



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Cartes des zones réglementaires relatives à la Géothermie de Minime Importance. Propositions pour la région Pays-de-la-Loire

Rapport final

BRGM/RP-72191-FR

15 décembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM AP21DAT002

X. Rachez, V. Baudouin, H. Bonnefoy (*), A. Cazaubon (*), F. Chami, A. Foultier (*),
G. Pétillon (*)

(*) CEREMA

Vérificateur :

Nom : Pierre Durst

Fonction : Référent thématique

Date : 14/10/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Laurence Chéry

Fonction : Directrice adjointe

Date : 15/12/2022

Signature :

:

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

Contact : qualite@brgm.fr



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Géothermie, carte aléa, cartographie, code minier, télédéclaration, Pays-de-la-Loire

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

X. Rachez, V. Baudouin, H. Bonnefoy (*), A. Cazaubon (*), F. Chami, A. Foultier (*), G. Pétilion (*) (2022) – Cartes des zones réglementaires relatives à la Géothermie de Minime Importance. Propositions pour la région Pays-de-la-Loire. Rapport final. BRGM/RP-72191-FR, 85 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-01/04/2021

Synthèse

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, la géothermie est une activité promue par le Ministère de la Transition Energétique (MTE), notamment dans le cadre des actions de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Afin de favoriser le recours à la géothermie, de tenir compte des évolutions technologiques et de mieux prendre en compte l'incidence des installations sur l'environnement, la réglementation relative à la géothermie de minime importance (GMI) a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

Une carte a été réalisée à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par le ministère en juillet 2015. Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié.

La carte nationale tient compte de 8 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones dites « rouges » dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance ;
- les zones dites « orange » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles il est exigé la production d'une attestation de compatibilité d'un projet de géothermie de minime importance, rédigée par un expert agréé et prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- les zones dites « vertes » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter des dangers et inconvénients graves.

Cette carte nationale est entrée en vigueur le 1er juillet 2015 et est disponible sur le site www.geothermies.fr.

L'arrêté du 25 juin 2015, relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser régionalement la carte nationale pour apporter plus de précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes redoutés. Dans cette carte régionale, les niveaux d'aléas ou de susceptibilité attribués à chaque phénomène peuvent être différents de ceux de la carte nationale.

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur les Pays-de-la-Loire, la DGPR, l'ADEME, le CEREMA et le BRGM ont financé la révision de la carte sur la région. Celle-ci a été réalisée pour le compte de la DREAL des Pays-de-la-Loire par le CEREMA et le BRGM, qui en a piloté la réalisation.

L'élaboration de la carte des Pays-de-la-Loire tient compte de phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Les conséquences considérées peuvent être d'ordre :

- Géologique causant, notamment en surface, des désordres sur la solidité des bâtiments situés au voisinage du forage, ou la dégradation des échangeurs géothermiques ou d'autres ouvrages mis en place ;
- Environnemental, notamment par la dégradation ou la pollution des eaux souterraines.

Conformément au guide méthodologique de 2015, les phénomènes retenus sont :

1. Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
2. Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
3. Affaissement/effondrement lié aux cavités minières ;
4. Mouvement de terrain de type glissement ;
5. Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
6. Artésianisme ;
7. Mise en communication d'aquifères ;
8. Inondation par remontée de nappe ;
9. Biseau salé.

La carte nationale initiale a été réalisée avec une maille de 500mx500m. Or, trois tailles de maille peuvent être utilisées pour réaliser les cartes révisées : 500mx500m ou 250mx250m ou encore 100mx100m. Une étude de sensibilité à la taille de maille sur la surface des différents niveaux de susceptibilité a été réalisée en région Pays-de-la-Loire, et une maille de 250mx250m a été retenue.

Ces 9 phénomènes ont donc été cotés séparément selon des niveaux établis sur chacune des 517 201 mailles de 250 m de côté couvrant la région Pays-de-la-Loire. Ils ont ensuite été pondérés par un facteur dit aggravant, inhérent aux techniques de GMI mises en œuvre, et sommés afin d'aboutir à des cartes répertoriant les trois zones (rouge, orange, verte) mentionnées précédemment. Cette méthodologie conduit à produire six cartes de zonage réglementaire. Elles correspondent à deux types d'usages géothermiques : exploitation par doublet sur aquifère (échangeur ouvert) et par sonde géothermique verticale (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur (10-50 m, 10-100 m, 10-200 m).

Par rapport à la carte nationale initiale, la mise à jour de la zonation des cartes réglementaires des Pays-de-la-Loire est ainsi distincte pour les trois gammes de profondeur. Les données et les connaissances acquises localement sur la région ont été prises en compte. La précision apportée par la carte révisée concerne de fait tous les phénomènes redoutés ; notamment de par l'utilisation de cartes d'aléas produites à l'échelle de la région (cavités minières et non-minières, mouvement de terrain), d'informations plus précises (localisation des sites et sols pollués dans la BD BASOL largement mises à jour depuis 2015, entités BD LISA de niveau 3, modèle géologique MODGEAU finalisé fin 2020, etc.) et traitées en détail ; et car nous avons considéré la géométrie des formations dès que cela était possible pour tous les phénomènes. Pour un système géothermique donné (fermé-Doublets, ouvert-SGV), les cartes obtenues sont ainsi différentes d'une tranche de profondeur à l'autre. Néanmoins, quelle que soit la tranche de profondeur (10-50, 10-100 et 10-200 m), pour les doublets, la zone verte représente globalement 78-80% de la surface totale de la région Pays-de-la-Loire, la zone orange 20-22% et la zone rouge 0,07-0,11%, tandis que pour les SGV les proportions sont respectivement : 76-80%, 20-24 et 0,07-0,36%.

Sommaire

1. INTRODUCTION	11
2. REGLEMENTATION APPLICABLE A LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE	13
2.1. LES TECHNOLOGIES DE GEOTHERMIE CONCERNEES PAR LA GMI.....	13
2.1.1. Les Sondes Géothermiques Verticales.....	13
2.1.2. Les doublets géothermiques.....	14
2.2. LE CODE MINIER	15
2.3. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES.....	16
3. METHODOLOGIE DE REALISATION DE LA CARTE REGLEMENTAIRE	17
3.1. METHODOLOGIE UTILISEE	17
3.2. LA GRILLE UTILISEE ET SES ATTRIBUTS	19
3.3. CALCUL DE COTATION ET ELABORATION DES ZONES.....	23
4. CARTOGRAPHIE DES ALEAS	25
4.1. ALEA « AFFAISSEMENT/SURRECTION LIE AUX FORMATIONS EVAPORITIQUES ».....	25
4.1.1. Description du phénomène et occurrences.....	25
4.1.2. Qualification du phénomène	25
4.1.3. Données utilisées et traitement.....	25
4.1.4. Cartographie de l'aléa « Affaissement/surrection lié aux évaporites ».....	26
4.1.5. Cotation de l'aléa « Affaissement/surrection lié aux évaporites ».....	27
4.2. ALEA « AFFAISSEMENT/EFFONDREMENT LIE AUX CAVITES (HORS MINES) »	28
4.2.1. Description du phénomène et occurrences.....	28
4.2.2. Qualification du phénomène	28
4.2.3. Données utilisées et traitement.....	29
4.2.4. Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ».....	31
4.2.5. Cotation de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ».....	33
4.3. ALEA « AFFAISSEMENT /EFFONDREMENT LIE AUX CAVITES MINIERES »	34
4.3.1. Description du phénomène et occurrences.....	34
4.3.2. Qualification du phénomène	34
4.3.3. Données utilisées et traitement.....	35
4.3.4. Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités minières ».....	36
4.3.5. Cotation de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités minières ».....	37
4.4. ALEA « MOUVEMENT DE TERRAIN DE TYPE GLISSEMENT ».....	37
4.4.1. Description du phénomène et occurrences.....	37
4.4.2. Qualification du phénomène	37
4.4.3. Données utilisées et traitement.....	38
4.4.4. Cartographie de l'aléa « Mouvement de terrain de type glissement ».....	39
4.4.5. Cotation de l'aléa « Mouvement de terrain de type glissement »	40
4.5. ALEA « POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE »	40
4.5.1. Description du phénomène et occurrences.....	40
4.5.2. Qualification du phénomène	40
4.5.3. Données utilisées et traitement.....	40
4.5.4. Cartographie de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine ».....	41
4.5.5. Cotation de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »	42
4.6. ALEA « ARTESIANISME »	43
4.6.1. Description du phénomène et occurrences.....	43
4.6.2. Qualification du phénomène	43
4.6.3. Données utilisées et traitement.....	44
4.6.4. Cartographie de l'aléa « artésianisme ».....	47
4.6.5. Cotation de l'aléa « artésianisme ».....	48

4.7.	ALEA « MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFERES »	49
4.7.1.	<i>Description du phénomène et occurrences</i>	49
4.7.2.	<i>Qualification du phénomène</i>	49
4.7.3.	<i>Données utilisées et traitement</i>	49
4.7.4.	<i>Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifères »</i>	51
4.7.5.	<i>Cotation de l'aléa « mise en communication d'aquifères »</i>	53
4.8.	ALEA « INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE »	53
4.8.1.	<i>Description du phénomène et occurrences</i>	53
4.8.2.	<i>Qualification du phénomène</i>	53
4.8.3.	<i>Données utilisées et traitement</i>	55
4.8.4.	<i>Cartographie de l'aléa « remontée de nappe »</i>	56
4.8.5.	<i>Cotation de l'aléa « remontée de nappe »</i>	57
4.9.	ALEA « BISEAU SALE »	58
4.9.1.	<i>Description du phénomène et occurrences</i>	58
4.9.2.	<i>Qualification du phénomène</i>	62
4.9.3.	<i>Données utilisées et traitement</i>	63
4.9.4.	<i>Cartographie de l'aléa « biseau salé »</i>	65
4.9.5.	<i>Cotation de l'aléa « biseau salé »</i>	65
5. PROPOSITION DE CARTES DES ZONES REGLEMENTAIRES RELATIVES A LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE		67
6. CONCLUSION		69
7. BIBLIOGRAPHIE		71

Liste des figures

Figure 1 : Eléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015).....	13
Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015).....	14
Figure 3 : Evolution des niveaux de susceptibilité (faible, moyen et fort) entre des mailles de 500mx500m, 250mx250m et la couche d'aléa non maillée pour le phénomène « Pollution des sols et des nappes »	20
Figure 4 : Grille de 517201 mailles de 250mx250m couvrant la région des Pays-de-la-Loire	21
Figure 5 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas)	27
Figure 6: Principe du comptage par maille des évènements ponctuels avec leur tampon (en rouge le nombre d'évènements par maille)	31
Figure 7: Cartes de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut), 10-100m de profondeur (carte du milieu) et 10-200m de profondeur (carte du bas).....	32

Figure 8 : Carte de susceptibilité du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières" en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs	36
Figure 9 : Carte de susceptibilité du phénomène "Mouvement de terrain" en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs.....	39
Figure 10 : Carte de susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et des nappes » en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs.	42
Figure 11 : Zones d'artésianisme sur le territoire de l'EPCI Loire Layon Aubance, classées en 3 catégories (Permanent, Temporaire, Probable) pour les sables inférieurs du Cénomaniens.....	45
Figure 12 : Résultat de l'identification des entités aquifères captives de la BDLISA Niveau 3...	46
Figure 13 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Artésianisme » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas)	48
Figure 14 : Nappes réservées en priorité à l'alimentation en eau potable (rapport BRGM/RP-62961-FR)	50
Figure 15 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas).....	52
Figure 16 : Cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe (source : georisques.gouv.fr)	54
Figure 17 : Présentation des masques utilisés pour la cartographie de l'aléa « Remontée de nappe »	55
Figure 18 : Carte de susceptibilité du phénomène « Remontée de nappe » en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs.....	57
Figure 19 : Salinité des eaux de la Loire (source : loire-estuaire.org)	59
Figure 20 : Illustration de la remontée de sel dans l'estuaire de la Loire (source : loire-estuaire.org)	60
Figure 21 : Marais littoraux et aquifères côtiers – Noirmoutier – Baie de Bourgneuf (d'après SCE, 2003).....	61
Figure 22 : Cartographie de l'extension de la nappe d'eau souterraine salée de la baie de Bourgneuf (Collet, 1992)	62
Figure 23 : Concentrations en chlorures mesurées en Vendée (source : ADES).....	63
Figure 24 : Cartographie des zones basses	64
Figure 25 : Carte de susceptibilité du phénomène « Biseau salé » en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs	65

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des niveaux d'aléa et des facteurs aggravants utilisés pour la cartographie réglementaire de la GMI en région Pays-de-la-Loire en comparaison avec la cartographie initiale nationale.....	18
Tableau 2 : Table de classification du niveau d'aléa réglementaire (vert, orange, rouge) en fonction de sa valeur résultante	23
Tableau 3 : Exemple de table attributaire de la grille	23
Tableau 4 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » pour les gammes de profondeur 10-50m / 10-100m / 10-200m»	26
Tableau 5 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée.....	28
Tableau 6 : Caractérisation du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines".....	29
Tableau 7: Valeurs des tampons attribués aux évènements ponctuels "Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines"	30
Tableau 8: Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » pour les différentes gammes de profondeur	33
Tableau 9 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée	33
Tableau 10 : Caractérisation du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières"	35
Tableau 11 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières"	36
Tableau 12 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée	37
Tableau 13 : Caractérisation du phénomène "Mouvement de terrain"	38
Tableau 14 : Valeurs des tampons attribués aux évènements ponctuels "Mouvement de terrain"	38
Tableau 15 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain » pour la profondeur 10-200 m.....	40
Tableau 16 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain de type glissement » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée	40

Tableau 17 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » pour la gamme de profondeur 10-200m.....	41
Tableau 18 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et des nappes » et facteur aggravant– Comparaison des cartes initiale et révisée	43
Tableau 19 : Cotation de la susceptibilité du phénomène d'« Artésianisme » et facteur aggravant– Comparaison des cartes initiale et révisée	49
Tableau 20 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » pour les gammes de profondeur 10-50m / 10-100m / 10-200m»	51
Tableau 21 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Mise en communication d'aquifères » et facteur aggravant– Comparaison des cartes initiale et révisée	53
Tableau 22 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Remontée de nappe » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée	58
Tableau 23 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Biseau salé » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale (critère absent) et révisée	65
Tableau 24 : répartition des zones vertes, orange et rouges de la carte révisée en Pays-de-la-Loire (2022) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015).....	67

Liste des annexes

ANNEXE 1.....	73
CARTES DES ZONES REGLEMENTAIRES RELATIVES A LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE EN PAYS-DE-LA-LOIRE.....	73

1. Introduction

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, la géothermie est une activité promue par le Ministère de la Transition Energétique (MTE), notamment dans le cadre des actions de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Afin de favoriser le recours à la géothermie, de tenir compte des évolutions technologiques et de mieux prendre en compte l'incidence des installations sur l'environnement, la réglementation relative à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

La filière géothermie doit actuellement répondre à deux grands enjeux :

- se développer fortement et conformément aux attentes sur les énergies renouvelables ;
- se développer en tenant compte des incidences sur l'environnement.

Une carte, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique a été réalisée à l'échelle nationale. Elle est appelée carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (GMI). Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par en juillet 2015 (MEDDE, 2015). Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié.

La carte nationale de 2015 tient compte d'un ensemble de 8 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones dites « rouges » dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance ;
- les zones dites « orange » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles est exigé la production d'une attestation de compatibilité d'un projet de géothermie de minime importance, rédigé par un expert agréé prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- les zones dites « vertes » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter des dangers et inconvénients graves.

Cette carte nationale est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2015 et est disponible sur le site : <https://www.geothermies.fr/>.

L'arrêté du 25 juin 2015, relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser régionalement la carte nationale pour apporter plus de précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes redoutés. Dans cette carte régionale, les niveaux d'aléa ou de susceptibilité attribués à chaque phénomène peuvent être différents de ceux de la carte nationale.

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur les Pays-de-la-Loire, la DGPR, l'ADEME, le CEREMA et le BRGM ont financé la révision de la carte sur la région. Celle-ci a été réalisée pour le compte de la DREAL des Pays-de-la-Loire par le CEREMA et le BRGM, qui en a piloté la réalisation.

Dans la suite de ce rapport, la carte « révisée » fera référence à la carte régionale mise à jour dans le cadre de cette étude ; la carte « initiale » fera référence à la carte nationale réalisée en 2015.

L'élaboration de la carte révisée des Pays-de-la-Loire tient compte de 9 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Conformément au guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015), les phénomènes retenus sont :

1. Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
2. Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
3. Affaissement/effondrement lié aux cavités minières ;
4. Mouvement de terrain de type glissement ;
5. Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
6. Artésianisme ;
7. Mise en communication d'aquifères ;
8. Remontée de nappe ;
9. Biseau salé - salinisation.

Les conséquences considérées peuvent être d'ordre :

- géologique causant, notamment en surface, des désordres sur la solidité des bâtiments situés au voisinage du forage ou la dégradation des échangeurs géothermiques mis en place ;
- environnemental notamment par la dégradation ou la pollution des eaux souterraines.

2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance

2.1. LES TECHNOLOGIES DE GEOTHERMIE CONCERNEES PAR LA GMI

La Géothermie de Minime Importance (GMI) est un des types de géothermie permettant d'échanger de l'énergie du sous-sol présente au sein de la roche ou d'une nappe d'eau souterraine afin de la restituer dans un bâtiment à l'aide d'une pompe à chaleur (MEDDE, 2015).

Il existe deux types de technologies qualifiées de Minime Importance :

- Les Sondes Géothermiques Verticales (SGV) ;
- Les Doublets géothermiques ou Doublet sur nappe (Doublet).

2.1.1. Les Sondes Géothermiques Verticales

Une sonde géothermique verticale (SGV) est un échangeur thermique à boucle fermée de plusieurs dizaines de mètres de profondeur qui prélève de la chaleur emmagasinée dans le sol par conduction thermique le long d'un forage, et le transfert via un fluide caloporteur à une pompe à chaleur (PAC). 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 (par exemple eau ou eau glycolée), circule au sein d'une boucle de la sonde (en U ou double U) disposées dans un forage dont l'espace annulaire est comblé par un coulis spécifique (Norme NF X-10-970¹).

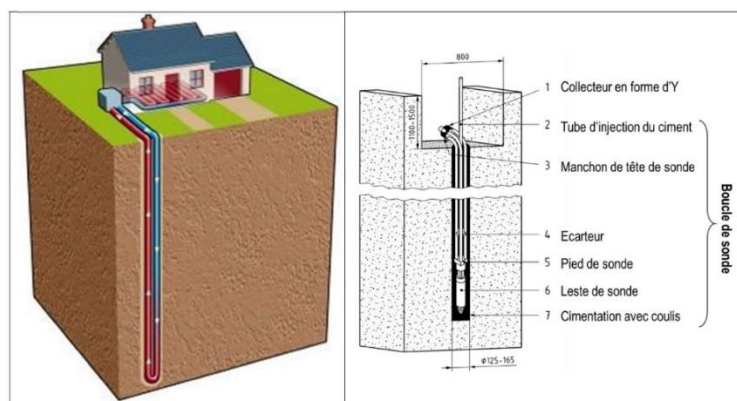


Figure 1 : Eléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015)

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

2.1.2. Les doublets géothermiques

Un doublet géothermique (autrement appelé « échangeur géothermique en boucle ouverte ») est un système géothermique permettant de prélever de l'eau à partir d'une nappe souterraine au travers d'un puits de prélèvement (ou d'alimentation). L'énergie calorifique de cette eau souterraine sera prélevée via une pompe à chaleur (PAC) avant d'être réinjectée au sein du même aquifère par un second puits, le puits de réinjection (MEDDE, 2015). Ce doublet, composé d'un puits de prélèvement et d'un puits de réinjection, suppose des conditions de productivité (puits de production, d'exhaure) et de rejet (réinjection), dans le milieu souterrain, aptes à des débits de l'ordre de 2 à 10m³/h.

L'efficacité 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 doublet induit une variation thermique locale sur la nappe au point de rejet de l'eau dont une part de la « chaleur » a été extrait par la PAC.

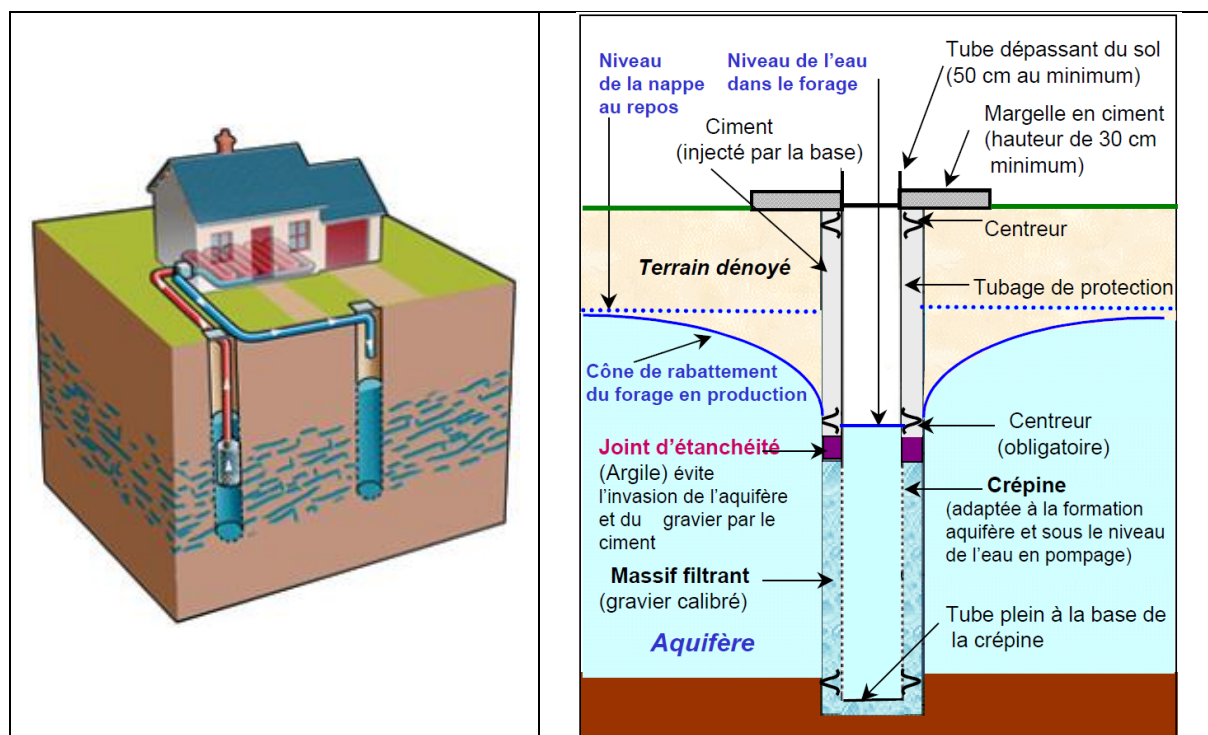


Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015)

2.2. LE CODE MINIER

La géothermie est réglementée par le Code minier qui considère comme des mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent. Les installations de géothermie nécessitent un titre minier et un arrêté d'autorisation d'ouverture des travaux miniers. Toutefois, les projets respectant les critères du régime de la « géothermie de minime importance » bénéficient d'une dérogation, et sont soumises à une simple déclaration.

Les critères de la géothermie de minime importance sont définis dans le paragraphe II de l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié. Les conditions de mise en œuvre sont précisées dans l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

Les critères de la géothermie de minime importance (GMI) sont :

- pour les échangeurs géothermiques fermés : la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres, et la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW. Les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone rouge ;
- pour les échangeurs géothermiques ouverts :
 - o la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres ;
 - o la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
 - o la température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement est inférieure à 25 °C ;
 - o les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle ;
 - o les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement ;
 - o les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone rouge.

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

- préalablement aux travaux de forage, l'activité géothermique répondant aux critères de la géothermie de minime importance doit être déclarée. Cette démarche doit être réalisée sur le téléservice dédié, accessible depuis le site www.geothermies.fr ;
- les forages doivent être réalisés par une entreprise qualifiée selon les conditions techniques prévues par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance ;
- la localisation d'un échangeur doit répondre aux prescriptions définies par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables. En outre, selon la localisation de l'échangeur au regard de la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance, une attestation de compatibilité est jointe à la déclaration. Cela est notamment requis lorsque le projet se situe dans une zone orange.

L'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance et sa cessation d'exploitation doivent être mises en œuvre conformément à l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance. Les travaux de cessation d'exploitation et le changement d'exploitant de la ressource sont à déclarer. Ces démarches peuvent être réalisées par voie dématérialisée sur le site de télédéclaration dédié. L'ensemble des informations nécessaires à ces démarches est disponible sur le site internet « geothermies.fr ».

2.3. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES

Les forations envisagées dans le cadre de la GMI, puis l'exploitation de l'ouvrage, induisent la prise en compte de certaines précautions au regard des enjeux et des risques présents dans le sous-sol. Le régime de la minime importance s'applique sans préjudice des autres réglementations. Il s'agit en particulier de respecter les prescriptions sur les zones à proximité de captages d'eau potable, d'eau minérale, les zones mentionnées dans les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) ainsi que les périmètres qui disposent de servitudes d'utilité publique encadrant l'utilisation du sol et du sous-sol.

Ces réglementations 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.

Il appartient à l'exploitant et à tout sous-traitant impliqué dans l'activité de géothermie de ce dernier de s'informer et de mettre en œuvre la réglementation spécifique applicable sur la zone.

3. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire

3.1. METHODOLOGIE UTILISEE

La réalisation de la carte de la région des Pays-de-la-Loire suit la méthode définie dans le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance publiée en juillet 2015 par le Ministère en charge de l'Ecologie (MEDDE, 2015). Les caractéristiques du sous-sol et les phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de travaux de forage des échangeurs géothermiques de minime importance sont pris en compte.

Les phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux de type affaissement, mouvement de terrain, pollutions, etc. susceptibles d'être rencontrés par la réalisation d'un projet de géothermie de minime importance en région Pays-de-la-Loire ont été identifiés.

Pour chaque phénomène :

- le phénomène redouté est décrit et caractérisé par des niveaux d'aléa (nul, faible, moyen, fort) lorsque des cartes d'aléas existent ou en termes de probabilité d'occurrence (susceptibilité) sinon ;
- une valeur est attribuée à chaque niveau ;
- un facteur aggravant est ensuite attribué en fonction (1) du phénomène redouté et (2) de la technique d'exploitation géothermique employée (échangeur fermé ou ouvert) ;
- la disponibilité des données utilisées est précisée.

La carte des zones réglementaires relatives à la GMI de la région des Pays-de-la-Loire se compose en réalité de six cartes, car elle distingue, pour chaque type d'échangeur (ouvert, fermé), trois intervalles de profondeur : 10-50 mètres, 10-100 mètres et 10-200 mètres.

La méthodologie d'élaboration de la carte utilise une analyse multicritère (c'est-à-dire basée sur la superposition de plusieurs phénomènes). Les cartes ont été réalisées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) dans lequel chacun des phénomènes identifiés est représenté par une couche spécifique.

Les phénomènes retenus pour la région des Pays-de-la-Loire sont :

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

Le tableau suivant (

Tableau 1) présente une comparaison des niveaux d'aléas/susceptibilité et des facteurs aggravants utilisés pour la cartographie initiale nationale et la cartographie révisée régionale Pays-de-la-Loire, dont les niveaux de cotation retenus pour les différents phénomènes sont explicités dans le chapitre 4. Le neuvième phénomène, le « biseau salé – salinisation », n'avait pas été analysé lors de la cartographie nationale initiale.

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Evaporites	Initiale	0	-	-	-	-	-	-	-	0	6	10	0	0
	Révisée	0	1	-	-	-	-	-	-	1			6	10
Cavité (NM)	Initiale	0	1	2	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	2	3	-	-	-	7	7			14	14
Cavité minière	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	-	3	-	5	-	7	7			14	14
Mvt terrain	Initiale	0	1	2	-	-	-	-	-	2	2	2	4	4
	Révisée	0	1	2	3	-	5	-	7	7			14	14
Pollution sols et nappes	Initiale	0	1	-	-	4	-	6	-	6	3	3	18	18
	Révisée	0	1	-	-	4	-	6	-	6			18	18
Artésianisme	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	4	6	12
	Révisée	0	-	-	3	-	-	-	7	7			14	28
Communication aquifères	Initiale	0	1	-	3	-	-	-	-	3	4	4	12	12
	Révisée	0	1	-	-	4	-	-	-	4			16	16
Remontée nappe	Initiale	0	1	-	-	-	-	-	-	1	2	0	2	0
	Révisée	0	1	-	-	-	-	-	-	1			2	0
Biseau salé	Initiale	0	-	-	-	-	-	-	-	0	4	0	0	0
	Révisée	0	1	-	-	-	-	-	-	1			4	0

Tableau 1 : Récapitulatif des niveaux d'aléa et des facteurs aggravants utilisés pour la cartographie réglementaire de la GMI en région Pays-de-la-Loire en comparaison avec la cartographie initiale nationale

La superposition de l'ensemble des couches au sein du SIG avec l'application de la pondération des critères associés permet d'obtenir une carte composée de zones vertes, orange et rouges. La carte distingue les zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- **les zones « vertes »** dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves ;
- **les zones « orange »** dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles est exigée la production de l'attestation prévue à l'article 22-2 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- **les zones « rouges »** dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance.



Il est rappelé que les périmètres et prescriptions fixés à l'échelle locale par d'autres réglementations relatives à l'usage du sol et du sous-sol doivent être considérés en priorité par les maîtres d'ouvrage, au-delà de la prise en compte des zones réglementaires de la GMI (vertes, orange et rouges).

Pour chaque couche d'information utilisée pour la carte, sont précisées les métadonnées avec :

- l'origine de la donnée ;
- la date d'extraction pour les données issues de bases de données ;
- la description de la donnée ;
- le(s) phénomène(s) concerné(s) par la donnée ;
- le(s) traitement(s) réalisé(s) sur cette donnée ;
- etc.

3.2. LA GRILLE UTILISEE ET SES ATTRIBUTS

Selon le guide méthodologique, trois tailles de maille peuvent être utilisées pour réaliser les cartes révisées : 500mx500m ou 250mx250m ou encore 100mx100m.

Une étude de sensibilité à la taille de maille sur la surface des différents niveaux de susceptibilité a été réalisée en région Pays-de-la-Loire. Les résultats obtenus avec des mailles de 500mx500m et 250mx250m ont été comparés pour le phénomène « Pollution des sols et des nappes » (

Figure 3). Pour ce phénomène qui peut être assez discontinu, diminuer la taille de maille permet de mieux caractériser finement l'emprise des surfaces d'aléa.

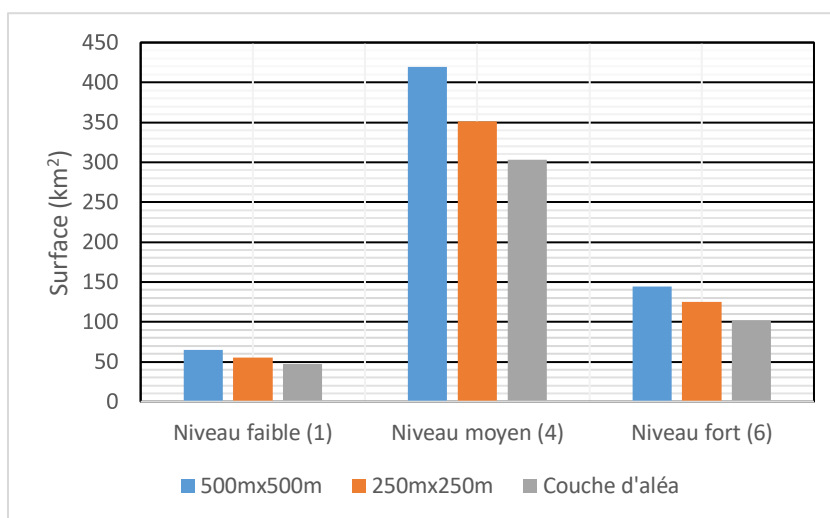


Figure 3 : Evolution des niveaux de susceptibilité (faible, moyen et fort) entre des mailles de 500mx500m, 250mx250m et la couche d'aléa non maillée pour le phénomène « Pollution des sols et des nappes »

L'utilisation d'une maille de 100mx100m a été écartée pour différentes raisons :

- La précision de certains jeux de données utilisés pour caractériser certains phénomènes ont une précision largement inférieure au niveau de résolution d'une maille de 100mx100m ;
- L'usage de maille de 100mx100m aurait nécessité d'important temps de calculs et de traitements cartographiques, ainsi que de gros volumes de stockage des cartes réglementaires.

Suite à cette étude de sensibilité, il a été décidé d'utiliser une maille de 250mx250m pour caractériser les phénomènes concernés par la GMI en région Pays-de-la-Loire.

Cette grille a été créée dans le système géodésique officiel en France, le réseau géodésique français 1993 (RGF93-Lambert93) qui répond à la directive INSPIRE. Le maillage correspond à des pixels de 250 mètres x 250 mètres. Le modèle numérique de terrain (MNT) a été constitué en prenant la médiane des valeurs de cote d'altitude (valeur Z) du MNT IGN au pas de 25 m sur chaque pixel de 250mx250m.

La couverture complète de la région Pays-de-la-Loire correspond à 517 201 mailles au total, soit environ 32 325 km² (Figure 4).

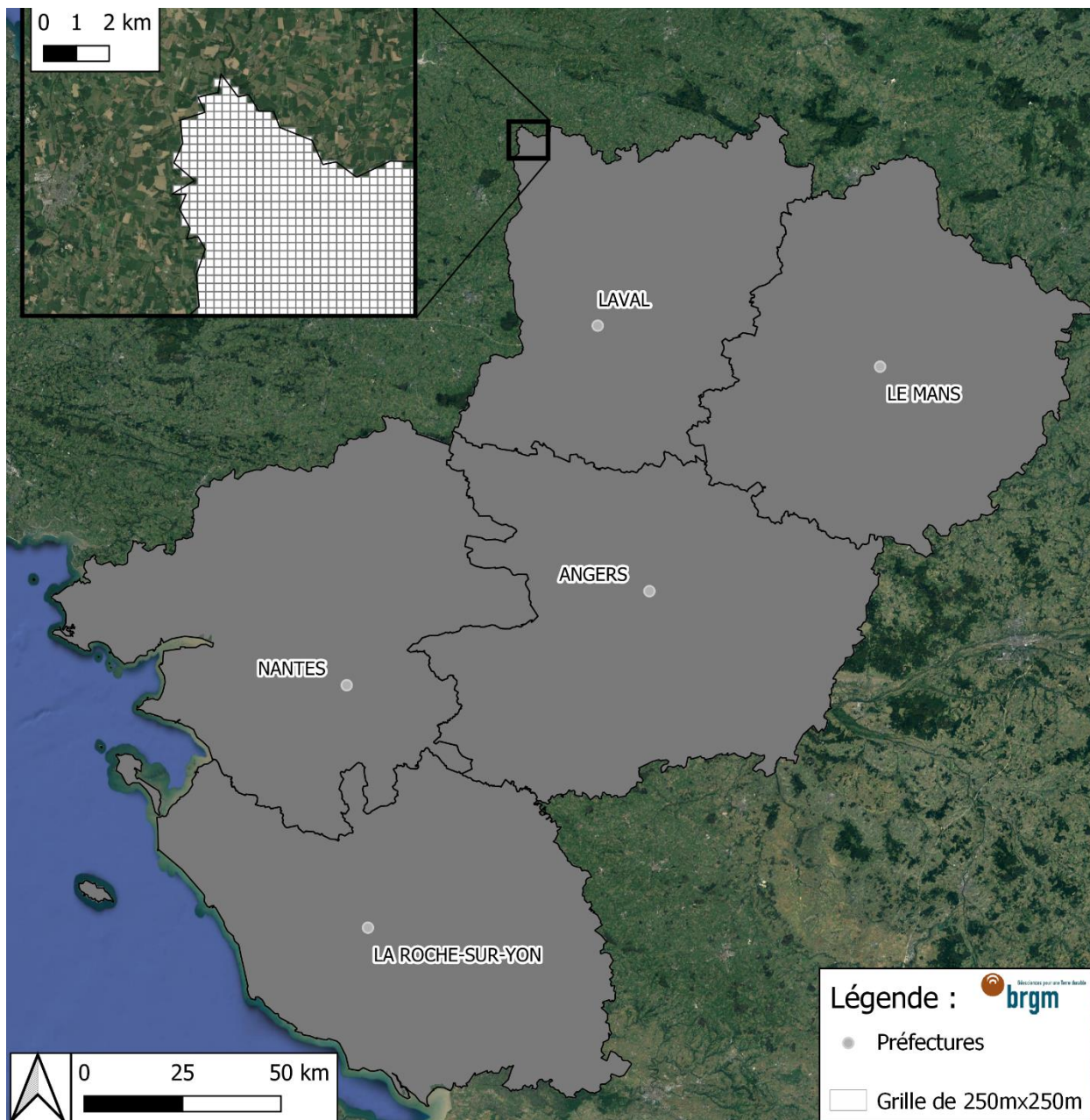


Figure 4 : Grille de 517201 mailles de 250mx250m couvrant la région des Pays-de-la-Loire

La table attributive de cette grille (au format « shapefile » ou « fichier de formes ») comprend, outre les champs obligatoires FID et Shape :

- **Attribut « Maille »** : de type entier long, correspondant à un identifiant unique attribué à chaque maille. Pour une maille de 250 x 250, l'identifiant se termine par 00 ;
- **Attribut « Profondeur »** : de type entier court. L'intervalle de profondeur est précisé (50, 100, 200) pour la carte régionale ;

- **Attributs « coordonnées X_RGF93 » et « Y_RGF93 »** de type entier long. Ces coordonnées sont exprimées en mètre. Elles correspondent au centre de chaque maille dans le système RGF93-Lambert93 ;
- **Attribut « Altitude Z_NGF »** de type entier court. Il correspond à l'altitude moyenne du sol au sein de la maille ; cette altitude est définie par rapport au NGF. Elle est exprimée en mètre avec une précision au mètre ;
- **Champs** de type entier court **correspondent aux neuf phénomènes définissant un risque potentiel, et d'un champ additionnel**. Ces dix champs contiennent la valeur attribuée au niveau d'aléa associé :
 1. « **evaporites** » : phénomène d'affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
 2. « **cavite_nm** » : phénomène d'affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)
 3. « **cav_min** » : phénomène d'affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière ;
 4. « **MVT** » : phénomène mouvements de terrain (glissement de terrain) ;
 5. « **BASOL** » : phénomène pollution des sols et/ou des nappes ;
 6. « **artésien** » : phénomène « artésianisme » ;
 7. « **com_aquif** » : phénomène de « mise en communication d'aquifères » ;
 8. « **remontee** » : phénomène de « remontée de nappe » ;
 9. « **biseau** » : phénomène « biseau salé » ;
 10. « **admin** » : ce caractère binaire (soit 0, soit 1) pose le pixel considéré en zone rouge ou pas. La cotation 1 qui place le pixel en zone rouge est posée au regard du retour d'expérience ou de la connaissance locale, dont dispose l'administration vis-à-vis des conséquences d'un forage géothermique de minime importance ou tout autre forage du sol et du sous-sol sur la zone. La réalisation d'un ouvrage de géothermie sur la zone est alors réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance prévu par l'article L.112-3 du code minier.
- **Attribut « Doublet »** de type entier court. Ce champ correspond à la somme des niveaux d'aléa pondérés des facteurs aggravants pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs ouverts (de type « doublet sur aquifère ») ;
- **Attribut « SGV »** de type entier court. Ce champ correspond à la somme des niveaux d'aléa pondérés des facteurs aggravants pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs fermés (de type « sonde géothermique verticale ») ;
- **Attribut « cl_doublet »** de type entier court. Ce champ présente la classification des zones réglementaires retenue pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs ouverts (de type « doublet sur aquifère » (1=vert, 2=orange, 3=rouge)) ;
- **Attribut « cl_sgv »** de type entier court. Ce champ présente la classification des zones réglementaires retenue pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs fermés (de type « sonde géothermique verticale » (1=vert, 2=orange, 3=rouge)).

3.3. CALCUL DE COTATION ET ELABORATION DES ZONES

Les notes finales par pixel sont calculées en fonction des facteurs aggravants, selon les formules suivantes :

Valeur résultante pour les doublets :

$(6 \times \text{« évaporites »}) + (2 \times \text{« cavités non minières »}) + (2 \times \text{« cavités minières »}) + (2 \times \text{« Mvt terrain »}) + (3 \times \text{« Basol »}) + (2 \times \text{« artésianisme »}) + (4 \times \text{« communication aquifère »}) + (2 \times \text{« remontée de nappe »}) + (4 \times \text{« biseau salé »})$.

Valeur résultante pour les SGV :

$(10 \times \text{« évaporites »}) + (2 \times \text{« cavités non minières »}) + (2 \times \text{« cavités minières »}) + (2 \times \text{« Mvt terrain »}) + (3 \times \text{« Basol »}) + (4 \times \text{« artésianisme »}) + (4 \times \text{« communication aquifère »}) + (0 \times \text{« remontée de nappe »}) + (0 \times \text{« biseau salé »})$.

Les valeurs résultantes sont ensuite regroupées selon les trois classes suivantes, illustrées Tableau 2.

Valeur résultante : $\sum(\text{Niveau d'aléa} \times \text{Facteur aggravant})$		
Vert [0-13]	Orange[14-41]	Rouge[≥ 42]
Classe des champs « cl_doublet » et « cl_sgv »		
1	2	3

Tableau 2 : Table de classification du niveau d'aléa réglementaire (vert, orange, rouge) en fonction de sa valeur résultante

Le classement en zone verte, orange ou rouge est effectué pour les trois niveaux de profondeur 10-50m, 10-100m et 10-200m avec une règle d'héritage de la zone sus-jacente lorsque l'aléa est plus élevé que celui des autres profondeurs. Il est convenu en termes de représentation, qu'un aléa élevé, présent en surface, c'est-à-dire entre 10 et 50m de profondeur, décrit un risque pour la réalisation d'un ouvrage de GMI dans cette tranche d'épaisseur. Tout ouvrage qui traverse cette tranche, comme c'est également le cas des niveaux 10-100m et 10-200m de profondeur, est soumis à cet aléa. De ce fait, la valeur résultante de l'intervalle 10-100m ne pourra pas être inférieure à celle calculée pour l'intervalle 10-50m, et celle de l'intervalle 10-200m ne pourra pas être inférieure à celle de l'intervalle 10-50m ni à celle de l'intervalle 10-100m.

Un extrait de la table attributaire de la grille est présenté Tableau 3.

	Maille	Profondeur	X_RGF93	Y_RGF93	Z_NGF	evaporites	cavite_nm	cav_min	MVT	panaches	BASOL	artésien	com_aquif	remontee	BASIAS	seisme	admin	Doublet	SGV	cl_doublet	cl_sgv
1	62457100	50	766238	6439738	684	1	0	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	18	20	2	2
2	62582600	50	766238	6440238	655	1	7	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	32	34	2	2
3	62708100	50	766238	6440738	668	1	7	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	32	34	2	2
4	62331800	50	766738	6439238	651	1	7	0	3	0	0	7	1	1	0	0	0	60	62	3	3
5	62457200	50	766738	6439738	659	1	1	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	20	22	2	2
6	62582700	50	766738	6440238	715	1	5	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	26	30	2	2

Tableau 3 : Exemple de table attributaire de la grille

4. Cartographie des aléas

4.1. ALEA « AFFAISSEMENT/SURRECTION LIE AUX FORMATIONS EVAPORITQUES »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.1.1. Description du phénomène et occurrences

La présence de formations évaporitiques peut présenter un frein au déploiement d'un dispositif de GMI. La réalisation d'un forage à l'aplomb d'une formation évaporitique présente un risque de déstructuration des terrains en surface par des phénomènes de dissolution ou de surrection suite à une mise en communication d'aquifères superficiels ou profonds avec ces horizons évaporitiques à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte (MEDDE, 2015).

Dans le cas des couches profondes d'évaporite, cet aléa nécessite la présence d'aquifères pour exister. Dans le cas des couches superficielles affleurantes d'évaporite, cet aléa nécessite soit la présence d'une source d'eau superficielle (Forte pluviométrie, inondation.) ou la remontée d'eau depuis les aquifères profonds provoqués par les travaux de forage.

4.1.2. Qualification du phénomène

La méthodologie proposée par la GMI pour la cartographie réglementaire de ce phénomène classe le niveau de susceptibilité d'apparition de ce phénomène en quatre catégories :

- **Susceptibilité forte (7)** : présence avérée d'un ou plusieurs horizons évaporitiques en quantité importante, définie soit à partir d'informations provenant de sondages ou figurant dans les notices de cartes géologiques, soit à dire d'expert sur la base du retour d'expérience ;
- **Susceptibilité moyenne (5)** : présence avérée d'un ou plusieurs horizons évaporitiques en faible quantité, définie soit à partir d'informations provenant de sondages ou figurant dans les notices géologiques, soit à dire d'expert sur la base du retour d'expérience ;
- **Susceptibilité faible (1)** : pas d'horizons évaporitiques connus mais formation susceptible d'en contenir ;
- **Susceptibilité nulle (0)** : formation ne pouvant pas contenir d'horizons évaporitiques.

4.1.3. Données utilisées et traitement

Comme préconisé par le guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015), la qualification du phénomène « Affaissement/Surrection lié aux formations évaporitiques » nécessite l'utilisation de différents jeux de données :

- La carte géologique harmonisée et vectorisée à l'échelle 1/50.000ème ;
- Les notices géologiques numérisées ;
- Les données issues des forages de la Banque du Sous-Sol (BSS) – données extraites en avril 2021 ;
- Le modèle hydrogéologique du sud-Vendée (Domez et al, 2010) ;

- Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères (BD LISA) version 2 de niveau 3 (échelle locale) - – données extraites en avril 2021.

Traitements géomatiques :

- Etape 1 : Identification des horizons évaporitiques
 - Recherche par mots clefs des formations évaporitiques à l’affleurement au sein des :
 - Cartes géologiques harmonisées et vectorisées à l’échelle 1/50.000ème ;
 - Notices géologiques numérisées.
 - Recherche par mots clefs des formations évaporitiques en profondeur au sein des :
 - Données issues des forages de la Banque du Sous-Sol (BSS).
- Etape 2 : Affectation des horizons évaporitiques aux :
 - Emprises des unités hydrologiques extraites de la BD LISA ;
 - La position en profondeur des horizons évaporitiques a été obtenu par exploitation des données de la BSS. Les emprises de ces horizons ont été extraites de la BD LISA et affectées aux trois intervalles de profondeur 10-50m, 10-100m, 10-200m en fonction de la profondeur indiquée par les données de la BSS.
 - Rasters du modèle hydrogéologique « SudVendée » (Domez et al, 2010) :
 - Les données de la BSS en Sud-Vendée ont mis en évidence la présence d’un seul horizon évaporitique. Après identification de celui-ci à partir du modèle hydrogéologique local, une extraction de son emprise au sol par gamme de profondeur (10-50m, 10-100m et 10-200m) a été réalisée.
- Etape 3 : Création d’un nouveau champ « Evap » et attribution des notes de susceptibilité par gamme de profondeur en fonction de la présence/absence d’horizons évaporites.

4.1.4. Cartographie de l’aléa « Affaissement/surrection lié aux évaporites »

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est présentée dans le

Tableau 4.

Evaporites	Niveau susceptibilité	Nbr mailles (250mx250m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture
10-50m	Faible (1)	22949	1434.3	4.4
	Nul (0)	494252	30890.8	95.6
10-100m	Faible (1)	28813	1800.8	5.6
	Nul (0)	488388	30524.3	94.4
10-200m	Faible (1)	28944	1809.0	5.6
	Nul (0)	488257	30516.1	94.4

Tableau 4 : Table d’évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » pour les gammes de profondeur 10-50m / 10-100m / 10-200m»

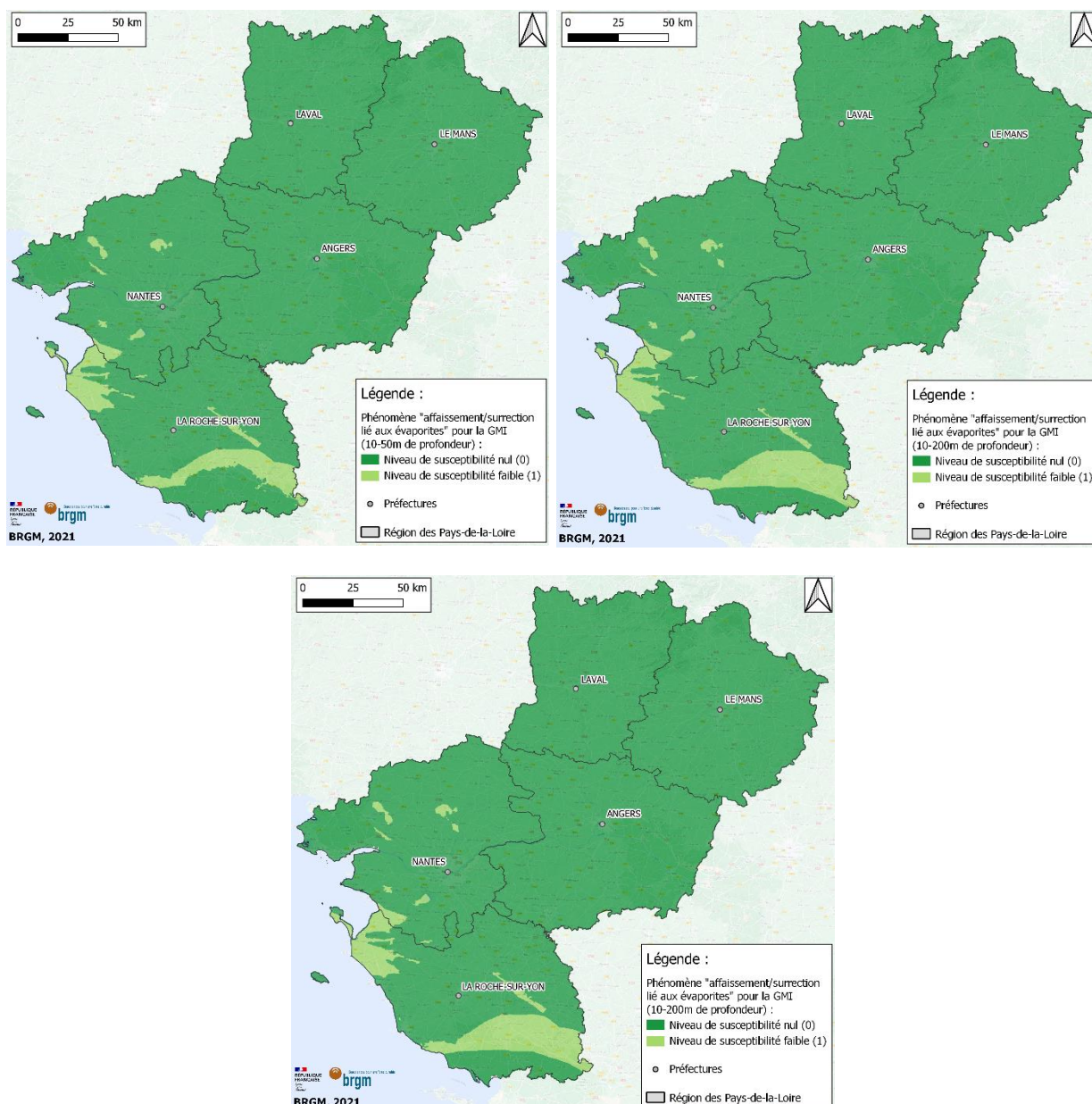


Figure 5 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas)

4.1.5. Cotation de l'aléa « Affaissement/surrection lié aux évaporites »

Le guide méthodologique propose 4 niveaux de susceptibilité (0, 1, 5 et 7) pour les cartes régionales (§4.1.2). Ces cotations correspondent respectivement aux classes de susceptibilité nulle, faible, moyen et forte définies plus haut.

Ce type de formation étant peu présente en région Pays-de-la-Loire, seuls les niveaux de susceptibilité nul (0) et faible (1) ont été caractérisés :

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Evaporites	Initiale	0	-	-	-	-	-	-	-	0	6	10	0	0
	Révisée	0	1	-	-	-	-	-	-	1			6	10

Tableau 5 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/surrection lié aux évaporites » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

4.2. ALEA « AFFAISSEMENT/EFFONDREMENT LIE AUX CAVITES (HORS MINES) »

Cet aléa a été évalué par le Cerema.

4.2.1. Description du phénomène et occurrences

Des phénomènes d'affaissement ou d'effondrement de terrain pourraient être provoqués, soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif de GMI, soit sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface, d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités potentiellement présentes.

Dans le cas de la présence de cavité, la réalisation des ouvrages peut s'avérer difficile et des affaissements ou effondrements peuvent se produire pendant ou à la suite d'une mauvaise exécution de l'ouvrage.

Les cavités de dissolution des réseaux anciens dans les zones karstiques, potentiellement remplies de matériaux sans cohérence, sont également concernées par des affaissements ou effondrements par des infiltrations d'eau et le soutirage de matériaux.

4.2.2. Qualification du phénomène

La méthodologie proposée par le guide de 2015 de la GMI en vue de la cartographie réglementaire de ce phénomène, classe le niveau de susceptibilité d'apparition d'affaissement ou d'effondrement en six catégories avec des notations différentes selon la source et le format de l'information.

En présence d'une carte d'aléa, le phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines » est caractérisé par des niveaux, en fonction de la présence de formations géologiques susceptibles de contenir des cavités et selon le type de processus rencontré :

- Niveau **fort** : zone potentiellement concernée par des **effondrements localisés**, généralisés ou en masse, noté 7 ;
- Niveau **moyen** : zone potentiellement concernée par un aléa **affaissement progressif**, noté 5

- Niveau **faible** : zone concernée par des cavités engendrant des mouvements résiduels de faible ampleur de type **tassement** ou zone sans cavité connue mais susceptible d'en contenir, noté 1 ;
- Niveau **nul** : zone non susceptible de contenir des cavités, noté 0.

En l'absence de carte d'aléa, les susceptibilités sont définies à partir du comptage, pour chaque maille de 250 m x 250 m, des événements recensés à partir de la base de données « Cavités » du BRGM. Le niveau de susceptibilité de l'apparition du phénomène est défini de la façon suivante :

- Susceptibilité **forte** : au moins 3 cavités recensées par pixel 250 m x 250 m, notée 3 ;
- Susceptibilité **moyenne** : 2 cavités recensées par pixel 250 m x 250 m, notée 2 ;
- Susceptibilité **faible** : 1 cavité recensée par pixel 250 m x 250 m ou présence d'une formation géologique susceptible d'en contenir (zone karstique), notée 1 ;
- Susceptibilité **nulle** : pas de cavité recensée par pixel 250 m x 250 m et pas de formation susceptible d'en contenir, notée 0.

Il est à noter que, d'après le guide méthodologique de 2015, les données provenant des cartes d'aléa sont prépondérantes par rapport aux données résultant de la BD Cavité.

En résumé, les pondérations attribuées au phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » sont définies selon le tableau suivant :

	Niveau d'aléa / Susceptibilité du phénomène			
	Nul(le)	Faible	Moyen(ne)	Fort(e)
Commune avec carte d'aléa – données surfaciques	0 Pas de formation susceptible de contenir des cavités	1 Tassement	5 Affaissement progressif	7 Effondrement localisé ou généralisé
BD Cavité – données ponctuelles	0 Pas de formation susceptible de contenir des cavités 0 cavités comptée par maille	1 Formation susceptible de contenir des cavités (zone karstique) 1 cavité comptée par maille	2 2 cavités comptées par maille	3 3 cavités comptées par maille

Tableau 6 : Caractérisation du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines"

4.2.3. Données utilisées et traitement

a) Cartes d'aléa

Les données provenant des cartes d'aléa sont issues de sources différentes, selon les départements. Un grand nombre de communes présente des cartes d'aléa de type Plan de

Prévention des Risques (PPR) cavité ou PPR mouvement de terrain, dans lesquels ont été extraits les aléas « cavités ».

Les différentes DDT(M) ont été consultées du 4 mai au 7 juin 2021. Leurs données ont été complétées par des extractions depuis le site Sigloire, consulté le 4 mai 2021. Le BRGM a également fourni les fichiers numériques des carrières d'ardoise sur le secteur d'Angers, le 28 avril 2021.

Les aléas issus des cartes ont été définis en 3 catégories, avec une retranscription en niveau d'aléa :

- Les effondrements localisés ou généralisés classés en niveau d'aléa fort (note 7) ;
- Les affaissements progressifs classés en aléa moyen (note 5) ;
- Les mouvements résiduels de faible ampleur, les tassements classés en aléa faible (note 1).

Quelques interprétations ont été réalisées au niveau de certains PPR, recensant des marnières. Celles-ci ont été transcrites en effondrement localisé. Deux marnières remblayées ont été classées en aléa tassement.

Pour certains PPR, seuls les règlements sont disponibles. En l'absence des cartes d'aléas et de la description détaillée des phénomènes et à la suite de la lecture des rapports de présentation, les aléas « cavités » ont été interprétés en effondrement localisé.

L'aléa affaissement progressif n'a pas été recensé dans la région des Pays-de-la-Loire.

Une fois les données collectées et analysées, elles sont projetées sur la grille 250 m x 250 m. Chaque maille de la grille intersectée par un aléa obtient la note de l'aléa correspondant, tout en conservant la note la plus défavorable.

b) BD Cavité

En l'absence de carte d'aléas, la qualification du phénomène s'est appuyée sur les données ponctuelles issues de la BD Cavité consultée le 22 avril 2021 et complétée par des données fournies par les DDT(M).

C'est la précision géographique de la donnée qui est prise en considération. Ce critère va définir le tampon appliqué à chaque événement, il sera égal à un rayon de 50 m augmenté de la précision de la donnée :

Précision	Métrique	Décamétrique	Hectométrique	Kilométrique	Centre commune
Tampon (m)	51	60	150	1050	Supprimé

Tableau 7: Valeurs des tampons attribués aux événements ponctuels "Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines"

Après analyse des données, les événements localisés au niveau du centroïde de la commune ont été supprimés. Lorsque 2 cavités ponctuelles se trouvaient à une distance inférieure à 1 m, celle avec la meilleure précision a été conservée. Pour 2 événements à une distance entre 1 et 5 m et une précision autre que métrique, l'entité avec la meilleure précision a été gardée. Cependant, si les 2 entités avaient une précision métrique, alors elles ont été conservées toutes les deux.

La profondeur de la cavité a été aussi prise en compte, si deux événements étaient très proches

avec une profondeur différente, les deux ont été gardés.

Les tampons associés aux cavités ponctuelles sont découpés par la grille de 250 m x 250 m. Les différentes portions de tampons des évènements sont décomptées par maille et donnent ainsi la susceptibilité du phénomène notée 0-1-2-3 (voir paragraphe 4.2.2 et

Tableau 6).

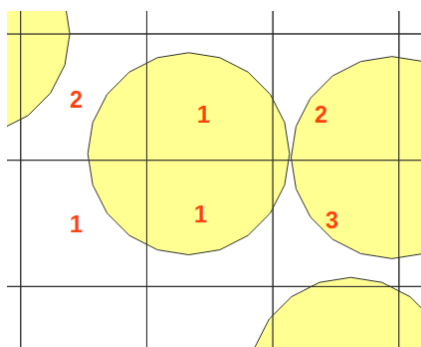


Figure 6 : Principe du comptage par maille des évènements ponctuels avec leur tampon (en rouge le nombre d'évènements par maille)

c) Zone karstique

L'emprise de la zone karstique a été extraite à partir du site de la BD Lisa, <https://bdlisa.eaufrance.fr/> le 20 juillet 2021. Les formations géologiques ne présentant aucun aléa de cavité ou des évènements ponctuels ont été supprimées.

Les couches géologiques prises en compte sont :

- Les calcaires du Dogger dans le département de la Vendée ;
- La partie affleurante de la craie marneuse du Turonien inférieur dans la Sarthe et le Maine-et-Loire ;
- Les calcaires du Rupélien supérieur en Loire-Atlantique.

Une fois nettoyée, l'emprise de la zone karstique a été projetée sur la grille 250mx250m. La surface karstique étant importante (environ 6 000 km²), les mailles présentant un recouvrement inférieur à 20 % de leur surface par celle-ci n'ont pas été prises en considération dans la notation des aléas faible « affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine ».

Sur la région des Pays-de-la-Loire, le phénomène « affaissement/effondrement lié à une cavité hors mine » est très répandu. Tous les évènements s'étant produits en dehors d'une formation géologique susceptible de renfermer des cavités ont été pris en compte.

4.2.4. Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »

La profondeur des cavités n'apparaît pas dans les cartes d'aléa. Seules quelques données ponctuelles indiquent des profondeurs : sur 5413 évènements, 82 indiquent une profondeur supérieure à 50 m, dont 18 une profondeur supérieure à 100 m.

Les trois grilles correspondant aux profondeurs 10-50m, 10-100m et 10-200m sont donc différentes. Les différences ne concernent que quelques mailles (voir

Tableau 8).

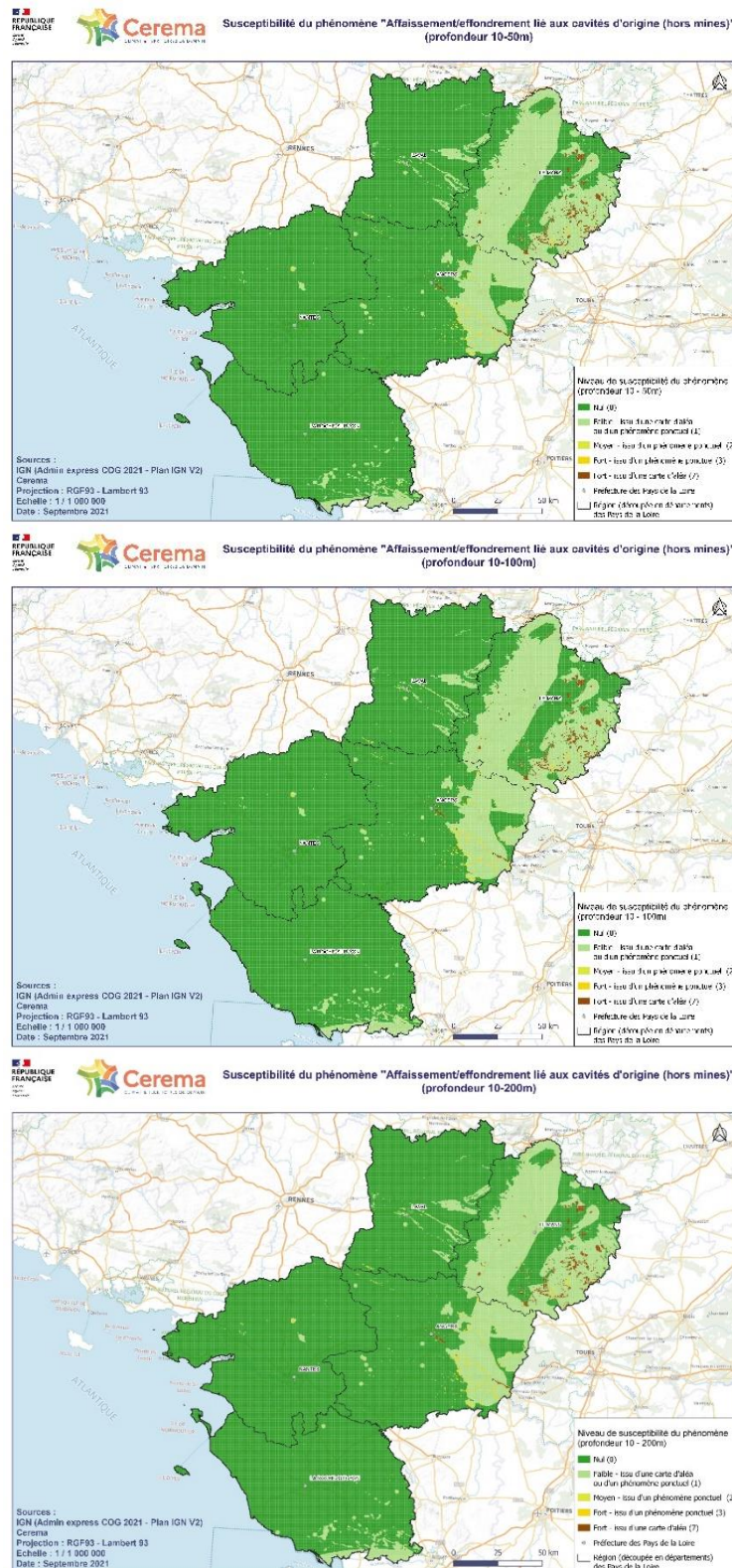


Figure 7 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut), 10-100m de profondeur (carte du milieu) et 10-200m de profondeur (carte du bas)

Cavités hors mines	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (250mx250m)	Surface [km ²]	Surface [%]
10 – 50 m	Fort (7)	3 528	221	0,68
	Fort (3)	1 203	75	0,23
	Moyen (2)	918	57	0,18
	Faible (1)	99 614	6 226	19,26
	Nul (0)	411 938	25 746	79,65
10 – 100 m	Fort (7)	3 528	221	0,68
	Fort (3)	1 220	76	0,24
	Moyen (2)	939	59	0,18
	Faible (1)	99 637	6 227	19,26
	Nul (0)	411 877	25 742	79,64
10 – 200 m	Fort (7)	3 528	221	0,68
	Fort (3)	1 222	76	0,24
	Moyen (2)	940	59	0,18
	Faible (1)	99 643	6 228	19,27
	Nul (0)	411 868	25 742	79,63

Tableau 8 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » pour les différentes gammes de profondeur

4.2.5. Cotation de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Cavité (NM)	Initiale	0	1	2	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	2	3	-	-	-	7	7			14	14

Tableau 9 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

4.3. ALEA « AFFAISSEMENT /EFFONDREMENT LIE AUX CAVITES MINIERES »

Cet aléa a été évalué par le Cerema.

4.3.1. Description du phénomène et occurrences

Les phénomènes pris en considération sont les effondrements localisés de type « fontis », les effondrements généralisés ainsi que les 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 généralement qu'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 être provoqués soit par foration au cours de la mise en place du dispositif, soit sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.

4.3.2. Qualification du phénomène

Deux types de données sont exploitées pour ce phénomène : les données surfaciques à partir des cartes d'aléas et les données ponctuelles à partir de la base de données « mouvements de terrain ». Le traitement des données surfaciques est prioritaire par rapport aux données ponctuelles.

Pour les communes disposant d'une carte d'aléa minier de type PPR minier, la qualification du phénomène est basée sur le type de phénomène recensé et non sur le niveau de l'aléa :

- Niveau **fort** : zones potentiellement concernées par des phénomènes d'**effondrements** localisés et généralisés ;
- Niveau **moyen** : zones potentiellement concernées par des phénomènes d'**affaissement** progressif ;
- Niveau **faible** : zones exploitées qui ne peuvent engendrer en surface que des mouvements **résiduels** de faible ampleur ;
- Niveau **nul** : zones sans travaux miniers.

En cas d'absence de cartographie du niveau d'aléa minier, la qualification de ce phénomène est basée sur la présence de site minier, dont la donnée ponctuelle est issue de la base « Sigmines ». Les sites miniers recensés sont classés en aléa/susceptibilité faible.

Les pondérations attribuées au phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » sont définies selon l'origine de la donnée :

	Niveau d'aléa / susceptibilité du phénomène			
	Nul(le)	Faible	Moyen(ne)	Fort(e)
Commune avec carte d'aléa	0	1	5	7
Données ponctuelles (Sigmines)	0	3	-	-

Tableau 10 : Caractérisation du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières"

4.3.3. Données utilisées et traitement

a) Cartes d'aléa

Selon la méthodologie du guide de 2015, les données surfaciques sont issues des cartes d'aléas réalisées par Géodéris. À partir des données fournies par les différentes DDT(M) des Pays-de-la-Loire et Géodéris contactés du 4 au 7 juin 2021, et du site Sigloire consulté le 4 mai 2021, trois catégories de phénomènes ont été classées en trois niveaux d'aléa :

- Les tassements classés en niveau d'aléa faible (1) ;
- Les affaissements progressifs classés en aléa moyen (5) ;
- Les effondrements localisés classés en aléa fort (7).

Une fois les données recensées et analysées, elles sont projetées sur la grille 250 m x 250 m. Chaque maille de la grille intersectée par un aléa obtient la note de l'aléa correspondant, tout en conservant la note la plus défavorable.

b) Données Sigmines

En l'absence de carte d'aléas, la qualification du phénomène s'est appuyée sur les données du site Sigmines dont les extractions ont été réalisées par le BRGM le 11 mai 2021.

Vingt-deux sites sur les 63 répertoriés dans les départements des Pays-de-la-Loire ont été supprimés du fait de leur proximité et de leur chevauchement avec les zones d'aléa.

Trois sites ont été également supprimés du fait de l'incertitude géographique, dont un localisé dans le département de la Gironde et deux en Île et Vilaine.

Trente-huit sites ont été traités.

Autour de chaque site Sigmines recensé, un tampon de rayon de 5 000 m est créé, comme l'indique le guide méthodologique. Ensuite, ces tampons ont été découpés par la grille de 250 m x 250 m. Du fait de l'importance du tampon autour des sites miniers, les mailles présentant un recouvrement inférieur à 20 % de leur surface par le tampon n'ont pas été prises en compte.

4.3.4. Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités minières »

Les profondeurs des exploitations minières n'étant pas indiquées dans les données d'origine, les grilles correspondant aux trois profondeurs initiales 10-50 m, 10-100 m, 10-200 m seront ainsi identiques.

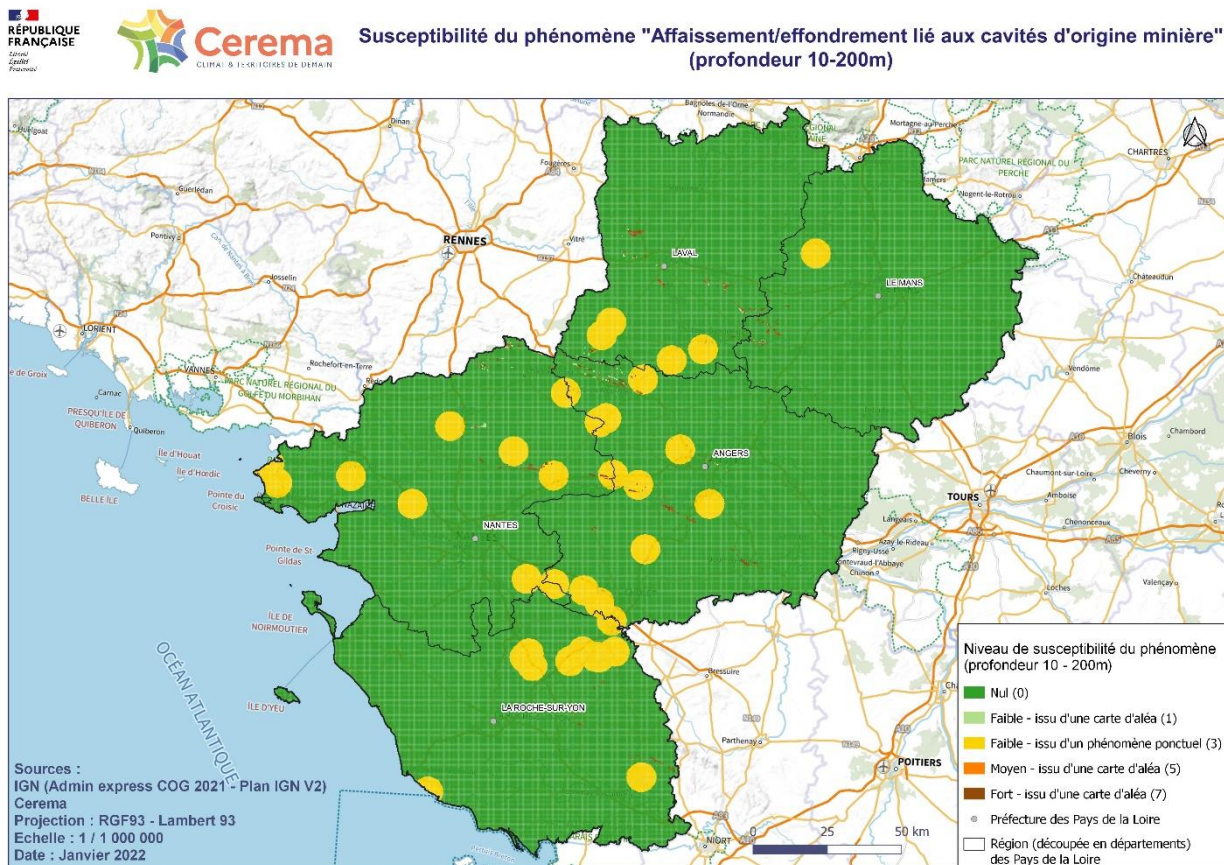


Figure 8 : Carte de susceptibilité du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières" en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est la suivante :

Cavités minières	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (250mx250m)	Surface [km ²]	Surface [%]
10 – 200 m	Fort (7)	1 491	93	0,29
	Moyen (5)	23	1	0,00
	Faible (3)	37 996	2 375	7,35
	Faible (1)	347	22	0,07
	Nul (0)	477 344	29 834	92,29

Tableau 11 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène "Affaissement/effondrement lié aux cavités minières"

4.3.5. Cotation de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités minières »

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Cavité minière	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	-	3	-	5	-	7	7			14	14

Tableau 12 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

4.4. ALEA « MOUVEMENT DE TERRAIN DE TYPE GLISSEMENT »

Cet aléa a été évalué par le Cerema.

4.4.1. Description du phénomène et occurrences

Le phénomène mouvement de terrain correspond au glissement de terrain. Les zones présentant les conditions géométriques et lithologiques favorables au déclenchement d'un 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 le déclencheur d'un glissement de terrain. Il en est de même pour la mise en communication avec des eaux superficielles, souterraines ou un fluide caloporteur. Un tel phénomène est donc susceptible de se produire durant la foration ou 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. Selon les couches lithologiques affectées et la géométrie de celles-ci, ce phénomène 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 a pas de phénomène naturel de glissement de terrain, mais l'impact de la géothermie sur ce phénomène est limité.

4.4.2. Qualification du phénomène

Deux types de données sont exploitées pour ce phénomène : les données surfaciques à partir des cartes d'aléas et les données ponctuelles à partir de la base de données « mouvements de terrain ». Le traitement des données surfaciques est prioritaire par rapport aux données ponctuelles.

Dans les communes disposant d'une carte d'aléa mouvements de terrain, la qualification du phénomène est basée sur le niveau de l'aléa glissement de terrain :

- Niveau fort : dans les zones cartographiées en **aléa « fort »**, noté 7 ;
- Niveau moyen : dans les zones cartographiées en **aléa « moyen »**, noté 5 ;
- Niveau faible : dans les zones cartographiées en **aléa « faible »**, noté 1 ;
- Niveau nul : dans les zones cartographiées en **aléa « nul »**, noté 0.

Dans le cas d'absence de cartographie du niveau d'aléa de glissement de terrain, la qualification de ce phénomène est la susceptibilité qui correspond à la probabilité d'occurrence de l'apparition du phénomène basée sur la densité des évènements par maille traitée. Le recensement des évènements est réalisé à partir de la base de données du BRGM, la BDMVT. Dans ce cas, la qualification du phénomène est définie de la façon suivante :

- Susceptibilité **forte** : minimum **3** glissements recensés (pixel 250m x 250 m), noté 3 ;
- Susceptibilité **moyenne** : **2** glissements recensés (pixel 250m x 250 m), noté 2 ;
- Susceptibilité **faible** : **1** glissement recensé (pixel 250m x 250 m), noté 1 ;
- Susceptibilité **nulle** : pas de mouvement de terrain recensé (pixel 250m x 250 m), noté 0.

Les pondérations attribuées au phénomène « Mouvement de terrain » sont définies selon l'origine de la donnée :

	Niveau d'aléa / susceptibilité du phénomène			
	Nul(le)	Faible	Moyen(ne)	Fort(e)
Commune avec carte d'aléa – données surfaciques	0	1	5	7
BDMVT – données ponctuelles	0	1	2	3

Tableau 13 : Caractérisation du phénomène "Mouvement de terrain"

4.4.3. Données utilisées et traitement

a) Carte d'aléa

Selon la méthodologie du guide de 2015, les données surfaciques sont issues des Plans de Prévention des Risques (PPR) naturels mouvement de terrains et des PPR miniers et de cartes d'aléas diverses. A partir des données fournies par les différentes DDT(M) consultées du 4 au 7 juin 2021 et du site Sigloire consulté le 22 avril 2021, seuls les glissements de terrain et les coulées boueuses ont été extraits.

Une fois collectée, les données surfaciques sont projetées sur la grille 250mx250m. Chaque maille de la grille intersectée par un aléa, obtient la note de l'aléa correspondant. La note la plus défavorable est conservée.

b) BD MVT

En l'absence de carte d'aléas la qualification du phénomène s'est appuyée sur les données de la BDMVT dont les extractions ont été réalisées par le BRGM le 9 juin 2021. Chaque évènement recensé fait l'objet d'une précision sur sa géolocalisation. C'est ce critère qui va définir la zone tampon attribuée. La valeur de cette zone tampon est égale à 100 m augmentée de la précision :

Précision	Métrique	Décamétrique	Hectométrique	Kilométrique	Centre commune
Tampon (m)	101	110	200	1100	Supprimé

Tableau 14 : Valeurs des tampons attribués aux évènements ponctuels "Mouvement de terrain"

Les différentes portions des tampons des évènements sont comptées par maille de 250mx250m et donne ainsi la susceptibilité du phénomène (voir paragraphe 4.4.2 et

Figure 6).

4.4.4. Cartographie de l'aléa « Mouvement de terrain de type glissement »

Les grilles correspondant aux trois profondeurs initiales 10-50 m, 10-100 m, 10-200 m sont identiques. Dans la région des Pays-de-la-Loire, aucun glissement profond au-delà de 50 m n'est connu. Il ne sera retenu qu'une seule grille : 10-200m.

Les glissements de terrain sont peu représentés dans la région des Pays-de-la-Loire avec 264 événements recensés et ne représentant que des petites superficies dispersées (au total 8,9 km²).

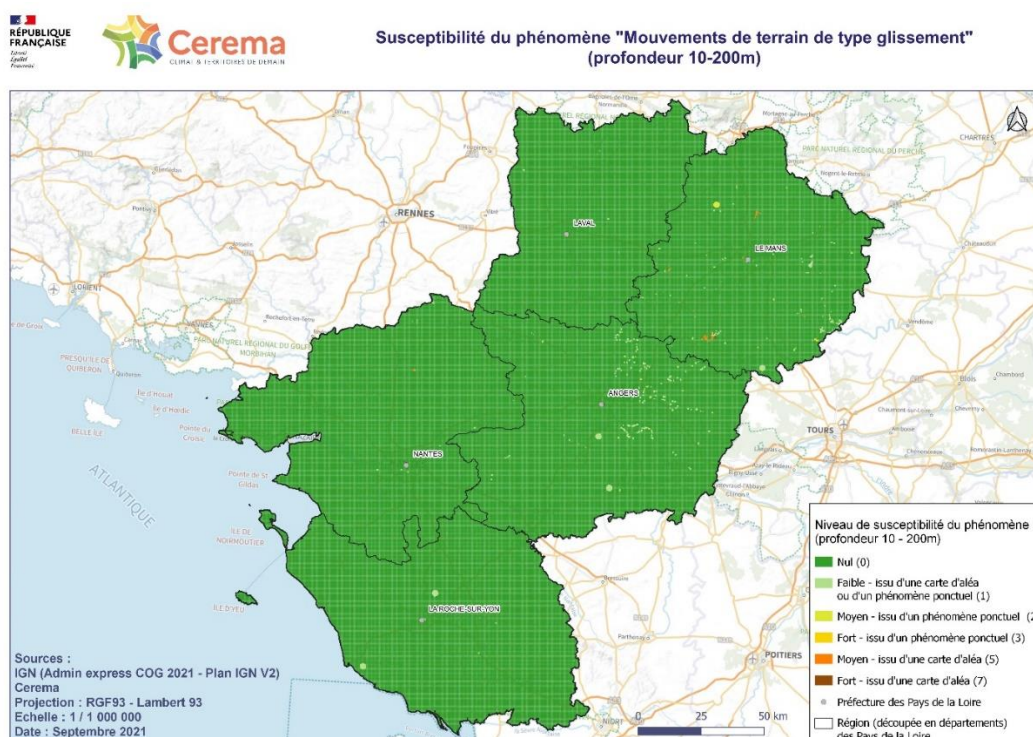


Figure 9 : Carte de susceptibilité du phénomène "Mouvement de terrain" en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est la suivante :

Glissements	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (250mx250m)	Surface [km ²]	Surface [%]
10 – 200 m	Fort (7)	17	1	0,00
	Moyen (5)	162	10	0,03
	Fort	30	2	0,01
	Moyen (3)	167	10	0,03
	Faible (1)	1 947	122	0,38
	Nul (0)	514 878	32 180	99,55

Tableau 15 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain » pour la profondeur 10-200 m

4.4.5. Cotation de l'aléa « Mouvement de terrain de type glissement »

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
		Mvt terrain	Initiale	0	1	2	-	-	-		-	-	2	2
Révisée	0		1	2	3	-	5	-	7	7	14	14		

Tableau 16 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain de type glissement » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

4.5. ALEA « POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.5.1. Description du phénomène et occurrences

Le phénomène « Pollution des sols et des nappes par infiltration de polluants depuis la surface ou mise en contact d'aquifères avec des nappes polluées » est décrit dans ce paragraphe.

L'impact des forages sur la migration des polluants dans le sous-sol est fortement sous-estimé et est suspecté de présenter un rôle non négligeable dans la caractérisation du risque de pollution (Miquel et al, 2003). 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.

4.5.2. Qualification du phénomène

Ce type de phénomène, lié aux activités anthropiques, n'est pas représenté sous forme de carte d'aléa. Ainsi, le guide méthodologique pour la cartographie réglementaire de GMI précise la méthode d'affectation des niveaux de susceptibilité en fonction de données ponctuelles :

- **Susceptibilité forte (6)** : pollution avérée de la nappe à partir des données BASOL ;
- **Susceptibilité moyenne (4)** : présence d'un site BASOL et présence d'aquifère sous-jacent ;
- **Susceptibilité faible (1)** : présence d'un site BASOL et absence d'aquifère sous-jacent ;
- **Susceptibilité nulle (0)** : pas de site BASOL répertorié dans la base.

4.5.3. Données utilisées et traitement

Comme préconisé par le guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015), la qualification du phénomène « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » nécessite l'utilisation de différents jeux de données :

- Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués (BASOL) et Base de données Secteur d'Information sur les Sols (SIS) sur la région des Pays-de-la-Loire - données extraites en juin 2021;
- Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères (BD LISA) de niveau 3 sur la région des Pays-de-la-Loire – données extraites en avril 2021:
 - o Couche « EXTENSION » de la BD LISA :
 - Exploitation de l'emprise des entités hydrologiques pour déterminer si un site BASOL se trouve à l'aplomb d'une entité hydrologique (aquifère ou semi-perméable) ;

Traitements géomatiques :

- Etape 1 : Export et nettoyage des données BASOL et SIS.
 - o Application de deux tampons consécutifs de +20m et +20m.
- Etape 2 : Traitement des données BASOL et SIS.
 - o Application d'une bande tampon de 500m.
- Etape 3 : Traitement des données de la BD LISA.
 - o Extraction des unités « aquifères » et « semi-perméables ».
- Etape 4 : Croisement des données BASOL+SIS avec la BD LISA et définition des niveaux de susceptibilité Nul, Faible et Moyen.
 - o Croisement réalisé via le traitement « Intersecter ».
- Etape 5 : Recherche du milieu concerné par la pollution à partir du champ « Milieu pollué » des données BASOL et SIS pour la définition du niveau de susceptibilité Fort.
 - o Création d'un nouveau champ « POLNAPPE » précisant l'état de pollution des eaux souterraines d'après les données BASOL et SIS.

4.5.4. Cartographie de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est présentée dans le Tableau 17.

Pollution des sols et des nappes	Niveau susceptibilité	Nbr mailles (250mx250m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture
10-200m	Fort (6)	1998	124.9	0.4
	Moyen (4)	5623	351.4	1.1
	Faible (1)	882	55.1	0.2
	Nul (0)	508698	31793.6	98.4

Tableau 17 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » pour la gamme de profondeur 10-200m

La carte d'aléa résultante est présentée en

Figure 10. Les pollutions considérées étant par définition superficielles, cette carte d'aléa ne différencie pas les intervalles de profondeur, les tranches profondes héritant directement leur niveau d'aléa depuis la surface.

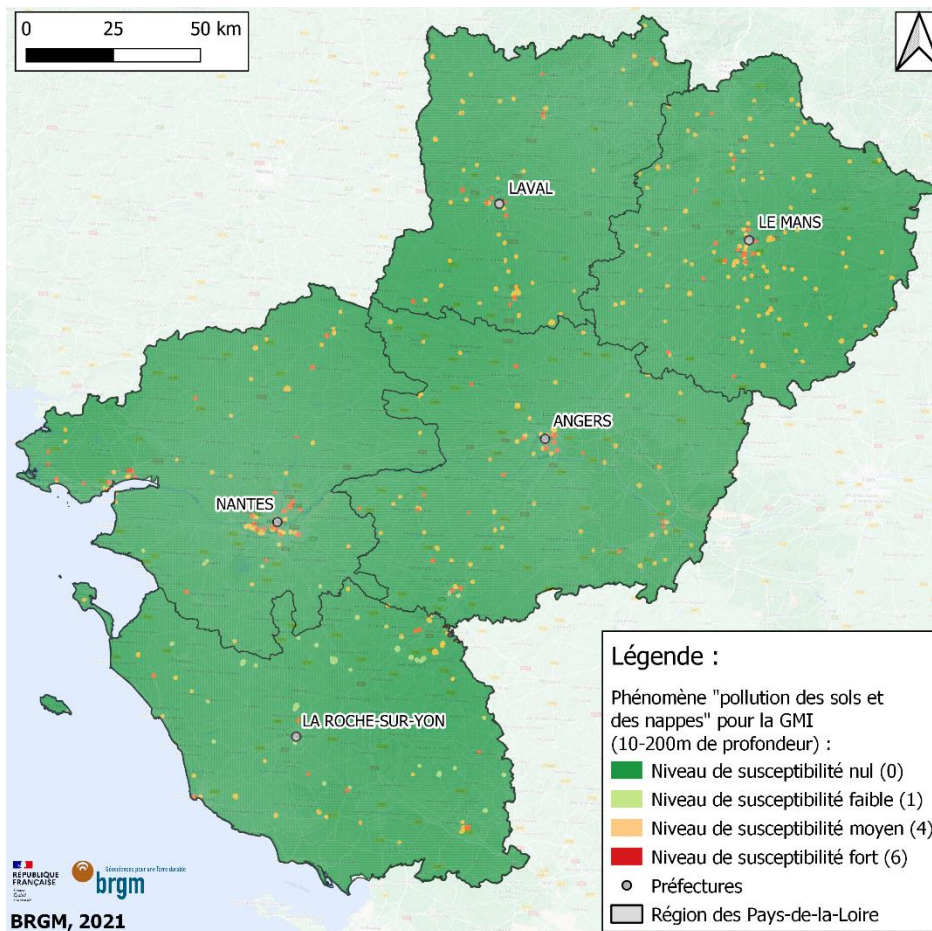


Figure 10 : Carte de susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et des nappes » en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs.

4.5.5. Cotation de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »

Le guide propose 4 niveaux de susceptibilité pour les cartes régionales. Les niveaux (0), (4), (6) et (10) correspondent respectivement aux classes d'aléa nul, moyen, fort et très fort (Tableau 18).

Son application en région Pays-de-la-Loire a nécessité la création d'un niveau additionnel de (1) qui a été utilisé pour caractériser l'aléa faible (absent de la classification régionale proposée par le guide de 2015). Le niveau très fort (10) proposé par le guide concerne les panaches de pollution cartographiés. Ce niveau de susceptibilité est absent de la cartographie de ce phénomène en région Pays-de-la-Loire de par l'absence de données exploitables sur ce type de pollution.

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Pollution sols et nappes	Initiale	0	1	-	-	4	-	6	-	6	3	3	18	18
	Révisée	0	1	-	-	4	-	6	-	6			18	18

Tableau 18 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et des nappes » et facteur aggravant– Comparaison des cartes initiale et révisée

Compte tenu des impacts potentiels liés à ce type de phénomène, le facteur aggravant potentiel est estimé à 3 pour les doublets sur aquifère et les sondes géothermiques verticales, soit une valeur maximale résultante de 18.

Sur demande de la DREAL Pays-de-la-Loire, le code « Admin » a été utilisé pour intégrer en zone rouge les mailles concernées par des servitudes d'utilités publique (SUP). Les données correspondant aux SUP ont été téléchargées le 01/02/22 sur le site SigLoire (<https://catalogue.sigloire.fr/geosource/panierDownloadFrontalParametrage/c52dbaa5-c520-45cc-9396-7417dfce5377>) et complétées par les informations de la DREAL (SUP non encore intégrées à SigLoire et périmètre de protection du stockage souterrain de gaz liquéfié de Donges). 323 mailles de 250m*250m sont concernées par le code « Admin » et sont classées directement en zone rouge. Cela représente 20 km², soit 0,06 % de la surface totale de la région Pays-de-la-Loire.

4.6. ALEA « ARTESIANISME »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.6.1. Description du phénomène et occurrences

L'artésianisme se définit comme 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 provoquer des écoulements d'eau sur le sol, et/ou une déstabilisation d'une formation superficielle.

Ce type de phénomène se produit lorsque le niveau piézométrique de l'aquifère concerné est au-dessus de la surface du sol. La délimitation des secteurs d'artésianisme est obtenue en confrontant la surface piézométrique d'un aquifère captif, dont le niveau piézométrique est au-dessus du toit de l'aquifère, avec la topographie.

4.6.2. Qualification du phénomène

Le phénomène artésianisme a été qualifié comme suit :

- Susceptibilité forte : présence d'un aquifère artésien connu.
- Susceptibilité moyenne : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique proche de la surface du sol dans la tranche de terrain considérée.
- Susceptibilité nulle : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée.

La susceptibilité a été cartographiée pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

4.6.3. Données utilisées et traitement

Le guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015) présente la méthodologie générale à appliquer pour représenter le phénomène de « Artésianisme » et permettre son intégration au sein de l'analyse multicritère proposée pour la GMI.

Pour l'élaboration de la carte initiale nationale de la GMI, le travail s'est appuyé sur les données piézométriques des atlas de potentiel des ressources géothermiques sur aquifère comportant des données piézométriques ou de cartes piézométriques locales qui puissent permettre d'identifier des secteurs à risque d'artésianisme, mais la région Pays-de-la-Loire en était dépourvue.

L'option supplémentaire a été d'utiliser des indices ponctuels d'artésianisme observés à partir des données de la Banque du Sous-Sol et des chroniques piézométriques chargées dans ADES (« Accès aux Données Eaux Souterraines » ; valeurs négatives = au-dessus de la surface du sol).

Pour l'élaboration de la cartographie régionale de l'aléa « artésianisme » ces deux derniers jeux de données seront exploités.

Néanmoins, l'étude du potentiel géothermique sur le territoire Loire Layon Aubance (Baudouin & al., 2020) a fait l'objet d'une cartographie de cet aléa à l'échelle de l'EPCI (Figure 11).

Les secteurs d'artésianisme, contenus dans l'emprise des sables et marnes du Cénomanién inférieur à moyen (correspondant au code 123AE05 de la BD LISA), ont été déterminés à partir des cartes piézométriques de basses eaux et de hautes eaux disponibles.

Pour les besoins du projet, les zones de risque liés à l'artésianisme pour le forage ont pu être classés en 3 catégories, tout en considérant une marge d'incertitude de l'ordre du mètre :

- Permanent pour des surfaces piézométriques de basses eaux < 1 m par rapport à la surface du sol ;
- Temporaire pour des surfaces piézométriques de hautes eaux < 1m par rapport à la surface du sol ;
- Probable pour des surfaces piézométriques de basses eaux < 1m pour les sables du Cénomanién inférieur affleurant en bordure de la zone sous couverture.

Les grilles pour le croisement de la piézométrie avec la topographie ont une résolution de 50 m. Les contours de ces délimitations ont ensuite été lissés puis réajustés avec les courbes de niveau.

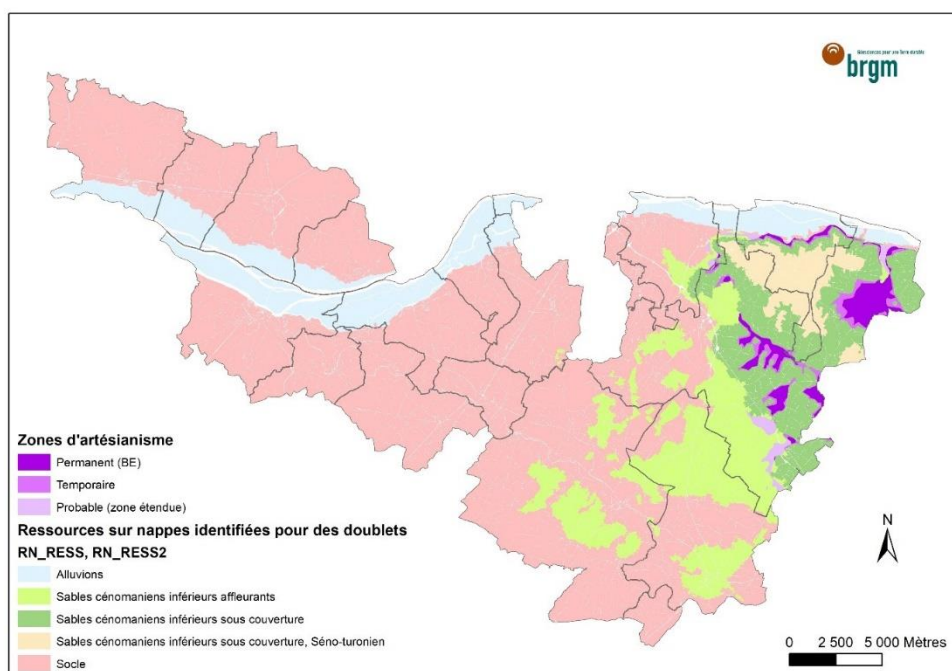


Figure 11 : Zones d'artésianisme sur le territoire de l'EPCI Loire Layon Aubance, classées en 3 catégories (Permanent, Temporaire, Probable) pour les sables inférieurs du Cénomanien

Une vérification de ce zonage à partir de dossiers de forages collectés à posteriori et qui font état de ce phénomène montre une parfaite adéquation avec la cartographie obtenue.

Ce résultat sera directement intégré en complément aux grilles finales, en appliquant une zone tampon de 50 m en prévision du changement de résolution (grille de 250 m) et de la non considération des surfaces recouvertes par maille inférieure à 20%.

Pour poursuivre ce travail d'identification des secteurs d'artésianisme avérés ou probable à l'échelle régionale, plusieurs étapes de traitement ont été nécessaires. Elles s'appuient tout d'abord sur la constitution d'un ensemble de jeux de données :

- Données BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) de niveau 3 (entités hydrogéologiques locales) sur la région des Pays-de-la-Loire – données extraites en avril 2021 ;
- BSS Banque de données du Sous-Sol : mesures ponctuelles niveaux d'eau ; indicateurs artésianisme – données extraites en avril 2021 ;
- ADES Accès aux Données Eaux Souterraines : suivis quantitatifs – données extraites en août 2021 ;
- Bd Alti MNT 25 : Modèle numérique de terrain topographique ;
- Modèle géologique MODGEAU (Rouxel & al., 2020) pour le Cénomanien en Sarthe et Maine-et-Loire (bassin parisien) ;
- Modèle géologique jurassique du Sud-Vendée ;
- Bibliographiques : grands aquifères artésiens connus sur la région.

Traitements géomatiques :

- Etape 1 : Identification des nappes captives de la BDLISA avec des phénomènes d'artésianisme reconnus à partir de mesures ou observations piézométriques

- Sélection des entités hydrogéologiques à nappes captives en contexte sédimentaire de la BDLISA
 - Etat : 1 (Entité hydrogéologique à nappe captive)
 - Etat : 3 (Entité hydrogéologique à parties libres et captives)

42 entités aquifères du domaine sédimentaire possédant au moins une partie captive ont été identifiées. Elles concernent le bassin parisien et aquitain et le secteur du bassin de Challans (Figure 12).

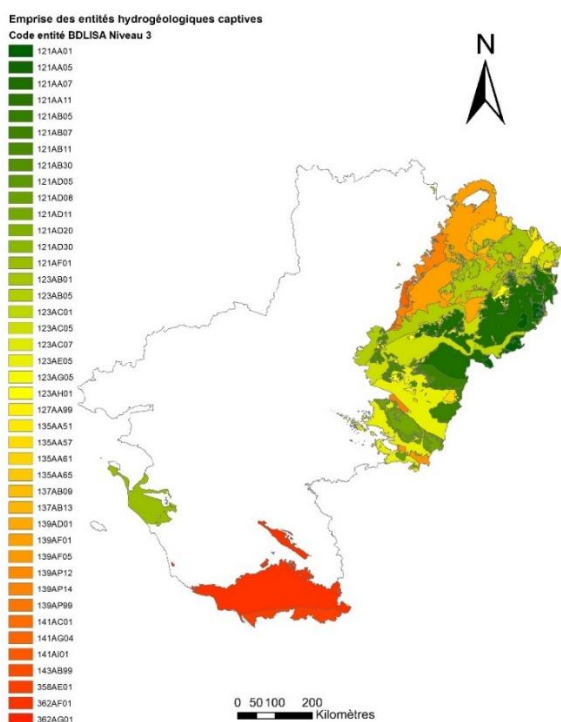


Figure 12 : Résultat de l'identification des entités aquifères captives de la BDLISA Niveau 3.

Cette première étape permet d'identifier les secteurs où des phénomènes d'artésianisme sont susceptibles de survenir lors de la réalisation de forages, et de mener par la suite des recherches de valeurs de niveau d'eau pour chacune de ces entités aquifères captives.

- Traitement des dossiers d'ouvrages en Banque du Sous-Sol avec des indices d'artésianisme :
 - Sélection des dossiers avec des valeurs de niveau d'eau négatives observés en fin de forage, et sur des mots clés tels que « Artésien », « Jaillissant ».
 - Attribution du code BDLISA auquel se rattache le niveau d'eau observé ;
 - Suppression des anomalies, et ouvrages en domaine de socle.
- Recherche de niveaux artésiens ou de très proche surface depuis les séries temporelles dans ADES (les codes entités BDLISA sont déjà renseignés)
 - Compilation des deux jeux de données et détermination de l'altitude du toit de l'entité considérée au droit de chaque ouvrage
 - Sélection des entités BDLISA avec des observations avérées d'artésianisme et ajout de celles non reconnues lors de la première phase de sélection.

15 entités ont pu être identifiées comme captives avec à minima un point de mesure ou d'observation qui témoigne d'un phénomène d'artésianisme avéré. Ces entités sont sélectionnées pour la suite des traitements.

- Etape 2 : Délimitation des emprises de zones captives susceptibles de provoquer de l'artésianisme et détermination de la profondeur toit de l'aquifère :
 - Interpolation des données de piézométrie / entité hydrogéologique (BdLISA)
 - Extraction des données points d'eau de la BSS pour chacune des entités, et compilation des mesures de niveau d'eau ;
 - Constitution d'une surface piézométrique pour chacune des entités par interpolation.
 - Soustraction raster entre MNT et piézométrie pour déterminer l'emprise des zones d'artésianisme (pour chacune des emprises des entités reconnues)
 - Interpolation de l'altimétrie du toit des entités hydrogéologiques pour attribution par classe de profondeur (50-100-200 m).

4.6.4. Cartographie de l'aléa « artésianisme »

La susceptibilité du phénomène « artésianisme » a été cartographiée pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m (Figure 13).

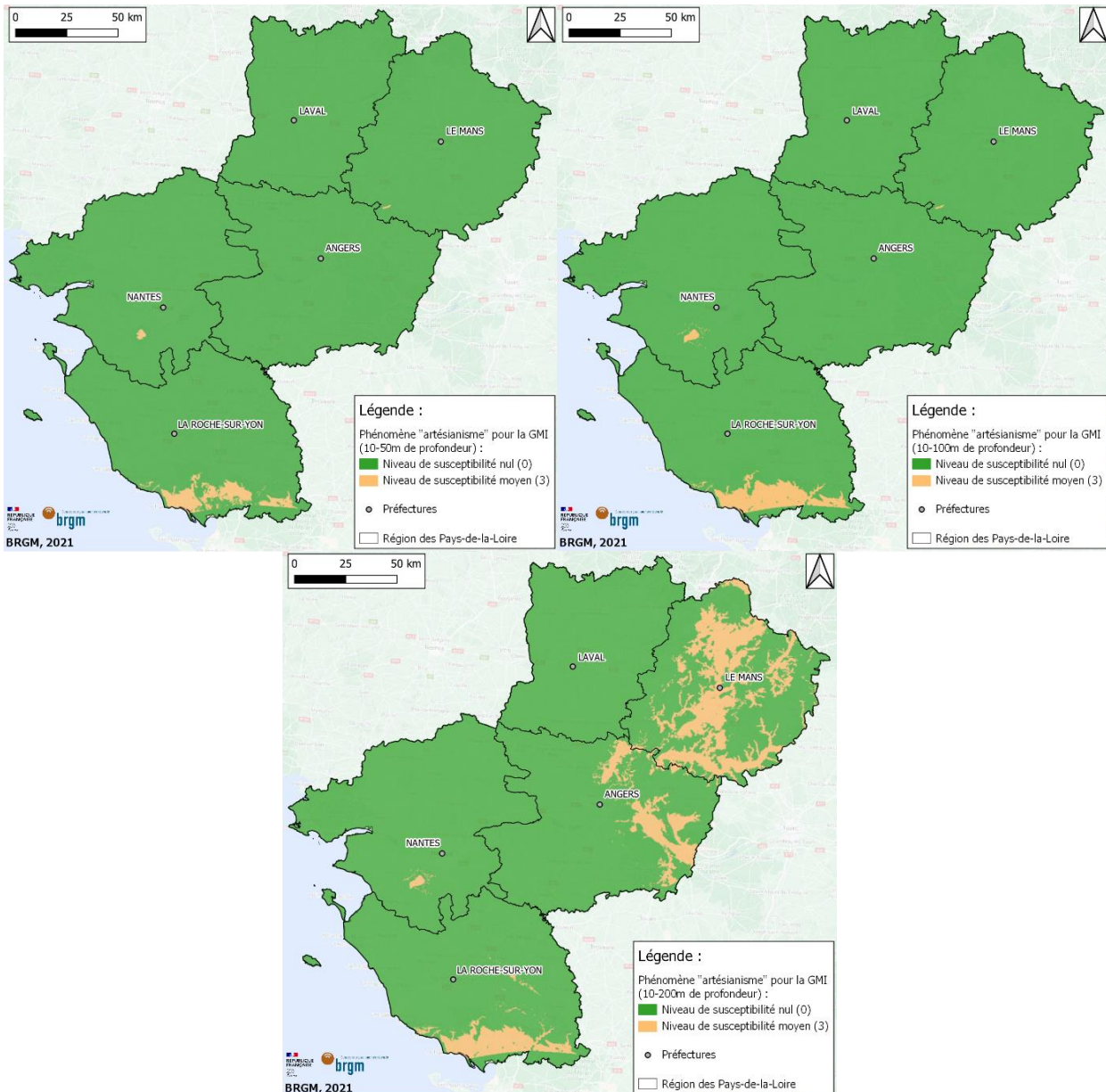


Figure 13 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Artésianisme » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas)

4.6.5. Cotation de l'aléa « artésianisme »

Le guide propose 3 niveaux d'aléa pour les cartes régionales (Tableau 19), à savoir :

- Susceptibilité forte (7) : présence d'un aquifère artésien connu. La région en est dépourvue ;
- Susceptibilité moyenne (3) : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique proche de la surface du sol dans la tranche de terrain considérée. Ce niveau d'aléa est appliqué aux secteurs identifiés ;
- Susceptibilité nulle (0) : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée.

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Artésianisme	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	4	6	12
	Révisée	0	-	-	3	-	-	-	-	3			6	12

Tableau 19 : Cotation de la susceptibilité du phénomène d'« Artésianisme » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

4.7. ALEA « MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFERES »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.7.1. Description du phénomène et occurrences

Le phénomène de « Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères » lié au déploiement d'un dispositif géothermique présente différents niveaux de risque pris en compte pour la construction de la carte réglementaire pour la GMI (MEDDE, 2015). Parmi ces risques, on retrouve :

- Un risque de dégradation de la qualité de l'eau dans un des aquifères si l'autre présente une pollution ou un faciès géochimique différent ;
- Un risque lié à une baisse du niveau piézométrique dans un aquifère pouvant entraîner des assèchements de captages voisins, voire des désordres géotechniques ;
- Un risque d'inondation d'un aquifère superficiel par remontée d'eau suite à une communication de cet aquifère avec un aquifère artésien sous-jacent.

4.7.2. Qualification du phénomène

Pour la cartographie de ce phénomène en région Pays-de-la-Loire, des données ponctuelles ont été utilisées en respectant les niveaux de susceptibilité proposés par le guide méthodologique pour la cartographie réglementaire de la GMI. Les notes de susceptibilités ont été déterminées de la façon suivante :

- **Susceptibilité moyenne (4)** : présence de plusieurs aquifères dont une ressource stratégique NAEP (Nappes à réserver pour l'Alimentation en Eau Potable) dans l'intervalle considéré ;
- **Susceptibilité faible (1)** : présence de nappes superposées dans l'intervalle considéré ;
- **Susceptibilité nulle (0)** : absence d'aquifère ou présence d'un seul aquifère dans l'intervalle de profondeur considéré.

4.7.3. Données utilisées et traitement

Le guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015) présente la méthodologie à appliquer pour représenter le phénomène de « Mise en communication d'aquifères » et permettre son intégration au sein de l'analyse multicritère proposée pour la GMI. La méthode précise l'utilisation d'un jeu de donnée commun à l'ensemble des régions :

- Données BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) de niveau 2 sur la région des Pays-de-la-Loire – données extraites en avril 2021 :
 - o - Couche « EXTENSION » de la BD LISA :
 - Identification des zones d'empilement d'aquifères pour la caractérisation de ce phénomène.

Le guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015) permet l'utilisation de données locales afin de mieux caractériser le niveau de susceptibilité lié à ce phénomène :

- Modèle Hydrogéologique « SudVendée » : Modèle en trois dimensions représentant les empilements des horizons hydrogéologiques au sud du département Vendéen (85) de la surface (Alluvions-Jurassique) jusqu'à la base de la couverture sédimentaire (domaine de socle) ;
- Modèle hydrogéologique « MODGEAU » : Modèle hydrogéologique en trois dimensions représentant l'empilements des horizons hydrogéologiques de la Sarthe (72). Ce modèle représente les unités hydrogéologiques du Cénomaniens, Post-Cénomaniens jusqu'au alluvions sus-jacents. La base de ce modèle repose sur l'empilement sédimentaire du Jurassique, lui-même reposant sur du socle cristallin.
- Couche SIG d'emprise des Nappes à réserver pour l'Alimentation en Eau Potable (NAEP) réalisée par le BRGM en partenariat avec l'agence de l'eau Loire-Bretagne et la DREAL Centre (Figure 14). Les données ont été extraites en avril 2021.

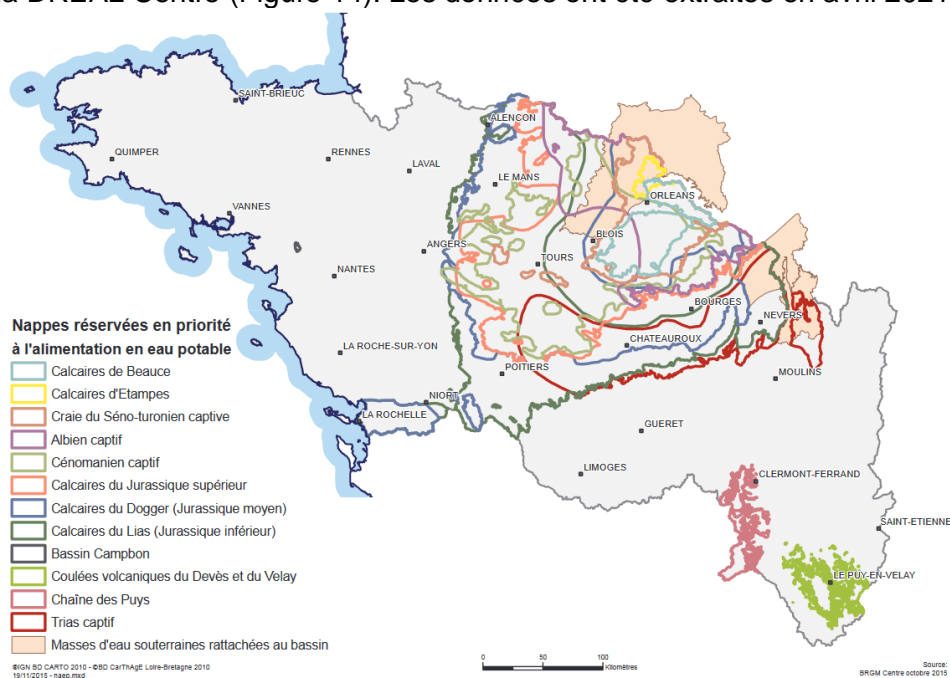


Figure 14 : Nappes réservées en priorité à l'alimentation en eau potable (rapport BRGM/RP-62961-FR)

Traitements géomatiques :

- Etape 1 : Exploitation du modèle hydrogéologique « MODGEAU » du Cénomaniens
 - o Identification et exploitation des rasters des bases des horizons imperméables qui, en cas de foration, peuvent induire une mise en communication d'aquifères ;
 - o Extraction des emprises au sol des zones de superposition d'aquifères sur les gammes 10-50m, 10-100m et 10-200m de profondeur ;
 - o Données du modèle « MODGEAU » complétées avec les emprises des aquifères du Jurassique (sous-jacent au Cénomaniens) extraits de la BD LISA.

- Etape 2 : Exploitation du modèle hydrogéologue « SudVendée » du Jurassique
 - Identification et exploitation des rasters des toits des horizons aquifères à l'aplomb d'un second aquifère qui, en cas de foration, peuvent induire une mise en communication de l'aquifères le plus superficiel vers l'aquifère sous-jacent ;
 - Extraction des emprises au sol des zones de superposition d'aquifères sur les gammes 10-50m, 10-100m et 10-200m de profondeur.
- Etape 3 : Exploitation des données de la BD LISA
 - Identification et exploitation des unités aquifères de la BD LISA sur les parties du territoire des Pays-de-la-Loire non couverts par les modèles hydrogéologiques ;
 - Utilisées en complément du modèle « MODGEAU » du Cénomani en ingérant les horizons infra-Cénomani (du Jurassique au socle cristallin).
- Etape 4 : Prise en compte des zones à « ressources stratégiques »
 - Ces données ont été croisées avec les résultats obtenu suite au traitement des modèles « MODGEAU », « SudVendée » et aux données extraites de la BD LISA pour le reste du territoire pour définir les zones à enjeux particuliers lié à la présence de NAEP ;
 - Création d'un nouveau champs « Note_Com » contenant la note de susceptibilité attribuée en fonction des préconisations du guide méthodologique (§4.7.2).

4.7.4. Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifères »

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est présentée dans le Tableau 17 ci-après.

Mise en communication d'aquifères	Niveau susceptibilité	Nbr mailles (250mx250m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture
10-50m	Moyen (4)	93220	5826.3	18.0
	Faible (1)	17146	1071.6	3.3
	Nul (0)	406835	25427.2	78.7
10-100m	Moyen (4)	104495	6530.9	20.2
	Faible (1)	23297	1456.1	4.5
	Nul (0)	389409	24338.1	75.3
10-200m	Moyen (4)	105392	6587.0	20.4
	Faible (1)	23866	1491.6	4.6
	Nul (0)	387943	24246.4	75.0

Tableau 19 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » pour les gammes de profondeur 10-50m / 10-100m / 10-200m»

La susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » a été cartographiée pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m (Figure 13).

Cartes des zones réglementaires relatives à la Géothermie de Minime Importance. Propositions pour la région Pays-de-la-Loire

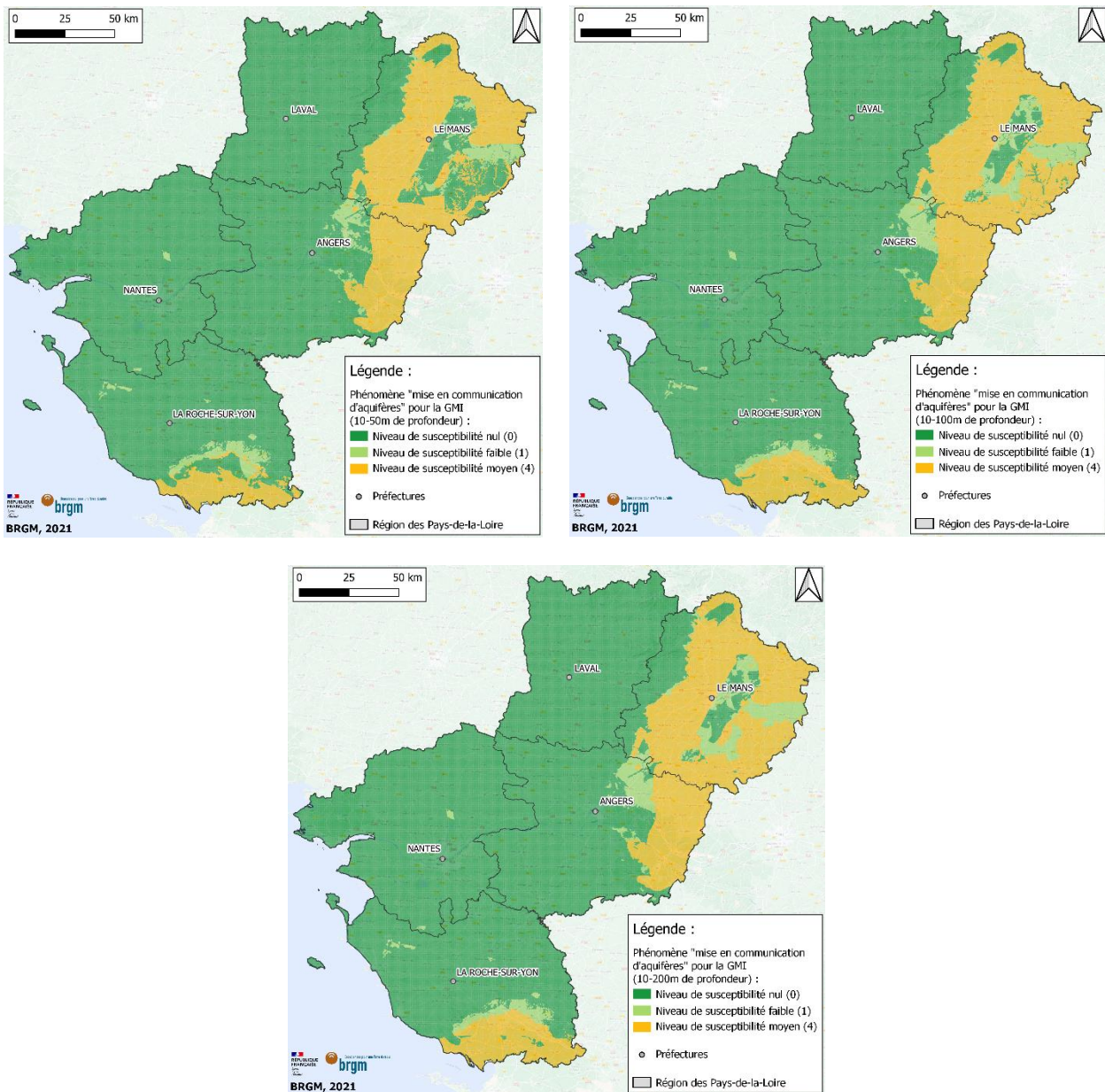


Figure 15 : Cartes de susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » en région Pays-de-la-Loire entre 10-50m de profondeur (carte du haut à gauche), 10-100m de profondeur (carte du haut à droite) et 10-200m de profondeur (carte du bas)

4.7.5. Cotation de l'aléa « mise en communication d'aquifères »

Le guide propose 3 niveaux d'aléa pour les cartes régionales (Tableau 20).

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Communication aquifères	Initiale	0	1	-	3	-	-	-	-	3	4	4	12	12
	Révisée	0	1	-	-	4	-	-	-	4			16	16

Tableau 20 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Mise en communication d'aquifères » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

Compte tenu des impacts potentiels liés à ce type de phénomène, le facteur aggravant potentiel est estimé à 4 pour les doublets sur aquifère et pour les sondes géothermiques verticales, soit une valeur maximale résultante de 16 (Tableau 20).

4.8. ALEA « INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.8.1. Description du phénomène et occurrences

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

Cet aléa ne concerne que les échangeurs ouverts (doublets géothermiques) et n'est pas considéré pour les échangeurs fermés.

4.8.2. Qualification du phénomène

Une cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe a été réalisée en 2018 par le BRGM (Brugeron et al., 2017) à la demande du ministère de la Transition écologique et solidaire. La réalisation de cette carte a reposé principalement sur l'exploitation de données piézométriques et de leurs conditions aux limites d'origines diverses (BSS, ADES « Accès aux Données Eaux Souterraines », déclarations Catastrophes Naturelles « CATNAT », résultats de modèles hydrodynamiques, isopièzes, etc.) qui, après avoir été validées, ont permis, par interpolation, de créer une grille nationale (mailles de 250 m x 250 m) des cotes maximales probables. Par soustraction aux côtes du modèle numérique de terrain de la BD ALTI, les valeurs de débordement potentielles ont ensuite pu être obtenues. Les résultats de ces travaux sont publics et mis à disposition sur le site <http://georisques.gouv.fr>.

Cette cartographie distingue :

- Les « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » pour lesquelles la différence de cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est négative ;

- Les « zones potentiellement sujettes aux inondations de caves » pour lesquelles la différence entre la cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est comprise entre 0 et 5 m ;
- Les « zones sans débordement » au-delà.

Un certain nombre de recommandations entourent l'utilisation de cette carte. Il est ainsi conseillé d'afficher plusieurs masques afin de lire l'information correctement : celui des terrains affleurants imperméables (la nappe ne peut remonter s'ils sont continus), des zones karstiques et les zones urbaines (carte non valable sur ces dernières).

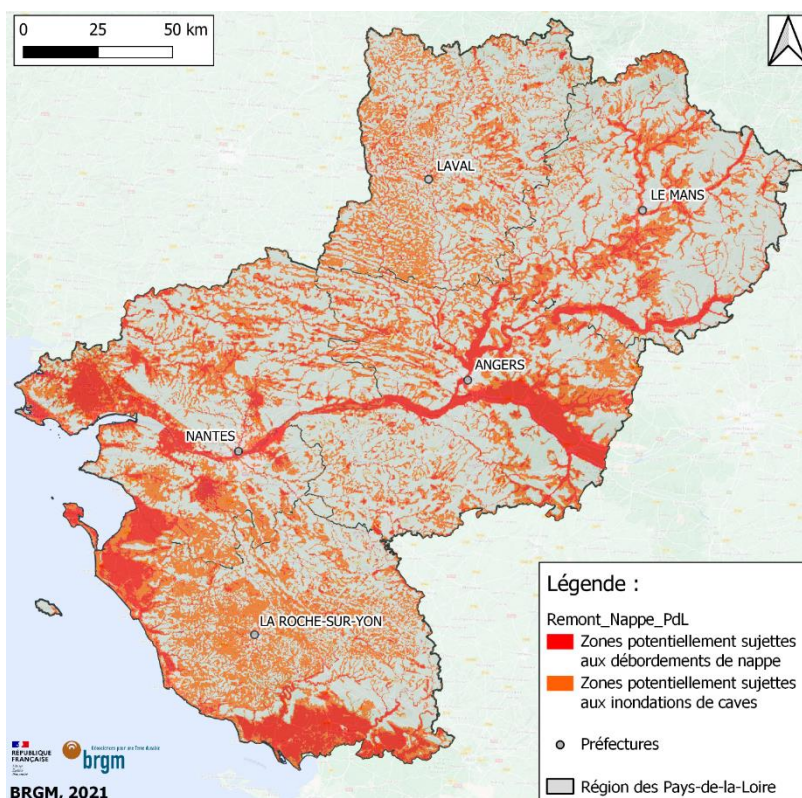


Figure 16 : Cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe (source : georisques.gouv.fr)

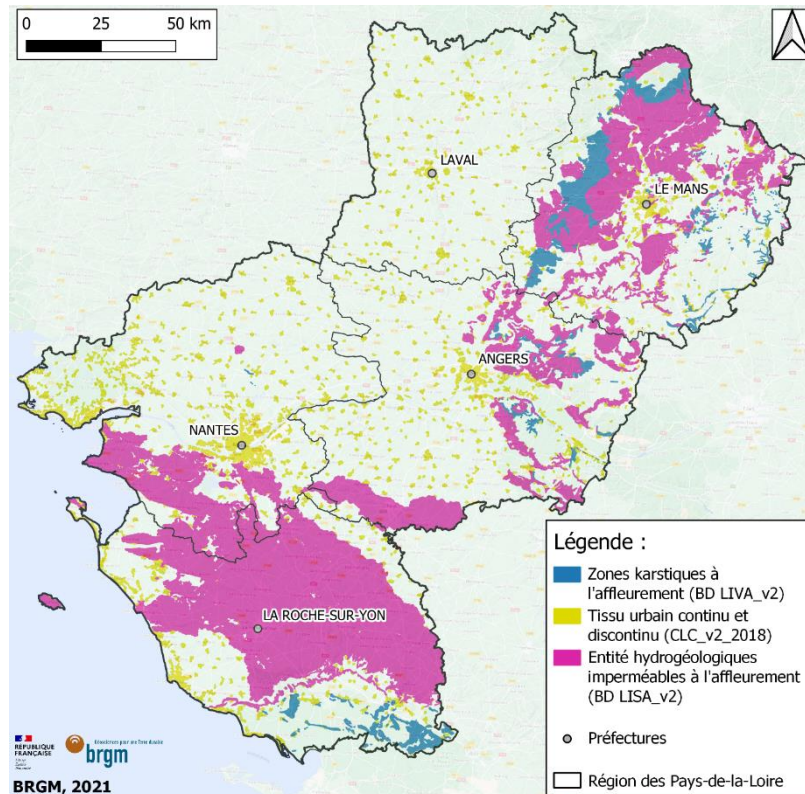


Figure 17 : Présentation des masques utilisés pour la cartographie de l'aléa « Remontée de nappe »

Les deux classes prévues par le guide méthodologique ont été créées à partir de ces informations.

Il a été distingué :

Niveau Faible (1) : présence d'un aquifère où un niveau piézométrique a déjà été observé entre 0 et 5 mètres sous la surface du sol en hautes eaux. Ce niveau regroupe les zones potentiellement sujettes aux débordements de nappes et aux inondations de caves cartographiées par la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe (cf.

- Figure 16) ;
- **Niveau Nul (0)** : pas d'aquifère ayant un niveau piézométrique déjà observé à moins de cinq mètres sous la surface du sol en hautes eaux.

4.8.3. Données utilisées et traitement

La caractérisation de ce phénomène s'appuie essentiellement sur la cartographie nationale de sensibilité aux remontées de nappe (Brugeron et al., 2017). Cette cartographie,

Figure 16, distingue : les « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe », pour lesquelles la différence de cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est négative, les « zones potentiellement sujettes aux inondations de caves » pour

lesquelles la différence entre la cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est comprise entre 0 et 5 m, et les zones sans débordement au-delà.

Cette zonation ne s'applique pas dans les secteurs :

- où les terrains affleurants sont imperméables, empêchant le débordement en surface de nappes potentiellement captives sous-jacentes ;
 - Données obtenues en complément des données de sensibilité aux remontées de nappe fourni par GEORISQUES – données extraites en juin 2021 ;
- où les terrains affleurants sont de type karstique, dont la forte hétérogénéité des écoulements souterrains empêche leur intégration au sein de cette approche globale ;
 - Données issues de la BDLISA d'ordre 1 (sélection des entités karstiques affleurantes) - – données extraites en avril 2021 ;
- où les terrains sont urbanisés (tissu urbain continu et discontinu) et contiennent des aménagements souterrains (canalisations, réseaux enterrés, etc.) susceptibles de perturber de façon non négligeable la dynamique d'écoulement des eaux souterraines.
 - Données du CorineLandCover de 2018 (sélection des entités urbaines).

4.8.4. Cartographie de l'aléa « remontée de nappe »

L'inondation par remontée de nappe étant un phénomène superficiel, apparaissant à des profondeurs inférieures à 50m, sa susceptibilité a été cartographiée pour une seule gamme de profondeur : 10-200m.

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est illustrée Figure 18. La carte de susceptibilité du phénomène « Remontée de nappe » en région Pays-de-la-Loire est identique pour les 3 profondeurs

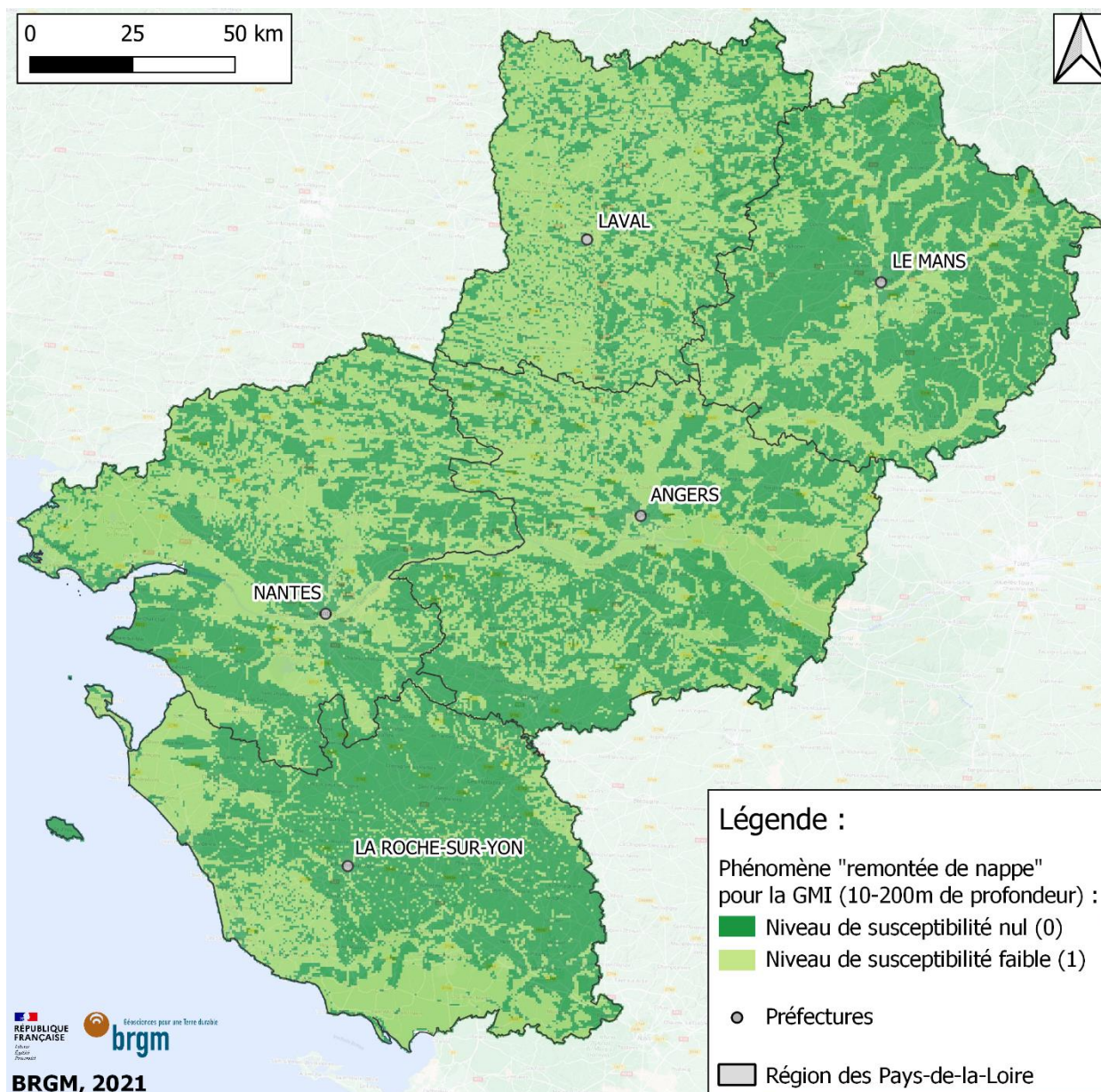


Figure 18 : Carte de susceptibilité du phénomène « Remontée de nappe » en région Pays-de-la-Loire – identique pour les 3 profondeurs

4.8.5. Cotation de l'aléa « remontée de nappe »

Le guide propose deux niveaux de susceptibilité (0) et (1) correspondant aux qualifications Nul et Faible rappelées précédemment (§4.8.2) qui ont été retenus en région Pays-de-la-Loire. Le facteur aggravant est fixé de par la réglementation à 2 pour les doublets et à 0 pour les SGV. La valeur résultante de l'aléa « Remontée de nappe » varie donc entre 0 et 2 pour les doublets géothermiques et reste à 0 pour les SGV (Tableau 21).

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
		Remontée nappe	Initiale	0	1	-	-	-	-		-	-	1	2
Révisée	0		1	-	-	-	-	-	-	1	2	0		

Tableau 21 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Remontée de nappe » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale et révisée

Compte tenu des impacts potentiels liés à ce type de phénomènes, le facteur aggravant potentiel est estimé à 2 pour les doublets sur aquifère et à 0 pour les sondes géothermiques verticales.

Le risque de remontée de nappe lié à la réinjection des eaux prélevées au sein du même aquifère ne concerne que la technologie des doublets sur aquifère. La technologie des sondes géothermiques verticales ne nécessitant pas d'action de pompage, le phénomène de « remontée de nappe » ne sera pas considéré pour cette technologie de géothermie en fixant le facteur aggravant à 0.

4.9. ALEA « BISEAU SALE »

Cet aléa a été évalué par le BRGM. Ce phénomène n'ayant pas été décrit dans la carte nationale initiale de 2015, sa description est ici volontairement plus détaillée que les autres phénomènes présentés précédemment, afin de préciser la méthodologie employée, qui n'est pas précisée dans le guide méthodologique de 2015.

4.9.1. Description du phénomène et occurrences

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 qui 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.

Estuaire de la Loire :

L'estuaire de la Loire est une zone humide majeure sur la façade atlantique, maillon essentiel du complexe écologique de la basse Loire estuarienne (lac de Grand-Lieu, marais de Brière, marais de Guérande). Il possède une grande diversité de milieux et d'espèces en fonction des marées, du gradient de salinité, et du contexte hydraulique.

La rencontre des eaux fluviales et marines entraîne un mélange ou à l'inverse une stratification des eaux estuariennes. En cas de stratification, les eaux douces, moins denses, circulent en surface alors que les eaux marines, plus denses, circulent au fond au rythme des marées. La rencontre de ces eaux de densité différente entraîne la formation de gradients de salinité longitudinaux et verticaux plus ou moins prononcés. Pritchard (1967) a défini une classification des estuaires en fonction du mode de mélange des eaux douces et salées : (1) estuaire stratifié à coin salé, (2) stratifié, (3) partiellement mélangé ou (4) bien mélangé. Les estuaires de la façade Manche/Atlantique sont principalement classés dans les estuaires partiellement mélangés. Ce sont des systèmes dominés par la marée où la force des courants de marée génère une turbulence par frottement au fond suffisante pour permettre un mélange vertical des eaux (Deloffre, 2005). Ce mélange entraîne la formation de gradients de salinité à partir desquels quatre zones aux caractéristiques halines différentes, peuvent être distinguées (Figure 19) :

- la zone fluviale tidale (eau douce soumise à la marée dynamique) ;
- la zone oligohaline (salinité de 0,5 à 5 g/l) ;
- la zone mésohaline (salinité de 5 à 18) ;
- la zone polyhaline (salinité de 18 à 30).

LA SALINITÉ : EAU DOUCE, EAU SAUMÂTRE, EAU SALÉE

La salinité des eaux de la Loire offre une grande variabilité longitudinale entre 0 (eau douce) et 35 g/l (eau de mer) et, dans une moindre mesure, verticale.

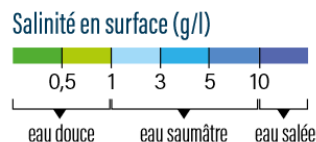


Figure 19 : Salinité des eaux de la Loire (source : loire-estuaire.org)

La remontée du sel dans l'estuaire (

Figure 20) est conditionnée par l'équilibre fleuve - mer. Lors des bas débits, le front de salinité (concentration à 0,5 g/l), limite amont de la zone oligohaline, pénètre davantage dans l'estuaire. En période de vives eaux (VE), la grande amplitude de marée favorise une dispersion plus amont en fin de marée montante, et un recul plus aval à basse mer. Les variations de salinité sont donc très importantes en période de fort coefficient de marée. En étiage sévère, lors des coefficients

de marée d'équinoxe, le front de salinité dépasse Nantes. En période de mortes eaux (ME), les eaux fluviales moins denses que l'eau de mer restent en surface. En début de remontée des coefficients de marée, les eaux de surface et du fond se mélangent, augmentant brusquement la salinité des eaux de surface (bulletin [SYVEL – loire-estuaire.org](http://loire-estuaire.org)).

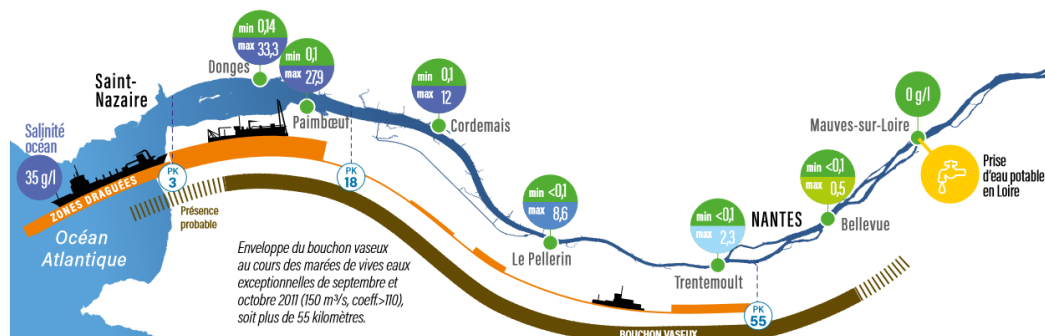


Figure 20 : Illustration de la remontée de sel dans l'estuaire de la Loire (source : loire-estuaire.org)

Marais littoraux :

Dans ce type d'environnement, la présence d'eaux minéralisées peut être liée à des intrusions effectives actuelles (marais salés, salants) ou historiques (marais poldérisés), mais peut également être l'héritage de l'invasion d'horizons peu perméables par l'eau de mer lors de la transgression flandrienne (opérée lors de la dernière glaciation datée d'il y a environ 19 000 ans), avec la présence d'une « paléonappe » salée ou saumâtre.

Aquifères côtiers :

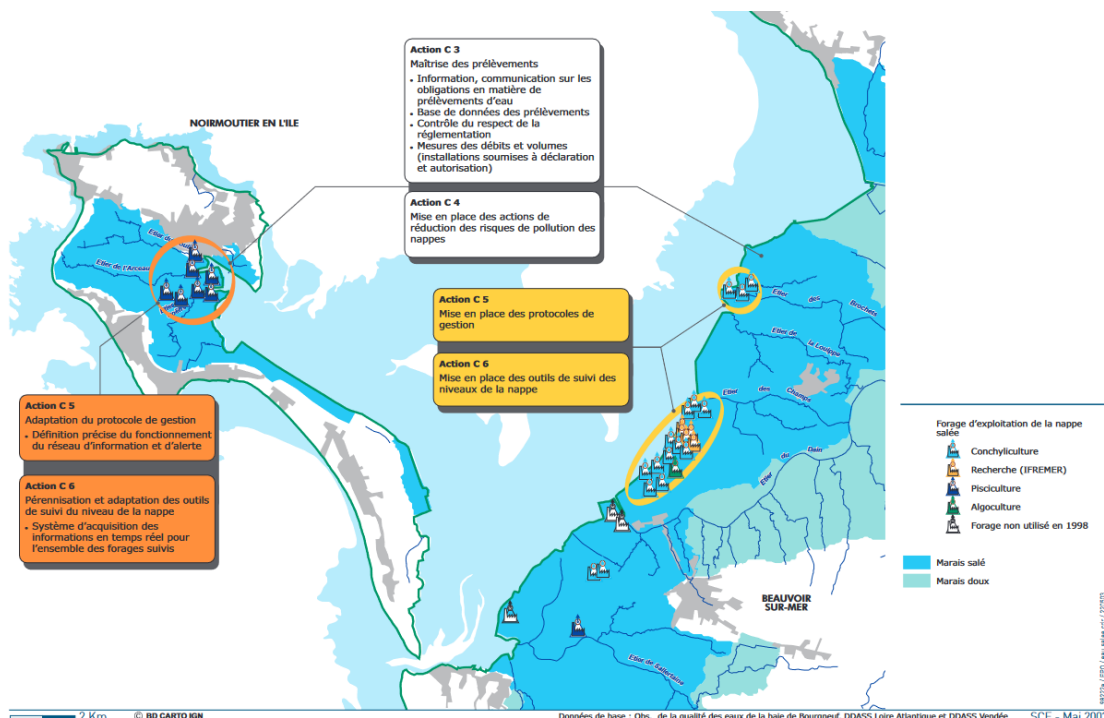


Figure 21 : Marais littoraux et aquifères côtiers – Noirmoutier – Baie de Bourgneuf (d'après SCE, 2003)

Certains aquifères contiennent une nappe salée, et sont exploités pour la pisciculture, la conchyliculture et l'algoculture. C'est le cas à Noirmoutier et dans la baie de Bourgneuf, cependant l'extension de la nappe salée est mal connue (Figure 21). La nappe d'eau salée souterraine de l'île de Noirmoutier (nappe des calcaires et des grès lutéciens de l'île de Noirmoutier) est classée dans son ensemble en Zone de Répartition des Eaux depuis 2003.

Les premières études à l'initiative du SMIDAP (Syndicat Mixte pour le Développement Aquacole en Pays-de-la-Loire), réalisées dès 1984, avaient pour principal objectif une exploitation rationnelle de la ressource et favoriser l'essor de l'aquaculture dans la baie de Bourgneuf.

Dans ce cadre, des travaux importants de caractérisation chimique et de cartographie de l'extension de la nappe d'eau souterraine salée de la Baie de Bourgneuf ont été confiés au BRGM et au Laboratoire de Biologie Marine ISOMer de l'Université de Nantes (Collet, 1992).

Les points conclusifs sont les suivants :

- La salinité des eaux est très variable ;
- Il y a une diminution logique de la salinité du pôle marin à l'Ouest vers le pôle d'eau douce à l'Est ;
- La salinité est homogène et élevée dans la partie sud du marais, constituant un pôle très salé (depuis le Polder du Dain et jusqu'au Port des Becs) ;
- En bordure des reliefs de socle, les caractéristiques chimiques sont plus variables, complexes, et sous l'influence d'apports d'eau douce, continentale ;
- A partir d'analyses isotopiques, trois familles d'eau ont été différenciées entre les eaux de mer, les eaux météoriques et le mélange entre ces deux pôles. La zone située au Sud du Port des Champs apparaît donc comme la plus homogène de l'ensemble du marais.

L'étude a produit les premières délimitations entre ces trois pôles avec un zonage selon l'intérêt aquacole. Cette carte (Figure 22) apporte des éléments de connaissance utiles pour la cartographie de l'aléa biseau salé du présent projet.

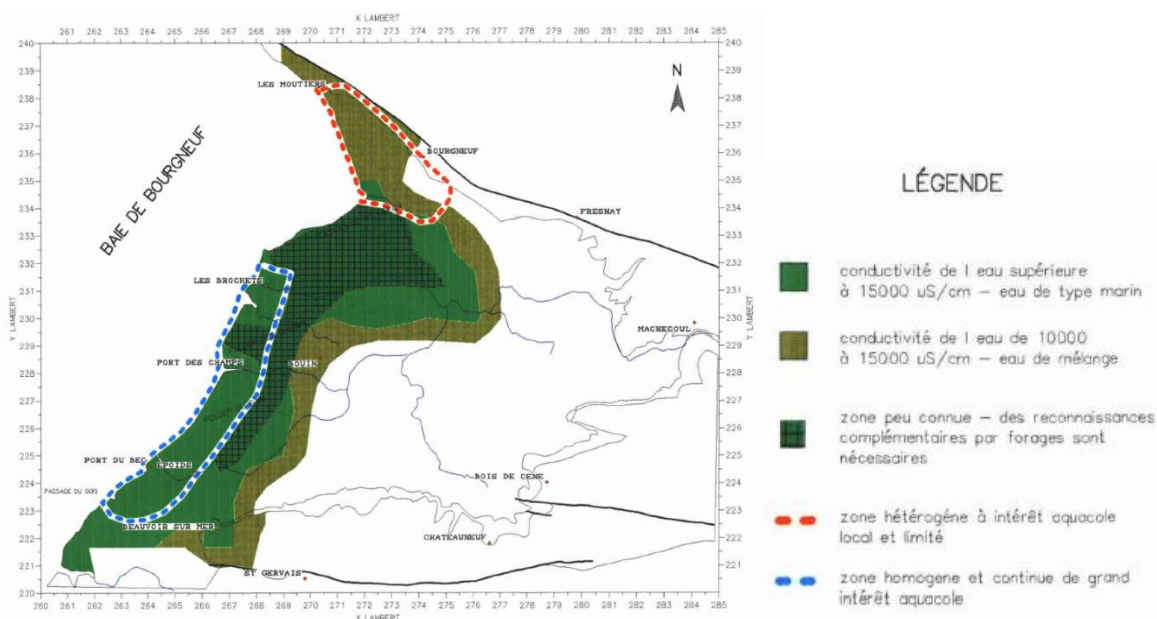


Figure 22 : Cartographie de l'extension de la nappe d'eau souterraine salée de la baie de Bourgneuf (Collet, 1992)

Domaine de socle :

Le caractère hétérogène des aquifères de socle (milieu discontinu avec une porosité de fissure et/ou de fracture) complique la compréhension du fonctionnement du système aquifère de socle à l'interface avec la mer, thématique scientifique peu investiguée (Lucassou, 2019).

En Bretagne, la majorité des ouvrages présentant une teneur moyenne en chlorures supérieure à 60 mg/L et/ou une conductivité moyenne supérieure à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont situés à moins de 1,5 km du trait de côte et dans une configuration particulière du trait de côte (marais maritime, île et presqu'île) et plus d'un tiers se trouvent à proximité immédiate d'une faille ou d'un linéament.

Les processus d'intrusions salines sont donc complexes et peuvent s'établir par le biais de biseau salé, par drainance verticale, par invasion salée dans les rias et il peut s'agir d'eau récente ou ancienne.

Changement climatique :

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles (en fonction de leur structure, géométrie et hétérogénéités) aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique, sur le littoral ou dans l'environnement des cours d'eau envahis par l'eau salée.

Selon les scénarios du GIEC, le changement climatique aura divers impacts : modification des températures et précipitations, augmentation du niveau de la mer, étiage sévère et plus long qui aurait comme conséquence de favoriser l'invasion marine dans les fleuves. Dans les zones côtières, une pression démographique pourra également conduire à une augmentation des besoins en eau.

Les premiers tests de simulation (Dörfliger, 2010) concernent le modèle du marais de Saint-Ciers-sur-Gironde au niveau de l'estuaire de la Gironde et la partie Nord du marais Poitevin. Les modélisations ont été effectuées à l'aide du logiciel MARTHE (version 7.0) avec prise en compte du transport de masse et de la salinité pour le premier uniquement.

Concernant le Marais Poitevin, la remontée océanique n'impacte pas le niveau de hautes eaux du fait, vraisemblablement, des cotes des eaux superficielles (à proximité d'un des piézomètres de référence) qui sont en hiver nettement supérieures au niveau de base simulé. C'est également le cas sur la période d'étiage en année humide, ou encore avec le maintien en eaux des canaux qui vient soutenir le niveau du piézomètre. Pour les années humides, en périodes de hautes-eaux, la remontée océanique semble impacter légèrement le littoral dans les secteurs où le cordon dunaire est assez restreint et ne joue donc pas ou peu le rôle de barrière hydraulique. Le niveau de la nappe serait égal à celui de l'Océan au maximum de la remontée (+ 1 mètre) à un peu plus d'un kilomètre au nord de la ligne de rivage actuelle

4.9.2. Qualification du phénomène

Dörfliger (2011) résume le principe mathématique de Ghyben-Herzberg sur le biseau salé : en un point quelconque de l'aquifère, **l'interface entre l'eau douce et l'eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer.**

On considèrera que pour des niveaux piézométriques inférieurs à 5 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer, le biseau salé se situe théoriquement à moins de 200 mètres de profondeur, et encore à 50 mètres avec une piézométrie de 1,25 mètre, à 100 mètres avec 2,5 mètres.

4.9.3. Données utilisées et traitement

Pour l'établissement de la cartographie de l'aléa biseau salé, 5 jeux de données ont été préparés.

Les données disponibles (décembre 2021) pour évaluer l'aléa de ce phénomène sont très éparées. 89 points de mesures qualitatives du réseau ADES présentent des valeurs de concentration en chlorures. Ainsi seulement quelques valeurs élevées de concentrations en chlorures peuvent être constatées, de manière isolée et à proximité du littoral ou de zones de marais salants (utilisées notamment pour la conchyliculture). Les concentrations maximales mesurées en chlorures pour chacun des points de mesures du département de la Vendée sont présentées en exemple dans la Figure 23.

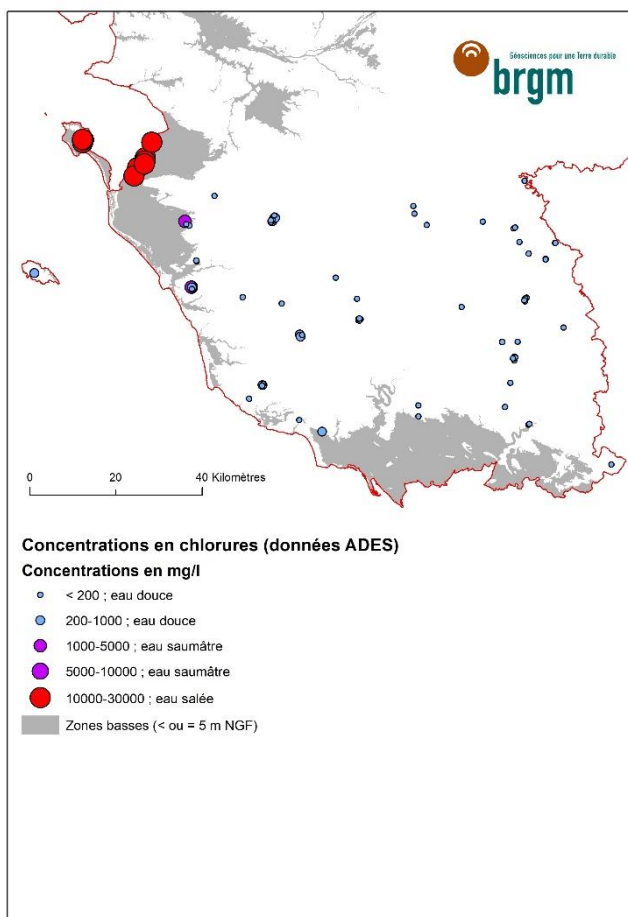


Figure 23 : Concentrations en chlorures mesurées en Vendée (source : ADES)

Par mesure conservatrice, une zone tampon de 500 mètres est appliquée au Trait de côte HISTOLITT® (IGN-SHOM).

Une cartographie des zones basses (< ou = à 5 m NGF) est produite à partir du MNT au pas de 25 m (BdAlti IGN). Elle permet de définir (1) les secteurs où un front de salinité pourrait être rencontré à moins de 200 m de profondeur, et (2) l'extension maximale des secteurs où de potentielles intrusions marines par submersion pourraient survenir dans un futur, en lien avec la hausse du niveau marin, dans un contexte de changement climatique.

L'emprise des vases flamandaises issues de la BdLISA (entité 101AA03) est isolée. Cette entité considérée comme semi perméable caractérise les secteurs où des paléonappes saumâtres ou salées peuvent potentiellement subsister. A noter que ces dépôts récents sont strictement inclus dans l'emprise des zones basses définies ci-dessus.

Enfin les entités hydrogéologiques aquifères en connexion à ces trois zonages ont été sélectionnées. Ont été retenues les entités aquifères regroupées du Jurassique et du Tertiaire, les alluvions de la Loire et les sables dunaires.

Le résultat est présenté dans la cartographie suivante (Figure 24).

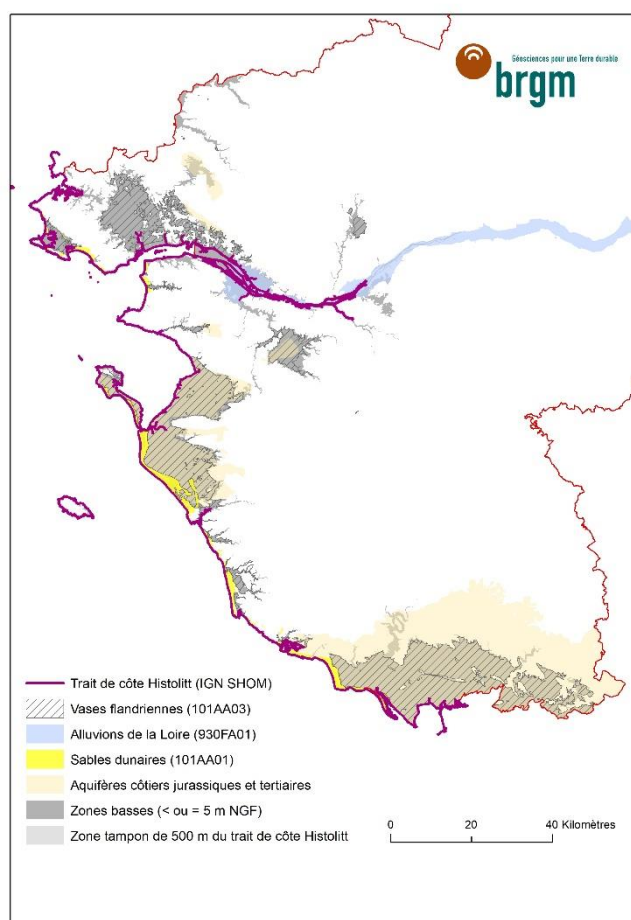


Figure 24 : Cartographie des zones basses

4.9.4. Cartographie de l'aléa « biseau salé »

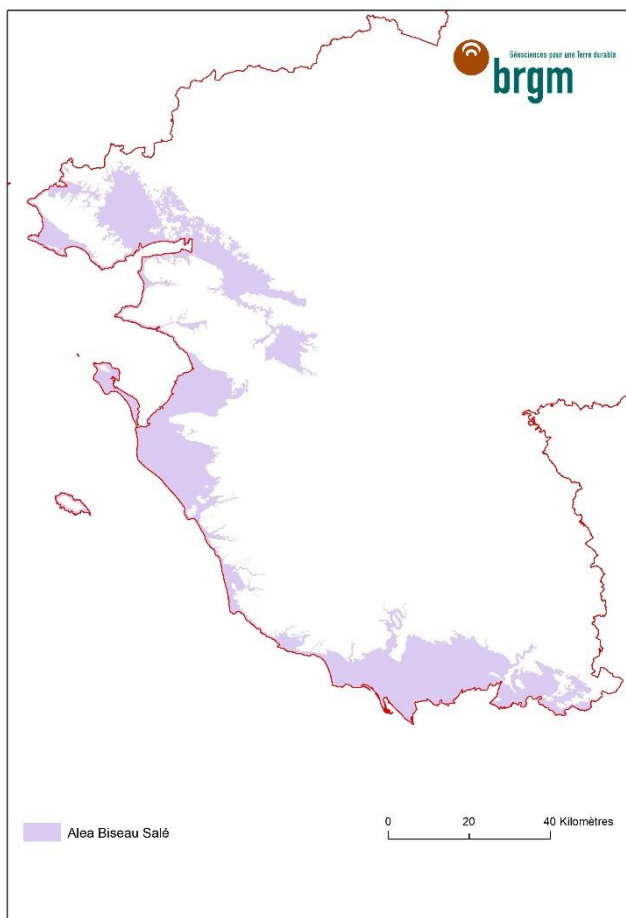


Figure 25 : Carte de susceptibilité du phénomène « Biseau salé » en région Pays-de-la-Loire - identique pour les 3 profondeurs

4.9.5. Cotation de l'aléa « biseau salé »

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa - GMI Région Pays-de-la-Loire								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
		Biseau salé	Initiale	0	-	-	-	-	-		-	-	X	4
	Révisée	0	1	-	-	-	-	-	-	1	4	0	4	0

Tableau 22 : Cotation de la susceptibilité du phénomène de « Biseau salé » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiale (critère absent) et révisée

5. Proposition de cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Conformément à la méthodologie exposée dans le chapitre 3 du présent rapport, des notes finales ont été calculées par pixel (maille de 250 m x 250 m) en fonction de la cotation attribuée (niveaux et facteurs aggravants), aboutissant à un classement en zone verte, orange ou rouge. Ainsi, six cartes ont été réalisées en fonction de la tranche de profondeur (10-50 m, 10-100 m et 10-200 m) et du type d'ouvrage géothermique envisagé : échangeur ouvert ou échangeur fermé.

Les six cartes réalisées pour la région Pays-de-la-Loire sont présentées dans l'Annexe 1. Il s'agit à ce stade de propositions de cartes pour la révision des cartes réglementaires, issues de l'application du guide national et d'un dialogue avec les acteurs. Elles ne sauraient constituer à la publication de ce rapport le zonage réglementaire. Ce dernier sera entériné par un arrêté préfectoral à l'issue d'une phase de consultation pilotée par les services de l'Etat.

La répartition des superficies des zones verte, orange et rouge obtenues est indiquée dans le tableau ci-dessous.

Type d'usage	Profondeur	Carte révisée			Carte initiale (10-200m)		
		Zone verte [%]	Zone orange [%]	Zone rouge [%]	Zone verte [%]	Zone orange [%]	Zone rouge [%]
Doublet	10-050m	80,26	19,67	0,07	94,38	5,56	0,05
	10-100m	78,16	21,77	0,07			
	10-200m	77,71	22,18	0,11			
SGV	10-050m	79,71	20,22	0,07	95,30	4,64	0,05
	10-100m	77,60	22,32	0,08			
	10-200m	75,99	23,65	0,36			

Tableau 23 : répartition des zones vertes, orange et rouges de la carte révisée en Pays-de-la-Loire (2022) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015)

La proportion de zones vertes, orange et rouges est quasi identique pour les deux types de réalisation géothermiques et selon les trois gammes de profondeurs considérées.

Concernant les sondes géologiques verticales, et la gamme de profondeur 10 – 200 m, la surface de la zone rouge s'élève à 0,36 %, à la faveur du phénomène d'artésianisme.

Pour la profondeur 10 – 200 m, qui est la profondeur la plus restrictive, on compte environ 77 % de zones vertes (simple déclaration), 23 % de zones orange (simple déclaration avec intervention d'un expert) et moins de 0,5 % de zones rouges (autorisation), toutes techniques confondues.

En comparaison avec la carte initiale, la zone orange augmente de façon significative, passant de 5,6 % pour les doublets et 4,6 % pour les SGV à 22,2 % et 23,7 % respectivement.

Cette augmentation n'est pas un frein au développement de la GMI car dans la zone orange, pour chaque installation, l'attestation de compatibilité du projet par un expert agréé sera demandée, réduisant ainsi la prise de risques liée au contexte géologique.

6. Conclusion

Afin de favoriser le recours à la géothermie, de tenir compte des évolutions technologiques et de mieux prendre en compte l'incidence des installations sur l'environnement, la réglementation relative à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

Il existe une carte initiale, réalisée à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point en juillet 2015 (MEDDE, 2015). Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié.

L'arrêté **du 25 juin 2015, relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser régionalement la carte nationale pour** apporter plus de précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes. Les niveaux d'aléa ou de susceptibilité attribués à chaque phénomène peuvent être différents entre la carte nationale initiale et la carte révisée.

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur les Pays-de-la-Loire, la DGPR, l'ADEME, le CEREMA et le BRGM ont financé la révision de la carte sur la région. Celle-ci a été réalisée pour le compte de la DREAL des Pays-de-la-Loire par le CEREMA et le BRGM, qui en a piloté la réalisation.

L'élaboration de la carte de la région Pays-de-la-Loire tient compte de 9 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Conformément au guide méthodologique de 2015 (MEDDE, 2015), les phénomènes retenus en Pays-de-la-Loire sont :

1. Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
2. Affaissement/ effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
3. Affaissement/ effondrement lié aux cavités minières ;
4. Mouvement de terrain (ou glissement de terrain) ;
5. Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
6. Artésianisme ;
7. Mise en communication d'aquifères ;
8. Remontée de nappe ;
9. Biseau salé - salinisation.

La carte nationale initiale a été réalisée avec une taille de 500mx500m. Or, trois tailles de maille peuvent être utilisées pour réaliser les cartes révisées : 500mx500m ou 250mx250m ou encore 100mx100m. Une étude de sensibilité à la taille de maille sur la surface des différents niveaux de susceptibilité a été réalisée en région Pays-de-la-Loire, et une maille de 250mx250m a été retenue.

Ces 9 phénomènes ont donc été cotés séparément selon des niveaux établis sur chacune des 517 201 mailles de 250 m de côté couvrant la région Pays-de-la-Loire. Ils ont ensuite été pondérés par un facteur dit aggravant, inhérent aux techniques de GMI mises en œuvre, et sommés afin d'aboutir à des cartes répertoriant les trois zones (rouge, orange, verte) mentionnées précédemment. Cette méthodologie conduit à produire six cartes de zonage réglementaire. Elles correspondent à deux types d'usages géothermiques : exploitation par doublet sur aquifère (échangeur ouvert) et par sonde géothermique verticale (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur (10-50 m, 10-100 m, 10-200 m).

Par rapport à la carte nationale initiale, la mise à jour de la zonation des cartes réglementaires des Pays-de-la-Loire est ainsi distincte pour les trois gammes de profondeur. Les données et les connaissances acquises localement sur la région ont été prises en compte. La précision apportée par la carte révisée concerne de fait tous les phénomènes redoutés ; notamment de par l'utilisation de cartes d'aléas produites à l'échelle de la région (cavités minières et non-minières, mouvement de terrain), d'informations plus précises (localisation des sites et sols pollués dans la BD BASOL largement mises à jour depuis 2015, entités BD LISA de niveau 3, modèle géologique MODGEAU finalisé fin 2020, etc.) et traitées en détail ; et car nous avons considéré la géométrie des formations dès que cela était possible pour tous les phénomènes. Pour un système géothermique donné (fermé-Doublets, ouvert-SGV), les cartes obtenues sont ainsi différentes d'une tranche de profondeur à l'autre. Néanmoins, quelle que soit la tranche de profondeur (10-50, 10-100 et 10-200 m), pour les doublets, la zone verte représente globalement 78-80% de la surface totale de la région Pays-de-la-Loire, la zone orange 20-22% et la zone rouge 0,07-0,11%, tandis que pour les SGV les proportions sont respectivement : 76-80%, 20-24 et 0,07-0,36%.

Après validation des critères par les services de l'Etat, consultation publique et publication d'un arrêté par le Préfet, les cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour la région Pays-de-la-Loire seront mises à disposition sur le site internet <http://www.geothermies.fr>.

7. Bibliographie

Baudouin, Vivien ; Maragna, Charles ; Chrétien, Pierre ; Leconte, Steve ; Robin, J.B. (2020) - Cartographie du potentiel géothermique sur le territoire de la Communauté de Communes Loire Layon Aubance - Rapport final. BRGM/RP-69744-FR, 113 p., 2 ann.

Brugeron A., Bessiere H., Bourguine B., Stollsteiner P. (2017) - Etude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale – BRGM/RP-65452-FR, 119 p., 58 fig., 7 tabl., 1 ann.

Collet Th., Moreau Ch. (1992) - Délimitation et cartographie de l'extension de la nappe d'eau souterraine salée de la Baie de Bourgneuf – BRGM-ISOMER RR-35615-FR, 63 p., 46 fig., 7 tab., 3 ann.

Deloffre, Julien (2005) – La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux – Thèses de doctorat de l'université de Rouen, 227 p.

Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O. (2010) - Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.

Dörfliger N., Fleury P., Asfirane F., Blanc M. (2011). Nouvelle approche et capteurs innovants pour la connaissance et le suivi des aquifères côtiers. Application à la surveillance des intrusions salines dans le bassin sédimentaire du Roussillon (France). Rapport d'étude Tâche 1. Projet ANR « Grain d'sel ».

Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L. (2010) – Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-58297-FR, 239p., 212 ill., 5 ann., 12 pl.

Lucassou F, J.-M. Schroëtter, J. Baptiste, N. Coppo, avec la collaboration de F. Beaubois, F. Koch, F. Tilloloy, B. Mougine, A. Laurent, N. Croiset (2019) – Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines. Rapport final. BRGM/RP-69012-FR, 227 p., 105 ill., 9 ann.

MEDDE (2015) – Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. 83 p., 50 fig., 3 ann.

Miquel, G., Deutsch, J. C., Meybeck, M., Montiel, A., & Vasel, J. L. (2003). La qualité des eaux souterraines l'échec des réglementations. Flux, (2), 8-16.

Pritchard, D., 1967, What is an estuary : physical point of view: ed. H Lauff, estuaries, AAAS Washington, CD. Pub., v. 83.

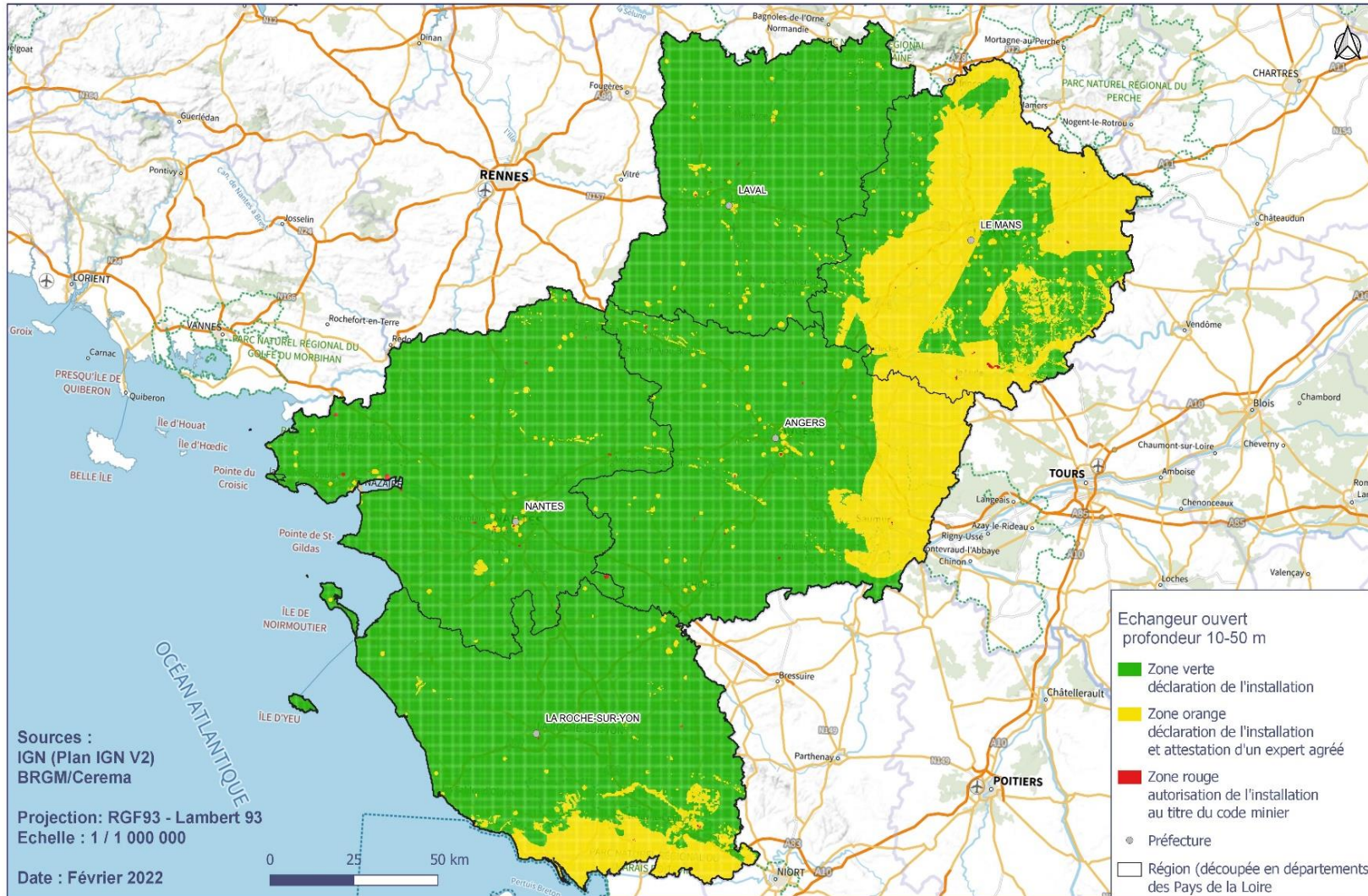
Rouxel E., Lasseur E. Baudouin V., et al., (2020) ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau. Rapport final. BRGM/RP-70301-FR, 129p., 88 fig. 1 ann.

Annexe 1

Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance en Pays-de-la-Loire

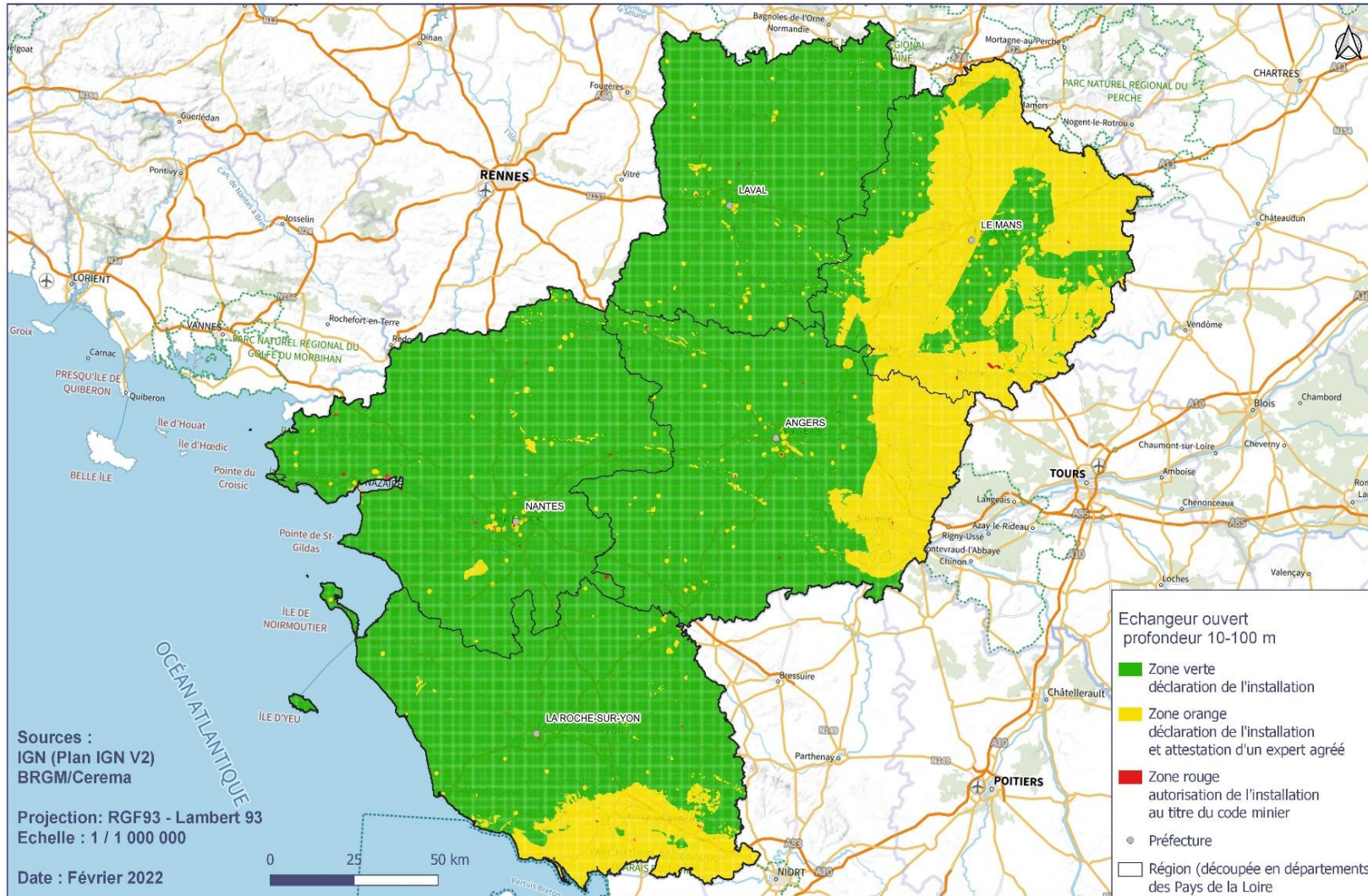
Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur ouvert
Profondeur 10-50 m



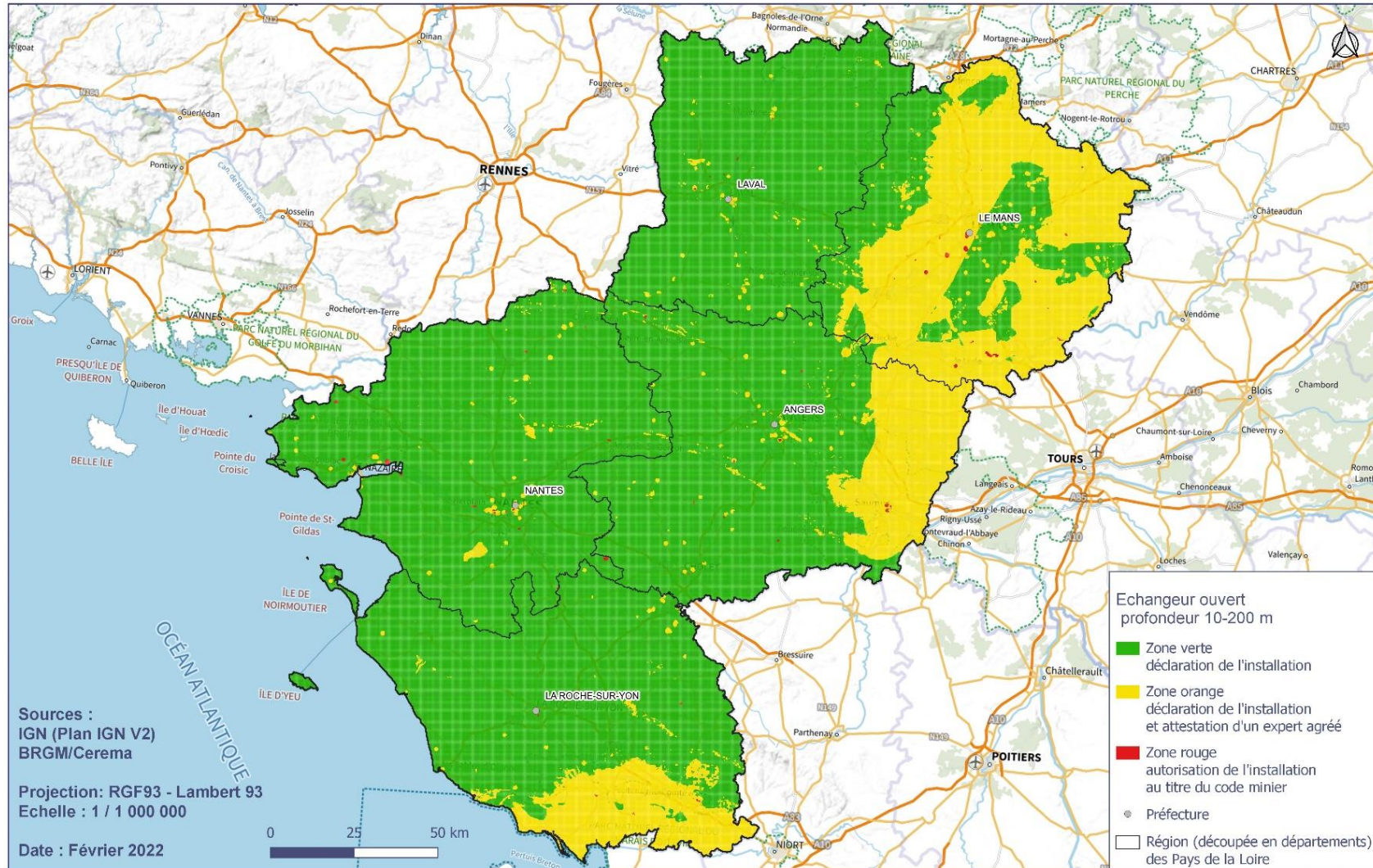
Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur ouvert
Profondeur 10-100 m



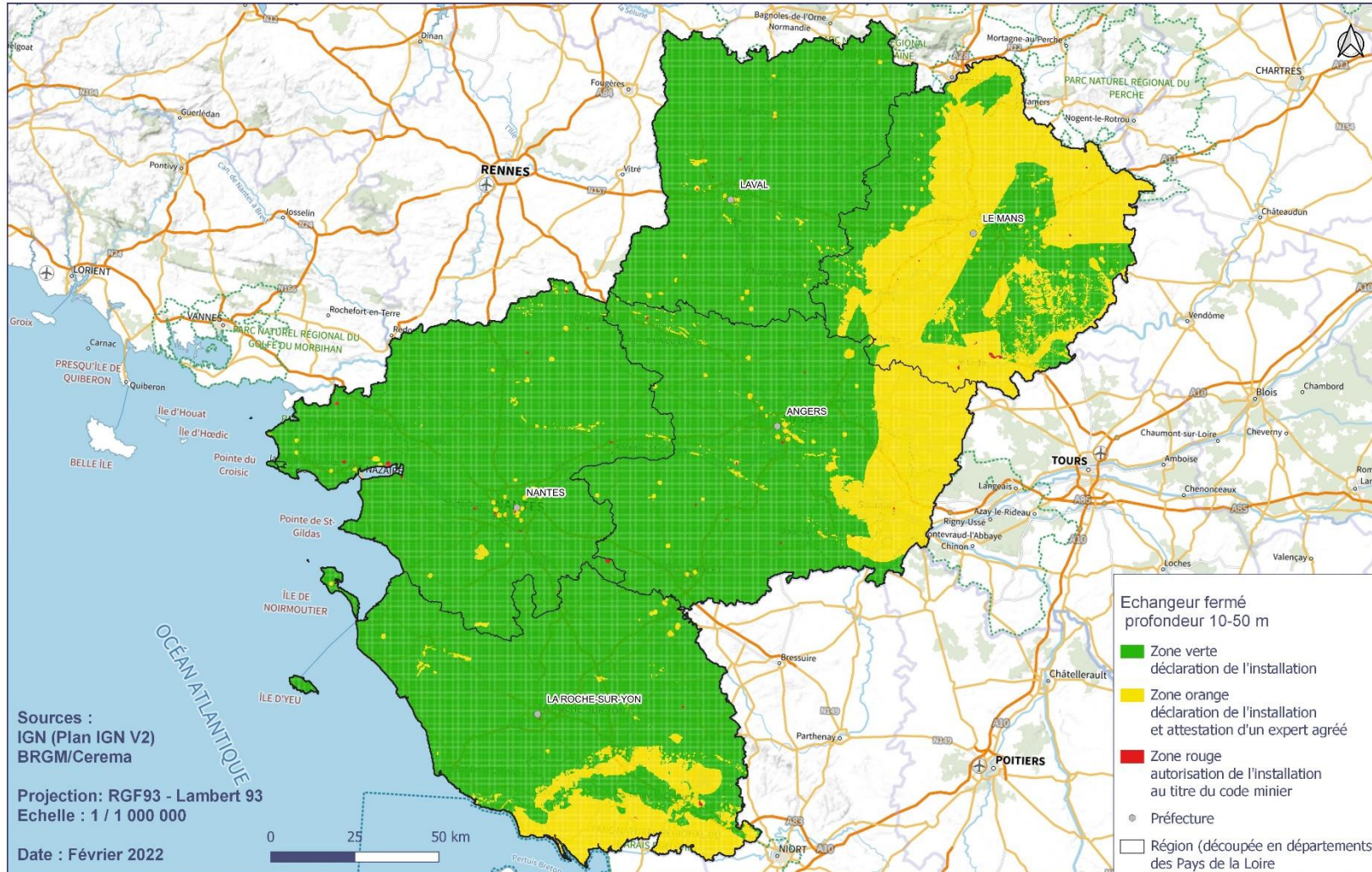
Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur ouvert
Profondeur 10-200 m



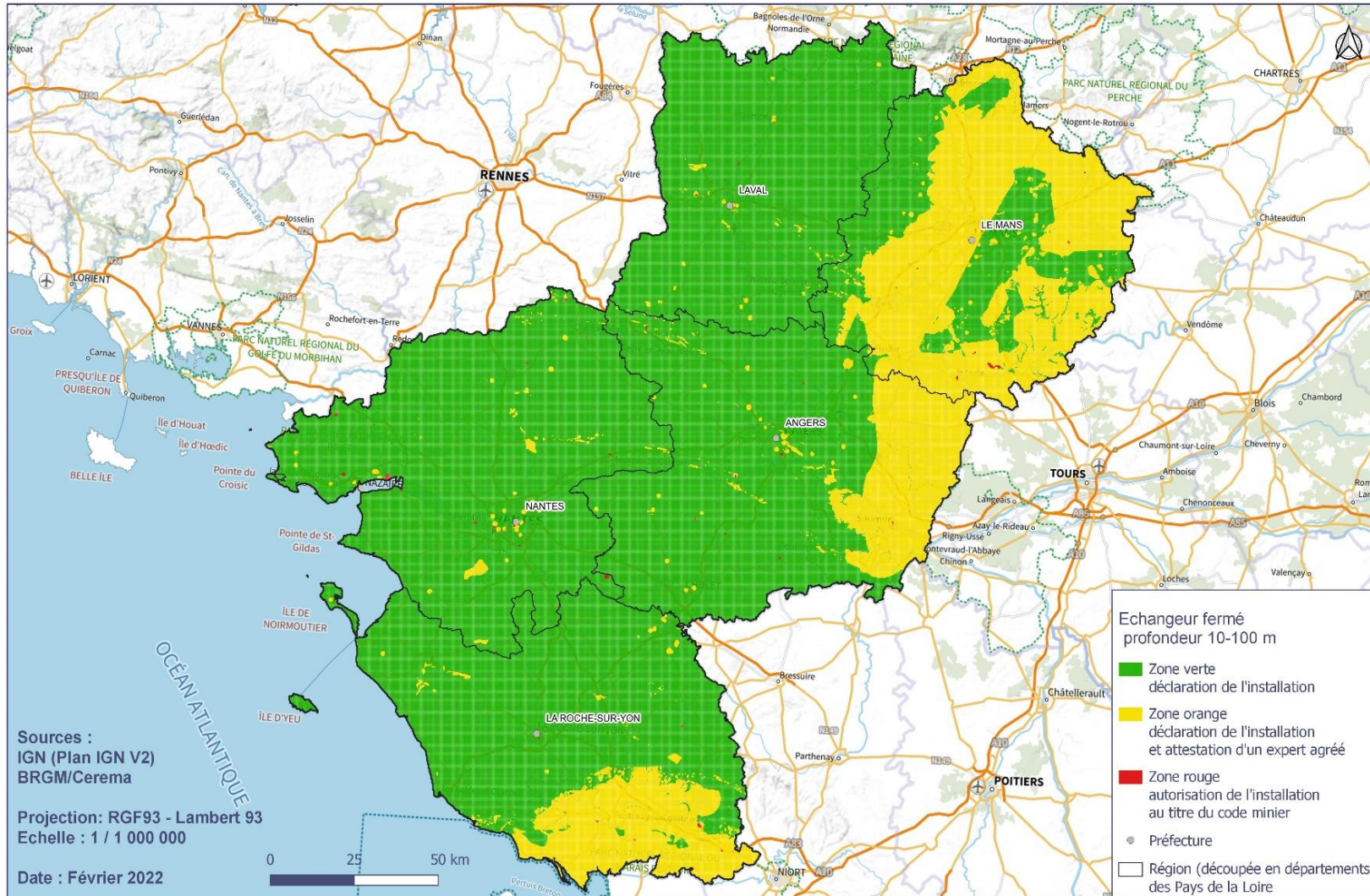
Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur fermé
Profondeur 10-50 m



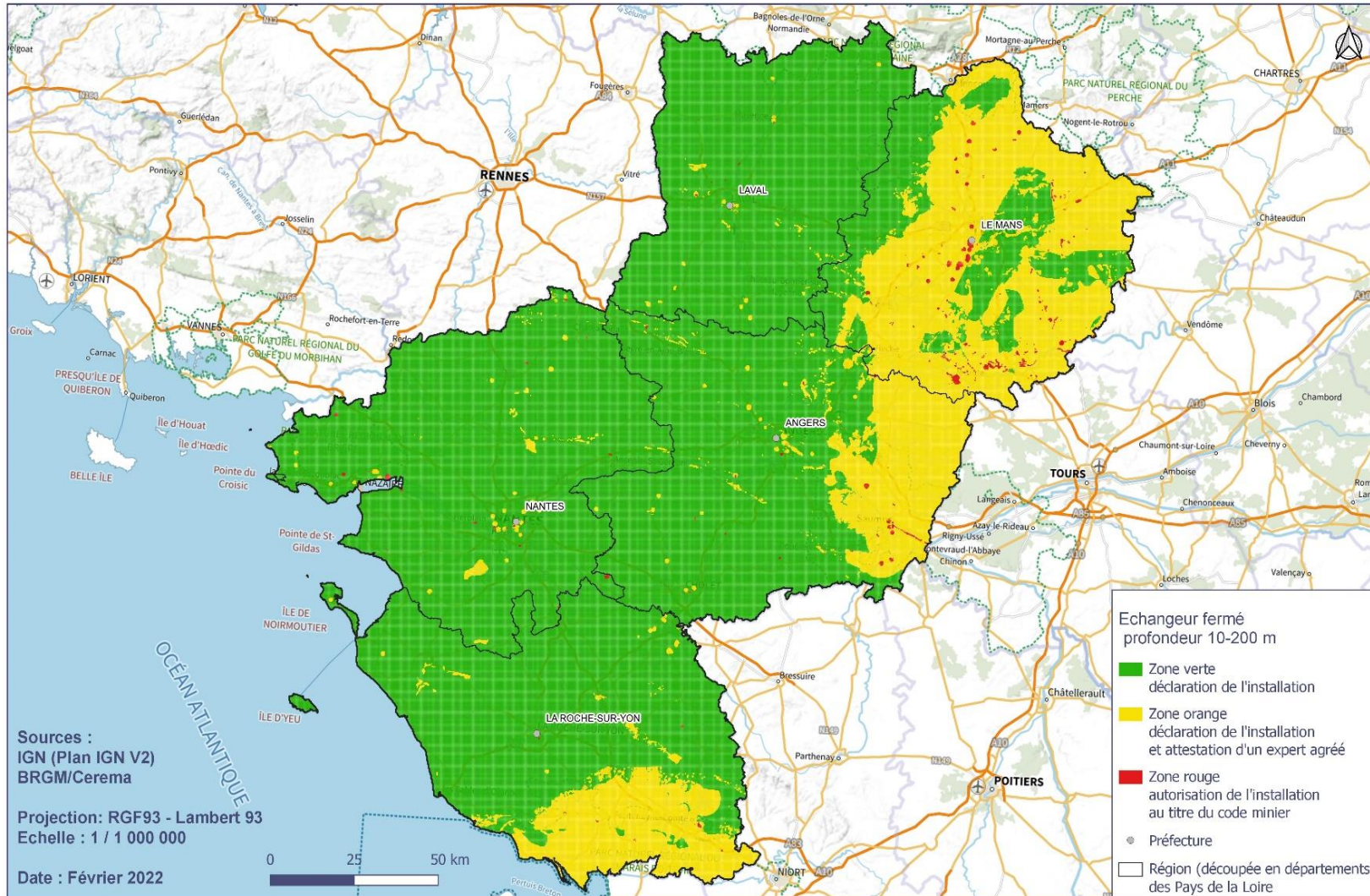
Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur fermé
Profondeur 10-100 m



Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance

Echangeur fermé
Profondeur 10-200 m





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Pays de la Loire

1, rue des Saumonières
BP 92342
44323 Nantes Cedex 3 - France
Tél. : 02 51 86 01 51

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm