



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Cartographie réglementaire de la Géothermie de Minime Importance en Bretagne

Rapport final

**BRGM/RP-73344-FR**

Version 1 du 3 avril 2026

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

Aertgeerts G., Pétilion G., Foultier A., Cazaubon A., Lucassou F., Leconte S., Garcin Q.

*Ce rapport a été vérifié le 10/01/2024 et approuvé le 07/10/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

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](mailto:qualite@brgm.fr)

Ce rapport a été réalisé en partenariat avec :



## 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/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Géothermie minime importance, Cartographie réglementaire, Bretagne, Evaporite, Biseau salé, Artésianisme, Remonté de nappe, Pollution, Mouvement de terrain, Mise en communication d'aquifères.

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

**Aertgeerts G., Pétilion G., Foultier A., Cazaubon A., Lucassou F., Leconte S., Garcin Q. 2026.**

Cartographie réglementaire de la Géothermie de Minime Importance en Bretagne. Rapport final V1.  
BRGM/RP-73344-FR, 65 p., 34 fig.

© BRGM, 2026, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-08/04/2024

## Synthèse

Le contexte de transition énergétique actuel cherche à valoriser les énergies dites renouvelables dans l'espoir de réduire l'impact carbone de notre société. La géothermie fait partie des solutions prometteuses utilisant l'énergie thermique de la Terre afin de fournir, aussi bien à l'échelle du particulier qu'au niveau national, de l'énergie thermique ou électrique. Cette énergie est disponible sur l'ensemble du territoire mais nécessite tout de même des études au préalable afin d'optimiser son utilisation, respecter les enjeux environnementaux et urbains.

La géothermie actuelle comprend deux activités distinctes, la géothermie dite « profonde » allant chercher des températures au-delà de 150 °C à plusieurs centaines voire milliers de mètres de profondeur (e.g., cas de Soultz-Sous-Forêts en Alsace) dans le but de produire soit de la chaleur soit de l'électricité à grande échelle (industrie ou ville) et la géothermie dite de « **minime importance** » (GMI) pouvant aller jusqu'à 200 mètres de profondeur et délivrant essentiellement de l'énergie thermique à des particuliers ou des locaux. L'étude présentée ici s'intéressera seulement à cette seconde pratique.

Suite à une révision des réglementations liées à l'activité géothermique par le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015, cette activité doit tenir compte de son impact potentiel sur l'environnement dans lequel elle est déployée. Cette étude s'inscrit donc dans ce projet dans l'optique de localiser, d'évaluer, et de caractériser les risques géologiques liés à la géothermie de minime importance au niveau régional. À ce jour, une étude cartographique à l'échelle nationale a déjà été réalisée permettant une vision globale de la cause sur le territoire français. L'intérêt de cette étude est de réaliser une cartographie plus précise des risques de la région Bretagne afin de soutenir des projets de GMI dans cette région.

Les risques étudiés dans ce projet ont été déterminés et décrits par neuf aléas géologiques, pouvant survenir lors de travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Ces aléas ont été combinés afin d'obtenir une carte finale présentant l'élévation du risque en Bretagne.

Ces aléas comprennent :

- les affaissements et surrections liés aux formations évaporitiques ;
- les affaissements et surrections liés aux cavités (hors mines) ;
- les affaissements et surrections liés aux cavités d'origine minières ;
- les glissements de terrain ;
- la pollution des sols et des nappes d'eau souterraines ;
- le phénomène d'artésianisme ;
- la mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères ;
- les remontées d'inondation par remontée de nappe ;
- le phénomène de biseau salé.

Cette étude a été menée conjointement par le BRGM et le CEREMA entre les années 2022 et 2023. Elle a permis de fortement préciser la carte réglementaire déjà produite à l'échelle nationale et couvrant la Bretagne. En effet, les secteurs classés en orange couvrent au maximum (i.e., pour un système ouvert et pour une profondeur de 200 m) 15,5 % du territoire, mais impactent 33,7 % de la population, ce qui paraît significatif. Les secteurs cartographiés en rouge se limitent à 0,02 % du territoire et concernent jusqu'à 0,2 % de la population. L'ensemble de ces résultats suggère, au moins en zone côtière, de privilégier les systèmes fermés afin de minimiser au maximum le risque lié à l'installation d'ouvrage de GMI.

# Sommaire

1. Introduction .....	9
2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance .....	11
2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI) .....	11
2.1.1. Échangeur géothermique fermé.....	11
2.1.2. Échangeur géothermique ouvert .....	12
2.2. LE CODE MINIER .....	12
2.3. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES .....	13
3. Contexte géologique et hydrogéologique de la Bretagne .....	15
3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	15
3.1.1. Le socle polymétamorphique déformé.....	15
3.1.2. La couverture sédimentaire.....	16
3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE .....	16
4. Méthodologie .....	19
5. Cartographie des aléas .....	21
5.1. PREAMBULE .....	21
5.2. LES AFFAISSEMENTS ET SURRECTIONS LIES AUX FORMATIONS EVAPORITQUES .....	22
5.2.1. Description du phénomène redouté .....	22
5.2.2. Qualification des aléas .....	22
5.2.3. Données disponibles.....	23
5.2.4. Traitement et résultats .....	23
5.3. LE PHENOMENE DE BISEAU SALE .....	29
5.3.1. Description du phénomène .....	29
5.3.2. Qualification des aléas .....	29
5.3.3. Données disponibles.....	29
5.3.4. Traitement et résultats .....	30
5.4. LE PHENOMENE D'ARTESIANISME.....	33
5.4.1. Description du phénomène .....	33
5.4.2. Qualification des aléas .....	33
5.4.3. Données disponibles.....	33
5.4.4. Traitement et résultats .....	33
5.5. PROBLEME DE REMONTEE DE NAPPE.....	35
5.5.1. Description du phénomène .....	35
5.5.2. Qualification des aléas .....	35
5.5.3. Données disponibles.....	35
5.5.4. Traitement et résultats .....	36

5.6.	LA POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES .....	38
5.6.1.	Description du phénomène .....	38
5.6.2.	Qualification des aléas.....	38
5.6.3.	Données disponibles .....	38
5.6.4.	Traitement et résultats .....	39
5.7.	LA MISE EN COMMUNICATION DES EAUX SOUTERRAINES ENTRE DIFFERENTS AQUIFERES .....	42
5.7.1.	Description du phénomène .....	42
5.7.2.	Qualification des aléas.....	42
5.7.3.	Données disponibles .....	42
5.7.4.	Traitement et résultats .....	43
5.8.	LES AFFAISSEMENTS ET EFFONDREMENTS LIES AUX CAVITES (HORS MINES).....	44
5.8.1.	Description du phénomène .....	44
5.8.2.	Qualification des aléas.....	44
5.8.3.	Données utilisées et traitement.....	45
5.8.4.	Résultats .....	47
5.9.	LES AFFAISSEMENTS ET EFFONDREMENTS LIES AUX CAVITES D'ORIGINE MINIERES .....	48
5.9.1.	Description du phénomène .....	48
5.9.2.	Qualification des aléas.....	48
5.9.3.	Données utilisées et traitement.....	49
5.9.4.	Résultats .....	50
5.10.	LES GLISSEMENTS DE TERRAIN.....	51
5.10.1.	Description du phénomène .....	51
5.10.2.	Qualification des aléas.....	51
5.10.3.	Données utilisées et traitement.....	52
5.10.4.	Résultats .....	52
6.	Cartographie finale .....	55
6.1.	CARTE REGLEMENTAIRE DES RISQUES GEOLOGIQUES DE LA GMI EN SYSTEME FERME.....	55
6.1.1.	Rappel de la carte nationale .....	55
6.1.2.	Cartes régionales pour la Bretagne .....	55
6.2.	CARTE REGLEMENTAIRE DES RISQUES GEOLOGIQUES DE LA GMI EN SYSTEME OUVERT .....	57
6.2.1.	Rappel de la carte nationale .....	57
6.2.2.	Cartes régionales pour la Bretagne .....	58
6.3.	COMPARAISON AVEC LES REGIONS LIMITOPHES .....	60
7.	Bilan .....	63
8.	Bibliographie .....	65

## Liste des figures

Figure 1 : Éléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015).....	11
Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015).....	12
Figure 3 : Schéma géologique présentant les 9 principaux domaines structuraux de Bretagne. Données cartographiques issues de la carte géologique à 1/250 000 du Massif armoricain (Chantraine et al. 2003). ....	16
Figure 4 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004). ....	18
Figure 5 : Schéma du protocole de projection à la surface de l'extension en profondeur des Formations de Saint-Germain-sur-Ille.....	26
Figure 6 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques ».....	27
Figure 7 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-50 m.....	27
Figure 8 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-100 m.....	28
Figure 9 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-200 m.....	28
Figure 10 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « remontée du biseau salé ».....	30
Figure 11 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-50 m. ....	31
Figure 12 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-100 m. ....	32
Figure 13 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-200 m. ....	32
Figure 14 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « artésianisme ».....	34
Figure 15 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « artésianisme» pour la tranche de profondeur 10-50, 100 et 200 m. ....	34
Figure 16 : Cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe, en région Bretagne, et masques nécessaires à sa lecture (source : georisques.fr). ....	36
Figure 17 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « remontée de nappe» pour la tranche de profondeur 10-200 m. ....	37
Figure 18 : Carte de localisation des sites InfoSols. ....	39
Figure 19 : Traitement des sites InfoSols suivant la présence ou non d'une nappe polluée au droit du site.....	40
Figure 20 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » pour la tranche de profondeur 10-200 m.....	41
Figure 21 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « mise en communication d'aquifère» pour la tranche de profondeur 10-50, 100 et 200 m. ....	43
Figure 22 : Principe du comptage par maille des évènements ponctuels avec leur tampon (en rouge le nombre d'évènements par maille). ....	46
Figure 23 : Carte de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs.....	47

Figure 24 : Carte de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs. ....	50
Figure 25 : Carte de susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs.....	53
Figure 26 : Extrait, pour la Bretagne, de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur fermé » et pour la tranche 10-200 m. ....	55
Figure 27 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d’ouvrage de 50 m. ....	56
Figure 28 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d’ouvrage de 100 m. ....	56
Figure 29 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d’ouvrage de 200 m. ....	57
Figure 30 : Extrait, pour la Bretagne, de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur ouvert » et pour la tranche 10-200 m. ....	58
Figure 31 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d’ouvrage de 50 m. ....	59
Figure 32 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d’ouvrage de 100 m. ....	59
Figure 33 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d’ouvrage de 200 m. ....	60
Figure 34 : Cartes finales compilées sur la base de l’ensemble des travaux réalisés au cours des 3 phases du projet national. ....	61

# 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 écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT), notamment dans le cadre des actions de l'Agence de la transition écologique (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).

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 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 (GMI)* ». Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) 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. En 2023, cette méthodologie a été révisée et complétée dans un addendum au guide méthodologique. Cette révision fait suite aux retours d'expérience des territoires ayant déjà réalisé leur cartographie réglementaire.

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

Cette carte nationale a été réalisée pour une seule gamme de profondeur (10 - 200 m) avec un maillage de 500 × 500 mètres. Elle est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> juillet 2015 et est disponible sur le site : [www.geothermies.fr](http://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 précisions 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 en fonction des spécificités régionales.

Dans l'objectif donc de finaliser la carte régionale sur la Bretagne, la DGPR (Direction générale de la prévention des risques), l'ADEME et le BRGM ont financé la révision de la carte sur la région. Celle-ci a été réalisée conjointement par le BRGM et le CEREMA pour le compte de la DREAL Bretagne.

L'élaboration de la carte de la Bretagne tient compte de neuf 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 mis en place ;
- environnemental, notamment par la dégradation ou la pollution des eaux souterraines.

Conformément au guide méthodologique de 2015 et à son addendum de 2023, les phénomènes retenus sont :

- Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau ;
- Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
- Affaissement / effondrement lié aux cavités minières ;
- Mouvement de terrain (glissement de terrain) ;
- Pollution des sols et / ou des nappes souterraines ;
- Artésianisme ;
- Mise en communication d'aquifères ;
- Problèmes liés à la réinjection (anciennement appelé « Remontée de nappe ») ;
- Biseau salé.

Ces neuf phénomènes ont été évalués séparément selon des niveaux établis sur chacune des 112 451 mailles de 500 m de côté couvrant la région Bretagne. 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).

## 2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance

### 2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI)

La « Géothermie de Minime Importance » (GMI) est une géothermie de très basse température permettant d'extraire l'énergie du sous-sol, présente au sein de la terre 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) ou échangeurs géothermiques fermés ;
- les Doublets géothermiques ou doublet sur nappe ou échangeurs géothermiques ouverts.

#### 2.1.1. Échangeur géothermique fermé

Les capteurs géothermiques, pouvant être des corbeilles ou des Sondes Géothermiques Verticales (SGV), sont des échangeurs thermiques verticaux qui échangent la chaleur du sol par conduction thermique le long d'un forage (cf. Figure 1).

L'échange énergétique avec le sol s'effectue au niveau du système géothermique qui est constitué des éléments de l'espace annulaire, de la sonde permettant la circulation du fluide caloporteur et du fluide en lui-même. Un fluide caloporteur, de composition variable, circule au sein d'une boucle de la sonde (en U ou double U) disposée dans un forage dont l'espace annulaire est comblé par un coulis spécifique.

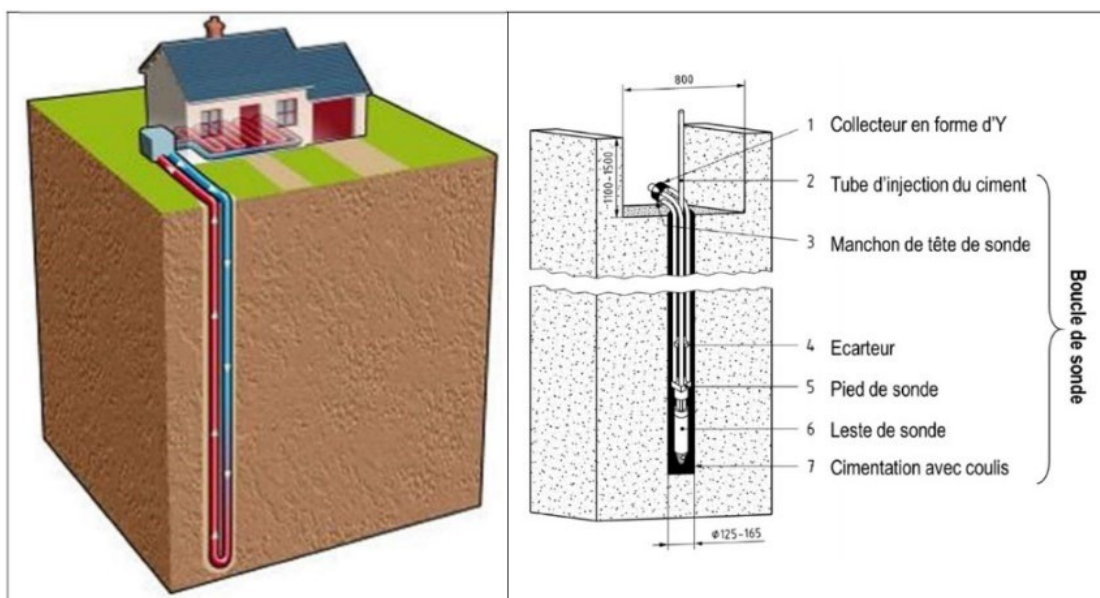


Figure 1 : Éléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015).

### 2.1.2. Échangeur géothermique ouvert

Cette géothermie est aussi appelée géothermie sur aquifère ou doublet géothermique. Elle consiste à prélever de l'eau d'une nappe souterraine via un puits de prélèvement (ou d'alimentation), la faire circuler à travers une pompe à chaleur (PAC) puis la réinjecter dans un second puits, appelé le « puits de réinjection » (cf. Figure 2).

Cette technologie induit localement une variation thermique de la nappe.

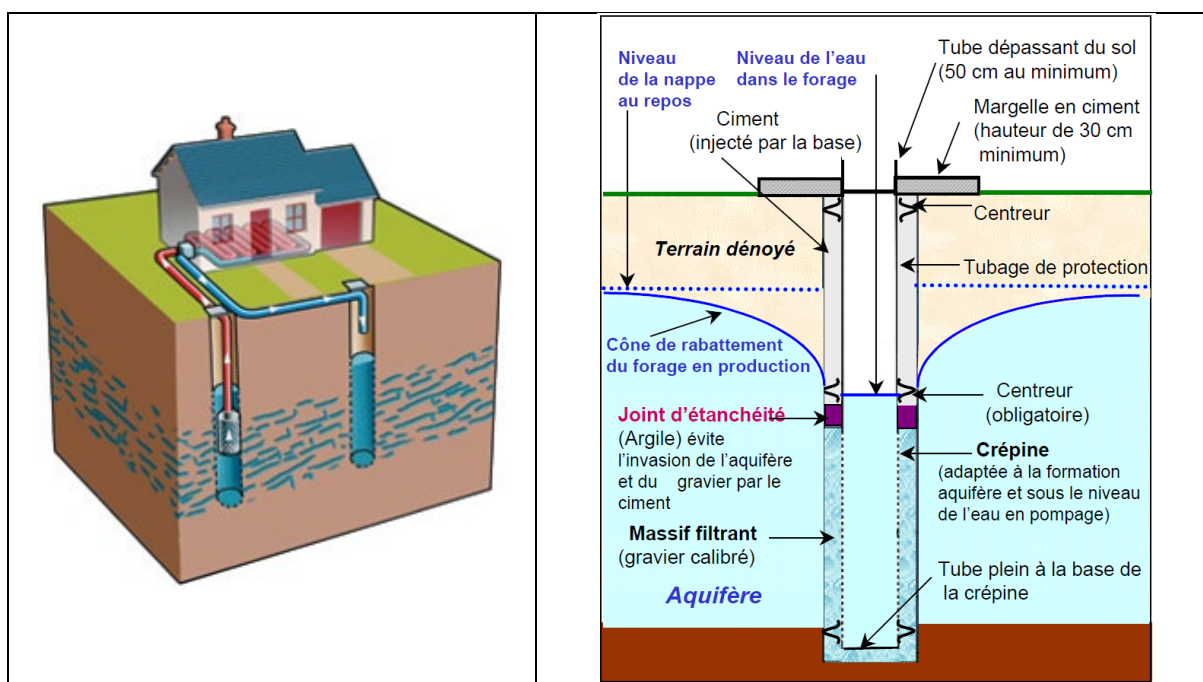


Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015).

## 2.2. LE CODE MINIER

La géothermie est réglementée par le Code Minier qui considère comme des mines « *les gîtes renfermés au sein de la Terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent* ». Les installations de géothermie nécessitent un titre minier et un arrêté d'autorisation d'ouverture des travaux miniers. Toutefois, les projets respectant aux critères du régime de la « Géothermie de Minime Importance » bénéficient d'une dérogation et sont soumis 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 critères de la GMI sont :

- pour les **échangeurs géothermiques fermés** :
  - la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 m,
  - 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** :
  - la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 m,
  - la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol, et utilisée pour l'ensemble de l'installation, est inférieure à 500 kW,
  - la température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement est inférieure à 25 °C,
  - les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevées et réinjectées est nulle,
  - 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,
  - les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone rouge.

Les conditions de mise en œuvre sont précisées dans le décret n° 2006-649 du 2 juin 2016 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

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 service dédié, accessible sur le site [www.geothermies.fr](http://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 du 25 juin 2015 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 du projet 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 du 25 juin 2015 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.

### **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 Schéma 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. Contexte géologique et hydrogéologique de la Bretagne

### 3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

#### 3.1.1. Le socle polymétamorphique déformé

D'une manière générale le Massif armoricain de Bretagne comprend plusieurs grands ensembles de roches qui ont été mis en place et structurés au cours de la construction de deux chaînes de montagne aujourd'hui érodées : la Chaîne Cadomienne (ou Panafricaine ; d'âge précambrien) et la Chaîne varisque (ou hercynienne ; d'âge paléozoïque).

En Bretagne, ces grands ensembles sont structurés en huit domaines de composition, d'âge et d'histoire tectono-métamorphique contrastés (Figure 3).

Au sud (Domaine sud-armoricain), la Bretagne comprend principalement des terrains métamorphiques fortement déformés et métamorphisés à foliation et schistosité subhorizontales à faiblement inclinées. Il s'agit principalement de schistes d'origine sédimentaire et magmatique, de gneiss et d'amphibolite. Au nord de ce premier ensemble (Domaines nantais et ligéro-sénaux), les terrains sont aussi fortement déformés et métamorphisés, mais ils se distinguent par des structures davantage verticales. Ces domaines sont principalement constitués de gneiss d'origine magmatique et de schistes d'origine sédimentaire. Ces trois premiers domaines sont séparés les uns des autres par des accidents tectoniques majeurs (failles de la zone de cisaillement sud-armoricain) le long desquels sont exposés de manière plus ou moins continue des granites parfois très déformés (i.e., mylonites).

Le centre de la Bretagne (domaines médio-armoricains et domaine de Bretagne central) est occupé par de vastes ensembles sédimentaires plus ou moins intensément plissés et très légèrement métamorphisés. Ces ensembles comprennent principalement des schistes et grauwackes d'âge briovérien, sur lesquels se sont déposées en discordance des séries sédimentaires paléozoïques. Ces dernières sont constituées de schistes parfois fossilifères, parfois ardoisiers, de wackes et de grès (dont les fameux grès armoricains).

Le nord-est de la Bretagne est caractérisé par des terrains sédimentaires briovériens comparables à ceux de la Bretagne centrale, mais dans lesquels, de nombreuses intrusions magmatiques – essentiellement granodioritiques – peuvent être identifiées. Si les schistes de ce domaine sont, à l'image de ceux du domaine central, peu métamorphisés, autour des intrusions magmatiques, ils ont subi une très forte augmentation de la température qui les a transformés en cornéennes.

Au nord et au nord-est de Brest (domaine du Léon), la Bretagne présente une géologie comparable à celle de la Bretagne sud, c'est-à-dire faite de roches métamorphiques fortement déformées d'origine magmatique ou sédimentaire (schistes, gneiss et amphibolites).

Enfin, entre le Cap-Fréhel, Saint-Brieuc, Guingamp et Perros-Guirec, la Bretagne expose des terrains anciens d'âge précambrien. Ils sont principalement constitués de gneiss d'origine magmatique ou sédimentaire, de schistes, de métavolcanites, d'amphibolites et de métagabbro. Les domaines du nord de la Bretagne sont séparés des domaines centraux par un accident tectonique majeur (le cisaillement nord armoricain), le long duquel, des intrusions granitiques sont fréquentes.

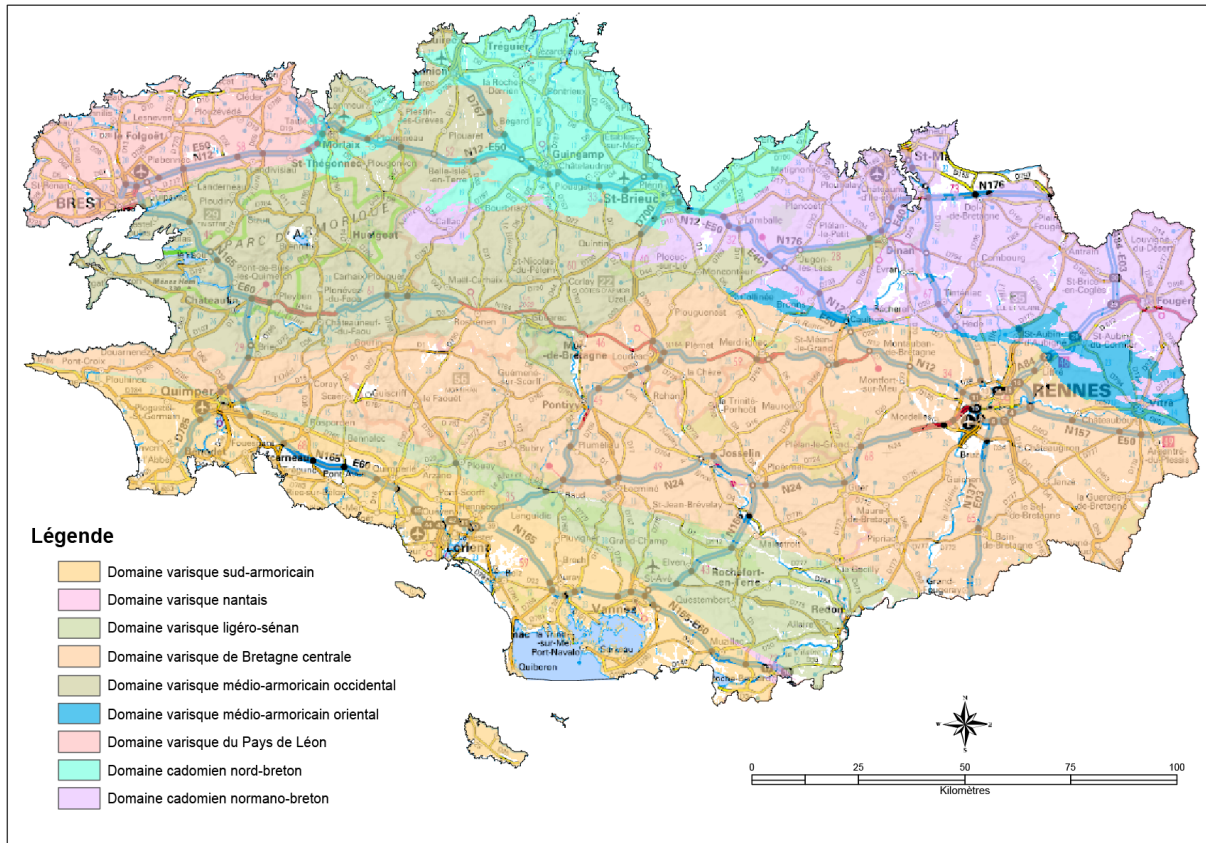


Figure 3 : Schéma géologique présentant les 9 principaux domaines structuraux de Bretagne. Données cartographiques issues de la carte géologique à 1/250 000 du Massif armoricain (Chantraine et al. 2003).

### 3.1.2. La couverture sédimentaire

En plus de ce socle polymétamorphique constitué de roches déformées et métamorphisées et de roches magmatiques intrusives, la Bretagne présente, sporadiquement des bassins sédimentaires intracontinentaux. Ces derniers se sont ouverts à la faveur du fonctionnement de grandes failles tectoniques d'orientation constante d'environ N150. Les principaux bassins en termes de superficie sont le bassin de Rennes et celui de Quiou-Tréfumel. Ils sont principalement constitués de sables, de calcaires, d'argiles et de marnes.

## 3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

La présence de ressources en eau souterraine est fortement conditionnée par le substrat géologique. La Bretagne est essentiellement constituée de roches dures anciennes (formations dites « de socle »).

Dans ces formations, la présence d'eau souterraine est fortement conditionnée par le degré d'altération, le degré de fracturation et la géométrie du substrat géologique (projet ANAFORE, Schroetter *et al.* 2020). En Bretagne, il n'existe pas de grands aquifères, mais des systèmes de petites tailles, de 5 à 15 km<sup>2</sup>, indépendants les uns des autres.

Trois types d'aquifères sont dénombrés pour le Massif armoricain, même si certains sont très réduits en termes de superficie :

- le plus important en termes de superficie est l'**aquifère de socle**. (voir <https://sigesbre.brgm.fr/Aquiferes-bretons.html>) situé dans l'altération et la fracturation d'origine latéritique, mais aussi tectonique, des roches du socle du Massif armoricain. L'altération et la fracturation ont généré un horizon meuble de roches altérées (de 20 à 30 m d'épaisseur) avec une porosité permettant le stockage et l'infiltration des eaux météoritiques vers un horizon plus compact et fissuré de 40 à 60 m d'épaisseur et soutenant le débit des cours d'eau. ;
- les évènements tectoniques ont généré de petits **bassins** d'effondrements **sédimentaires** (d'âge Tertiaire), dont le plus important en région Bretagne est celui de Chartres-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine). Ces bassins renferment des aquifères de type sédimentaire dans lesquels la ressource en eau, malgré leur superficie réduite, est plus importante et contenue dans différentes formations sédimentaires (sables, calcaires, faluns) dont la perméabilité est très supérieure à celle des roches de socle. Soixante-huit (68) bassins tertiaires, dont 21 sont exploités pour l'eau potable, ont été recensés en Bretagne (Boisson *et al.*, 2021) ;
- le troisième type d'aquifère est **alluvial**, il est contenu dans les alluvions des fleuves et cours d'eau. Les alluvions fluviales peuvent constituer des aquifères intéressants et donner des débits supérieurs aux aquifères de socle. C'est notamment le cas pour les alluvions de la Vilaine et de l'Oust.

Classiquement les aquifères en domaine dit « de socle » étaient considérés comme « discontinus » dans les années 1970 et seulement localisés au niveau de fractures, failles, etc.

Ce concept a, depuis les années 1990-2000, évolué à partir de développements méthodologiques dans le secteur de Plabennec pour la Bretagne et sur le Massif central (Wyns, 1998), mais aussi en Afrique, en Inde, en Guyane ou en Corse et déclinés à l'échelle de bassins versants de la région Bretagne (Mougin *et al.*, 2008).

Il a été démontré que dans les roches dites de « socle » (granites, schistes, gneiss, etc.), comme celles du Massif armoricain, ayant subi une altération importante (désagrégation par l'action de l'eau), les aquifères peuvent être considérés comme relativement « continus », avec une surface piézométrique relativement « stratiforme » parallèle à la surface du sol contemporaine.

Ces « *horizons-réservoirs* » d'altération en domaine de socle sont composés de trois niveaux principaux, du sommet vers la base du profil d'altération :

- les allotérites : un horizon argilo-limoneux issu de la transformation *in situ* de la roche-mère (granite, gneiss, micaschistes ou schistes etc.) sous l'effet de l'altération, où la structure de la roche-mère est perdue ;
- les isaltérites : un horizon limono-sableux issu de l'altération *in situ* de la roche mère, pour lequel l'ensemble des structures primaires de la roche originelle (foliation, schistosité, pendage, orientation des filons etc.) sont préservées et mesurables dans une roche très friable ;

- la zone fissurée : roche-mère dure plus ou moins altérée présentant de nombreuses zones de fissures et fractures, soulignées par des placages d'oxydes (oxydes et hydroxydes de fer notamment et manganèse), témoins de la circulation des eaux souterraines. La fracturation dominante est liée à l'altération supergène qui se surimpose sur la fracturation tectonique. Cet horizon assure la fonction transmissive (flux) de cet aquifère composite, les altérites sus-jacentes, lorsqu'elles sont saturées en eau, en constituent sa partie capacitive (stockage). Cet horizon fissuré est capté par la plupart des forages productifs dans le socle.

En-dessous de l'horizon fracturé, la roche saine n'est perméable que très localement à la faveur de fractures d'origine tectonique.

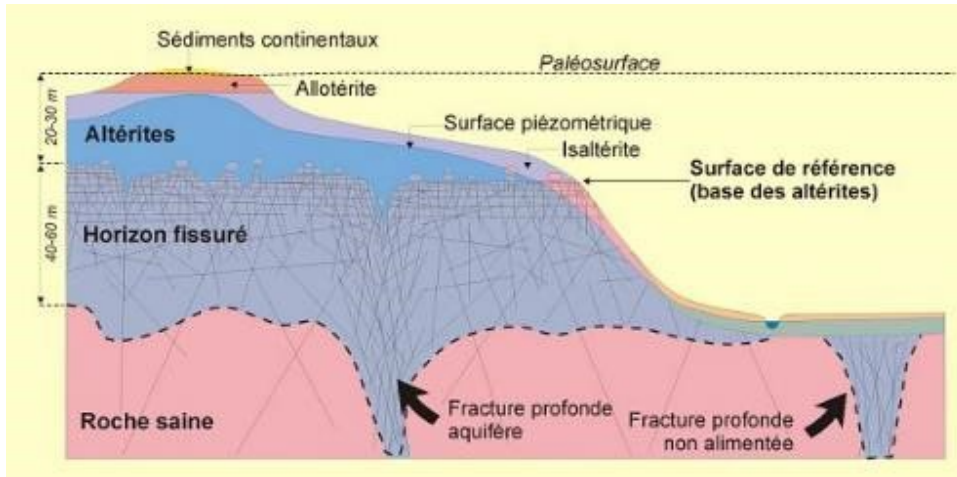


Figure 4 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004).

Enfin, avec ses 2 700 km de côtes, la Bretagne comporte de nombreux aquifères côtiers, pouvant être vulnérables aux intrusions salines (Lucassou *et al.*, 2009).

En Bretagne, le niveau des nappes souterraines est suivi grâce à 52 piézomètres, de 30 mètres de profondeur en moyenne. Le niveau piézométrique est généralement peu profond. Quelques forages artésiens sont recensés localement.

## 4. Méthodologie

La méthodologie d'élaboration de la carte des zones réglementaires pour la géothermie de minime importance prend en considération les caractéristiques du sous-sol et des phénomènes pouvant être rencontrés lors de travaux de forage des échangeurs géothermiques de minime importance. Rappelons que les zones disposant de prescriptions spéciales au titre d'autres réglementations ne sont pas intégrées à cette méthodologie mais s'impose au maître d'ouvrage, à l'exploitant. Les phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux (de type affaissement, mouvement de terrain, pollutions...) ont été identifiés. Pour chaque phénomène :

- le phénomène redouté est décrit et caractérisé par des niveaux d'aléas (faible, moyen, fort), lorsque les cartes d'aléas existent ou en termes de probabilité d'occurrence (susceptibilité) en l'absence d'une carte de l'aléa ;
- une valeur est attribuée à chaque niveau ;
- un facteur aggravant est ensuite attribué en fonction de son impact potentiel, ce facteur pouvant être différent selon la technique d'exploitation géothermique employée : l'échangeur fermé ou l'échangeur ouvert ;
- la disponibilité des données utilisées est précisée.

Les phénomènes pris en compte et la méthode de cotation de chacun peuvent différer selon le niveau de précision apporté à la carte. La carte initiale arrêtée par le ministère en charge de l'environnement considère l'intervalle de profondeur de 10-200 mètres. Cette carte se compose de deux sous cartes : l'une pour un échangeur fermé, l'autre pour un échangeur ouvert. Lors de la révision de chacune de ces deux cartes initiales, la connaissance et la localisation des phénomènes présents dans le sous-sol seront améliorées. Les cartes révisées distinguent pour chaque type d'échangeur trois intervalles de profondeur : 10-50 mètres, 10-100 mètres, 10-200 mètres. Les cartes ainsi révisées se composent en fait de six cartes différentes : trois cartes pour les intervalles de profondeurs 10-50 mètres, 10-100 mètres, 10-200 mètres, chacune considérant les deux techniques d'exploitation.

La méthodologie d'élaboration de la carte des zones utilise une analyse multicritère (c'est-à-dire basée sur la superposition de plusieurs phénomènes) et les cartes ont été réalisées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Chacun des phénomènes identifiés est représenté par une couche spécifique au sein de l'outil SIG. Les phénomènes retenus sont :

- les affaissements et surrections liés aux formations évaporitiques ;
- les affaissements et surrections liés aux cavités (hors mines) ;
- les affaissements et surrections liés aux cavités d'origine minières ;
- les glissements de terrain ;
- la pollution des sols et des nappes d'eau souterraines ;
- le phénomène d'artésianisme ;
- la mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifère ;
- les problèmes liés à la réinjection ;
- le phénomène de biseau salé.

Les éléments qui alimentent chacune des couches identifiant un phénomène particulier sont cotés en fonction de leur niveau d'aléa/susceptibilité (fort, moyen, faible ou nul) vis-à-vis des travaux de forage à exécuter. Une valeur de pondération, fonction de l'intensité des

phénomènes redoutés (affaissement, effondrement, pollution...), appelé facteur aggravant a ensuite été attribuée à chacun des phénomènes identifiés. Le niveau final est le produit entre le niveau d'aléa et le facteur aggravant.

Les niveaux finaux sont ensuite regroupés selon les trois classes suivantes :

**Valeur résultante par maille de 250 x 250 m :  $\Sigma$  (niveau d'aléa x facteur aggravant)**

<b>Vert [0-13]</b>	<b>Orange [14-41]</b>	<b>Rouge <math>\geq</math> 42]</b>
--------------------	-----------------------	------------------------------------

Phénomènes redoutés	Niveau aléa / susceptibilité du phénomène	Facteur aggravant (doublet sur nappe)	Facteur aggravant (Sonde géothermique verticale)	Niveau final (doublet sur nappe)	Niveau final (Sonde géothermique verticale)
Affaissements / Surrection lié aux niveaux évaporitiques	0/1/5/7	6	10	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Affaissements / effondrement lié aux cavités (hors mines)	0/1/2/3/5/7	2	2	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Affaissements / effondrement lié aux cavités minières	0/1/3/5/7	2	2	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Glissements de terrain	0/1/2/3/5/7	2	2	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Pollution sols et nappes souterraines	0/1/4/6/10	3	3	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Artesianisme	0/3/7 ou 0/1/3/4/7 <i>Addendum</i>	2	4	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Mise en communication d'aquifères	0/1/4	4	4	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Problème liés à la réinjection	0/1 ou 0/1/18 <i>Addendum</i>	2	0	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
Biseau salé	0/1/4	4	0	= niveau * facteur aggravant	= niveau * facteur aggravant
			<b>Niveau final</b>	<b>Somme</b>	<b>Somme</b>
<b>Classement</b>	<b>Vert : [0-13]</b>		<b>Orange : [14-41]</b>		<b>Rouge : &gt;41</b>

L'ensemble des sources utilisées pour chacun des aléas se décrit dans les paragraphes dédiés aux aléas. De même, le niveau de susceptibilité défini pour chacun des aléas est expliqué dans ces même paragraphes.

## 5. Cartographie des aléas

### 5.1. PREAMBULE

Ce travail a été réalisé conjointement entre le BRGM et le CEREMA. Chacun de ces établissements a eu en charge la rédaction des parties incombant aux aléas dont il a eu la charge.

- BRGM
  - partie 5.2 ;
  - partie 5.3 ;
  - partie 5.4 ;
  - partie 5.5 ;
  - partie 5.6 ;
  - partie 0 ;
- CEREMA
  - partie 0 ;
  - partie 5.9 ;
  - partie 5.10.

D'un point de vue méthodologique, chacune des cartes d'aléa a été réalisée sur la base de données disponibles parfois retraitées et le plus souvent disponibles sous la forme de vecteur (i.e., polygones ou points). Or, si le fichier de restitution finale de la carte GMI est bien un fichier de type vecteur, il s'agit d'un carroyage définissant des coupures ou mailles de 500 m par 500 m. Aussi, afin de transposer les cartes d'aléa produites dans le cadre de cette étude à la maille, un travail de rapatriement a systématiquement été réalisé pour chacun des aléas. Le guide méthodologique et son addendum offrent plusieurs possibilités pour faire ce rapatriement :

- la note du polygone de la carte initiale est attribuée à toutes les mailles qui intersectent ledit polygone (méthode des intersections) ;
- la note du polygone de la carte initiale est attribuée à toutes les mailles dont le centroïde est inclus dans le polygone initial (méthode du centroïde) ;
- la note du polygone de la carte initiale est attribuée à toutes les mailles qui intersectent ledit polygone, mais en considérant un pourcentage de recouvrement : 10, 20 ou 50 (méthode des surfaces).

Pour davantage de précision, le lecteur pourra se référer au guide méthodologique et à son addendum. Ces documents sont disponibles et accessibles sur demande à la DREAL de Bretagne.

## 5.2. LES AFFAISSEMENTS ET SURRECTIONS LIES AUX FORMATIONS EVAPORITIQUES

### 5.2.1. Description du phénomène redouté

Il s'agit d'un affaissement, voire d'un effondrement ou d'une surrection des terrains de surface, lié soit à la dissolution d'un niveau d'évaporite, soit au gonflement de ce niveau en cas de présence d'anhydrite. Ces phénomènes sont provoqués par la mise en communication d'aquifères superficiels ou profonds avec les horizons évaporitiques à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte. Il n'existe pas de cartographie des aléas liés à ce phénomène actuellement en France ni en Bretagne.

### 5.2.2. Qualification des aléas

D'après l'addendum, en l'absence de carte, ce phénomène est qualifié en fonction de sa susceptibilité (probabilité d'occurrence) selon trois méthodes possibles résultant du travail réalisé dans les phases précédentes :

- Méthode n° 1 : épaisseur/profondeur selon la méthodologie INERIS/CEREMA (Île-de-France) ;
- Méthode n° 2 : épaisseur cumulée des évaporites (Lorraine, Champagne-Ardenne, Poitou-Charentes) ;
- Méthode n° 3 : probabilité à partir des connaissances géologiques (cartes géologiques, logs de forage, rapports, analyses chimiques, dire d'expert...).

Compte tenu des spécificités géologiques de la Bretagne, qui implique, *a priori*, une très faible susceptibilité de présence de niveaux évaporitiques, c'est la méthode 3 qui a été retenue pour ce territoire :

- aléa nul (cotation 0) : pas de formation connue pour contenir des évaporites ;
- aléa faible (cotation 1) : présence d'une formation connue pour contenir parfois des évaporites dans le territoire concerné ;
- aléa moyen à fort (cotation 2 à 7) : présence d'évaporites avérée. Une cotation de 2 correspond à des évaporites disséminés dans la formation et une cotation de 7 à la présence avérée de bancs d'évaporites d'épaisseur plurimétrique (à partir du niveau 5 pour les systèmes fermés et 7 pour les systèmes ouverts, cela entraîne mathématiquement le classement de la maille en rouge).

Il est ensuite octroyé un facteur aggravant de 6 pour les systèmes ouverts (doublets) et de 10 pour les systèmes fermés (SGV - Sondes Géothermiques Verticales).

### 5.2.3. Données disponibles

Comme précisé dans la partie 3.1, la Bretagne est d'un point de vue géologique, une région de socle dans laquelle les formations évaporitiques sont quasi inexistantes. De ce fait, il n'existe que très peu de données spécifiques, concernant cette thématique. Les principales données utilisées dans le cadre de ce projet sont les données classiquement disponibles :

- les cartes géologiques 1/50 000 (données vectorisées) de Bretagne<sup>1</sup> ;
- la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) ;
- la base de données documentaire interne du BRGM (Intraterre) ;
- la littérature scientifique (Sciences directe, web of knowledge, google scholar).

### 5.2.4. Traitement et résultats

#### a) Sélection des emprises géologiques

Afin de cartographier la susceptibilité associée au phénomène « affaissements et surrections liés aux formations évaporitiques », une recherche par mots-clés a été réalisée dans l'ensemble des bases de données précédemment mentionnées. Les mots-clés choisis sont les suivants : évaporite, gypse, anhydrite, sel, halite.

Sur les 97 notices adossées aux cartes géologiques de Bretagne, 7 mentionnent le terme gypse (notices 281, 282, 283, 317, 353, 355 et 477) et 2 mentionnent le terme sel (notices 208 et 417).

Concernant la BSS, la consultation et la recherche des différents mots-clés s'est faite en deux phases :

- la première phase a consisté à extraire l'ensemble des ouvrages BSS situés dans les zones d'âge paléogène, néogène et plus largement cénozoïque cartographiées en Bretagne. Les zones considérées comme telles sont issues des différentes cartes géologiques départementales harmonisées à 1/50 000 du BRGM. Une extraction plus fine de ce premier ensemble a ensuite été menée en sélectionnant les ouvrages disposant :
  - d'un Log géologique (champ « log\_geol\_v » de la BSS),
  - d'une coupe géologique (champ « coupe\_geol » de la BSS),
  - d'une autre coupe (champ « autre\_coupe » de la BSS).

Lorsqu'une très forte concentration de points BSS a été identifié dans un secteur donné, une sélection des ouvrages considérés lithologiquement et géographiquement comme représentatifs du secteur, a été réalisée.

Au total, à la suite de cette chaîne de sélections, ce sont 337 ouvrages qui ont été sélectionnés et consultés (165 en Ile-et-Vilaine, 60 en Côtes-d'Armor, 12 en Finistère et 100 en Morbihan). La recherche des mots clés sélectionnés dans le cadre de cette étude a été réalisée en consultant les documents disponibles pour chacun des ouvrages. Le mot « gypse » a été identifié dans 4 ouvrages : BSS000ZNGA, BSS000ZNSN, BSS000ZNST et BSS000VQVG. Les autres mots-clés n'ont jamais été identifiés ;

---

<sup>1</sup> Les coupures suivantes couvrent la Bretagne : 207 ; 208 ; 245 ; 246 ; 247 ; 248 ; 281 ; 282 ; 283 ; 284 ; 315 ; 316 ; 317 ; 318 ; 319 ; 351 ; 352 ; 353 ; 354 ; 355 ; 387 ; 388 ; 389 ; 419 ; 420 ; 170 ; 171 ; 203 ; 204 ; 205 ; 206 ; 241 ; 242 ; 243 ; 244 ; 277 ; 278 ; 279 ; 280 ; 312 ; 313 ; 314 ; 311 ; 347 ; 348 ; 349 ; 350 ; 383 ; 384 ; 385 ; 386 ; 415 ; 416 ; 417 ; 418 ; 447 ; 448 ; 449 ; 477 ; 478 ; 200 ; 201 ; 202 ; 237 ; 238 ; 239 ; 240 ; 273 ; 274 ; 275 ; 276 ; 309 ; 310 ; 344 ; 345 ; 346 ; 380 ; 381 ; 382.

- la deuxième phase a consisté à compléter la recherche dans la BSS en extrayant les ouvrages inclus (i) dans les formations géologiques et (ii) aux environs des lieux-dits, villages ou villes pour lesquels des mots-clés ont été identifiés dans les notices.

Au total, 136 ouvrages ont été identifiés par cette deuxième phase de recherche. Sur ces 136 ouvrages, 25 avaient déjà été identifiés lors de la phase 1 (dont les ouvrages BSS000ZNGA, BSS000ZNSN et BSS000ZNST cités précédemment). La consultation des documents disponibles en BSS pour les 121 « nouveaux » ouvrages a permis d'identifier le terme « gypse » pour 1 d'entre eux : BSS001ERFK.

La recherche des mots clés dans les bases de données concernant la littérature scientifique a permis d'identifier un document mentionnant la présence de gypse : Ollivier-Pierre *et al.* (1993). Il est à noter que cette information est cohérente avec l'identification de gypse dans l'ouvrage BSS000ZNGA et dans la notice de la carte géologique n°353.

L'emprise des formations géologiques identifiées dans les notices des cartes géologiques ou à l'aide de la consultation de la BSS (i.e., les formations pour lesquelles un forage mentionnant la présence de gypse a été identifié) a ensuite été extraite à partir des données numériques de la carte harmonisée départementale du département concerné. Il est à noter que lorsqu'une formation était présente sur plusieurs secteurs, seul le secteur concerné par le mot-clé a été extrait. Par ailleurs, des lacunes<sup>2</sup> ont été identifiées dans les fichiers numériques servant de base à l'extraction des emprises. Dans ce cas, la formation concernée a été digitalisée sur la base des cartes géologiques à 1/50 000<sup>e</sup> imprimées du BRGM. De même, dans certains cas, les formations géologiques sélectionnées peuvent être en partie masquées par des formations peu puissantes (quelques mètres) de surface. Dans ce cas, la continuité sous couverture de ces formations a été digitalisée sur la base d'une analyse des données de forage disponible en BSS.

Au final, les deux mots-clés identifiés par l'analyse (i.e., gypse et sel) ont permis l'extraction de six ensembles géologiques :

- la Formation des faluns du Quiou ;
- le Stampien supérieur lacustre ;
- les argiles de Landéan ;
- la Formation de Saint-Germain-sur-Ille ;
- Les marais salants ;
- Le secteur de la Pointe de Taillefer.

Il est à noter que les marais salants et le secteur de la pointe de Taillefer n'ont pas été retenus pour une qualification de l'aléa supérieure à 0. En effet :

- (i) les marais salants étant des formations anthropiques, très superficielles et peu puissantes, elles ne peuvent en aucun cas être responsables d'affaissement ou de surrection de terrain sus-jacent ;
- (ii) l'analyse plus fine des données concernant la pointe de Taillefer a montré que le gypse de ce secteur était à mettre en relation avec une faille tectonique dans laquelle ce gypse constitue des petites cristallisations. La surrection ou l'affaissement de terrains sus-jacents du fait de la dissolution ou du gonflement de ces minéraux, ne sont pas réalistes.

---

<sup>2</sup> Ces lacunes sont liées au fait que certaines formations cartographiées sur les cartes à 1/50 000 imprimées du BRGM sont des formations sous couvertures sédimentaires superficielles. Leurs contours n'ont pas été repris dans les cartes numériques harmonisées qui traduisent la géologie à la surface.

## b) Qualification du niveau d'aléa

Une analyse critique des données disponibles concernant les quatre formations géologiques identifiées a été menée afin de préciser le niveau d'aléa :

- la Formation des faluns du Quiou : dans la notice (281) il est fait mention du gypse à titre d'information et l'on ne sait pas s'il s'agit de strates, de petits niveaux ou encore de simples petits cristaux. Si la présence de strates semble peu probable au regard de la description géologique de cette formation faite dans la littérature scientifique, elle n'est pas complètement exclue et si de tels niveaux sont présents, il est très probable qu'ils sont disséminés et de faible, voire très faible dimension. **Au regard de cette analyse critique et en accord avec le barème fixé par l'addendum pour la méthode 3 (cf. partie 5.2.2) la note de 2 a été attribuée aux emprises concernées par cette formation ;**
- le Stampien supérieur lacustre et les argiles de Landéan correspondent à deux formations appartenant à l'hémi-graben de Rennes-Chartres. Ce dernier comprend une succession de niveaux palustres, marins et lacustres dont certains présentent du gypse. Les formations qui constituent cet hémi-graben sont partiellement recouvertes par des dépôts superficiels. Aussi, dans un premier temps, une estimation de l'emprise de ces deux formations sous couverture superficielle a été réalisée sur la base d'une analyse des données de la BSS disponibles. **Tout comme pour les faluns du Quiou, aucune information ne permet de certifier de l'absence de strates ou de petits niveaux de gypse. Aussi, une note de 2 a été attribuée aux emprises concernées par ces deux formations ;**
- la Formation de Saint-Germain-sur-Ille est principalement constituée de grès. Là encore, s'il est fait mention de gypse dans cette formation, aucune information ne permet de préciser s'il s'agit de petits cristaux disséminés dans la roche ou dans ses fractures ou s'il s'agit de niveau plus ou moins conséquents, voire de strates. Néanmoins, la nature essentiellement gréseuse à schisto-quartzitique de la sédimentation paléozoïque qui constitue l'Unité du Ménez-Bélair (bassin molassique) rend très peu probable la présence de tels niveaux de gypse. **Aussi, uniquement à titre d'information et par principe de précaution, la note de 1 a été attribuée aux emprises concernées par ces formations.** De plus, il est à noter que ces formations géologiques présentent un pendage dont l'orientation est fournie sur les cartes géologiques à 1/50 000 du BRGM. Une telle géométrie implique, en particulier pour les formations à faible pendage, leur extension en profondeur sous les unités géologiques qui leur sont adjacentes à la surface (Figure 5). Afin d'être parfaitement rigoureux, cette extension a été projetée, de manière simplifiée et schématique à la surface pour chacune des tranches de profondeur considérées dans le cadre de cette étude (i.e., 10-50 ; 10-100 ; 10-200 ; (Figure 5)). Cette projection est représentée par un buffer orienté dans le sens du pendage de la couche considérée (Figure 5).

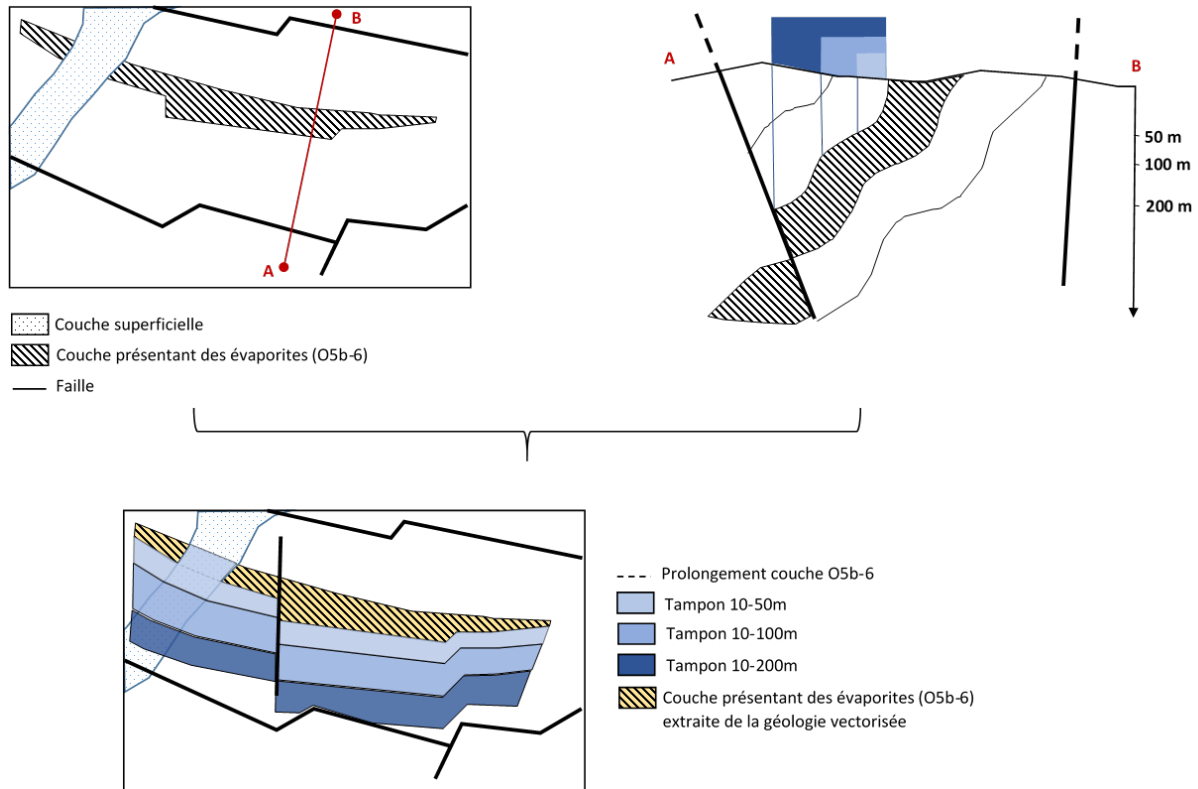


Figure 5 : Schéma du protocole de projection à la surface de l'extension en profondeur des Formations de Saint-Germain-sur-Ille.

### c) Rapatriement à la maille et résultats

Le traitement décrit précédemment a conduit à la réalisation d'une carte d'aléa par tranche de profondeur. Les données cartographiques précédemment compilées ont été rapatriées à la maille, en considérant les mailles qui couvraient à plus de 20 % les surfaces cartographiées en niveau d'aléa supérieur à 0 (Figure 6). Les résultats pour chacune des tranches considérées sont présentés sur la Figure 7 (tranche 10-50 m), la Figure 8 (tranche 10-100 m) et la Figure 9 (tranche 10-200m).

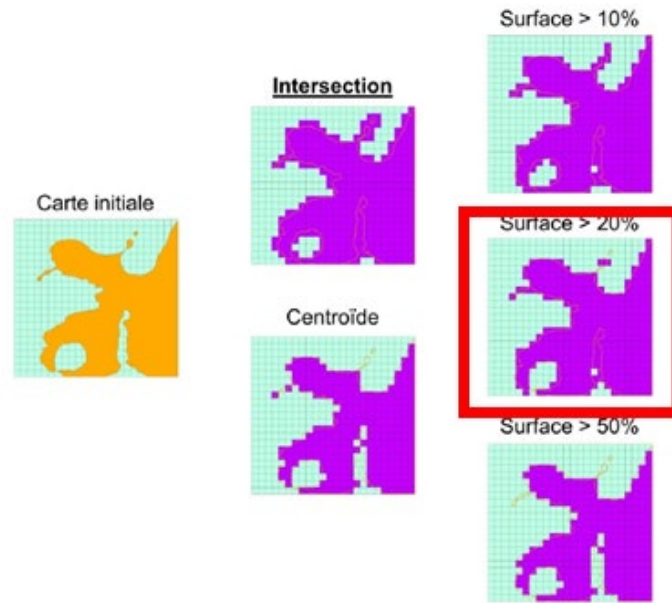


Figure 6 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques ».



Figure 7 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-50 m.



Figure 8 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-100 m.



Figure 9 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « affaissement et surrection liés aux formations évaporitiques » pour la tranche de profondeur 10-200 m.

## 5.3. LE PHENOMENE DE BISEAU SALE

### 5.3.1. Description du phénomène

D'après le guide méthodologique pour la cartographie GMI :

*« En zone côtière, la nappe d'eau douce est en contact direct avec la nappe d'eau salée plus dense. Le simple fait de trop pomper, ou le défaut d'alimentation d'une nappe à la suite d'une période moins pluvieuse, suffit à permettre à l'eau salée de "polluer" une nappe d'eau douce utilisée pour l'irrigation, l'industrie ou l'eau potable, ou surtout conduit au déplacement de l'interface eau salée/eau douce. La remontée du biseau salé vers l'intérieur des terres constitue un phénomène difficilement réversible, l'eau salée se comportant comme une "limite étanche". Une fois que le biseau s'est déplacé, le gradient hydraulique requis pour le faire reculer est bien plus important que la situation d'équilibre initiale. Ainsi les aquifères littoraux sont le lieu de rencontre de deux types d'eaux souterraines :*

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

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

### 5.3.2. Qualification des aléas

Selon le guide méthodologique et son addendum, « la définition des cartes de niveaux d'aléa pour le biseau salé reste très dépendante des territoires et des données disponibles. Il n'y a donc pas de méthodologie unifiée définie dans le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Ce phénomène n'a pas été traité au niveau national. »

Les documents réglementaires précisent néanmoins que les données suivantes peuvent être utilisées :

- rapports sur la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine ;
- études plus spécifiques à certains secteurs ;
- cartes de salinité à partir de mesures de la conductivité et des chlorures dans les nappes ;
- une distance à partir du trait de côtes et des étangs ;
- dire d'expert après consultation des gestionnaires locaux des eaux souterraines.

### 5.3.3. Données disponibles

En Bretagne, une étude de vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines a été réalisée par le BRGM (Lucassou *et al.* 2019) et a grandement facilité la cartographie de l'aléa « remontée du biseau salé » prévu dans le cadre de ce projet. D'une manière synthétique, les travaux réalisés par Lucassou *et al.* (2019) ont montré :

- (i) que l'ensemble des forages présentant des anomalies de conductivité se trouvaient à une distance maximum de 5 km du trait de côte ;
- (ii) que plus précisément, la quasi-totalité de ces forages étaient situés à une distance de moins de 1,5 km du trait de côte.

À l'intérieur des terres, la synthèse bibliographique réalisée par Lucassou *et al.* (2019) a permis de montrer que le fond conductimétrique des eaux de Bretagne était toujours inférieur au seuil réglementaire, bien que certaines valeurs attestent d'une anomalie de conductivité très localisée. Les données concernant les chlorures, bien que moins nombreuses que les données de conductivité, montrent toujours des teneurs faibles qui démontrent (malgré quelques incertitudes) le faible risque de remontée de paléa-saumur à l'intérieur des terres.

Au regard des travaux réalisés par Lucassou *et al.* (2019) et de leurs conclusions, il apparaît pertinent de traiter, pour les objectifs de cette étude, l'aléa « remontée du biseau salé » sur la base d'une distance au trait de côte en utilisant les limites établies par ces auteurs, puis en adaptant les résultats obtenus en fonction des contraintes méthodologiques spécifiques à la présente étude.

#### 5.3.4. Traitement et résultats

Afin de réaliser la carte d'aléa pour le phénomène « remontée du biseau salé », seule l'étude réalisée par le BRGM (Lucassou *et al.* 2019) a donc été utilisée. Ainsi, la première phase de traitement a consisté, sur la base des fichiers du trait de côte historique du SHOM, à produire une zone tampon, de 1,5 km et une zone tampon de 3,5 km depuis cette première zone tampon. Il a été considéré, en accord avec le Comité de Pilotage du projet, qu'une note de 4 serait assignée à la première emprise ainsi créée, tandis qu'une note de 1 serait assignée à la seconde. Ces notes ont ensuite été attribuées à chacune des mailles intersectant les emprises sans tenir compte d'un pourcentage de recouvrement (Figure 10).

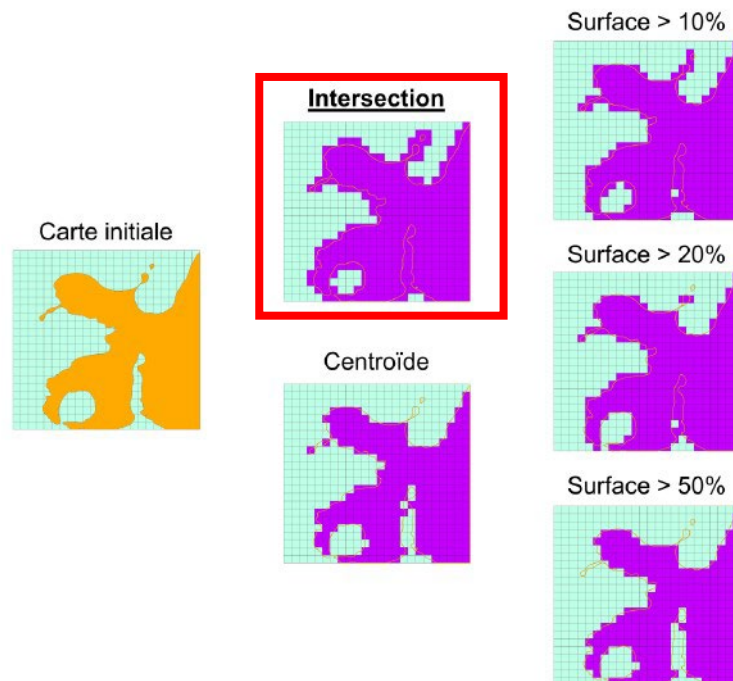


Figure 3 : exemple de possibilités de projection d'un polygone sur un maillage

Figure 10 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « remontée du biseau salé ».

L'addendum au guide méthodologique rappelle que dans les terres, le biseau salé ne peut être au-dessus du niveau 0 NGG. Cela implique que l'aléa « remontée du biseau salé » dépend en plus de la distance au trait de côte, de l'altitude à laquelle l'ouvrage de GMI est implanté. Aussi, pour chacune des tranches de profondeur, la note de 0 a été affectée aux mailles d'altitude supérieures à la tranche considérée (e.g., pour la tranche 10-50 m, toutes les mailles notées 1 ou 4 ont été notées à 0 dès lors que l'altitude de la maille était supérieure à 50 m NGF). La cote altimétrique utilisée dans ce traitement est celle directement fournie dans la grille officielle du projet.

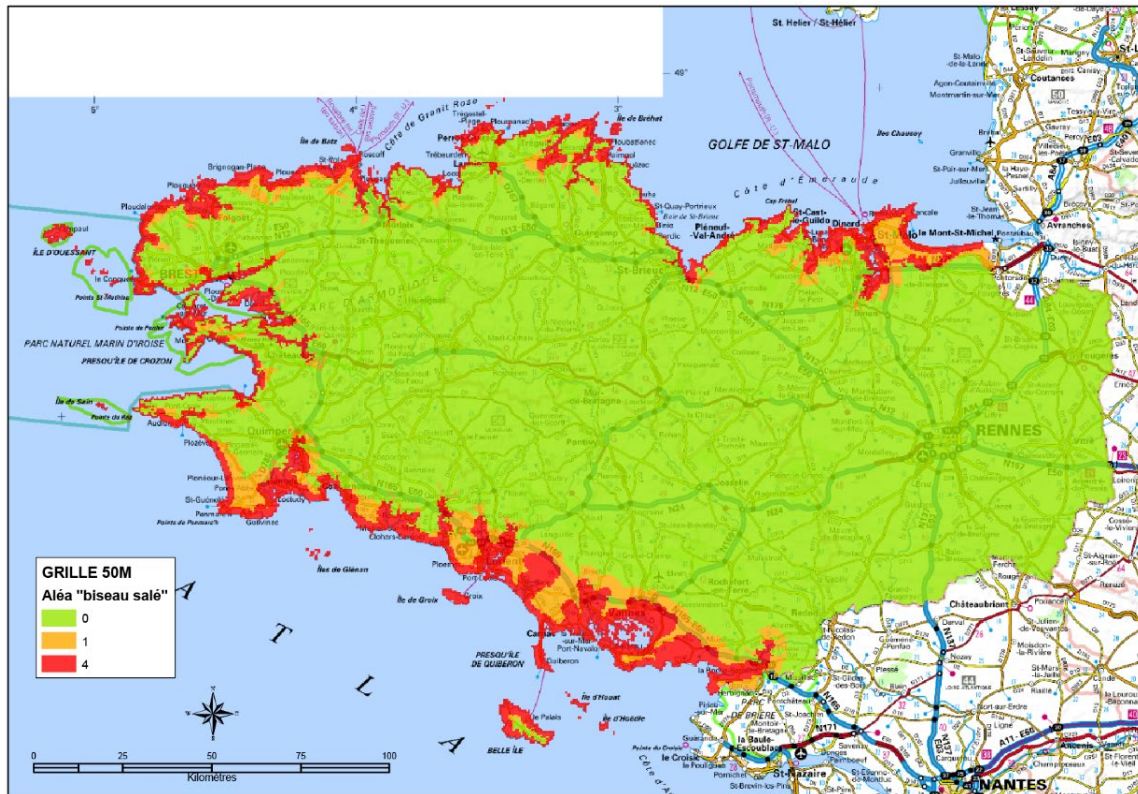


Figure 11 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-50 m.

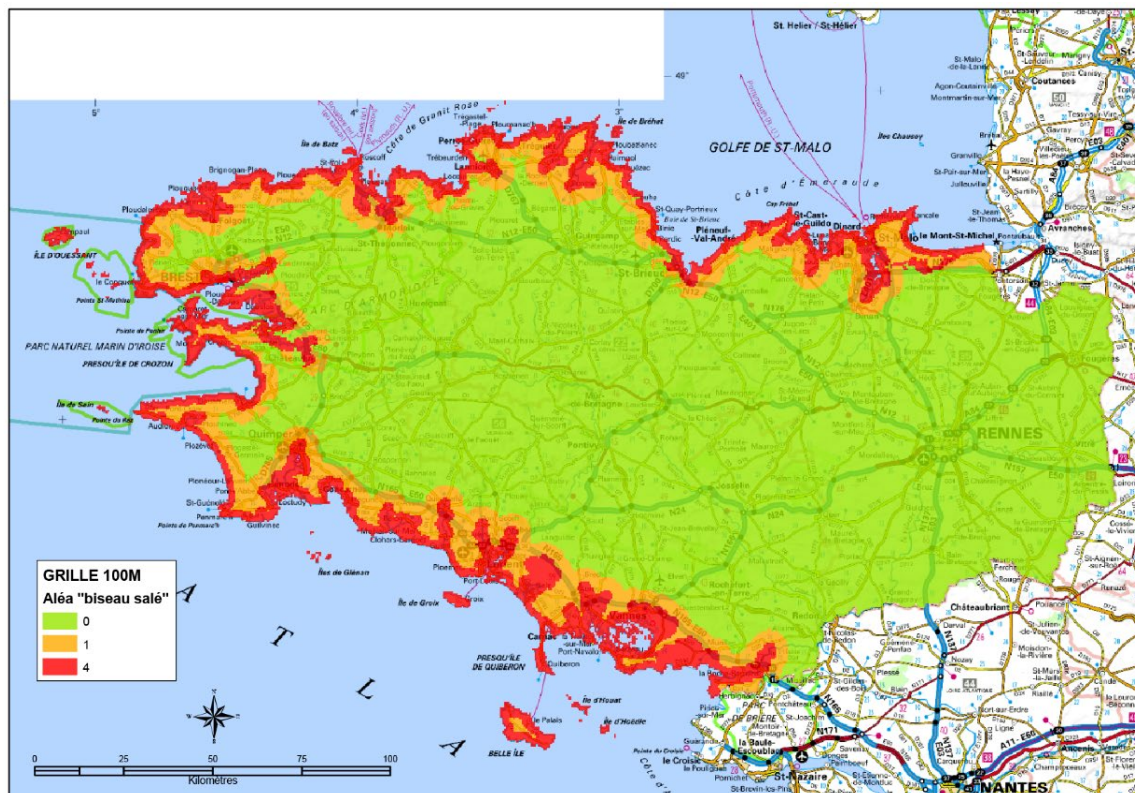


Figure 12 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-100 m.

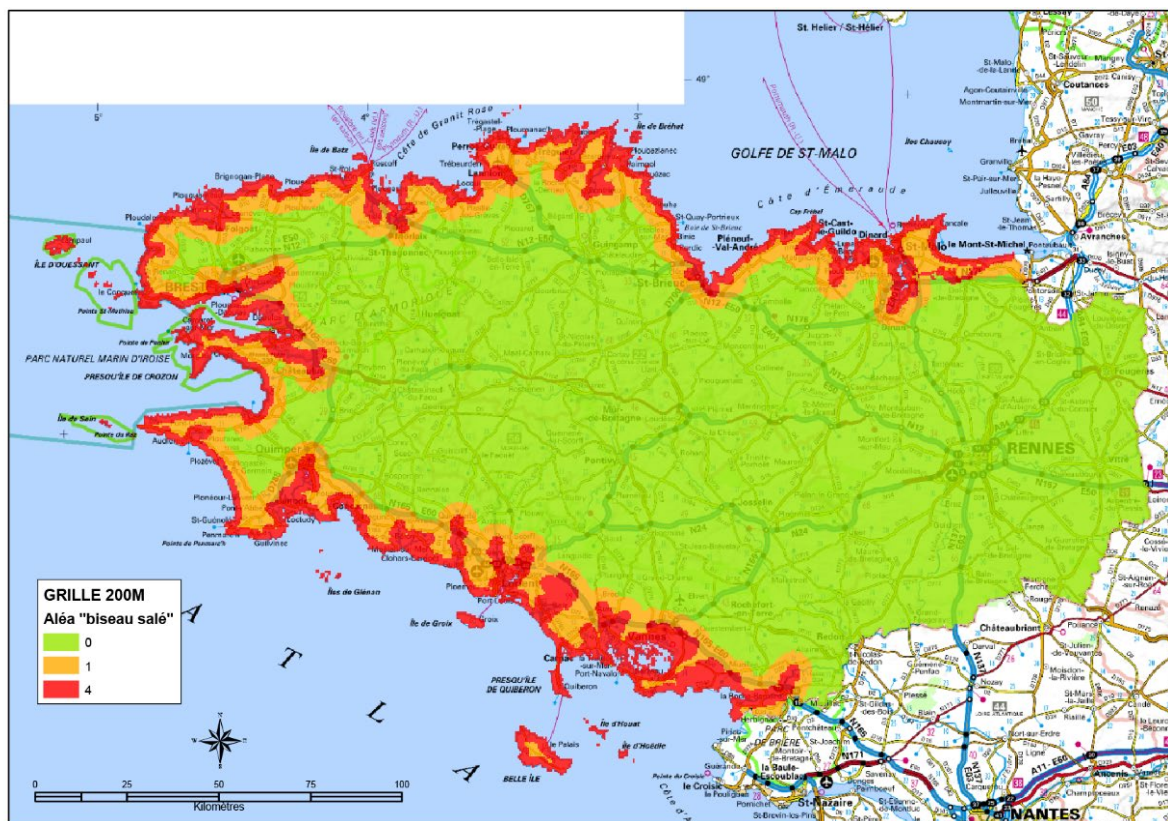


Figure 13 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « biseau salé » pour la tranche de profondeur 10-200 m.

## 5.4. LE PHENOMENE D'ARTESIANISME

### 5.4.1. Description du phénomène

L'artésianisme est l'aptitude d'un aquifère captif à permettre la remontée d'eau spontanée par des ouvrages (puits, forages). Cette remontée d'eau en surface peut ainsi entraîner des écoulements d'eau sur le sol, et/ou une déstabilisation d'une formation superficielle. L'aquifère concerné a ainsi une surface piézométrique située au-dessus de la surface du sol.

### 5.4.2. Qualification des aléas

La méthodologie de cotation du niveau d'aléa « artésianisme », telle que définie dans le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance, a été établie comme suit :

- Aléa fort (7) : présence d'un aquifère artésien connu (retour d'expérience) ;
- Aléa moyen (3) : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique connu pour être supérieur à la surface du sol dans la tranche de terrain considérée ;
- Aléa nul (0) : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée.

### 5.4.3. Données disponibles

La Bretagne n'est pas un territoire connu pour son artésianisme, ni dans le socle cristallin, ni dans les formations sédimentaires des petits bassins tertiaires cartographiés ici et là sur le territoire. Néanmoins, il existe un nombre limité de forages artésiens qui traduisent des contextes hydrogéologiques très particuliers. Ces ouvrages sont inventoriés dans la BSS et seules ces données ont été utilisées dans le cadre de ce projet.

### 5.4.4. Traitement et résultats

La consultation de la BSS a permis de faire ressortir 14 ouvrages décrits comme atteignant un aquifère de socle artésien (BSS000MLMJ, BSS000SXHV, BSS000VEWT, BSS000VFED, BSS000VPRZ, BSS000VUNL, BSS000ZDLS, BSS000ZRMR, BSS001BLER, BSS001BLJE, BSS001BLJG, BSS000ZLUP, BSS000ZMQZ, BSS000ZMPG). Les aquifères de socle étant d'un point de vue géologique (Schroetter *et al.* 2020), mais aussi hydrogéologique (Schroetter *et al.* 2020), il est difficile d'établir dans quelle mesure, l'artésianisme de ces secteurs très particuliers s'étend latéralement (i.e., en longitude et en latitude). Aussi, compte tenu de la rareté des forages artésiens en Bretagne, il a été décidé d'appliquer une zone tampon de 250 m autour de chacun de ces ouvrages. Par la suite, les mailles possédant au moins 10 % de recouvrement avec ces zones tampons ont été sélectionnées. Il leur a été affecté la note de 3, en accord avec le guide méthodologique (Figure 5). Cette note est valable pour toutes les tranches de profondeur (principe d'héritage de la méthodologie nationale), ce qui implique que les trois cartes produites sont identiques. Les résultats sont présentés sur la Figure 15.

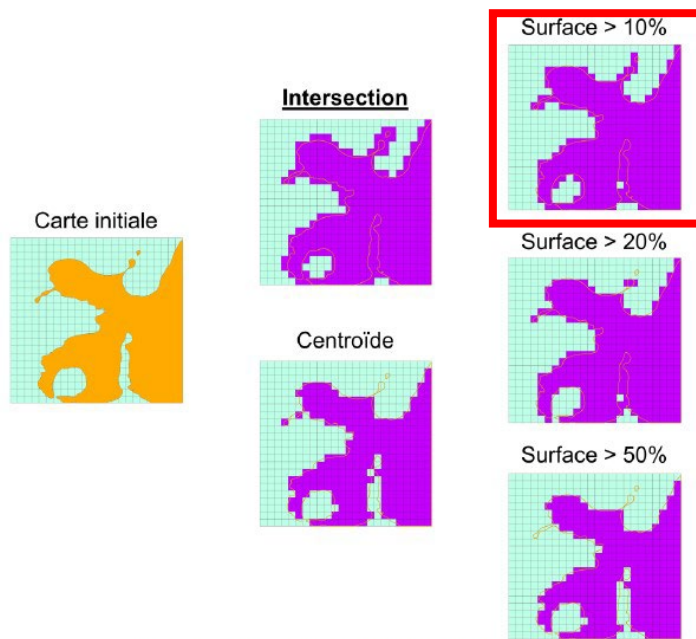


Figure 14 : Méthodologie de rapatriement à la maille sélectionnée et appliquée pour l'aléa « artésianisme ».



Figure 15 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « artésianisme » pour la tranche de profondeur 10-50, 100 et 200 m.

## 5.5. PROBLEME DE REMONTEE DE NAPPE

### 5.5.1. Description du phénomène

Ce phénomène correspond à la remontée de nappe due à une surcote provoquée potentiellement par la réinjection d'eau dans le cadre du fonctionnement d'un doublet géothermique. Cette remontée 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.

### 5.5.2. Qualification des aléas

Le phénomène « inondation par remontée de nappe » a été qualifié comme suit :

- Susceptibilité nulle (0) : pas d'aquifère ayant un niveau piézométrique déjà observé à moins de cinq mètres sous la surface du sol en hautes eaux ; et pas d'aquifère présentant des difficultés de réinjection ;
- Susceptibilité 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.

### 5.5.3. Données disponibles

Les données disponibles pour établir la carte du phénomène « inondation par remontée de nappe » pour la région Bretagne sont :

- l'étude BRGM/RP-65452-FR détaillée ci-dessous ;
- les entités hydrogéologiques karstiques affleurantes de la BDLISA (niveau 3) ;
- CORINE Land Cover de 2018.

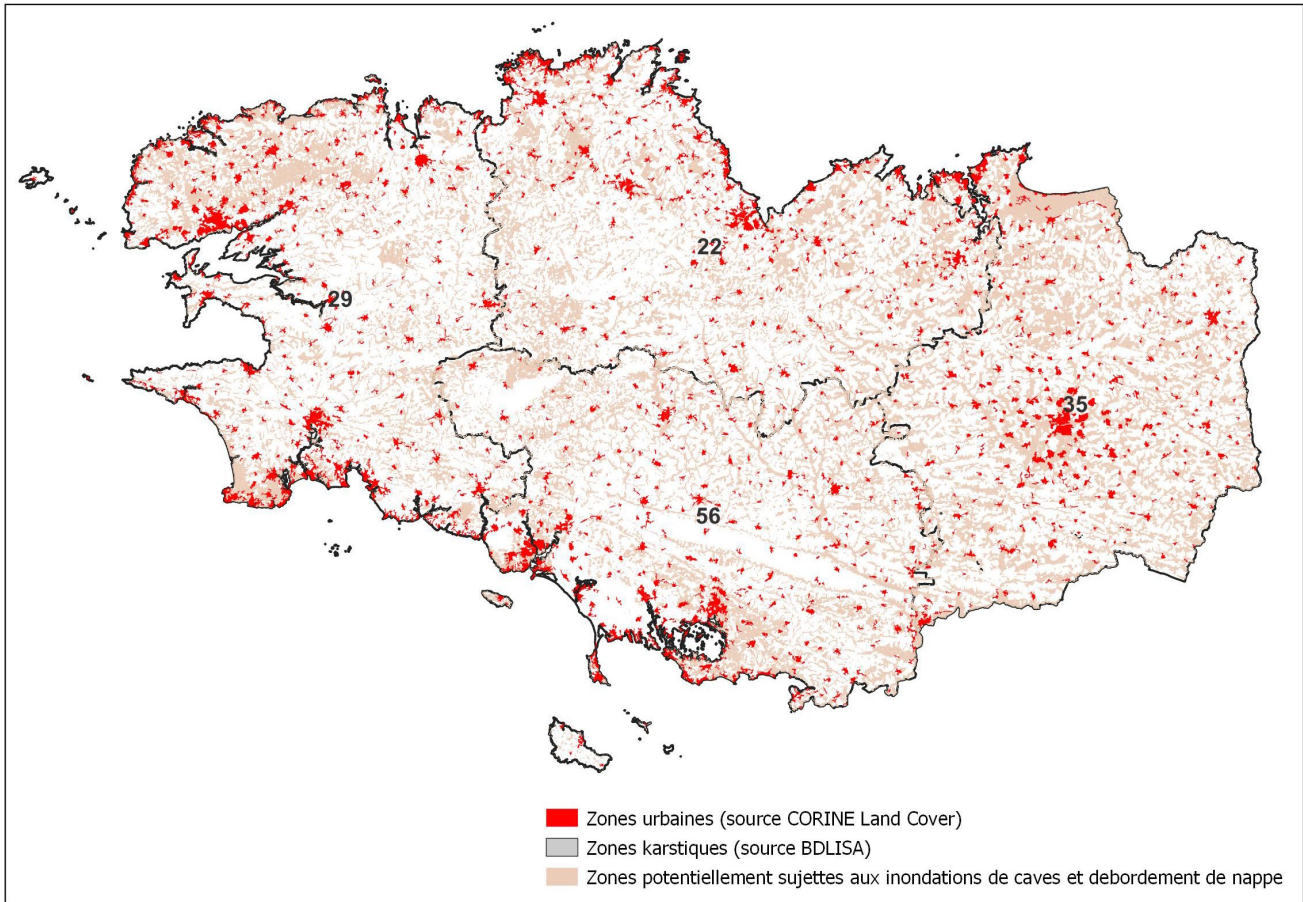


Figure 16 : Cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe, en région Bretagne, et masques nécessaires à sa lecture (source : georisques.fr).

#### 5.5.4. Traitement et résultats

Une cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe a été réalisée en 2018 par le BRGM (Brugeron *et al.*, 2018, BRGM/RP-65452-FR) à la demande du Ministère de la Transition Écologique (MTE). 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, déclarations 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 cotes 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 ;
- et les zones sans débordement au-delà.

Cette zonation ne s'applique pas dans les secteurs :

- 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 (sélection des entités karstiques affleurantes) ;
- 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 CORINE Land Cover (sélection des entités urbaines).

Suite à ce géotraitement, il a été attribué la note de 1 aux mailles possédant au moins 20 % de recouvrement avec les zones potentiellement affectées par l'aléa remontée de nappe.

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

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est illustrée Figure 17. La carte de susceptibilité du phénomène « Remontée de nappe » en région Bretagne est identique pour les trois profondeurs.

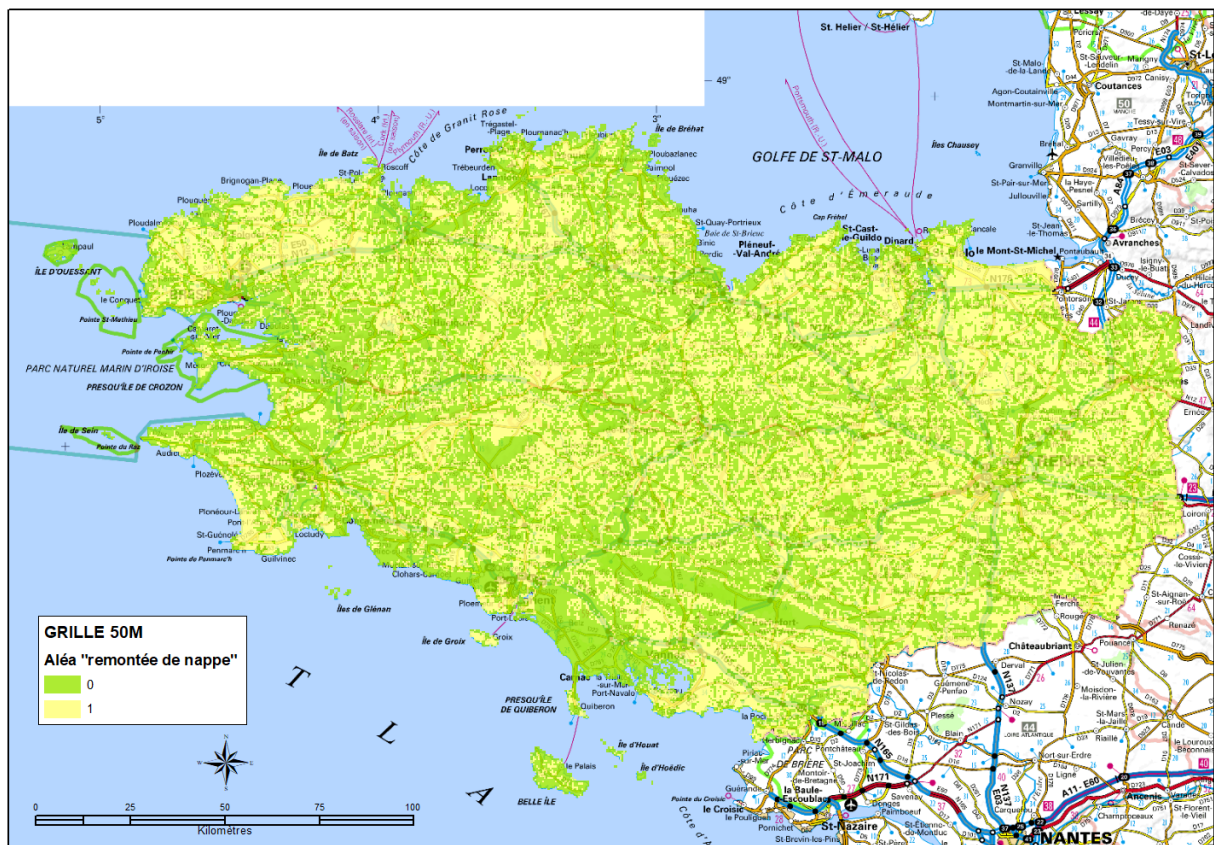


Figure 17 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « remontée de nappe » pour la tranche de profondeur 10-200 m.

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est présentée dans le tableau ci-dessous.

Remontée de nappe	Niveau de susceptibilité	Nbr mailles (500mx500m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
10-200m	Faible (1)	54143	13536	48,1
	Nul (0)	58308	14577	51,9

Tableau 1 : Table d'évolution des emprises des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « remontée de nappe » pour la gamme de profondeur 10-200 m.

## 5.6. LA POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES

### 5.6.1. Description du phénomène

Le phénomène décrit est une pollution des sols et des nappes, par infiltration de polluants depuis la surface ou la mise en contact d'aquifères avec des nappes polluées. Il pourrait être provoqué soit par la foration, au cours de la mise en place du dispositif géothermique, soit, pendant 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.

### 5.6.2. Qualification des aléas

Le phénomène « pollution des sols et des nappes souterraines » a été qualifié selon cinq niveaux d'aléa/susceptibilité ; conformément aux préconisations de l'addendum du guide méthodologique de 2015 :

- nul (0) : pas de site InfoSols<sup>3</sup> répertorié ou présence d'un site InfoSols classé comme traité et libre de toute restriction ;
- faible (1) : présence d'un site InfoSols et absence d'aquifère sous-jacent ;
- moyen (4) : présence d'un site InfoSols et présence d'aquifère sous-jacent ;
- fort (6) : pollution avérée de la nappe à partir des données InfoSols ;
- très fort (10) : présence d'un panache de pollution avéré, cartographié et suivi (aucun site concerné en Bretagne).

### 5.6.3. Données disponibles

Depuis octobre 2020 la plateforme InfoSols centralise les données sur la thématique des sites et sols (potentiellement) pollués. Elle reprend les données issues de BASOL<sup>4</sup> et des SIS (Secteurs d'Information sur les Sols)<sup>5</sup>, les informations sont hétérogènes sur le plan qualitatif (renseignement des informations) et localisation ; emprise pour SIS contre centroïde pour BASOL.

<sup>3</sup> Plateforme nationale de gestion des données relatives aux risques de pollution des sols

<sup>4</sup> <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-industriels/basol>

<sup>5</sup> <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-industriels/secteurs-information-sols>

Quatre-vingt-quatorze (94) sites ex-BASOL ont ainsi été extraits le 21 juin 2021 et 1 047 SIS (dont 49 sont référencés dans BASOL). Leur répartition est indiquée sur la Figure 18.

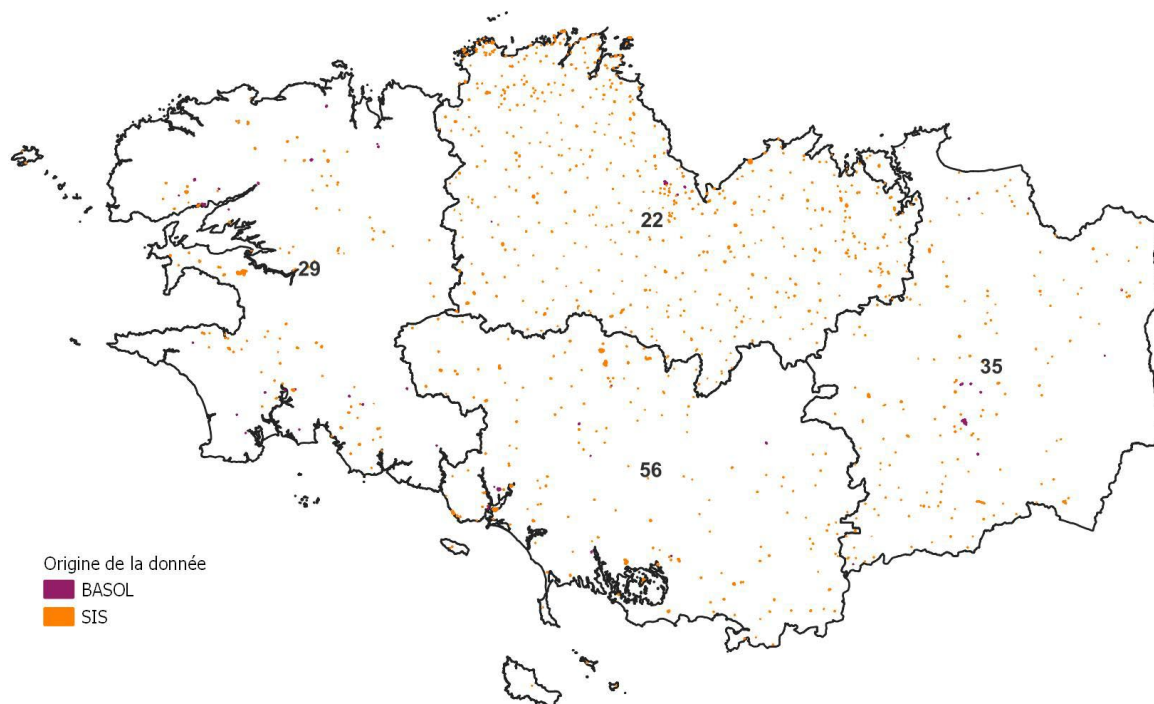


Figure 18 : Carte de localisation des sites InfoSols.

D'autre part, pour connaître l'existence d'un aquifère sous-jacent, il a été utilisé les données de la Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères (BD LISA) de niveau 3, Couche « EXTENSION ». Un croisement géographique a permis de déterminer si au droit d'un site InfoSols se trouve une entité hydrologique (aquifère ou semi-perméable).

#### 5.6.4. Traitement et résultats

Il a été favorisé les informations contenues dans les fiches BASOL, car elles avaient été mises à jour plus récemment et étaient plus complètes que celles des SIS. Ces fiches contiennent, entre autres, des informations sur l'état de la nappe (polluée ou non, quand elle existe) permettant de qualifier l'aléa « pollution des sols et des nappes souterraines » comme fort le cas échéant. Pour les 998 sites uniquement référencés comme SIS, il n'est ni mentionné le type de milieu contaminé ni l'état de dépollution.

Il a été décidé de traiter les sites inventoriés différemment en fonction qu'une pollution de nappe ait été signalée ou non au droit du site dans les fiches BASOL. Dans le détail, il a été affecté une zone tampon de 500 m à tous les points BASOL ainsi qu'à tous les SIS concernés par une pollution de nappe pour prendre en compte un éventuel panache de pollution dans la nappe (sans en connaître le sens de circulation). En l'absence de nappe contaminée (d'après les fiches BASOL), il a été utilisé l'emprise de la parcelle SIS quand elle existait, ou appliqué un tampon de 500 m au point BASOL sinon (Figure 19 : Traitement des sites InfoSols suivant la présence ou non d'une nappe polluée au droit du site).

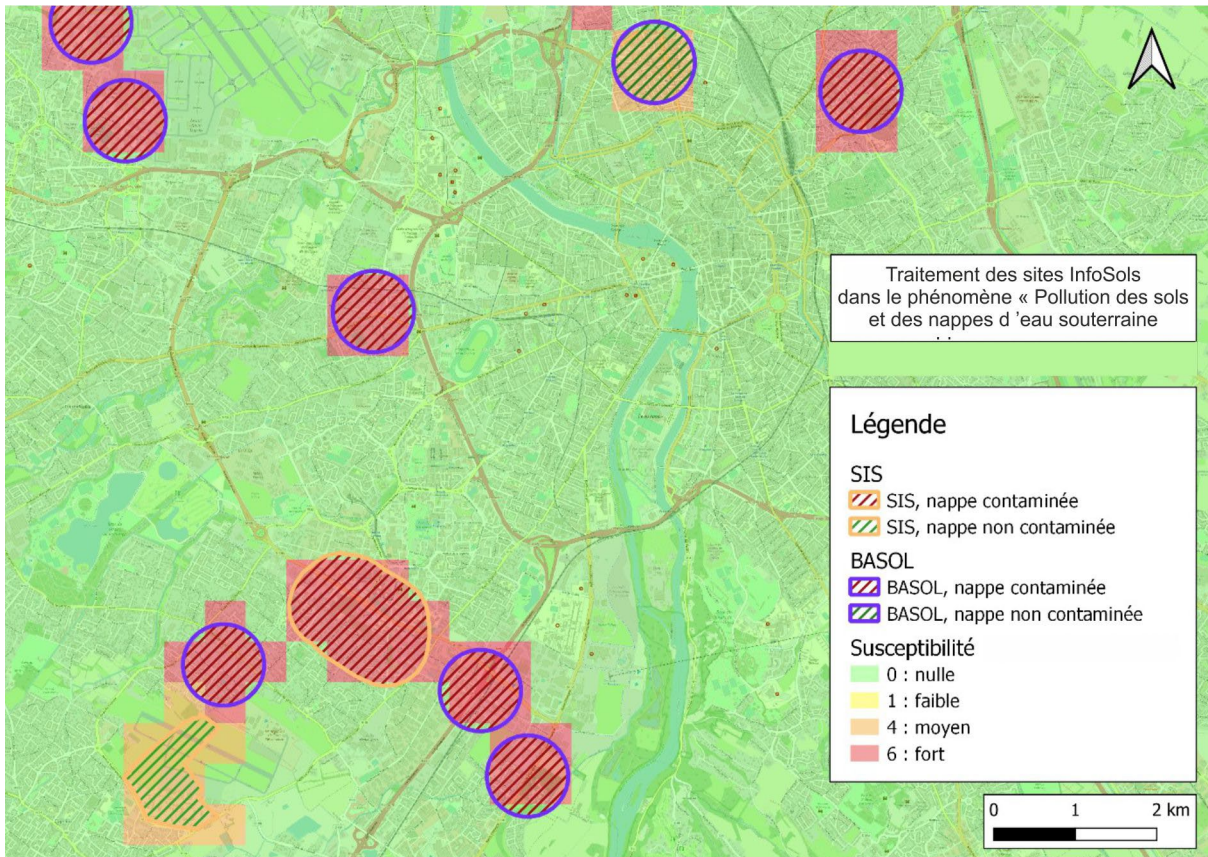


Figure 19 : Traitement des sites InfoSols suivant la présence ou non d'une nappe polluée au droit du site.

Pour tous les sites où l'information de la pollution d'une nappe n'est pas mentionnée, il a fallu réaliser un croisement géographique avec la BDLISA. Ainsi, il est porté à connaissance l'existence, ou non, d'une entité hydrologique (aquifère ou semi-perméable). Dans le cas de la négation la note est de 1, contre 4 pour la présence d'un aquifère sous-jacent.

Par la suite, les mailles possédant au moins 20 % de recouvrement avec ces zones tampons ont été sélectionnées. Il leur a été affecté la note maximale ; dans le cas de plusieurs emprises potentielles de pollution. Cette note est valable pour toutes les tranches de profondeur (principe d'héritage de la méthodologie nationale). En Bretagne, nous ne disposons pas de modèle hydrogéologique avec des notions de profondeur, et étant donné que le socle est omniprésent, le travail de discrimination pour les trois gammes de profondeur n'a pas été réalisé. Ce qui implique que les trois cartes produites sont identiques.

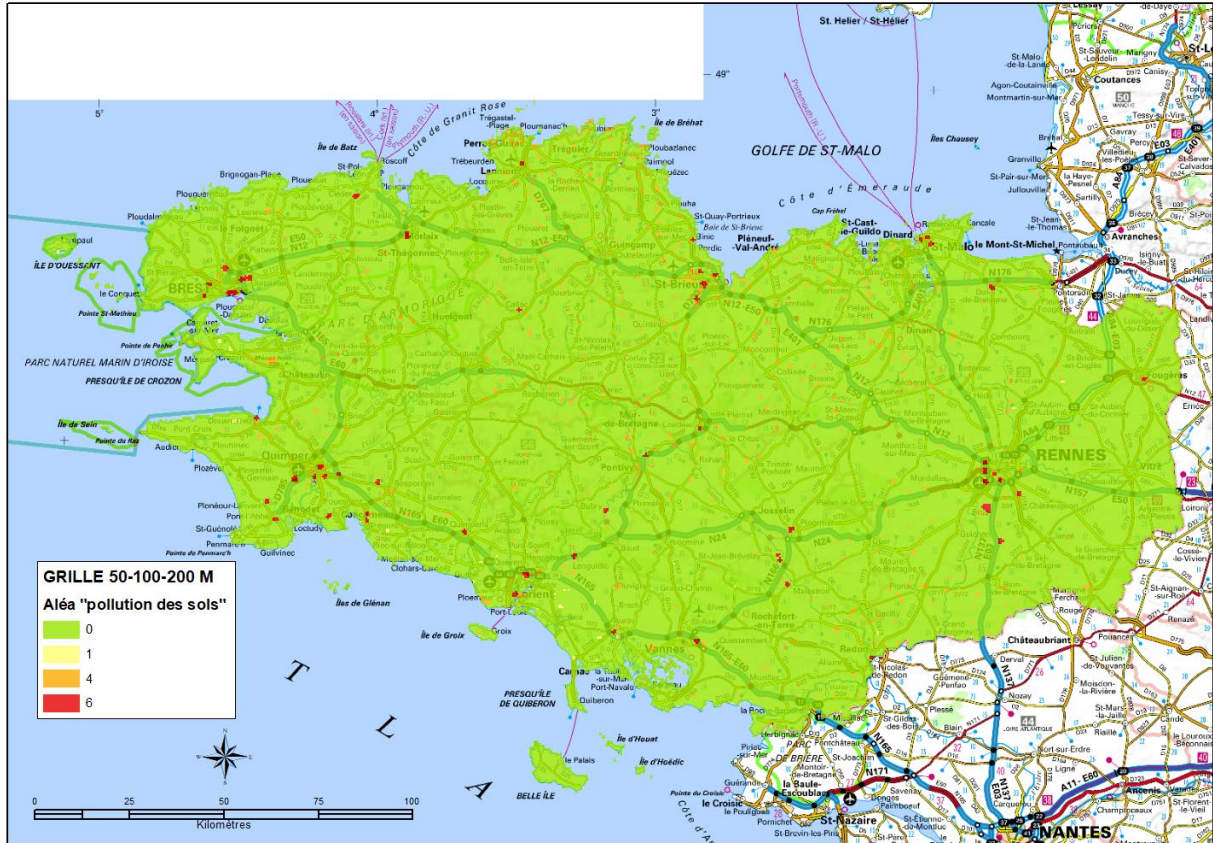


Figure 20 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » pour la tranche de profondeur 10-200 m.

La répartition des emprises des niveaux de susceptibilité est présentée dans le Tableau 2 ci-dessous.

Pollution des sols et des nappes	Niveau de susceptibilité	Nbr mailles (500m x 500m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
10-200 m	Fort (6)	346	86,5	0,3
	Moyen (4)	1694	423,5	1,5
	Faible (1)	56	14	0,1
	Nul (0)	110355	27588,7	98,1

Tableau 2 : 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 10-200 m.

## 5.7. LA MISE EN COMMUNICATION DES EAUX SOUTERRAINES ENTRE DIFFERENTS AQUIFERES

### 5.7.1. Description du phénomène

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.

### 5.7.2. Qualification des aléas

Il n'existe pas de carte nationale de ce phénomène actuellement en France.

Le phénomène « mise en communication d'aquifères » n'étant pas cartographié en région Bretagne, la qualification du phénomène est basée sur la probabilité d'avoir un ou plusieurs aquifères dans l'intervalle de profondeur considéré.

La susceptibilité a ainsi été établie avec les critères suivants :

- susceptibilité nulle (0) : absence d'aquifère ou présence d'un seul aquifère ;
- susceptibilité faible (1) : présence de plus d'un aquifère ;
- susceptibilité forte (4) : présence de plus d'un aquifère dont une ressource stratégique NAEP (Nappes à réserver pour l'Alimentation en Eau Potable) dans l'intervalle considéré.

### 5.7.3. Données disponibles

Le guide méthodologique de 2015 (MEEDE) précise l'utilisation d'un jeu de données commun à l'ensemble des régions :

- il sera utilisé la couche « EXTENSION » de la BDLISA, en écartant les entités imperméables (nature = 7), pour connaître l'empilement d'aquifères ;
- le projet ICARE (Lucassou *et al.*, 2021, BRGM/RP-70336-FR) qui identifie et caractérise les aquifères tertiaires et quaternaires stratégiques de Bretagne.

Le guide permet l'utilisation de données locales afin de mieux caractériser le niveau de susceptibilité lié à ce phénomène. Ça n'a pas été le cas ici pour cause d'inexistence de cette donnée localisée, de modèle.

5.7.4. Traitement et résultats

Le traitement a consisté à identifier les zones où la BDLISA référence au moins deux entités hydrogéologiques (ordre) de nature perméable, ou semi-perméable, et leur affecter la note de 1.

Un croisement a ensuite été réalisé avec les aquifères reconnus dans le projet ICARE, ressource stratégique NAEP, afin de connaître les zones à susceptibilité forte. Note de 4.

Par la suite, les mailles possédant au moins 20 % de recouvrement avec ces zones ont été sélectionnées. Il leur a été affecté la note maximale ; dans le cas de différentes susceptibilités. Cette note est valable pour toutes les tranches de profondeur (principe d'héritage de la méthodologie nationale). Le travail de discrimination pour les trois gammes de profondeur n'a pas été réalisé par manque de données homogènes sur l'ensemble du territoire. Ce qui implique que les trois cartes produites sont identiques.

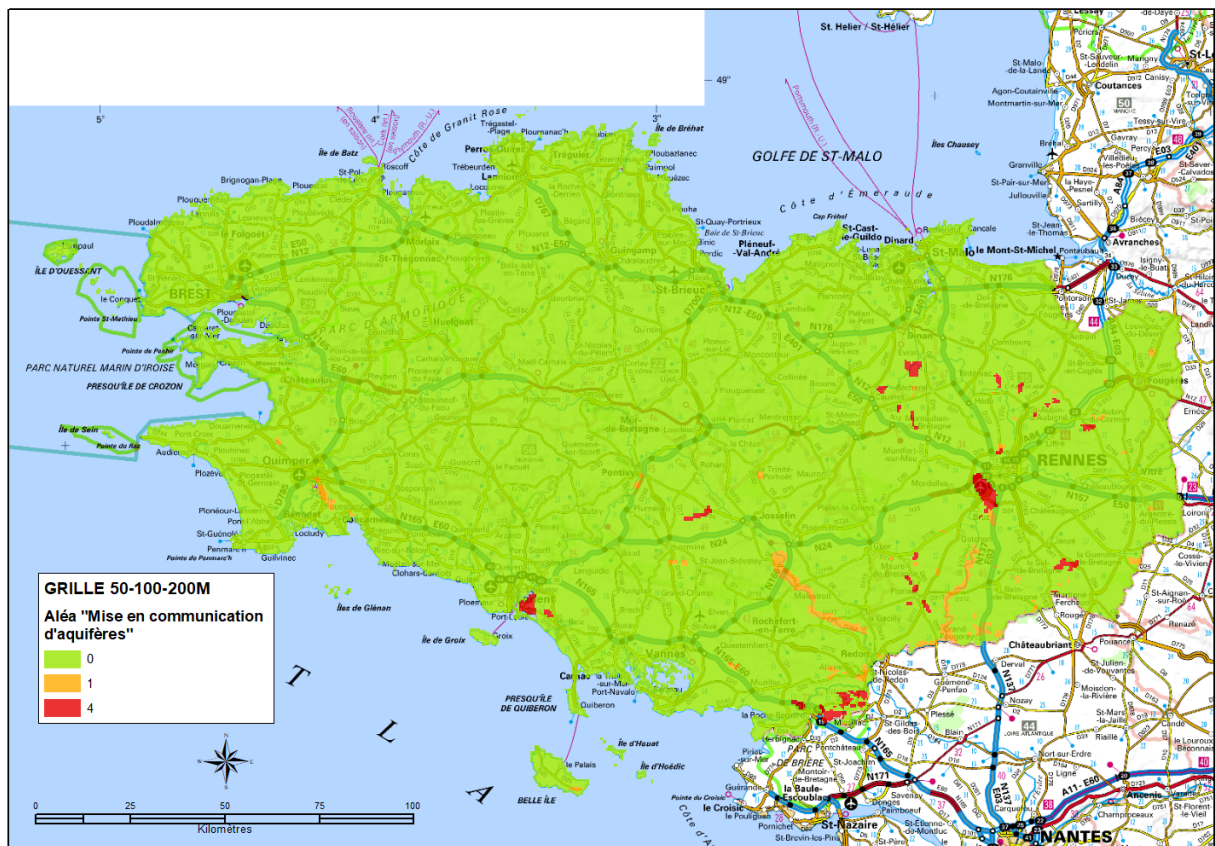


Figure 21 : Carte montrant les résultats du traitement concernant l'aléa « mise en communication d'aquifère» pour la tranche de profondeur 10-50, 100 et 200 m.

## **5.8. LES AFFAISSEMENTS ET EFFONDREMENTS LIES AUX CAVITES (HORS MINES)**

### 5.8.1. Description du phénomène

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.

### 5.8.2. Qualification des aléas

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, selon la présence des formations géologiques susceptibles de contenir des cavités et selon le type de phénomène :

- 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'aléas, les susceptibilités sont définies à partir du comptage pour chaque maille de 500 m x 500 m des événements recensés à partir de la base de données « Cavités » du BRGM.

La base de données Lisa du BRGM a été consultée afin de connaître les formations géologiques susceptibles de contenir des cavités (formations karstiques).

Le niveau de susceptibilité de l'apparition du phénomène est défini de la façon suivante :

- susceptibilité forte : plus de 8 cavités recensées par pixel 500 m x 500 m, notée 3 ;
- susceptibilité moyenne : de 5 à 8 cavités recensées par pixel 500 m x 500 m, notée 2 ;
- susceptibilité faible : de 2 à 4 cavités recensées par pixel 500 m x 500 m ou présence d'une formation géologique susceptible d'en contenir, notée 1 ;
- susceptibilité nulle : moins de 2 cavités recensées par pixel 500 m x 500 m et pas de formation susceptible d'en contenir, notée 0.

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	Faible	Moyen(ne)	Fort(e)
Commune avec carte d'aléa – données surfaciques	<b>0</b> Pas de formation susceptible de contenir des cavités	<b>1</b> Tassement	<b>5</b> Affaissement progressif	<b>7</b> Effondrement localisé ou généralisé
BD Cavité – données ponctuelles	<b>0</b> Pas de formation susceptible de contenir des cavités De 0 à 1 cavité comptée	<b>1</b> Formation susceptible de contenir des cavités De 2 à 4 cavités comptées par maille	<b>2</b> De 5 à 8 cavités comptées par maille	<b>3</b> Plus de 8 cavités comptées par maille

Tableau 3 : Caractérisation du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine ».

### 5.8.3. Données utilisées et traitement

#### a) Cartes d'aléa

Selon le guide méthodologique, les données cartographiques ont été traitées prioritairement. Les données sont issues de sources différentes selon les départements. Seulement deux communes de la région Bretagne présentent des cartes d'aléas de type PPR mouvement de terrain, Douarnenez et Audierne.

Les DDTM ont été consultées le 11 janvier 2023. Les réponses ont été prises en compte jusqu'en mars 2023. Afin de compléter les données fournies, le site Géorisques a été consulté par le CEREMA le 23 janvier 2023 pour les départements 22 et 29, le 29 janvier 2023 pour les départements 35 et 56.

Dans la région Bretagne, les aléas d'effondrements localisés et d'affaissements progressifs ne sont pas représentés. Seuls les tassements, dans le département du Finistère, sont présents et constituent au total 240 ha. Cinq données sur 15 n'ont pas été prises en compte du fait d'erreurs de géolocalisation qui n'ont pas pu être corrigées.

Une fois les données collectées et analysées, celles-ci sont projetées sur la grille 500 m x 500 m. Chaque maille de la grille intersectée par un aléa obtient la note de l'aléa correspondant, soit 1.

#### 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, fournies par le BRGM le 10 mars 2023 et complétées par des données fournies par les DDTM.

C'est la précision géographique de la donnée qui est prise en considération pour cet aléa. 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 4 : Valeurs des tampons attribués aux évènements ponctuels « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines ».

Après analyse des données, les évènements localisés au niveau du centroïde de la commune ont été supprimés. Il reste ainsi 4 669 cavités recensées essentiellement situées sur le pourtour des côtes bretonnes. Elles correspondent ainsi à des grottes naturelles formées dans les formations géologiques cristallines. Près d'un millier de cavités se situent quant à elles, à l'intérieur des terres.

Les tampons associés aux cavités ponctuelles sont découpés par la grille de 500 m x 500 m. Les différentes portions de tampons des évènements sont décomptées par maille et donnent ainsi la susceptibilité du phénomène notée 0, 1, 2 ou 3 (voir paragraphe 1.2.2).

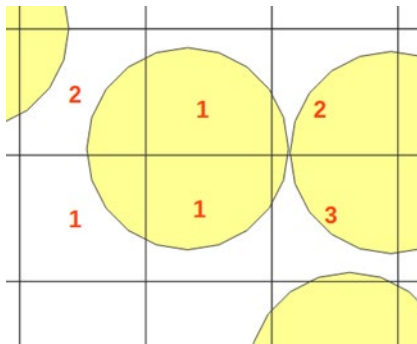


Figure 22 : Principe du comptage par maille des évènements ponctuels avec leur tampon (en rouge le nombre d'évènements par maille).

### 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 23 octobre 2023. L'extraction de la couche karstique numérisée n'identifie que cinq petites surfaces au sud de la ville de Rennes dans l'Ille-et-Vilaine. La surface la plus proche de Rennes à Chartres-de-Bretagne renferme environ 170 cavités répertoriées dans la Bd Cavités.

Un aléa de niveau faible (1) est attribué à chaque maille recoupant et contenant ces surfaces, avec ou sans cavité ponctuelle.

Sur la région Bretagne, les cavités naturelles sont assez présentes sur tous les départements. Elles sont localisées en majorité dans des formations géologiques non karstiques.

5.8.4. Résultats

La profondeur des cavités n'apparaît pas dans les cartes d'aléas. Les données ponctuelles n'indiquent pas précisément les profondeurs, mais seulement une indication du « z » qui semble être l'altitude de la cavité. Les trois grilles correspondant aux profondeurs 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m seront donc identiques.

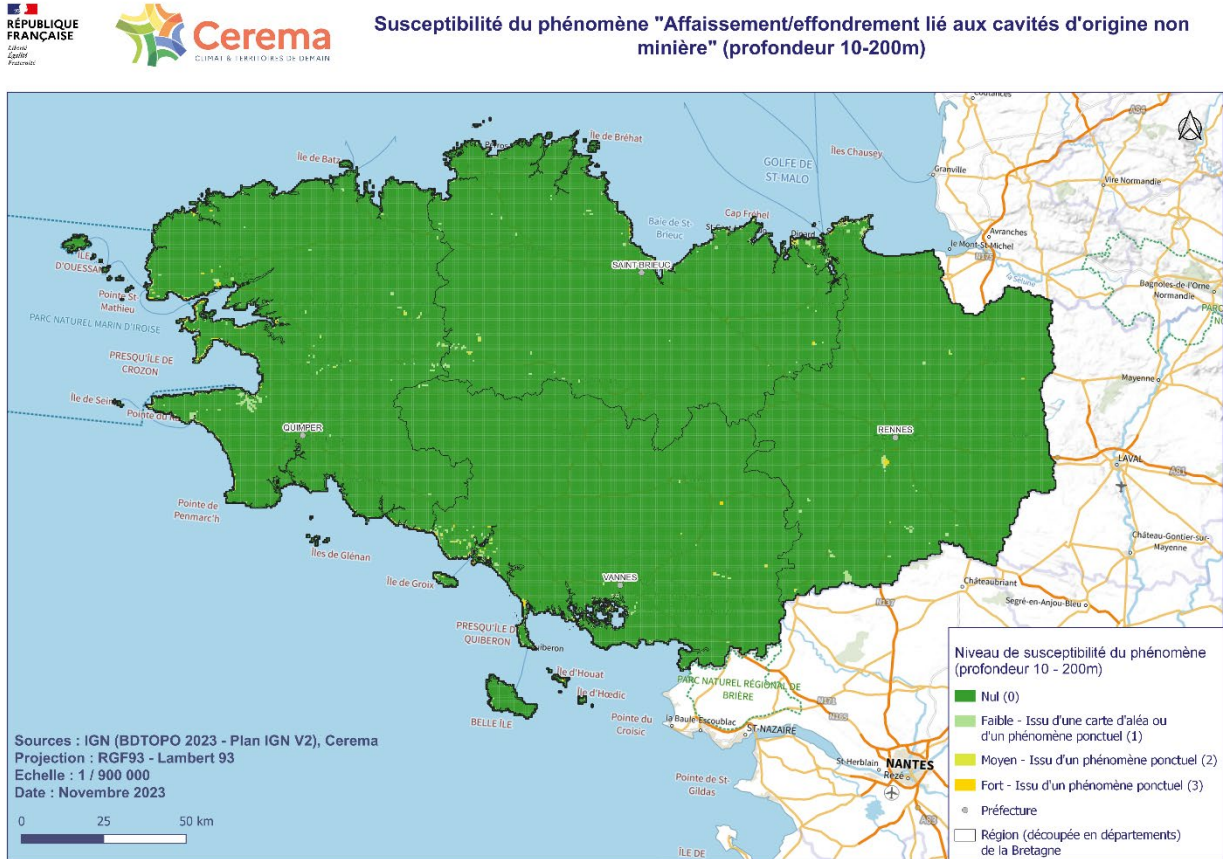


Figure 23 : Carte de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs.

Cavités hors mines	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (500mx500m)	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]
10 – 200 m	Fort (3)	108	27	0,1
	Moyen (2)	282	70,5	0,25
	Faible (1)	1163	290,75	1,03
	Nul (0)	110898	27724,5	98,62

Tableau 5 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités hors mine ».

## **5.9. LES AFFAISSEMENTS ET EFFONDREMENTS LIES AUX CAVITES D'ORIGINE MINIERES**

### 5.9.1. Description du phénomène

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 donc être provoqués, soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par 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.

### 5.9.2. Qualification des aléas

Deux types de données sont exploitées pour ce phénomène : les données surfaciques à partir des cartes d'aléas. Dans le cas d'absence de cartographie du niveau d'aléa minier, la qualification de ce phénomène est basée sur la présence du site minier, dont la donnée ponctuelle est issue de la base « Sigmines ».

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 la qualification du 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.

Les sites miniers recensés dans « Sigmines » 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	Faible	Moyen	Fort
Commune avec carte d'aléa	0	1	5	7
Données ponctuelles (Sigmines)	0	3	-	-

Tableau 6 : Caractérisation du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières ».

### 5.9.3. Données utilisées et traitement

#### a) Cartes d'aléas

Selon la méthodologie du guide de 2015, les données surfaciques sont issues des données fournies par les différentes DDTM de la région Bretagne et les cartes réalisées par GEODERIS fournies par la DREAL le 1<sup>er</sup> juin 2023. Trois catégories de phénomènes ont été classées en trois niveaux d'aléas :

- 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 500 m x 500 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 3 mars 2023.

Selon le guide de 2015, autour de chaque site minier, un tampon de 5 km doit être appliqué afin de maximiser le rayon d'influence, en l'absence d'une cartographie d'extension de la mine. L'addendum de 2022 permet d'adapter ce tampon en fonction du type d'exploitation minière en présence sur le territoire. En région Bretagne, les exploitations répertoriées sont essentiellement métallifères : fer, uranium, plomb, étain, zinc, or... Ce type d'exploitation est d'extension modeste. Après discussion avec la DREAL, il a été décidé de réduire ce tampon à 3 km autour des sites miniers.

Quatre-vingt-quinze sites ont été répertoriés. Les sites proches des zones d'aléa minier et dont le centroïde est à moins de 3 km ont été supprimés. Soixante-quatorze points « Sigmine » ont été conservés.

Chaque tampon a été découpé par la grille de 500 m x 500 m. La valeur attribuée de ces zones est 3.

5.9.4. Résultats

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.

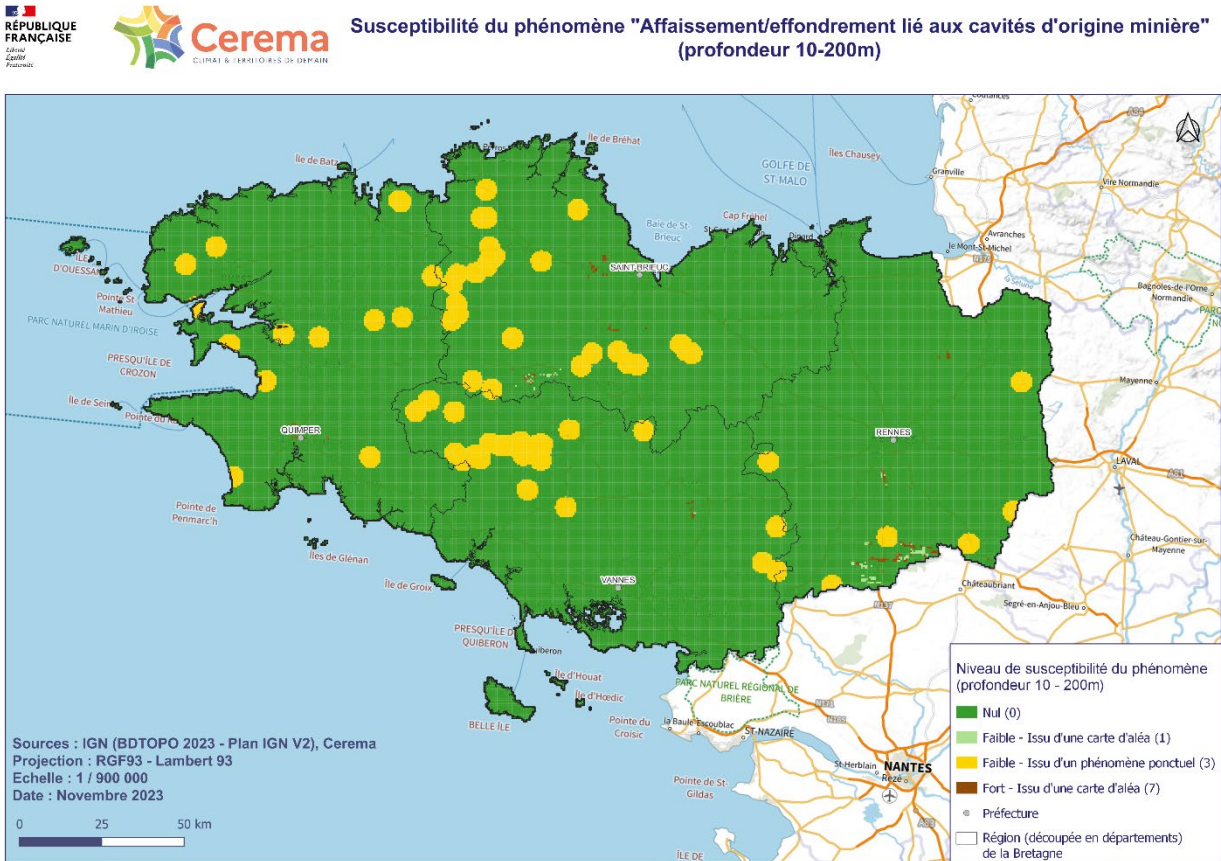


Figure 24 : Carte de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs.

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

Cavités minières	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (500mx500m)	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]
10 – 200 m	Fort (7)	213	53,25	0,19
	Faible (3)	7473	1868,25	6,65
	Faible (1)	110	27,5	0,1
	Nul (0)	104655	26163,75	93,07

Tableau 7 : Répartition des différents niveaux de susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières ».

## 5.10. LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

### 5.10.1. Description du phénomène

Le phénomène mouvement de terrain correspond aux glissements 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 un 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.

### 5.10.2. Qualification des aléas

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 » du BRGM. 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 : les zones cartographiées en aléa « fort », noté 7 ;
- niveau moyen : les zones cartographiées en aléa « moyen », noté 5 ;
- niveau faible : les zones cartographiées en aléa « faible », noté 1 ;
- niveau nul : 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 événements par maille traitée. Le recensement des événements 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 : plus de 8 glissements recensés (pixel 500 m × 500 m), noté 3 ;
- susceptibilité moyenne : entre 5 et 8 glissements recensés (pixel 500 m × 500 m), noté 2 ;
- susceptibilité faible : entre 1 et 4 glissements recensés (pixel 500 m × 500 m), noté 1 ;
- susceptibilité nulle : pas de mouvement de terrain recensé (pixel 500 m × 500 m), noté 0.

Les pondérations attribuées au phénomène « Mouvement de terrain » sont définies selon l'origine de la donnée sont récapitulées dans le tableau suivant :

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

Tableau 8 : Caractérisation du phénomène « Mouvement de terrain ».

### 5.10.3. Données utilisées et traitement

#### a) Cartes d'aléa

Selon la méthodologie du guide de 2015, les données surfaciques sont issues des Plans de Prévention des Risques naturels mouvement de terrains, des PPR miniers et de cartes d'aléas diverses. Les données ont été extraites à partir des fichiers numériques fournis par les différentes DDTM consultées le 11 janvier 2023 et du site Géorisques consulté le 13 janvier 2023 pour le département 22 et le 23 janvier 2023 pour les départements 29, 35, 56. Seuls les glissements de terrain et les coulées boueuses ont été extraits.

Une fois collectée, les données surfaciques sont projetées sur la grille 500mx500m. Chaque maille de la grille intersectée par un aléa, obtient la note de l'aléa correspondant. La note la plus défavorable est conservée.

#### b) BDMVT

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 3 mars 2023.

Chaque évènement recensé fait l'objet d'une précision sur leur 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 du point :

Précision	métrique	décamétrique	hectométrique	kilométrique	centre commune
Tampon (m)	101	110	200	1100	supprimé

Tableau 9 : Valeurs des tampons attribués aux évènements ponctuels « Mouvement de terrain ».

### 5.10.4. Résultats

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

Les glissements de terrain sont représentés dans la région Bretagne avec 906 évènements recensés dont la majorité se situe le long des côtes. Seule une cinquantaine d'évènements est localisée dans les terres. La majorité des glissements surfaciques présente un aléa faible et de petites superficies dispersées dans les départements du Finistère et des Côtes d'Armor. En Ille-et-Vilaine, les glissements de terrain sont essentiellement liés aux exploitations minières. La surface totale concernée par les glissements surfaciques est de 2,6 km<sup>2</sup>, en région Bretagne.

Susceptibilité du phénomène "Mouvement de terrain de type glissement"  
(profondeur 10-200m)

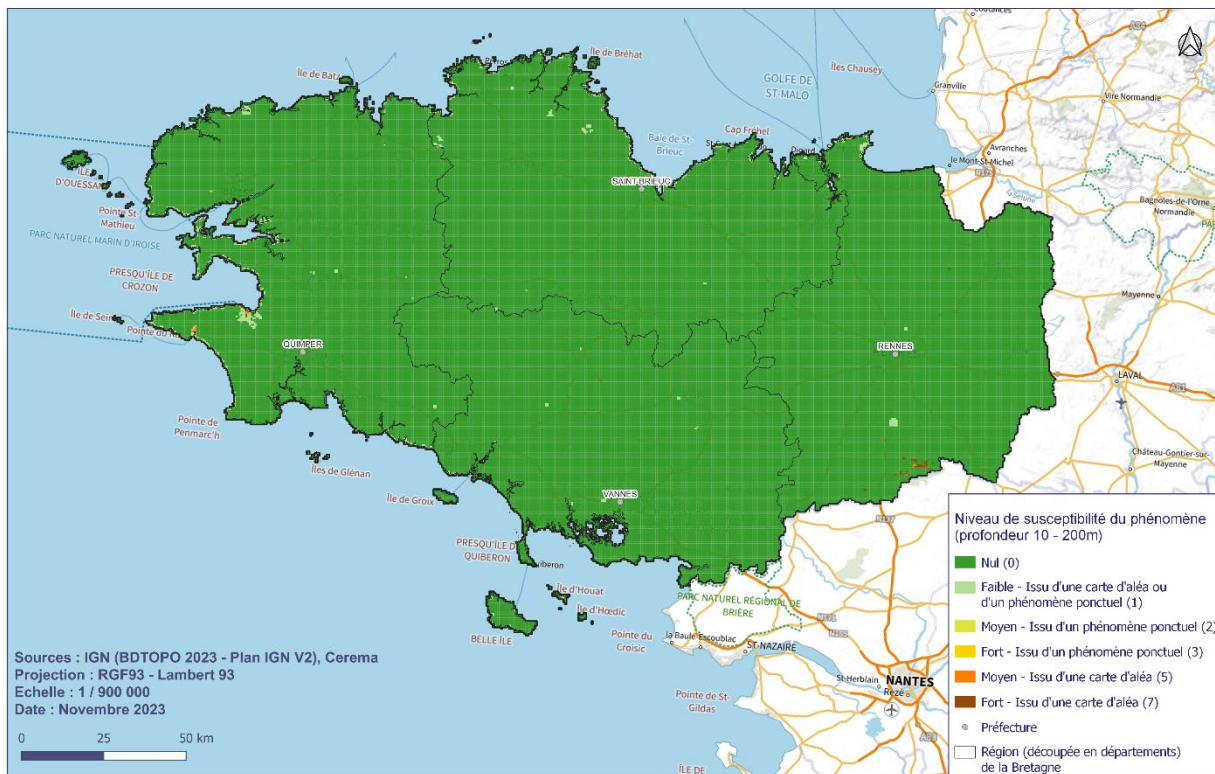


Figure 25 : Carte de susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain » en région Bretagne – identique pour les 3 profondeurs.

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

Glissements	Niveau de susceptibilité	Nb mailles (500mx5000m)	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]
10 – 200 m	Fort (7)	51	12,75	0,05
	Moyen (5)	26	6,5	0,02
	Fort	8	2	0,01
	Moyen (3)	51	12,75	0,05
	Faible (1)	1012	253	0,9
	Nul (0)	111303	27825,75	98,98

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



## 6. Cartographie finale

### 6.1. CARTE RÉGLEMENTAIRE DES RISQUES GÉOLOGIQUES DE LA GMI EN SYSTÈME FERMÉ

#### 6.1.1. Rappel de la carte nationale

Un extrait de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur fermé » et pour la tranche 10-200 m pour le territoire breton est présenté sur la Figure 26. Cette carte montre quelques secteurs de très faible superficie identifiés comme des zones orange, c'est-à-dire nécessitant une déclaration de l'installation et l'attestation d'un expert agréé. Ces secteurs représentent 0,05 % du territoire et concerne 0,2 % de la population.

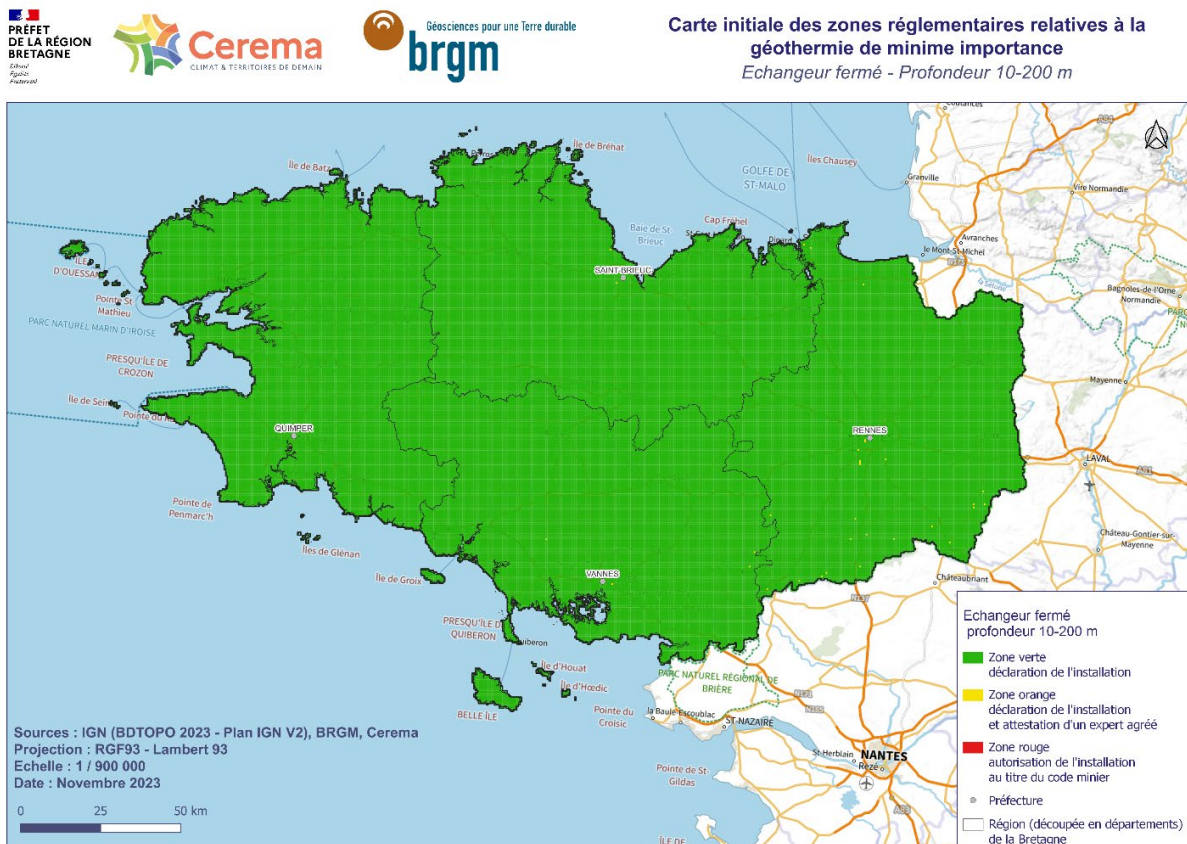


Figure 26 : Extrait, pour la Bretagne, de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur fermé » et pour la tranche 10-200 m.

#### 6.1.2. Cartes régionales pour la Bretagne

Les cartes obtenues pour les tranches de profondeur 10-50, 10-100 et 10-200 sont respectivement présentées sur la Figure 27, la Figure 28 et la Figure 29. Les trois cartes sont identiques. Les zones cartographiées en orange sont plus importantes en superficie et en nombres que celles présentes sur la carte réglementaire nationale. Elles représentent 1,3 % de la superficie du territoire et concernent 3,6 % de la population. De plus, quelques zones cartographiées en rouge, c'est-à-dire où l'ouvrage nécessite une autorisation au titre du code minier, peuvent être identifiées. Elles représentent 0,02 % du territoire et 0,1 % de la population.

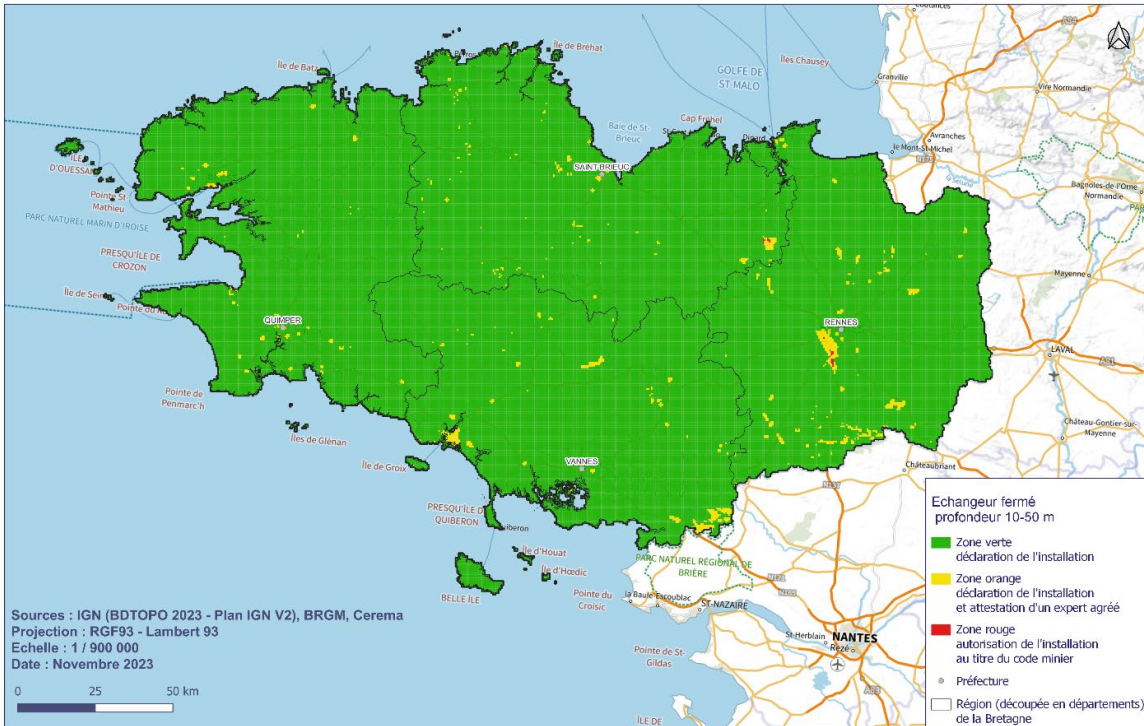


Figure 27 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d'ouvrage de 50 m.

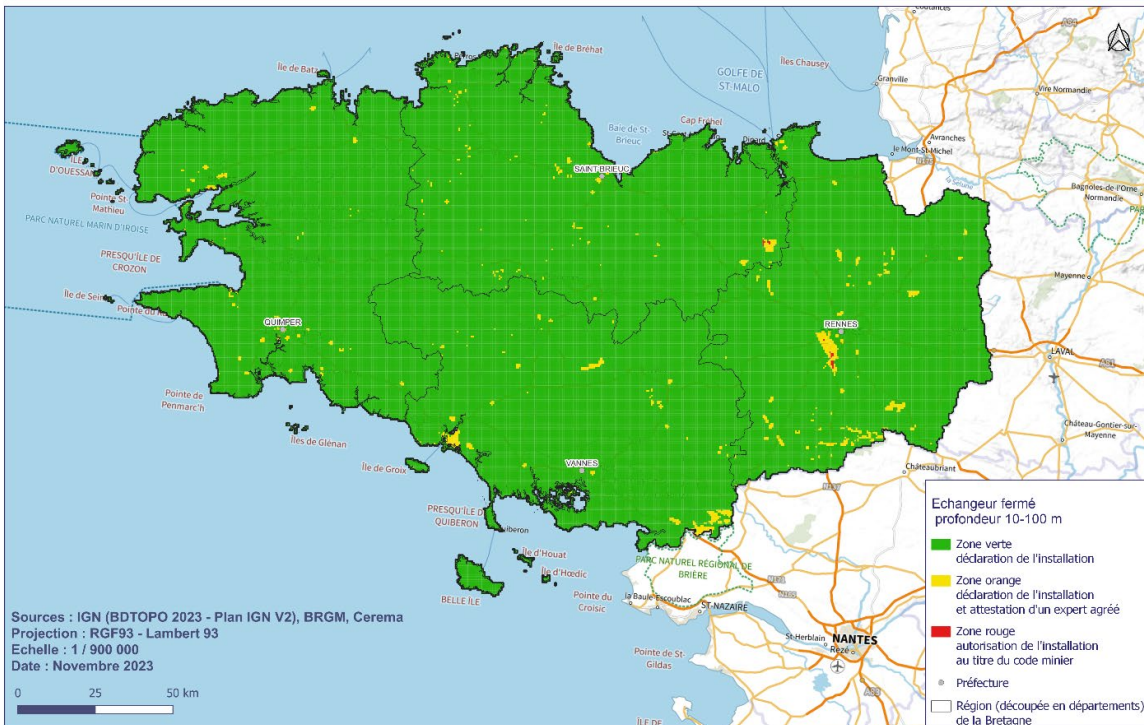


Figure 28 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d'ouvrage de 100 m.

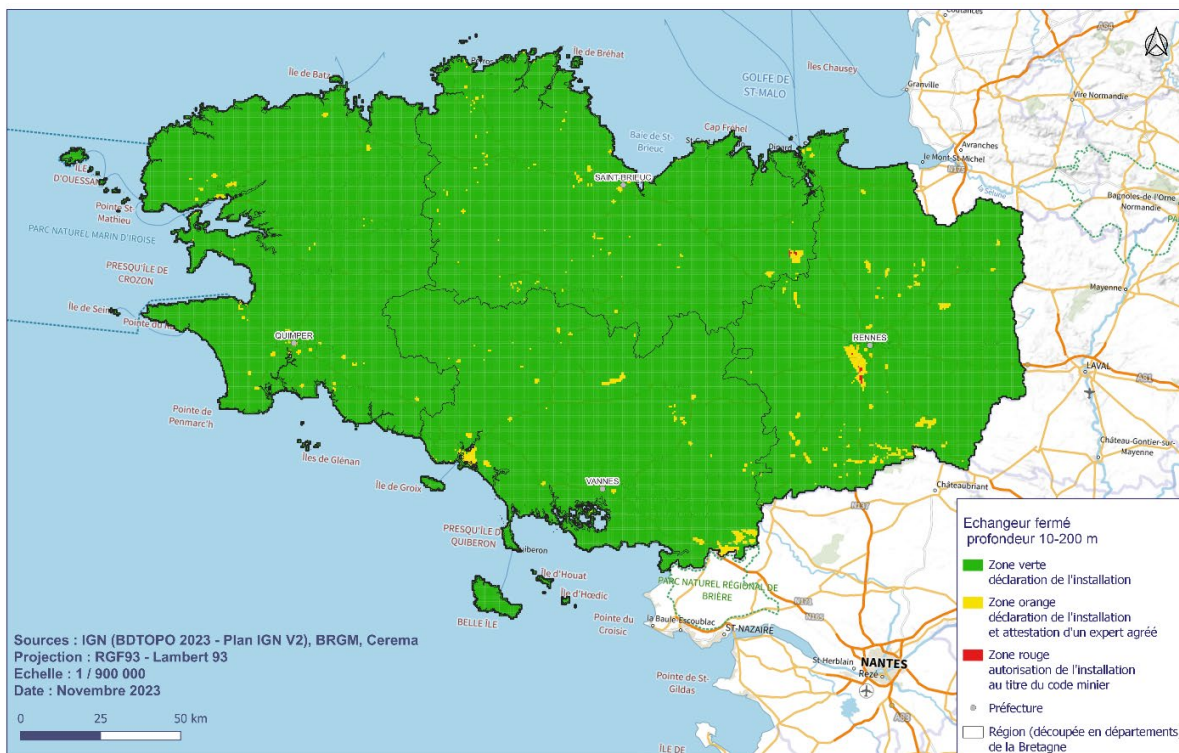


Figure 29 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les systèmes fermés (technologie de type « SGV ») et pour une profondeur d'ouvrage de 200 m.

## 6.2. CARTE REGLEMENTAIRE DES RISQUES GEOLOGIQUES DE LA GMI EN SYSTEME OUVERT

### 6.2.1. Rappel de la carte nationale

Un extrait de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur ouvert » et pour la tranche 10-200 m pour le territoire breton est présenté sur la Figure 30. Cette carte montre quelques secteurs de très faible superficie identifiés comme des zones orange, c'est-à-dire nécessitant une déclaration de l'installation et l'attestation d'un expert agréé. Ces secteurs représentent 0,03 % du territoire et concernent 0,2% de la population.

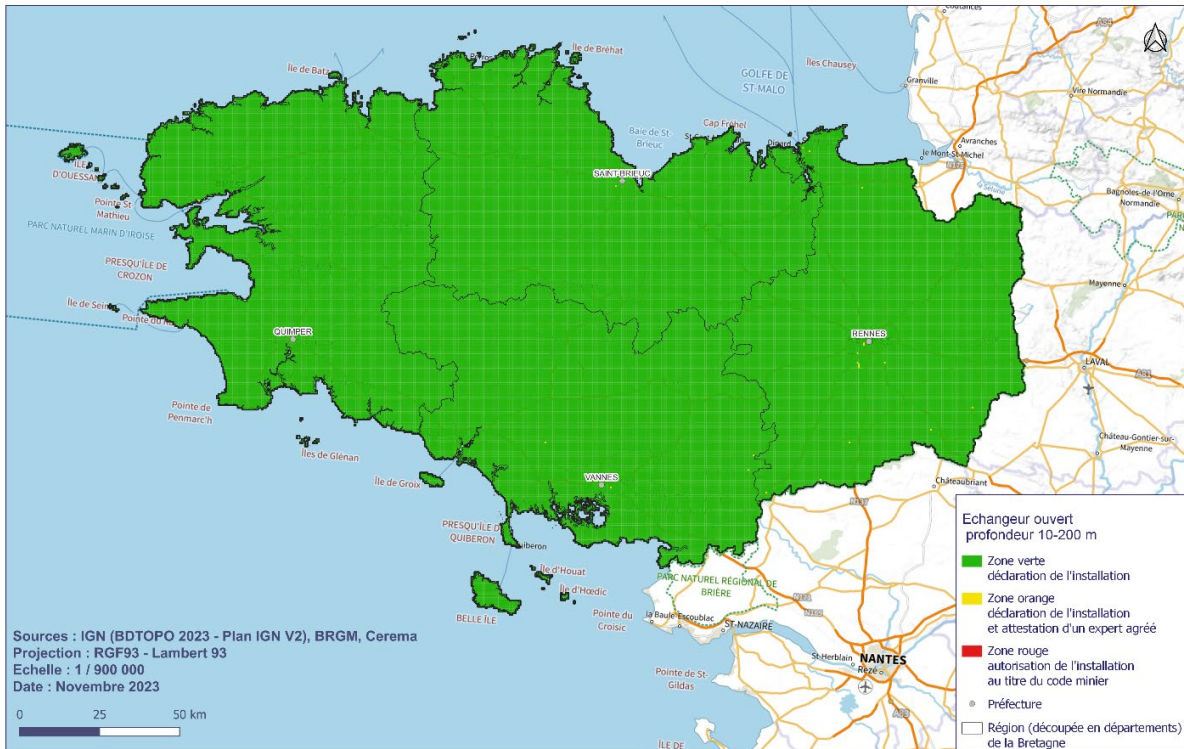


Figure 30 : Extrait, pour la Bretagne, de la carte réglementaire nationale relative à la géothermie de minime importance pour une technologie de type « échangeur ouvert » et pour la tranche 10-200 m.

### 6.2.2. Cartes régionales pour la Bretagne

Les cartes obtenues pour les tranches de profondeur 10-50, 10-100 et 10-200 sont respectivement présentées sur la Figure 31, la Figure 32 et la Figure 33. Ces cartes diffèrent significativement de la carte réglementaire nationale pour la Bretagne : d'une part à l'intérieur des terres, comme c'est le cas pour les cartes concernant la technologie de type SGV (systèmes fermés), mais aussi, et surtout, le long du littoral, montrant ainsi l'influence de l'aléa biseau salé. Concernant la tranche de profondeur 0-50 m, la superficie des zones cartographiées en orange représente 12,9 % du territoire. Celle des zones représentées en rouge ne représente que 0,02 %. Dans le premier cas, cela impacte 27,6 % de la population tandis que dans le second cas, cela impacte 0,2 % de la population. Pour la tranche de profondeur de 10-100 m, les zones cartographiées en orange représentent 15,3 % du territoire et impactent 33,4 % de la population. Les zones cartographiées en rouge sont équivalentes à celles de la tranche 10-50 m. Concernant la tranche 10-200 m, la superficie cumulée des zones cartographiées en orange augmente très légèrement et atteint 15,5 % du territoire, ce qui impacte environ 33,7 % de la population. Ceci étant, les zones en orange ne constituent pas un frein au déploiement de la GMI.



**Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance**  
Echangeur ouvert - Profondeur 10-50 m

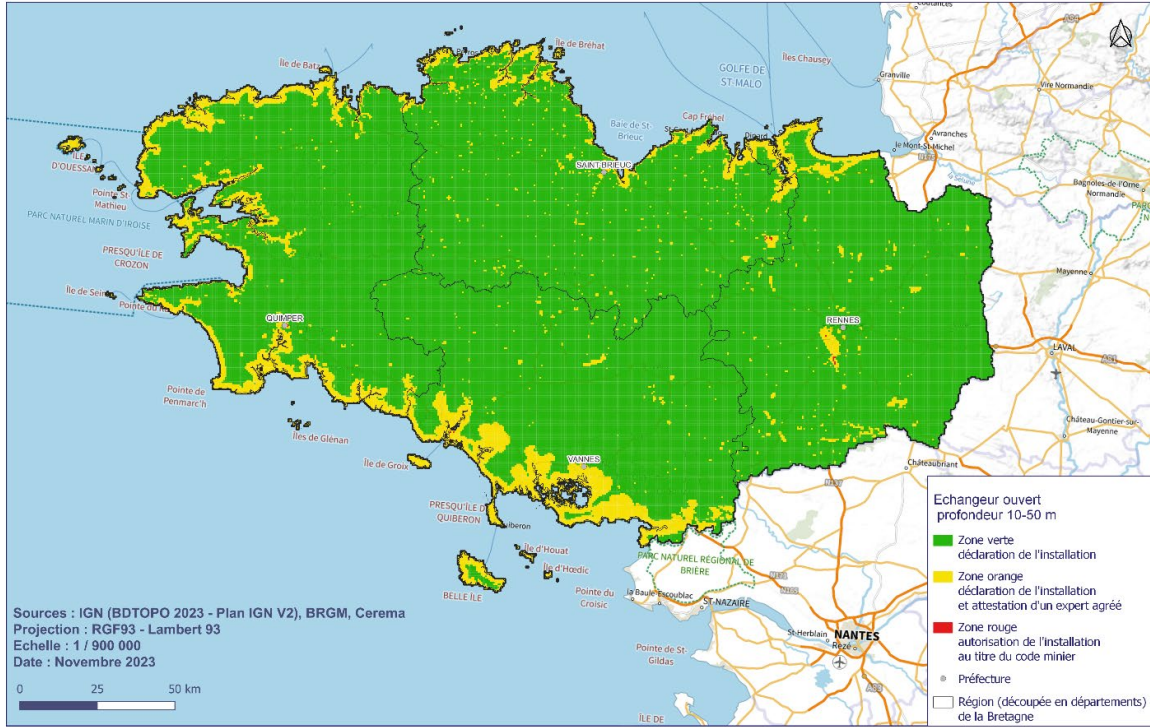


Figure 31 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d'ouvrage de 50 m.



**Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance**  
Echangeur ouvert - Profondeur 10-100 m

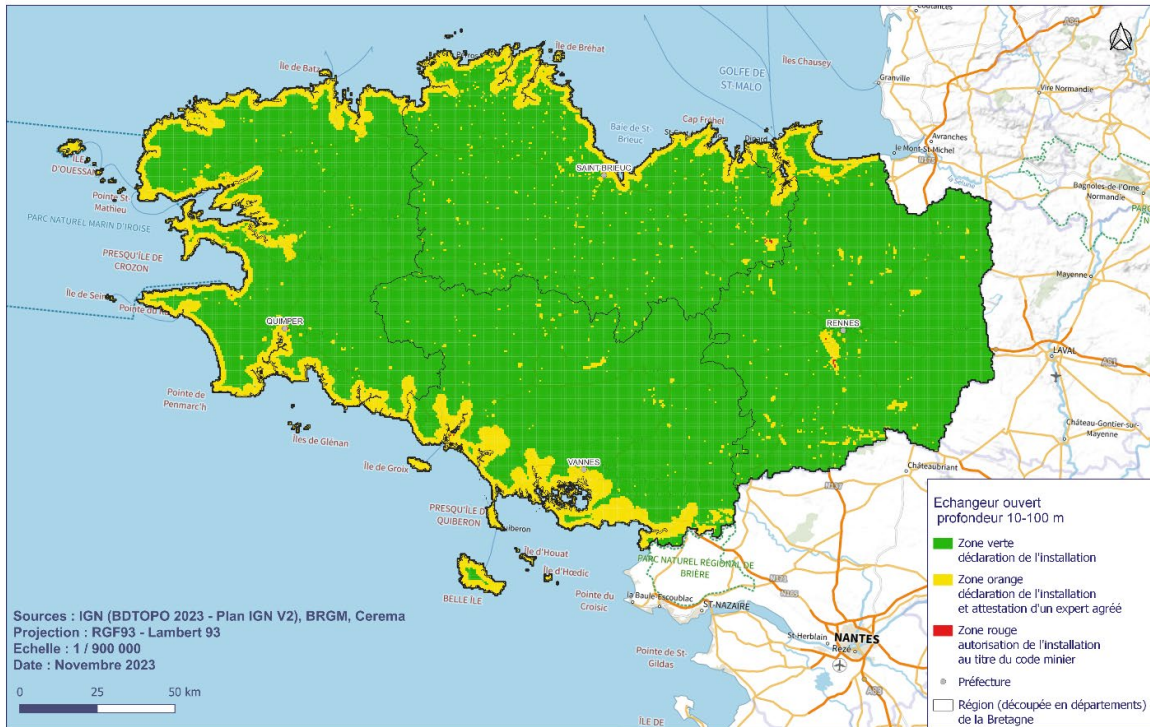


Figure 32 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d'ouvrage de 100 m.

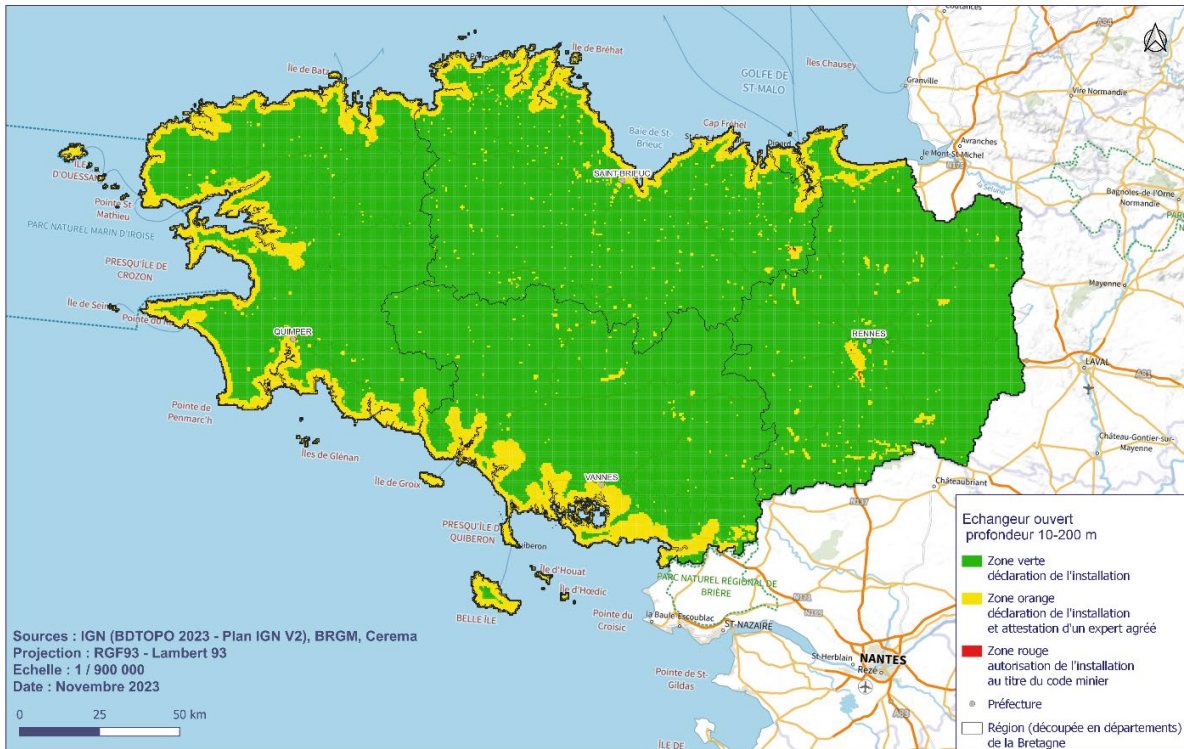


Figure 33 : Carte issue de cette étude relative à la géothermie de minime importance pour les échangeurs ouverts (technologie de type « doublets ») et pour une profondeur d'ouvrage de 200 m.

### 6.3. COMPARAISON AVEC LES REGIONS LIMITOPHES

La Figure 34 présente les six cartes nationales réalisées à partir de l'ensemble des trois phases du projet national. Dans l'ensemble, ces cartes montrent, tous systèmes confondus et tous niveaux de profondeur confondus, une bonne cohérence entre les régions de l'hexagone. Concernant la Bretagne et ses régions limitrophes (i.e., Pays de la Loire et Normandie), les résultats obtenus entre la phase 2 (Pays de la Loire et Normandie) et la phase 3 (Bretagne) du projet national montrent une très bonne cohérence pour les systèmes fermés (Figure 34 a, b et c). Concernant les systèmes ouverts, la cohérence est très bonne avec la Normandie et une légère différence existe avec la région Pays de la Loire. Cette différence résulte principalement de l'intégration d'une étude plus aboutie concernant le biseau salé en Bretagne (cf. section 5.3).

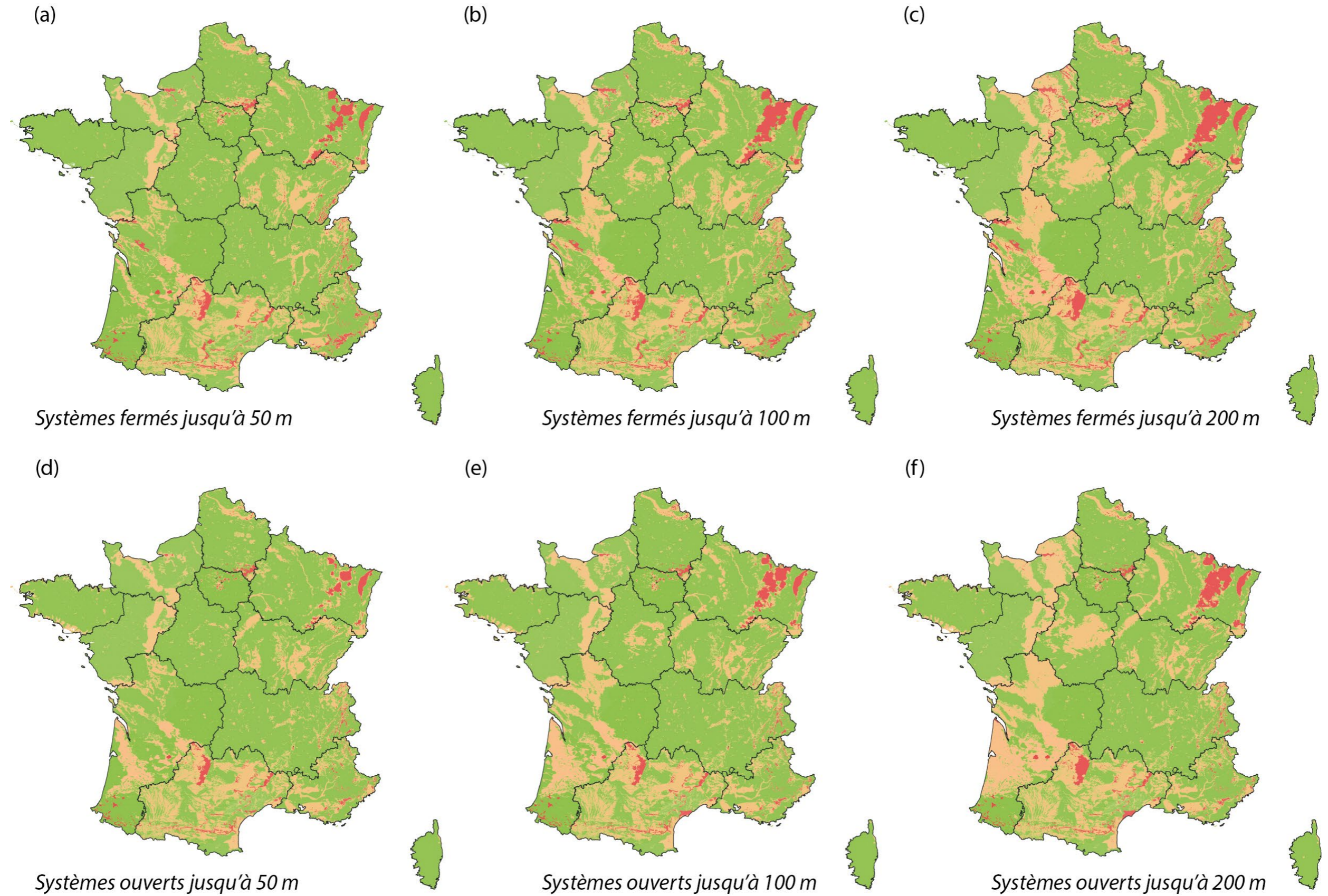


Figure 34 : Cartes finales compilées sur la base de l'ensemble des travaux réalisés au cours des 3 phases du projet national.



## 7. Bilan

Ce projet de cartographie de différents aléas vis-à-vis de l'installation d'ouvrages de géothermie minime importance (GMI) constituait la 3<sup>e</sup> phase d'un projet d'envergure nationale. Au niveau du littoral breton, ce projet a permis de fortement préciser la carte réglementaire déjà produite à l'échelle nationale et couvrant ce territoire. Cette amélioration résulte principalement de l'intégration du phénomène « biseau salé » qui n'avait pas été pris en compte dans le cadre de la cartographie nationale. L'intégration de cet aléa a permis, pour les systèmes ouverts, de proposer une classification orange pour une partie du territoire ; classification qui n'existait quasiment pas sur la partie bretonne de la carte nationale. La superficie couverte par cette classification est variable en fonction de la profondeur envisagée de l'ouvrage. À l'intérieur des terres, l'intégration sur la base de jeux de données plus complets et plus fins, des différents phénomènes, a aussi permis de classer un certain nombre de secteurs du territoire en orange et un nombre très limité de secteurs en rouge, ce qui constitue, là aussi, une amélioration majeure de la carte nationale. Les secteurs classés en orange couvrent au maximum (i.e., pour un système ouvert et pour une profondeur de 200 m) 15,5 % du territoire, mais impactent 33,7 % de la population, ce qui paraît significatif. Les secteurs cartographiés en rouge se limitent à 0,02 % du territoire et concernent jusqu'à 0,2 % de la population. L'ensemble de ces résultats suggèrent, au moins en zone côtière, de privilégier les systèmes fermés afin de minimiser au maximum le risque lié à l'installation d'ouvrages de GMI.



## 8. Bibliographie

- Boisson, A., Lucassou, F., avec la collaboration de Schroetter, J.-M. et Mougin, B.** (2021) - Identification et caractérisation des aquifères tertiaires et quaternaires stratégiques de Bretagne (projet ICARE). Rapport final BRGM/RP-70336-FR, 76 p., 43 ill., 2 ann., 1 volume séparé.
- Mougin B., Allier D., Blanchin R., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E., collaboration Jegou J.-P., Lachassagne P., Stollsteiner P. et Wyns R.** (2008) - SILURES Bretagne – Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR - 129 p., 37 ill., 7 ann. 2 planches.
- Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J.** (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bulletin de la Société Géologique de France, t.175, n°1, pp.21-34.
- Chantraine, J., Rabu, D., et Béchenec, F.** (2003) - 1/250 000 geological map of the Armorican Massif : explicative notice, 107 p.
- Lucassou, F., Schroetter, J.-M., Baptiste, J., et Coppo, N.** (2019) - Sensibilité des aquifères bretons côtiers aux intrusions salines. Rapport final BRGM-RP69012-FR. 227 p., 105 ill. 9 ann.
- Ollivier-Pierre, M.-F., Maupin, C., Estcoule-choux, J., et Sittler, C.** (1993) - Transgression et paleoenvironnement Bretagne ( France ). Skdimentologie , micropalkontologie , palynologie et palynofacib du Rupklien du Bassin de Rennes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 103, 223-250.
- Schroetter, J.-M., Boisson, A., Lucassou, F., Bader, A.-G., Beccaletto, L., Ouergui, Y., et Tourlière, B.** (2020) - ANAFORE : ANALyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagnE - Rapport final BRGM/RP-70280-FR, 156 p., 105 ill., 2 ann.







**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

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

**Direction régionale Bretagne**

Atalante Beaulieu  
2 rue de Jouanet  
35700 Rennes  
Tél. : 02 99 84 26 70

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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**