



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

Document à accès immédiat

# Cartographie réglementaire de la Géothermie de Minime Importance en région Normandie

Rapport final

BRGM/RP-72225-FR

4 mai 2023

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

AP21DAT002

Jallais N. (BRGM), Rajon G. (CEREMA), Coudray N. (CEREMA), Flahaut R. (CEREMA)

Vérificateur :		Approbateur :	
Nom :	Pierre Durst	Nom :	Manuel Parizot
Fonction :	Référent thématique	Fonction :	Directeur Parizot
Date :	24/10/2022	Date :	24/11/2022
Signature :		Signature :	

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

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

## Avertissement

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

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

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

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

## Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Cartes d'aléa, Doublet sur nappe, Géothermie minime importance, Normandie, Sonde géothermique verticale, Zones réglementaires

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

**Jallais N. (BRGM), Rajon G. (CEREMA), Coudray N. (CEREMA), Flahaut R. (CEREMA) (2023)** – Cartographie réglementaire de la Géothermie de Minime Importance en région Normandie. Rapport final. BRGM/RP-72225-FR, 103 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-20/01/2022



## Synthèse

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

La filière géothermie doit actuellement répondre à deux grands enjeux :

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

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

La carte nationale tient compte d'un ensemble de 8 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Elle a été réalisée pour une seule gamme de profondeur (10 - 200 m) et avec un maillage 500×500 m. Elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones dites « **rouges** » dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance. Pas de procédure simplifiée, un dossier d'autorisation doit être déposé ;
- les zones dites « **orange** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles est 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. La déclaration du projet est réalisée via un téléservice avec attestation de compatibilité d'un projet de GMI établie par un expert agréé ;
- les zones dites « **vertes** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves. La déclaration du projet est réalisée via un téléservice.

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

L'arrêté du 25 juin 2015, relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser régionalement la carte nationale pour apporter plus de 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 d'avoir une carte régionale plus précise sur la Normandie, la DGPR, 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 de Normandie.

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

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

Pour la majorité des phénomènes, les niveaux d'aléa ou de susceptibilité définis par le guide méthodologique ont été employés. Seuls les phénomènes « Pollution des sols et/ou des nappes souterraines » et « Artésianisme » ont fait l'objet d'une modification de leur niveau d'aléa afin de mieux correspondre aux spécificités normandes.

Au total, six cartes proposant un nouveau zonage réglementaire ont été réalisées avec un maillage 250\*250 mètres. Elles correspondent à deux technologies : les doublets sur aquifère (échangeur ouvert) et les sondes géothermiques verticales (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur : 10-50 m, 10-100 m, 10-200 m.

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

## Sommaire

1.	Réglementation applicable à la géothermie de minime importance .....	13
1.1	Principes de la géothermie de minime importance (GMI).....	13
1.2	Réglementation de la géothermie de minime importance.....	14
2.	Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire.....	17
2.1	Paramètres de la cartographie régionale.....	17
2.2	Méthode utilisée .....	18
2.3	Grille des cartes réglementaires.....	21
3.	Cartographie des phénomènes redoutés.....	23
3.1	Phénomène « Affaissement / Surrection liés aux niveaux d'évaporites et à la présence d'eau » 23	
3.1.1	Description du phénomène.....	23
3.1.2	Qualification du phénomène.....	23
3.1.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	24
3.1.4	Cartographie du phénomène .....	24
3.1.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	28
3.2	Phénomène « Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) » .....	29
3.2.1	Description du phénomène.....	29
3.2.2	Qualification du phénomène.....	29
3.2.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	30
3.2.4	Cartographie du phénomène redouté .....	31
3.2.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	35
3.3	Phénomène « Affaissement / effondrement liés aux cavités minières » .....	36
3.3.1	Description du phénomène.....	36
3.3.2	Qualification du phénomène.....	36
3.3.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	36
3.3.4	Cartographie du phénomène redouté .....	37
3.3.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	41
3.4	Phénomène « Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) ».....	42
3.4.1	Description du phénomène.....	42
3.4.2	Qualification du phénomène.....	42
3.4.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	43
3.4.4	Cartographie du phénomène redouté .....	45

3.4.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	49
3.5	Phénomène « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » .....	50
3.5.1	Description du phénomène.....	50
3.5.2	Qualification du phénomène.....	50
3.5.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	51
3.5.4	Cartographie du phénomène redouté .....	52
3.5.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	56
3.6	Phénomène « Artésianisme » .....	57
3.6.1	Description du phénomène.....	57
3.6.2	Qualification du phénomène.....	57
3.6.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	58
3.6.4	Cartographie du phénomène redouté .....	60
3.6.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	64
3.7	Phénomène « Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères »....	65
3.7.1	Description du phénomène.....	65
3.7.2	Qualification du phénomène.....	65
3.7.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	65
3.7.4	Cartographie du phénomène redouté .....	67
3.7.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	71
3.8	Phénomène « Inondation par remontée de nappe » .....	72
3.8.1	Description du phénomène.....	72
3.8.2	Qualification du phénomène.....	72
3.8.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	72
3.8.4	Cartographie du phénomène redouté .....	73
3.8.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	75
3.9	Phénomène « Biseau salé ».....	76
3.9.1	Description du phénomène.....	76
3.9.2	Qualification du phénomène.....	76
3.9.3	Données utilisées et méthodologie employée.....	77
3.9.4	Cartographie du phénomène redouté .....	79
3.9.5	Cotation des niveaux d'aléa .....	83
4.	Cartes réglementaires .....	85
5.	Conclusion .....	99
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	101

## Liste des figures

Illustration 1 : Principes d'un doublet sur nappe ou échangeur géothermique ouvert (MEDDE, 2015).....	13
Illustration 2 : Principes d'une Sonde Géothermique Verticale (SGV) ou échangeur géothermique fermé (MEDDE, 2015).....	14
Illustration 3 : Différence entre la cartographie nationale et régionale.....	17
Illustration 4 : Etapes de la détermination des zones des cartes réglementaires de la GMI .....	20
Illustration 5 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	25
Illustration 6 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	26
Illustration 7 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	27
Illustration 8 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres.....	32
Illustration 9 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres.....	33
Illustration 10 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres.....	34
Illustration 11 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres.....	38
Illustration 12 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres.....	39
Illustration 13 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres.....	40
Illustration 14 : Exemple d'aléa "glissement de terrain" en présence d'un PPR MVT - PPR MVT Granville et Donville-les-Bains (50).....	44
Illustration 15 : Exemple d'aléa "glissement de terrain" en l'absence d'un PPR MVT – aux environs de Pont-L'Evêque (14).....	45
Illustration 16 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres .....	46
Illustration 17 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	47
Illustration 18 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	48
Illustration 19 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	53
Illustration 20 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	54

Illustration 21 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	55
Illustration 22 : Données utilisées et couches BDLISA associées aux nappes identifiées comme potentiellement captives .....	59
Illustration 23 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	61
Illustration 24 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	62
Illustration 25 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	63
Illustration 26 : Couches BDLISA et données utilisées pour caractériser les nappes normandes .....	66
Illustration 27 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	68
Illustration 28 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	69
Illustration 29 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	70
Illustration 30 : Carte d'aléa du phénomène "Inondation par remontée de nappe" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	74
Illustration 31 : Formule de calcul de la vulnérabilité des aquifères côtiers (Laurent et al., 2017) .....	77
Illustration 32 : Paramètres utilisés pour le calcul de la vulnérabilité des aquifères côtiers (Laurent et al., 2017) .....	77
Illustration 33 : Système estuarien de la Seine, limite de l'intrusion saline (Dubrulle-Brunaud, 2007) .....	78
Illustration 34 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	80
Illustration 35 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	81
Illustration 36 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	82
Illustration 37 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	87
Illustration 38 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	89
Illustration 39 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 200 mètres .....	91
Illustration 40 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales (SGV) de la gamme de profondeur 10 - 50 mètres .....	93
Illustration 41 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales (SGV) de la gamme de profondeur 10 - 100 mètres .....	95

Illustration 42 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales de la gamme de profondeur 10 - 200 mètres ..... 97

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / surrection lié aux niveaux évaporitiques et à la présence d'eau" .....	28
Tableau 2 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines)" .....	35
Tableau 3 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / effondrement liés aux cavités minières" .....	41
Tableau 4 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Mouvements de terrain (ou glissements de terrain)" .....	49
Tableau 5 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " .....	56
Tableau 6 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Artésianisme " .....	64
Tableau 7 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères " .....	71
Tableau 8 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Inondation par remontée de nappe " .....	75
Tableau 9 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Biseau salé " .....	83

## 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 Ecologique (MTE), notamment dans le cadre des actions de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Afin de favoriser le recours à la géothermie, de tenir compte des évolutions technologiques et de mieux prendre en compte l'incidence des installations sur l'environnement, la réglementation relative à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

La filière géothermie doit actuellement répondre à deux grands enjeux :

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

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

La carte nationale tient compte d'un ensemble de 8 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Conformément à la classification prévue à l'article 22-6 du décret 2006-649, elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones dites « **rouges** » dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance ;
- les zones dites « **orange** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance ne sont pas réputées présenter des dangers et inconvénients graves, mais dans lesquelles est 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 dites « **vertes** » dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves.

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

L'arrêté du 25 juin 2015, relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser régionalement la carte nationale pour apporter plus de 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.

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale plus précise sur la Normandie, la DGPR, 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 de Normandie.

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

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

Les conséquences considérées peuvent être d'ordre :

- géologique causant, notamment en surface, des désordres ayant des conséquences sur les 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.

# 1. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance

## 1.1 PRINCIPES DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI)

L'objectif de la géothermie de minime importance, aussi appelée géothermie de très basse température, est d'échanger, via une pompe à chaleur, de l'énergie avec le sous-sol ou une nappe d'eau souterraine afin de la restituer à un bâtiment.

La géothermie de minime importance est réglementée, au même titre que les autres types de géothermie (haute température, basse température et de surface), par le code minier. Ses critères sont définis dans le paragraphe II de l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié et ses conditions de mise en œuvre sont précisées dans le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

Il existe 2 types de technologies qualifiées de Minime Importance :

- Les doublets géothermiques ou doublets sur nappe ou échangeurs géothermiques ouverts

Le principe de cette technologie est de faire circuler à travers une pompe à chaleur de l'eau prélevée au sein d'une nappe d'eau souterraine via un puits de prélèvement puis de la réinjecter dans la nappe via un autre puits, un puits de réinjection (Illustration 1).

Cette technologie induit localement une variation thermique de la nappe.

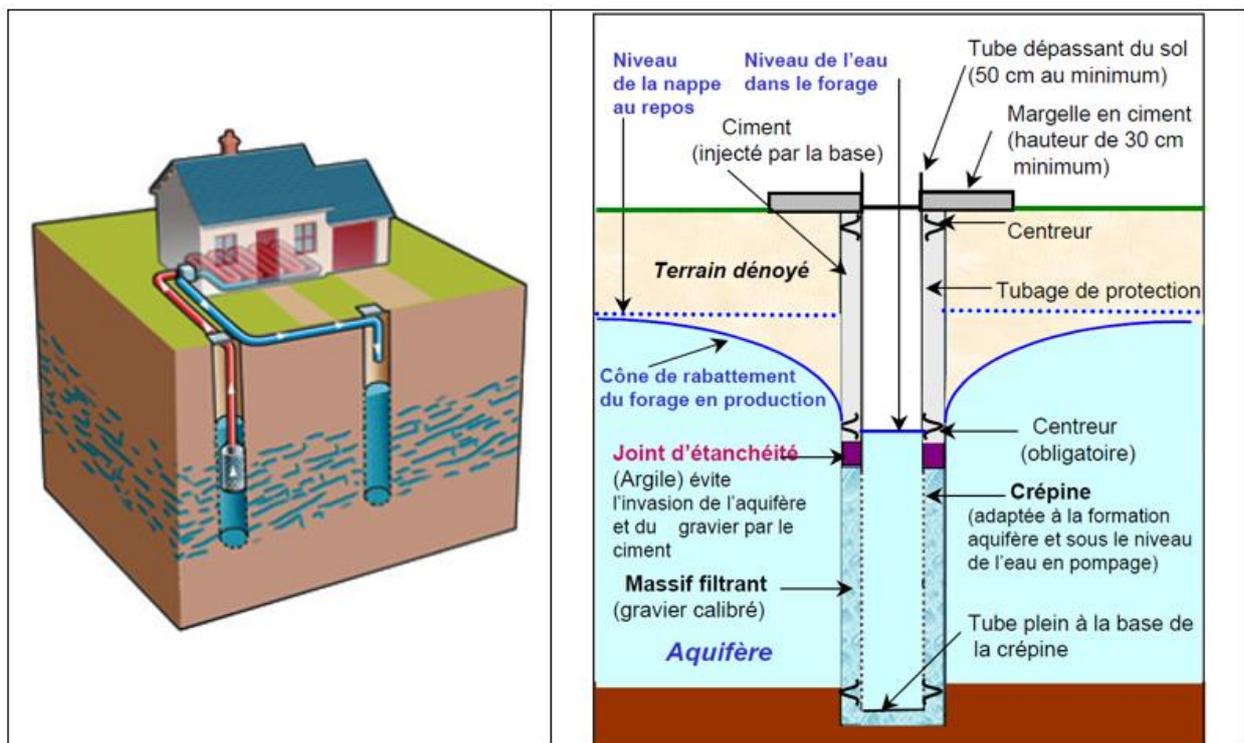


Illustration 1 : Principes d'un doublet sur nappe ou échangeur géothermique ouvert (MEDDE, 2015)

Les critères définis dans le code minier pour cette technologie sont les suivants :

- La profondeur du forage doit être comprise entre 10 et 200 mètres ;
- La puissance thermique maximale prélevée dans le sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation doit être inférieure à 500 kW ;
- La température de l'eau prélevée en sortie des puits de prélèvement doit être inférieure à 25 °C ;
- Les eaux prélevées doivent être réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes prélevés et réinjectés doit être nulle.

○ Les Sondes Géothermiques Verticales (SGV) ou échangeurs géothermiques fermés

Le principe de cette technologie est d'échanger la chaleur du sol par conduction thermique le long d'un forage. Cet échange s'effectue au niveau du système géothermique qui est constitué d'un fluide caloporteur de composition variable, de tuyauteries disposées dans le forage et permettant la circulation du fluide et d'un coulis spécifique situé dans l'espace annulaire pour le combler (Illustration 2).

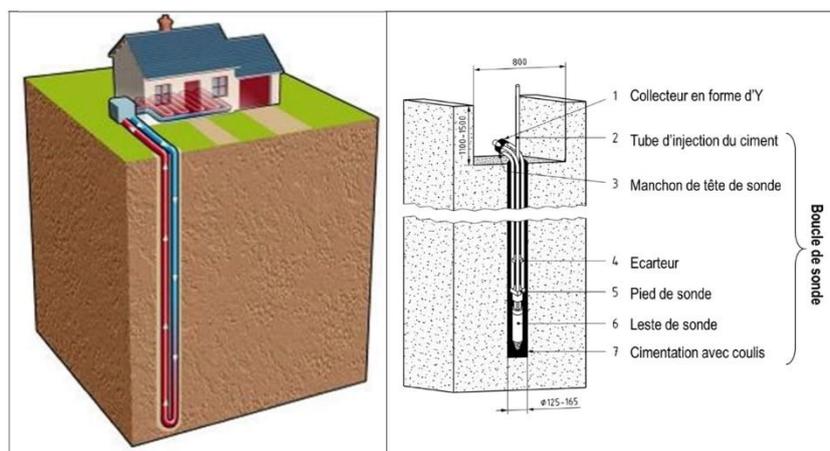


Illustration 2 : Principes d'une Sonde Géothermique Verticale (SGV) ou échangeur géothermique fermé (MEDDE, 2015)

Les critères définis dans le code minier pour cette technologie sont les suivants :

- La profondeur du forage doit être comprise entre 10 et 200 mètres ;
- La puissance thermique maximale prélevée dans le sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation doit être inférieure à 500 kW.

## 1.2 REGLEMENTATION DE LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE

Comme vu précédemment, la géothermie de minime importance est règlementée par le code minier. La cartographie des zones réglementaires relatives à la GMI a pour objectif de préciser

les secteurs où les activités de géothermie de minime importance sont réputées présenter ou non des dangers ou des inconvénients graves et ainsi préciser la procédure de mise en place d'un projet de GMI.

Les 3 zones relatives à la carte règlementaire GMI défini par le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 modifiant le Décret n°2006-649 du 2 juin 2006 – article 22-6 sont :

- Zones « **vertes** » : les activités de GMI sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves. Téléservice ;
- Zones « **orange** » : les activités de GMI ne sont pas réputées présenter de dangers et inconvénients graves. Téléservice avec attestation de compatibilité d'un projet de GMI établie par un expert agréé ;
- Zones « **rouges** » : les activités de GMI sont réputées présenter des dangers et ne peuvent pas bénéficier du régime GMI. Pas de procédure simplifiée, un dossier d'autorisation doit être déposé.

D'autres prescriptions et réglementations peuvent être localement présentes. Elles sont indépendantes de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance et doivent être prises en compte lors de la réalisation d'un forage de géothermie.

Ces prescriptions peuvent concerner :

- la protection des captages d'alimentation en eau potable ;
- la protection des eaux minérales ;
- un schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ;
- un schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) ;
- des périmètres de protection des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ;
- des servitudes d'utilité publique notamment celles prévues par l'article L.515-12 du code de l'environnement.

Cette liste n'est pas exhaustive et il appartient donc à l'exploitant et à tout sous-traitant de s'informer et de mettre en œuvre l'ensemble des réglementations spécifiques et applicables à la zone d'un projet de géothermie de minime importance.

Il est rappelé que les travaux de forages géothermiques mis en œuvre pour l'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance (GMI) doivent être réalisés par des entreprises qualifiées selon les conditions techniques prévues par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance.



## 2. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire

### 2.1 PARAMETRES DE LA CARTOGRAPHIE REGIONALE

La méthode utilisée pour élaborer les cartes réglementaires de la GMI au sein de la région Normandie est une adaptation régionale de la méthodologie initiale réalisée à l'échelle nationale. Cette méthode est décrite dans le « Guide d'élaboration de la carte des réglementaires relatives à la géothermie de minime importance » publié en juillet 2015 par le Ministère en charge de l'Ecologie (MEDDE, 2015).

Cette méthode est basée sur une analyse multicritère qui regroupe 9 phénomènes redoutés pour 3 gammes de profondeur : 10 - 50 mètres, 10 - 100 mètres et 10 - 200 mètres, et pour deux technologies : doublets sur nappe et sondes verticales géothermiques.

Les 9 phénomènes redoutés sont les suivants :

- Affaissement / surrection liés aux évaporites ;
- Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) ;
- Affaissement / effondrement liés aux cavités minières ;
- Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) ;
- Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
- Artésianisme ;
- Mise en communication d'aquifères ;
- Remontée de nappe ;
- Biseau salé.

Au final, 6 cartes réglementaires sont réalisées.

Les principales différences entre la cartographie nationale et régionale sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Carte nationale	Carte régionale
8 phénomènes pris en compte	9 phénomènes pris en compte Ajout du phénomène « Biseau salé »
1 seule gamme de profondeur : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 - 200 m</li> </ul>	3 gammes de profondeur : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 - 50 m</li> <li>• 10 - 100 m</li> <li>• 10 - 200 m</li> </ul>
Maille au 500 x 500 m	Maille au 250 x 250 m

*Illustration 3 : Différence entre la cartographie nationale et régionale*

## 2.2 METHODE UTILISEE

La méthode appliquée pour déterminer les zones de la cartographie réglementaire de la GMI se déroule en 3 grandes étapes (Illustration 4) :

- **Etape 1 : Détermination des niveaux d'aléa de chaque phénomène pour une gamme de profondeur donnée**

Cette étape consiste à caractériser chaque phénomène redouté par des niveaux d'aléa (nul, faible, moyen, fort, très fort) pour chaque gamme de profondeur. Une valeur est attribuée à chaque niveau d'aléa conformément au guide méthodologique (MEDDE, 2015).

Chaque phénomène étudié est représenté sur une carte (couche cartographique pour les différentes profondeurs) où sont figurés les différents niveaux d'aléas. Chaque carte est découpée (quadrillée) en mailles. Les mailles ont une taille de 250 par 250 mètres. La valeur attribuée à chaque maille correspond au niveau d'aléa représentant la plus importante superficie de la maille.

Le présent rapport précise pour chaque phénomène :

- Les caractéristiques du phénomène étudié ;
- Les données utilisées ainsi que leur origine et leur date d'extraction s'il s'agit de données issues de bases de données ;
- Les différents niveaux d'aléa utilisés ;
- La méthodologie et les traitements réalisés pour obtenir les différents niveaux d'aléa.

- **Etape 2 : Analyse multicritère**

Cette étape consiste à additionner les valeurs des mailles des grilles de chaque phénomène pour une gamme de profondeur donnée, après leur avoir appliqué un facteur aggravant défini en fonction de la technique d'exploitation géothermique employée (doublets sur nappe ou sondes géothermiques verticales). Les facteurs aggravant sont définis dans la méthodologie nationale.

Les formules utilisées pour chaque maille sont les suivantes :

- Valeur résultante pour les doublets sur nappe = (6 x « évaporites ») + (2 x « cavités non minières ») + (2 x « cavités minières ») + (2 x « Mvt terrain ») + (3 x « Basol ») + (2 x « artésianisme ») + (4 x « communication aquifère ») + (2 x « remontée de nappe ») + (4 x « biseau salé »)
- Valeur résultante pour les sondes géothermiques verticales = (10 x « évaporites ») + (2 x « cavités non minières ») + (2 x « cavités minières ») + (2 x « Mvt terrain ») + (3 x « Basol ») + (4 x « artésianisme ») + (4 x « communication aquifère ») + (0 x « remontée de nappe ») + (0 x « biseau salé »).

- **Etape 3 : Définition des zones réglementaires pour chaque gamme de profondeur**

Cette dernière étape permet d'attribuer une zone réglementaire (verte, orange ou rouge) à chaque maille des cartes réglementaires : une par gamme de profondeur et technique d'exploitation géothermique, soit 6 cartes réglementaires.

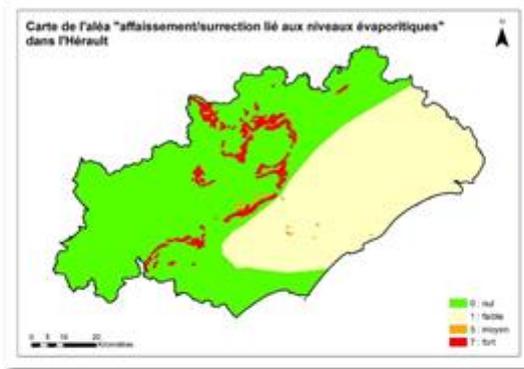
Les zones sont attribuées en fonction de la valeur résultante de chaque maille :

- Verte : entre 0 et 13 ;
- Orange : entre 14 et 41 ;
- Rouge : supérieure à 42.

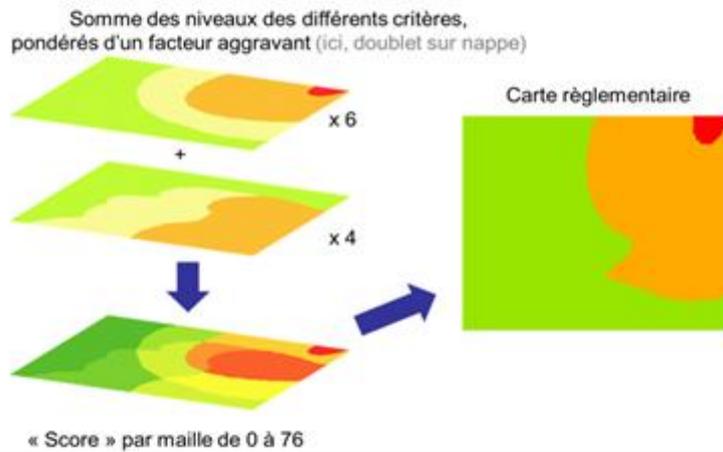
Il est à noter que le classement en zone est effectué pour les trois niveaux de profondeur 10-50m, 10-100 m et 10-200 m avec une règle d'héritage de la zone sus-jacente lorsque l'aléa est plus élevé que celui des autres profondeurs.

Ainsi, si une maille présente un aléa élevé pour la gamme de profondeur de 10 - 50 m et donc un risque pour la réalisation d'un ouvrage de GMI dans cette tranche d'épaisseur, alors tout ouvrage qui traverse cette tranche (c'est-à-dire les 2 autres gammes de profondeur 10 - 100 m et 10 – 200 m) est soumis à cet aléa. De ce fait, la valeur résultante de la maille pour la gamme de profondeur 10 - 100 m ne pourra pas être inférieure à celle calculée pour la gamme de profondeur 10 – 50 m. De même, la valeur résultante de cette maille pour la gamme de profondeur 10 – 200 m ne pourra pas être inférieure à celles des gammes de profondeur 10 - 50 m et 10 - 100 m.

Etape 1 : Détermination des niveaux d'aléa de chaque phénomène pour une gamme de profondeur donnée



Etape 2 : Analyse multicritère



Etape 3 : Définition des zones réglementaires pour chaque gamme de profondeur



Illustration 4 : Etapes de la détermination des zones des cartes réglementaires de la GMI

## 2.3 GRILLE DES CARTES REGLEMENTAIRES

Les grilles des cartes réglementaires ont été créées dans le système géodésique officiel en France, le réseau géodésique français 1993 (RGF93-Lambert93) qui répond à la directive INSPIRE. Le maillage correspond à des pixels de 250 x 250 mètres.

La table attributaire de ces grilles (au format « shapefile ») se compose des champs suivants (outre les champs obligatoires FID et Shape) :

- **Attribut « Maille »** : de type entier long, correspondant à un identifiant unique attribué à chaque maille. Pour une maille de 250 x 250, l'identifiant se termine par 00 ;
- **Attribut « Profondeur »** : de type entier court. L'intervalle de profondeur est précisé (50, 100, 200) pour la carte régionale ;
- **Attributs « coordonnées X\_RGF93 » et « Y\_RGF93 »** de type entier long. Ces coordonnées sont exprimées en mètre. Elles correspondent au centre de chaque maille dans le système RGF93-Lambert93 ;
- **Attribut « Altitude Z\_NGF »** de type entier court. Il correspond à l'altitude moyenne du sol au sein de la maille ; cette altitude est définie par rapport au NGF. Elle est exprimée en mètre avec une précision au mètre ;
- **Champs de type entier court correspondent aux neuf phénomènes redoutés.** Ces neuf champs contiennent la valeur attribuée au niveau d'aléa associé :
  - **evaporites** : phénomène d'affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques ;
  - **cavite\_nm** : phénomène d'affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
  - **cav\_min** : phénomène d'affaissement/effondrement lié aux cavités d'origine minière ;
  - **MVT** : phénomène des mouvements de terrain (glissement de terrain) ;
  - **BASOL** : phénomène de pollution des sols et/ou des nappes ;
  - **Artésien** : phénomène d'artésianisme ;
  - **com\_aquif** : phénomène de mise en communication d'aquifères ;
  - **remontee** : phénomène de remontée de nappe ;
  - **biseau** : phénomène de biseau salé ;
- **Attribut « Admin »** de type binaire (soit 0, soit 1). Cet attribut permet de classer d'office la maille considérée en zone rouge. La cotation 1 permet de placer une maille en zone rouge au regard du retour d'expérience ou de la connaissance locale, dont dispose l'administration vis-à-vis des conséquences d'un forage géothermique de minime importance ou tout autre forage du sol et du sous-sol sur la zone. La réalisation d'un ouvrage de géothermie sur la zone est alors réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance prévu par l'article L.112-3 du code minier.

- **Attribut « Doublet »** de type entier court. Ce champ correspond à la somme des niveaux d'aléa pondérés des facteurs aggravants pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs ouverts (de type « doublet sur aquifère ») ;
- **Attribut « SGV »** de type entier court. Ce champ correspond à la somme des niveaux d'aléa pondérés des facteurs aggravants pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs fermés (de type « sonde géothermique verticale ») ;
- **Attribut « cl\_doublet »** de type entier court. Ce champ présente la classification des zones réglementaires retenue pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs ouverts (de type « doublet sur aquifère » (1=vert, 2=orange, 3=rouge)) ;
- **Attribut « cl\_sgv »** de type entier court. Ce champ présente la classification des zones réglementaires retenue pour la carte qui décrit les zones pour les échangeurs fermés (de type « sonde géothermique verticale » (1=vert, 2=orange, 3=rouge)).

## 3. Cartographie des phénomènes redoutés

Cette partie présente la première étape de la méthodologie, c'est-à-dire la cartographie des niveaux d'aléa / susceptibilité par phénomène.

Pour chaque phénomène, la méthodologie employée pour le cartographier ainsi que les données utilisées sont détaillées avant la présentation des cartes d'aléas. Un descriptif du phénomène ainsi que ses différents niveaux de qualification sont également présentés.

### 3.1 PHENOMENE « AFFAISSEMENT / SURRECTION LIES AUX NIVEAUX D'EVAPORITES ET A LA PRESENCE D'EAU »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.1.1 Description du phénomène

Il s'agit d'un affaissement voire d'un effondrement ou une surrection des terrains de surface lié soit à la dissolution d'un niveau d'évaporite, soit au gonflement de ce niveau en cas de présence d'anhydrite. Ces phénomènes sont provoqués par la mise en communication d'aquifères superficiels ou profonds avec les horizons évaporitiques à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte (MEDDE, 2015).

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

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

#### 3.1.2 Qualification du phénomène

Le phénomène « Affaissement / surrection lié aux niveaux d'évaporites et à la présence d'eau » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide :

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

Ce phénomène a été cartographié pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

### **3.1.3 Données utilisées et méthodologie employée**

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015.

La Normandie ne présentant pas de formations géologiques connues pour leurs horizons évaporitiques avérés, la cartographie de cet aléa s'est essentiellement basée sur la recherche de mots-clefs au sein de différentes sources de données afin d'identifier des formations susceptibles de contenir des évaporites.

Les mots-clefs utilisés ont été les suivants : évaporite, anhydrite, gypse, sel gemme, halite carnallite et sylvine. Les sources de données dans lesquelles ils ont été recherchés sont listées ci-dessous :

- Les colonnes lithostratigraphiques disponibles dans la base de données du sous-sol (BSS) gérée par le BRGM ;
- Les dénominations des couches géologiques des cartes géologiques au 1/50 000 ;
- Les dénominations des couches BDLISA de niveau 3.

Cette recherche a permis d'identifier les formations géologiques susceptibles de contenir des évaporites. Ces couches ont été cartographiées avec une zone tampon de 200 mètres pour tenir compte des incertitudes. Elle a également permis d'identifier des horizons comprenant des évaporites.

Ces formations ont été cartographiées avec la susceptibilité faible. Le reste du territoire normand a été cartographié avec la susceptibilité nulle. Aucun secteur normand n'a été qualifié avec les susceptibilités moyenne ou forte car il n'existe pas en Normandie d'horizons évaporitiques connus.

Une fois les secteurs cartographiés avec la susceptibilité faible, les différentes gammes de profondeur ont pu être déterminées. Ainsi la profondeur 10 - 50 mètres a été attribuée aux formations affleurantes (issues de la carte géologique). La profondeur des autres formations a été déterminée en fonction des profondeurs renseignées dans les colonnes lithostratigraphiques de la BSS. L'ensemble de ces profondeurs sont inférieures à 50 mètres.

Ainsi, les cartes des 3 gammes de profondeur : 10 - 50 mètres, 10 - 100 mètres et 10 - 200 mètres, sont identiques.

### **3.1.4 Cartographie du phénomène**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

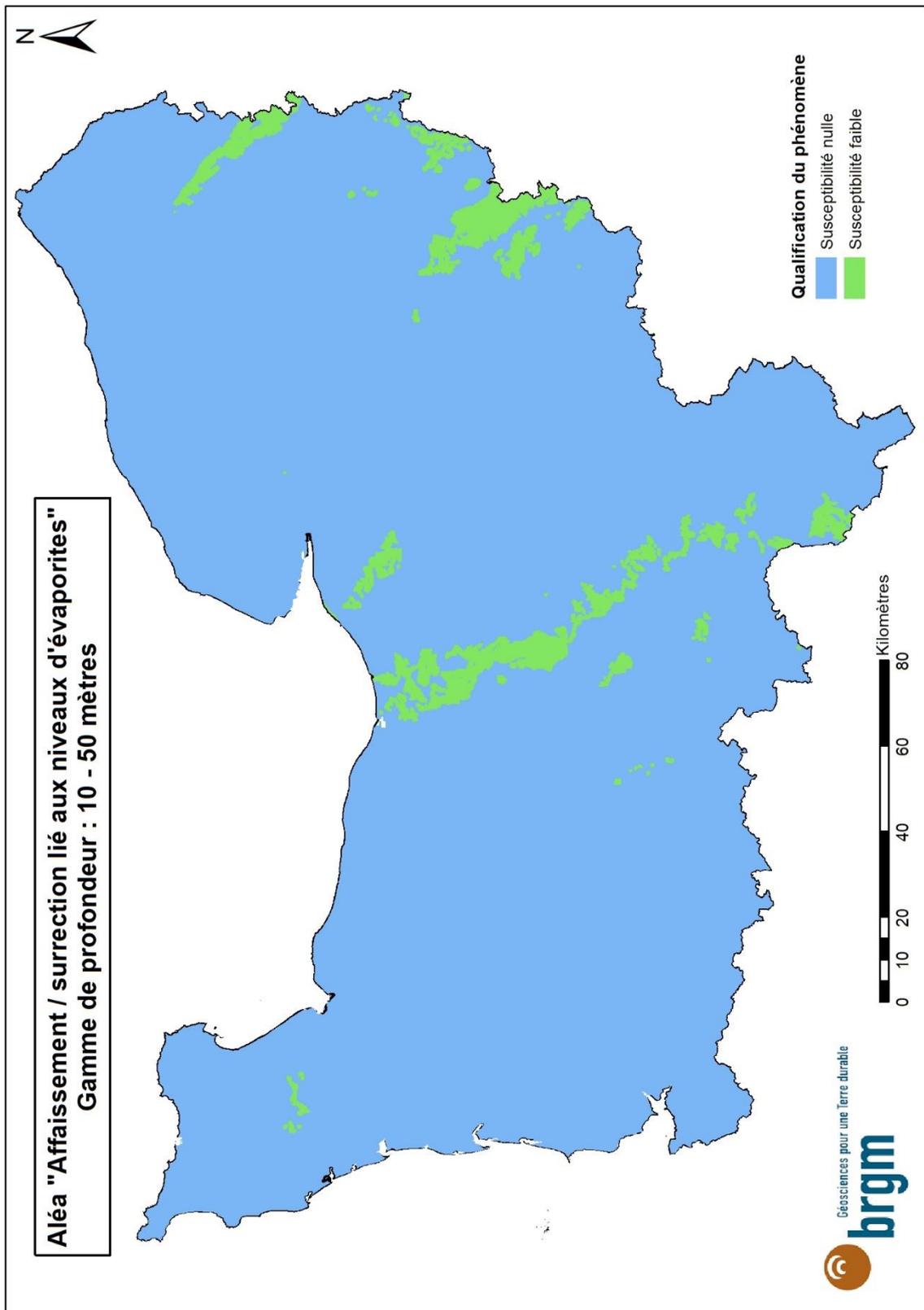


Illustration 5 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

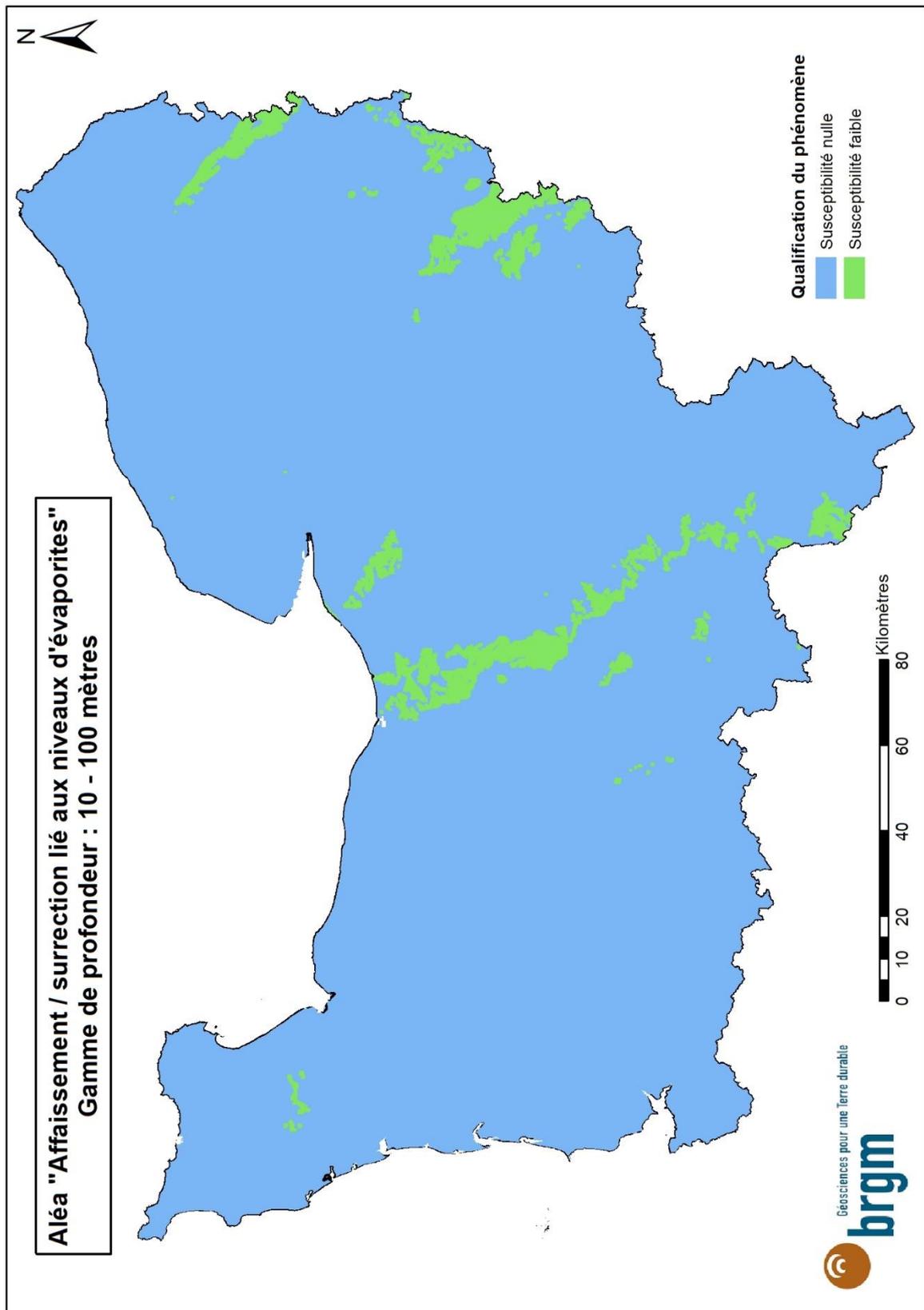


Illustration 6 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

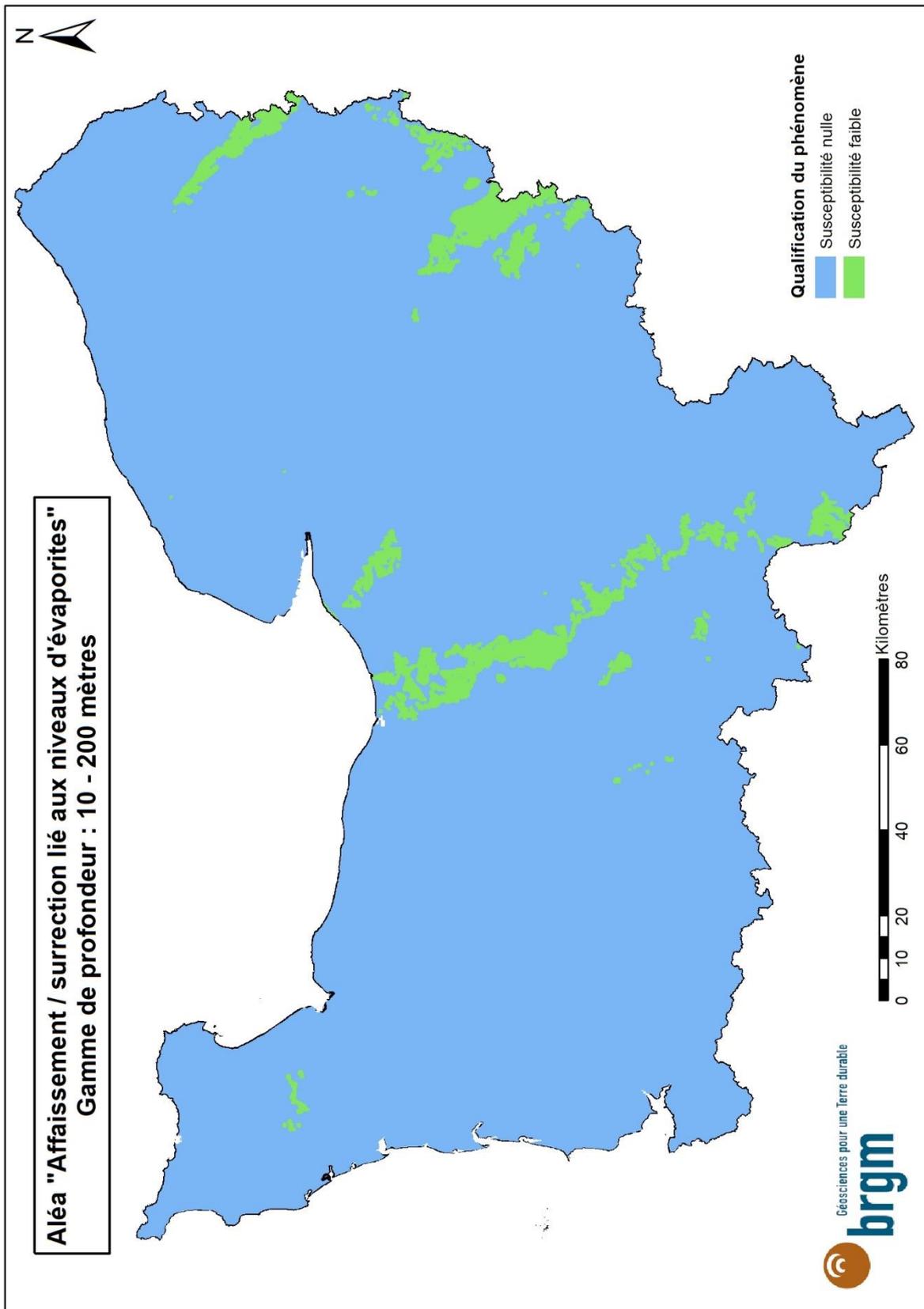


Illustration 7 : Carte d'aléa du phénomène "Affaissement / surrection liés aux niveaux évaporitiques" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.1.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Faible	1	6	10	6	10
Nulle	0			0	0

*Tableau 1 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / surrection lié aux niveaux évaporitiques et à la présence d'eau"*

### **3.2 PHENOMENE « AFFAISSEMENT / EFFONDREMENT LIES AUX CAVITES (HORS MINES) »**

Ce phénomène a été traité par le Cerema.

#### **3.2.1 Description du phénomène**

Les phénomènes d'affaissement ou d'effondrement liés aux cavités souterraines pourraient être provoqués, soit par foration au cours de la mise en place du dispositif, soit pour toute la durée de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur de forages mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte. Les cavités de dissolution des réseaux anciens, potentiellement remplies de matériaux sans cohérence, sont aussi concernées (phénomène d'infiltration et de soutirage).

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

La Normandie est impactée par deux grands types de cavités non minières :

- Karsts : système de cavités et conduits formés naturellement par la dissolution hydrochimique des formations carbonatées ou sulfatées ;
- Marnières (terme normand) : cavités creusées dans le substratum crayeux au cours du 19<sup>ème</sup> siècle ; la craie extraite servant à amender les terres agricoles.

La Normandie est inégalement impactée par ces deux facteurs. Les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure contiennent une très grande majorité de ces cavités ; ceux-ci composant l'extrémité Nord-Ouest du bassin parisien avec des sols majoritairement crayeux ou calcaire. Compte tenu des fortes incertitudes sur la localisation des cavités souterraines, l'aléa effondrement/affaissement qui en résulte, est un aléa diffus qui peut impacter une grande partie du territoire normand.

#### **3.2.2 Qualification du phénomène**

Comme indiqué dans la méthodologie nationale, l'ensemble des données ont été agrégées aux mailles 500x500 m afin de procéder aux calculs d'aléa. Aucune commune ne disposant d'un PPRN cavité, la méthodologie suivie est décrite ci-après.

Sur toutes les communes qui ne bénéficient pas d'une cartographie détaillée de l'aléa « effondrement » et/ou d'une cartographie précise des cavités, la méthodologie arrêtée repose sur le critère de densité des cavités connues, comme prévue dans la méthodologie nationale.

Sur cette base, les critères retenus pour la qualification de l'aléa à la maille 500x500 sont les suivants :

- Susceptibilité forte : > 8 cavités recensées par maille ;
- Susceptibilité moyenne : 4 à 8 cavités recensées par maille ;
- Susceptibilité faible : 2 à 3 cavités recensées par maille et présence d'une formation géologique susceptible de contenir des cavités ;
- Susceptibilité nulle : 0 à 1 cavité recensée et pas de formation géologique susceptible d'en contenir.

On rappellera que sur les zones de plateau, la densité de marnière est estimée à environ 14 marnières au km<sup>2</sup>, soit entre 3 et 4 marnières par maille de 500 m soit 1 marnière par maille de 250m.

### 3.2.3 Données utilisées et méthodologie employée

Il n'existe pas de carte de ce phénomène à l'échelle régionale actuellement en Normandie. Néanmoins, plusieurs types de données sont disponibles à des échelles, des précisions, et des qualités très différentes :

- BD cavité, BSS, BDMVT : recense de façon homogène l'ensemble des cavités souterraines abandonnées et connues « hors mines » en France métropolitaine
- Carte géologique BRGM de la région à l'échelle 1/50000<sup>ème</sup>
- SIGES Seine-Normandie : données des eaux souterraines pour le bassin Seine Normandie
- Recensement des indices de cavités souterraines (RICS) : Cartographie communale principalement utilisée en Seine-Maritime pour recenser les indices de cavités.

#### ○ **BD cavités**

En Normandie les données de la BD cavité sont hétérogènes d'un territoire à l'autre, voire d'une commune à l'autre, pourtant soumise au même niveau d'aléa affaissement/effondrement lié aux cavités hors mines. Cette disparité s'explique par le fait que certaines communes ont déclaré des phénomènes de manière exhaustive et d'autres non. Ensuite, compte tenu de la présence importante de marnières, il est devenu coutume de signaler tout affaissement comme pouvant être en lien avec une cavité souterraine sans pour autant en être certain. Cette donnée étant peu fiable, il a été choisi de ne retenir de la BD Cavité que les termes : carrières, marnières, effondrement, bétoires, orifices naturels.

Pour les indices localisés précisément dans la base de données, une zone tampon de 60 m a été retenue autour des points, correspondant à la probabilité qu'une cavité soit présente au droit de cette zone (Guide Les marnières de Haute Normandie – Méthodologie d'études et de prévention - LCPC2008). Dans les autres cas un périmètre de 150 m a été appliqué correspondant à l'occurrence de la présence de quatorze marnières au kilomètre carré (14 marnières par kilomètre carré, soit 1 marnière pour 70 000 m<sup>2</sup> soit un disque de 150 m de rayon).

#### ○ **Cartes géologiques**

La Normandie est située à cheval entre deux grands ensembles géologiques distincts : le massif Armoricaïn à l'Ouest et le Bassin Parisien à l'Est. Ce dernier est composé d'une roche sédimentaire d'assises jurassiques et crétacées sub-horizontales. C'est au sein de ces assises que l'ensemble des exploitations de Craie ("marne", Calcaire de Caen...) ont été exploitées pour la construction ou l'amendement des terres agricoles.

Sur le territoire normand, les formations postérieures au Jurassique (-200Ma) sont susceptibles de contenir des cavités.

Afin de prendre en compte les lacunes importantes dans la connaissance de l'existence et la localisation des cavités souterraines, un aléa faible a été retenu au droit de ces formations.

Lorsque le substratum crayeux est affleurant, la méthode d'exploitation est principalement à ciel ouvert, l'aléa a donc été considéré comme nul au droit de ces zones.

○ **SIGES Seine-Normandie**

Pour les phénomènes d'origine naturelle, le SIGES Seine-Normandie regroupe l'ensemble des informations relatives aux eaux souterraines. De nombreux points d'infiltration des eaux de surface y sont répertoriés très précisément. Chaque point a fait l'objet d'une zone d'influence de 30 mètres.

Aucune publication ou étude n'évoque un système karstique développé à plus de 50 m de profondeur

○ **RICS**

Ces documents sont très utilisés dans le département de la Seine-Maritime, dans une bien moindre mesure dans l'Eure, et, nullement dans les autres départements de la Normandie. Ils recensent l'ensemble des indices de cavités souterraines, leurres et autres mouvements de terrains indéterminés à l'échelle communale. L'intégration de ces données à la cartographie d'aléa n'a pas paru pertinente pour plusieurs raisons :

- Ces documents répertorient des suspicions d'indices de cavités souterraines dans le but d'être le plus exhaustif possible pour éviter toute nouvelle urbanisation au droit d'une exploitation souterraine. Il vise à faire réaliser des investigations pour déterminer si une cavité est présente. Étant donné l'incertitude associée à ces suspicions de présence d'un vide, la majorité de ces données localisées n'a pas paru pertinente à l'établissement d'une carte d'aléa pour la GMI. De plus, les données concernant de manière certaine les cavités, sont recensées pour partie dans la BD Cavité.
- Des données anciennes et non disponible sous SIG pour la majorité.
- Des données hétérogènes d'une commune à une autre en fonction par exemple de l'ancienneté du recensement, de la sensibilité du bureau d'études qui va réaliser ce document visant à prévenir toute nouvelle urbanisation.

### **3.2.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

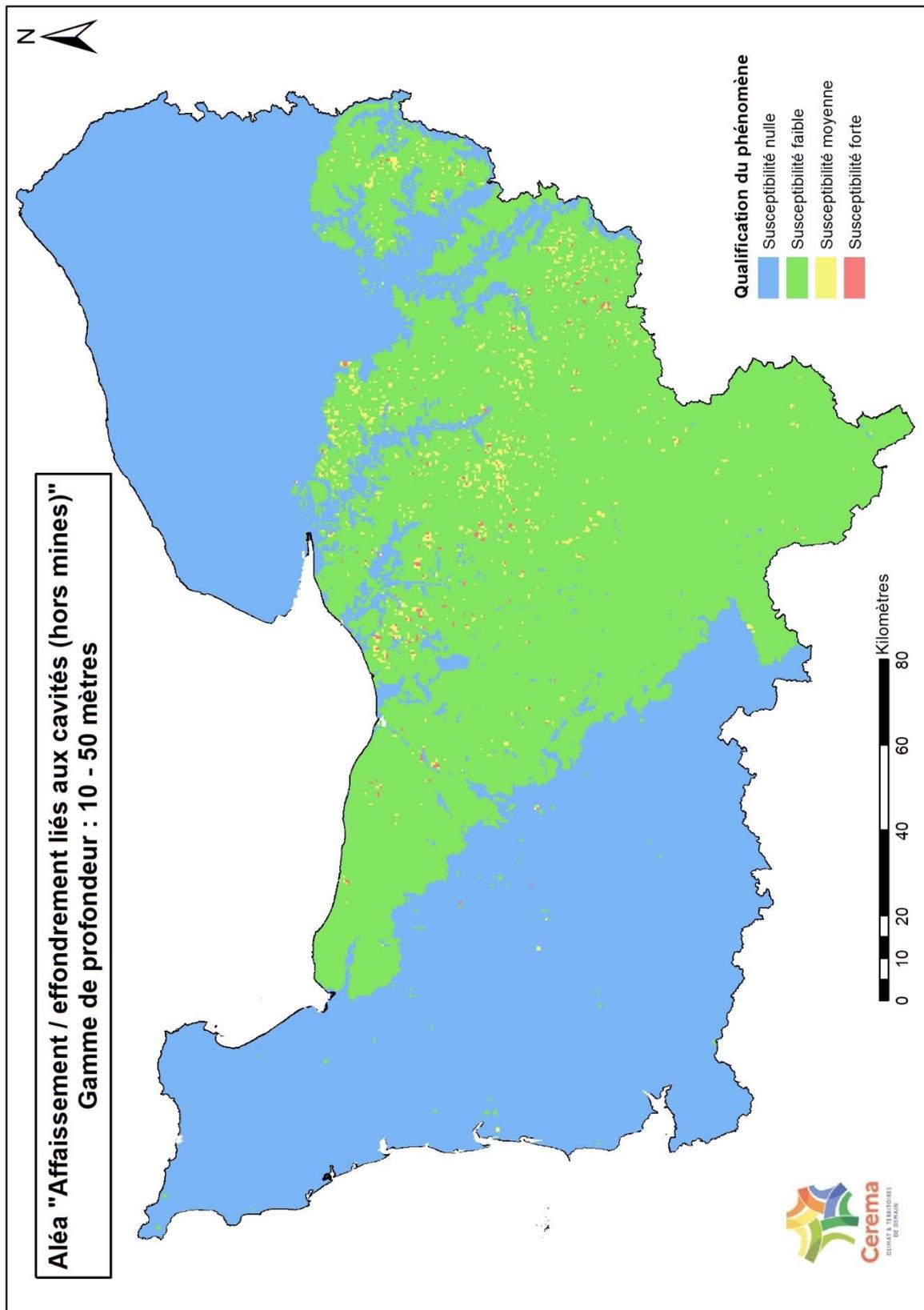


Illustration 8 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres

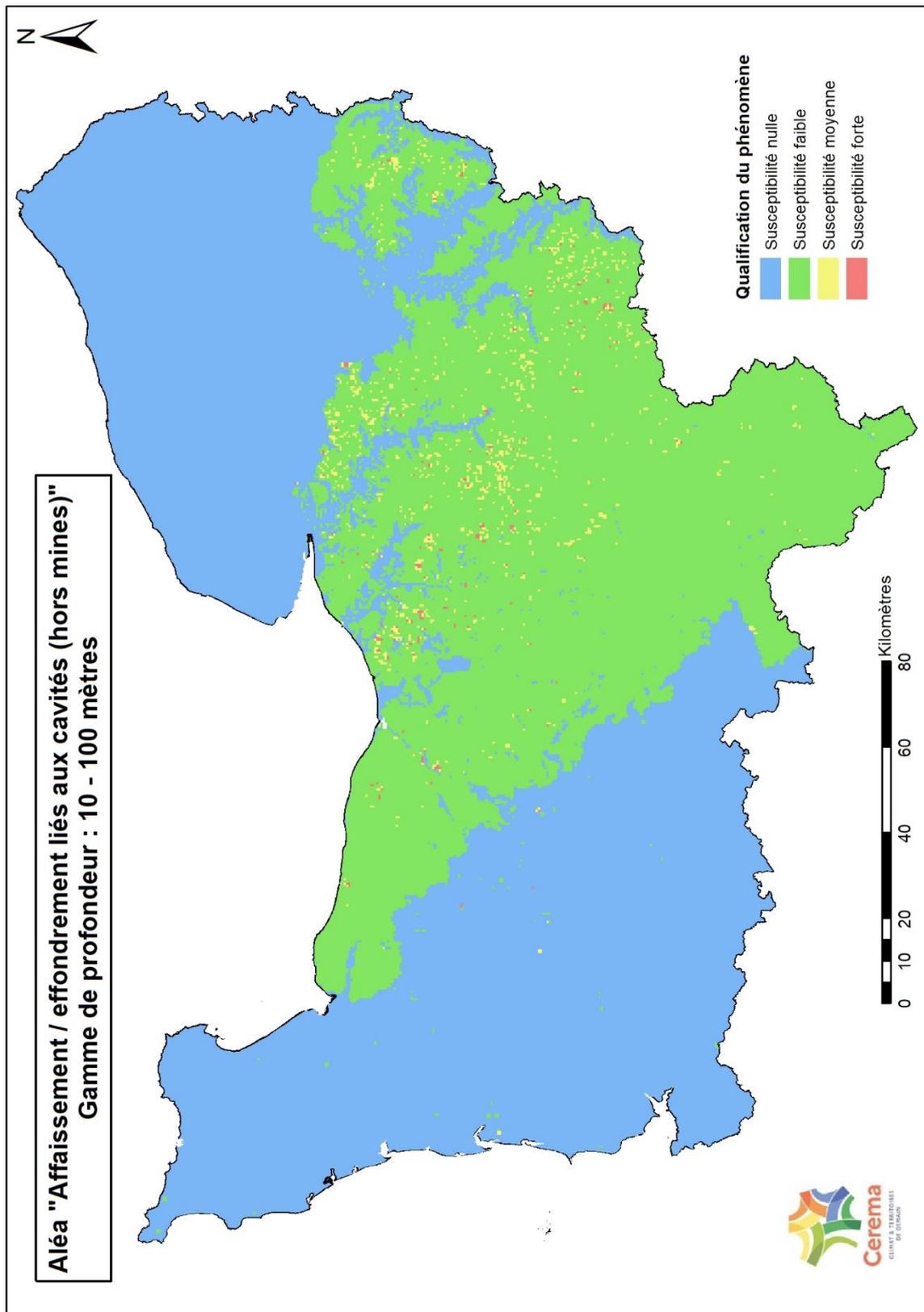


Illustration 9 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

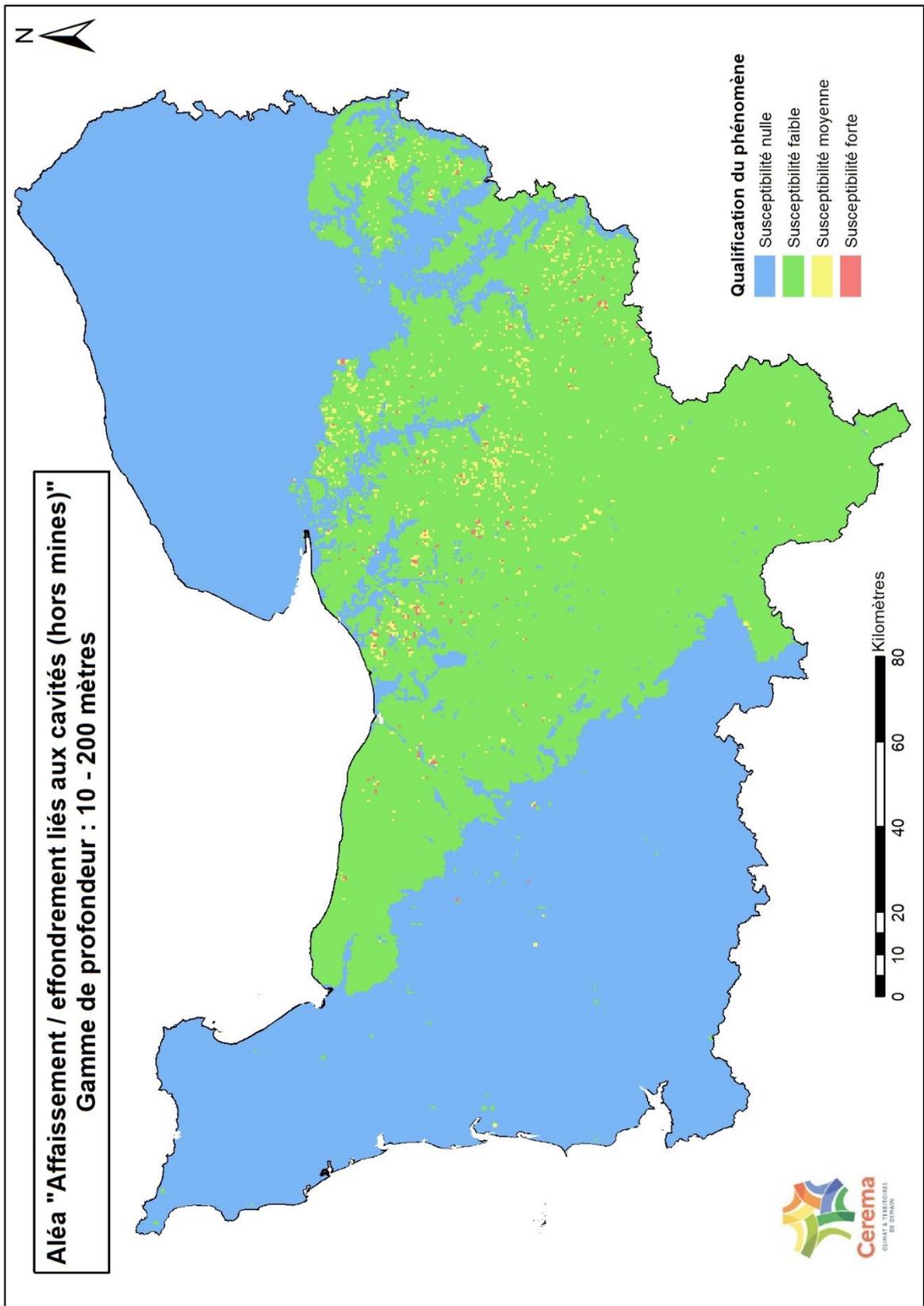


Illustration 10 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.2.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Forte	3	2	2	6	6
Moyenne	2			4	4
Faible	1			2	2
Nulle	0			0	0

Tableau 2 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines)"

### **3.3 PHENOMENE « AFFAISSEMENT / EFFONDREMENT LIES AUX CAVITES MINIERES »**

Ce phénomène a été traité par le Cerema.

#### **3.3.1 Description du phénomène**

Il s'agit ici des effondrements localisés (de type « fontis »), ainsi que des affaissements. De par leur brutalité, les effondrements localisés, potentiellement généralisés à de larges surfaces, 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 qu'un risque économique menaçant principalement les constructions. Dans le cadre d'un projet de géothermie basse température, la foration peut avoir des conséquences sur la tenue des terrains et ainsi provoquer des phénomènes d'affaissement/effondrement dans les zones concernées par des cavités minières. Ces phénomènes pourraient donc être provoqués soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.

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

#### **3.3.2 Qualification du phénomène**

Pour les activités minières disposant d'une cartographie détaillée de l'aléa, les niveaux d'aléas correspondent à ceux présents dans l'étude Géoderis. Trois qualifications d'aléa sont présentes :

- Fort (cotation à 7) ;
- Moyen (cotation à 5) ;
- Faible (cotation à 1).

Pour les activités minières ne disposant pas d'une cartographie détaillée de l'aléa, les niveaux d'aléas sont considérés comme faible (cotation à 1). Les zones sans exploitation minière connue sont en Aléa Nul (cotation à 0).

#### **3.3.3 Données utilisées et méthodologie employée**

##### **○ Activités minières disposant d'études sur les aléas**

Dans le cadre de la présente étude, les données sur les aléas associés aux anciennes activités minières ont été fournies par la DREAL Normandie avec une cartographie précise :

- Jurques, Ondefontaine et Mont-Pinçon
- Littry
- May-sur-Orne
- Saint-Rémy
- Mortain
- Saint-Clair-de-Halouze
- Soumont
- La Chapelle-Enjuger, Surtainville et Bourberouge

- La Ferrière-aux-Etangs

Compte tenu de la précision de ces cartes, aucune zone tampon n'a été appliquée autour de ces sites.

- **Activités minières ne disposant pas d'études sur les aléas**

Géoderis a réalisé une identification des ouvrages et travaux débouchant au jour présentant un risque corporel potentiel en Normandie. 120 ouvrages ont été identifiés par le bureau d'études dans le Calvados, la Manche et l'Orne. Cet inventaire est suffisamment précis mais ne comporte pas de périmètre de risque. Par transposition des périmètres retenus par Géoderis pour des aléas effondrement des ouvrages débouchant au jour (puits) disposant d'une carte d'aléa, il a été appliqué un tampon de 30 m autour de ceux-ci. Cette zone tampon correspond à la zone maximum observée pour un aléa effondrement fort au niveau d'un puits.

En l'absence d'une carte d'aléas dédiée ou de données dans l'inventaire Géoderis, les données utilisées ont été celles de l'inventaire des Ressources minières du territoire métropolitain (1992) du SIG Mines. Ce SIG recense 17 sites d'extraction en Normandie dont 4 n'ont pas été précisés par les autres études.

Ces données d'inventaires ne disposent que d'une localisation ponctuelle et les coordonnées XY correspondent uniquement à une localisation approximative du site. Il peut s'agir des coordonnées du principal site d'extraction, du barycentre, de l'implantation des infrastructures... De nombreux décalages ont été observés sur les coordonnées présentant une carte d'aléa, pouvant aller jusqu'à 4km de la coordonnée XY du SIGES Mines. Conformément à la méthodologie nationale, une zone tampon de 5 km de rayon a été appliquée sur les 4 sites non précisés par les études d'aléas réalisées par Géoderis et listées supra.

### **3.3.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

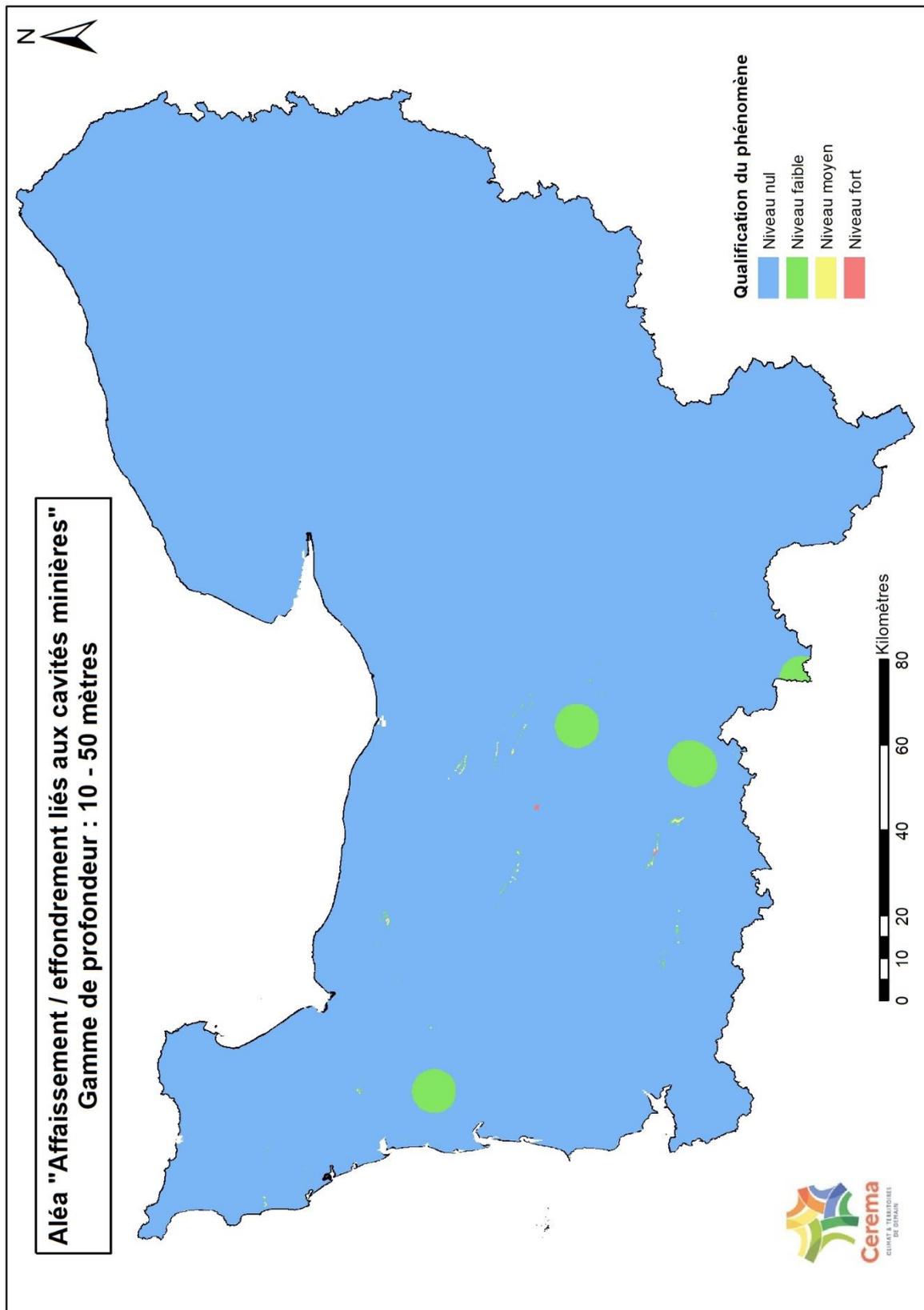


Illustration 11 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres

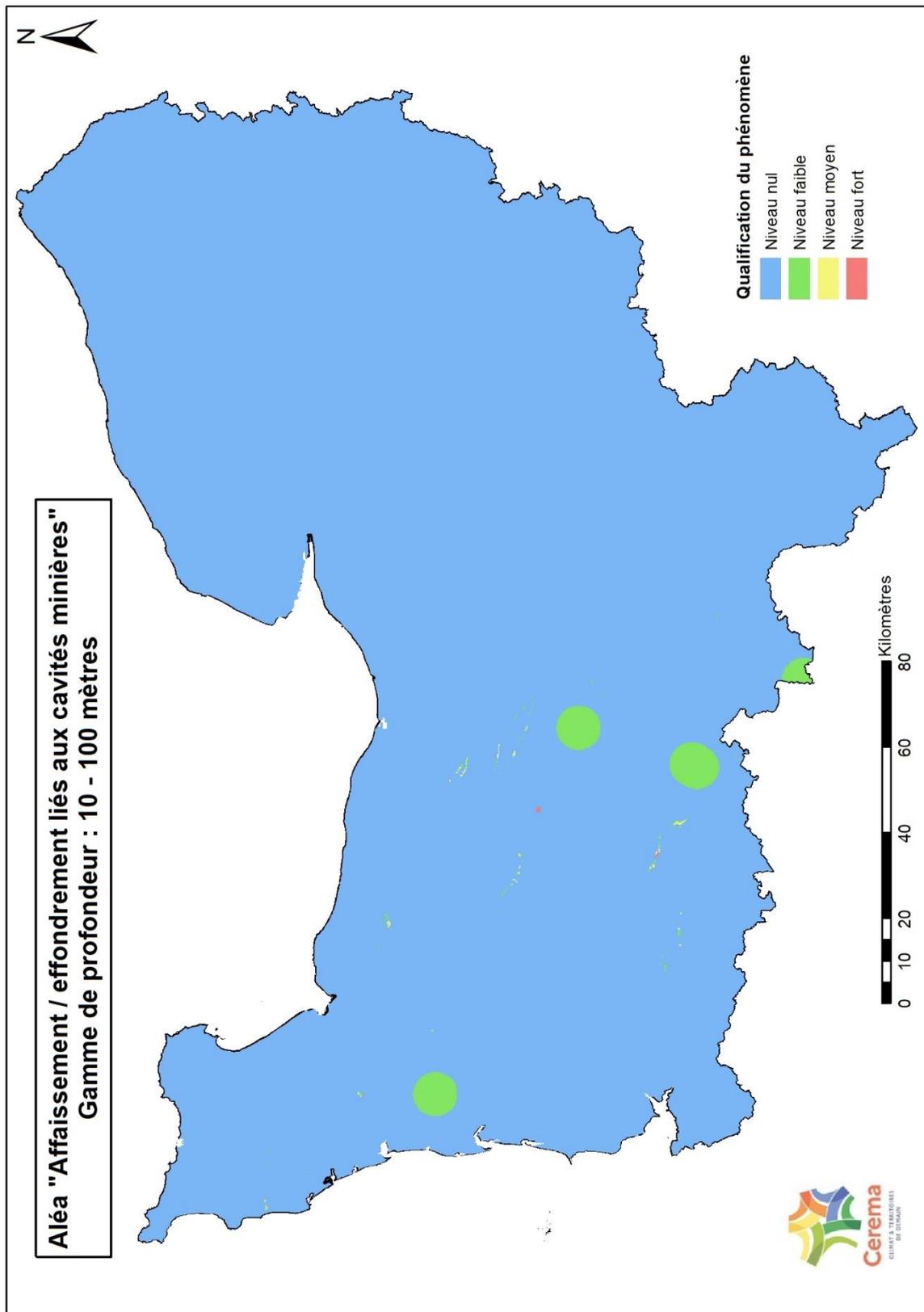


Illustration 12 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

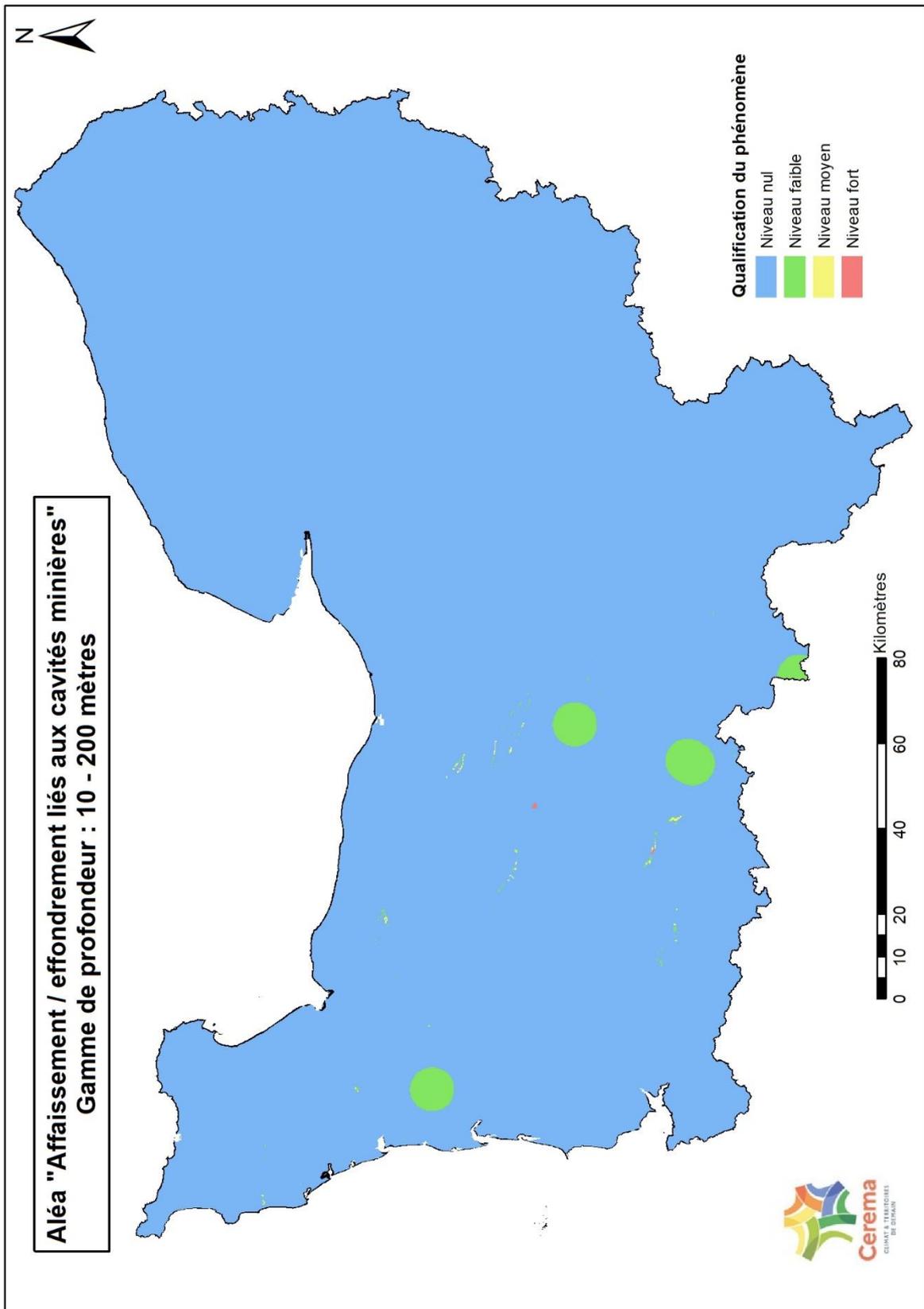


Illustration 13 : Carte d'aléa du phénomène " Affaissement / effondrement liés aux cavités minières " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.3.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Forte	7	2	2	14	14
Moyenne	5			10	10
Faible	1			2	2
Nulle	0			0	0

Tableau 3 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Affaissement / effondrement liés aux cavités minières"

### **3.4 PHENOMENE « MOUVEMENTS DE TERRAIN (OU GLISSEMENTS DE TERRAIN) »**

Ce phénomène a été traité par le Cerema.

#### **3.4.1 Description du phénomène**

Le phénomène décrit ici correspond au glissement de terrain. Les zones présentant les conditions géométriques et lithologiques nécessaires au déclenchement d'un phénomène de type glissement de terrain peuvent rester stables, en l'absence d'un déclencheur du processus. En revanche, la foration en cours de la mise en place du dispositif de géothermie peut être un déclencheur de ce type de phénomène. Il en est de même pour la mise en communication avec des eaux superficielles ou souterraines ou, le fluide caloporteur. Un tel phénomène est donc susceptible de se produire durant la foration ou durant l'exploitation géothermique.

En présence d'une nappe captive, un phénomène de glissement de terrain peut se produire en cas de percement non contrôlé de l'aquifère, avec un processus de saturation d'une couche supérieure qui ne l'était pas, ce qui, selon les couches lithologiques affectées et la géométrie de celles-ci, pourrait être très défavorables 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 que l'impact de la géothermie sur ce phénomène est limité.

#### **3.4.2 Qualification du phénomène**

En présence d'une carte d'aléa, la qualification de l'aléa est la suivante :

- Niveau fort : dans les zones cartographiées en aléa "fort" (noté 7),
- Niveau moyen : dans les zones cartographiées en aléa "moyen" (noté 5),
- Niveau faible : dans les zones cartographiées en aléa "faible" (noté 1),
- Niveau nul : dans les zones cartographiées en aléa "nul" (noté 0).

Lorsqu'une cartographie d'aléa est disponible dans la maille de 250 x 250 m, l'aléa le plus important qualifie l'aléa de la maille.

En l'absence d'une carte d'aléa, le phénomène est qualifié en fonction de la probabilité d'occurrence. Elle est basée sur la densité de mouvements de terrain recensés dans une maille de 250 x 250 m.

- Probabilité d'occurrence forte : plus de 8 glissements recensés (noté 3),
- Probabilité d'occurrence moyenne : 5 à 8 glissements recensés (noté 2),
- Probabilité d'occurrence faible : 1 à 4 glissements recensés (noté 1),
- Probabilité d'occurrence nulle : pas de mouvement de terrain recensé (noté 0).

### 3.4.3 Données utilisées et méthodologie employée

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

Dans le cadre de l'étude de l'aléa mouvements de terrain, seuls les glissements de terrain et les coulées de boue ont été pris en compte. Les affaissements ont une origine indéterminée : ils peuvent être liés à une marnière, un karst, un glissement ou autre. Étant donné cette incertitude sur leur origine, il a été choisi de ne pas les prendre en compte dans la cartographie d'aléa « mouvements de terrain ».

Ces données ponctuelles ont nécessité le traitement suivant pour être intégrées à l'étude :

- Sélection des événements de type « glissement de terrain » et « coulée » dans la base de données BDMVT, soit 547 glissements et coulées sur la zone d'étude,
- Création d'une zone tampon autour de chaque événement. Cette zone est proportionnelle à l'imprécision de la donnée et ajoutée à une zone d'influence forfaitaire de 100 m selon les principes suivants :
  - un tampon de 100 m pour les événements possédant une précision métrique, soit environ 2,4 % des événements,
  - un tampon de 110 m pour les événements possédant une précision décamétrique (soit 100 m + 10 m), soit environ 75,7 % des événements,
  - un tampon de 200 m pour les événements possédant une précision hectométrique (soit 100 m + 100 m), soit environ 21,6 % des événements,
  - un tampon de 1100 m pour les événements possédant une précision kilométrique (soit 100 m + 1000 m), soit près de 0,3 % des événements.

Les données » localisés au centroïde des communes n'ont pas été prises en compte.

À l'échelle territoriale, les données des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) ont été utilisées, lorsqu'elles étaient disponibles. Elles ont été recueillies sur les sites des préfectures de départements. Les DDT(M) ont été sollicitées pour compléter les données recueillies.

Les cartes d'aléa suivantes ont été prises en compte :

- Calvados :
  - PPR Mouvement de terrain du Mont Canisy et son versant nord,
  - PPR Mouvement de terrain Trouville-sur-Mer, Villerville et Cricqueboeuf,
  - PPR Mouvement de terrain des falaises des Vaches Noires.
- Manche :
  - PPR Mouvement de terrain de Granville et de Donville-les-Bains.

- Orne :
  - PPR Mouvement de terrain de Coulimer,
  - PPR Mouvement de terrain de Céton.
- Seine-Maritime :
  - PPR Mouvement de terrain de Saint-Adresse.

Pour ces cartes d'aléa, seuls les aléas « glissement » ont été conservés.

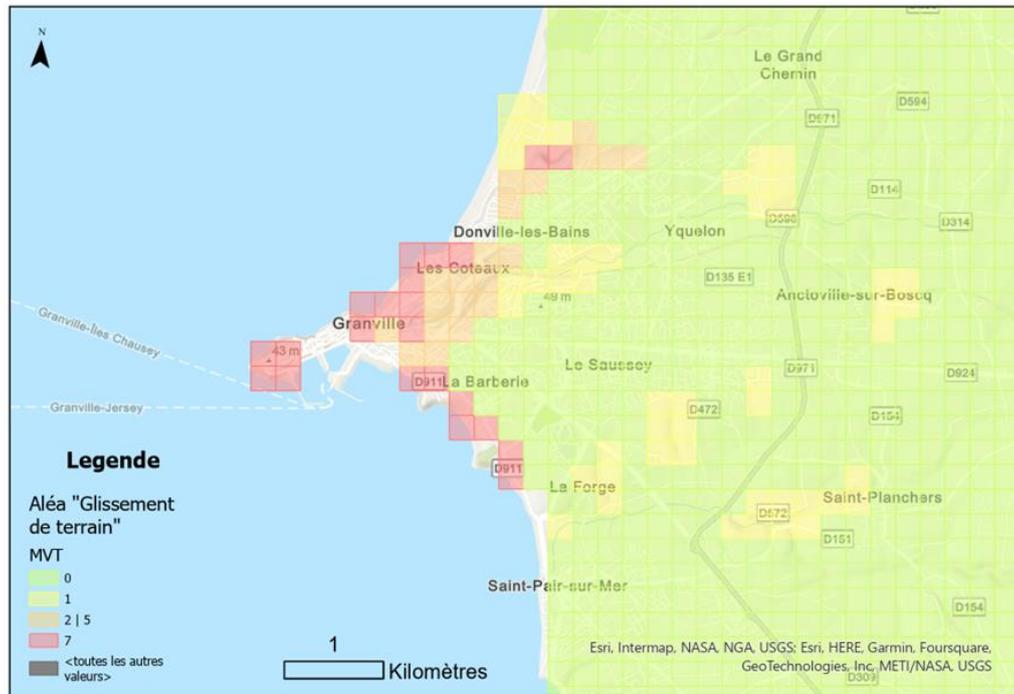


Illustration 14 : Exemple d'aléa "glissement de terrain" en présence d'un PPR MVT - PPR MVT Granville et Donville-les-Bains (50)

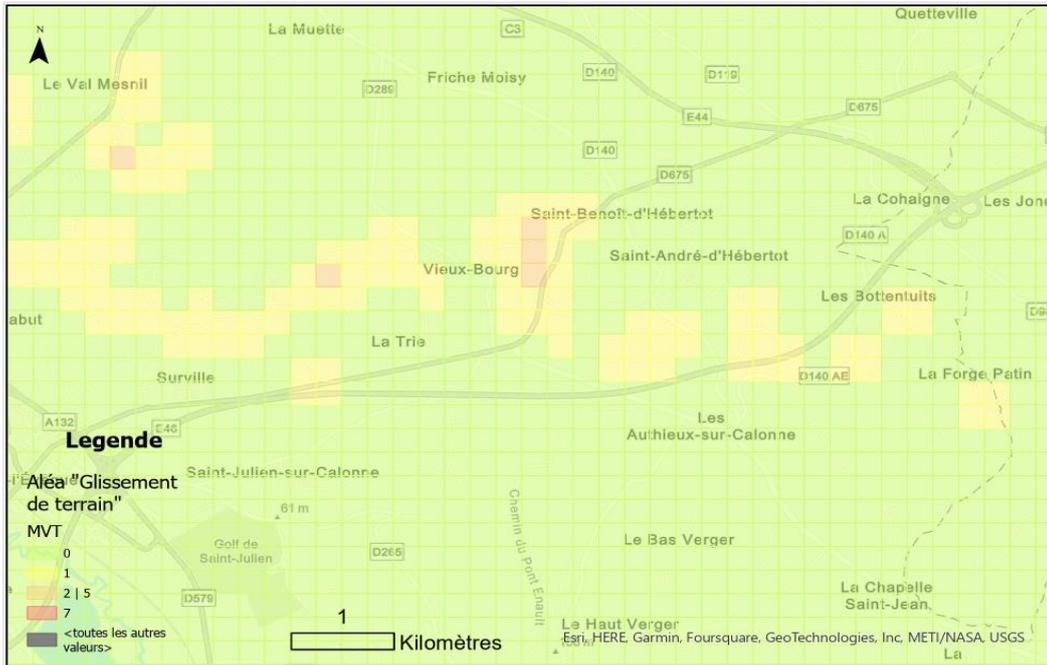


Illustration 15 : Exemple d'aléa "glissement de terrain" en l'absence d'un PPR MVT – aux environs de Pont-L'Evêque (14)

### 3.4.4 Cartographie du phénomène redouté

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

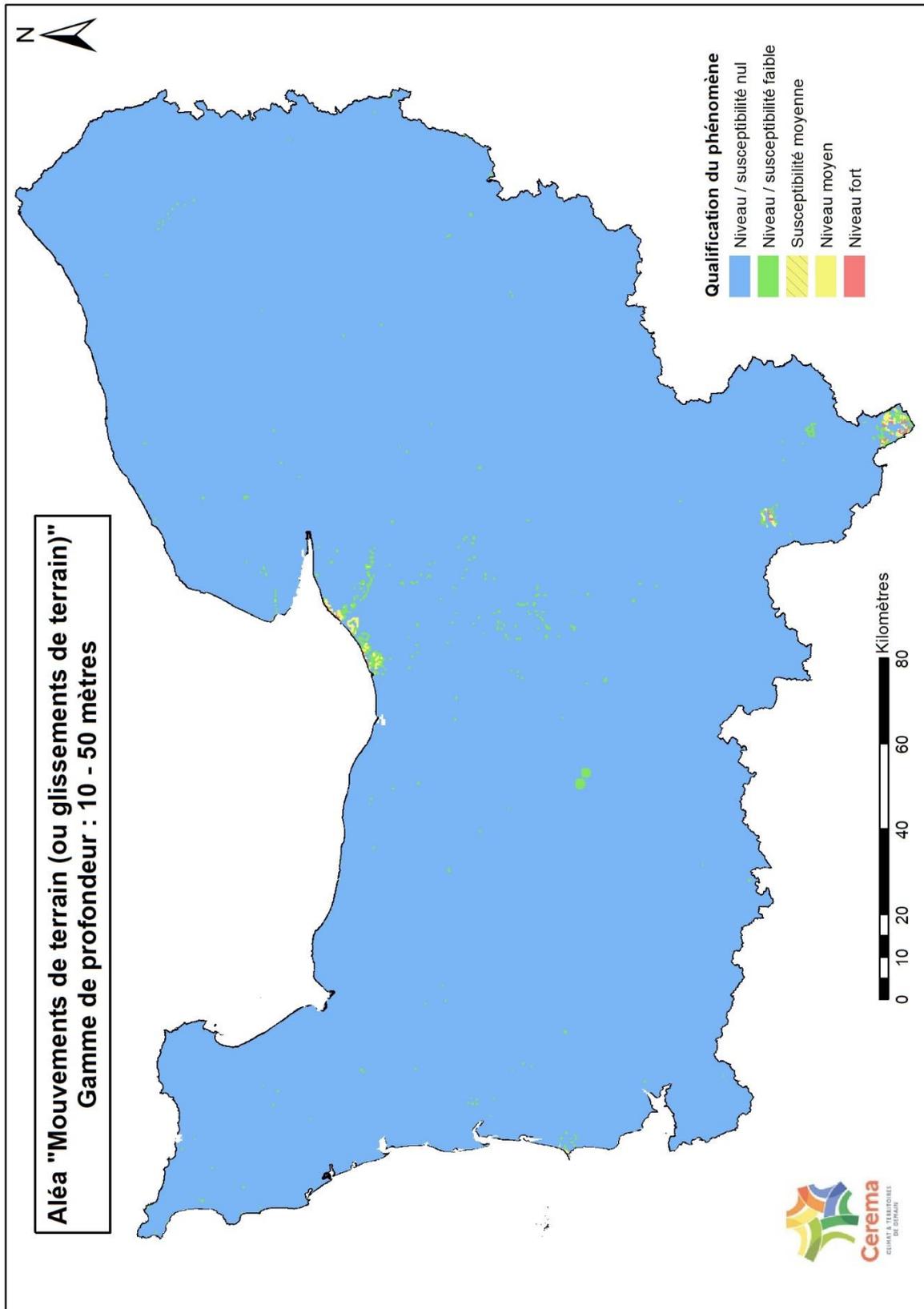


Illustration 16 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 -50 mètres

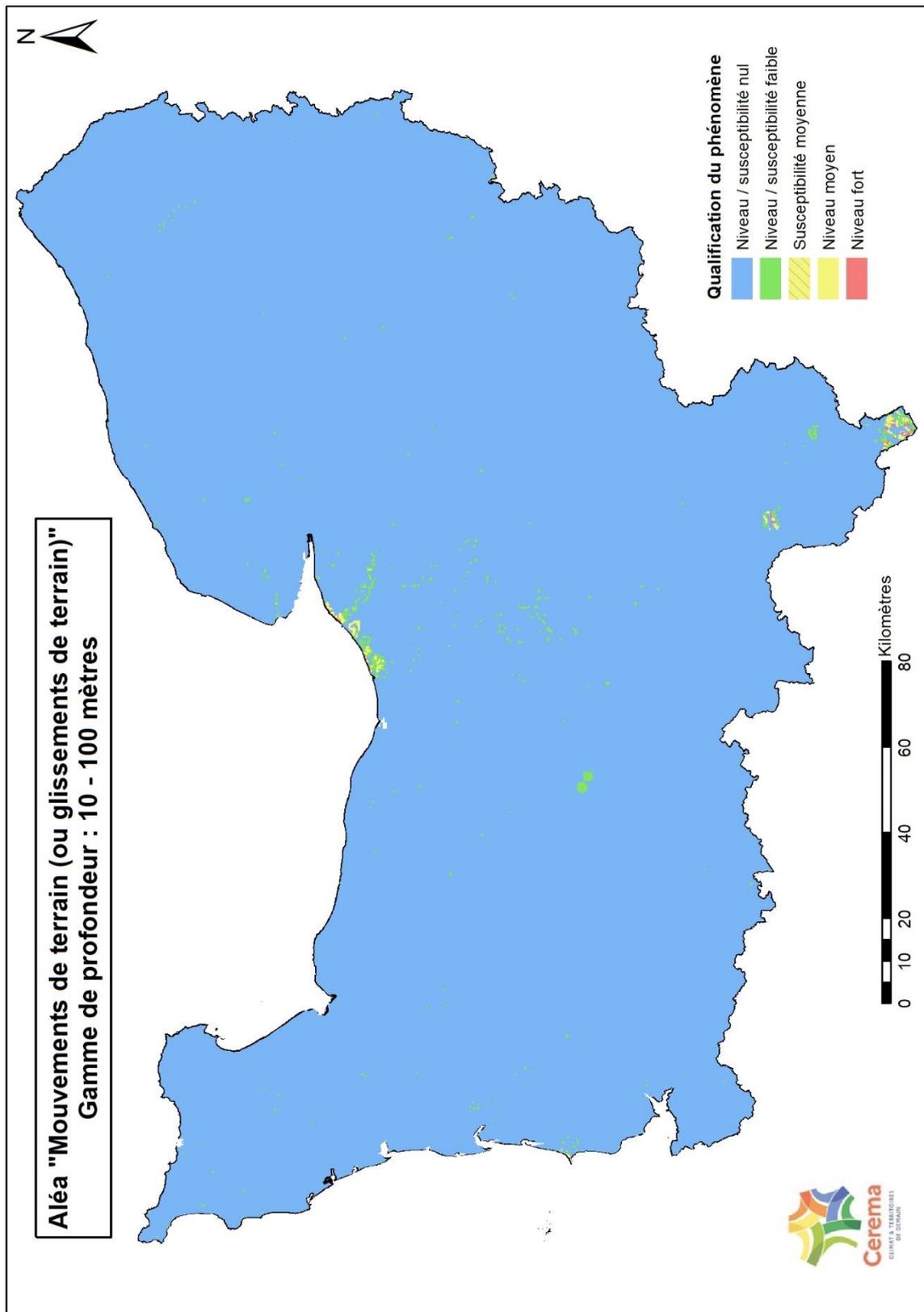


Illustration 17 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

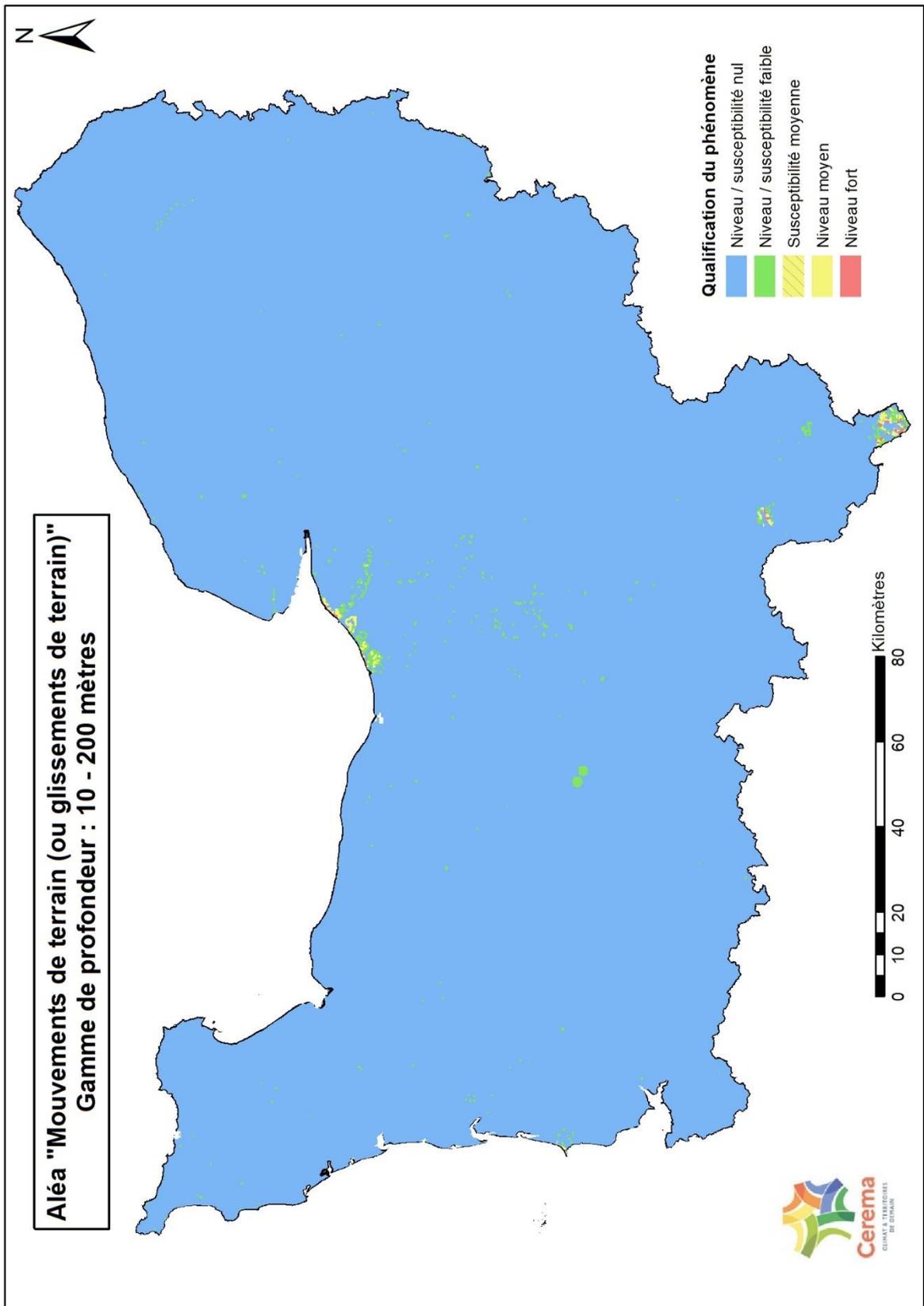


Illustration 18 : Carte d'aléa du phénomène " Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.4.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité / Niveau	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
<b>En présence d'une carte d'aléa</b>					
Niveau fort	7	2	2	14	14
Niveau moyen	5			10	10
Niveau faible	1			2	2
Niveau nul	0			0	0
<b>En l'absence de carte d'aléa</b>					
Susceptibilité forte	3	2	2	6	6
Susceptibilité moyenne	2			4	4
Susceptibilité faible	1			2	2
Susceptibilité nulle	0			0	0

Tableau 4 : Cotation et facteur aggravant du phénomène "Mouvements de terrain (ou glissements de terrain)"

### 3.5 PHENOMENE « POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.5.1 Description du phénomène

Ce phénomène correspond à la possibilité d'infiltrer des polluants depuis la surface vers une nappe ou de mettre en communication une nappe superficielle polluée avec des aquifères plus profonds (non contaminés), soit au cours de la foration des ouvrages, soit tout au long de la durée de vie d'un ouvrage en cas de défaut d'étanchéité.

#### 3.5.2 Qualification du phénomène

Les préconisations du guide qualifiaient le phénomène « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine » comme suit :

- **Susceptibilité très forte** : présence d'un panache de pollution (pollution avérée de la nappe et cartographiée) ;
- **Susceptibilité forte** : présence d'un site identifié dans BASOL et présence d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Susceptibilité moyenne** : présence d'un site identifié dans BASOL et absence d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Susceptibilité nulle** : pas de site BASOL répertorié dans la base.

Cependant la qualification avec une susceptibilité moyenne pour un site identifié dans BASOL avec une absence d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée a été jugée trop importante et impactant de façon disproportionnée la note finale pour ce phénomène et donc pour la carte réglementaire. Ainsi un niveau de susceptibilité supplémentaire a été créé : susceptibilité faible.

Les qualifications ainsi remaniées et appliquées pour ce phénomène sont les suivantes :

- **Susceptibilité très forte** : présence d'un panache de pollution (pollution avérée de la nappe et cartographiée) ;
- **Susceptibilité forte** : pollution avérée de la nappe à partir des données BASOL ;
- **Susceptibilité moyenne** : présence d'un site identifié dans BASOL et présence d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Susceptibilité faible** : présence d'un site identifié dans BASOL et absence d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Susceptibilité nulle** : pas de site BASOL répertorié dans la base.

Ces nouvelles qualifications ont été déclinées pour l'ensemble des régions de la phase 2 du projet, c'est-à-dire pour les régions Pays-de-la-Loire et Occitanie.

Ce phénomène a été cartographié pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

### **3.5.3 Données utilisées et méthodologie employée**

La méthodologie appliquée pour ce phénomène a été adaptée par rapport au guide de 2015.

La cartographie de ce phénomène s'appuie sur les données présentes dans les sites BASOL et SIS ainsi que sur les couches de la BDLISA de niveau 3.

Les sites « libres de toutes restrictions, travaux réalisés, aucune restriction, pas de surveillance nécessaire » ont été exclus et codés avec un niveau de susceptibilité nulle.

Une zone tampon de 500 mètres est appliquée aux autres sites des bases BASOL et SIS, puis ces zones sont croisées avec les couches de la BDLISA de niveau 3. Ce croisement permet de déterminer si un site se situe au droit d'une nappe et à quelle profondeur celle-ci se situe afin de pouvoir coder les sites avec les niveaux de susceptibilités de niveau « moyenne » et « faible ».

Pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres, les zones tampon des sites répertoriés dans les bases BASOL et SIS sont croisées avec les couches de la BDLISA d'ordre 1. Ces couches correspondent aux couches situées à l'affleurement et donc à moins de 50 mètres de profondeur. Dans le cas où plus de 50 % de la surface de la zone tampon est occupée par une unité aquifère et/ou une unité semi-perméable (codes 5 et 6 du statut « Nature de l'entité hydrogéologique ») d'une ou plusieurs couches BDLISA, alors le site est codé avec un niveau de susceptibilité moyen.

Les autres sites sont de nouveau croisés avec les couches de la BDLISA d'ordre supérieur. L'objectif de ces nouveaux croisements est de déterminer quelles nappes couvrent plus de 50 % de la surface de la zone tampon du site. Une fois la nappe déterminée, sa profondeur est déterminée à l'aide des colonnes lithostratigraphiques des ouvrages BSS situés à proximité. Comme pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres, le site est codé avec une susceptibilité moyenne uniquement si plus de 50 % de la surface de la zone tampon est occupée par une unité aquifère et/ou une unité semi-perméable pour la profondeur considérée, sinon il reste codé avec une susceptibilité faible.

Une fois les sites codés avec la susceptibilité moyenne ou faible pour les 3 gammes de profondeur, les sites issus des bases de données BASOL et SIS dont la nappe a été atteinte par la pollution du site (pollution avérée) sont listés. Si ces sites présentent une susceptibilité moyenne pour une gamme de profondeur donnée, une susceptibilité forte est appliquée à la place de la susceptibilité moyenne. En effet, si le site est codé avec une susceptibilité moyenne, cela signifie que la nappe est présente dans la gamme de profondeur considérée et donc polluée par les sites dont la pollution est avérée.

La zone de pollution des eaux souterraines identifiée dans le plan de prévention des risques miniers du bassin ferrifère de May-sur-Orne et conduisant à interdire l'utilisation de l'eau provenant de l'aquifère du "Primaire" a été spécifiquement identifiée lors de l'analyse du phénomène pollution des nappes d'eaux et codée avec une susceptibilité très forte.

Il est à noter que les zones de dénitrification naturelle, bien que présentant un intérêt majeur dans la qualité de l'eau, ne sont pas prises en compte dans le cadre de l'élaboration des zones réglementaires de la GMI. En revanche, en cas de projet de géothermie de minime importance au sein d'une maille classée en zone orange, l'impact des forages sur la dénitrification naturelle

devra être pris en compte. Dans le cas de zone classée en rouge, ces zones de dénitrification naturelles seront prises en compte en dehors du contexte réglementaire de la GMI.

#### **3.5.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

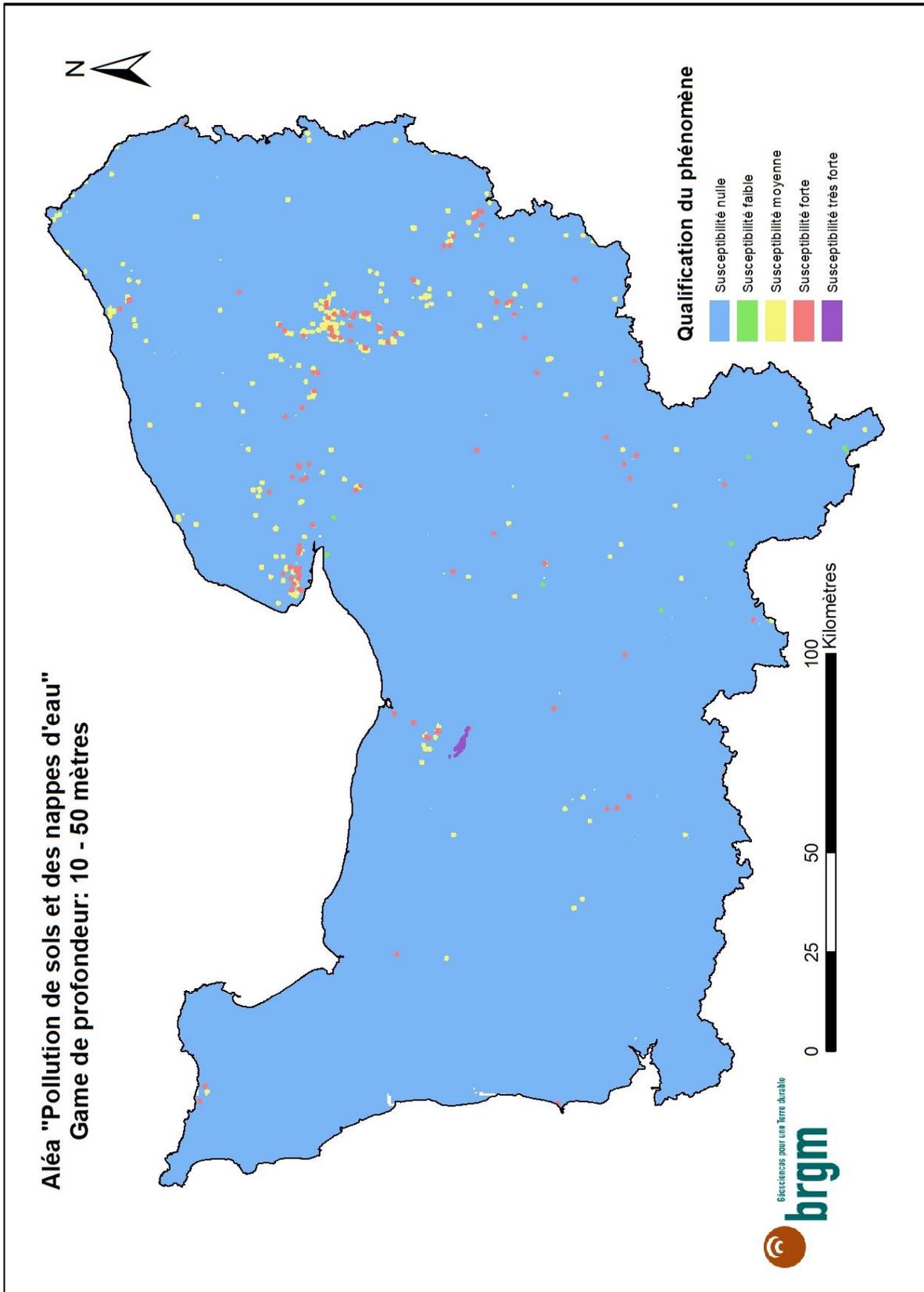


Illustration 19 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

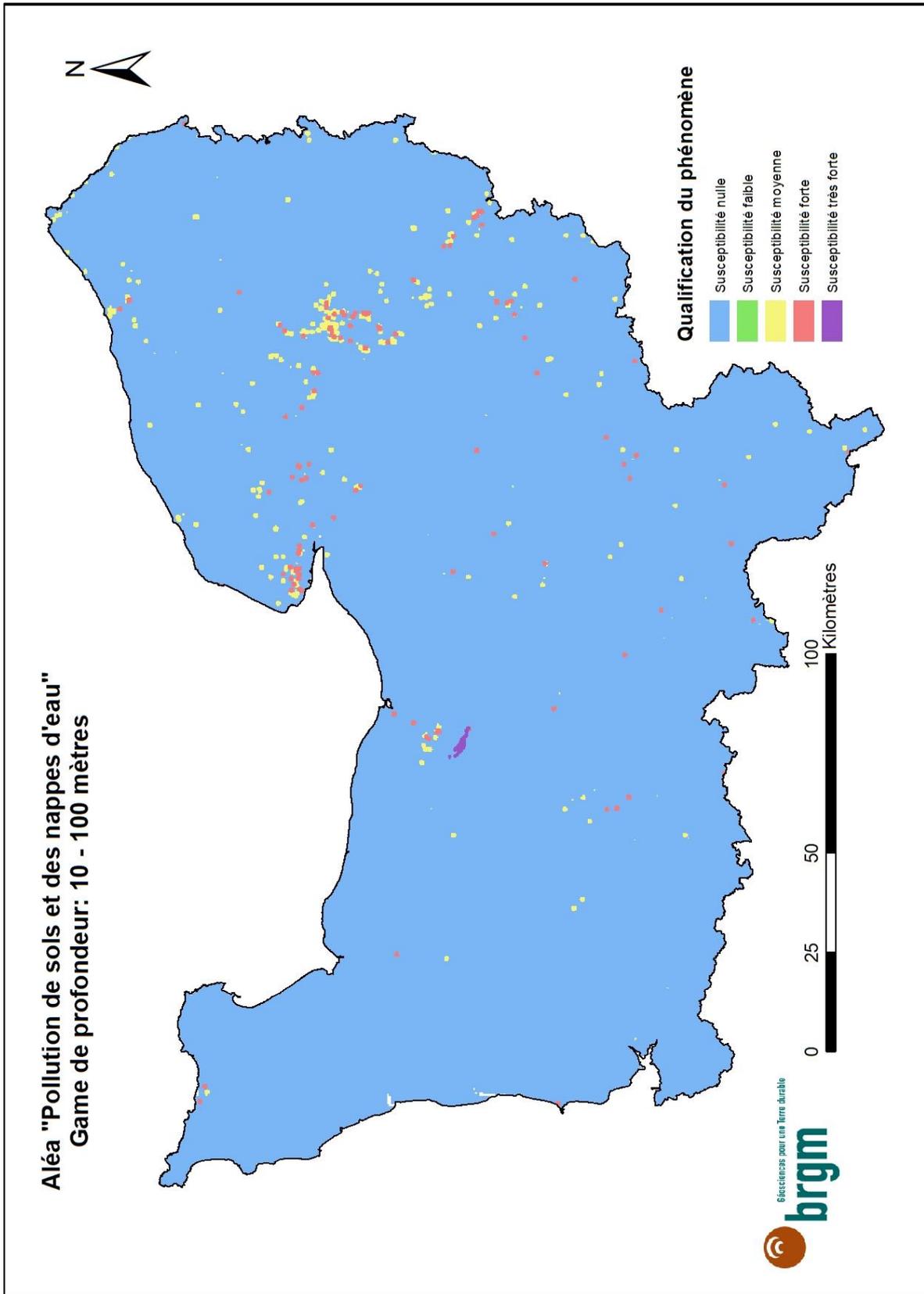


Illustration 20 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

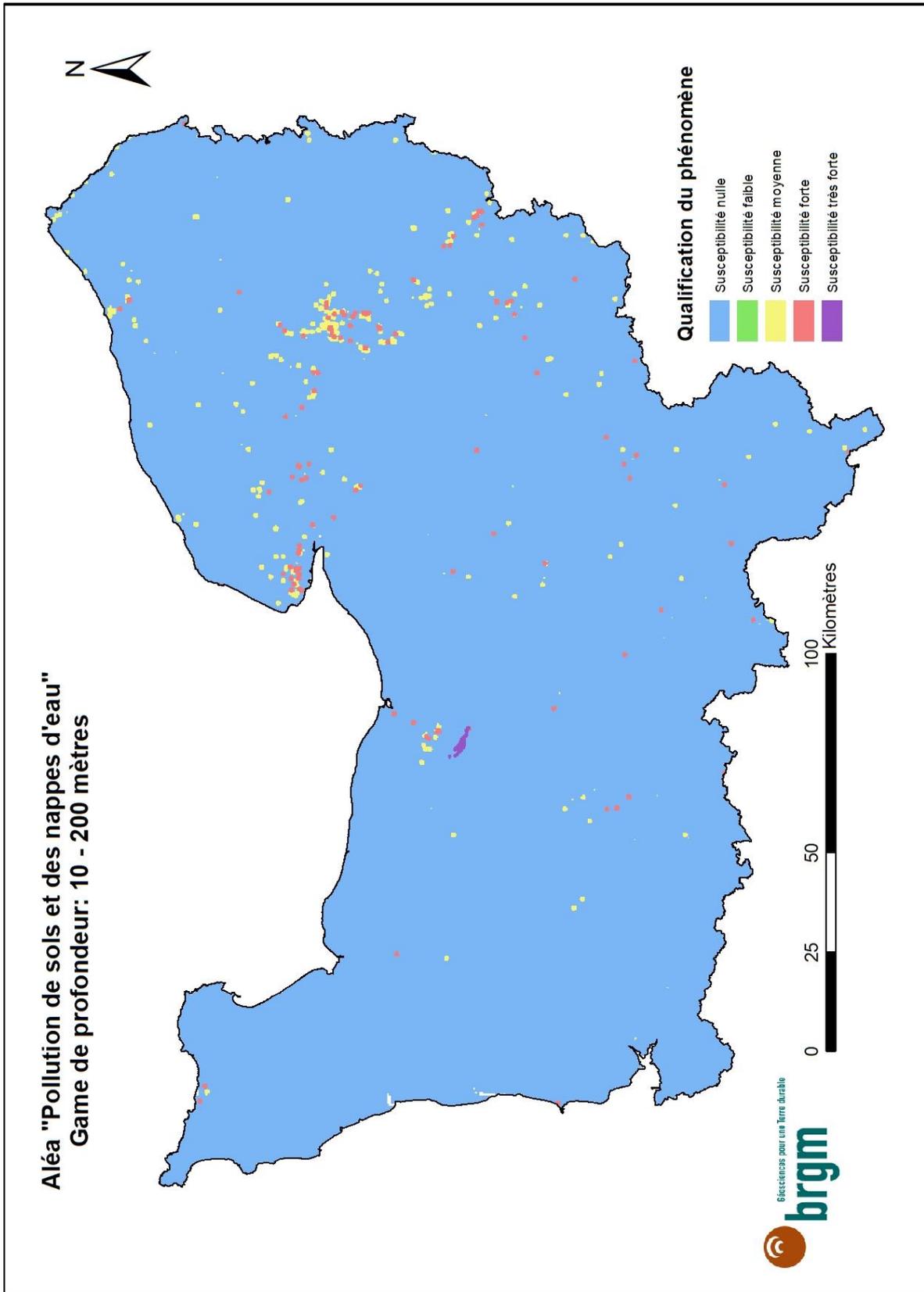


Illustration 21 : Carte d'aléa du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine " pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.5.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Très forte	10	3	3	30	30
Forte	6			18	18
Moyenne	4			12	12
Faible	1			3	3
Nulle	0			0	0

Tableau 5 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine "

### 3.6 PHENOMENE « ARTESIANISME »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.6.1 Description du phénomène

Le phénomène redouté correspond à une remontée d'eau spontanée par les ouvrages (puits, forages) dans le cas d'un aquifère captif. Cette remontée d'eau en surface peut entraîner des écoulements d'eau sur le sol et/ou une déstabilisation d'une formation superficielle.

#### 3.6.2 Qualification du phénomène

Le phénomène « Artésianisme » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide :

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

Cependant la qualification de l'ensemble des phénomènes d'artésianisme avéré avec un niveau d'aléa fort a été jugée trop importante et impactant de façon disproportionnée la note finale pour ce phénomène et donc pour la carte réglementaire. En effet, cette classification ne permet pas de prendre en compte la puissance de l'artésianisme. Ainsi un niveau d'aléa supplémentaire a été créé : niveau faible.

Les qualifications ainsi remaniées et appliquées pour ce phénomène sont les suivantes :

- **Niveau fort** : présence d'un aquifère artésien connu dont la puissance est supérieure à 5 m (c'est-à-dire dont le niveau piézométrique de la nappe se situe plus de 5 m au-dessus du sol en période de basses-eaux) ;
- **Niveau moyen** : présence d'un aquifère artésien connu dont la puissance est comprise entre 0 et 5 m (c'est-à-dire dont le niveau piézométrique de la nappe se situe la surface du sol (0 m) et 5 m au-dessus du sol en périodes de basses-eaux) ;
- **Niveau faible** : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique connu pour être proche de la surface (entre 0 et 1 m de profondeur) en période de basses-eaux ou présenter un niveau piézométrique supérieur à la surface du sol en période de hautes-eaux ;
- **Niveau nul** : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée.

Ces nouvelles qualifications sont propres à la région Normandie.

Ce phénomène a été cartographié pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

### 3.6.3 Données utilisées et méthodologie employée

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015.

La cartographie de cet aléa repose sur la comparaison entre le niveau piézométrique des aquifères par rapport à l'altitude du sol.

La première étape de cartographie de ce phénomène consiste à sélectionner les couches BDLISA de niveau 3 dont l'état renseigné est « Entité hydrogéologique à nappe captive » ou « Entité hydrogéologique à parties libres et captives ».

A partir des données disponibles (cartes piézométriques, données BSS, bibliographie ...) pour les différentes nappes identifiées, leurs niveaux piézométriques sont comparés avec le MNT<sup>1</sup> 25 mètres. Quatre cas se présentent :

- Cas 1 : la nappe présente un niveau piézométrique en basses-eaux supérieur à l'altitude du sol. Si celui-ci est supérieur à 5 m, un niveau fort lui est alors attribué, sinon c'est un niveau moyen qui lui est attribué ;
- Cas 2 : la nappe présente un niveau piézométrique en basses eaux proche du niveau du sol (entre 0 et 1 mètre de profondeur), un niveau faible lui sera attribué ;
- Cas 3 : la nappe présente un niveau piézométrique en hautes-eaux supérieur à l'altitude du sol, un niveau faible lui est alors attribué ;
- Cas 4 : le niveau piézométrique de la nappe ne dépasse pas l'altitude du sol que ce soit en basses-eaux ou en hautes-eaux, le niveau nul lui sera attribué.

Les données utilisées pour chaque nappe identifiée ainsi que les couches BDLISA associées sont présentées dans le tableau ci-dessous.

---

<sup>1</sup> Modèle Numérique de Terrain, source BD ALTI®

NAPPES	COUCHES BDLISA (niveau 2)	DONNEES UTILISEES	
Nappes des bassins sédimentaires tertiaires	104AG	Bibliographie (BRGM/RP-69128-FR)	
Nappes tertiaires (Eocène, Lutétien et Yprésien)	113AK 113AQ	113AV	Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le bassin parisien (BRGM/RP-64887-FR)
Nappes tertiaires (Oligocène et Miocène)	107AC	107AK	Ouvrages disponibles dans la BSS avec au moins une mesure de niveau d'eau
Nappes du Séno-Turonien	119AC		Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie. Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux (basses-eaux 2006, hautes-eaux 2001)
Nappes du Cénomanién	121AA 121AB	121AP 121AS	Atlas hydrogéologique 2007 du Calvados (piézométrie en basses-eaux et hautes-eaux) Carte piézométrique du Cénomanién de 2003 (réalisée par SOGREAH) au sein du bassin versant Loire-Bretagne
Nappes de l'Aptien-Albien et Néocomien	127AA	127AG	Carte piézométrique synchrone de la nappe de l'Albien du Bassin parisien, année 2018 Carte de la nappe du Néocomien dans le bassin de Paris, année 1997
Nappes du Tithonien-Oxfordien	131AA 135AA	137AB	Ouvrages disponibles dans la BSS avec au moins une mesure de niveau d'eau
Nappes du Bathonien-Bajocien	139AC 139AD 139AF	139AM 139AN 139AP	Atlas hydrogéologique 2007 du Calvados (piézométrie en basses-eaux et hautes-eaux)
Nappes du Lias	141AC	141AG	Ouvrages disponibles dans la BSS avec au moins une mesure de niveau d'eau
Nappes du Trias	143AB	144AA	Ouvrages disponibles dans la BSS avec au moins une mesure de niveau d'eau

*Illustration 22 : Données utilisées et couches BDLISA associées aux nappes identifiées comme potentiellement captives*

Une fois les différents niveaux attribués pour chaque nappe, ceux-ci sont divisés selon les 3 gammes de profondeur : 10 - 50, 10 - 100 et 10 - 200 mètres. Les données utilisées pour les définir sont les mêmes que pour le phénomène « Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères ». Ces données sont présentées dans l'illustration 26.

Enfin, les niveaux sont regroupés par gammes de profondeur afin d'obtenir les cartes finales pour ce phénomène.

### **3.6.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

Ce phénomène se localise essentiellement dans les vallées à de faibles profondeurs car les toits des aquifères artésiens y sont majoritairement moins profonds, même s'ils sont présents sur un territoire plus large. Ainsi ce phénomène est également présent sous les plateaux mais pour des profondeurs plus importantes. C'est par exemple le cas de la principale nappe artésienne de Normandie : la nappe de l'Albien.

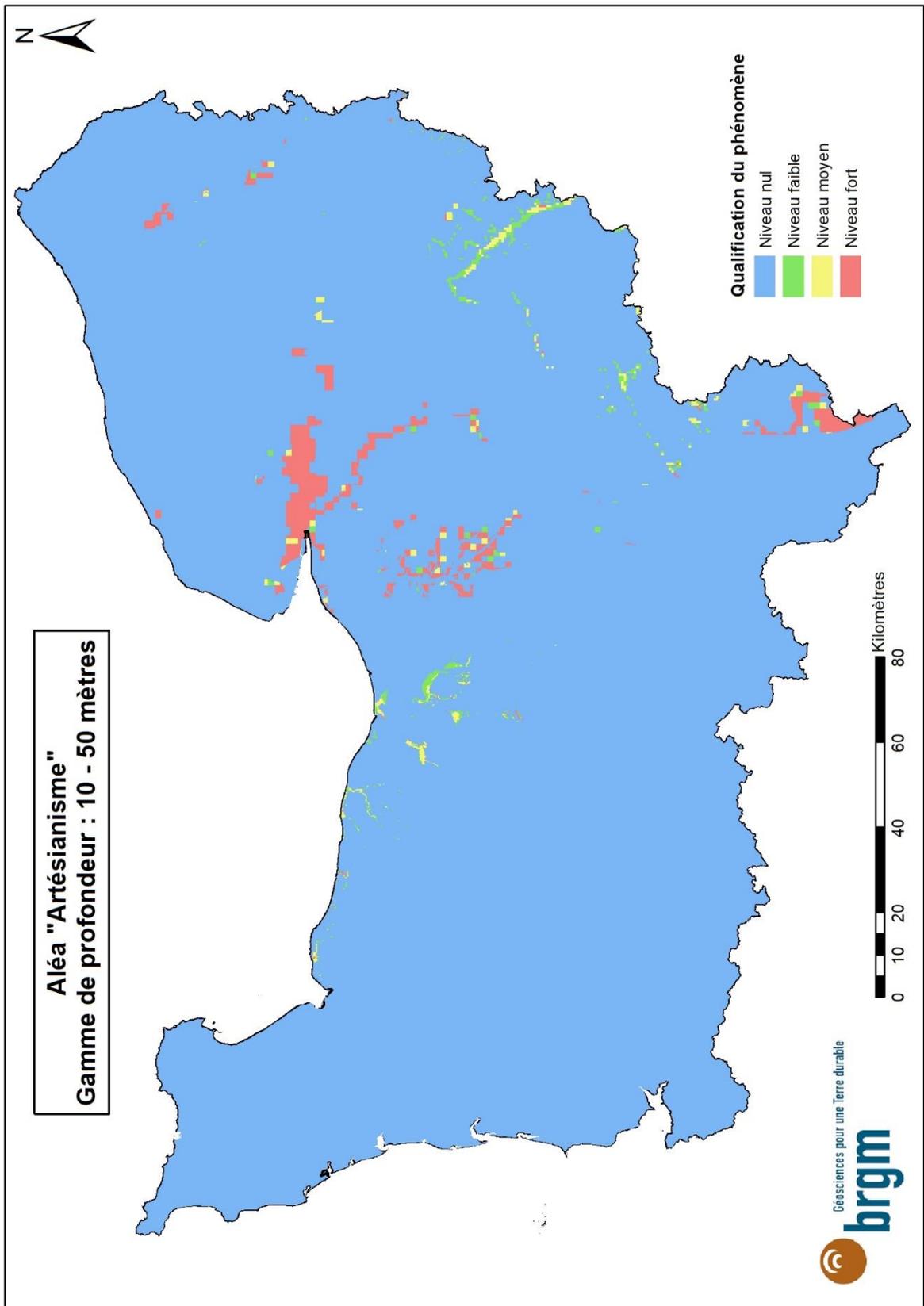


Illustration 23 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

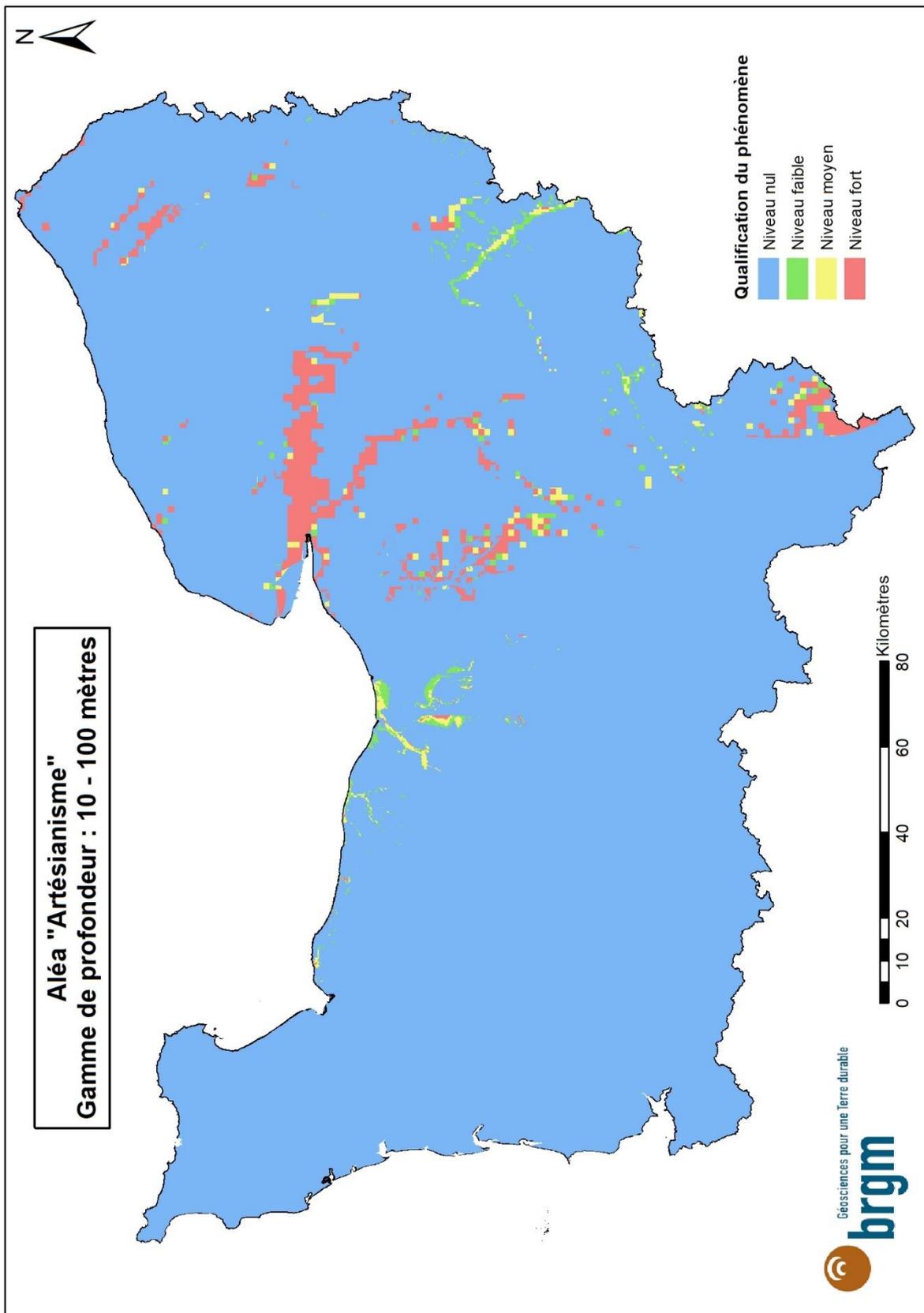


Illustration 24 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

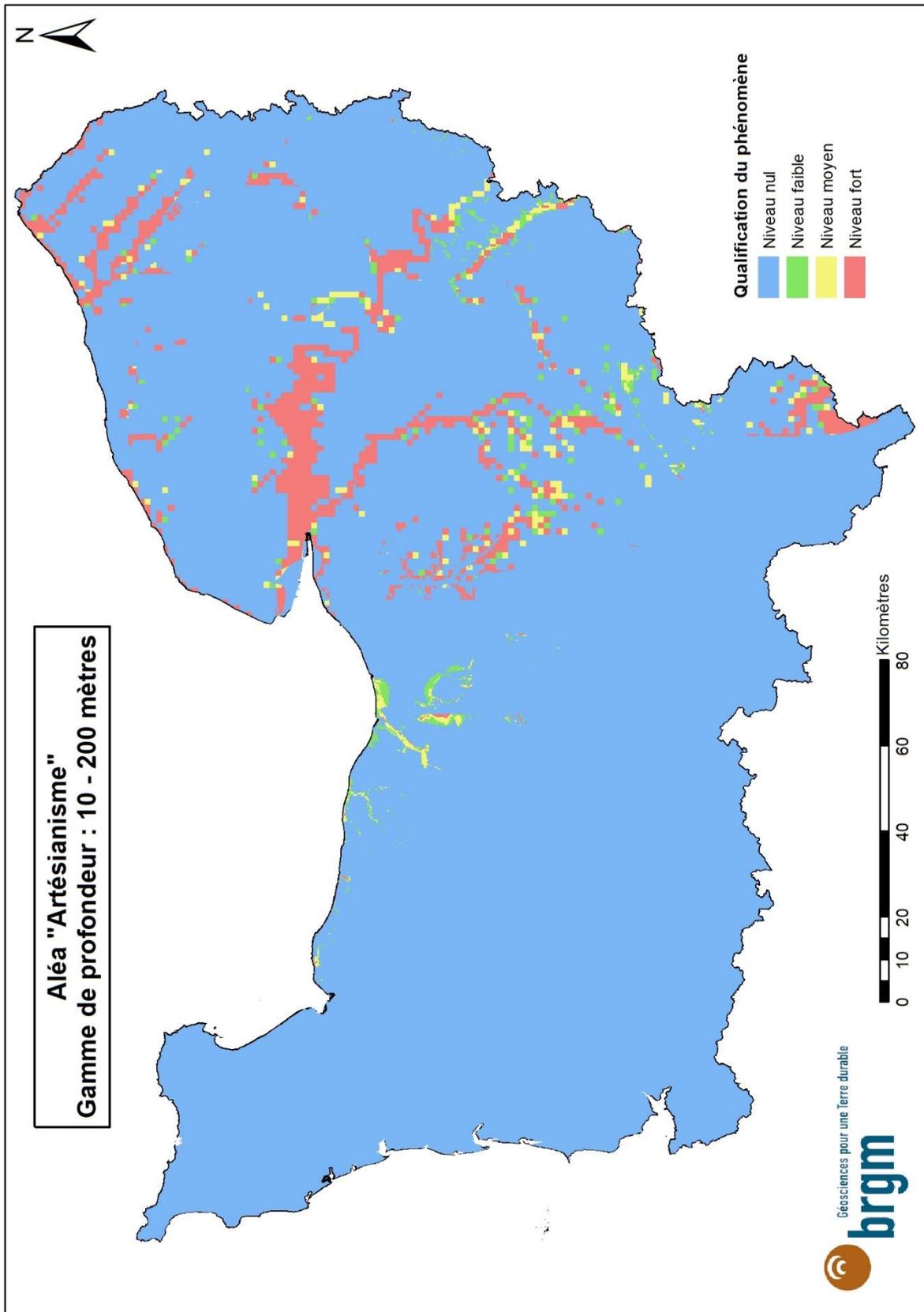


Illustration 25 : Carte d'aléa du phénomène "Artésianisme" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.6.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Forte	7	2	4	14	28
Moyenne	3			6	12
Faible	1			2	4
Nulle	0			0	0

Tableau 6 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Artésianisme "

### 3.7 PHENOMENE « MISE EN COMMUNICATION DES EAUX SOUTERRAINES ENTRE DIFFERENTS AQUIFERES »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.7.1 Description du phénomène

Le phénomène redouté est celui de la mise en communication des eaux de deux aquifères distincts. Cette mise en communication peut entraîner :

- Une dégradation de la qualité de l'eau dans l'un des aquifères si l'un d'eux est pollué ;
- Une modification des caractéristiques chimiques des aquifères s'ils ne présentent pas le même faciès géochimique ;
- Une baisse du niveau piézométrique d'un aquifère pouvant entraîner des assèchements de captages voisins, voire des désordres géotechniques ;
- Une augmentation du niveau piézométrique d'un aquifère superficiel pouvant entraîner une remontée d'eau à la surface et une inondation potentielle.

#### 3.7.2 Qualification du phénomène

Le phénomène « Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide :

- **Susceptibilité moyenne** : présence de plusieurs aquifères dont une ressource stratégique NAEP<sup>2</sup> dans l'intervalle considéré ;
- **Susceptibilité faible** : présence de nappes superposées dans l'intervalle considéré ;
- **Susceptibilité nulle** : absence d'aquifère ou présence d'un seul aquifère dans l'intervalle de profondeur considéré.

Ce phénomène a été cartographié pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

#### 3.7.3 Données utilisées et méthodologie employée

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015.

La cartographie de cet aléa repose sur la stratigraphie des aquifères au sein de la Normandie. Cette superposition est présentée dans le tableau ci-dessous ainsi que les couches BDLISA et les données utilisées.

Dans un premier temps, les contours des nappes normandes ont été définis à partir de la BDLISA de niveau 2 (les couches BDLISA sélectionnées sont présentées dans le tableau ci-dessous). Puis dans un second temps, les gammes de profondeur au sein desquelles chaque nappe se situe ont été définies (les données utilisées pour les définir sont présentées dans le tableau ci-dessous).

---

<sup>2</sup> Nappes à réserver pour l'alimentation en eau potable

Aquifères	Couches BDLISA utilisées (niveau 2)		Données disponibles pour déterminer la profondeur
Nappes alluviales	161AA 920AA 922AA	924AA 924AC 937AB	Pas de profondeur définie car il s'agit de nappes de surface
Nappe du Tertiaire	107AC 107AK 113AD 113AK	113AQ 113AV 119AC	Logs disponibles dans la BSS
Nappe des Faluns	104AG		<ul style="list-style-type: none"> <li>D'après la bibliographie (RP-69128-FR)</li> <li>Logs disponibles dans la BSS</li> </ul>
Nappe de la Craie (Sénonien, Turonien et Cénomanién)	121AA 121AB 121AI 121AJ 121AP 121AS 121AU 121AV 121AW 121AX	121AZ 123BI 123BJ 123BS 123BU 123BV 123BW 123BX 123BZ	Logs disponibles dans la BSS
Nappe des sables du Cénomanién	123AB et 123AC		Logs disponibles dans la BSS
Nappe de l'Albien et Néocomien	127AA et 127AG		Modèle géologique de l'Albien pour le Bassin Parisien
Nappe de l'Oxfordien	131AA et 135AA		Logs disponibles dans la BSS
Nappe du Bathonien	139AC et 139AM		<ul style="list-style-type: none"> <li>Modèle géologique des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (RP-62006-FR)</li> </ul>
	139AD et 139AF		
Nappe du Bajocién	139AP		<ul style="list-style-type: none"> <li>Logs disponibles dans la BSS</li> </ul>
Nappe du Lias	141AG		Logs disponibles dans la BSS
Nappe du Trias	144AA		Logs disponibles dans la BSS
Nappes de Socle	163AG 164AA 165AA 165AC 167AA 167AC 169AA 169AC 169AE	170AA 170AC 170AE 171AA 171AC 173AA 177AA 179AA 179AC	Pas de profondeur à définir car il s'agit des nappes de base

Illustration 26 : Couches BDLISA et données utilisées pour caractériser les nappes normandes

Une fois l'ensemble des gammes de profondeur définies pour chaque nappe, celles-ci sont croisées afin d'identifier les secteurs où elles se superposent. Ces secteurs sont codés avec une susceptibilité faible. Les autres secteurs sont codés avec une susceptibilité nulle.

Les secteurs de susceptibilité moyenne sont définis par rapport à la présence d'une ressource stratégique NAEP dans la gamme de profondeur considérée.

Les nappes d'eau souterraines retenues en tant que ressources stratégiques sont celles listées dans les SDAGE de Loire-Bretagne (Comité de bassin Loire-Bretagne, 2015) et de Seine-Normandie (Adage environnement, 2020) ainsi que celles susceptibles de l'être :

- La masse d'eau GG067, Calcaires à silex et marnes captifs du Dogger sud bassin parisien ;
- La masse d'eau GG073, Calcaires captifs du Jurassique supérieur sud bassin parisien ;
- La masse d'eau GG079, Calcaires et marnes du Lias et Dogger mayennais et sarthois Libres ;
- La masse d'eau GG081, Sables et grès du Cénomaniens sarthois libres ;
- La masse d'eau GG130, Calcaires du Lias du bassin parisien captifs ;
- La masse d'eau GG131, Grès et arkoses du Berry captifs ;
- La masse d'eau GG142, Sables et grès du Cénomaniens captifs ;
- La masse d'eau HG101, Isthme du Cotentin ;
- La masse d'eau HG211, Craie altérée du Neubourg - Iton - Plaine St-André uniquement sur le territoire du SAGE Iton et du SAGE Avre ;
- La masse d'eau HG218, Albien - Néocomien captif ;
- La masse d'eau HG220, Craie altérée de l'estuaire de la Seine hors pointe de Caux uniquement sur le territoire de l'AAC Cailly-Aubette-Robec, de l'AAC Radicatel et du SCOT Normandie Rouen Métropole ;
- La masse d'eau HG308, Bathonien - Bajocien - Plaine de Caen et du Bessin ;
- La masse d'eau HG403, Trias-Lias du Cotentin.

Si les secteurs correspondant à ces nappes d'eau souterraines présentaient une susceptibilité faible pour une gamme de profondeur donnée, alors elle est remplacée par une susceptibilité moyenne. En revanche, s'il présentait une susceptibilité nulle alors ce niveau de susceptibilité n'était pas modifié.

#### **3.7.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

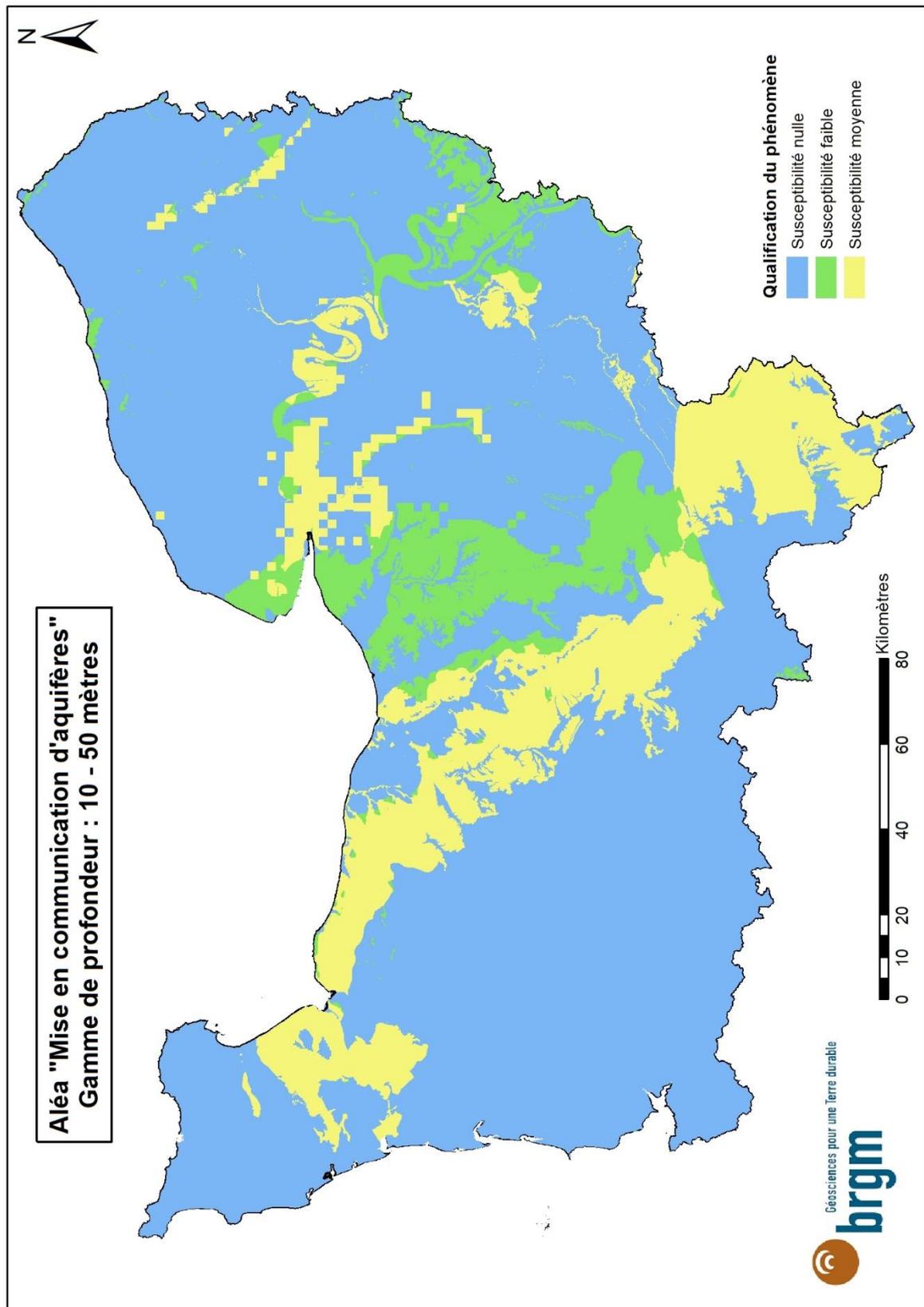


Illustration 27 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

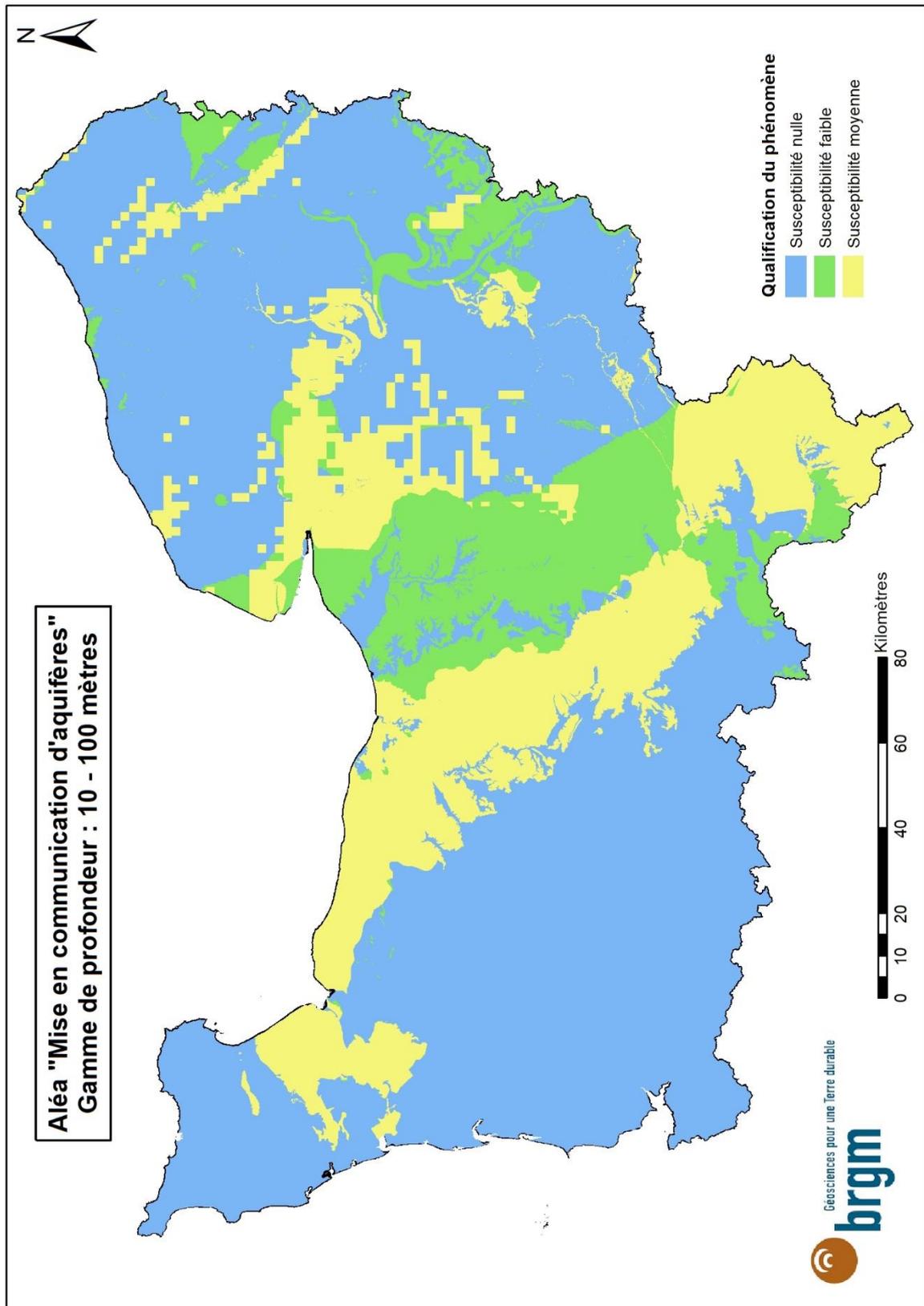


Illustration 28 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

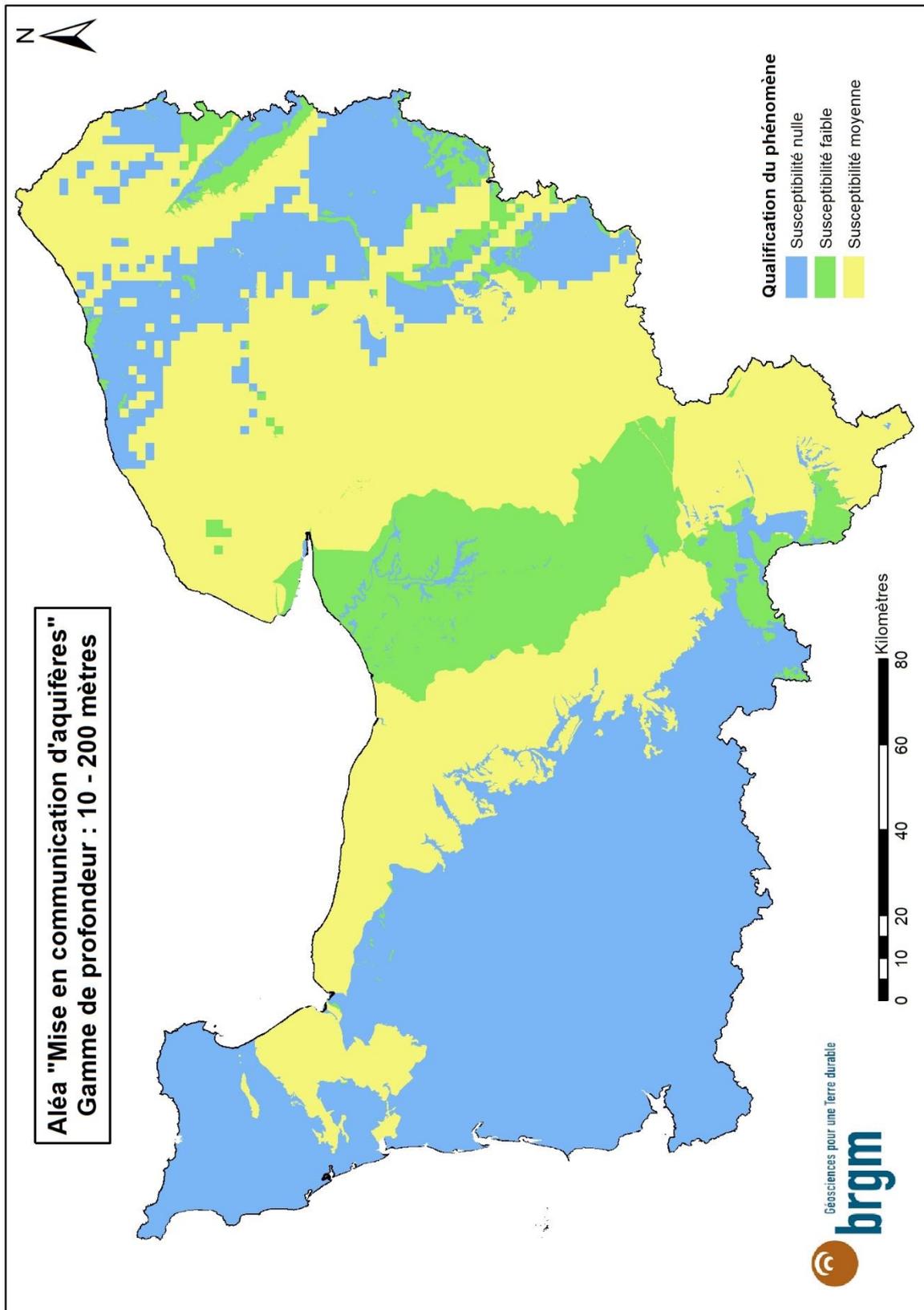


Illustration 29 : Carte d'aléa du phénomène "Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.7.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Moyenne	4	4	4	16	16
Faible	1			4	4
Nulle	0			0	0

Tableau 7 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Mise en communication des eaux souterraines entre différents aquifères "

### 3.8 PHENOMENE « INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.8.1 Description du phénomène

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

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

#### 3.8.2 Qualification du phénomène

Le phénomène « Inondation par remontée de nappe » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide :

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

Ce phénomène n'a été cartographié que pour la gamme de profondeur 10-50 m car il s'agit exclusivement d'un phénomène de surface.

#### 3.8.3 Données utilisées et méthodologie employée

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015.

La cartographie de cet aléa repose essentiellement sur la cartographie nationale de sensibilité aux remontées de nappe (Brugeron et al., 2017). Cette cartographie distingue 2 types de zones : les « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » et les « zones potentiellement sujettes aux inondations de caves ».

Les « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » ont été codées avec un niveau « Faible » tandis que les « zones potentiellement sujettes aux inondations de caves » l'ont été avec un niveau « Nul ».

Cependant, certains secteurs doivent être exclus des zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe et donc codés avec un niveau « Nul ». Ces secteurs sont :

- les terrains affleurants imperméables car ils empêchent le débordement en surface de nappes potentiellement captives sous-jacentes. Ces terrains sont déterminés à partir des couches BDLISA de niveau 3 ;
- les terrains affleurants de type karstique dont la forte hétérogénéité des écoulements empêche leur intégration au sein de cette approche globale. Ces terrains sont également déterminés à partir des couches BDLISA de niveau 3 ;

- les terrains urbanisés (tissu urbain continu et discontinu) car ils contiennent des aménagements souterrains (canalisations, réseaux enterrés, etc.) susceptibles de perturber de façon non négligeable la dynamique d'écoulement des eaux souterraines. Ces terrains sont définis à partir des données d'occupation des sols issues de Corine Land Cover de 2018.

Une fois les secteurs exclus, une première carte d'aléa est établie. Afin de vérifier la délimitation des zones de niveaux « Faible » et « Nul », ceux-ci sont croisés avec les ouvrages piézométriques présentant au moins une mesure de niveau de nappe comprise entre 0 et 5 mètres sous la surface du sol. Ces données sont issues de la BSS et d'ADES.

Les cas de figures rencontrés suite à ce croisement sont les suivants :

- 1<sup>er</sup> cas : l'ouvrage piézométrique se situe sur une zone à niveau « Faible ». Ce croisement est donc correct ;
- 2<sup>ème</sup> cas : l'ouvrage se situe sur une zone à niveau « Nul » car correspondant à l'un des 3 secteurs exclus. Ce croisement est donc correct ;
- 3<sup>ème</sup> cas : l'ouvrage se situe sur une zone à niveau « Nul » et qui ne correspond pas à l'un des 3 secteurs exclus. Une analyse au cas par cas de ces ouvrages est réalisée, pouvant amener à l'ajout d'une zone tampon de 250 m autour de l'ouvrage codé en niveau « Faible ».

#### **3.8.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour la gamme de profondeur 10-50 m est présentée ci-dessous (les profondeurs plus importantes n'étant pas affectées par ce phénomène).

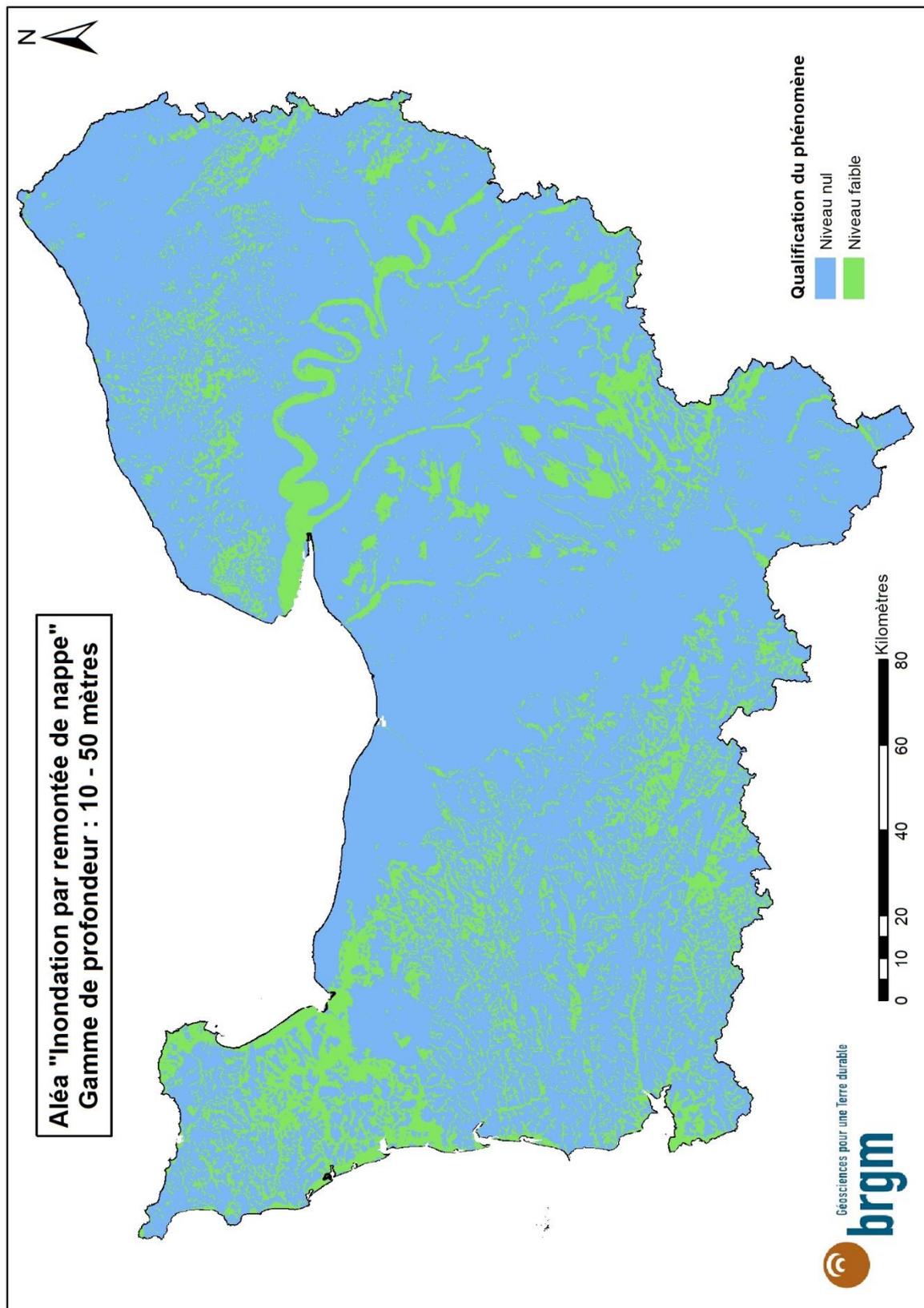


Illustration 30 : Carte d'aléa du phénomène "Inondation par remontée de nappe" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

### 3.8.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Faible	1	2	0	2	0
Nulle	0			0	0

Tableau 8 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Inondation par remontée de nappe "

### 3.9 PHENOMENE « BISEAU SALE »

Ce phénomène a été traité par le BRGM.

#### 3.9.1 Description du phénomène

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

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

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

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

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

#### 3.9.2 Qualification du phénomène

Le phénomène « Biseau salé » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide :

- **Niveau fort** : présence d'un aquifère présentant des intrusions salines avérées ;
- **Niveau faible** : présence d'un aquifère pouvant potentiellement présenter des intrusions salines ;
- **Niveau nul** : le biseau salé n'est pas présent dans l'intervalle de profondeur considéré.

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

### 3.9.3 Données utilisées et méthodologie employée

La méthodologie appliquée pour ce phénomène a été adaptée par rapport au guide de 2015.

La cartographie de cet aléa a été réalisée en 3 grandes étapes.

#### Cartographie de la Basse-Normandie

La cartographie de l'aléa du biseau salé au sein de l'ex-région Basse-Normandie s'appuie sur l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale (Laurent et al., 2017).

Cette étude a eu pour objectif de cartographier la vulnérabilité aux intrusions salines des aquifères côtiers de l'ex-région Basse-Normandie selon une approche multicritères basée sur la méthode GALDIT (décrite au point suivant). Au terme de cette étude, 3 classes de vulnérabilités ont été définies : forte, moyenne et faible.

Chacune de ces classes de vulnérabilités a été associée à un niveau d'aléa :

- Classe de vulnérabilité forte a été associée au niveau fort ;
- Classe de vulnérabilité moyenne a été associée au niveau faible ;
- Classe de vulnérabilité faible a été associée au niveau nul.

#### Cartographie de la Haute-Normandie

Malheureusement, l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines, mentionnée au point précédent, ne concerne pas les aquifères de l'ex-région Haute-Normandie. Ainsi, dans un souci d'harmonisation de la cartographie de cet aléa à l'échelle de la Normandie, la méthode appliquée dans cette étude a été appliquée aux aquifères côtiers de l'ex-région Haute-Normandie.

L'analyse multicritères qui a été développée repose sur 3 paramètres qui sont combinés au sein d'une formule de classifications à index et auxquels un poids a été défini.

$$V_{act} = \frac{\sum(Poids * rang)}{\sum Poids}$$

Illustration 31 : Formule de calcul de la vulnérabilité des aquifères côtiers (Laurent et al., 2017)

Paramètres	Poids
Conductivité hydraulique (A) et épaisseur de la zone saturée (E)	3
Epaisseur de la zone saturée au-dessus du niveau marin (L) en mètres	4
Distance à la côte (D) en mètres	2

Illustration 32 : Paramètres utilisés pour le calcul de la vulnérabilité des aquifères côtiers (Laurent et al., 2017)

Le premier paramètre « Conductivité hydraulique (A) et épaisseur de la zone saturée (E) » est déterminé à partir de la géologie de l'aquifère considéré. Les données de la BDLISA de niveau 3 ont été utilisées pour délimiter ce paramètre.

Le second paramètre « Epaisseur de la zone saturée au-dessus du niveau marin (L) en mètres » est obtenue à partir du niveau piézométrique des nappes. Les atlas de la craie des départements de la Seine-Maritime et de l'Eure de 1990 ont été utilisés pour définir ce paramètre.

Enfin le troisième paramètre « Distance à la côte (D) en mètres » a été défini à partir du trait de côte Histolitt.

La vulnérabilité des aquifères côtiers de la Haute-Normandie a ainsi été calculée à l'aide de ces 3 paramètres puis divisée en 3 classes.

### Cas particulier de l'estuaire de la Seine dans la cartographie de la Haute-Normandie

La Seine aval correspond à toute la partie de l'estuaire qui est soumise à la marée dynamique. Elle s'étend du barrage de Poses jusqu'à son embouchure et se divise en 3 grandes parties (Illustration 33) :

- Estuaire fluvial : eau douce soumise à la marée dynamique ;
- Estuaire moyen : mélange d'eau douce et d'eau marine ;
- Estuaire marin : soumis entièrement à la marée dynamique.

Ainsi l'estuaire moyen correspond à la limite de l'intrusion saline au sein de l'estuaire de la Seine. Cette limite se situe au niveau de la ville de Caudebec-en-Caux (Dubrulle-Brunaud, 2007).

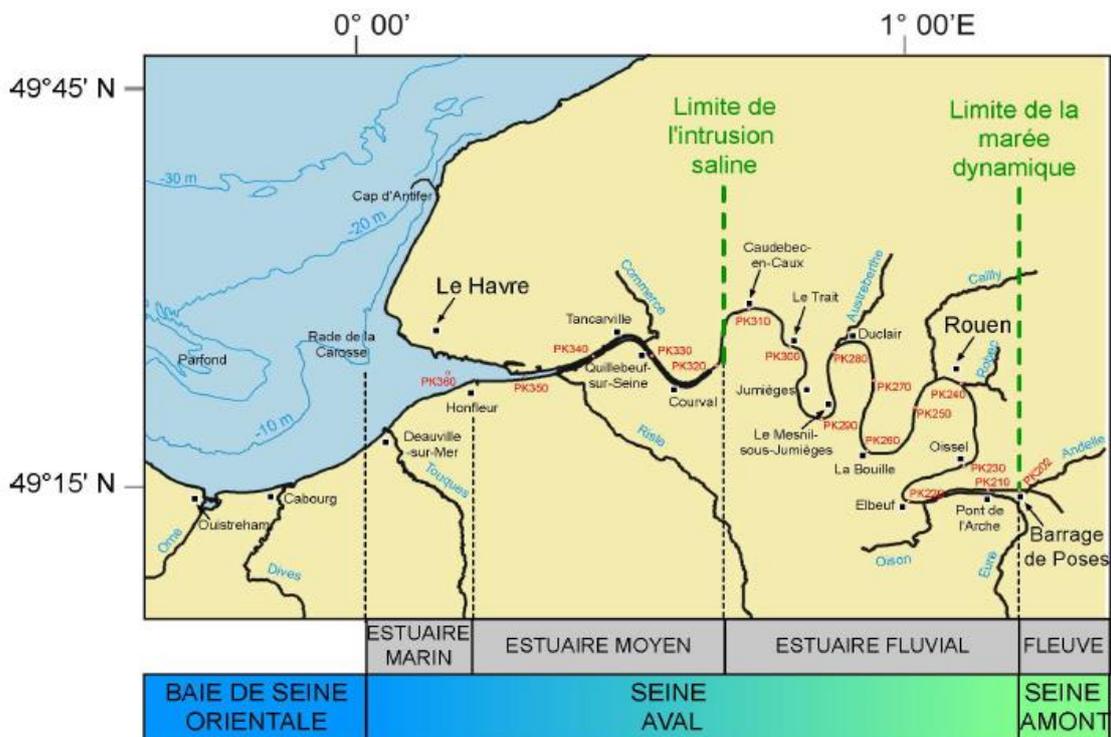


Illustration 33 : Système estuarien de la Seine, limite de l'intrusion saline (Dubrulle-Brunaud, 2007)

La cartographie de l'aléa du biseau salé au niveau de l'estuaire de la Seine a donc été coupée à la limite de l'estuaire moyen. L'estuaire fluvial et la Seine amont ont été cartographiés avec un niveau nul pour les 3 gammes de profondeurs.

#### Définition des gammes de profondeurs

Une fois l'ensemble des aquifères côtiers de la Normandie cartographiées en 3 niveaux pour l'aléa du biseau salé, les différentes gammes de profondeur ont pu être déterminées.

Celles-ci ont été définies à partir du principe de Ghyben-Herzberg sur le biseau salé. Ce principe repose sur le fait qu'en un point quelconque de l'aquifère, l'interface entre l'eau douce et l'eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer.

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

Les données utilisées pour définir ces profondeurs sont :

- Pour les gammes de profondeur 10 - 100 mètres et 10 - 200 mètres : les isopièzes des atlas de la craie des départements de la Seine-Maritime et de l'Eure de 1990 et les isopièzes définies dans l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale.
- Pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres : le MNT 1 mètre.

#### **3.9.4 Cartographie du phénomène redouté**

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous.

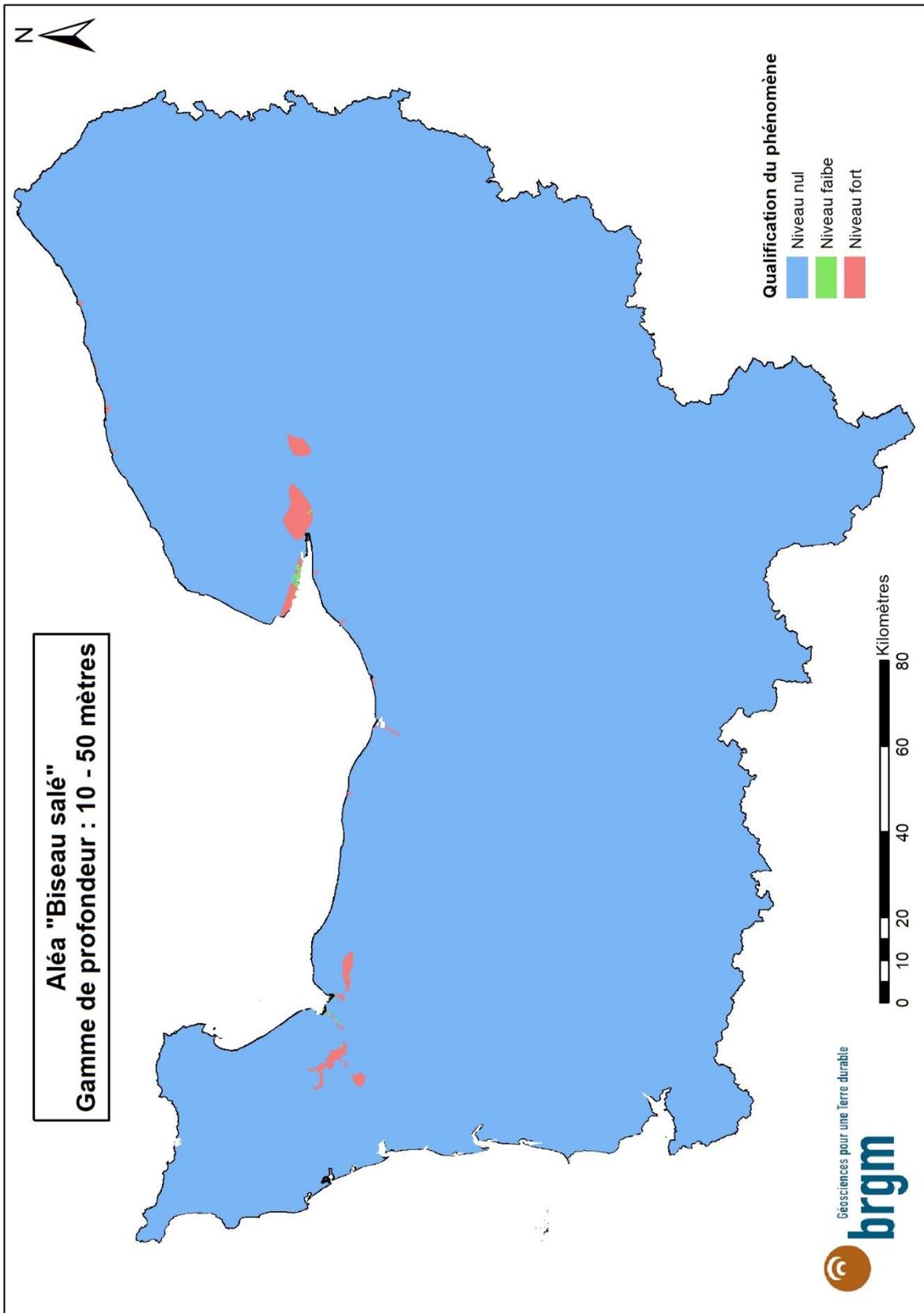


Illustration 34 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres

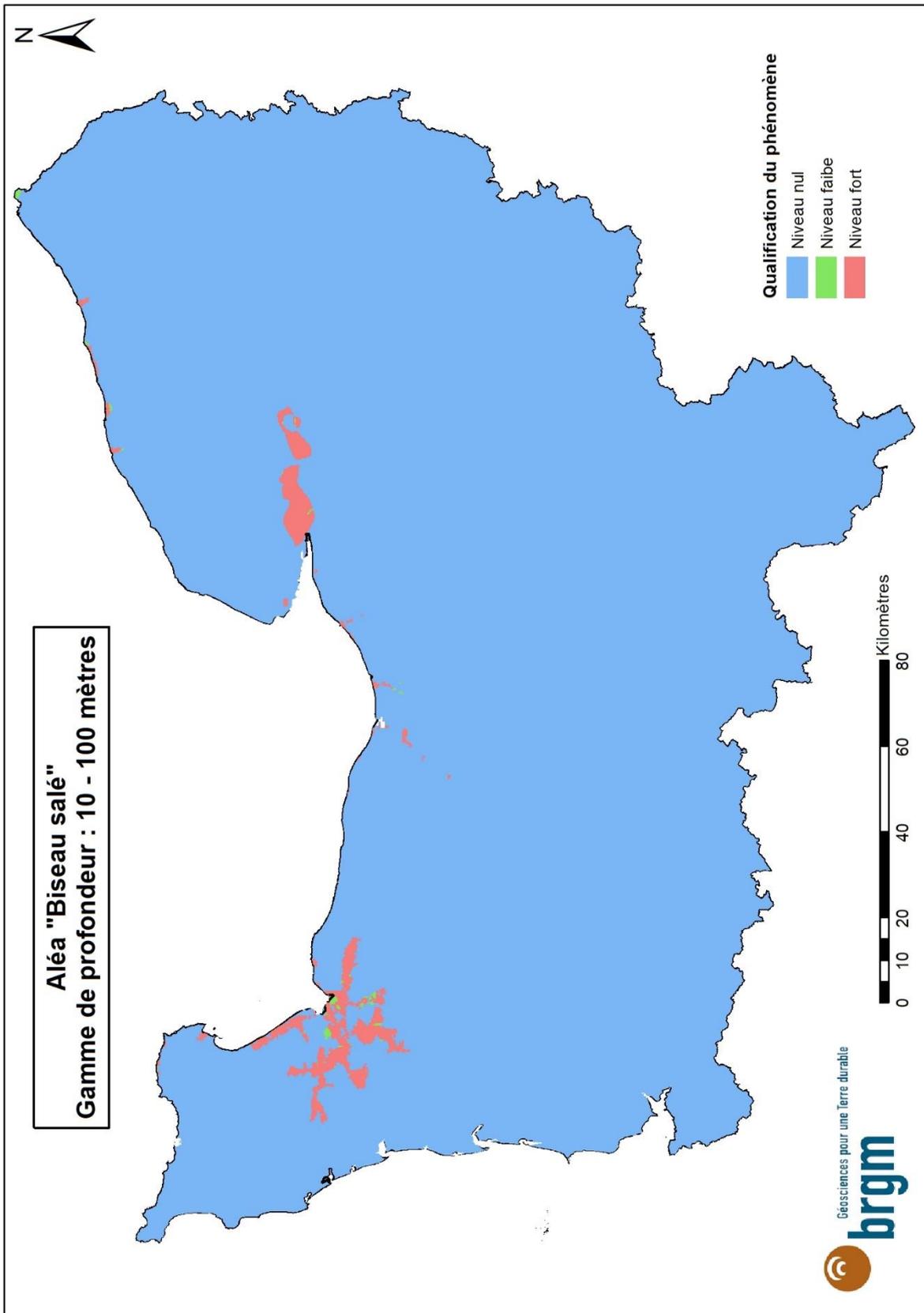


Illustration 35 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres

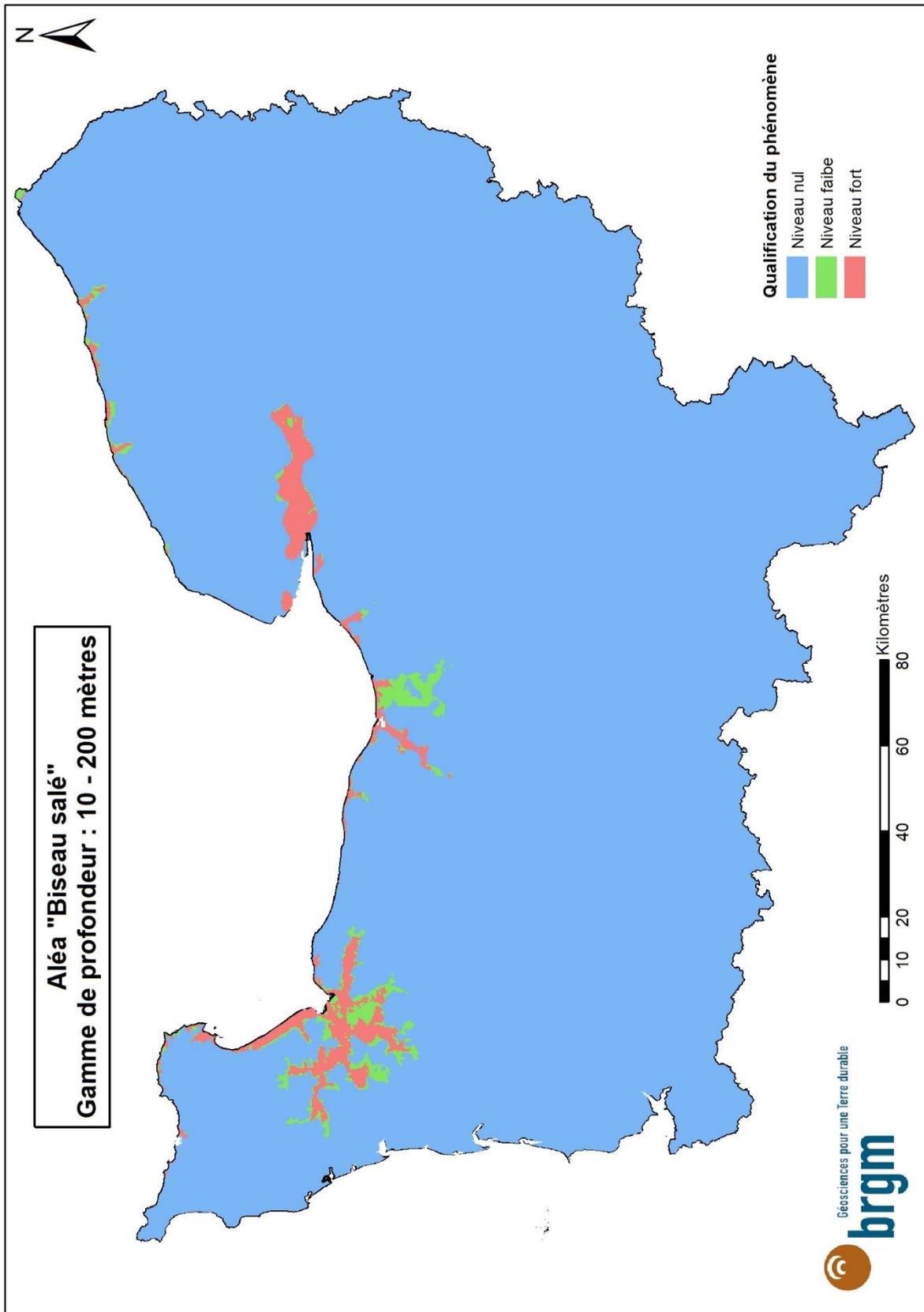


Illustration 36 : Carte d'aléa du phénomène "Biseau salé" pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres

### 3.9.5 Cotation des niveaux d'aléa

Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléas de ce phénomène sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Susceptibilité	Niveau d'aléa	Facteur aggravant		Résultat maximal	
		Doublets	SGV	Doublets	SGV
Fort	4	4	0	16	0
Faible	1			4	0
Nulle	0			0	0

Tableau 9 : Cotation et facteur aggravant du phénomène " Biseau salé "



## 4. Cartes réglementaires

Suite à l'élaboration des cartes d'aléas et à leur croisement conformément à l'analyse multicritères définie dans la méthodologie nationale (MEDDE, 2015), les cartes réglementaires suivantes ont été obtenues.

La répartition des 3 zones réglementaires au sein de la région Normandie est présentée dans les tableaux ci-dessous en fonction de la surface occupée et de la population (les données utilisées sont celles de 2017, disponibles sur le site de l'Institut national de la statistique et des études économiques).

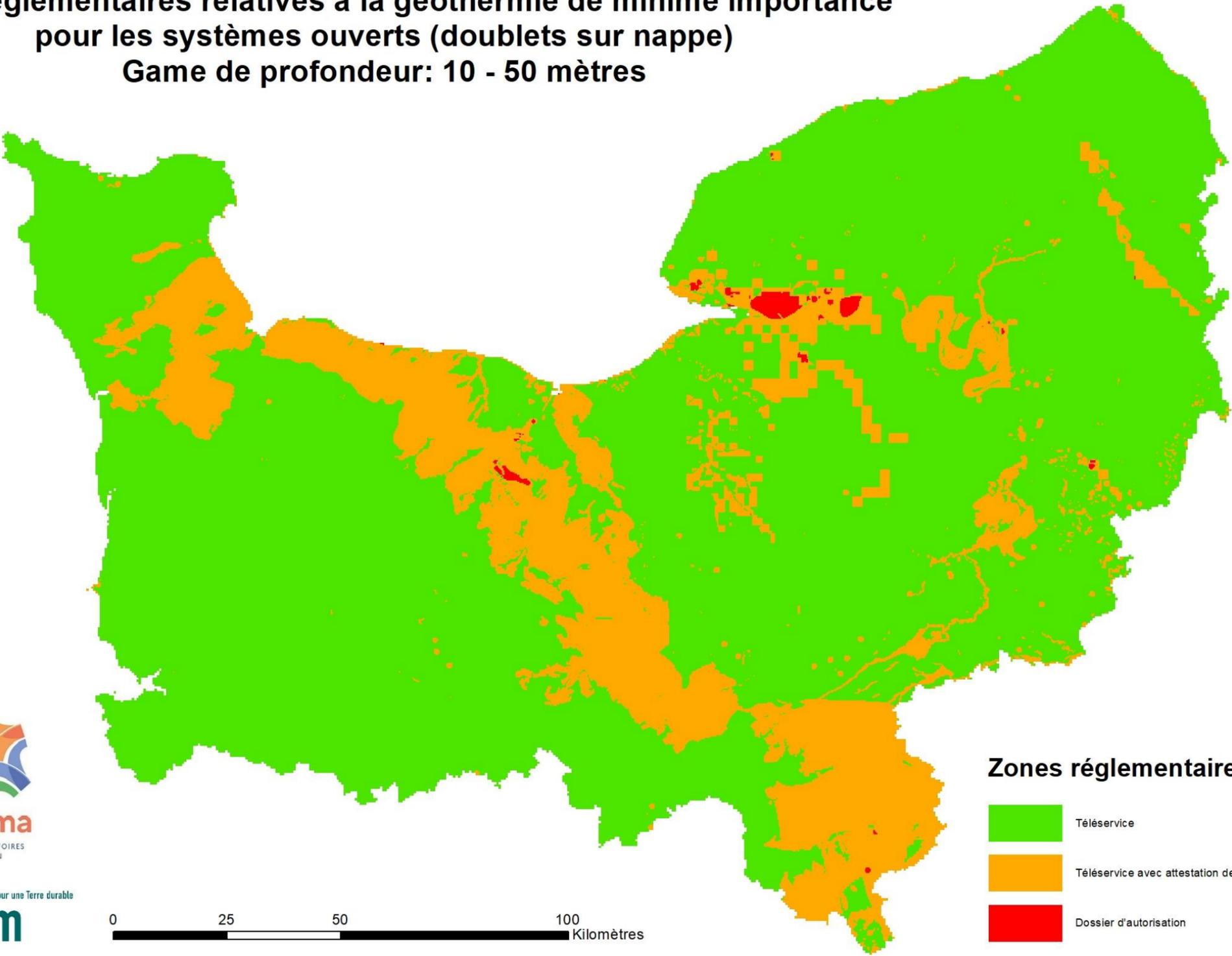
Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
<b>10 - 50 mètres</b>	81 %	71 %	79 %	71 %
	19 %	28 %	19 %	27 %
	< 1 %	1 %	1 %	2 %

Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
<b>10 - 100 mètres</b>	74 %	57 %	72 %	56 %
	26 %	41 %	25 %	37 %
	< 1 %	2 %	3 %	7 %

Gamme de profondeur	Doublets sur nappe		Sondes géothermiques verticales	
	Surface occupée	Population concernée	Surface occupée	Population concernée
<b>10 - 200 mètres</b>	55 %	36 %	54 %	36 %
	44 %	60 %	41 %	53 %
	1%	4 %	6 %	11 %



### Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour les systèmes ouverts (doublets sur nappe) Game de profondeur: 10 - 50 mètres



#### Zones réglementaires

-  Téléservice
-  Téléservice avec attestation de compatibilité
-  Dossier d'autorisation



Illustration 37 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 50 mètres



### Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour les systèmes ouverts (doublets sur nappe) Game de profondeur: 10 - 100 mètres

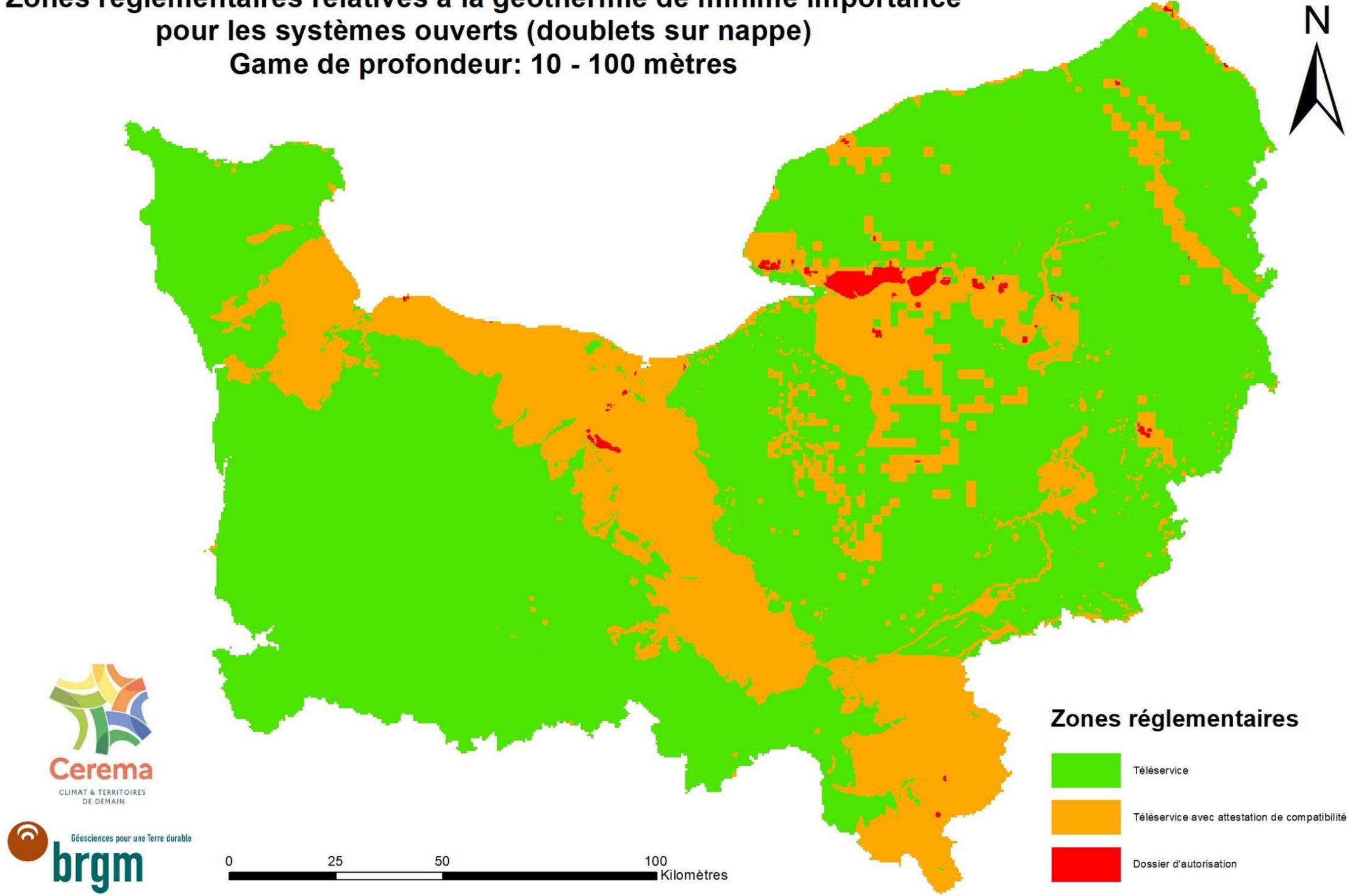


Illustration 38 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 100 mètres



### Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour les systèmes ouverts (doublets sur nappe) Game de profondeur: 10 - 200 mètres

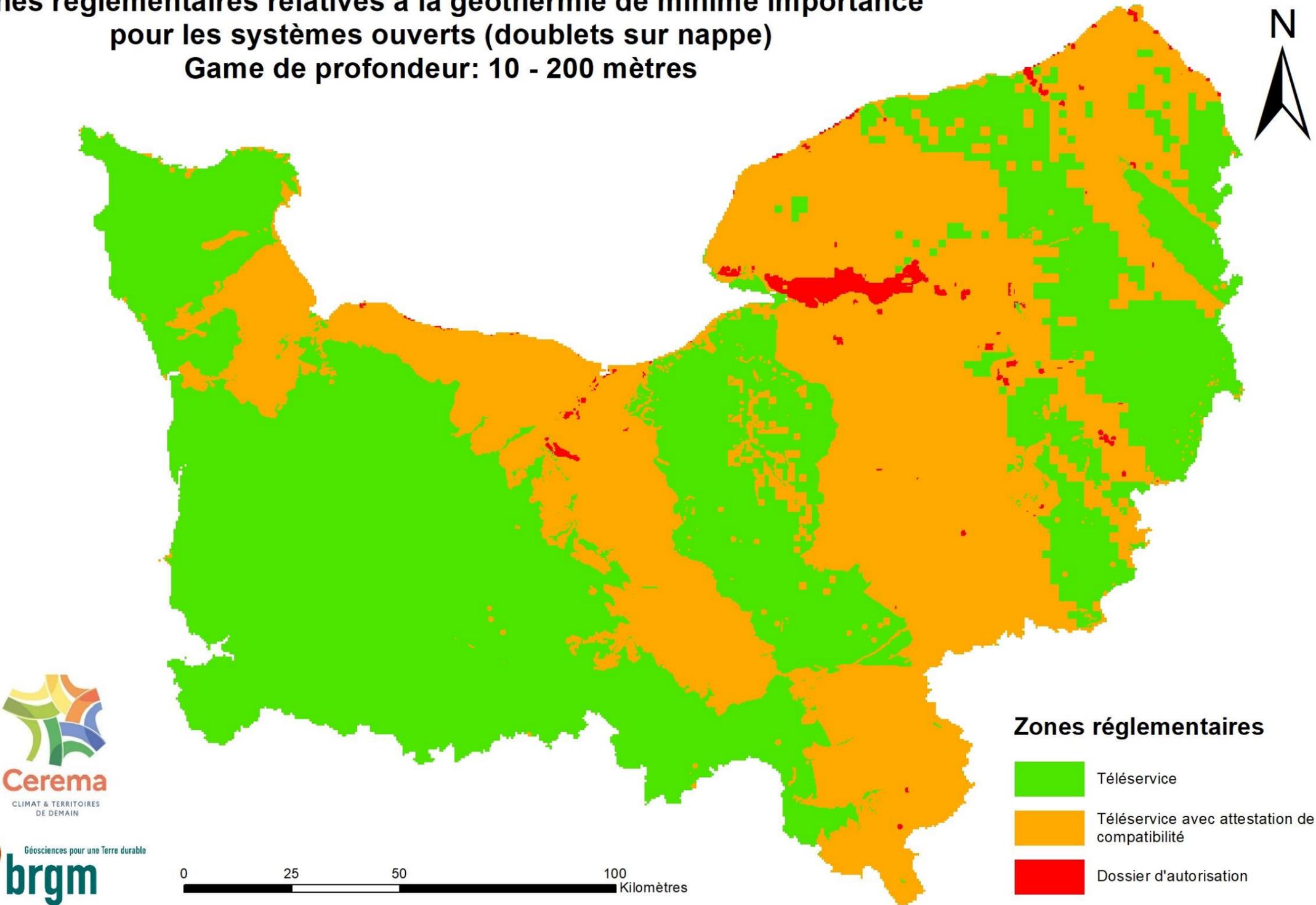


Illustration 39 : Cartes réglementaires pour les doublets sur nappe de la gamme de profondeur 10 - 200 mètres



**Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance  
pour les systèmes fermés (sondes géothermiques verticales)  
Game de profondeur: 10 - 50 mètres**

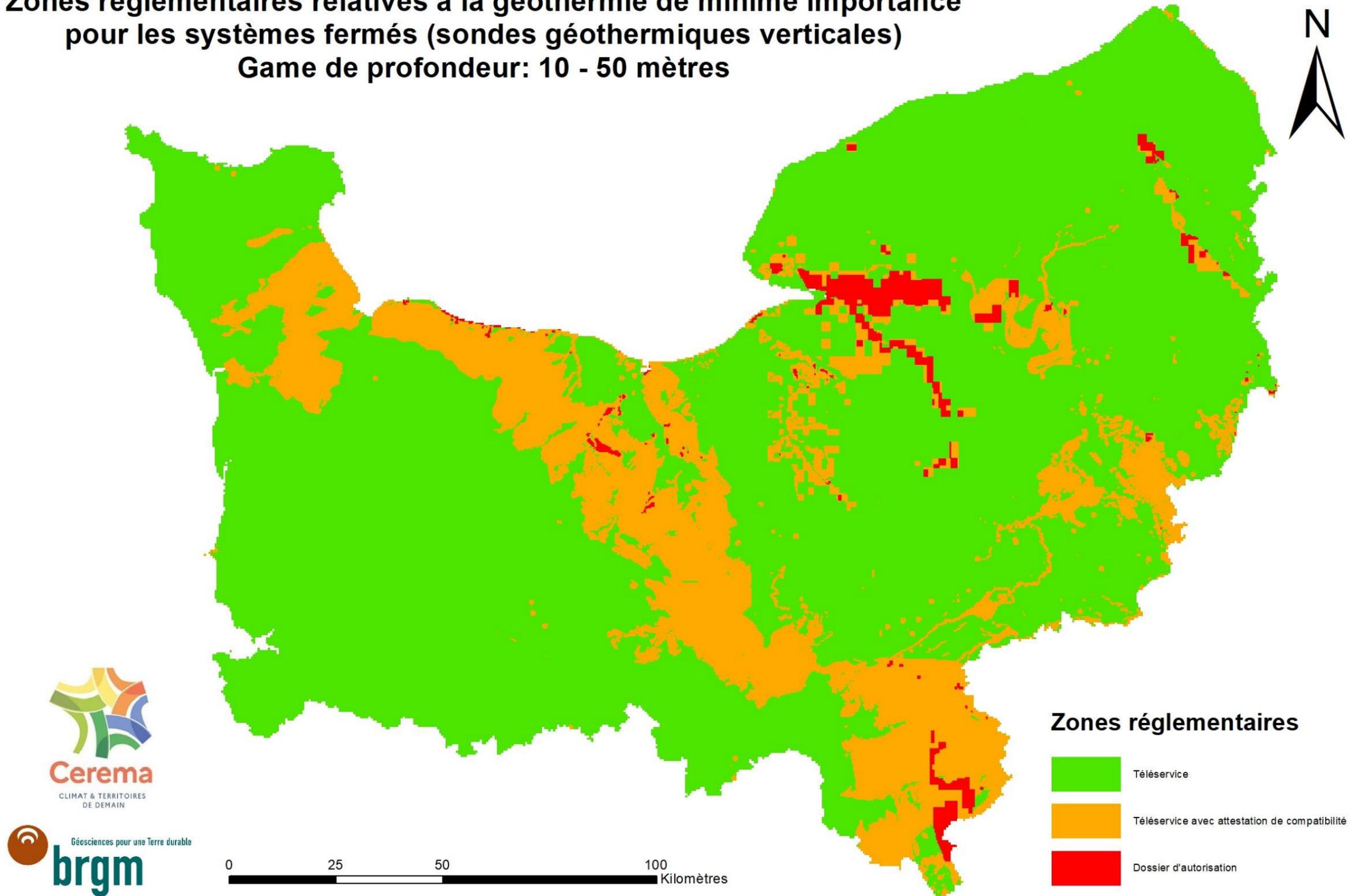


Illustration 40 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales (SGV) de la gamme de profondeur 10 - 50 mètres



**Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance  
pour les systèmes fermés (sondes géothermiques verticales)  
Game de profondeur: 10 - 100 mètres**

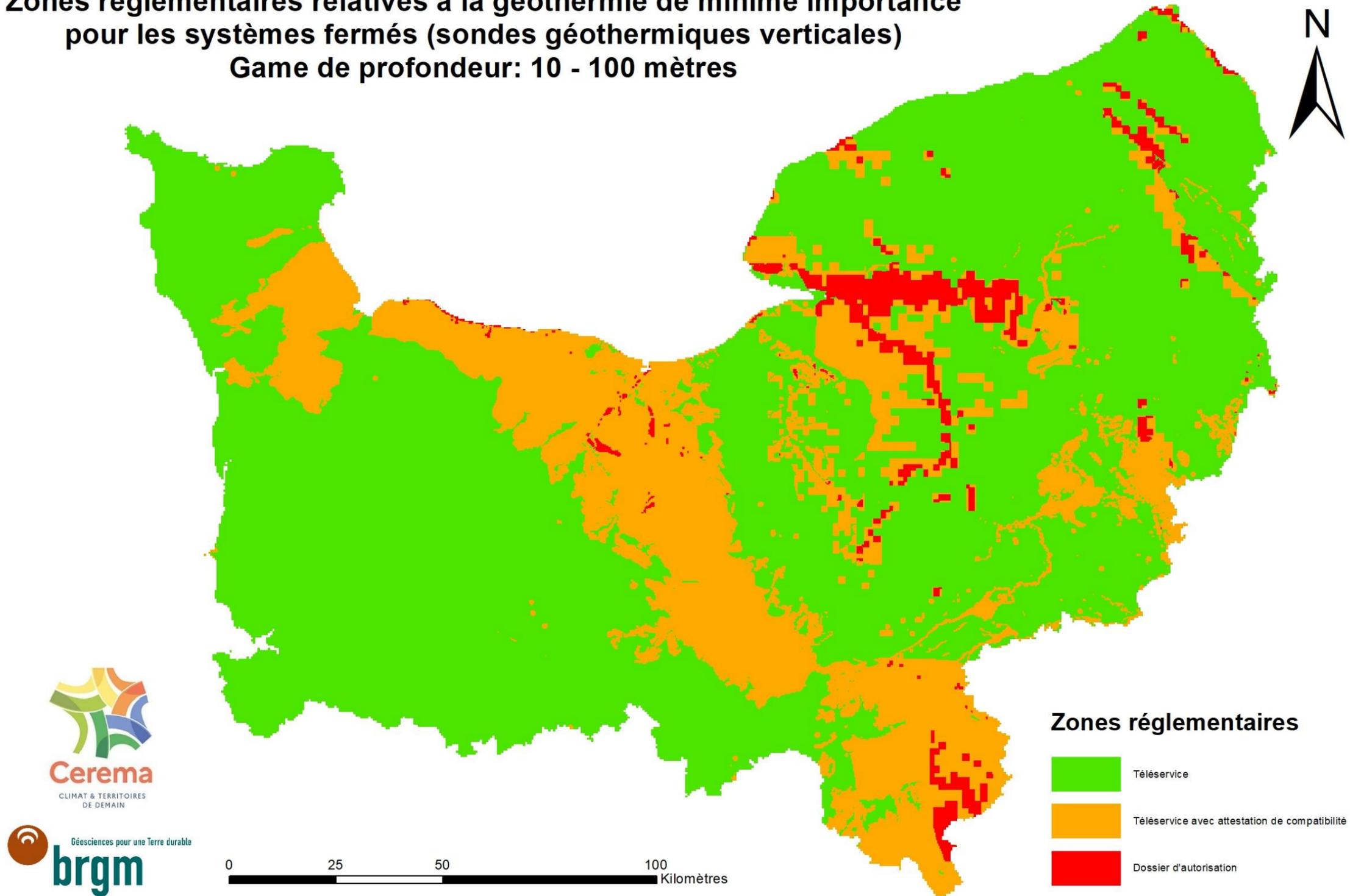


Illustration 41 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales (SGV) de la gamme de profondeur 10 - 100 mètres



**Zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance  
pour les systèmes fermés (sondes géothermiques verticales)  
Game de profondeur: 10 - 200 mètres**

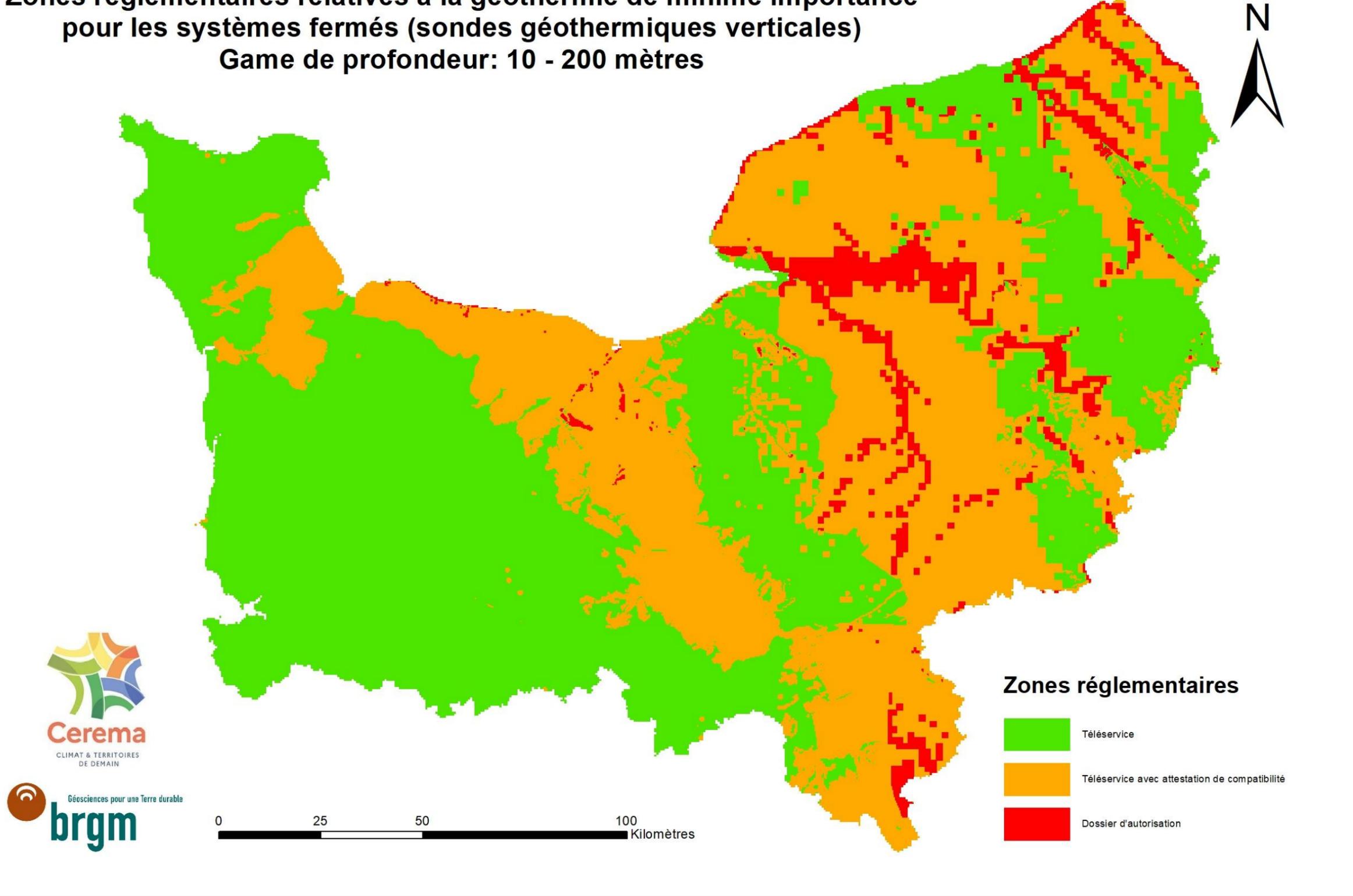


Illustration 42 : Cartes réglementaires pour les sondes géothermiques verticales de la gamme de profondeur 10 - 200 mètres



## 5. Conclusion

Dans le contexte de la transition énergétique et du développement des énergies renouvelables, le cadre réglementaire relatif à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision via l'arrêté du 25 juin 2015. Cet arrêté relatif à la géothermie de minime importance permet de réviser la carte nationale régionalement afin d'apporter plus de précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes redoutés.

Cette révision a permis de redéfinir les zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance conformément à la méthode décrite dans le « Guide d'élaboration de la carte des réglementaires relatives à la géothermie de minime importance » publié en juillet 2015 par le Ministère en charge de l'Ecologie (MEDDE, 2015).

Conformément au guide méthodologique, les 9 phénomènes pris en compte pour cette nouvelle cartographie sont les suivants :

- Affaissement / surrection liés aux évaporites ;
- Affaissement / effondrement liés aux cavités (hors mines) ;
- Affaissement / effondrement liés aux cavités minières ;
- Mouvements de terrain (ou glissements de terrain) ;
- Pollution des sols et/ou des nappes souterraines ;
- Artésianisme ;
- Mise en communication d'aquifères ;
- Remontée de nappe ;
- Biseau salé.

Pour chacun de ces phénomènes, des niveaux d'aléa ou de susceptibilité ont été attribués conformément aux recommandations du guide méthodologique. Cependant, pour 2 phénomènes, les niveaux d'aléa ont été affinés afin de mieux correspondre aux spécificités normandes. Les 2 phénomènes concernés sont « Pollution des sols et/ou des nappes souterraines » et « Artésianisme ».

Au total, six cartes proposant un nouveau zonage réglementaire ont été réalisées avec un maillage 250\*250 mètres. Elles correspondent à deux technologies : les doublets sur aquifère (échangeur ouvert) et les sondes géothermiques verticales (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur : 10-50 m, 10-100 m, 10-200 m.

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



## 6. BIBLIOGRAPHIE

**ADAGE ENVIRONNEMENT** (2020). Rapport environnemental du SDAGE 2022 - 2027 du bassin Seine-Normandie. Eau Seine-Normandie et Préfet de la région d'Île-de-France. 255p.

**BRUGERON A., BESSIERE H., BOURGINE B., STOLLSTEINER P.** (2018) - Etude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale. BRGM/RP-65452-FR, 116 p.

**COMITE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE** (2015). Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2016-2021. Bassin Loire-Bretagne. 360p.

**DUBRULLE-BRUNAUD C.** (2007). Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (continuum Seine-baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. Université de Rouen - Ecole doctorale normande de chimie-biologie. 341 pages.

**HERBAUX M. (CEREMA), KREZIAK C. (CEREMA), DURST P. (BRGM), MIDOT D. (BRGM), SCHOMBURGK S. (BRGM), MARTIN J.-C. (BRGM), COCHERY R. (BRGM), FOURNIGUET G. (BRGM), BARRAS A.-V. (BRGM)** (2015). Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance.

**INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ETUDES ECONOMIQUES** (2017). Revenus, pauvreté et niveau de vie en 2017 - Données carroyées. Dispositif Fichier localisé social et fiscal (Filosofi). Données au carreau de 200m (y compris données imputées).

**JALLAIS N. (BRGM), DAVID P.-Y. (BRGM), PENNEQUIN D. (BRGM), HAMEL M. (SDEAU 50)** (2019) – Etat des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines du département de la Manche. Rapport final. BRGM/RP-69128-FR, 159 p., 92 ill., 2 ann





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Normandie**

7, rue Andréï Sakharov  
76130 – Mont Saint Aignan

Tél. : 02 35 60 12 00

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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**