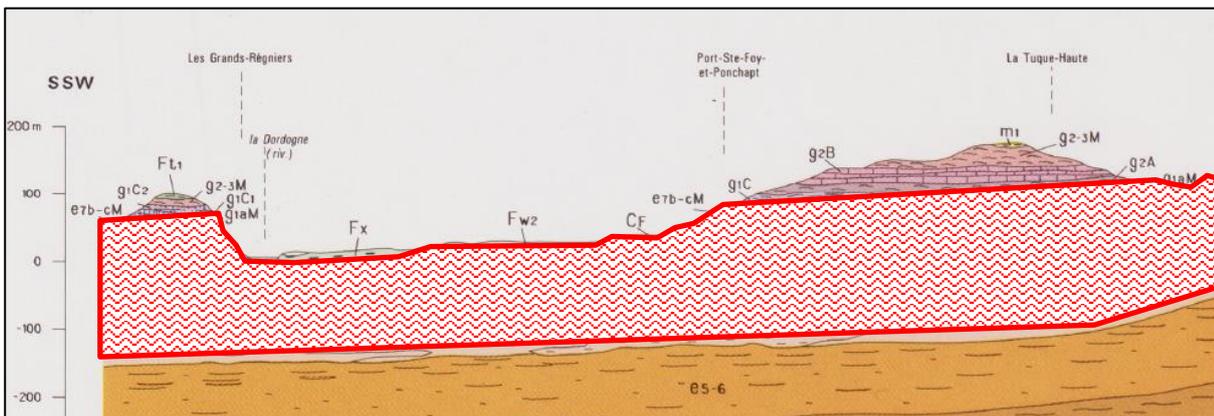


Illustration 12 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°805 de Sainte-Foy-La-Grande (en rouge : e6-7a / e7b-cm / g1-2m)

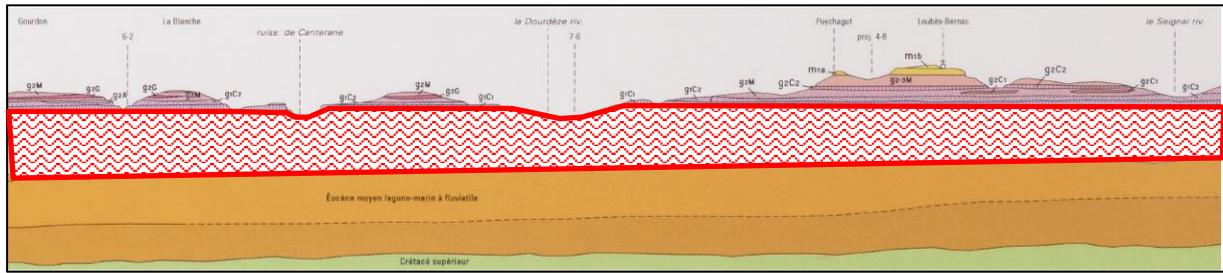


Illustration 13 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°829 de Duras
(en rouge : e_{6-7a} / e_{7-ab})

Paléogène : groupe de Saint-Estèphe

Dans l'anticlinal de Saint-Estèphe, d'axe sud-ouest/nord-est, les formations du Paléogène (aléa faible) plongent rapidement vers le nord-ouest et le sud-est, mais un peu moins vers le sud-ouest et le nord-est. De plus, on se retrouve sous l'estuaire de la Garonne côté nord-est.

Ces considérations mènent à appliquer une zone tampon de 5 km.

Crétacé : formation d'Atur

La formation est le plus souvent érodée au sommet. Son épaisseur peut atteindre une centaine de mètres. Si les fonds des vallées principales sont exempts de ces formations géologiques, les plateaux doivent être entièrement considérés (Illustration 14).

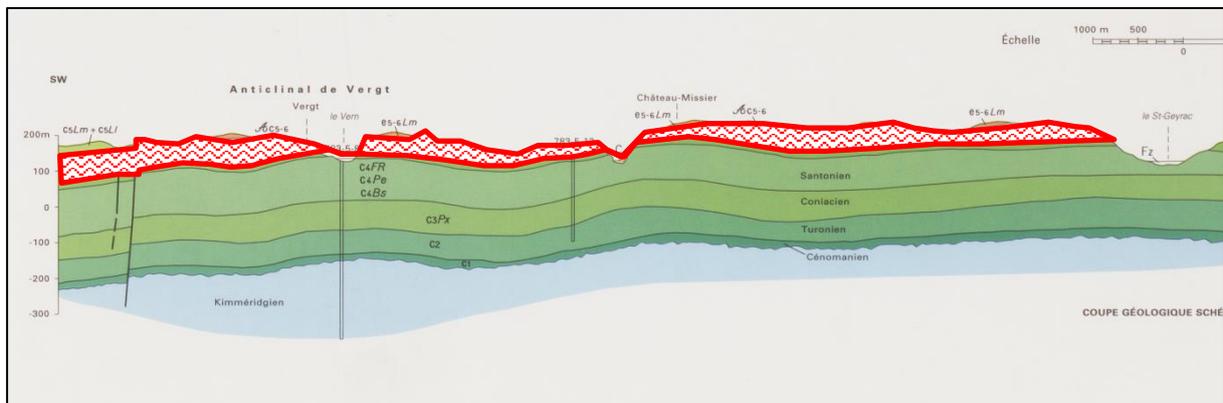


Illustration 14 : Coupe géologique dans le secteur de la carte de Thenon - (CG783 - C₅At)

Crétacé : Cénomaniens

Cette formation est notamment visible en surface au niveau de l'anticlinal de la Tour Blanche (Illustration 15). D'après les données géologiques récoltées dans ce secteur, les pendages oscillent entre 15 et 50% (10° et 30°).

Une zone tampon de 1°000 mètres a par conséquent été appliquée à l'extérieur de la structure anticlinale.

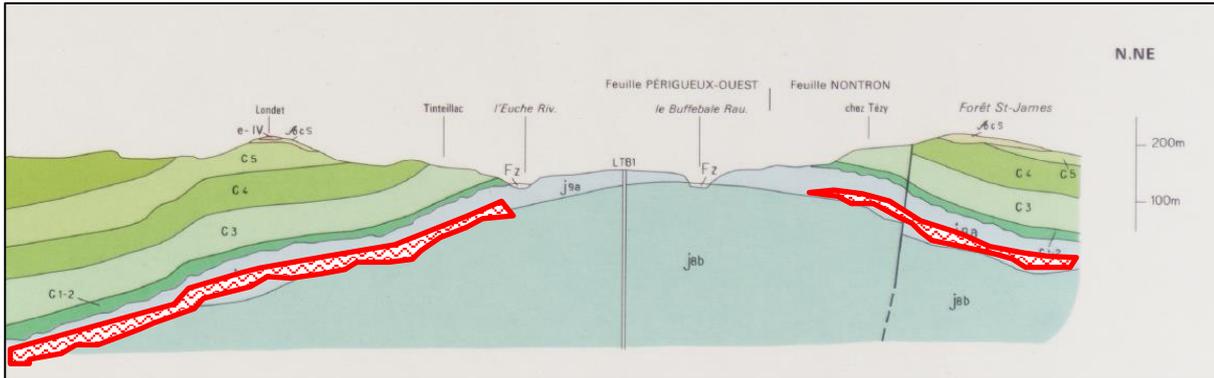


Illustration 15 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°758 de Périgueux-ouest (en rouge : C₁₋₂)

Cette formation est également visible au niveau de couches plissées, dans un secteur situé plus au nord, (carte n°734 de Nontron : - C₁₋₂). Dans ce secteur où cette formation affleure, nous proposons d'ajouter une zone tampon d'environ 1°000 mètres en poursuivant sur les plateaux vers le sud-ouest.

Jurassique

Il s'agit de la couche située géologiquement à la base de la formation précédente (cf. Cénomaniens + Illustration 15 : j_{9a}). De ce fait, les considérations seront prises à l'identique au niveau de la structure anticlinale de la Tour Blanche (Illustration 16) avec une zone tampon de 1°000 m.

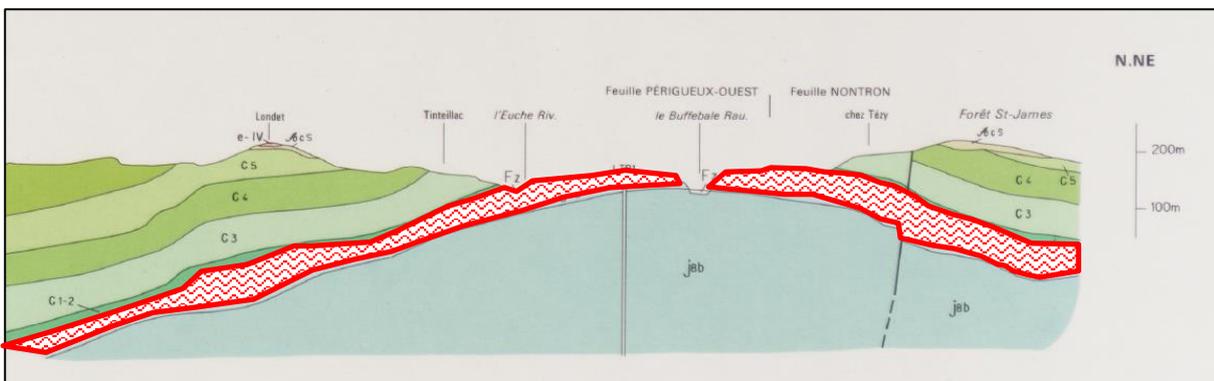


Illustration 16 : Coupe géologique dans le secteur de la carte n°758 de Périgueux-ouest (en rouge : j_{9a})

Plus au nord, au niveau des cartes géologiques 759 et 734 (j_{2-6a} / j_{2-6b} / j_{2b}), une zone tampon de 1°000 mètres a été appliquée vers le sud-ouest.

Trias : Keuper

Les couches de gypse ou d'anhydrites se sont déposées au Keuper sur une épaisseur pouvant dépasser 200 mètres. Ces couches se sont retrouvées en surface à la faveur de structures anticlinales et sont remontées sous forme de diapirs. De ce fait, les couches sont fortement verticalisées et la géométrie fine de leurs structures est très peu connue. Leur épaisseur peut atteindre plus d'un millier de mètres.

Etant donné le potentiel de dissolution de ces formations, elles correspondent à des zones en dépression recouvertes par des alluvions récentes ; ce qui peut entraîner une large sous-

estimation de leur répartition géographique si les seules emprises des affleurements sont considérées.

La cartographie de ces formations, affectées d'un aléa fort, a été reprise manuellement, à dire d'expert, sur la base :

- des affleurements connus ;
- des extensions connues des diapirs, détaillées dans plusieurs rapports (Berard et al., 1998, Berard et al., 1999,) ;
- des données des forages environnants disposant de coupes validées ;
- des localisations connues d'anciennes concessions pour l'exploitation de sel dans les Pyrénées-Atlantiques.

Afin d'intégrer les incertitudes sur la connaissance des géométries, une zone tampon minimale de 200 mètres a été appliquée à ces emprises tracées.

Un exemple de tracé pour le secteur de Dax et Saint-Pandelon est donné sur l'illustration 17. Le diapir apparaît localement masqué par les alluvions récentes ; son contour a pu être défini de manière fine au nord, sur Dax, grâce aux nombreux forages disposant de coupes géologiques fiables. Plus au sud, la moindre densité d'informations souterraines rend le contour du diapir de Saint-Pandelon plus incertain, nécessitant l'application d'une zone tampon.

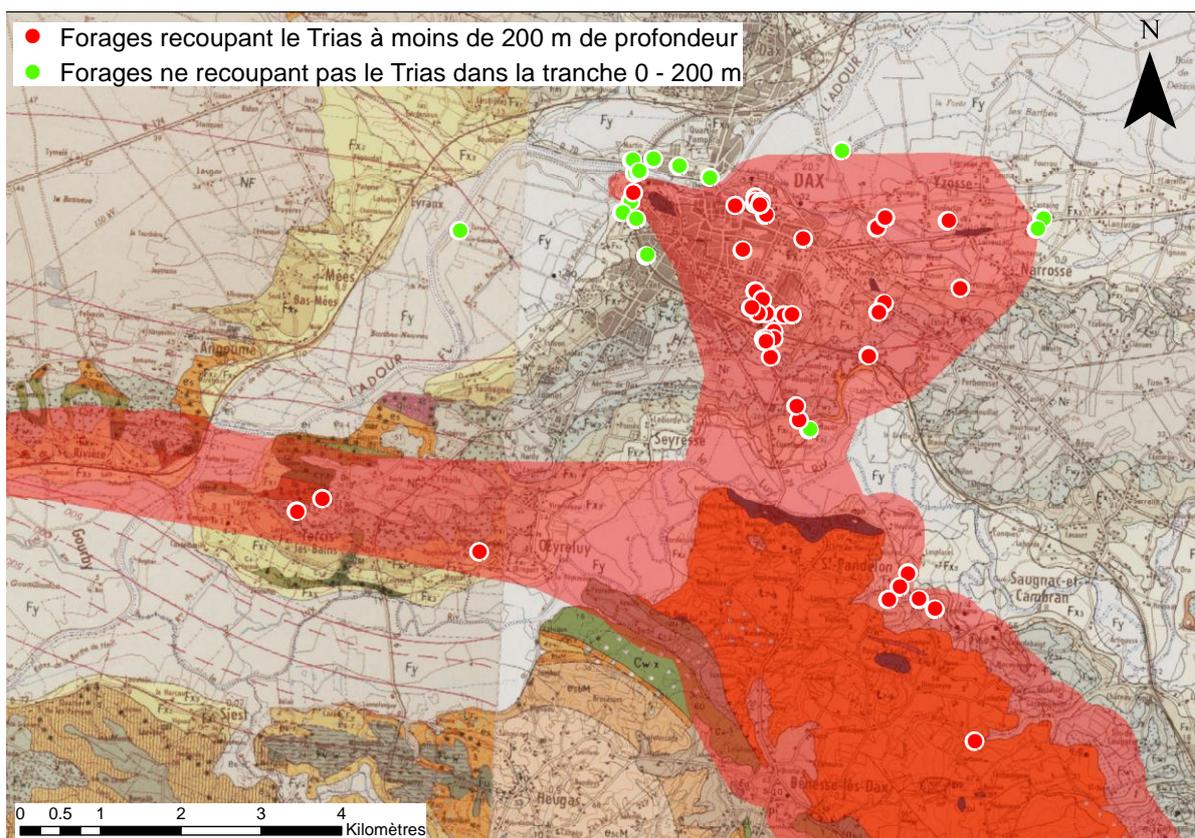


Illustration 17 : Tracé de l'emprise classée en aléa fort pour l'affaissement / surrection liés aux niveaux d'évaporites" (en rouge) sur le secteur de Dax / Saint-Pandelon, au regard de la carte géologique et des données de forages

L'illustration 18 ci-dessous donne un premier aperçu de la cartographie de l'aléa à l'échelle de l'Aquitaine.

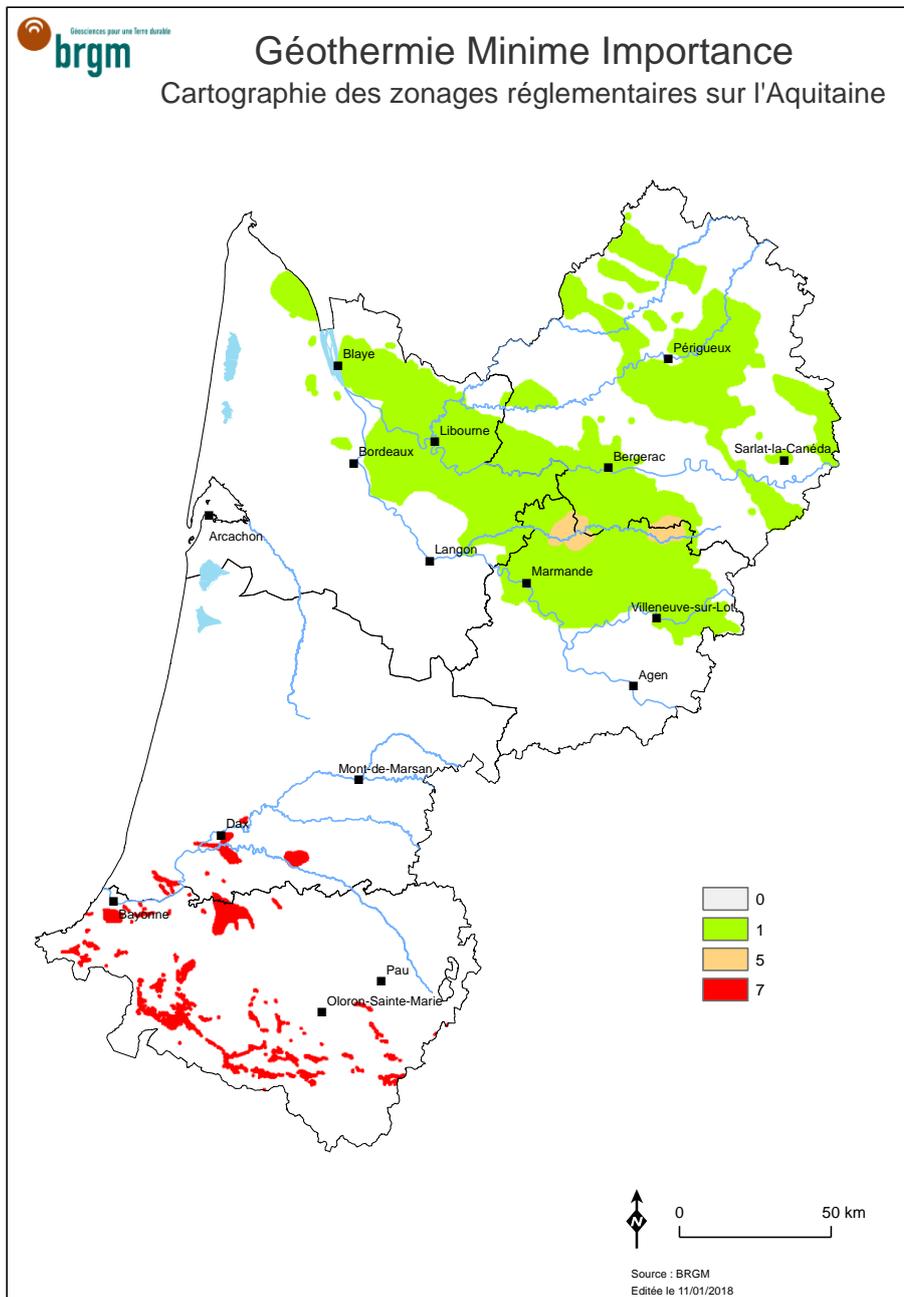


Illustration 18 : Aperçu de la carte de l'aléa "affaissement/surrection lié aux niveaux évaporitiques"

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

Phénomène redouté

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).

Les cavités sont, de plus, une difficulté pour la réalisation d'un forage, en particulier pour la cimentation.

Sur le territoire aquitain, cet aléa concerne également les carrières souterraines, utilisées pour l'extraction de matériaux de construction. C'est principalement le cas du secteur de l'Entre-Deux-Mers en Gironde (entre la Garonne et la Dordogne).

Données disponibles sur les aléas

Certaines communes isolées bénéficient de cartographies détaillées des aléas "effondrement" ou "affaissement / tassement différentiel". Elles sont recensées par la DREAL Nouvelle-Aquitaine dans la base de données Carmen, et concernent les communes de :

- Accous (64)
- Cénac-et-Saint-Julien, Domme (24)
- Beynac-et-Cazenac, la Roque-Gageac, Vézac, Vitrac (24)
- Blaye (33)
- Foulayronnes (47)
- Bajamont (47)
- Nicole (47)

A ces données s'ajoutent les effondrements effectifs recensés :

- par la base de données des mouvements de terrains ;
- par le Bureau des Carrières de la Gironde.

Seuls les mouvements dont la localisation était précise (mètre ou décimètre) ont été retenus.

Données disponibles sur les cavités

Il n'existe pas de cartographie de l'aléa à l'échelle nationale, ni même à l'échelle de l'Aquitaine. Toutefois, les occurrences de cavités sur le territoire aquitain sont recensées par plusieurs sources.

La banque de données nationale des cavités souterraines abandonnées en France métropolitaine "hors mines" (BD Cavités - cf. Illustration 19) recense 8°922 cavités en Dordogne, 1°606 en Gironde, 667 dans les Pyrénées-Atlantiques, 623 en Lot-et-Garonne et 166 dans les Landes. Ces données sont ponctuelles. Elles ont été complétées par celles de plusieurs recensements locaux.

The screenshot shows the 'Cavités souterraines' page on the GéoRisques website. At the top, there is a search bar and the GéoRisques logo with the tagline 'Mieux connaître les risques sur le territoire'. The navigation bar includes 'Accueil', 'Ma maison / Mes risques', 'Cartes interactives', 'Dossiers thématiques', 'Téléchargement', 'Glossaire', and 'Aide'. The breadcrumb trail reads 'Accueil » Cavités souterraines'. A sidebar on the left contains links for 'Contexte', 'Acteurs', 'Méthodes de détection et reconnaissance', 'Gestion du risque', 'Accès aux données', and 'FAQ'. The main content area features a pink banner with the text 'Bienvenue sur le nouvel espace Cavités souterraines du site GéoRisques'. Below this is a photo of a cave entrance and a text box titled 'Banque de données nationale des cavités souterraines abandonnées en France métropolitaine "hors mines"' with a 'Mise à jour des données : 02/03/2015'. A search form titled 'Accès rapide aux données' includes dropdown menus for 'Sélectionner un département...', 'Sélectionner une commune...', and 'Sélectionner un mode d'affichage', along with a 'VALIDER' button. An 'Avertissement' box contains the following 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.' At the bottom, logos for BRGM, Fédération Française de Spéléologie, IFSTAR, and INERIS are displayed, along with the footer text 'Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie' and navigation links for 'Contact', 'Plan du site', 'Mentions légales', 'Liens', and 'Flux RSS'.

Illustration 19 : Extrait du serveur <http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines>

La base de données sur les dolines du département de la Dordogne (Cabaret et al., 2014) recense 1°386 points, dont 840 proviennent de la BD Cavités. Le reste est issu de plusieurs études locales et analyses des cartes topographiques. A ces données s'ajoutent également celles de la base de données des traçages hydrogéologiques (<https://bdtracages.brgm.fr/>).

D'autre part, plusieurs plans de réseaux souterrains, souvent établis par les spéléologues, sont disponibles. Il s'agit en général de données papier, non géoréférencées (cf. exemple sur l'illustration 20), et la profondeur n'est pas connue. Les données ont été traitées sous SIG afin d'établir l'emprise en surface des réseaux identifiés pour les cavités suivantes en Dordogne :

- grotte des Combarelles (Les Eyzies-de-Taillac - Sireuil) ;
- grotte de Falguyret (Sainte-Alvère) ;
- grotte de Cussac (Le Buisson-de-Cadouin) ;
- les Badies (Mauzens-et-Miremont) ;

- grotte de Baha-Bahau (Le Bugue) ;
- grotte de Bernifal (Meyrals) ;
- grotte de Lascaux (Montignac) ;
- grotte de Villars ;
- réseau karstique de la Glane (Saint-Jory-las-Bloux) ;
- grotte de Rouffignac (Rouffignac-Saint-Cernin).

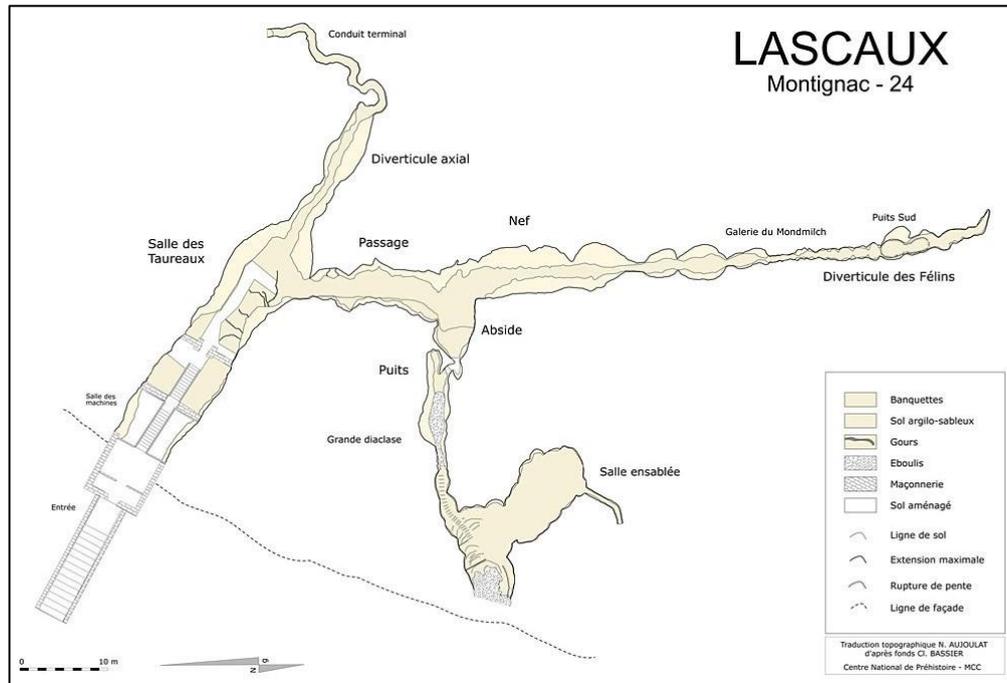


Illustration 20 : Exemple de plan de réseau karstique - grotte de Lascaux

A ces données s'ajoutent également les données fournies par le Bureau des Carrières de la Gironde : localisation des carrières souterraines, cavités, dolines.

Après croisement de l'ensemble des données (extraites en janvier 2017) et élimination des doublons, un total de 11 431 cavités a été recensé sur le territoire aquitain.

Données disponibles sur les formations géologiques

Le référentiel hydrogéologique français BD LISA inclut une surcouche karst (Parioissien et al., 2015), qui référence les entités karstiques à l'affleurement. En Aquitaine, les formations recensées sont essentiellement :

- les calcaires du Jurassique et du Crétacé, du nord et nord-est du Bassin aquitain (majoritairement en Dordogne) ;
- les calcaires du Paléozoïque, du Jurassique et du Crétacé du sud du Bassin aquitain ;
- les calcaires de l'Oligocène de l'Entre-Deux-Mers et immédiatement à l'ouest de la Garonne ;
- les calcaires de l'Aquitaniens-Burdigalien en rive gauche de la Garonne.

Afin que l'emprise des formations potentiellement karstifiées concorde avec les indices de cavités recensés (cf. Illustration 21, elle a dû être complétée en intégrant) :

- les calcaires à astéries, en rive gauche de la Garonne et dans l'Entre-Deux-Mers, et les calcaires de Castillon, y compris sous couverture molassique (entités BD LISA 324AA01, 324AA03 et 326AA03) ;
- en rive gauche de la Garonne, les faluns, grès et calcaires de l'Aquitanien-Burdigalien (entité BD LISA 320AA01), y compris sous couverture ;
- les calcaires de l'Agenais, inclus sous BD LISA dans les molasses oligo-miocènes du Bassin aquitain (322AA03).

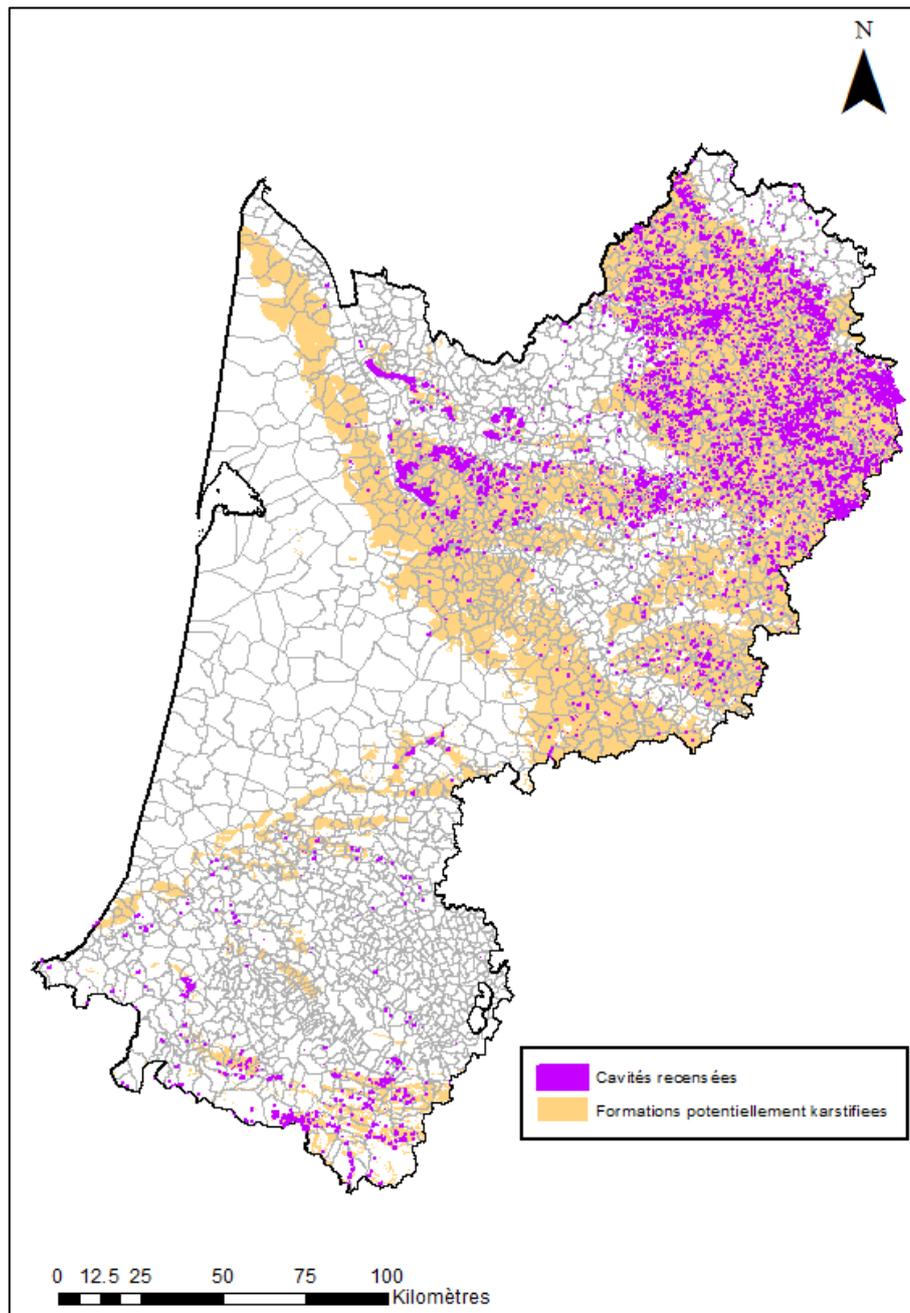


Illustration 21 : Recensement des cavités souterraines et des formations géologiques potentiellement karstifiées

Qualification de l'aléa

Pour les communes disposant d'une cartographie détaillée de l'aléa, la méthodologie fixée est la suivante, conformément au guide :

- niveau fort : zone potentiellement concernée par des effondrements localisés, généralisés ou en masse ;
- niveau moyen : zone potentiellement concernée par un aléa affaissement progressif.

Les effondrements effectifs recensés par la base de données des mouvements de terrain et par le Bureau des Carrières de la Gironde ont également été rattachés à un aléa fort, avec une zone d'influence de 50 m.

Sur toutes les communes qui ne bénéficient pas d'une cartographie détaillée de l'aléa "effondrement", la méthodologie arrêtée repose sur le critère de densité des cavités connues. Seules les cavités avec une localisation précise ont été prises en considération ; toutes les données imprécises au centroïde de la commune ont été éliminées. A chaque point a été affectée une zone tampon, dont le rayon est égal à l'imprécision de la donnée, majorée d'une zone d'influence de 50 m.

Sur cette base, la qualification de l'aléa à la maille de 100 x 100 m ne peut pas se baser sur les critères de densité utilisés par la carte nationale. Pour affiner le traitement, les critères retenus sont les suivants :

- susceptibilité forte : ≥ 2 cavités recensées par maille,
- susceptibilité moyenne : 1 cavité recensée par maille,
- susceptibilité faible : présence d'une formation géologique susceptible de contenir des cavités,
- susceptibilité nulle : pas de cavité recensée et pas de formation géologique susceptible d'en contenir.

L'illustration 22 ci-dessous donne un premier aperçu de la cartographie de l'aléa à l'échelle de l'Aquitaine.

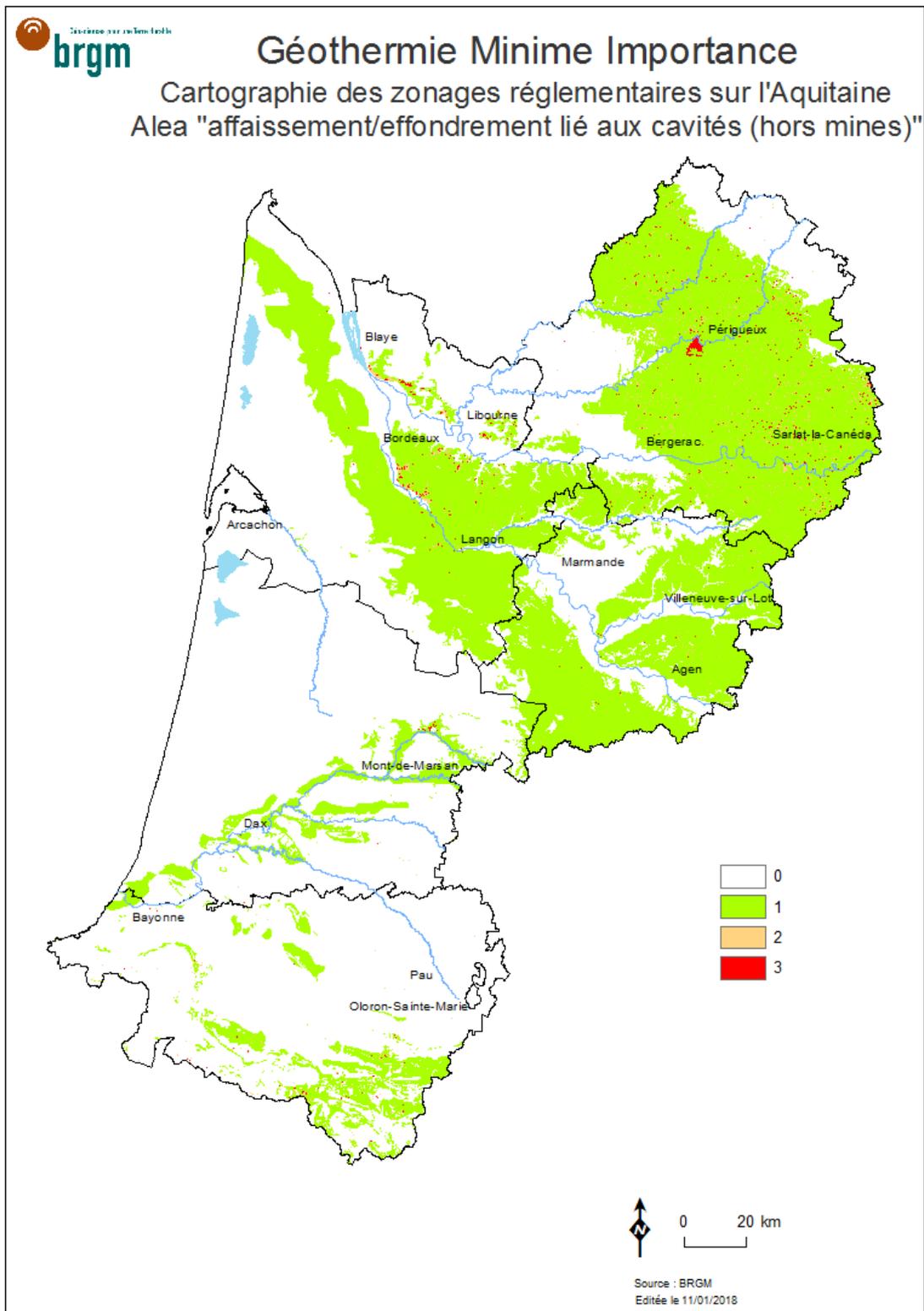


Illustration 22 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)"

4.3.3. Aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière"

Phénomène redouté

Il s'agit ici d'effondrements localisés (de type « fontis ») et généralisés, ainsi que des affaissements. De par leur brutalité, les effondrements localisés et généralisés sont susceptibles de mettre en péril la sécurité des personnes. Ils génèrent donc un impact plus fort que celui associé aux affaissements (phénomènes plus lents), qui n'induisent un risque économique « en ne mettant en péril que » 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. Ces phénomènes pourraient donc 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.

Il n'existe pas de carte de ce phénomène à l'échelle nationale actuellement en France. Localement, sans prise en compte de la spécificité de la géothermie et de ses interactions avec les cavités minières, des études ont pu être menées sur l'aléa mouvements de terrain liés aux cavités minières au niveau des bassins et concessions miniers ou au niveau communal (PPRM). L'ensemble de ces études est effectué par le GIP Geoderis.

Activités minières disposant d'études sur les aléas

Les données sur les aléas associés aux activités minières (actuelles et anciennes) ont été fournies par la DREAL Nouvelle-Aquitaine :

- études détaillées des aléas effectuées par Geoderis :
 - Lалуque et Larquier (40)
 - Le Lardin-Saint-Lazare (24)
 - secteur de Sarlat (24)
- études des aléas dans le cadre d'une déclaration d'arrêt définitif de travaux miniers, validées par Geoderis :
 - Bidart - Gortiaque (64)
 - Harretchia-Eyhartza (64)
- études de qualification rapide des aléas effectuées par Geoderis :
 - Dax - Boudigot (40)
 - Brindos - Bassussarry et Anglet (64)
 - La Chapelle Péchaud - Castelnau-la-Chapelle (24)
 - Dax (40)
 - Larralde (64)
 - Oraas / Salies-de-Béarn (64)
- études des aléas dans le cadre d'une déclaration d'arrêt définitif de travaux miniers en cours d'étude : Urcuit - Saint-Jouan (64).

L'ensemble des cartes d'aléa englobait pour chaque site des emprises supérieures aux aires exploitées : la notation d'aléa de niveau faible est écartée de facto. Conformément au guide

méthodologique, les aléas identifiés de tassement et d'affaissement ont été qualifiés avec un niveau moyen (phénomènes lents). Les aléas identifiés d'effondrement ont été qualifiés avec un niveau fort.

La précision de ces données a fait l'objet d'une concertation avec la DREAL :

- les études détaillées des aléas effectuées et les études réalisées dans le cadre d'une déclaration d'arrêt définitif de travaux sont basées sur des données précises, validées sur le terrain : il ne leur a pas été adjoint de zone tampon ;
- les études de qualification rapide des aléas et l'étude en cours (Urçuit) ne sont en l'état pas basées sur des validations de terrain complètes, et reposent essentiellement sur des données bibliographiques : une zone tampon de 300 m a été appliquée.

Plusieurs de ces études évaluaient également les aléas relatifs aux glissements de terrain : ils ont été pris en compte dans le volet propre à cette typologie d'aléa (cf. 4.3.4).

Activités minières ne disposant pas d'études sur les aléas

En l'absence de carte d'aléa existante, les données ponctuelles suivantes ont été utilisées et croisées :

- les données du GeoKiosk,
- l'inventaire des Ressources Minières du territoire métropolitain, achevé en 1992, répertorié sur le site SIG Mines.

Sur l'ensemble de ces inventaires, seuls les sites identifiés comme ayant fait l'objet d'une exploitation ont été conservés ; et les sites de prospection ont été éliminés.

Le SIG Mines recense au total 75 sites d'extraction sur l'Aquitaine. Les titres miniers recensés sur la région par la DREAL (données 2014) sont au nombre de 121, depuis la mise en place de la législation minière en 1810, hors hydrocarbures ; dont 72 concessions. Seuls deux sites sont encore en exploitation : Oraàs et Saint-Pandelon (exploitations de sel).

Il est à noter que ces données d'inventaire ne disposent que d'une localisation ponctuelle : aucune information d'emprise n'est disponible pour les sites d'Aquitaine. Les coordonnées XY correspondent uniquement à une localisation approximative du gîte, sans réalité géographique : il peut s'agir des coordonnées du principal site d'extraction, du barycentre des différents sites, de l'implantation des principales infrastructures. Au vue des décalages observés sur certains sites avec les localisations effectives des extractions, et en concertation avec la DREAL, il a été appliqué une zone tampon de 1,5 km sur ces localisations. Cette valeur permet de couvrir l'ensemble des incertitudes.

Certains sites ont été supprimés car le degré de connaissance sur les modalités d'exploitation était suffisant. C'est notamment le cas des exploitations de lignite mio-pliocènes dans le triangle landais (Arjuzanx, Hostens), dont l'extraction se faisait à ciel ouvert : absence de cavités et de risques d'effondrement associés.

Qualification de l'aléa

Pour les activités minières disposant d'une cartographie détaillée de l'aléa, les niveaux d'aléas pour la présente étude ont été attribués conformément au guide méthodologique :

- Niveau fort : zone potentiellement concernée par des phénomènes d'effondrements localisés et généralisés en lien avec une exploitation minière passée ou actuelle ;
- Niveau moyen : zone potentiellement concernée par des phénomènes d'affaissement progressif (phénomènes lents) ;
- Niveau nul : zones sans exploitations minières connues.

Sur toutes les activités minières (actuelles et anciennes) qui ne bénéficient pas d'une cartographie détaillée de l'aléa "effondrement / affaissement", il sera tenu compte d'une zone d'influence potentielle autour du site, sur laquelle le phénomène ne peut être écarté a priori. Compte tenu de l'imprécision des connaissances, l'aléa ne peut être considéré que comme faible sur ces emprises.

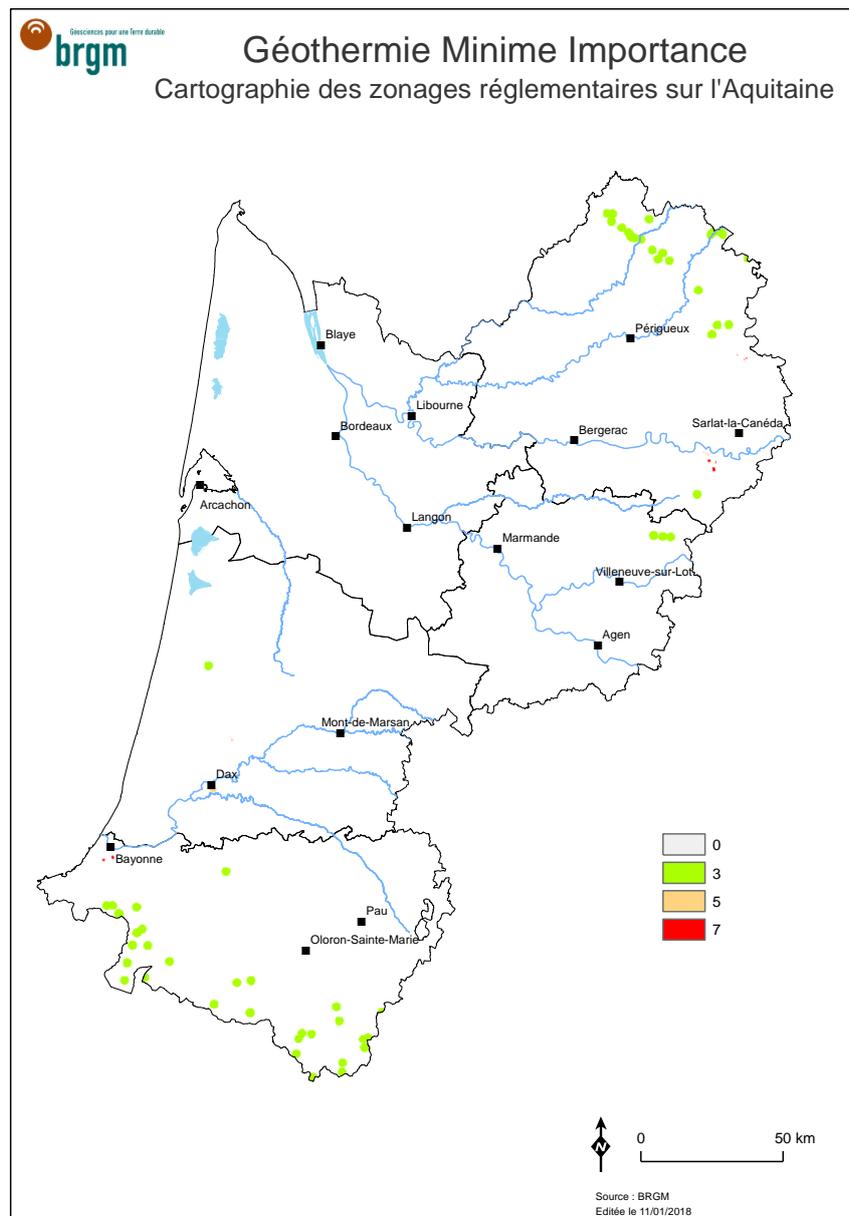


Illustration 23 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "affaissement/effondrement lié aux cavités minières"

4.3.4. Aléa "glissement de terrain"

Phénomène redouté

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 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 ou souterraines ou, le fluide caloporteur. 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.

Secteurs disposant d'études sur les aléas

Les données des plans de prévention des risques naturels ont été utilisées en priorité, sous réserve de leur disponibilité et de leur exploitabilité. Elles ont été recueillies sur la base de données Carmen et auprès des DDT :

- pour la Gironde, plusieurs PPR sont approuvés et plusieurs cartes sont soumises à concertation ; cependant, seule la commune de Blaye dispose de données d'aléa au format SIG et diffusables ;
- pour le Lot-et-Garonne, les communes suivantes disposent de données utilisables sur l'aléa "glissement de terrain" : Agen, Aiguillon, Bajamont, Bazens, Bon-Encontre, Castelculier, Colayrac-saint-Cirq, Foulayronnes, Lafox, Layrac, Le Passage, Moirax, Pont-du-Casse, Port-Sainte-Marie, Saint-Hilaire de Lusignan,
pour les communes disposant de données détaillées sur les risques, mais pas sur les aléas associés, il s'agit des PPR (ou PER) les plus anciens ; la lecture des règlements particuliers démontre que les risques sont directement déclinés des aléas ; les données ont par conséquent été utilisées sur cette base sur les communes suivantes : Clermont-Dessous, Clermont-Soubiran, Nicole, Saint-Jean-de-Thurac, Saint-Romain-le-Noble, Vianne ;
- pour les Pyrénées-Atlantiques, les communes suivantes disposent de données utilisables sur l'aléa "glissement de terrain" : Accous, Aydius, Bedous, Beost, Cette-Eygun, Gere-Belesten, Larrau, Lees-Athas, Lescun, Licq-Atherey, Lourdios-Ichère, Osse-en-Aspe, Saint-Engrace ; la commune de Louvie-Soubiron disposait également de données SIG sur les risques, qui ont pu être convertis en aléas par un traitement appliqué sur la base du règlement particulier ;
- pour la Dordogne, seules les communes de Cénac-et-Saint-Julien, Domme, Sarlat et Terrasson-Lavilledieu disposent d'études des aléas relatives aux glissements de terrain utilisables.

Il est à noter que sur les départements de la Dordogne et du Lot-et-Garonne, certains PPR "mouvements de terrain" ne concernent que les retraits-gonflements des argiles, et ne sont par conséquent pas concernés par les forages géothermiques. Les aléas "chutes de blocs" ont également été exclus.

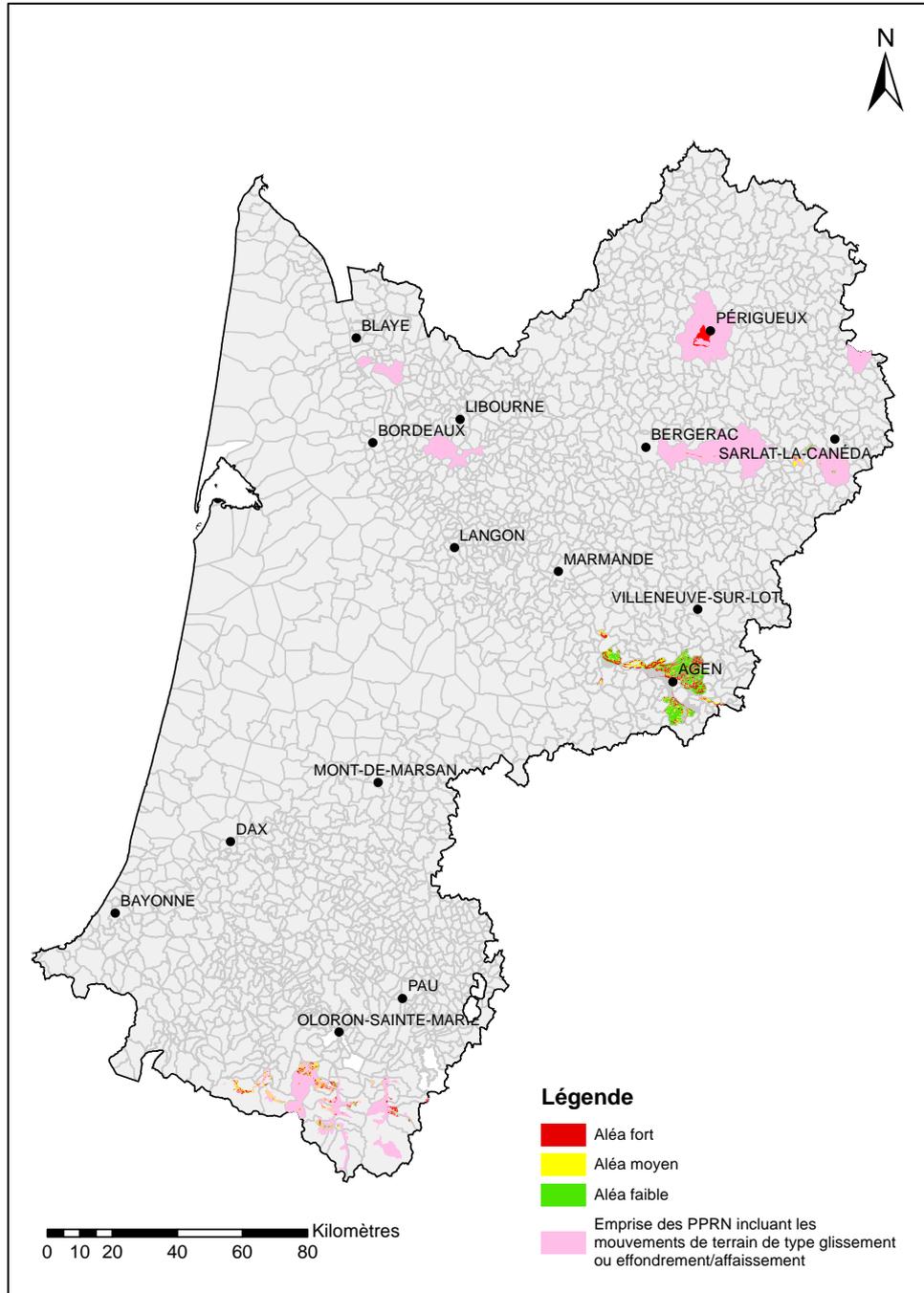


Illustration 24 : PPRN et zonages des aléas pris en compte pour l'aléa "glissement de terrain"

Ont été ajoutées à ces données les aléas, identifiés par Geoderis, de glissement de terrain associés aux activités minières (cf. 4.3.3.). Les aléas associés aux effondrements ont été reversés dans la catégorie correspondante.

Secteurs ne disposant pas d'études sur les aléas

En l'absence de cartographie (PPR ou carte d'aléa), la quantification de l'aléa est fondée sur les données d'inventaire des phénomènes recensés dans la base de données nationale des mouvements de terrain (<http://www.bdmvt.net/>). Parmi les mouvements de terrain recensés sur le territoire, seuls les événements de type "glissements de terrain" ont été considérés. Les événements dont les localisations ne sont pas connues (localisation au centroïde de la commune ou au kilomètre) ont été éliminés.

Ces données ont été complétées par les événements les plus récents, non recensés dans la base de données, et sur lesquels le BRGM est intervenu en expertise pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Ces données ont été validées par croisement avec les listes des arrêtés de catastrophes naturelles, fournis par les préfetures, après sollicitation.

La base de données des mouvements de terrain recense 454 glissements de terrain sur le territoire, auxquels ont été ajoutés 59 événements récents. Conformément à la méthodologie, une zone tampon a été affectée à chaque point pour intégrer sa zone d'influence. Son rayon est de 100 m, augmenté de la précision de positionnement géographique de la donnée.

Qualification de l'aléa

Conformément au guide méthodologique, des niveaux d'aléa significatifs ont été affectés aux secteurs disposant d'étude spécifique :

Niveau d'aléa dans les études spécifiques	Niveau d'aléa affecté pour la cartographie relative à la géothermie de minime importance
Fort	Très fort
Moyen	Fort
Faible	Faible

Pour le reste du territoire, les niveaux d'aléa affectés restent limités : le postulat est que les aléas définis à l'issue d'une étude spécifique auront un poids plus fort que ceux issus d'un simple traitement statistique. Pour chaque maille comportant un mouvement de terrain recensé au minimum, il a été choisi d'affecter un aléa moyen.

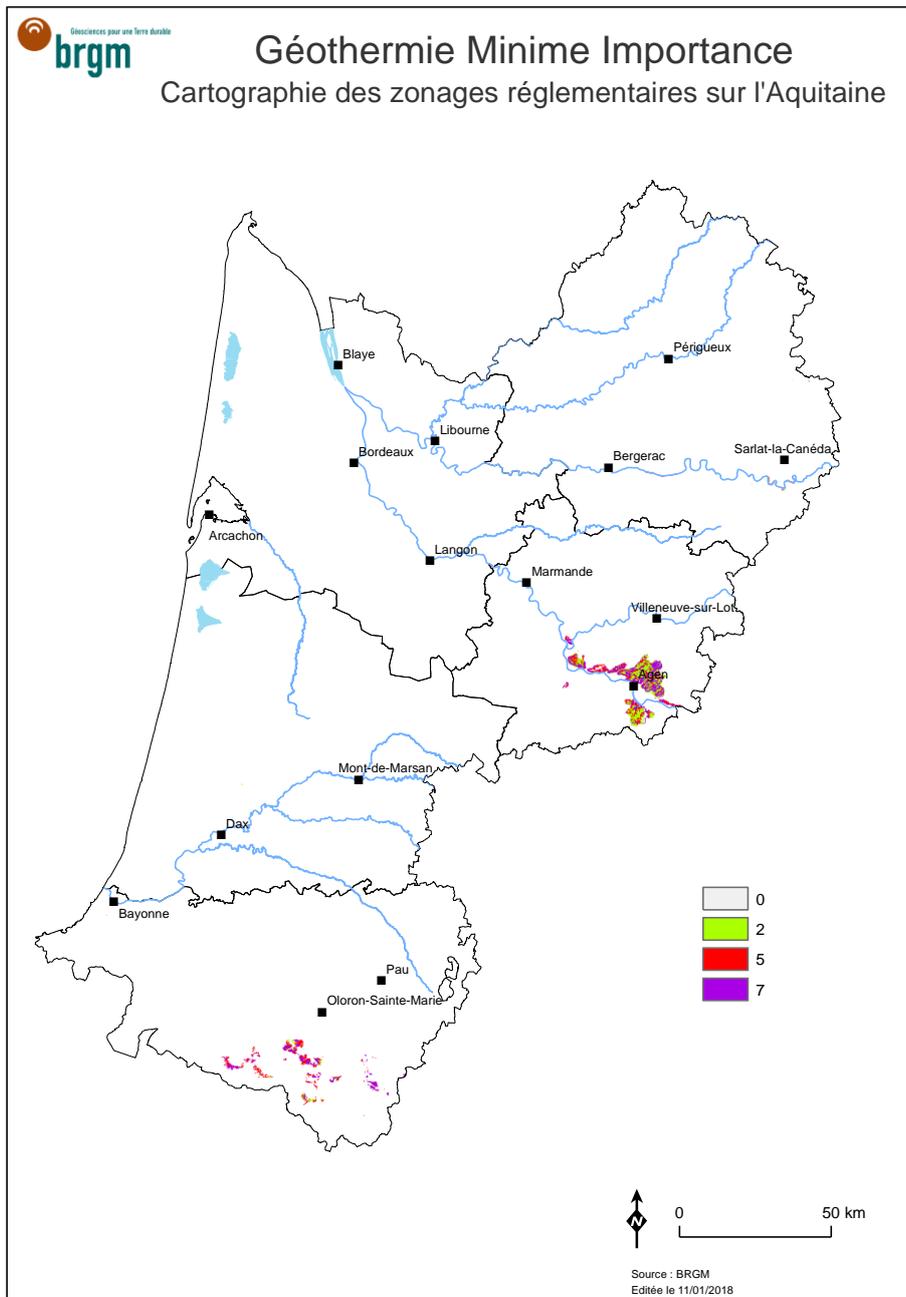


Illustration 25 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "mouvements de terrain de type glissement"

4.3.5. 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.

Données disponibles

La base de données Basol recense les sites pollués et potentiellement pollués : au total 611 sites recensés sur le territoire aquitain, dont 445 bénéficient d'une localisation, et 242 font état d'une pollution de nappe souterraine. Cette base de données est la seule disponible et utilisable en l'état des connaissances. Mais il est important de garder en mémoire ses limites : elle résulte d'un examen bibliographique et ne peut pas être exhaustive. Sur le rendu, on peut notamment s'étonner de la faible densité de points recensés autour des principales agglomérations de la région.

Les données extractibles de Basol ne recensent pas les molécules impliquées. Mais un parallèle peut être effectué entre l'activité du site et les polluants potentiellement émis, à partir de la matrice activités-polluants construite dans le cadre du programme annuel MEDDE-BRGM 2014 (Aubert et Koch-Mathian, 2014).

Qualification de l'aléa

Conformément à la méthodologie nationale, quatre niveaux d'aléa ont été définis, pour tous les sites Basol bénéficiant d'une localisation :

- aléa fort : présence d'un site Basol avec pollution de nappe avérée ;
- aléa moyen : présence d'un site Basol susceptible de présenter des contaminants non métalliques ou du mercure ;
- aléa faible : présence d'un site Basol susceptible de présenter des contaminants métalliques ;
- aléa nul : absence de site Basol identifié.

Une zone tampon de 500 m a été prise en compte autour de chaque site. En l'absence d'identification de l'activité du site, un aléa faible lui a été affecté, l'objectif étant de conserver l'information.

Les retours d'expérience sur les sites Basol montrent que les pollutions considérées ont en règle générale une extension spatiale très restreinte, alors même que le territoire aquitain se spécifie par des surfaces communales très étendues. Par conséquent, les sites Basol ne disposant pas de localisations précises n'ont pas été intégrés, car la pénalisation de l'intégralité d'un territoire communal n'est pas justifiable.

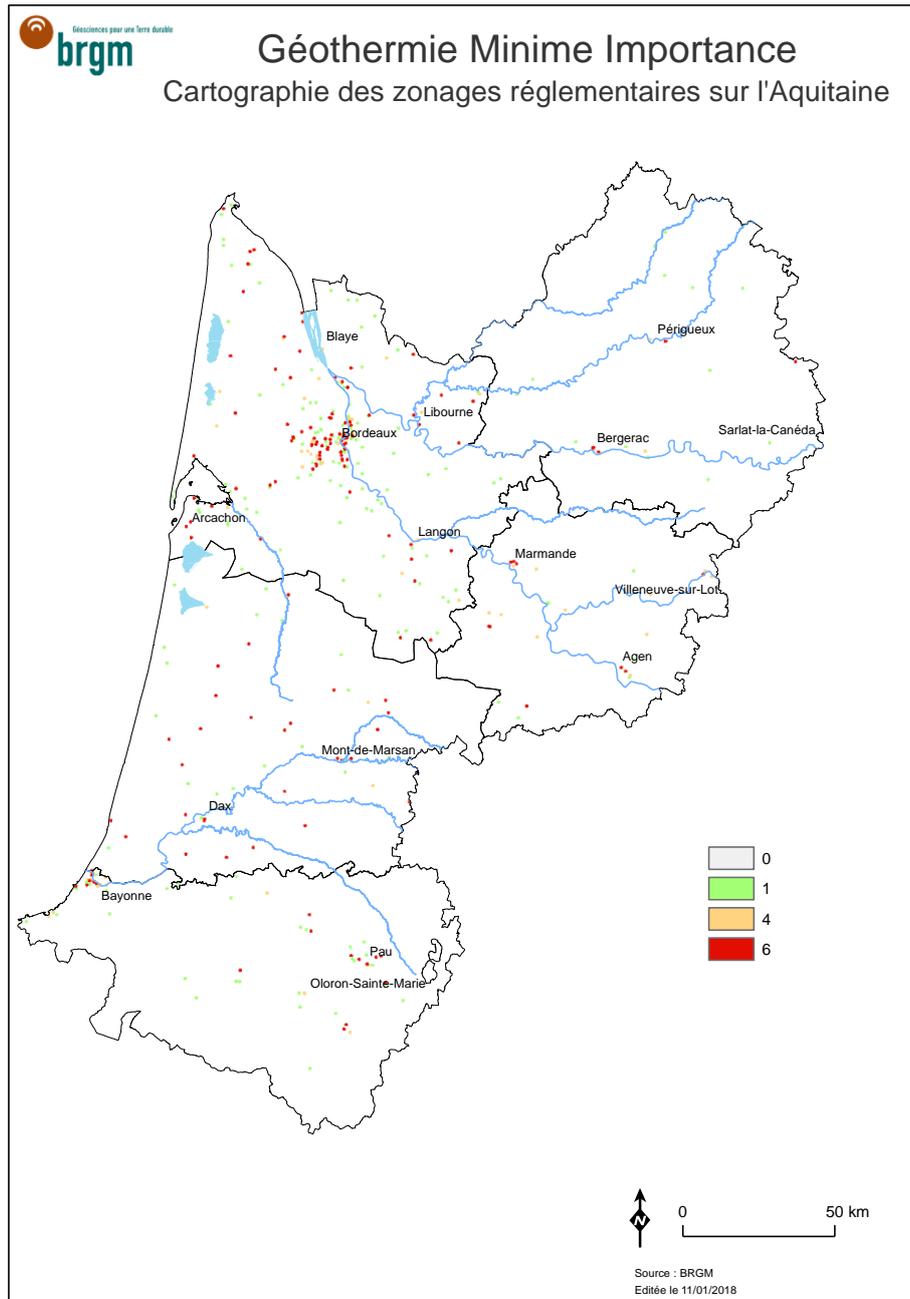


Illustration 26 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "pollution des sols et des nappes d'eau souterraine"

4.3.6. 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.

Données disponibles

Il n'existe pas de carte à l'échelle nationale ou régionale de ce phénomène.

Sur le territoire aquitain, les données disponibles sont de deux types :

- données piézométriques simulées dans le domaine sédimentaire : issues des modèles hydrodynamiques Nord-Aquitain (MONA v3.3) et Sud-Adour-Garonne (MSAG v1) ;
- données ponctuelles identifiant les forages artésiens, dans la banque du sous-sol.

Il existe une bonne corrélation entre l'occurrence de forages artésiens et les mailles des modèles identifiant des nappes potentiellement artésiennes : ceci valide de facto l'utilisation des données des modèles pour la caractérisation de cet aléa.

Qualification de l'aléa

Trois niveaux d'aléa ont été définis, sur l'emprise des deux modèles et pour chacune des tranches 0-50 m, 0-100 m, 0-200 m :

- aléa fort : présence d'au moins un aquifère présentant un niveau piézométrique simulé au-dessus du sol dans la tranche considérée ;
- aléa moyen : présence d'au moins un aquifère présentant un niveau piézométrique simulé entre 0 et 1 m sous le sol dans la tranche considérée ;
- aléa nul : absence d'aquifère captif identifié ou présence d'aquifère(s) présentant un niveau piézométrique simulé au-delà de 1 m sous le sol dans la tranche considérée.

Les cartographies finales, déclinées en fonction de la profondeur, sont données en page suivante sur l'illustration 27.

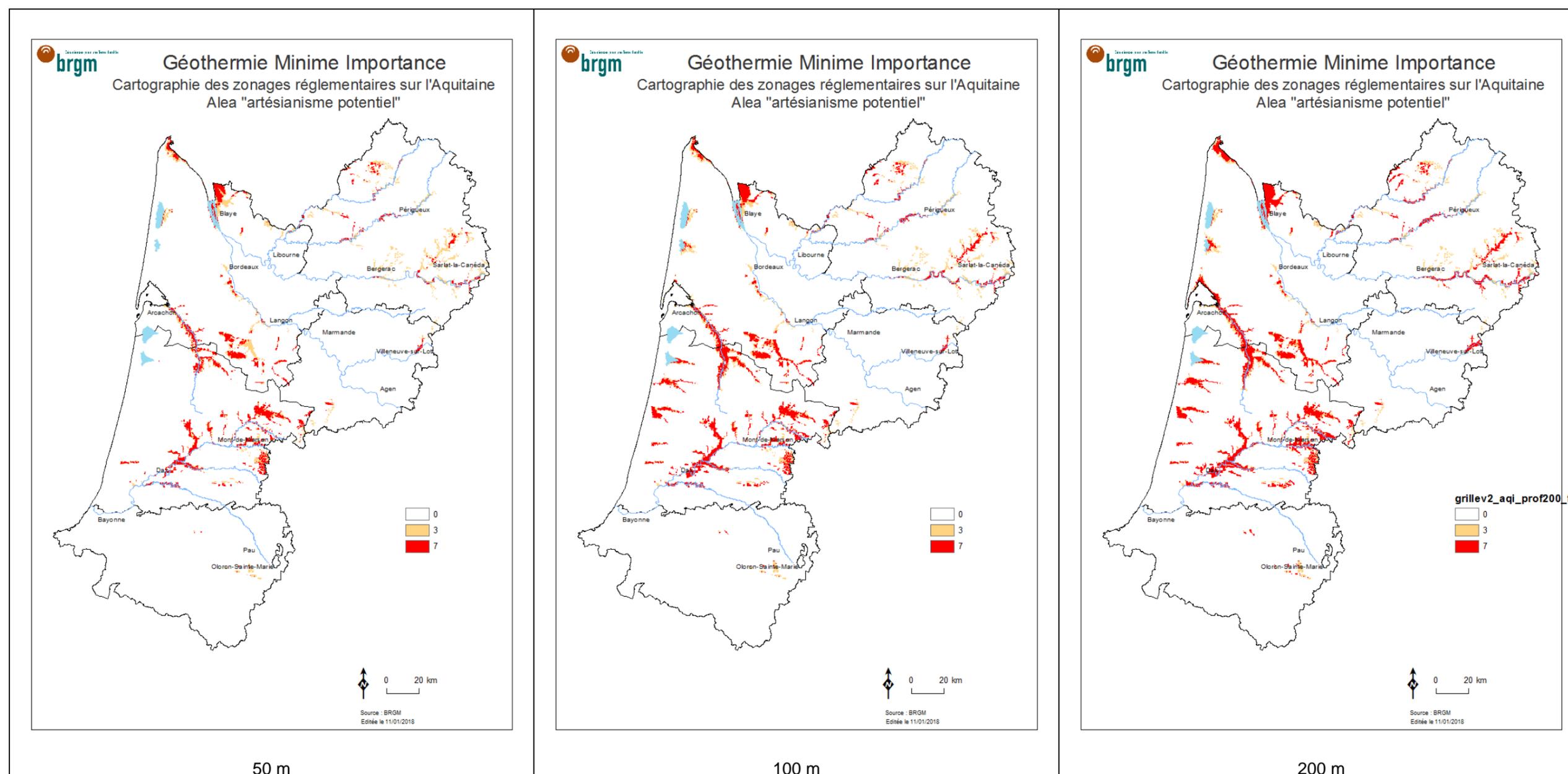


Illustration 27 : Aperçu des cartographies de l'aléa "artésianisme potentiel"

4.3.7. 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 potentiel hydraulique entre les aquifères est marquée.

Données disponibles

L'atlas national s'était basé sur le référentiel BD LISA et les données des atlas des potentiels géothermiques et des modèles existants (Modèle Nord-Aquitain, Modèle Sud Adour Garonne). 41,5 % de la superficie du territoire aquitain n'était pas concernée par le phénomène (absence d'aquifères superposés identifié sur la tranche 0-200 m). Le reste du territoire était caractérisé par la présence de plusieurs aquifères considérés comme ressources stratégiques.

La déclinaison à échelle régionale se basera également sur ces modèles, qui permettent de couvrir l'empilement sédimentaire sur le Bassin aquitain. Aux entités aquifères identifiées sur leur emprise ont été ajoutées les entités alluviales BD Lisa :

- Alluvions de la vallée de l'Adour (948)
- Alluvions de la vallée de la Garonne (946)
- Alluvions de la vallée de la Dordogne (942)
- Alluvions de l'estuaire de la Gironde (944)

Sur le reste du territoire, il n'existe pas d'aquifères superposés sur les 200 premiers mètres.

Qualification de l'aléa

La méthodologie nationale propose deux niveaux d'aléas distincts en cas de traversée de plusieurs aquifères, en distinguant par une susceptibilité supérieure les aquifères considérées comme stratégiques. Au vue des enjeux quantitatifs et qualitatifs sur les ressources en eau souterraine en Aquitaine, cette distinction ne sera pas faite et l'ensemble des aquifères sera considéré comme stratégique.

La qualification reposera sur deux niveau d'aléa :

- aléa nul : pas plus d'un aquifère dans la tranche de terrain considérée ;
- aléa fort : plus d'un aquifère dans la tranche de terrain considérée.

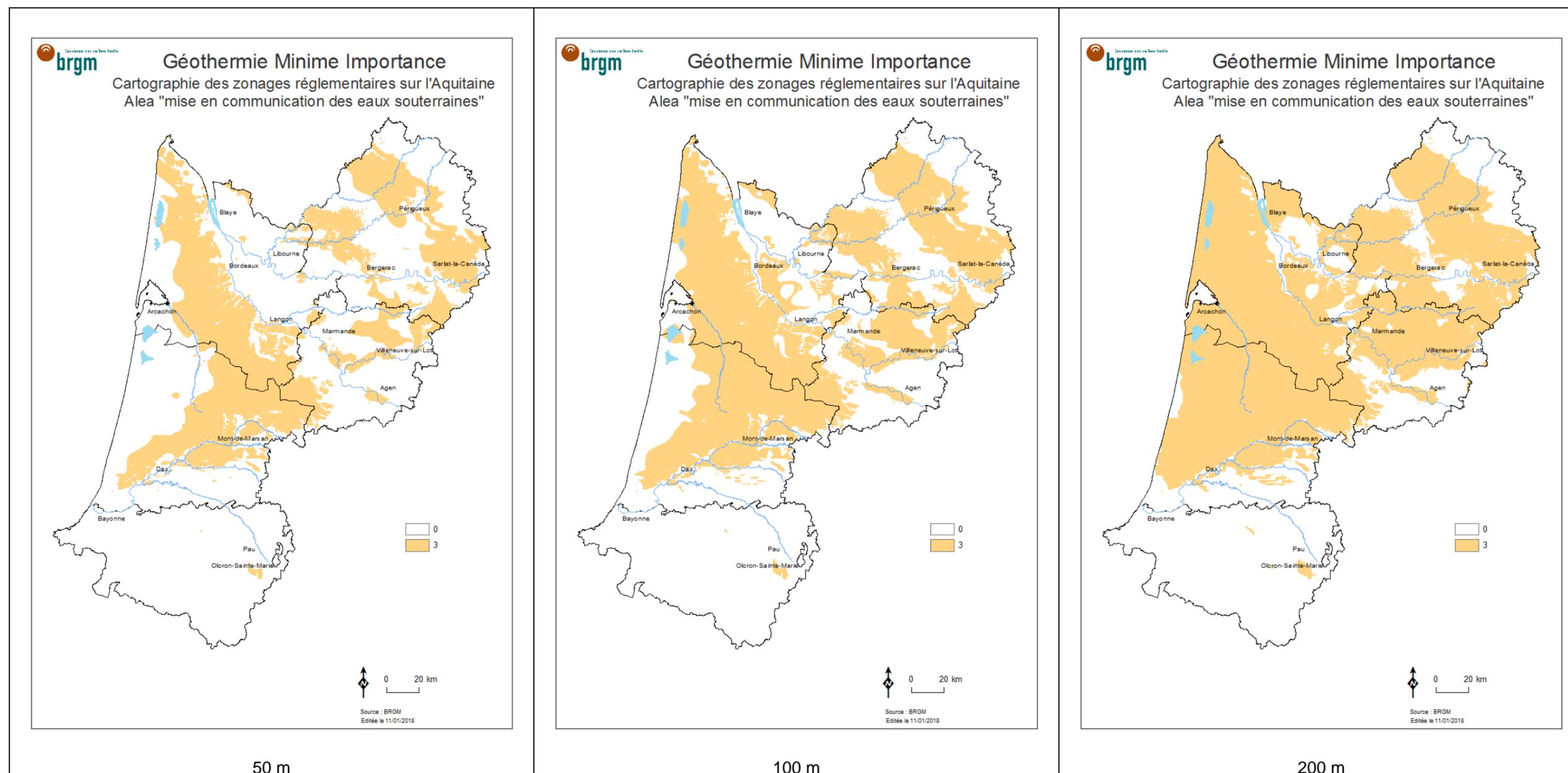


Illustration 28 : Aperçu des cartographies de l'alea "mise en communication des eaux souterraines"

4.3.8. Aléa "remontée de nappe"

Phénomène redouté

Le phénomène d'inondation par remontée de nappe correspond à une remontée de nappe due à une surcote pouvant être provoquée 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 100x100 mètres.

Données disponibles

La qualification du phénomène d'inondation par remontée de nappe à l'échelle régionale peut s'appuyer sur la cartographie nationale (données sur le site Internet <http://www.inondationsnappes.fr>). Toutefois, cette carte ne fournit pas une résolution suffisante sur les formations plio-quadernaires du triangle landais.

Sur l'emprise du triangle landais, les données du modèle Mio-Plio-Quaternaire en cours de développement (Cabaret et al., 2017), notamment les cotes piézométriques de référence calées en régime permanent, apportent des indicateurs plus fiables.

Qualification de l'aléa "remontée de nappe".

Deux niveaux d'aléa ont été définis :

- aléa faible :
 - sur l'emprise du modèle Mio-Plio-Quaternaire, niveau piézométrique des entités affleurantes situé entre 0 et 5 m sous le sol,
 - sur le reste du territoire, aléa "remontée de nappe" faible à fort dans la cartographie nationale ;
- aléa nul :
 - sur l'emprise du modèle Mio-Plio-Quaternaire, niveau piézométrique des entités affleurantes situé au-delà de 5 m sous le sol,
 - sur le reste du territoire, aléa "remontée de nappe" très faible à nul dans la cartographie nationale.

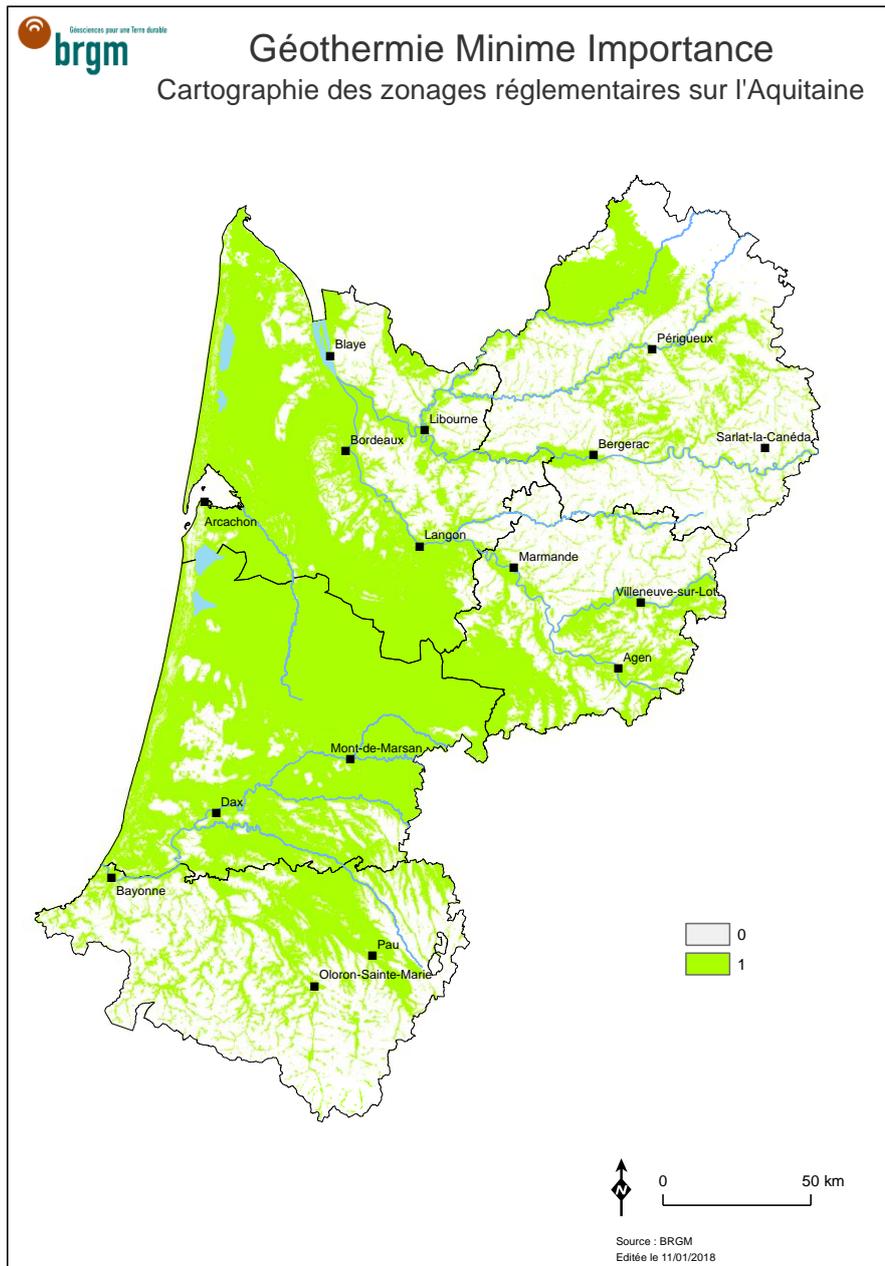


Illustration 29 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "remontée de nappe"

4.3.9. Aléa "biseau salé"

Phénomène redouté

En zone côtière, la nappe d'eau douce est en contact direct avec la nappe d'eau salée plus dense. Le simple fait de trop pomper, ou le défaut d'alimentation d'une nappe à la suite d'une période moins pluvieuse, suffit à permettre à l'eau salée de "polluer" une nappe d'eau douce utilisée pour l'irrigation, l'industrie ou l'eau potable, ou surtout conduit au déplacement de l'interface eau salée/eau douce.

La remontée du biseau salé vers l'intérieur des terres constitue un phénomène difficilement réversible, l'eau salée se comportant comme une "limite étanche". Une fois que le biseau s'est déplacé, le gradient hydraulique requis pour le faire reculer est bien plus important que la situation d'équilibre initiale. Ainsi les aquifères littoraux sont le lieu de rencontre de deux types d'eaux souterraines :

- des eaux douces provenant de l'infiltration des précipitations et des eaux de ruissellement au niveau de la surface continentale ;
- des eaux salées qui imprègnent les terrains au voisinage des côtes ou pénètrent les cours d'eau au niveau des estuaires, pouvant ainsi donner lieu à la salinisation des eaux souterraines.

Les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières : l'eau douce, d'une densité moindre que l'eau salée, « flottant » sur l'eau salée. L'intrusion d'eau salée prend la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément « biseau salé ». L'interface entre ces deux types d'eau va évoluer au cours du temps en fonction de facteurs naturels (précipitations, niveau marin) mais peut aussi être perturbée par l'exploitation des aquifères.

L'envahissement, même provisoire, d'une partie d'un aquifère par de l'eau salée peut durablement altérer la qualité de l'eau de celui-ci.

Données disponibles

Il n'existe pas d'étude globale de quantification de l'aléa associé aux intrusions d'eau salée à l'échelle du territoire aquitain. La seule étude étendue est la définition des zones à risque du SAGE Nappes Profondes, dans l'Eocène au nord du territoire (pointe du Médoc et estuaire). Sur ce secteur, la présence d'eaux minéralisées peut être liée à des intrusions effectives, mais peut également être l'héritage de l'invasion d'horizons peu perméables par l'eau de mer lors de la transgression flandrienne.

Les autres données sont clairement éparpillées, car les enjeux sont très disparates sur le territoire :

- quelques valeurs élevées de conductivité peuvent être constatées dans les piézomètres de suivi qualité de la base ADES, de manière très isolée et à proximité immédiate du littoral ;
- la thèse de J. Prevot (1965 - Etude de la nappe phréatique d'Anglet - relations avec les eaux salées de l'océan et de l'Adour) traite d'un domaine extrêmement restreint.

Dans le cadre de la Convention Eaux Souterraines de la région Aquitaine (Corbier et al., 2011), les analyses physico-chimiques conduites sur le territoire des SAGE qui incluent la zone littorale (Born-et-Buch et Lacs Médocains) n'ont pas montré d'invasion notable du Mio-Plio-Quaternaire par les eaux salées. Les seuls indices de minéralisation excessive concernent les eaux de

surface, dans les canaux reliant les étangs littoraux. Il apparaît que la nappe du Plio-Quaternaire est naturellement protégée des intrusions d'eau salée par la crête piézométrique au droit du cordon dunaire : le biseau salé sera nécessairement restreint à une mince frange littorale. Seule l'action anthropique est susceptible de modifier localement cet état (prélèvements excessifs).

Il n'existe ensuite pas d'indice d'invasions par des eaux salées dans les aquifères captifs sous-jacents, dont les exutoires sont de surcroît mal connus. L'aléa ne pourra pas être caractérisé sur ces aquifères profonds.

Qualification de l'aléa

En l'état actuel des connaissances, l'aléa "biseau salé" ne peut être considéré comme significatif sur le littoral océanique, à l'exception des zones à risque de salinisation de l'Eocène identifiées vers l'estuaire de la Gironde. Quelle que soit l'origine de cette salinisation, l'implantation d'un doublet géothermique à proximité est susceptible de la déplacer, il est par conséquent important de considérer cet aléa.

Trois classes ont été retenues :

- aléa fort : zone à risque de salinisation fort identifiée pour la nappe de l'Eocène dans le secteur de l'estuaire ;
- aléa faible : zone à risque de salinisation moyen ou faible identifiée pour la nappe de l'Eocène dans le secteur de l'estuaire ;
- aléa nul : hors zone à risque de salinisation.

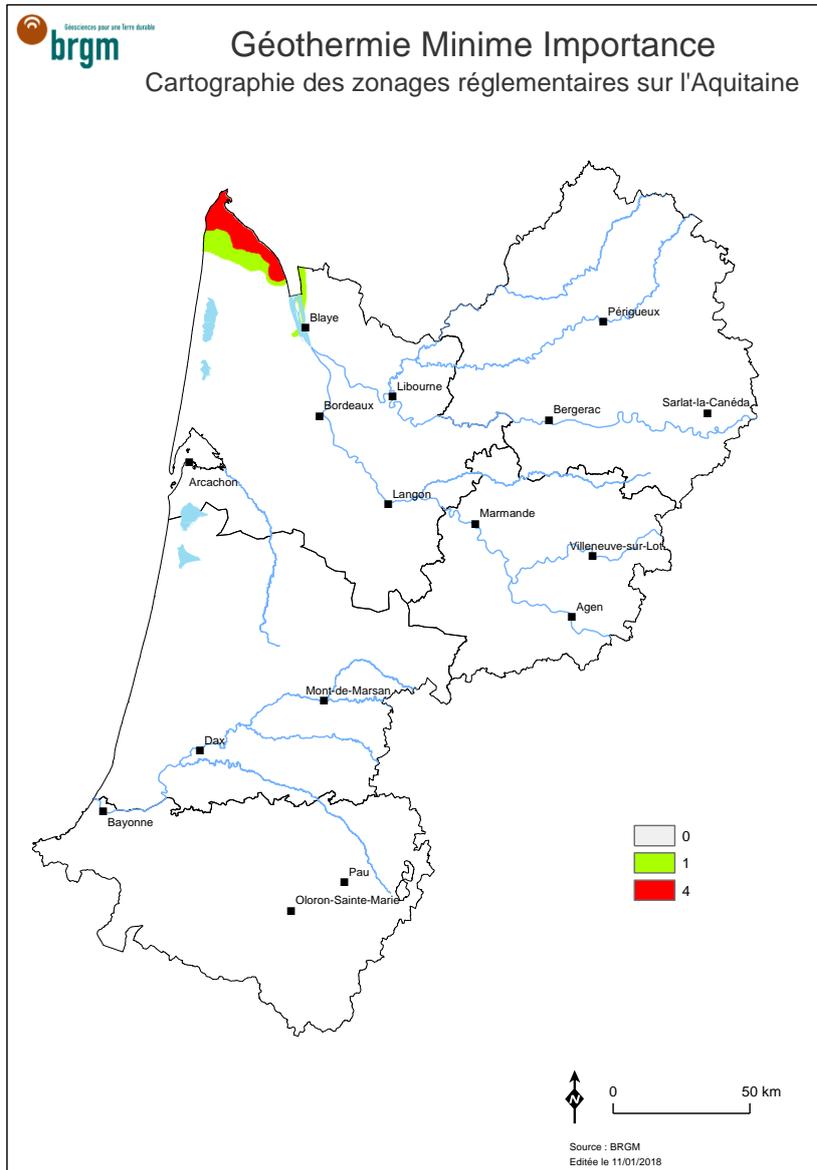


Illustration 30 : Aperçu de la cartographie de l'aléa "biseau salé"

4.4. TRAITEMENT FINAL ET EDITION DES CARTES REGLEMENTAIRES

Le traitement final a été effectué conformément au guide national, en appliquant les facteurs de pondération et les facteurs aggravants donnés dans le tableau ci-après (Tableau 4) :

	Déclinaison profonde	Facteurs de pondération					Facteur aggravant	
		Aléa très faible	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort	Aléa très fort	Forage d'eau	Sonde géothermique
Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques	non		1	5	7		6	10
Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)	non		1	2	3		2	2
Affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière	non		3	5	7		2	2
Glissement de terrain	non	1	2	3	5	7	2	2
Pollution des sols et des nappes souterraines	non		1	4	6	10	3	3
Artésianisme potentiel	oui			3	7		2	4
Mise en communication des eaux souterraines	oui			3			4	4
Remontée de nappe	non		1				2	0
Biseau salé	non		1		4		4	0

Tableau 4 : Facteurs de pondération et facteurs aggravants appliqués par type d'aléa

Les aperçus des zonages réglementaires finaux sont données sur l'illustration 31 pour les échangeurs ouverts et sur l'illustration 32 pour les échangeurs fermés.

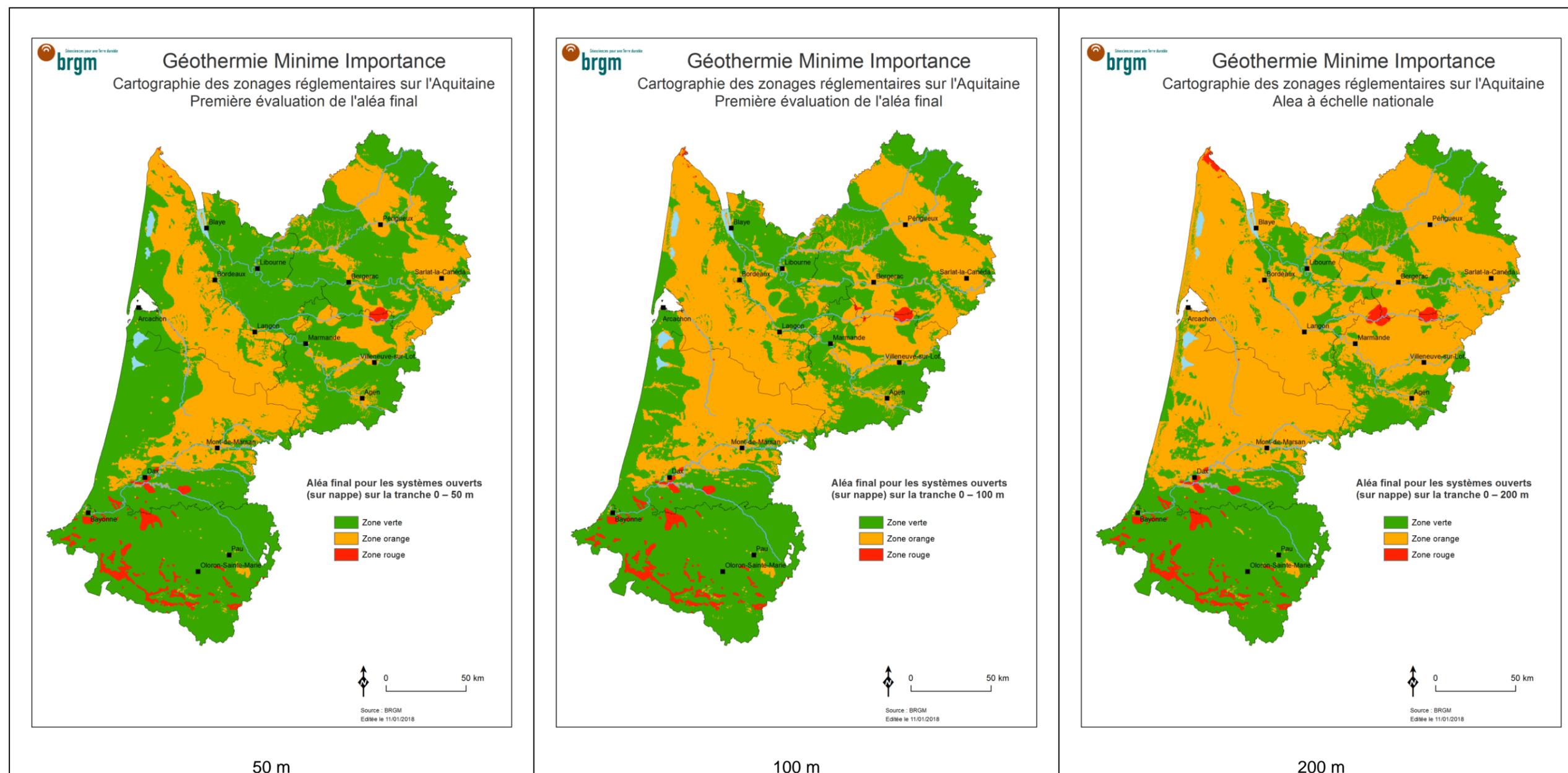


Illustration 31 : Aperçu des zonages finaux pour les échangeurs ouverts

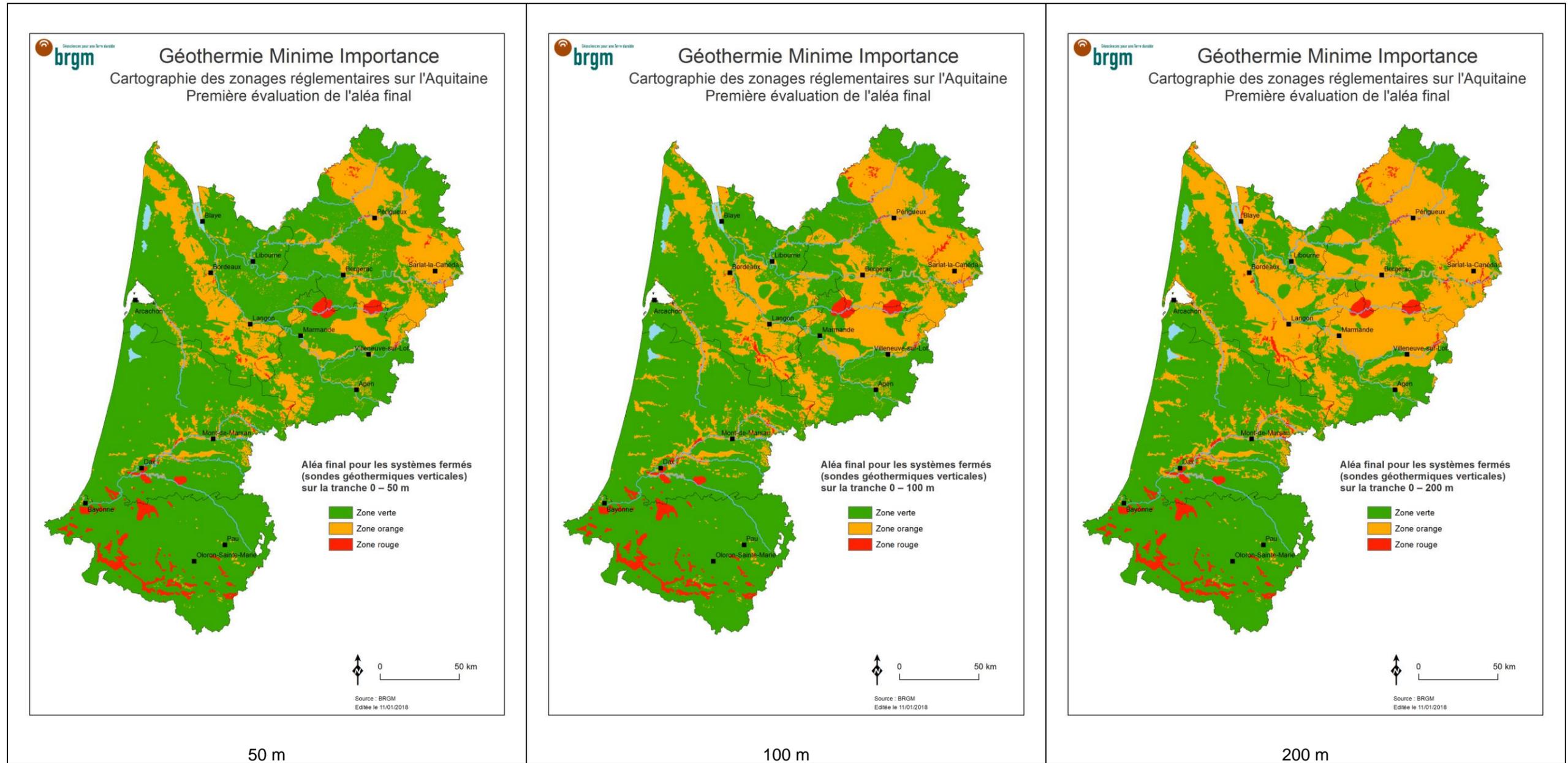


Illustration 32 : Aperçu des zonages finaux pour les échangeurs fermés

4.5. COHERENCE REGIONALE

La comparaison des cartes finales sur l'Aquitaine avec celles en cours de finalisation sur le Limousin, à la limite entre les départements de la Dordogne et de la Corrèze, figure sur l'illustration 33 et l'illustration 34. Il apparaît une bonne cohérence globale des cartographies, notamment au sud de la limite entre les deux départements, où les zones orange, liées principalement à l'aléa "affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines)" sont concordantes.

La seule disparité qui apparaît est liée à la qualité des données sur les sites miniers. Les zones orange très ponctuelles qui apparaissent côté Limousin, autour de la vallée de l'Isle, au nord de Saint-Yrieix-la-Perche notamment, sont influencées par de nombreux sites miniers, dont les emprises sont localisées avec précision en ex-Limousin. Les services de l'Etat en ex-Aquitaine ne disposent pas d'une cartographie précise de l'ensemble des emprises minières sur ce même secteur.

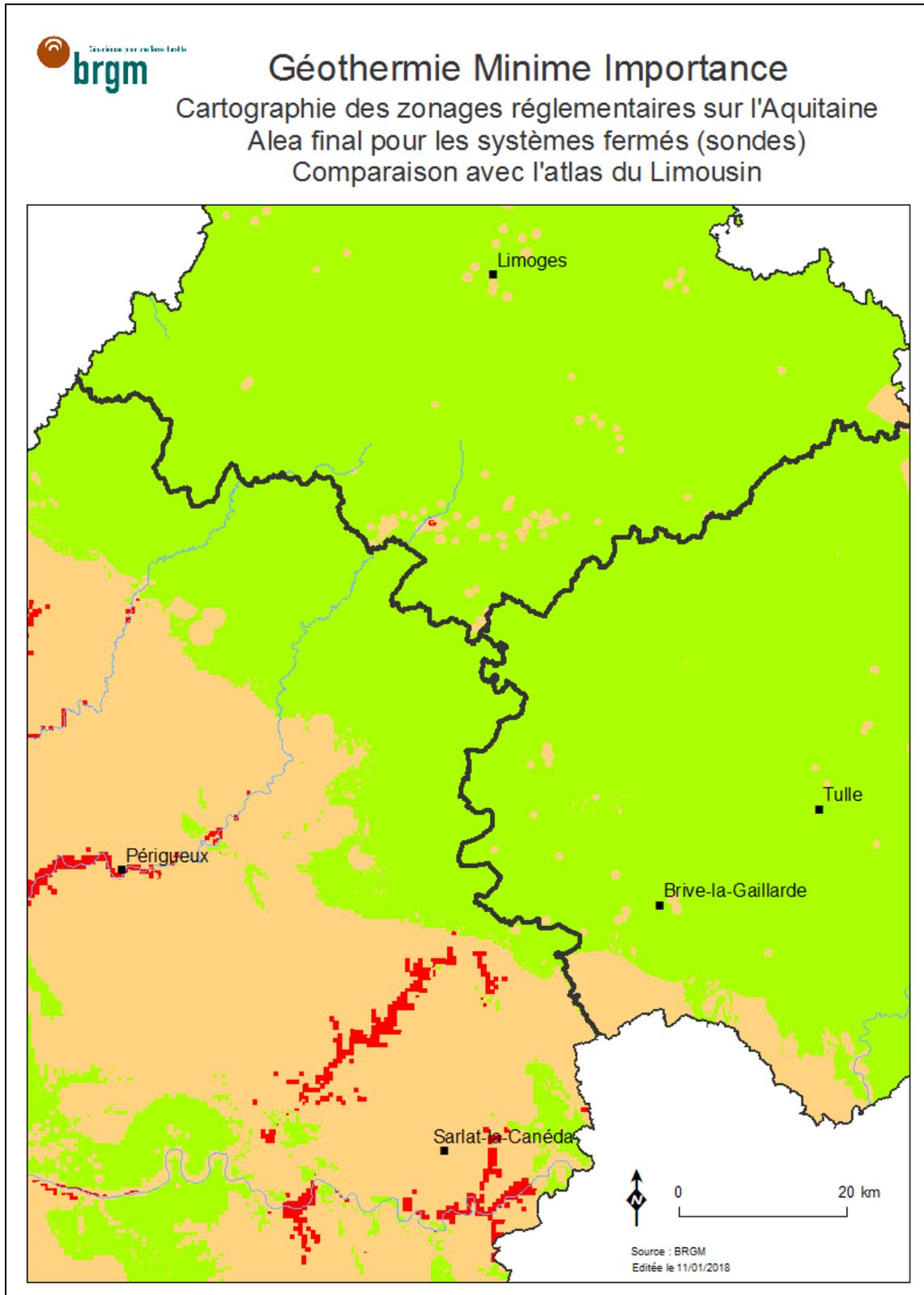


Illustration 33 : Zonages réglementaires finaux à la limite entre les ex-régions Aquitaine et Limousin pour les systèmes fermés

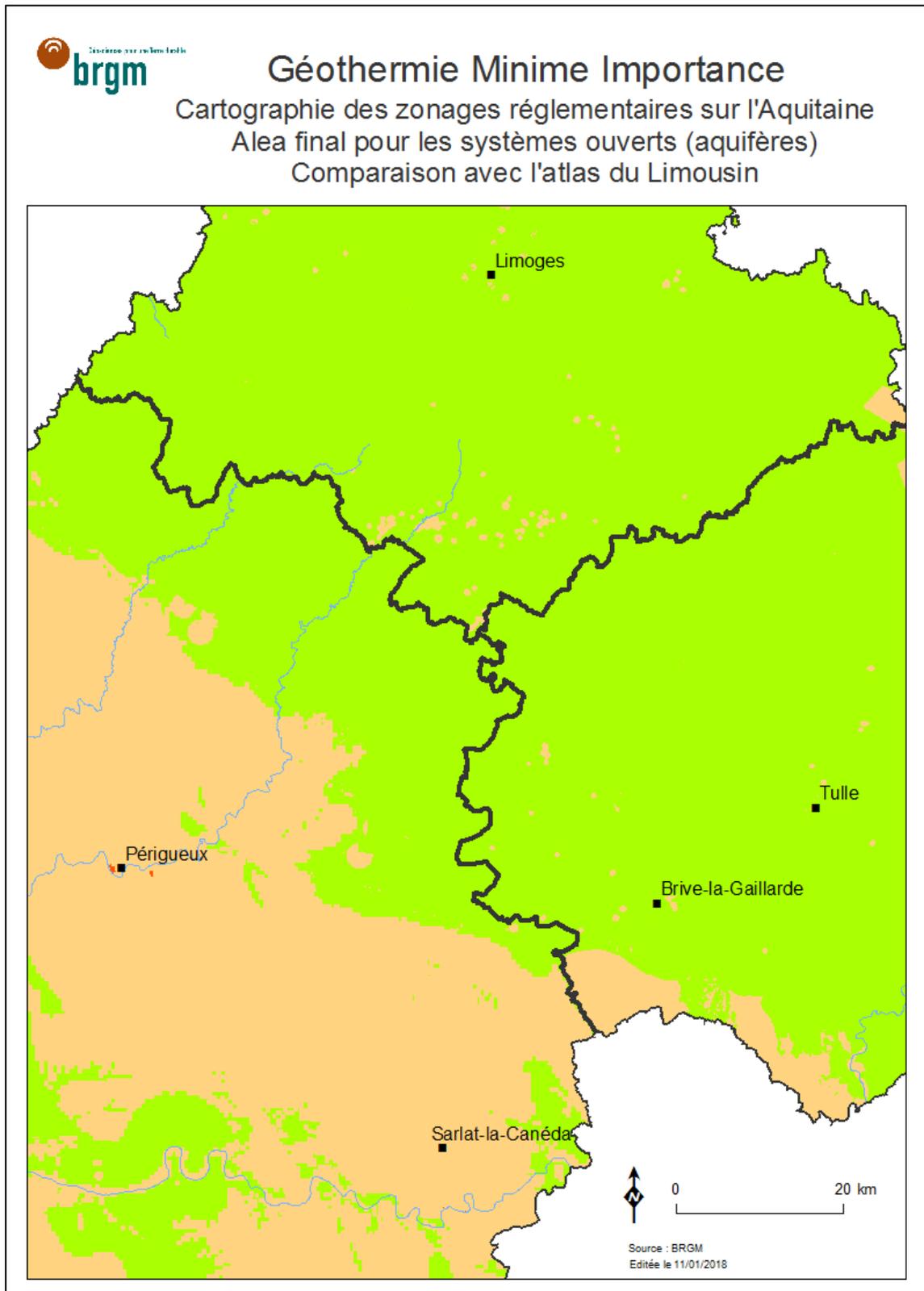


Illustration 34 : Zonages réglementaires finaux à la limite entre les ex-régions Aquitaine et Limousin pour les systèmes ouverts

5. Bilan

Le projet a permis l'ajout de plusieurs aquifères alluviaux et de l'aquifère de l'Oligocène dans l'Entre-Deux-Mers à l'atlas du potentiel géothermique sur nappe. L'exploitation de ces ressources peut s'avérer pertinente pour les filières très basse énergie. L'atlas des ressources pour la géothermie de minime importance accessible sur l'espace cartographique du site Géothermie Perspectives (<http://www.geothermie-perspectives.fr/cartographie>) sera mis à jour.

D'autre part, la déclinaison de la cartographie réglementaire relative à la géothermie de minime importance à échelle régionale a imposé l'intégration de nombreuses spécificités sur chacun des aléas identifiés. Cela a notamment nécessité la sollicitation des services de l'Etat, DREAL et DDT(M), sur plusieurs thématiques, et la mobilisation de nombreuses ressources bibliographiques et cartographiques issues de projets régionaux.

Les zonages finaux montrent la part significative prise par les zones orange sur le territoire (Tableau 5), qui s'avère supérieure à celle de la carte nationale, notamment à 200 m de profondeur. Ceci est notamment lié à la forte prépondérance de l'empilement sédimentaire du Bassin aquitain sur la région, qui inclut de nombreux aquifères stratégiques superposés induisant un aléa fort de mise en communication lors de la réalisation de forages. Mais ceci est également imputable à la modification sensible de la limite inférieure du classement en zone orange imposée par la méthodologie : de ≥ 15 sur la cartographie nationale, elle passe à ≥ 14 sur la cartographie révisée à échelle régionale, ce qui a pour effet mécanique de faire basculer une part significative du territoire. Cela est notamment visible pour les systèmes ouverts sur le triangle landais, où l'aléa fort de mise en communication des aquifères à 200 m (facteur de pondération 3 x facteur aggravant 4) combiné à l'aléa remontée de nappe (facteur de pondération 1 x facteur aggravant 2) conduit à une note finale minimale de 14.

Filière	Profondeur maximum	Part du territoire régional couverte par chaque zone réglementaire (%)		
		Zone verte	Zone orange	Zone rouge
Système ouvert	50 m	83,2	15,7	1,0
	100 m	77,5	21,5	1,1
	200 m	71,0	27,7	1,3
Système fermé	50 m	88,9	9,7	1,4
	100 m	85,5	12,9	1,6
	200 m	81,2	17,0	1,8

Tableau 5 : Taux de couverture des zonages réglementaires finaux, par filière et par gamme de profondeur

Les zonages finaux sont globalement cohérents avec ceux en cours de finalisation sur l'ex-région Limousin. Les quelques disparités visibles montrent l'influence notable que peut avoir la qualité des données à disposition, qui peut être fluctuante selon les découpages administratifs.

Suite au rendu du présent rapport, le Conseil Régional Nouvelle-Aquitaine portera une demande officielle de révision des zonages réglementaires auprès du Préfet de Région. L'instruction sera conduite conformément à l'arrêté du 25/06/2015, et mènera notamment à une consultation des comités de bassin puis du public.

A leur entrée en vigueur, les cartes réglementaires seront valorisées dans le portail cartographique du site www.geothermie-perspectives.fr/ et seront notamment accessibles via l'espace régional www.geothermie-perspectives.fr/espace-regional/nouvelle-aquitaine.

6. Bibliographie

- Aubert N., Koch-Mathian J-Y. avec la collaboration de Baraton A.** (2014). Elaboration d'une base de données corrélant activités et polluants potentiels. Rapport final BRGM/RP-64125-FR, 110 p., 3 ill., 21 tabl., 8 ann.
- Berard P., Sourisseau B.** (1998). Ressources thermales du Bas-Adour – Actualisation et régularisation des données, piézométrie, protection globale de la ressource – Rapport R 40011.
- Berard P., Lachassagne P., Seguin J.J., Sourisseau B..** (1999). Synthèse des connaissances sur la ressource thermique du Bas-Adour. Rapport BRGM R 40539
- Bézèlques-Courtade S., Durst P., avec la collaboration de Garnier F. et Demutrecy T.,** (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
- BRGM** (1975), Action concertée Adour, ressources en eaux souterraines. Rapport BRGM 75 SGN 018 AQI - MPY
- BRGM, SNPA, ESSO-REP, ELF-Re** (1974) - Géologie du Bassin d'Aquitaine - Atlas de 27 planches.
- Cabaret O., Vergnes J.P.** (2017), Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Développement du Modèle Mio-Plio-Quaternaire – Convention régionale eaux souterraines 2015-2020 – Module 1.3 – Année 1. Rapport final. BRGM/RP-66846-FR
- Cabaret O., Abasq L., Douez O. et Wuilleumier A.** (2016) – Projet AZENA – Atlas des Zones à Enjeux Aval du SAGE Nappes Profondes de Gironde – Phase 2. Rapport final BRGM/RP-66335-FR, 81 p., 77 ill., 6 ann.
- Cabaret O., Gutierrez T., Perrin J. avec la collaboration de Goublier J.B., Lorette G., Lastennet R. et Minvielle S.** (2014). Connaissance des karsts aquitains – Etude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne – Module 4 – Année 4. Rapport final. BRGM/RP-62902-FR, 131 pages, 110 illustrations, 10 annexes sur 1 CD.
- Corbier P., avec la collaboration de Bourdonné P. et Joncheray Y.** (2011) – Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine – Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE – Module 6 – Année 3 – BRGM/RP-61303-FR, 112 pages, 59 figures, 5 annexes
- Corbier P. et Wuilleumier A. avec la collaboration de Capéran F.** (2011) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Gestion intégrée des nappes alluviales - Etude des nappes alluviales de la Garonne, de la Dordogne, du Gave de Pau et du Dropt - Module 4 - Année 2 - BRGM/RP-60824-FR, 58 p., 38 ill., 5 ann., 1 tab.
- Corbier P., Abou Akar A. et Karnay G., avec la collaboration de Léger A.** (2007) – Caractérisation des biseaux d'eau salée exploités sur le pourtour du Bassin d'Arcachon et expérimentation sur 3 sites tests. 119 pages, 83 illustrations, 4 annexes.

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., Midot D., Schomburgk S., Martin J.-C., Cochery C., Barras A.-V. (2015), Méthodologie de construction de la cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance.

Herbaux M., Kreziak C., Durst P., Martin J.-C., Cochery C., Barras A.-V. (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.

Morabito J.S. (1999) Le bassin évaporitique de Sainte-Sabine (Dordogne) : un exemple typique de playa continentale, in *Géologie de la France* n°3, pp. 71-90, 8 fig. 9 tabl. 1 ann.

Paroissien J.B., Brugeron A., Sedan O., Renaud C., Quique R., Taffoureau E. (2015), Référentiel hydrogéologique français BDLISA Version 1 : présentation du référentiel. Principe de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-65370-FR.84 p., 24 fig., 15 tabl.

Pédron N., Capdeville J.P., Etcheverry P. (2003). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine – Gestion intégrée des nappes alluviales – Etude de la nappe alluviale de la Garonne – Département de Lot-et-Garonne – Module 5 – Année 1. BRGM/RP-52603-FR, 45 p., 18 fig., 3 tabl., 12 ann.

Saplaïrolles M., Pédron N., Lagouarde E. (2005). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine – Gestion intégrée des nappes alluviales – Etude de la nappe alluviale de la Dordogne – Département de la Dordogne – Module 5 – Année 2. BRGM/RP-53631-FR, 96 p., 37 ill., 9 ann.

Serrano O., Delmas J., Hanot F., Vially R., Herbin JP., Huel P., Tourlière B. (2006) - Le Bassin d'Aquitaine : valorisation des données sismiques, cartographie structurale et potentiel pétrolier. *Ed. BRGM*, 245 p., 142 figures, 17 tableaux, 17 annexes.

Vigouroux P. (2015). Cadre réglementaire de la DIP, Bulletin d'informations n°26, Association Française des techniques hydrothermales, p.35-36.



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

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24 avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70