



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Document à accès immédiat

Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance en région Hauts-de- France

Rapport final

BRGM/RP-73150-FR

Mars 2024

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM
AP22DAT002

Jouenne, A. (BRGM) et Bourhis, F. (CEREMA)

Avec la collaboration de
Manlay A., Meire B., Parmentier M.

Vérificateur :

Nom : Pierre Durst

Fonction : Référent thématique

Date : 08/12/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Xavier Daupley

Fonction : Directeur régional

Date : 04/03/2024

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

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

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

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

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

Votre avis nous intéresse

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

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



Mots clés : Géothermie Minime Importance, Cartographie réglementaire, Code minier, Télédéclaration, Hauts-de-France

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

Jouenne, A. (BRGM) et Bourhis, F. (CEREMA) (2024) – Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance en région Hauts-de-France. Rapport final VF. BRGM/RP-73150-FR, 96 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-22/09/2022

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 (GMI) a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

Une carte a été réalisée à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée « *Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (GMI)* ». Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) en juillet 2015. Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié. En 2023, cette méthodologie a été révisée et complétée dans un addendum au guide méthodologique. Cette révision fait suite aux retours d'expérience des territoires ayant déjà réalisé leur cartographie réglementaire.

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

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

Cette carte nationale a été réalisée pour une seule gamme de profondeur (10 - 200 m) avec un maillage de 500 × 500 mètres. Elle est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2015 et est disponible sur le site : www.geothermies.fr.

L'arrêté du 25 juin 2015, **relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser localement 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.

Une première phase de révision régionale a eu lieu en 2019 et concernait le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (*ABAD et BOURHIS, 2022*). Ce secteur fait partie de la longue bande houillère qui s'étend de l'Angleterre à l'Europe centrale et correspond donc à la partie française de l'exploitation charbonnière du Nord-Ouest européen. Cette exploitation intensive de houille a entraîné l'apparition

d'un phénomène associé qui est « Présence et émission de gaz de mine ». Ainsi, l'existence de ce phénomène a nécessité la réalisation d'une révision spécifique de ce secteur avant de se consacrer au reste de la région Hauts-de-France, territoire dans lequel ce phénomène n'existe pas.

Dans l'objectif de finaliser la carte régionale sur les Hauts-de-France, la DGPR et l'ADEME 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 Hauts-de-France.

L'élaboration de la carte des Hauts-de-France 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 et à son addendum de 2023, les phénomènes retenus sont :

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

Des niveaux d'aléa ou de susceptibilité ont été évalués pour chacun de ces phénomènes.

Concernant le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais, un travail spécifique a été mené pour vérifier la cohérence des données récoltées durant la phase 1 (*ABAD et BOURHIS, 2022*) avec la nouvelle méthodologie présentée dans l'addendum de 2023. Ainsi, pour 7 phénomènes de ce secteur, la cohérence des données avec la nouvelle méthodologie a été vérifiée et, le cas échéant, modifiée pour obtenir *in fine* une carte régionale harmonisée. Les 7 phénomènes impactés sont :

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

Pour ce qui est du phénomène « Biseau salé », il n'était pas pris en compte dans l'étude précédente puisque le secteur du Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais n'est pas en zone côtière.

La méthodologie de cartographie du phénomène « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » n'a pas été modifiée par l'addendum de 2023. Ainsi, les niveaux d'aléas obtenus pour ce phénomène lors des travaux de la Phase 1 sur le secteur du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (*ABAD et BOURHIS, 2022*), prenant donc en compte le phénomène associé qui est « Présence et émission de gaz de mine », ont été intégrés et surimposés aux résultats de la phase 3.

Au total, six cartes proposant un nouveau zonage réglementaire ont été réalisées avec un maillage 500 × 500 mètres. Elles correspondent à deux technologies : les doublets sur aquifère (échangeur ouvert) et les sondes géothermiques verticales (SGV) (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur : 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

Par rapport à la carte nationale initiale, la zonation des cartes réglementaires des Hauts-de-France est distincte pour les trois gammes de profondeur. Les données et les connaissances acquises localement sur la région ont été prises en compte. La précision apportée par la carte révisée concerne de fait tous les phénomènes redoutés notamment de par l'utilisation des atlas hydrogéologiques, des cartes d'aléas produites à des échelles locales (cavités non-minières, cavités minières, mouvement de terrain), d'informations plus précises traitées en détail (localisation des sites et sols pollués dans la BD BASOL mise à jour, données locales de la BSS) et par la prise en compte de la géométrie des formations dès que cela était possible pour tous les phénomènes (en particulier pour les formations évaporitiques et la mise en communication des aquifères).

Pour un système géothermique donné (doublets géothermiques ou SGV), les cartes obtenues sont ainsi différentes d'une tranche de profondeur à l'autre. Néanmoins, quelle que soit la tranche de profondeur (10-50, 10-100 et 10-200 m), pour les doublets géothermiques, la zone verte représente globalement 85-86 %, la zone orange 10-12 % et la zone rouge 2-3 % de la surface totale de la région Hauts-de-France, tandis que pour les SGV les proportions sont respectivement : 79-83 %, 14-17 % et 2-3 %. En terme de ratios de population impactée par ces zones, pour les doublets géothermiques la zone verte impacte entre 52 et 58 % de la population régionale totale, la zone orange 38-39 % et la zone rouge entre 3 et 10 %. Pour les SGV ces proportions sont respectivement : entre 49 et 57 %, 39-40 % et entre 3 et 11 % de la population totale des Hauts-de-France.

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 (GMI) pour la région Hauts-de-France seront mises à disposition sur le site internet www.geothermies.fr.

Sommaire

1. Introduction	12
2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance	14
2.1. Principes généraux de la géothermie de Minime Importance (GMI)	14
2.1.1. <i>Echangeur géothermique fermé</i>	14
2.1.2. <i>Echangeur géothermique ouvert</i>	15
2.2. Le code minier	15
2.3. Les réglementations territorialisées.....	16
2.4. Contexte local	17
3. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire	18
3.1. Paramétrisation de la cartographie régionale	18
3.2. Méthode utilisée.....	18
3.2.1. <i>Détermination des niveaux d'aléas de chaque phénomène pour chaque tranche de profondeur</i>	18
3.2.2. <i>Analyse multicritère</i>	19
3.2.3. <i>Définition des zones réglementaires pour chaque gamme de profondeur</i>	20
3.3. Paramètres de la grille utilisée	20
4. Cartographie des aléas	22
4.1. Aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau »	22
4.1.1. <i>Description du phénomène et occurrences</i>	22
4.1.2. <i>Qualification du phénomène</i>	22
4.1.3. <i>Données utilisées et traitement</i>	22
4.1.4. <i>Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau »</i>	25
4.1.5. <i>Cotation de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau »</i>	29
4.2. Aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) ».....	30
4.2.1. <i>Description du phénomène et occurrences</i>	30
4.2.2. <i>Qualification du phénomène</i>	31
4.2.3. <i>Données utilisées et traitement</i>	32
4.2.4. <i>Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) »</i> » 36	
4.2.5. <i>Cotation de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) »</i> .	38
4.3. Aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières ».....	39
4.3.1. <i>Description du phénomène et occurrences</i>	39
4.3.2. <i>Qualification du phénomène</i>	39
4.3.3. <i>Données utilisées et traitement</i>	40
4.3.4. <i>Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières »</i> » 42	
4.3.5. <i>Cotation de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières »</i>	44
4.4. Aléa « Mouvement de terrain (glissement de terrain) »	45

4.4.1.	Description du phénomène et occurrences	45
4.4.2.	Qualification du phénomène.....	45
4.4.3.	Données utilisées et traitement	46
4.4.4.	Cartographie de l'aléa « Mouvement de terrain (glissement de terrain) ».....	47
4.4.5.	Cotation de l'aléa « Mouvement de terrain (glissement de terrain) »	49
4.5.	Aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »	50
4.5.1.	Description du phénomène et occurrences	50
4.5.2.	Qualification du phénomène.....	50
4.5.3.	Données utilisées et traitement	50
4.5.4.	Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »	51
4.5.5.	Cotation de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines ».....	55
4.6.	Aléa « Artésianisme »	56
4.6.1.	Description du phénomène et occurrences	56
4.6.2.	Qualification du phénomène.....	56
4.6.3.	Données utilisées et traitement	56
4.6.4.	Cartographie de l'aléa « Artésianisme »	57
4.6.5.	Cotation de l'aléa « Artésianisme »	61
4.7.	Aléa « Mise en communication d'aquifères »	62
4.7.1.	Description du phénomène et occurrences	62
4.7.2.	Qualification du phénomène.....	62
4.7.3.	Données utilisées et traitement	62
4.7.4.	Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifères »	64
4.7.5.	Cotation de l'aléa « Mise en communication d'aquifères »	68
4.8.	Aléa « Problèmes liés à la réinjection »	69
4.8.1.	Description du phénomène et occurrences	69
4.8.2.	Qualification du phénomène.....	69
4.8.3.	Données utilisées et traitement	69
4.8.4.	Cartographie de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection »	70
4.8.5.	Cotation de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection »	72
4.9.	Aléa « Biseau salé »	73
4.9.1.	Description du phénomène et occurrences	73
4.9.2.	Qualification du phénomène.....	73
4.9.3.	Données utilisées et traitement	73
4.9.4.	Cartographie de l'aléa « Biseau salé »	74
4.9.5.	Cotation de l'aléa « Biseau salé »	78
5.	Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance	79
5.1.	Prise en compte de la cartographie issue de la Phase 1	79
5.2.	Présentation des résultats	83
6.	Conclusion	85
7.	Bibliographie	87
8.	Annexes	89

Liste des figures

Figure 1 : Eléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015)	14
Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015)	15
Figure 3 : Hypothèse de formation des puits naturels liés aux évaporites ("breccia pipes") (Source: LICOUR, 2014)	23
Figure 4 : Extrait de la carte géologique du département de l'Aisne datant de 1842. En rouge : exploitations de plâtre dans la formation du Ludien.....	25
Figure 5 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m.....	26
Figure 6 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m.....	27
Figure 7 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	28
Figure 8 : Communes des Hauts-de-France où des tranchées de la Première Guerre Mondiale ont été recensées	35
Figure 9 : Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » pour toutes les tranches de profondeur	36
Figure 10 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	37
Figure 11 : Données SIGMINES utilisées pour qualifier le phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités minières »	41
Figure 12 : Les extensions d'exploitations minières situées dans l'Oise et dans l'Aisne.....	42
Figure 13 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	43
Figure 14 : Cartographie de l'aléa « Mouvement de terrain (glissement de terrain) » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	48
Figure 15 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m.....	52
Figure 16 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m.....	53
Figure 17 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	54
Figure 18 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m	58
Figure 19 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m.....	59
Figure 20 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	60

Figure 21 : Délimitation de la ZRE et des nappes impactées pour le phénomène « mise en communication des aquifères »	63
Figure 22 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m	65
Figure 23 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m	66
Figure 24 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m	67
Figure 25 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe (résultat brut) (BRUGERON et al., 2018).....	70
Figure 26 : Cartographie de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m	71
Figure 27 : Cartographie de la zone tampon de 2 km sur la géologie du littoral des Hauts-de-France	74
Figure 28 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m.....	75
Figure 29 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m.....	76
Figure 30 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	77
Figure 31 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-50 m.....	80
Figure 32 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-100 m.....	81
Figure 33 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-200 m.....	82

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des niveaux des phénomènes et des facteurs aggravants proposés pour la carte réglementaire régionale	19
Tableau 2 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques »	29
Tableau 3 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement / surrection lié aux évaporites » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées	29
Tableau 4 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »	38
Tableau 5 : Cotation du niveau d'aléa ou de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées.....	38

Tableau 6 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières »	44
Tableau 7 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées.....	44
Tableau 8 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Mouvement de terrain (glissement de terrain) »	49
Tableau 9 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain (glissement de terrain) – Comparaison des cartes initiales et révisées	49
Tableau 10 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »	55
Tableau 11 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines – Comparaison des cartes initiales et révisées	55
Tableau 12 : Evolution des emprises des niveaux de susceptibilité du phénomène « Artésianisme »	61
Tableau 13 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Artésianisme » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées	61
Tableau 14 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Mise en communication d'aquifères »	68
Tableau 15 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées	68
Tableau 16 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Problèmes liés à la réinjection »	72
Tableau 17 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Problèmes liés à la réinjection » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées	72
Tableau 18 : Evolution des emprises des niveaux de susceptibilité du phénomène « Biseau salé »	78
Tableau 19 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Biseau salé » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées	78
Tableau 20 : Répartition des zones vertes, orange et rouges de la carte révisée dans les Hauts-de-France (2023) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015)	83
Tableau 21 : Ratios de population impactés par les zones vertes, orange et rouges de la carte révisée dans les Hauts-de-France (2023) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015). La population est calculée à partir de la maille IRIS.....	84

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance dans les Hauts-de-France	89
--	----

1. Introduction

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, la géothermie est une activité promue par le Ministère de la Transition 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 (GMI) a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015).

La filière géothermie doit actuellement répondre à deux grands enjeux :

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

Une carte a été réalisée à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée « *Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (GMI)* ». Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) en juillet 2015. Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié. En 2023, cette méthodologie a été révisée et complétée dans un addendum au guide méthodologique. Cette révision fait suite aux retours d'expérience des territoires ayant déjà réalisé leur cartographie réglementaire.

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

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

Cette carte nationale a été réalisée pour une seule gamme de profondeur (10 - 200 m) avec un maillage de 500 × 500 mètres. Elle est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2015 et est disponible sur le site : www.geothermies.fr.

L'arrêté du 25 juin 2015, **relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, prévoit la possibilité de réviser localement 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.

Une première phase de révision régionale a eu lieu en 2019 et concernait le bassin minier du Nord–Pas-de-Calais (*ABAD et BOURHIS, 2022*). Ce secteur fait partie de la longue bande houillère qui s'étend de l'Angleterre à l'Europe centrale et correspond donc à la partie française de l'exploitation charbonnière du Nord-Ouest européen. Cette exploitation intensive de houille a entraîné l'apparition d'un phénomène associé qui est « Présence et émission de gaz de mine ». Ainsi, l'existence de ce phénomène a nécessité la réalisation d'une révision spécifique de ce secteur avant de se consacrer au reste de la région Hauts-de-France, territoire dans lequel ce phénomène n'existe pas.

Dans l'objectif de finaliser la carte régionale sur les Hauts-de-France, la DGPR et l'ADEME 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 Hauts-de-France.

L'élaboration de la carte des Hauts-de-France 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. Les conséquences de ces phénomènes peuvent être d'ordre :

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

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

- Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau ;
- Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) ;
- Affaissement / effondrement lié aux cavités minières¹ ;
- Mouvement de terrain (glissement de terrain) ;
- Pollution des sols et / ou des nappes souterraines ;
- Artésianisme ;
- Mise en communication d'aquifères ;
- Problèmes liés à la réinjection (anciennement appelé « Remontée de nappe ») ;
- Biseau salé (*ajout par rapport à la carte nationale*).

Ces 9 phénomènes ont été cotés séparément selon des niveaux établis sur chacune des 128 047 mailles, de 500 m de côté, couvrant la région des Hauts-de-France. Ils ont ensuite été pondérés par un facteur dit aggravant, inhérent aux techniques de GMI mises en œuvre, et sommés afin d'aboutir à des cartes répertoriant les trois zones (rouge, orange, verte) mentionnées précédemment.

Concernant le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais, un travail spécifique doit être mené pour vérifier la cohérence des données avec la nouvelle méthodologie présentée dans l'addendum de 2023.

Cette méthodologie conduit à produire six cartes de zonage réglementaire. Elles correspondent à deux types d'usages géothermiques : exploitation par doublet sur aquifère (échangeur ouvert) et par sonde géothermique verticale (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur (10-50 m, 10-100 m, 10-200 m).

¹ Pour le cas spécifique du bassin minier du Nord–Pas-de-Calais, ce phénomène intègre les résultats du phénomène associé « Présence et émission de gaz de mine » (*ABAD et BOURHIS, 2022*)

2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance

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

La « Géothermie de Minime Importance » (GMI) est une géothermie de très basse température permettant d'extraire l'énergie du sous-sol, présente au sein de la terre ou d'une nappe d'eau souterraine, afin de la restituer dans un bâtiment à l'aide d'une pompe à chaleur (MEDDE, 2015).

Il existe deux types de technologies qualifiées de Minime Importance :

- les Sondes Géothermiques Verticales (SGV) ou échangeurs géothermiques fermés ;
- les Doublets géothermiques ou doublet sur nappe ou échangeurs géothermiques ouverts.

2.1.1. Echangeur géothermique fermé

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

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

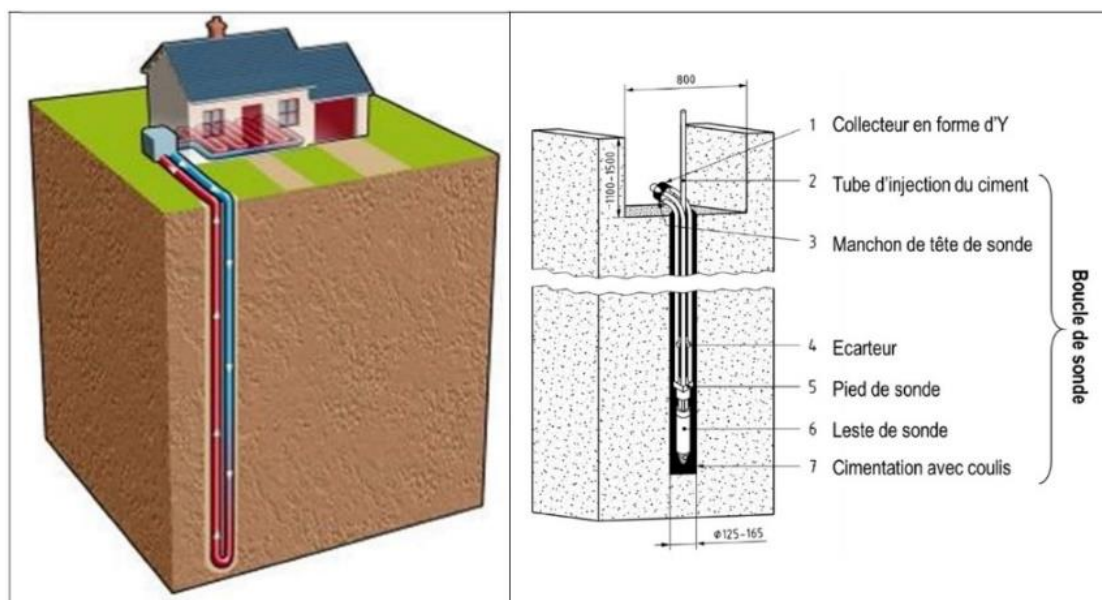


Figure 1 : Eléments d'une Sonde Géothermique Verticale (ou échangeur géothermique fermé) (MEDDE, 2015)

2.1.2. Echangeur géothermique ouvert

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

Cette technologie induit localement une variation thermique de la nappe.

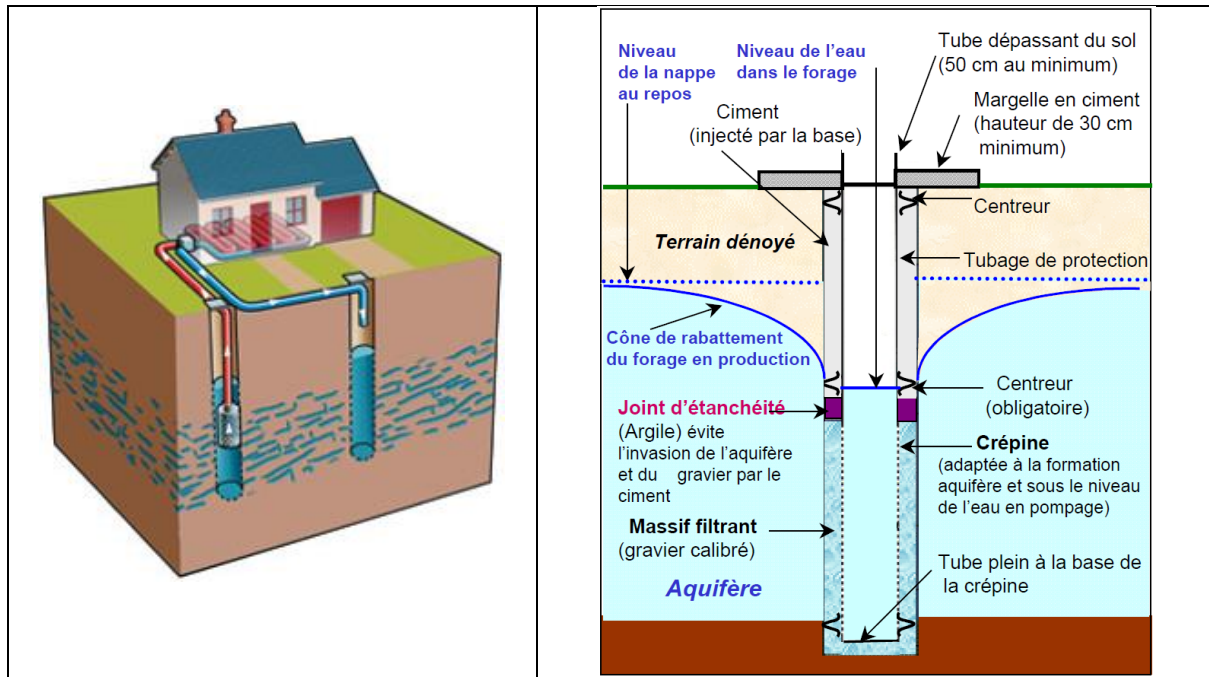


Figure 2 : Schéma d'un doublet géothermique sur nappe – dans le cas d'une nappe libre (MEDDE, 2015)

2.2. LE CODE MINIER

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

Les critères de la géothermie de minime importance sont définis dans le paragraphe II de l'article 3 du décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié.

Les critères de la GMI sont :

- Pour les **échangeurs géothermiques fermés** :
 - la profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 m ;
 - la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol, et utilisée pour l'ensemble de l'installation, est inférieure à 500 kW ;
 - les échangeurs ne doivent pas être situés sur une zone rouge.

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

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

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

- Préalablement aux travaux de forage, l'activité géothermique répondant aux critères de la Géothermie de Minime Importance doit être déclarée. Cette démarche doit être réalisée sur le service dédié, accessible sur le site www.geothermies.fr ;
- Les forages doivent être réalisés par une entreprise qualifiée selon les conditions techniques prévues par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance ;
- La localisation d'un échangeur doit répondre aux prescriptions définies par l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables. En outre, selon la localisation de l'échangeur au regard de la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance, une attestation de compatibilité du projet est jointe à la déclaration. Cela est notamment requis lorsque le projet se situe dans une zone orange.

L'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance et sa cessation d'exploitation doivent être mises en œuvre conformément à l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance. Les travaux de cessation d'exploitation et le changement d'exploitant de la ressource sont à déclarer. Ces démarches peuvent être réalisées par voie dématérialisée sur le site de télédéclaration dédié.

2.3. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES

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

Ces réglementations sont indépendantes de la carte des zones réglementaires relatives à la Géothermie de Minime Importance. Elles devront être prises en compte lors de la réalisation d'un forage de géothermie.

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

2.4. CONTEXTE LOCAL

La présente étude fait suite à la première phase qui s'est déroulée en 2019 et se consacrait à la révision de la carte nationale à l'échelle du bassin minier du Nord–Pas-de-Calais (*ABAD et BOURHIS, 2022*). Cette première phase était justifiée par l'existence d'un phénomène spécifique au contexte minier de ce secteur qui est « Présence et émission de gaz de mine », phénomène associé à celui de l'« Affaissement / effondrement lié aux cavités minières ».

Cette nouvelle étude permet d'étendre la révision de la cartographie de la faisabilité de la Géothermie de Minime Importance à tout le territoire des Hauts-de-France.

L'addendum au guide méthodologique, diffusé en 2023 (*MET, 2023*), a entraîné une révision de la méthodologie de cartographie des phénomènes, notamment concernant le phénomène « Pollution des sols et des nappes ». Dans un souci d'harmonisation, et en accord avec l'addendum, ces modifications ont été appliquées également sur le secteur du bassin minier du Nord–Pas-de-Calais.

3. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire

3.1. PARAMETRISATION DE LA CARTOGRAPHIE REGIONALE

La carte réglementaire de la région Hauts-de-France est une adaptation régionale de la méthodologie réalisée à l'échelle nationale. Cette méthodologie est définie dans le « Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance » publié en juillet 2015 par le Ministère en charge de l'Écologie (MEDDE, 2015). En 2023, cette méthodologie a été révisée et complétée dans un addendum (MET, 2023). Cette révision fait suite aux retours d'expérience des territoires ayant déjà réalisé leur cartographie réglementaire.

La méthodologie utilisée dans la présente étude repose sur une analyse multicritère de 9 phénomènes redoutés. Cette analyse est appliquée à 3 tranches de profondeur : 10 - 50 mètres, 10 - 100 mètres et 10 - 200 mètres ; pour deux technologies de géothermie de minime importance : les doublets sur nappe et les sondes géothermiques verticales. À l'instar de la carte nationale, la cartographie de la région Hauts-de-France est appliquée sur une grille de précision 500 × 500 mètres.

Au final, ce seront 6 cartes réglementaires qui seront réalisées : les trois tranches de profondeur seront analysées selon le type d'échangeur.

Les phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux susceptibles d'être rencontrés par la réalisation d'un projet de géothermie de minime importance sur le territoire de la région Hauts-de-France ont été identifiés. Il s'agit des suivants :

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

3.2. METHODE UTILISEE

La méthode qui est utilisée pour cartographier et analyser les différents phénomènes nécessite plusieurs étapes.

3.2.1. Détermination des niveaux d'aléas de chaque phénomène pour chaque tranche de profondeur

Cette étape consiste à décrire et caractériser chaque phénomène selon un niveau d'aléa (nul, faible, moyen, fort et très fort) pour chaque tranche de profondeur. Les valeurs attribuées à chaque aléa sont définies dans le guide méthodologique (MEDDE, 2015) et dans son addendum (MET, 2023).

Chaque phénomène étudié est représenté sur une carte (couche cartographique pour les différentes profondeurs) où sont figurées les valeurs de ces différents niveaux. Les mailles de la grille de précision se voient attribuer une valeur selon le niveau d'aléa le plus fort qu'elles intersectent.

Le rapport de cette étude présente pour chaque phénomène :

- ses caractéristiques ;
- les données utilisées pour le cartographier ainsi que leur origine ;
- les différents niveaux d'aléas utilisés ainsi que la méthodologie et les traitements réalisés pour les obtenir.

3.2.2. Analyse multicritère

Lors de cette deuxième étape, une valeur de pondération (ou facteur aggravant) est attribuée à chaque phénomène sur chacune des mailles de la grille de précision. Cette valeur dépend de l'intensité du phénomène redouté et du type d'échangeur impacté.

Le tableau de synthèse des cotations proposées pour chaque phénomène décrit dans l'analyse multicritère, et pour chaque type d'échangeur, est présenté ci-après (Tableau 1). Ce tableau est basé sur les recommandations du guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (MEDDE, 2015) et de son addendum (MET, 2023).

Tableau 1 : Récapitulatif des niveaux des phénomènes et des facteurs aggravants proposés pour la carte réglementaire régionale

Phénomènes redoutés	Niveau d'aléa / susceptibilité du phénomène	Facteur aggravant (doublet sur nappe)	Facteur aggravant (SGV)	Niveau final (doublet sur nappe)	Niveau final (SGV)
Affaissement / surrection liés aux horizons évaporitiques	0/1/3/5/7	6	10	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Affaissement / effondrement liés aux cavité (hors mines)	0/1/2/3/5/7	2	2	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Affaissement / effondrement liés aux cavité minières	0/1/3/5/7	2	2	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Mouvements de terrain (ou glissement de terrain)	0/1/2/3/5/7	2	2	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Pollution des sols et/ou des nappes souterraines	0/1/4/6/10	3	3	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Artésianisme	0/1/3/4/7	2	4	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Mise en communication d'aquifères	0/1/4	4	4	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Problèmes liés à la réinjection (anciennement appelé Remontée de nappe)	0/1/3/7/18	2	0	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant
Biseau salé	0/1/4	4	0	niveau*facteur aggravant	niveau*facteur aggravant

Classement en zone verte, orange ou rouge	Vert : [0-13]		Orange : [14-41]		Rouge : >41
---	---------------	--	------------------	--	-------------

3.2.3. Définition des zones réglementaires pour chaque gamme de profondeur

L'addition des résultats de chaque phénomène (niveau d'aléa x facteur aggravant) permet ainsi d'obtenir une carte composée de zones vertes, orange et rouges.

Ces zones se distinguent par l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

- les zones **vertes** (résultat de l'addition des facteurs entre 0 et 13) : zones dans lesquelles les activités géothermiques de minime importance sont réputées ne pas présenter de dangers et inconvénients graves ;
- les zones **orange** (résultat de l'addition des facteurs entre 14 et 41) : zones 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 **rouges** (résultat de l'addition des facteurs supérieurs ou égaux à 42) : zones dans lesquelles la réalisation d'ouvrages de géothermie est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peut pas bénéficier du régime de la minime importance.

Il est à noter que la classification des zones est effectuée pour les trois tranches de profondeur 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 est catégorisée en zone rouge pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres, alors tout ouvrage qui traverse cette tranche (c'est-à-dire les 2 autres gammes de profondeur 10 - 100 et 10 - 200 mètres) est soumis à cet aléa. De ce fait, la valeur résultante de la maille pour la gamme de profondeur 10 - 100 mètres ne pourra pas être inférieure à celle calculée pour la gamme de profondeur 10 - 50 mètres. De même, la valeur résultante de cette maille pour la gamme de profondeur 10 - 200 mètres ne pourra pas être inférieure à celles des gammes de profondeur 10 - 50 et 10 - 100 mètres.

3.3. PARAMETRES DE LA GRILLE UTILISEE

La grille de précision a été créée dans le système géodésique officiel en France, le réseau géodésique français 1993 (RGF93-Lambert 93) qui répond à la directive INSPIRE. Le maillage correspond à des pixels de 500 x 500 mètres. La couverture complète de la région Hauts-de-France correspond à 128 047 mailles au total, soit environ 32 012 km².

La table attributaire de ces grilles (au format « shapefile ») comprend les champs suivants :

- **Attribut « Maille »** : correspond à un identifiant unique attribué à chaque maille. Pour une maille de 500 x 500 mètres, l'identifiant se termine par 00 ;
- **Attribut « Profondeur »** : précise la profondeur maximum atteinte (50, 100, 200) pour la carte régionale ;
- **Attributs « X_RGF93 » et « Y_RGF93 »** : coordonnées exprimées en mètre. Elles correspondent au centre de chaque maille dans le système RGF93-Lambert93 ;
- **Attribut « Z_NGF »** : correspond à l'altitude moyenne du sol au sein de la maille (altitude définie par rapport au NGF). Elle est exprimée en mètre avec une précision de 1 mètre ;

- Champs 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 minières ;
 - **MVT** : phénomène de mouvement de terrain (glissement de terrain) ;
 - **BASOL** : phénomène de pollution des sols et / ou des nappes souterraines ;
 - **artésien** : phénomène d'artésianisme ;
 - **com_aquif** : phénomène de mise en communication d'aquifères ;
 - **remontee** : phénomène de problèmes liés à la réinjection ;
 - **biseau_sal** : 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 »** : 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 »** : 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 »** : 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 »** : 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)).

4. Cartographie des aléas

4.1. ALEA « AFFAISSEMENT / SURRECTION LIE AUX FORMATIONS EVAPORITQUES ET A LA PRESENCE D'EAU »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.1.1. Description du phénomène et occurrences

Ce phénomène se caractérise par la déstructuration des terrains en surface (affaissement, effondrement ou surrection) liée 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 de couches d'évaporite situées en profondeur, l'aléa nécessite la présence d'aquifères pour exister. Dans le cas des couches évaporitiques superficielles affleurantes, l'aléa nécessite soit la présence d'une source d'eau superficielle (forte pluviométrie, inondation...), soit la remontée d'eau depuis les aquifères profonds provoquée par des travaux de forage.

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

4.1.2. Qualification du phénomène

Le phénomène « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau » a été qualifié, d'après les préconisations du guide méthodologique et de son addendum, comme suit :

- **Aléa fort (7)** : présence avérée d'un ou plusieurs horizons évaporitiques d'épaisseur plurimétrique, 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 ;
- **Aléa moyen (3)** : présence avérée d'un ou plusieurs horizons évaporitiques disséminés ou d'épaisseur métrique, 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 ;
- **Aléa faible (1)** : présence d'une formation connue pour contenir parfois des évaporites dans le territoire concerné ;
- **Aléa nul (0)** : pas de formation connue pour contenir des évaporites.

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

4.1.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

La région Hauts-de-France présente des formations géologiques réputées pour leurs horizons évaporitiques. Les thèses de Justine Briaïs et d'Aurore Laurent (*BRIAIS, 2015* et *LAURENT, 2021*) décrivent ces niveaux, à savoir :

- les formations du Viséen : calcaire carbonifère très fossilifère à brèches calcaires et anhydrite. Ces formations sont localisées dans les départements du Pas-de-Calais et du Nord. Plusieurs sondages réalisés en Belgique, près de Valenciennes, ont rencontré des lits d'anhydrite dans cette formation (*ABAD et BOURHIS, 2022*) ;
- les formations du Marinésien et du Ludien (Eocène) : alternance de niveaux sableux et marneux avec 4 niveaux de masses de gypse. Ces formations sont retrouvées dans le sud de l'Oise et de l'Aisne.

Une hypothèse de formation des « puits naturels » dans la région de Valenciennes est présentée dans les travaux de Luciane Licour (*LICOUR, 2014*), faisant suite à ses recherches durant sa thèse (*LICOUR, 2012*). Cette formation de puits d'effondrement serait directement liée à la présence d'évaporites dans les formations du Viséen : la dissolution des calcaires génère des effondrements localisés qui ne se propagent pas en raison de la présence de la couche d'anhydrite. L'anhydrite devient soluble au contact des calcaires mais subit une déformation ductile, donnant lieu à des cuvettes (cf. Figure 3).

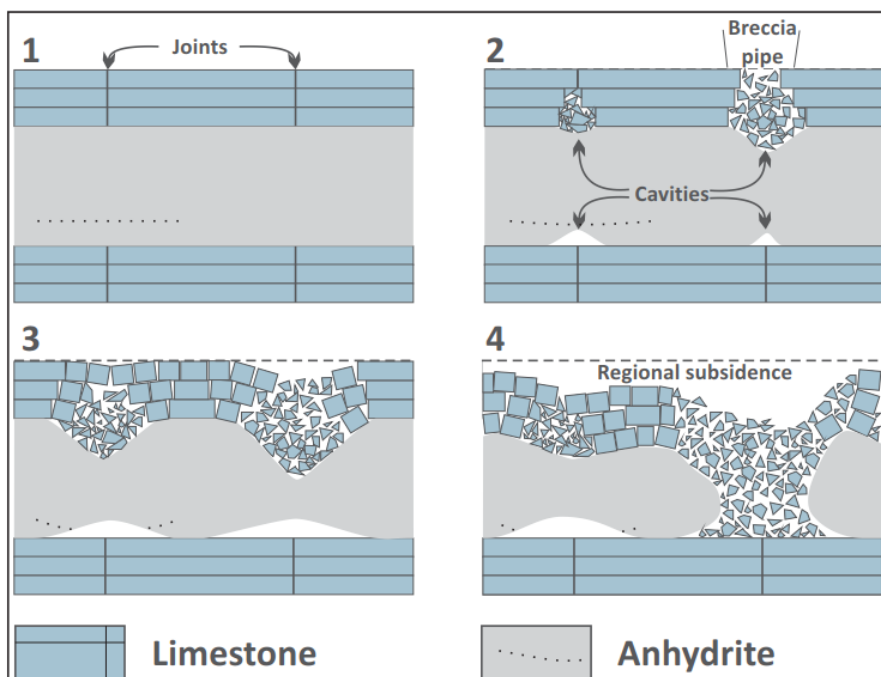


Figure 3 : Hypothèse de formation des puits naturels liés aux évaporites ("breccia pipes") (Source: *LICOUR, 2014*)

Comme préconisé par le guide méthodologique de 2015 (*MEDDE, 2015*) et par son addendum (*MET, 2023*), la qualification du phénomène « Affaissement / Surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau » nécessite l'utilisation de différents jeux de données :

- Les cartes géologiques harmonisées et vectorisées à l'échelle 1/50 000^{ème} ;
- Les données issues des forages disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM– données extraites en novembre 2022 ;
- Synthèses hydrogéologiques couvrant le territoire des Hauts-de-France :
 - Modèle de l'atlas hydrogéologique numérique de l'Oise (*BAULT et al., 2012*) ;

- Modèle de l'atlas hydrogéologique numérique l'Aisne (*ALLIER et al., 2009*) ;
- Modèle de l'atlas du potentiel géothermique du Nord – Pas de Calais (*PICOT & PIRA, 2011*) ;
- Modèle de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris (*SEGUIN et al., 2015*) ;

Plusieurs étapes de traitements ont été nécessaires pour récupérer les informations :

- **Etape 1** : Identification des couches géologiques susceptibles de contenir des horizons évaporitiques.
 - Recherche dans les ouvrages relatifs aux formations évaporitiques dans la région ;
 - Recherche par mots clefs des formations évaporitiques en profondeur au sein des données de forages issues de la Banque du Sous-Sol (BSS).
- **Etape 2** : Affectation des horizons évaporitiques aux :
 - Emprises des unités géologiques de la carte géologique régionale, vectorisée, à l'échelle 1/50 000^{ème} ;
 - Données de la BSS présentant les profondeurs des formations considérées ;
 - Emprises extraites des synthèses hydrogéologiques régionales.
- **Etape 3** : Création d'une couche « shapefile » associée aux niveaux d'évaporites et attribution des notes de susceptibilité par gamme de profondeur en fonction des paramètres observés.

Les formations du Viséen ont été cartographiées avec une susceptibilité faible. Bien que des travaux en Belgique ont démontré la présence d'horizons évaporitiques dans cette formation, les informations et données de la Banque du Sous-Sol (BSS) n'ont pas permis de confirmer cette présence dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais.

Les formations du Marinésien ont été cartographiées avec une susceptibilité faible. Les informations extraites de la thèse de Justine Briais (*BRIAIS, 2015*) mettent en évidence un niveau de masse de gypse au sein de cette formation. Cependant, aucune donnée de forage n'a permis de mettre en évidence des horizons évaporitiques au sein de ces formations.

Enfin, les formations du Ludien ont quant à elle été cartographiées en susceptibilité forte ou moyenne selon les informations qui ont pu être obtenues au cours de l'étude. Ainsi, la rive droite de la Marne a été classée en susceptibilité forte de par la présence avérée d'horizons évaporitiques de plusieurs mètres d'épaisseur qui ont été exploités pour la fabrication de plâtre, sur la rive droite du secteur de Château-Thierry, à partir de la première moitié du XIX^{ème} siècle. Cette exploitation s'est prolongée jusqu'à la fin des années 1960, date à laquelle ont fermé les dernières plâtrières.

La carte géologique de l'Aisne, datant de 1842 (cf. Figure 4), précise la localisation de ces exploitations de plâtre. En revanche, bien que les formations du Ludien soient présentes sur la rive gauche de la Marne, il n'est pas mentionnée l'existence d'exploitations similaires au sud de Château-Thierry. Un passage latéral de faciès, entre les marnes supragypseuses et le Calcaire de Champigny, est identifiable sur cette rive. D'autre part, il n'y a pas de données de la Banque du Sous-Sol (BSS) qui permet de confirmer l'existence d'horizons évaporitiques. Le choix a donc été fait de classer cette rive avec une susceptibilité moyenne.



Figure 4 : Extrait de la carte géologique du département de l'Aisne datant de 1842. En rouge : exploitations de plâtre dans la formation du Ludien

Le reste du territoire des Hauts-de-France a été cartographié avec une susceptibilité nulle.

Les informations ont été attribuées aux différentes gammes de profondeur. Les formations affleurantes (issues de la carte géologique à l'échelle 1/50 000^{ème}) ont été attribuées à la gamme de profondeur 10-50 m.

4.1.4. Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau »

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous (cf. Figure 5, Figure 6 et Figure 7) :

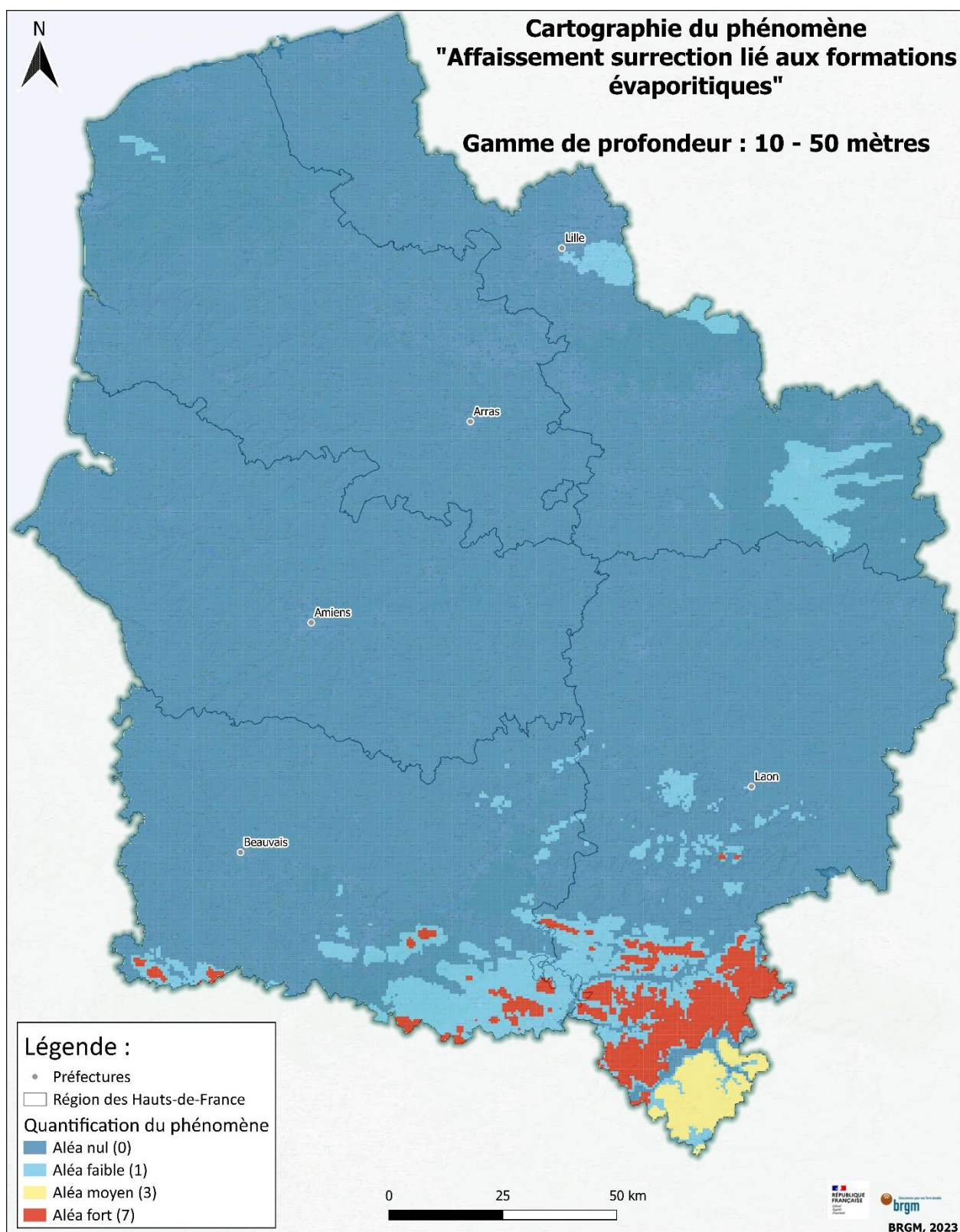


Figure 5 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

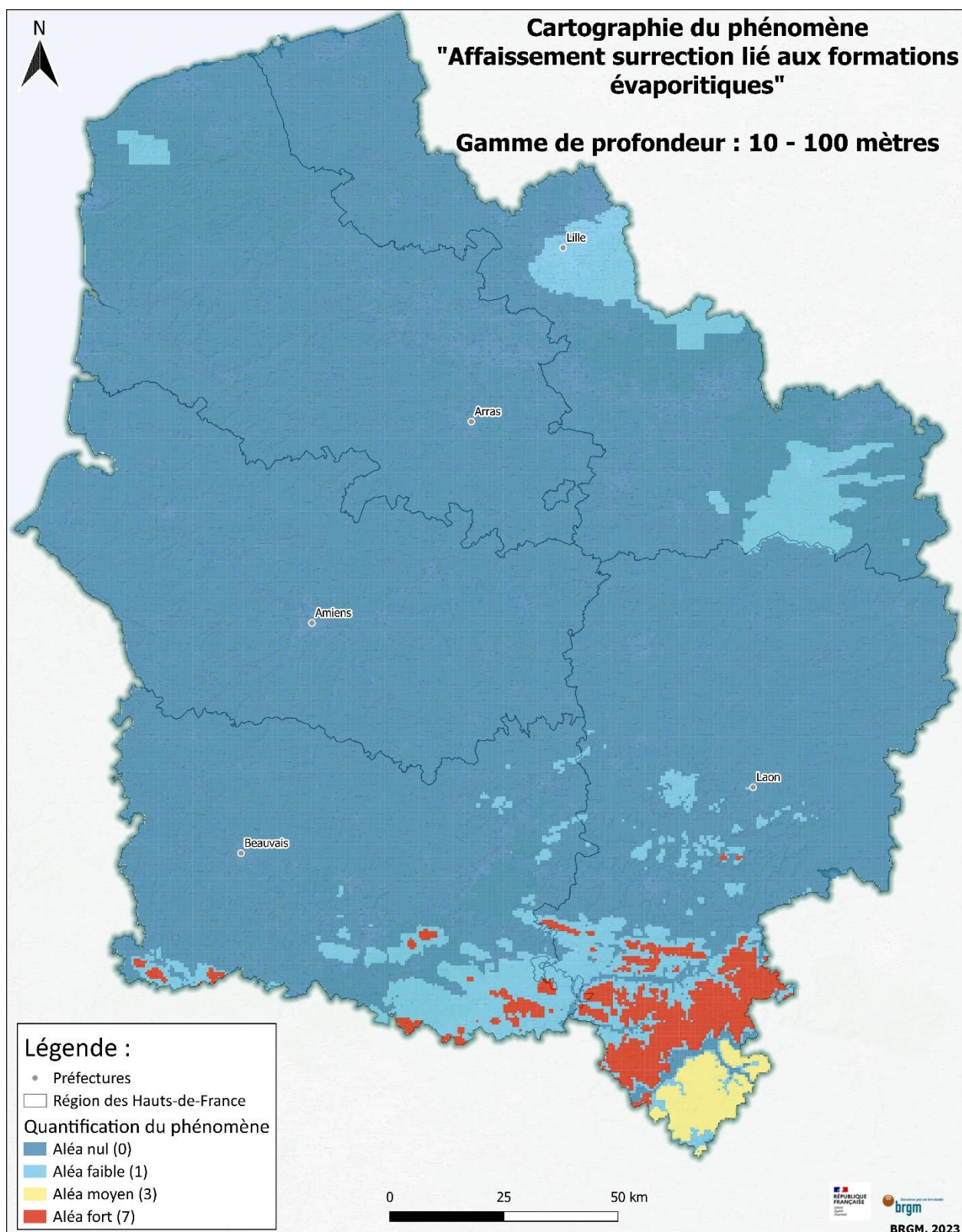


Figure 6 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m

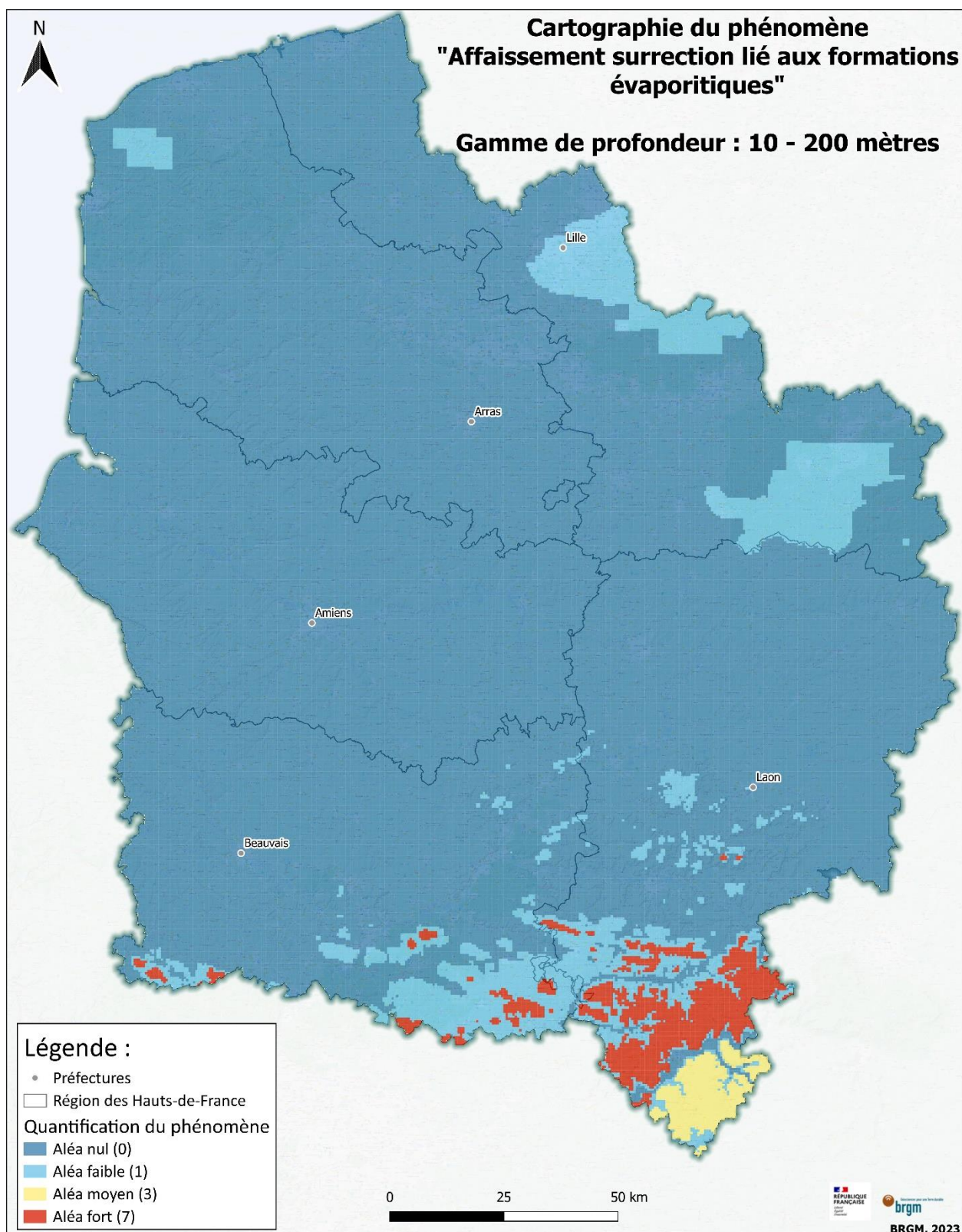


Figure 7 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 2) :

Tableau 2 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques »

Evaporite	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	116 482	29 120,5	91
	Faible (1)	7 614	1 903,5	5,9
	Moyen (3)	1 111	277,8	0,9
	Fort (7)	2 840	710	2,2
10-100 m	Nul (0)	114 505	28 626,3	89,4
	Faible (1)	9 586	2 396,5	7,5
	Moyen (3)	1 111	277,8	0,9
	Fort (7)	2 845	711,2	2,2
10-200 m	Nul (0)	113 496	28 374	88,6
	Faible (1)	10 595	2 648,8	8,3
	Moyen (3)	1 111	277,8	0,9
	Fort (7)	2 845	711,2	2,2

4.1.5. Cotation de l'aléa « Affaissement / surrection lié aux formations évaporitiques et à la présence d'eau »

Le guide méthodologique propose 5 niveaux de susceptibilité (0, 1, 3, 5 et 7) pour les cartes régionales (cf. 4.1.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 3 :

Tableau 3 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement / surrection lié aux évaporites » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte ²	Niveau d'aléa								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Evaporite	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	6	10	18	30
	Révisée	0	1	-	3	-	5	-	7	7			42	70
	Région Hauts-de-France	0	1	-	3	-	-	-	7	7			42	70

² La carte initiale correspond ici à la carte à l'échelle nationale qui est actuellement appliquée sur la région Hauts-de-France. La carte révisée correspond, quant à elle, à la carte à l'échelle régionale.

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

Cet aléa a été évalué par le CEREMA.

4.2.1. Description du phénomène et occurrences

Ces phénomènes d'affaissement ou d'effondrement peuvent se produire naturellement mais peuvent aussi être provoqués par la mise en place d'un dispositif de géothermie de minime importance. Ainsi, ces phénomènes d'affaissement ou d'effondrement pourraient être provoqués, soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte. En terme d'occurrence, un exemple de désordre lié à une cavité a été identifié à Bromley en Grande-Bretagne. Une formation sableuse a progressivement glissé dans une cavité karstique sous-jacente. Il en a résulté un affaissement et des dégâts importants sur le bâti. Ainsi, les cavités de dissolution des réseaux anciens (paléokarsts³), potentiellement remplies de matériaux sans cohérence, sont-elles concernées par le phénomène d'infiltration et de soutirage.

Sur le territoire des Hauts-de-France, des phénomènes karstiques ont été mis en évidence sur les hauteurs de l'Artois, du Cambrésis et de la Picardie (*MEILLIEZ, 2016* et *MAQSOUUD et al., 1996*) : ces phénomènes karstiques affectent la couche géologique de la craie. Toutefois, les poches de dissolution en ayant résulté n'ont pas été systématiquement recensées : elles ne figurent pas (ou de manière exceptionnelle) dans les bases de données cavités actuellement disponibles sur le territoire des Hauts-de-France. Ces dernières, en effet, sont essentiellement constituées de cavités d'origine anthropique. Aussi, plutôt que les formations karstiques, ce sont les travaux souterrains accomplis par l'homme (par exemple, les carrières de craie) qui ont été pris en compte pour élaborer la carte des zones réglementaires pour la géothermie de minime importance.

Parmi les travaux souterrains accomplis par l'homme, il faut dissocier ceux civils de ceux militaires :

- les ouvrages civils (carrières, catiches, boves) se situent principalement dans la couche géologique de la craie : il en était extrait, par exemple, du matériau pour la construction ;
- les ouvrages militaires édifiés durant la Première Guerre mondiale (parmi lesquels les sapes de guerre, les souterrains refuges et les tranchées) n'ont, quant à eux, pas été creusés dans des couches géologiques préférentielles : ils ont aussi bien été façonnés « dans les roches calcaires de la région que dans des terrains meubles » (*DESCAMPS, 2022*).

Les poches de dissolution et les cavités d'origine anthropique façonnées en vue de desseins agricoles, industriels ou de construction se retrouvent essentiellement dans la même couche géologique : celle de la craie. Ce n'est cependant pas le cas des ouvrages militaires souterrains : ceux-ci se concentrent autour des positions successives occupées par les forces belligérantes au cours du premier conflit mondial. Des facteurs historiques autant que géologiques expliqueront donc la carte finale de l'aléa.

³ Paléokarst : karst ancien dans lequel il n'y a plus de circulation d'eau.

4.2.2. Qualification du phénomène

Il n'existe pas, actuellement, de carte de ce phénomène à l'échelle nationale.

La qualification du phénomène « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors-mines) » dépend des données disponibles. Pour comprendre, considérons une maille X quelconque de la zone d'étude. Cette maille est un carré de 500 mètres de côté. Si cette maille X se situe sur un territoire où une carte d'aléa « cavités » a été produite (dans le cadre d'un PPR, par exemple), alors la qualification du phénomène est établie comme suit :

- **Aléa fort (7)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte une zone d'aléa fort, c'est-à-dire une zone potentiellement concernée par des effondrements localisés, généralisés ou en masse ;
- **Aléa moyen (5)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte pas de zone d'aléa fort, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa moyen, c'est-à-dire une zone potentiellement concernée par un aléa affaissement progressif ;
- **Aléa faible (1)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte ni zone d'aléa fort, ni zone d'aléa moyen, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa faible, c'est-à-dire une zone soit concernée par des cavités ne pouvant engendrer en surface que des mouvements résiduels de faible ampleur, soit sans cavité connue mais qui est susceptible d'en contenir (exemple d'une formation carbonatée) ;
- **Aléa nul (0)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte aucune zone susceptible de contenir des cavités.

Si la maille X ne se situe pas sur un territoire où une carte d'aléa « cavités » a été produite, alors le phénomène est qualifié en fonction de sa susceptibilité (probabilité d'occurrence). Celle-ci est fonction de deux paramètres :

- du nombre de cavités ayant été recensées dans la maille X ;
- de la présence, ou non, au droit de la maille X, de couches géologiques susceptibles de contenir des cavités.

Ces deux paramètres sont combinés comme suit pour qualifier la susceptibilité du phénomène. Soit, ainsi, une maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres :

- **Susceptibilité forte (3)** : s'il est recensé plus de 8 cavités dans la maille X considérée ;
- **Susceptibilité moyenne (2)** : s'il est recensé plus de 4 cavités, mais moins de 9, dans la maille X considérée ;
- **Susceptibilité faible (1)** : s'il est recensé plus d'une cavité, mais moins de 5, dans la maille X considérée, ou s'il y a présence, au droit de cette maille X, d'une couche géologique susceptible de contenir des cavités dans la tranche de profondeur étudiée ;
- **Susceptibilité nulle (0)** : s'il est recensé moins de 2 cavités dans la maille X considérée, et s'il y a absence, au droit de cette maille X, d'une couche géologique susceptible de contenir des cavités dans la tranche de profondeur considérée.

Une remarque s'avère ici nécessaire : les zones de combat de la Première Guerre Mondiale sont susceptibles de contenir des cavités (par exemple, des sapes de guerres ou des souterrains refuges). De ce fait, ces zones de combat ont été traitées comme des « couches géologiques susceptibles de contenir des cavités ». Ce concept de « couche géologique susceptible de contenir des cavités », issu du guide méthodologique (MEDDE, 2015), n'est donc pas complètement approprié pour décrire les travaux réalisés. En effet, les ouvrages militaires de la

Première Guerre mondiale n'ont pas été façonnées dans des couches géologiques préférentielles. Dans le cas présent, il serait par conséquent plus juste de désigner les terrains susceptibles de contenir des cavités par l'appellation suivante : « terrains susceptibles de contenir des cavités du fait de leur nature géologique ou de l'histoire régionale ».

Ce phénomène a été cartographié pour la gamme de profondeur 10-200 m.

4.2.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

Différents types de données ont été utilisés pour construire la cartographie de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) ». Ces différentes données, ainsi que les méthodes employées pour les traiter et les intégrer dans les cartes finales, sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

a) Les études d'aléa « mouvements de terrain »

Plusieurs Plans de Prévention des Risques (PPR) « mouvements de terrain » ont été approuvés sur le territoire des Hauts-de-France. Il s'agit :

- des PPR de Laon et de Saint-Quentin dans l'Aisne (02) ;
- du PPR de Valenciennes dans le Nord (59) ;
- des PPR de Fresnières, Vez, Clermont, Tricot, Esquennoy, Candor, Beaulieu-les-Fontaines, Ecuilly et de Margny-aux-Cerises dans le département de l'Oise (60) ;
- des PPR d'Arras et de Barly dans le Pas-de-Calais (62) ;
- du PPR de l'arrondissement de Montdidier dans la Somme (80).

Dans le cadre de l'élaboration de ces PPR « mouvements de terrain », des études d'aléa « mouvements de terrain » ont été réalisées. Ces études ont été utilisées pour construire les cartographies de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ». A ces études, s'en ajoutent deux autres :

- l'étude d'aléa « mouvements de terrain » menée dans le cadre de l'élaboration du Plan d'Exposition aux Risques (PER) « mouvements de terrain » sur les communes de Faches-Thumesnil, Hellemmes, Lesquin, Lezennes, Lille, Loos, Ronchin, Seclin, Templemars, Vendeville, Villeneuve d'Ascq et Wattignies (59) ;
- l'étude d'aléa « mouvements de terrain » menée dans le cadre du PPR prescrit, mais non approuvé, des communes d'Oeuilly et Pargnan (02).

D'autre part, il est à noter que le PPR de l'arrondissement de Montdidier présente une particularité. Dans ce PPR, il est cartographié des aléas « mouvement de terrain » associés à la présence de cavités souterraines et des aléas « mouvement de terrain » de type « glissements de terrain ». Seuls les premiers ont été retenus pour qualifier ce phénomène. Les seconds ont été retenus pour qualifier le phénomène « mouvements de terrain de type glissement ».

Les fichiers géoréférencés, élaborés lors des études d'aléa cités ci-dessus, n'étaient pas toujours disponibles. Dans ce cas, des fichiers PDF rendant compte de ces études et publiés sur internet ont été utilisés. Ces fichiers PDF ont été convertis au format TIF avant d'être manuellement

géoréférencés à l'aide des outils proposés par le logiciel QGis. Ces manipulations ont nécessairement induit quelques approximations.

Les croisements des aléas « mouvements de terrain » avec les mailles de la grille d'étude ont été réalisés sans difficulté lorsque les fichiers géoréférencés étaient disponibles. Lorsque ce n'était pas le cas, le croisement a été réalisé manuellement : un opérateur a étudié chacune des mailles intersectant des zones d'aléa « mouvement de terrain », manuellement géoréférencées, pour déterminer quelle intensité d'aléa leur affecter. Cette procédure a été mise en œuvre pour les cartes d'aléa issues des PPR suivants : le PPR de Barly, le PPR de Fresnières, le PPR de Clermont, le PPR de Tricot, le PPR d'Esquennoy, le PPR de Candor, Beaulieu-les-Fontaines, Ecuilly et Margny-aux-Cerises ainsi que le PPR de l'arrondissement de Montdidier. Pour ce dernier, qui s'étend sur plusieurs communes, un pré-traitement⁴ du fichier manuellement géoréférencé a été mis en œuvre pour faciliter le travail de l'opérateur.

b) Les bases de données recensant les cavités sur le territoire des Hauts-de-France

La base de données dite « cavités » disponible sur le portail Géorisques (www.georisques.gouv.fr) est une base de donnée au sein de laquelle sont recensées les cavités connues sur le sol français. Cette base de donnée n'est pas exhaustive, mais elle est la plus complète (à l'échelle du territoire national) parmi celles qui existent. Au sein de cette base de données, les cavités sont des objets ponctuels géoréférencés. Ces objets ponctuels sont localisés avec une précision variable. Aussi, pour la construction de la cartographie de l'aléa, les cavités n'ont pas été représentées par des points, mais par des disques : ces disques sont centrés sur les cavités et présentent des rayons égaux à la précision (augmentée de 50 mètres) avec laquelle elles sont localisées. Du fait de ce mode de représentation, c'est le nombre N_1 de disques qu'une maille intersecte (et non le nombre d'objets ponctuels qu'elle contient) qui a été comptabilisé pour qualifier la susceptibilité du phénomène.

D'autres bases de données recensant des cavités non minières ont été utilisées pour compléter les informations issues de la base de données « cavités » disponible sur le portail Géorisques. Ces bases de données complémentaires sont listées ci-dessous. Il est également détaillé la manière dont les données issues de ces bases ont été traitées pour les inclure dans la cartographie de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) » :

- Base de données « mouvements de terrain » disponible sur le portail Géorisques : cette base de données recense les mouvements de terrain connus sur le territoire français. Certains des mouvements de terrain recensés dans cette base sont associés à des effondrements ou des affaissements de cavités. Ces mouvements de terrain ont donc été considérés comme des cavités. Aussi, à l'instar des objets issus de la base de données « cavités », des disques ont été construits autour des mouvements de terrain avec un rayon égal à la précision (augmentée de 50 mètres) avec laquelle ils sont localisés. Il a ensuite été déterminé, pour chaque maille, le nombre de disques intersectés. Le résultat obtenu a été ajouté à N_1 pour obtenir N_2 ;

⁴Ce pré-traitement s'est basé sur l'analyse des couleurs de l'image géoréférencée : d'abord pour exclure les pixels représentant les routes et limites de communes, ensuite pour classer les pixels restants par couleur, c'est-à-dire par intensité d'aléa (chaque couleur correspondant à une intensité d'aléa donnée). Ces opérations réalisées, le raster a été vectorisé puis, à l'aide des outils proposés par le logiciel QGis, croisé avec les mailles de la grille d'étude. L'opérateur a alors manuellement vérifié que les résultats obtenus étaient justes. Lorsque ce n'était pas le cas, les valeurs initialement calculées ont été corrigées.

- Inventaire des cavités présentes sur le territoire de la communauté urbaine d'Arras, réalisé lors de l'élaboration du PPR « mouvements de terrain » d'Arras : les objets constituant cette base de données sont de trois types : ponctuel, linéaire et polygonale et leur localisation est précise. Aucune zone tampon n'a donc été définie et, pour chaque maille, il a simplement été calculé le nombre d'objet qu'elle intersectait. Le résultat obtenu a été ajouté à N_2 pour obtenir N_3 ;
- Registre (sous forme d'un tableau) des cavités connues dans le département Pas-de-Calais, recensé et mis à jour par la DDTM du Pas-de-Calais : certaines données de ce registre n'avaient pas encore été intégrées dans la base de données « cavités » disponible sur Géorisques. Ces cavités ont donc été également prises en compte dans la cartographie de l'aléa. Pour ce faire, celles-ci ont tout d'abord été manuellement géoréférencées grâce aux adresses indiquées dans le tableau. Dans certains cas, cependant, les localisations exactes n'ont pu être déterminées avec précision. C'est pourquoi, pour intégrer ces données à la grille finale, des disques de 50 mètres de rayon ont été construits autour des objets ponctuels initiaux. Ceci fait, il a été déterminé, pour chaque maille, le nombre de ces disques qu'elle intersectait. Le résultat obtenu a été ajouté à N_3 pour obtenir N_4 .

C'est ce nombre N_4 qui a été pris en compte pour mettre en œuvre la méthodologie détaillée au paragraphe 4.2.2 et permettant de qualifier, au niveau de chaque maille, la susceptibilité du phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ».

c) Les terrains susceptibles de contenir des cavités

- Les couches géologiques :

L'aquifère de la Craie du Sénonien-Turonien (ou Séno-Turonien) est une formation géologique dans laquelle se situent de nombreuses cavités d'origine anthropique : souterrains refuges (muches), exploitations de craie (catiches) par exemple. Cet aquifère a donc été considéré comme une couche géologique susceptible de contenir des cavités. Dans la cartographie finale, néanmoins, cette couche géologique n'a été prise en compte qu'au droit des mailles où sa profondeur était inférieure à 50 mètres. Au-delà, en effet, la susceptibilité de rencontrer des cavités anthropiques est faible.

- Les zones de combat de la Première Guerre mondiale :

Les zones de combat de la Première Guerre mondiale sont également des secteurs susceptibles de contenir des cavités. En effet, à l'issue du conflit, les nombreux ouvrages militaires (tranchées, sapes de guerre et souterrains refuges) ayant été creusés sur la ligne de front n'ont pas tous été remblayés avec soin. La plupart des sapes de guerre et souterrains refuges n'ont été qu'obstrués et, le temps faisant son œuvre, ces ouvrages militaires peuvent aujourd'hui causer des désordres en surface (DESCAMPS, 2022). Il a donc été recensé les communes des Hauts-de-France sur lesquelles des ouvrages militaires ont été édifiés lors de la Première Guerre mondiale. Pour ce faire, deux sources de données en ligne ont été mobilisées :

- le site internet de la bibliothèque nationale d'Écosse sur lequel sont disponibles les cartes d'état-major alliées de la Première Guerre mondiale (pour les zones de combat situées en Belgique et dans les Hauts-de-France) : <https://www.nls.uk> ;
- le site internet des archives allemandes sur lequel sont accessibles les cartes d'état-major de l'armée allemande : <https://invenio.bundesarchiv.de>.

Les cartes alliées sont géoréférencées, ce qui n'est pas le cas des cartes allemandes, ces dernières ont donc été géoréférencées manuellement. Ces cartes ont ensuite été étudiées une à une afin de déterminer les communes sur lesquelles des tranchées ont été réalisées. La Figure 8 montre l'ensemble des communes sur lesquelles (au minimum) une ou plusieurs portions de tranchée ont été constatées. Cet ensemble de communes a été confronté à la grille d'étude : les mailles intersectant les communes inventoriées ont été considérées comme des mailles situées au droit de secteurs susceptibles de contenir des cavités.

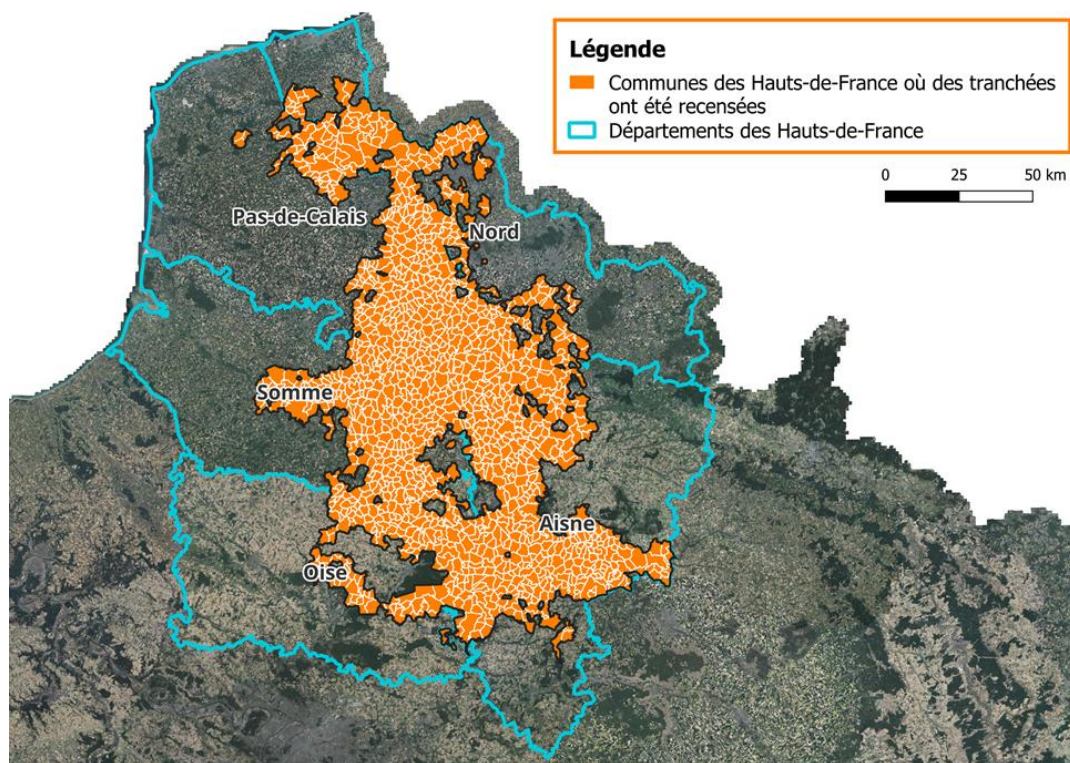


Figure 8 : Communes des Hauts-de-France où des tranchées de la Première Guerre Mondiale ont été recensées

L'inventaire des communes situées sur des zones de combat n'est peut-être pas exhaustif. En effet, de nombreuses cartes étaient disponibles sur le site internet des archives allemandes et toutes n'ont pas été géoréférencées et étudiées. Quelques communes, en marge des combats, ont donc pu être oubliées au cours de l'analyse des données disponibles.

- L'inventaire de l'association Sub Artésia :

Dans le département du Pas-de-Calais, une association (Sub Artésia) a établi un inventaire de cavités. Dans ce tableau, il est recensé, par commune, les cavités connues de l'association. Les communes figurant dans ce tableau ont donc été considérées comme des secteurs susceptibles de contenir des cavités. La Figure 9 montre l'ensemble de ces communes. Cet ensemble de communes a été confronté à la grille d'étude : les mailles intersectant les communes inventoriées par Sub Artésia ont été considérées comme des mailles situées au droit de secteurs susceptibles de contenir des cavités.

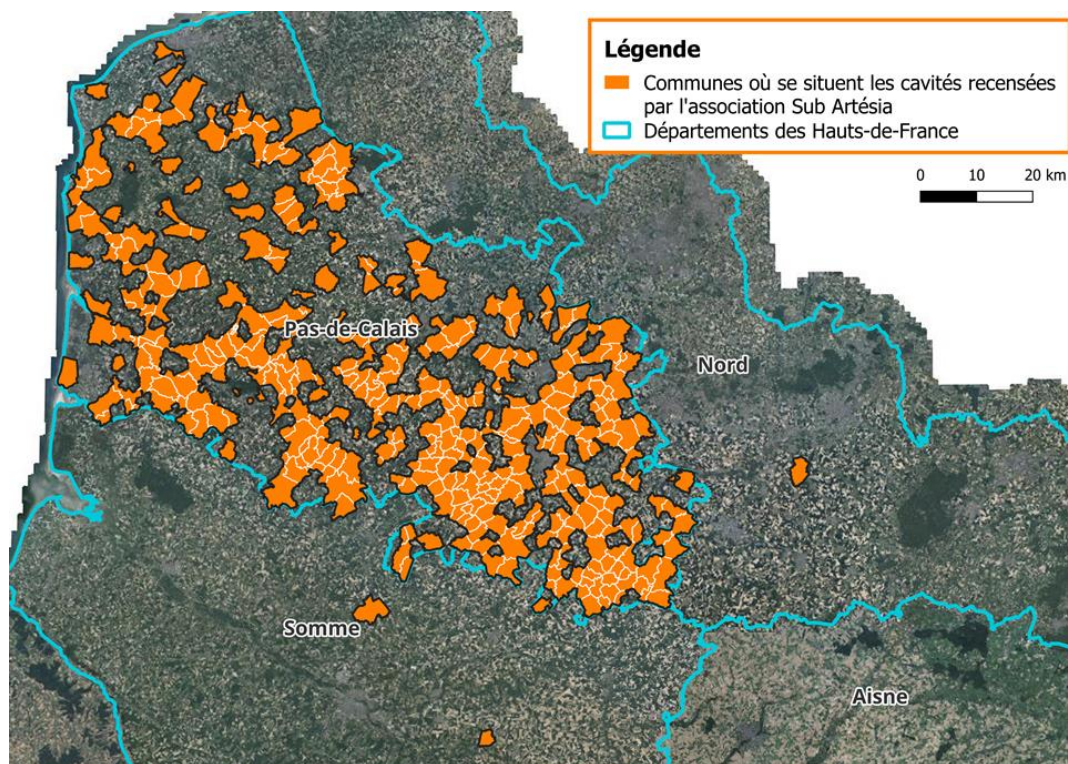


Figure 9 : Cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » pour toutes les tranches de profondeur

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

La cartographie de cet aléa pour la gamme de profondeur 10-200 m est présentée ci-dessous (cf. Figure 10) :

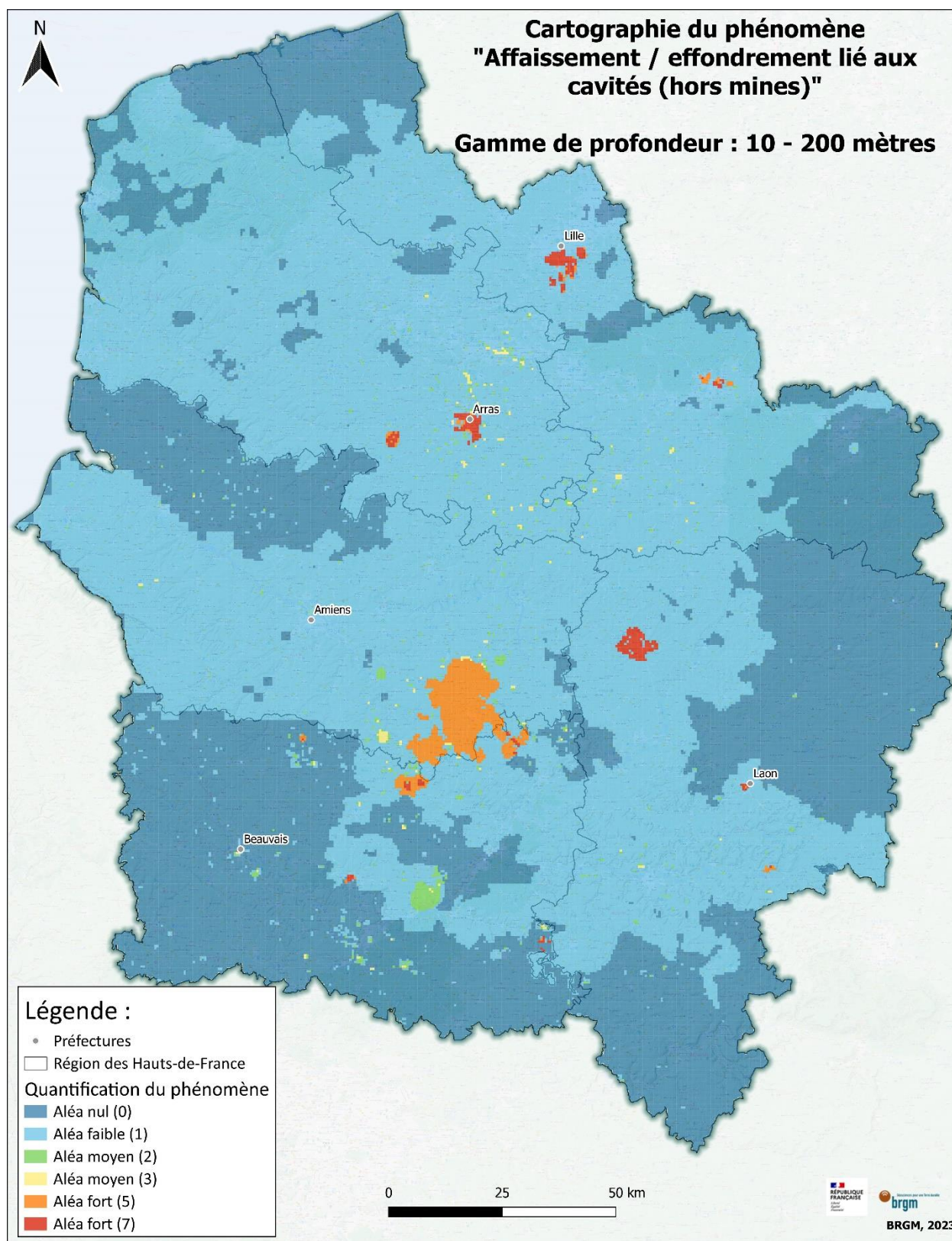


Figure 10 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités (hors mines) » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 4) :

Tableau 4 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »

Cavité (hors mine)	Niveau d'aléa ou susceptibilité	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-200 m	Nul (0)	48 360	12 090	37,8
	Faible (1)	77 088	19 272	60,2
	Moyen (2)	630	157,5	0,5
	Moyen (3)	198	49,5	0,2
	Fort (5)	1 319	329,8	1,0
	Fort (7)	452	113	0,3

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

Le guide méthodologique propose 6 niveaux de susceptibilité (0, 1, 2, 3, 5 et 7) pour les cartes régionales (cf. 4.2.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa et de susceptibilité de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 5 :

Tableau 5 : Cotation du niveau d'aléa ou de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa ou susceptibilité								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Cavité (hors mine)	Initiale	0	1	2	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	2	3	-	5	-	7	7			14	14
	Région Hauts-de-France	0	1	2	3	-	5	-	7	7			14	14

4.3. ALEA « AFFAISSEMENT / EFFONDREMENT LIÉ AUX CAVITÉS MINIÈRES »

Cet aléa a été évalué par le CEREMA.

4.3.1. Description du phénomène et occurrences

Il s'agit ici d'effondrements localisés (par exemple de type « fontis » ou « débouillage de puits ») et généralisés ainsi que d'affaissements. De par leur intensité et soudaineté, les effondrements localisés et généralisés sont susceptibles de mettre en péril la sécurité des personnes. Ils génèrent donc un impact plus fort que celui associé aux affaissements, phénomènes plus lents, qui n'induisent généralement qu'un risque économique en ne mettant en péril que les constructions. Dans le cadre d'un projet de géothermie basse température, la foration peut avoir des conséquences sur la tenue des terrains et ainsi provoquer des phénomènes d'affaissement / effondrement dans les zones concernées par des cavités minières. Ces phénomènes pourraient donc être provoqués soit par la foration au cours de la mise en place du dispositif, soit, sur toute la durée de vie de l'ouvrage, par la mise en communication d'eau de surface ou d'aquifères superficiels ou profonds avec les cavités à la faveur d'ouvrages souterrains mal réalisés ou difficilement réalisables dans ce contexte.

4.3.2. Qualification du phénomène

Il n'existe pas, actuellement, de carte de ce phénomène à l'échelle nationale.

La qualification de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités minières » dépend des données disponibles. Pour comprendre, considérons une maille X quelconque de la zone d'étude. Cette maille est un carré de 500 mètres de côté. Si cette maille X intersecte (au moins) une des zones constituant une carte d'aléas miniers, alors la qualification du phénomène est établie comme suit :

- **Aléa fort (7)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte une zone d'aléa fort, c'est-à-dire une zone potentiellement concernée par des effondrements localisés et généralisés en lien avec une exploitation minière passée ou actuelle ;
- **Aléa moyen (3)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte pas de zone d'aléa fort, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa moyen, c'est-à-dire une zone potentiellement concernée par des phénomènes d'affaissement progressif (phénomène lent) ;
- **Aléa faible (1)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte ni zone d'aléa fort, ni zone d'aléa moyen, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa faible, c'est-à-dire une zone exploitée qui ne peut engendrer en surface que des mouvements de faible ampleur ;
- **Aléa nul (0)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte aucune zone susceptible de contenir des cavités.

Si la maille X intersecte d'autres données (porteuses d'informations sur les activités minières actuelles ou passées) que des cartes d'aléas miniers, le phénomène est qualifié en fonction de sa susceptibilité (probabilité d'occurrence). Cette susceptibilité d'occurrence du phénomène est indépendante de l'origine des données intersectées :

- **Susceptibilité moyenne (3)** : cette valeur caractérise le fait que la maille X se situe au droit, ou à proximité, de travaux miniers susceptibles d'engendrer des affaissements. Il s'agit de la valeur qui est systématiquement considérée ;

- **Susceptibilité nulle (0)** : lorsque la maille X n'intersecte aucune donnée porteuse d'information sur les activités minières (cartes d'aléas miniers ou autres).

Une même maille X peut intersecter différents types de données : par exemple, une même maille X peut intersecter une extension d'exploitation minière (issue du site Camino) et une carte d'aléas miniers. Dans ce cas, il est choisi de conserver la donnée conduisant au niveau d'aléa / susceptibilité le plus haut pour qualifier le phénomène « affaissement / effondrement des cavités minières ».

4.3.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

Différents types de données ont été utilisées pour construire la cartographie de l'aléa « affaissement / effondrement lié aux cavités minières ». Ces différentes données, ainsi que les méthodes employées pour les traiter et les intégrer dans les cartes finales, sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

a) *Les études d'aléas miniers*

Des études d'aléas miniers ont été menées sur le territoire des Hauts-de-France. Ces études ont été réalisées par Geoderis. Elles l'ont été au droit des anciennes exploitations minières suivantes :

- les mines de charbon du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais ;
- les mines de charbon du Boulonnais ;
- les mines de fer de l'Avesnois.

Dans la présente étude, seules les deux dernières ont été considérées. En effet, les cartes d'aléas relatives aux mines de charbon du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais ont été déjà prises en compte dans de précédents travaux (ABAD et BOURHIS, 2022).

b) *La base de données SIGMINES*

La base de données SIGMINES n'est plus maintenue et n'est plus accessible en ligne. Toutefois, cette base existe toujours et les services du BRGM y ont encore accès : les données situées sur le territoire des Hauts-de-France ont pu donc être récupérées et exploitées. Leur étude a montré qu'il était recensé, dans la base SIGMINES et sur le territoire des Hauts-de-France, trois types d'exploitation minière : des exploitations de charbon, de fer et de phosphate.

Parmi les mines de charbon et de fer recensées, il n'a pas été pris en compte (pour éviter toute redondance) celles sur les territoires desquels des études d'aléas avaient été menées par Géodérès. Cette opération a mené à exclure de l'exploitation des données SIGMINES celles correspondant aux mines de fer de l'Avesnois et celles correspondant aux mines de charbon du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais.

De même, parmi les exploitations de phosphate recensées dans la base SIGMINES, toutes n'ont pas été prises en compte. Des analyses plus poussées que pour les autres sites SIGMINES ont été menées sur les exploitations de phosphates situées à moins de 500 mètres de crayères répertoriées dans la base de données « Cavités ». Lors de ces analyses, il a été recherché des données sur ces crayères afin de déterminer si elles étaient, ou non, des carrières de craie

phosphatée. Lorsque c'était le cas, il a été considéré que les exploitations de phosphates issues de SIGMINES désignaient les mêmes objets que les crayères issues de la base de données « Cavités » : les exploitations de phosphate situées à proximité (moins de 500 mètres) de carrières de craie phosphatées n'ont donc pas été prises en compte pour qualifier l'aléa « affaissement/effondrement des cavités minières ». En effet, ces crayères / exploitations de phosphate ayant déjà été prises en compte pour qualifier l'aléa « affaissement / effondrement des cavités (hors mine) », les prendre en compte pour qualifier le phénomène « affaissement / effondrement des cavités minières » aurait été redondant. Les sites SIGMINES situés à Lille, Templeux-le-Guérard et Hardivillers ont ainsi été éliminés de l'analyse. Les deux premiers sites sont situés à moins de 500 mètres de plusieurs crayères dont des rapports du BRGM (COULOMBEAU, 2016 ; RICOUR et LEPLAT, 1990) donnent à penser qu'il s'agissait de carrières de craie phosphatée. Quant au troisième, il est situé dans une maille où une carrière de craie phosphatée est recensée dans la base de donnée « Cavités ».

La Figure 11 montre les données SIGMINES finalement prises en compte.

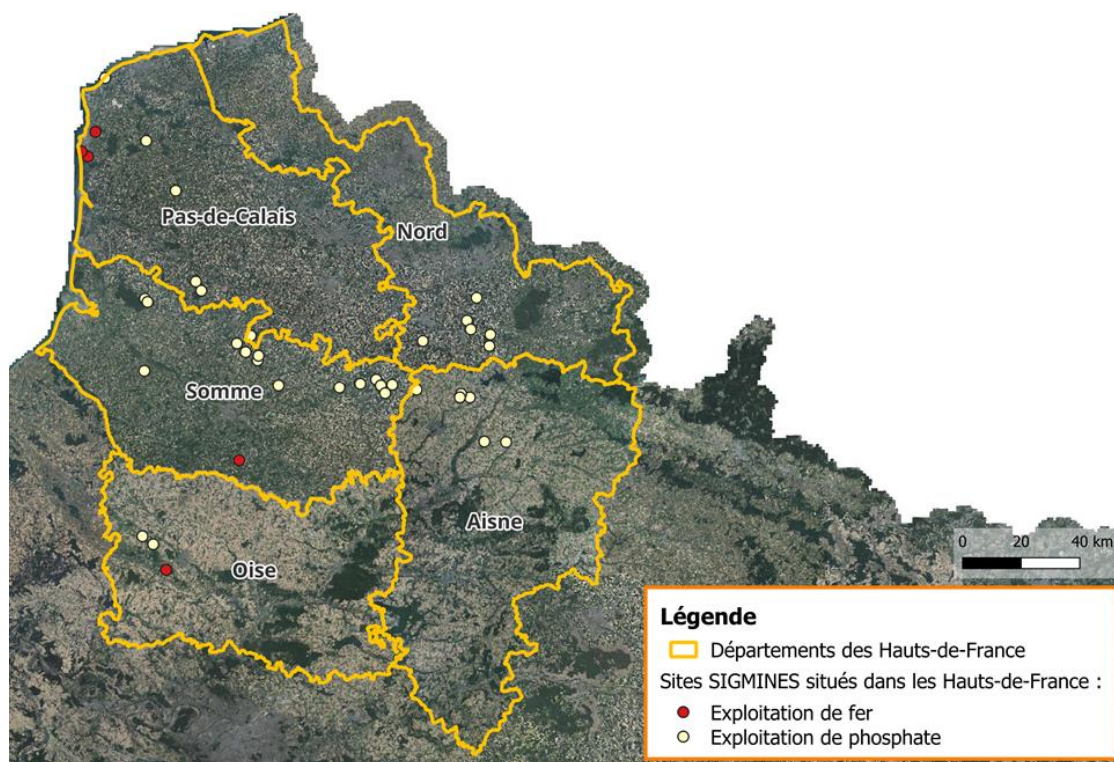


Figure 11 : Données SIGMINES utilisées pour qualifier le phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités minières »

Ces données issues de la base de données SIGMINES sont des objets ponctuels. Par conséquent, elles ne comportent aucune information sur l'étendue des travaux miniers. Aussi, des disques ont été construits pour prendre en compte l'étalement spatial des travaux miniers : ces disques, de 5 kilomètres de rayon, ont été centrés sur les objets ponctuels de la base SIGMINES. Une fois ces disques générés, il a été attribué aux mailles les intersectant une susceptibilité moyenne.

c) Le cadastre minier numérique ouvert

Le cadastre minier numérique ouvert est actuellement disponible sur le site <https://camino.beta.gouv.fr>. Cette base de données est constituée d'objets polygonaux

représentant les extensions des exploitations minières. Celles situées sur le territoire des Hauts-de-France ont été récupérées et analysées.

Parmi les données ainsi extraites, celles relatives au bassin houiller du Nord–Pas-de-Calais n'ont pas été prises en compte dans l'analyse : celui-ci, en effet, ne fait pas partie du périmètre de l'étude (pour le phénomène « affaissement/effondrement des cavités minières »). Toutes les autres extensions d'exploitation minière recensées sur le territoire des Hauts-de-France ont été prises en compte. Ces extensions d'exploitation minière prises en compte peuvent être réparties en 3 groupes :

- les extensions d'exploitation minière qui correspondent aux mines de fer de l'Avesnois ;
- les extension d'exploitation minière qui correspondent aux mines de charbon du Boulonnais ;
- les extensions d'exploitation minière situées dans l'Aisne et l'Oise : ces 5 exploitations correspondent à des stockages souterrains de gaz naturel ou à des exploitations d'hydrocarbures (liquides ou gazeux) (cf. Figure 12).

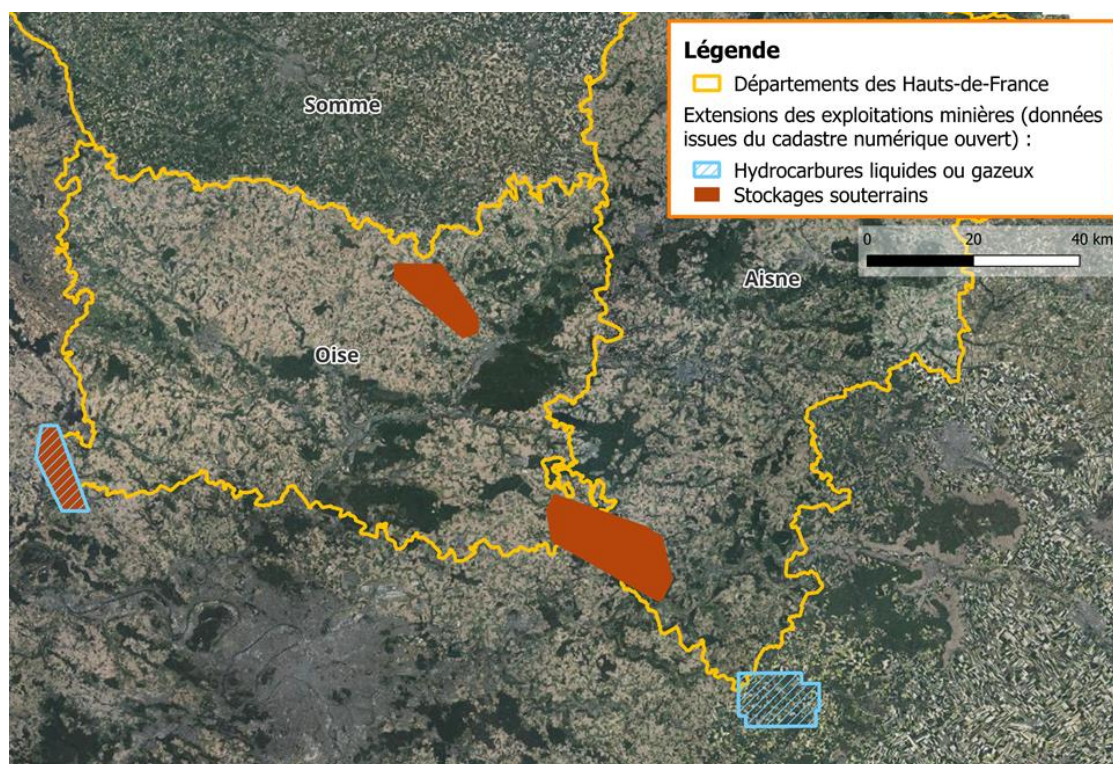


Figure 12 : Les extensions d'exploitations minières situées dans l'Oise et dans l'Aisne

Il a été attribué une susceptibilité d'occurrence du phénomène moyenne aux mailles intersectant les extensions retenues.

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

La cartographie de cet aléa pour la gamme de profondeur 10-200 m est présentée ci-dessous (cf. Figure 13) :

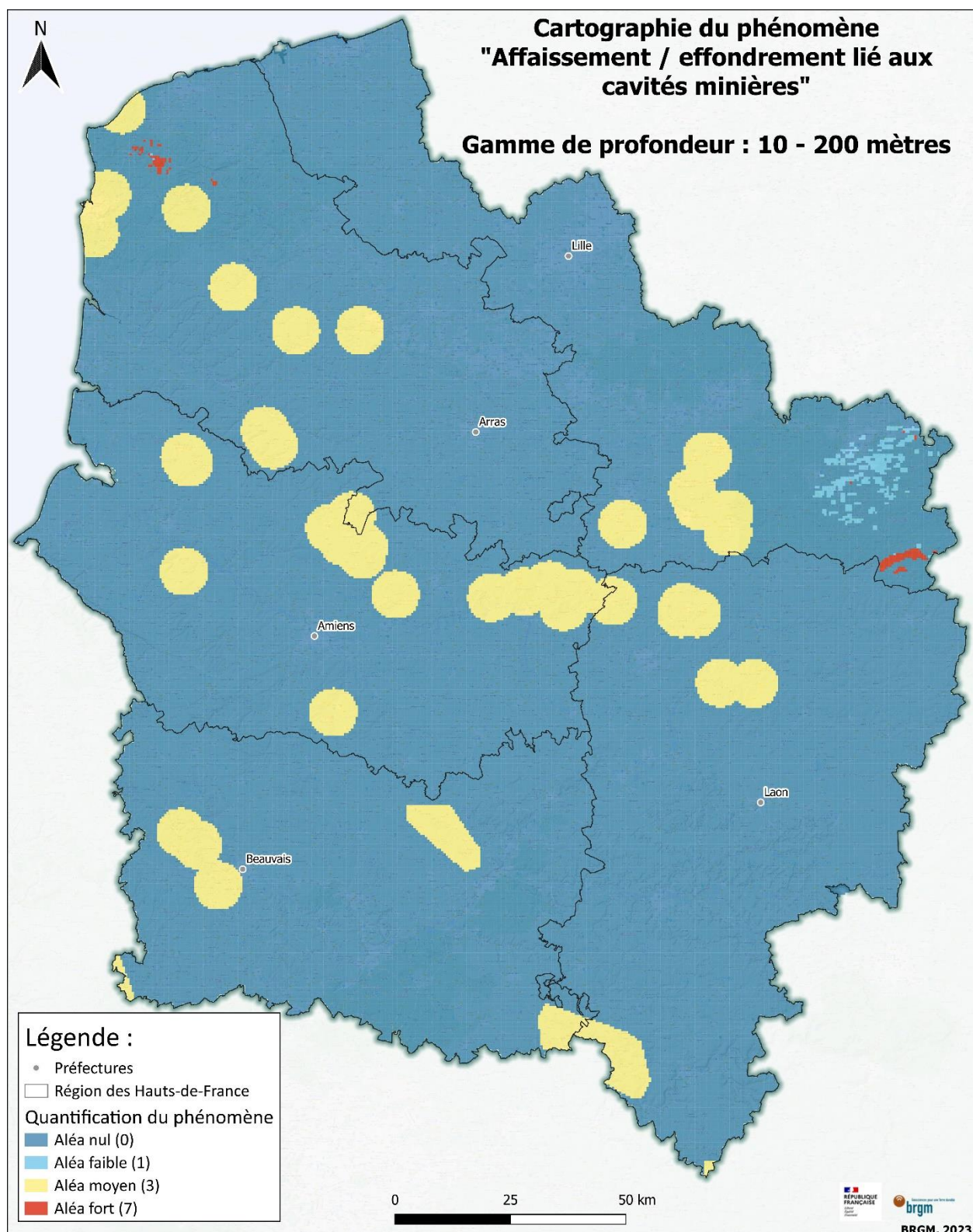


Figure 13 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 6) :

Tableau 6 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières »

Cavité minière	Niveau d'aléa ou susceptibilité	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-200 m	Nul (0)	115 864	28 966	90,5
	Faible (1)	465	116,3	0,4
	Moyen (3)	11 566	2 891,5	9,0
	Fort (7)	152	38	0,1

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

Le guide méthodologique propose 5 niveaux de susceptibilité (0, 1, 3, 5 et 7) pour les cartes régionales (cf. 4.3.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 7 :

Tableau 7 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Affaissement/effondrement lié aux cavités minières » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa ou susceptibilité								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Cavité minière	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	-	3	-	5	-	7	7			14	14
	Région Hauts-de-France	0	1	-	3	-	-	-	7	7			14	14

4.4. ALEA « MOUVEMENT DE TERRAIN (GLISSEMENT DE TERRAIN) »

Cet aléa a été évalué par le CEREMA.

4.4.1. Description du phénomène et occurrences

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 au cours de la mise en place du dispositif de géothermie peut être un déclencheur de type glissement de terrain. Il en est de même pour la mise en communication entre eaux superficielles, souterraines et fluide caloporteur. Un tel phénomène est susceptible de se produire durant la foration ou l'exploitation géothermique.

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

4.4.2. Qualification du phénomène

Il n'existe pas, actuellement, de carte de ce phénomène à l'échelle nationale.

La qualification de l'aléa « mouvement de terrain (glissement de terrain) » dépend des données disponibles. Pour comprendre, considérons une maille X quelconque de la zone d'étude. Cette maille est un carré de 500 mètres de côté. Si cette maille X se situe sur un territoire où une carte d'aléa « mouvement de terrain (glissement de terrain) » a été produite (dans le cadre d'un PPR, par exemple), alors la qualification du phénomène est établie comme suit :

- **Aléa fort (7)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte une zone d'aléa fort ;
- **Aléa moyen (5)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte pas de zone d'aléa fort, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa moyen ;
- **Aléa faible (1)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte ni zone d'aléa fort, ni zone d'aléa moyen, mais qu'elle intersecte une zone d'aléa faible ;
- **Aléa nul (0)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte aucune zone susceptible présenter un phénomène de glissement de terrain.

Si la maille X ne se situe pas sur un territoire où une carte d'aléa « mouvements de terrain (glissement de terrain) » a été produite, le phénomène est qualifié en fonction de sa susceptibilité (probabilité d'occurrence). Il est alors procédé comme suit :

- **Susceptibilité forte (3)** : s'il est recensé plus de 8 glissements de terrain dans la maille X considérée ;
- **Susceptibilité moyenne (2)** : s'il est recensé plus de 4 glissements de terrain, mais moins de 9, dans la maille X considérée ;
- **Susceptibilité faible (1)** : s'il est recensé au moins un glissement de terrain, mais moins de 5, dans la maille X considérée ;
- **Susceptibilité nulle (0)** : s'il n'est recensé aucun glissement de terrain dans la maille X considérée.

4.4.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

Différents types de données ont été utilisées pour construire la cartographie de l'aléa « mouvements de terrain (glissement de terrain) ». Ces différentes données, ainsi que les méthodes employées pour les traiter et les intégrer dans les cartes finales, sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

a) *Les études d'aléa « mouvements de terrain (glissement de terrain) »*

La plupart des PPR (Plans de Prévention des Risques) « mouvements de terrain » approuvés sur le territoire des Hauts-de-France ont été considérés, dans cette étude, comme des PPR « cavités ». En effet, les aléas « mouvements de terrain » cartographiés dans la grande majorité des PPR « mouvements de terrain » approuvés sur le territoire des Hauts-de-France sont associés à la présence de cavités anthropiques dans le sous-sol et ne font donc pas référence à des glissements de terrain proprement dit. Un seul des PPR « mouvements de terrain » approuvés sur le territoire des Hauts-de-France fait exception : celui de l'arrondissement de Montdidier dans la Somme (80). Deux types de mouvement de terrain ont été pris en compte dans ce PPR : les mouvements de terrain liés à la présence de cavités anthropiques dans le sous-sol et les mouvements de terrain de type glissement. Les cartes d'aléas « mouvement de terrain » produites lors de l'élaboration du PPR de l'arrondissement de Montdidier ont donc été utilisées pour qualifier le phénomène « mouvements de terrain (glissement de terrain) ». Parmi les aléas cartographiés, seuls ceux relatifs aux mouvements de terrain de type glissement de terrain ont été retenus pour qualifier ce phénomène.

Les fichiers géoréférencés produits lors de l'élaboration du PPR de l'arrondissement de Montdidier n'étaient pas disponibles. La carte d'aléa disponible au format PDF sur internet a donc été géoréférencée manuellement. Une fois cette opération réalisée, l'opérateur a pu :

1. Superposer les mailles de la grille d'étude et les zones d'aléa ;
2. Identifier visuellement les mailles de la grille d'étude qui intersectent une ou plusieurs zones d'aléa ;
3. Pour chacune des mailles intersectant une ou plusieurs zones d'aléa, déterminer visuellement quel niveau d'aléa leur affecter.

b) *La base de données recensant les mouvements de terrain sur le territoire des Hauts-de-France*

La base de données dite « mouvements de terrain » disponible sur le portail Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr>) est une base de donnée au sein de laquelle sont recensées les mouvements de terrain survenus sur le sol français. Les mouvements de terrain recensés ne sont pas tous des glissements de terrain proprement dit. Certains des mouvements de terrain recensés correspondent à des affaissements ou à des effondrements de cavités. D'autres correspondent à des érosions de berge, à des chutes de blocs, à des éboulements ou à des coulées de boue. Aussi, tous les mouvements de terrain recensés n'ont pas été retenus pour l'étude : seuls l'ont été ceux de type « glissement ».

Les données extraites de la base de données « mouvements de terrain » sont des objets ponctuels géoréférencés. Ces objets ponctuels sont localisés avec une précision variable. Aussi, pour la construction de la cartographie de l'aléa, les glissements de terrain n'ont pas été représentés par des points, mais par des disques : ces disques sont centrés sur les objets

ponctuels représentant les glissements de terrain et présentent des rayons égaux à la précision (augmentée de 50 mètres) avec laquelle ils sont localisés. Du fait de ce mode de représentation, c'est le nombre de disques qu'une maille intersecte (et non le nombre d'objets ponctuels qu'elle contient) qui a été comptabilisé pour qualifier la susceptibilité du phénomène « mouvements de terrain (glissement de terrain) ».

Dans la base de données « mouvements de terrain », 4 termes sont utilisés pour qualifier la précision avec laquelle sont situés les objets ponctuels : « mètre », « décamètre », « hectomètre » et « kilomètre ». Pour déterminer le rayon des disques à construire autour des objets ponctuels, il a été procédé comme suit :

- quand il était indiqué une précision métrique (désignée par le terme « mètre »), il a été pris 0 mètre comme précision du positionnement géographique : il était alors construit un disque de rayon $50 + 0 = 50$ mètres ;
- quand il était indiqué une précision décamétrique (désignée par le terme « décamètre »), il a été pris 10 mètres comme précision du positionnement géographique : il était alors construit un disque de rayon $50 + 10 = 60$ mètres ;
- quand il était indiqué une précision hectométrique (désignée par le terme « hectomètre »), il a été pris 100 mètres comme précision du positionnement géographique : il était alors construit un disque de rayon $50 + 100 = 150$ mètres ;
- quand il était indiqué une précision kilométrique (désigné par le terme « kilomètre »), il a été pris 1000 mètres comme précision du positionnement géographique : il était alors construit un disque de rayon $50 + 1000 = 1050$ mètres.

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

La cartographie de cet aléa pour la gamme de profondeur 10-200 m est présentée ci-dessous (cf. Figure 14) :

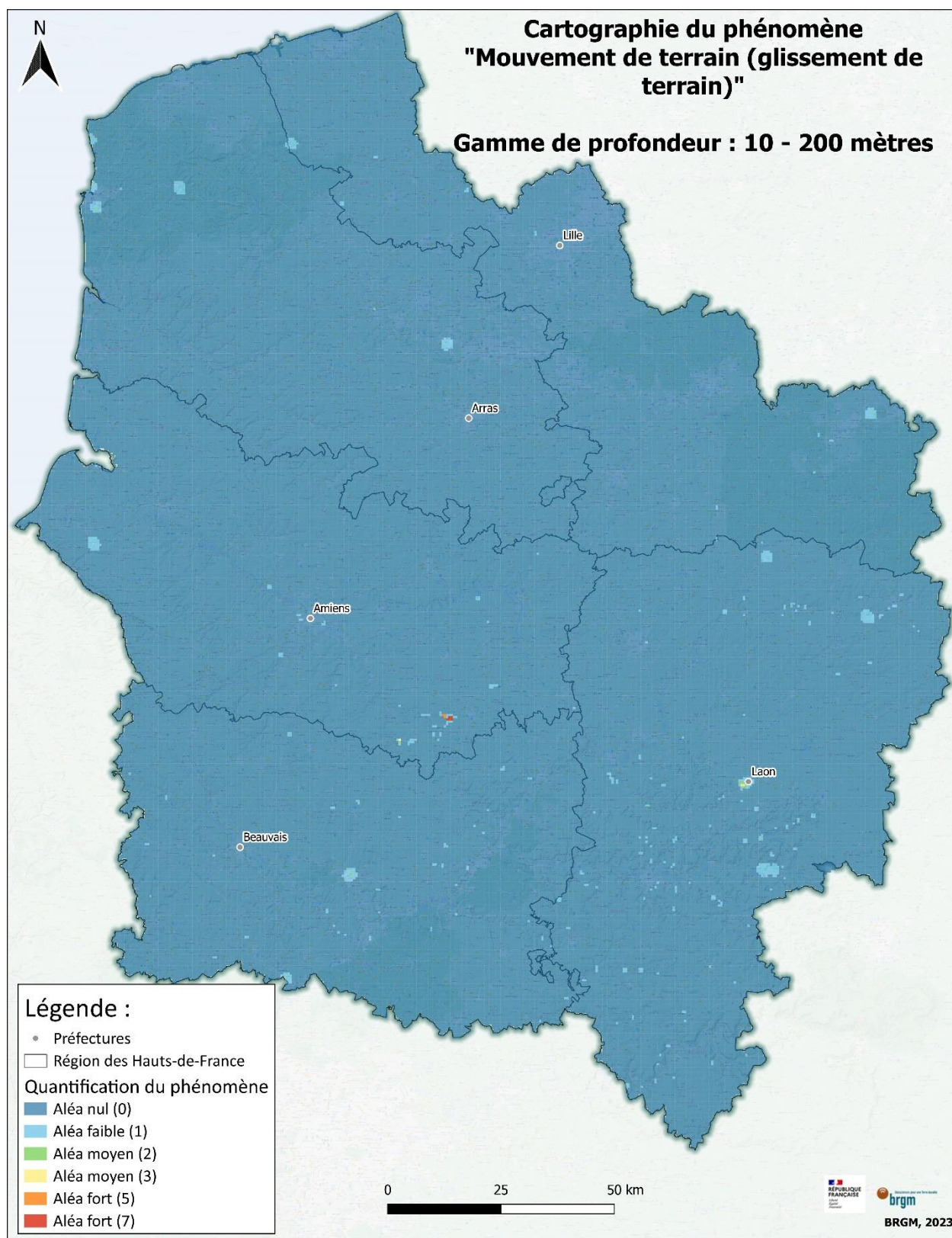


Figure 14 : Cartographie de l'aléa « Mouvement de terrain (glissement de terrain) » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 8) :

Tableau 8 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Mouvement de terrain (glissement de terrain) »

Mouvement de terrain	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-200 m	Nul (0)	127 355	31 838,8	99,46
	Faible (1)	672	167,9	0,52
	Moyen (2)	9	2,2	0,01
	Moyen (3)	3	0,8	0,001
	Fort (5)	3	0,8	0,001
	Fort (7)	5	1,3	0,01

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

Le guide méthodologique propose 6 niveaux de susceptibilité (0, 1, 2, 3, 5 et 7) pour les cartes régionales (cf. 4.4.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 9 :

Tableau 9 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mouvement de terrain (glissement de terrain) – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Mouvement de terrain	Initiale	0	1	2	3	-	-	-	-	3	2	2	6	6
	Révisée	0	1	2	3	-	5	-	7	7			14	14
	Région Hauts-de-France	0	1	2	3	-	5	-	7	7			14	14

4.5. ALEA « POLLUTION DES SOLS ET / OU DES NAPPES SOUTERRAINES »

Cet aléa a été évalué par le CEREMA.

4.5.1. Description du phénomène et occurrences

Ce phénomène de pollution des sols et des nappes par infiltration de polluants depuis la surface ou mise en contact d'aquifères avec des nappes polluées peut être provoqué :

- Soit par foration au cours de la mise en place du dispositif géothermique ;
- Soit, pour toute la durée de vie de l'ouvrage, par l'infiltration de polluants depuis la surface ou la mise en communication de nappes superficielles polluées avec des aquifères plus profonds, notamment, en cas de défaut d'étanchéité du trou ou forage.

4.5.2. Qualification du phénomène

Il n'existe pas, actuellement, de carte de ce phénomène à l'échelle nationale.

Aucune donnée sur les panaches de pollution n'est disponible sur le territoire des Hauts-de-France. La qualification du phénomène s'est donc basée deux types de données :

- les données issues de la plateforme Infosols qui répertorie les terrains (potentiellement) pollués ;
- les données disponibles sur les positions et profondeurs des aquifères (données fournies par le BRGM).

Ces différentes données ont été combinées pour qualifier le niveau d'aléa du phénomène « pollution des sols et / ou des nappes souterraines ». Pour comprendre la manière dont ces données ont été combinées, considérons une maille carrée X quelconque de la zone d'étude :

- **Aléa fort (6)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte des sites Infosols qui ne sont pas considérés comme traités et libres de restriction et si, pour au moins un de ces sites, la plateforme Infosols indique qu'il y a pollution avérée de la nappe ;
- **Aléa moyen (4)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte des sites Infosols qui ne sont pas considérés comme traités et libres de restriction, que la plateforme Infosols n'indique de pollution avérée de la nappe pour aucun de ces sites et qu'il y a un aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Aléa faible (1)** : si la maille carrée X de dimension 500 x 500 mètres intersecte des sites Infosols qui ne sont pas considérés comme traités et libres de restriction, que la plateforme Infosols n'indique de pollution avérée de la nappe pour aucun de ces sites et qu'il n'y a pas d'aquifère dans la tranche de profondeur considérée ;
- **Aléa nul (0)** : si la maille X de dimension 500 x 500 mètres n'intersecte pas de site Infosols ou intersecte un site Infosols considéré comme traité et libre de restriction.

4.5.3. Données utilisées et traitement

Comme indiqué précédemment, deux sources de données ont été utilisées pour qualifier le phénomène « pollution des sols et / ou des nappes souterraines » : la plateforme Infosols et les données sur les aquifères fournies par le BRGM.

La plateforme Infosols est construite à partir des données issues des ex-bases BASOL et SIS : la base de données Infosols est ainsi constituée d'objets ponctuels et polygonaux. Parmi ces objets, n'ont été sélectionnés que ceux qui n'étaient pas associés à des sites traités et libres de toute restriction. Une fois ce premier tri réalisé, des zones tampon ont été construites autour des sites retenus. La largeur de ces zones tampons est variable, elle dépend des informations recueillies sur la plateforme Infosols. Ainsi, il a été construit des zones tampon de 500 mètres de largeur/rayon autour des sites où il était indiqué, sur la plateforme Infosols, une pollution avérée de la nappe. Pour les autres sites, il a été construit une zone tampon de 100 mètres de largeur/rayon.

Les données sur les aquifères fournies par le BRGM sont des objets polygonaux : chacun d'eux représente l'étendue spatiale d'un aquifère donné pour une des tranches de profondeur étudiées. Ces données sur les aquifères ont été croisées avec les zones tampons construites autour des sites Infosols. Cette opération a permis d'identifier, pour chaque sites Infosols, la ou les nappes au-dessus desquelles il se situe. Une fois ces informations collectées, il a été aisé de déterminer, pour chaque site Infosols, la profondeur de la nappe la plus proche. Ce traitement réalisé, les zones tampons construites autour des sites Infosols ont été croisées avec les mailles de la grille d'étude : les données mises en forme étaient alors suffisantes pour qualifier le niveau d'aléa au niveau de chacune des mailles de la grille d'étude.

4.5.4. Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous (cf. Figure 15, Figure 16 et Figure 17) :

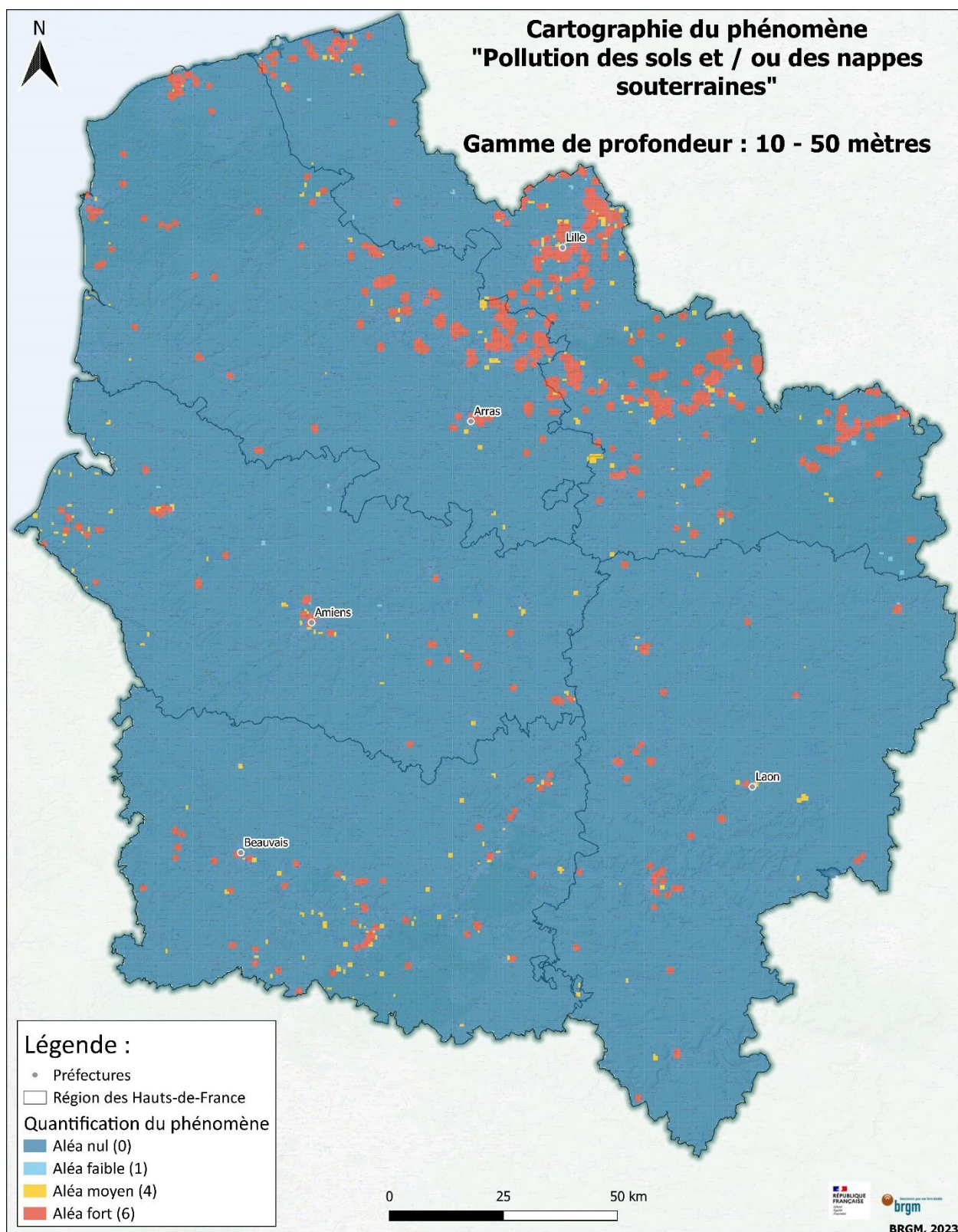


Figure 15 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

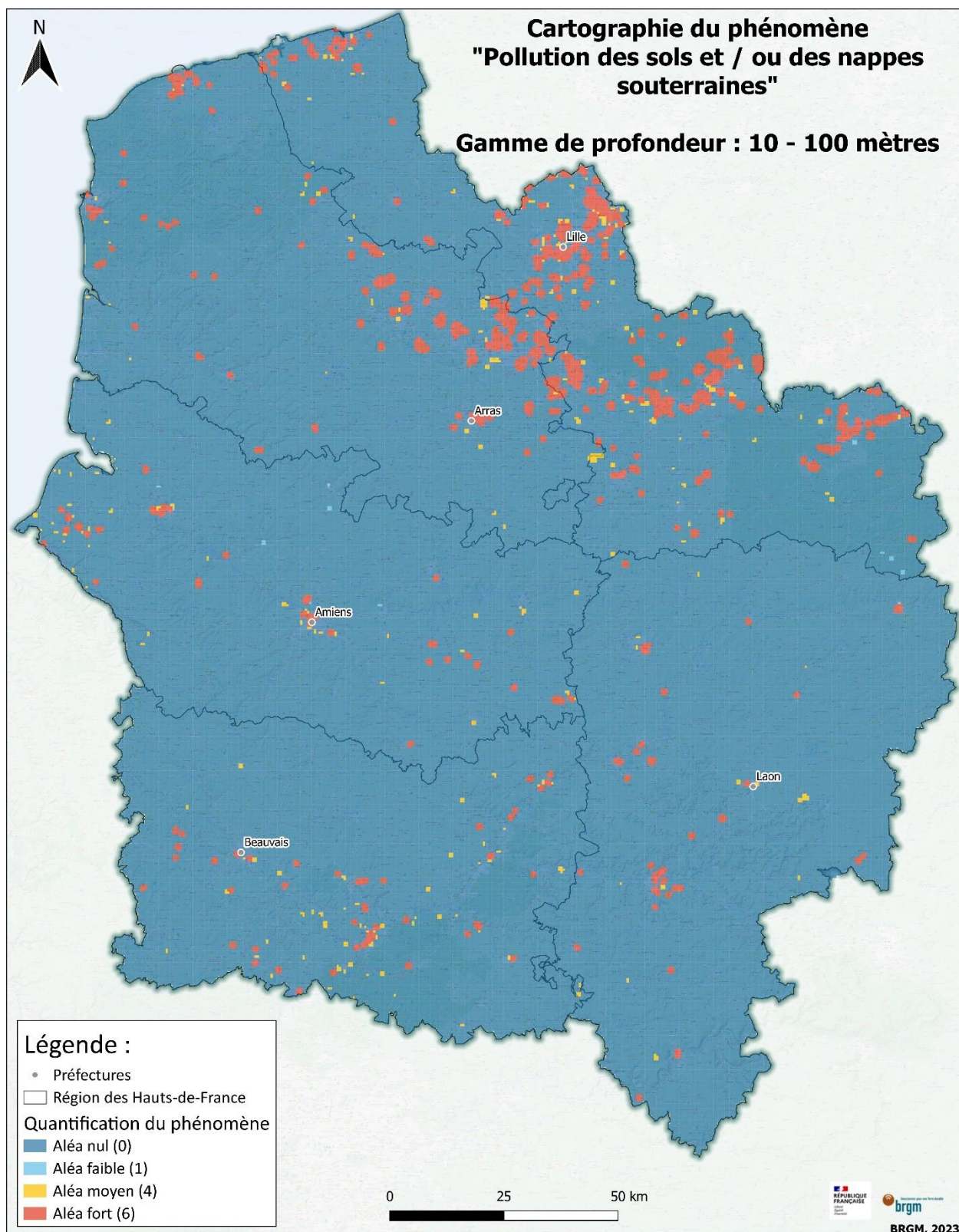


Figure 16 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m

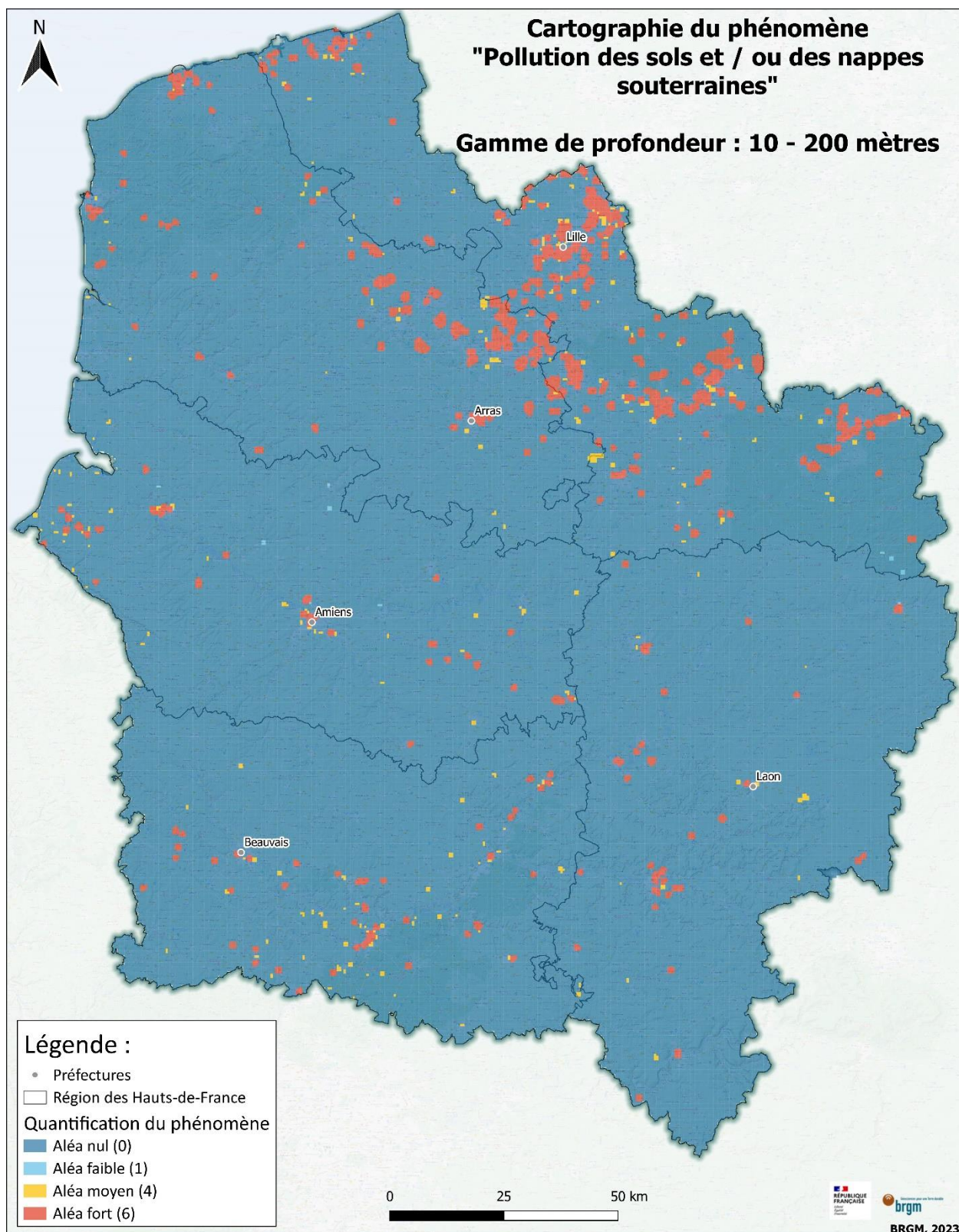


Figure 17 : Cartographie de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 10) :

Tableau 10 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »

Pollution sol et eau	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	123 072	30 768,0	96,11
	Faible (1)	43	10,8	0,03
	Moyen (4)	572	143,0	0,45
	Fort (6)	4 360	1 090,0	3,41
10-100 m	Nul (0)	123 072	30 768,0	96,11
	Faible (1)	31	7,8	0,02
	Moyen (4)	584	146,0	0,46
	Fort (6)	4 360	1 090,0	3,41
10-200 m	Nul (0)	123 072	30 768,0	96,11
	Faible (1)	27	6,8	0,02
	Moyen (4)	588	147,0	0,46
	Fort (6)	4 360	1 090,0	3,41

4.5.5. Cotation de l'aléa « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines »

Le guide méthodologique propose 5 niveaux de susceptibilité (0, 1, 4, 6 et 10) pour les cartes régionales (cf. 4.5.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 11 :

Tableau 11 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Pollution des sols et / ou des nappes souterraines – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa											Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Pollution sol et eau	Initiale	0	1	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4	3	3	12	12
	Révisée	0	1	-	-	4	-	6	-	-	-	10	10			30	30
	Région Hauts-de-France	0	1	-	-	4	-	6	-	-	-	-	6			18	18

4.6. ALEA « ARTESIANISME »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.6.1. Description du phénomène et occurrences

L'artésianisme se caractérise par l'aptitude d'un aquifère captif à permettre une remontée d'eau spontanée par des ouvrages : forages, puits... Cette remontée d'eau spontanée, qui se traduit par un relâchement de pression, peut entraîner des écoulements d'eau sur le sol et / ou une déstabilisation d'une formation superficielle. Dans le cadre de la mise en place d'ouvrages géothermiques, ce phénomène peut générer une difficulté technique pour contenir la pression de l'aquifère.

Ce phénomène se présente lorsque la hauteur du niveau piézométrique d'un aquifère est supérieure à l'altitude NGF du sol.

4.6.2. Qualification du phénomène

Le phénomène « Artésianisme » a été qualifié, d'après les préconisations du guide méthodologique et de son addendum, comme suit :

- **Aléa fort (7)** : présence d'un aquifère artésien connu (retour d'expérience) ;
- **Aléa fort historique (4)** : présence d'un aquifère artésien connu dont le niveau piézométrique n'est *actuellement* plus supérieur à la surface du sol dû à sa surexploitation ;
- **Aléa moyen (3)** : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique connu pour être supérieur à la surface du sol ;
- **Aléa moyen historique (1)** : présence d'un aquifère ayant un niveau piézométrique connu pour être supérieur à la surface du sol mais qui est *actuellement* inférieur dû à sa surexploitation ;
- **Aléa nul (0)** : pas d'aquifère artésien connu dans la tranche de terrain considérée.

Cette déclinaison des aléas moyens et forts est due à la prise en compte de la surexploitation des nappes souterraines lors de l'activité minière dans le Bassin Minier Nord - Pas-de-Calais et donc à la baisse significative du niveau piézométrique qui en a découlé. Cette notion « historique » a été prise en compte dans la méthodologie de l'addendum (MET, 2023) suite aux échanges avec les acteurs locaux durant la première phase.

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

4.6.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

Pour l'élaboration de ces cartes, un travail d'identification des secteurs d'artésianisme avérés, historiques ou probables à l'échelle régionale a été réalisé. Pour cela, plusieurs sources d'informations ont été nécessaires :

- Données de la Banque du Sous-Sol
- Données BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) de niveau 3 (entités hydrogéologiques locales), sur la région Hauts-de-France, recoupant les ouvrages de la Banque du Sous-Sol – données extraites en février 2023 ;

- Synthèses hydrogéologiques couvrant le territoire des Hauts-de-France :
 - Synthèse de l'atlas hydrogéologique numérique de l'Oise (BAULT et al., 2012) ;
 - Synthèse de l'atlas hydrogéologique numérique l'Aisne (ALLIER et al., 2009) ;
 - Données de l'atlas du potentiel géothermique du Nord – Pas de Calais (PICOT & PIRA, 2011) ;
 - Synthèse de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris (SEGUIN et al., 2015) ;
- Donnée bibliographique :
 - Zone d'extension de l'artésianisme due à la captivité de la Craie du Séno-Turonien dans la Plaine des Flandres (CRAMPON et al., 2006).

Les étapes nécessaires pour traiter les informations ont été les suivantes :

- **Etape 1** : Identification des zones artésiennes.
 - Recherche dans les ouvrages les zones artésiennes suite à la captivité d'une nappe ;
 - Recherche par mots clefs des indices ponctuels d'artésianisme dans la Banque du Sous-Sol (BSS) :
 - Utilisation des termes « artésien » et « jaillissant » ;
 - Suppression des ouvrages dont le niveau d'eau est positif ;
 - Suppression des ouvrages antérieurs à 1950.
- **Etape 2** : Délimitation des emprises de zones captives susceptibles de provoquer de l'artésianisme et détermination de la profondeur du toit de l'aquifère :
 - Croisement des données ponctuelles dans les vallées avec les entités alluvionnaires de la BD LISA ;
 - Croisement des zones extraites de la bibliographie et des données ponctuelles avec les entités hydrogéologiques pour leur attribuer une profondeur.
- **Etape 3** : Création d'une couche « shapefile » associée à l'artésianisme et attribution des notes de susceptibilité par gamme de profondeur en fonction des paramètres observés.

En accord avec les données de la Phase n°1 sur le Bassin minier du Nord – Pas-de-Calais, l'artésianisme identifié dans cette partie du territoire a été classée en aléa historique fort, du fait de la surexploitation des nappes.

Certaines données ont été gardées en tant que données ponctuelles. En effet, après analyse de l'extension des nappes interceptant les ouvrages, il n'est pas possible de définir un contour de formation induisant de l'artésianisme. Seules les entités alluvionnaires de fonds de vallées ont permis de créer un contour. Ainsi, ces données ponctuelles et formations alluvionnaires ont été classées en aléa moyen.

Enfin, la zone de captivité de la craie délimitée dans l'ouvrage « Aquifères et Eaux Souterraines en France » (CRAMPON et al., 2006) a été classée en aléa fort. Les données ponctuelles actuelles issues de la BSS et les retours des experts ont permis d'identifier cette zone comme étant encore actuellement artésienne.

4.6.4. Cartographie de l'aléa « Artésianisme »

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous (cf. Figure 18, Figure 19 et Figure 20) :

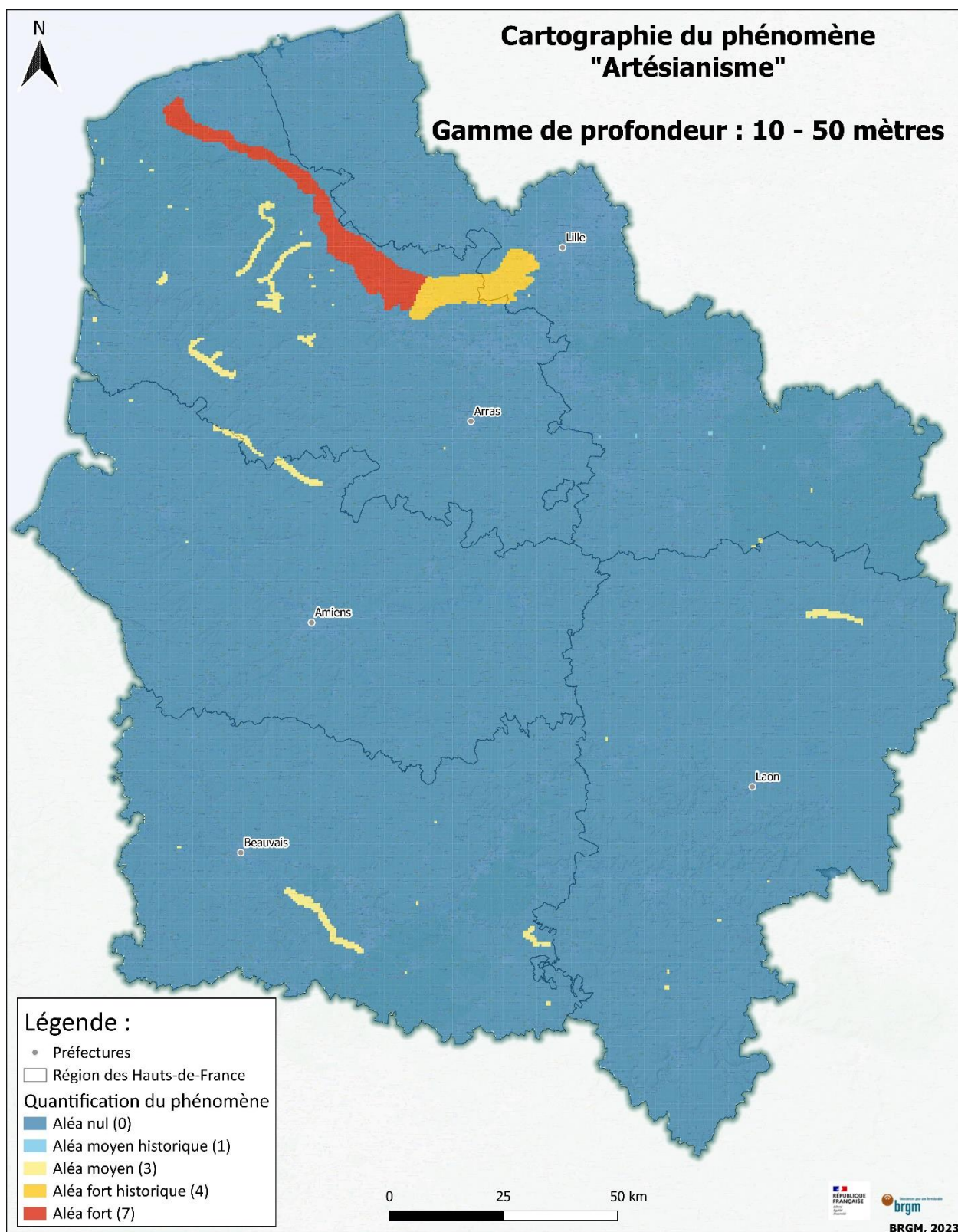


Figure 18 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

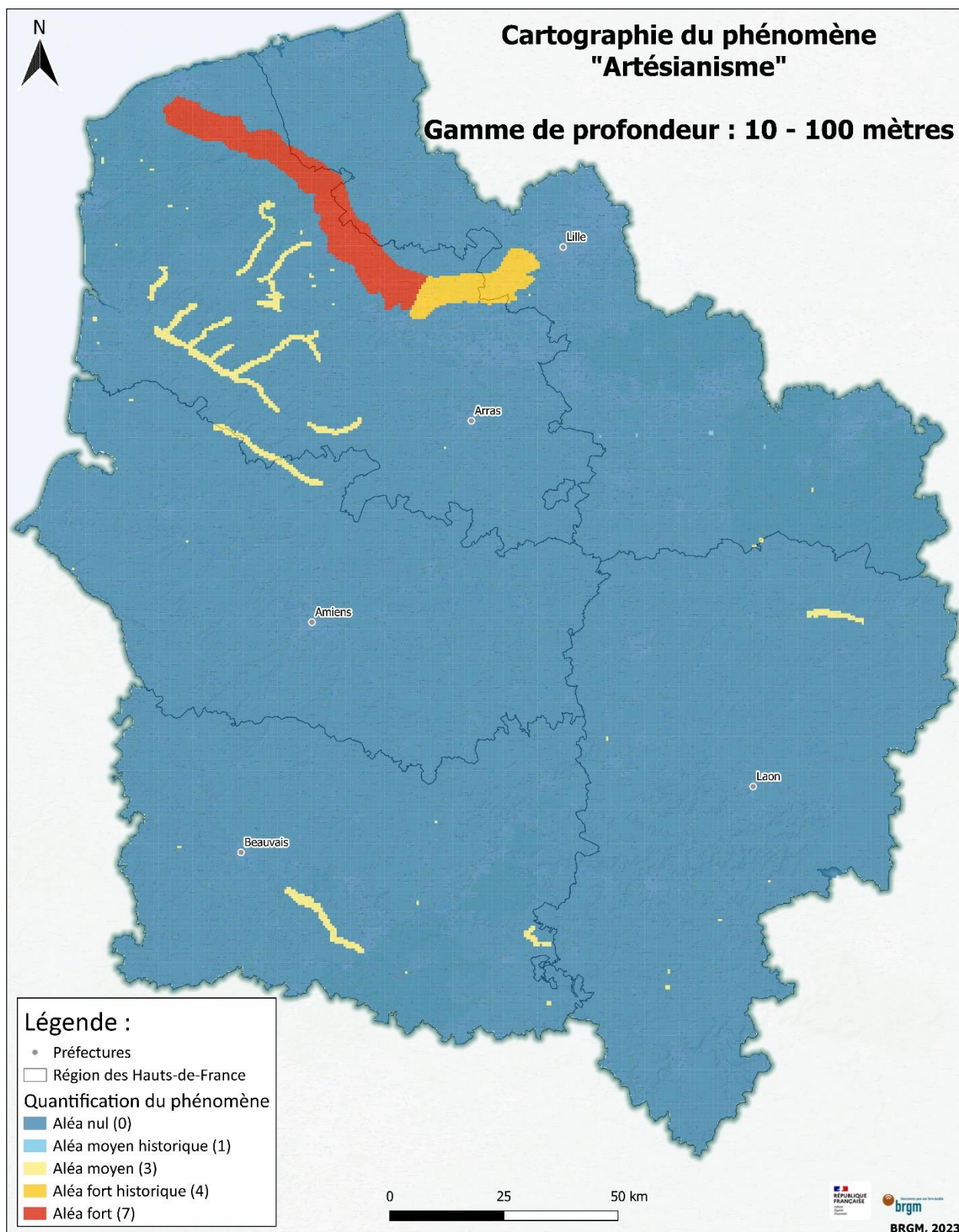


Figure 19 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m

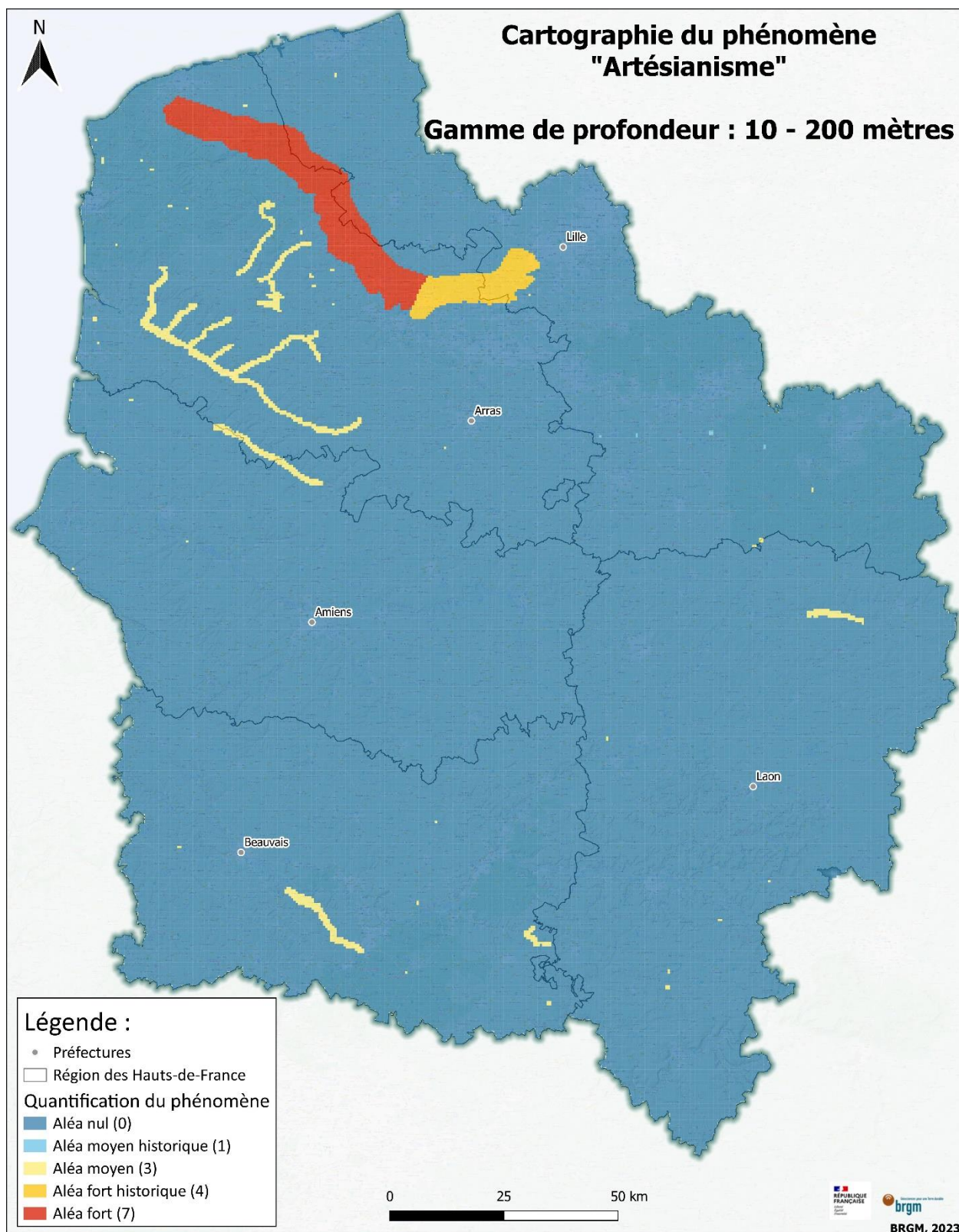


Figure 20 : Cartographie de l'aléa « Artésianisme » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 12) :

Tableau 12 : Evolution des emprises des niveaux de susceptibilité du phénomène « Artésianisme »

Artésianisme	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	125 128	31 282	97,72
	Faible (1)	9	2,2	0,01
	Moyen (3)	799	199,8	0,62
	Moyen à fort (4)	787	196,8	0,62
	Fort (7)	1 324	331	1,03
10-100 m	Nul (0)	123 940	30 985	96,79
	Faible (1)	9	2,2	0,01
	Moyen (3)	1 237	309,3	0,96
	Moyen à fort (4)	787	196,8	0,62
	Fort (7)	2 074	518,5	1,62
10-200 m	Nul (0)	123 578	30 894,5	96,51
	Faible (1)	9	2,2	0,01
	Moyen (3)	1 323	330,8	1,03
	Moyen à fort (4)	787	196,8	0,62
	Fort (7)	2 350	587,5	1,83

4.6.5. Cotation de l'aléa « Artésianisme »

L'addendum du guide méthodologique propose 5 niveaux de susceptibilité (0, 1, 3, 4 et 7) pour les cartes régionales (cf. 4.6.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 13 :

Tableau 13 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Artésianisme » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa								Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Artésianisme	Initiale	0	-	-	3	-	-	-	-	3	2	4	6	21
	Révisée	0	1	-	3	4	-	-	7	7			14	28
	Région Hauts-de-France	0	1	-	3	4	-	-	7	7			14	28

4.7. ALEA « MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFERES »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.7.1. Description du phénomène et occurrences

Ce phénomène se traduit par une mise en communication verticale entre deux aquifères, pouvant entraîner un écoulement de l'eau d'un des aquifères dans l'autre. Le risque de cet écoulement est de provoquer :

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

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

4.7.2. Qualification du phénomène

Le phénomène « Mise en communication d'aquifère » a été qualifié, d'après les préconisations du guide méthodologique et de son addendum, comme suit :

- **Aléa moyen (4)** : présence de plusieurs aquifères dans la tranche de terrain considérée dont au moins un est considéré comme NAEP (Nappe à préserver pour l'Alimentation en Eau Potable) ;
- **Aléa faible (1)** : présence de plusieurs aquifères dans la tranche de terrain considérée ;
- **Aléa nul (0)** : absence d'aquifère ou présence d'un seul aquifère dans la tranche de terrain considérée.

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

4.7.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

Pour l'élaboration de ces cartes, deux types de données ont été utilisées :

- Données BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) de niveau 3 sur la région des Hauts-de-France – données extraites en janvier 2023 :
 - Couche « ORDRES » de la BD LISA :
 - Extension de la couche aquifère du Cénomanien et du Jurassique.
- Synthèses hydrogéologiques couvrant le territoire des Hauts-de-France :
 - Synthèse de l'atlas hydrogéologique numérique de l'Oise (BAULT *et al.*, 2012) ;

- Synthèse de l'atlas hydrogéologique numérique l'Aisne (ALLIER et al., 2009) ;
- Données de l'atlas du potentiel géothermique du Nord – Pas de Calais (PICOT & PIRA, 2011) ;
- Synthèse de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris (SEGUIN et al., 2015) ;
- Données du Ministère de la Transition Énergétique
- Extension de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) pour déterminer les Nappes à Préserver pour l'Alimentation en Eau Potable (NAEP) (cf. Figure 21)

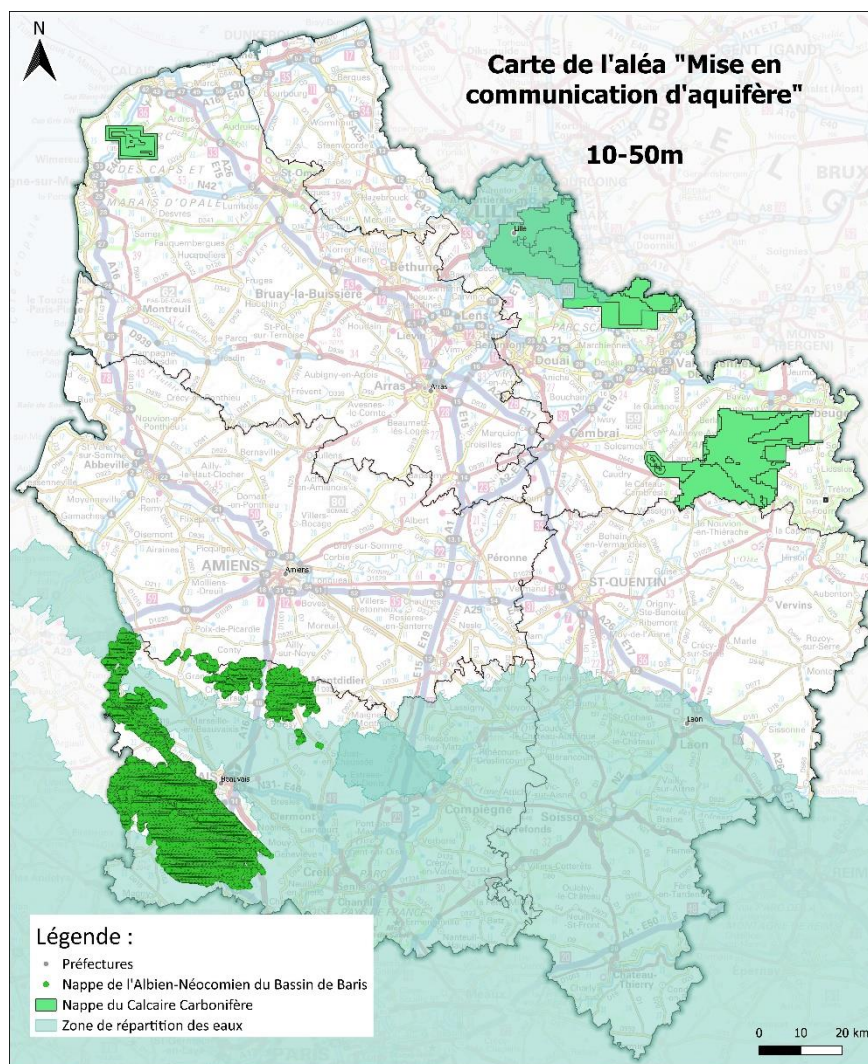


Figure 21 : Délimitation de la ZRE et des nappes impactées pour le phénomène « mise en communication des aquifères »

Les étapes nécessaires pour traiter les informations ont été les suivantes :

- **Etape 1** : Exploitation des synthèses hydrogéologiques :
 - Identification et exploitation des rasters des toits des horizons aquifères :
 - Utilisation de l'extension des aquifères du Cénomanien et du Jurassique du Nord – Pas-de-Calais provenant de la BD LISA.

- Soustraction de l'altitude des toits au MNT de la région pour obtenir la profondeur des formations.
- **Etape 2** : Prise en compte des aquifères NAEP :
 - Concerne les aquifères de l'Albien-Néocomien et du Calcaire Carbonifère.
- **Etape 3** : Création d'une couche « shapefile » associée à la mise en communication d'aquifères et attribution des notes de susceptibilité par gamme de profondeur en fonction des paramètres observés.

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

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous (cf. Figure 22, Figure 23 et Figure 24) :

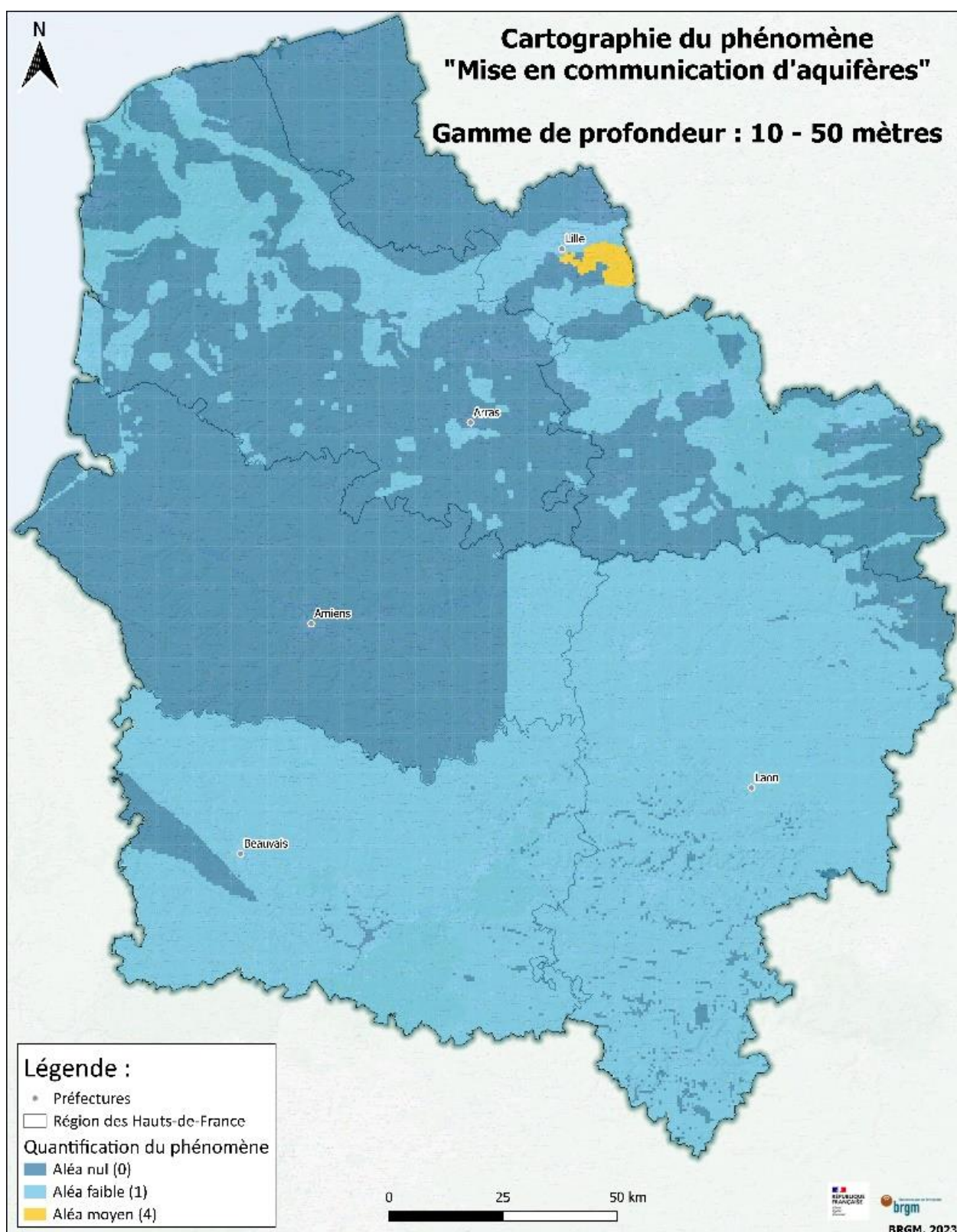


Figure 22 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

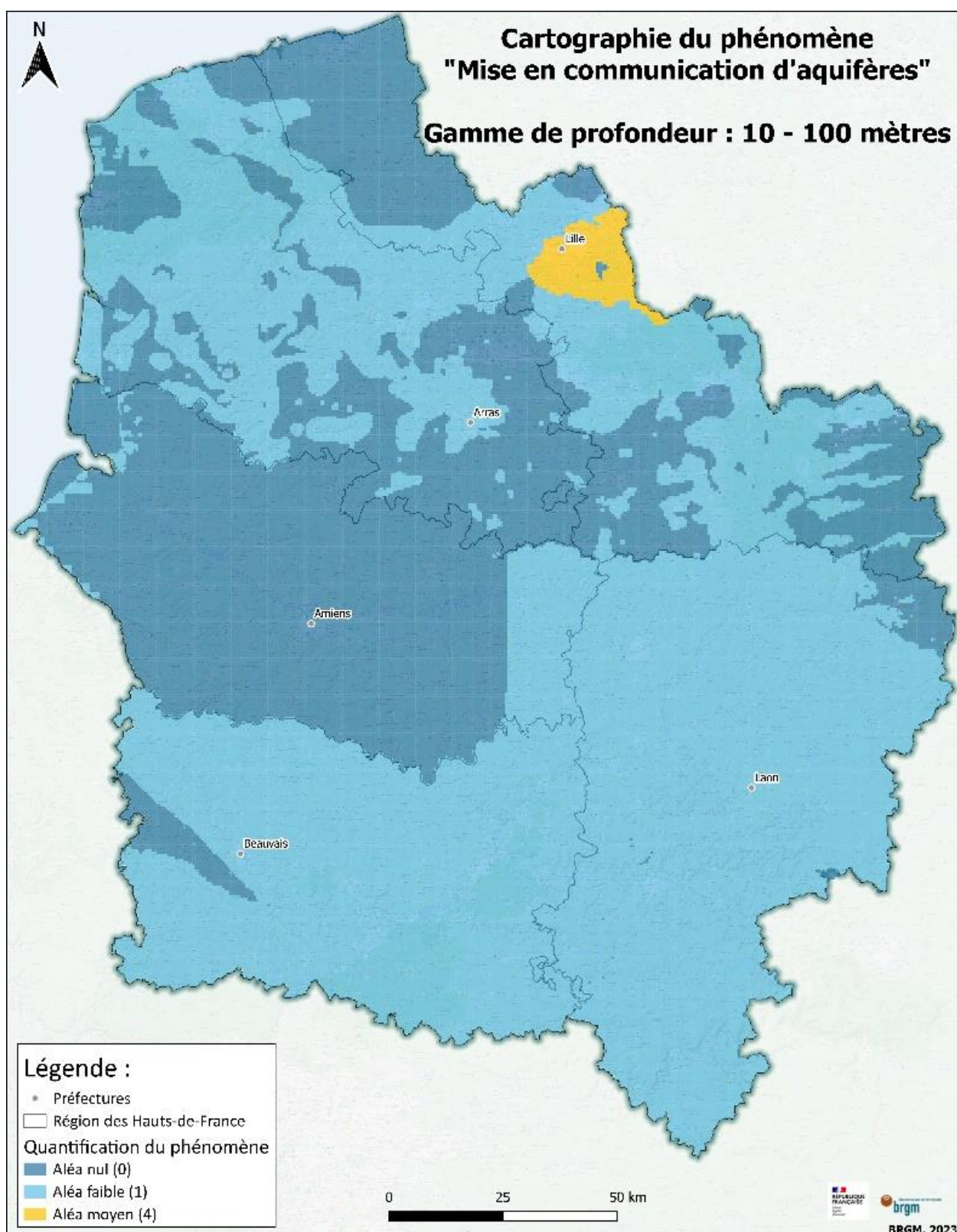


Figure 23 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m

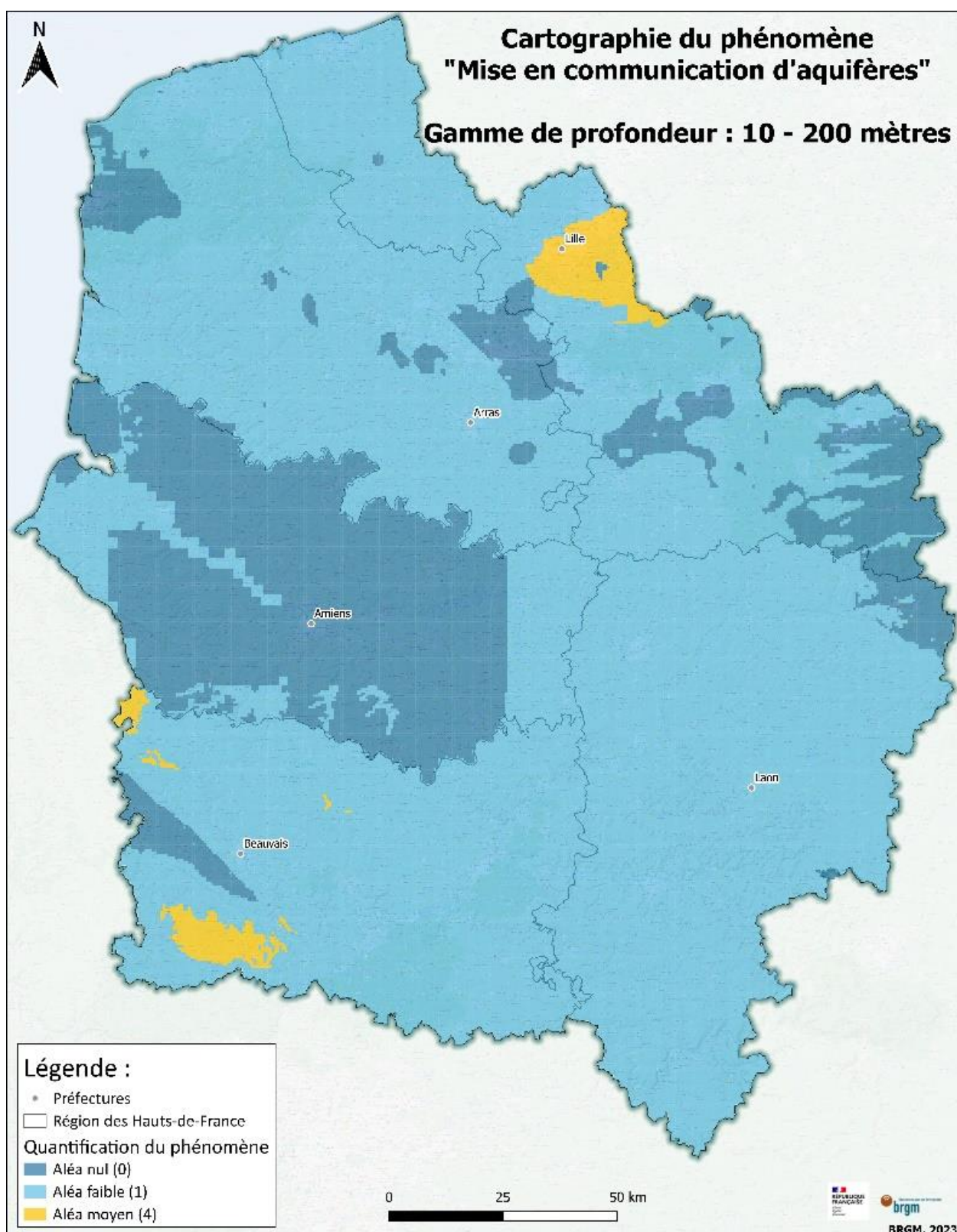


Figure 24 : Cartographie de l'aléa « Mise en communication d'aquifère » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 14) :

Tableau 14 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Mise en communication d'aquifères »

Mise en communication d'aquifères	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	58 669	14 667,2	45,8
	Faible (1)	69 027	17 256,8	53,9
	Moyen (4)	351	87,8	0,3
10-100 m	Nul (0)	46 321	11 580,3	36,2
	Faible (1)	80 343	20 085,8	62,7
	Moyen (4)	1 383	345,7	1,1
10-200 m	Nul (0)	27 389	6 847,3	21,4
	Faible (1)	98 195	24 548,7	76,7
	Moyen (4)	2 463	615,8	1,9

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

Le guide méthodologique propose 3 niveaux de susceptibilité (0, 1, et 4) pour les cartes régionales (cf. 4.7.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 15 :

Tableau 15 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Mise en communication d'aquifères » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa					Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Mise en communication d'aquifères	Initiale	0	1	-	-	-	1	4	4	4	4
	Révisée	0	1	-	-	4	4			16	16
	Région Hauts-de-France	0	1	-	-	4	4			16	16

4.8. ALEA « PROBLEMES LIES A LA REINJECTION »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.8.1. Description du phénomène et occurrences

Ce phénomène était anciennement appelé « Remontée de nappe ». Cependant, le nom de ce phénomène pouvant être confondu avec l'aléa « inondation par remontée de nappe », l'addendum a proposé de le rebaptiser en « Problèmes liés à la réinjection ».

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

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

4.8.2. Qualification du phénomène

Le phénomène « Problèmes liés à la réinjection » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide et à son addendum :

- **Aléa moyen à fort (3 à 18)** : présence d'un aquifère détritique dans lequel la réinjection des eaux est difficile voire impossible. Correspond à un échec probable d'une installation sur nappe aquifère ;
- **Aléa faible (1)** : présence d'un aquifère où un niveau piézométrique a déjà été observé entre 0 et 5 mètres sous la surface du sol en hautes eaux ;
- **Aléa nul (0)** : pas d'aquifère ayant un niveau piézométrique déjà observé à moins de 5 mètres sous la surface du sol en hautes eaux.

Ce phénomène a été cartographié pour la gamme de profondeur 10-50 m. En effet, la méthodologie nationale considère que tous les horizons traversés par les forages sont susceptibles d'être affectés par un aléa et donc qu'un niveau d'aléa dans une tranche de profondeur impliquera un niveau au minimum équivalent dans les tranches inférieures. Cependant, dans le cas des problèmes liés à la réinjection, cela n'a pas lieu de s'appliquer. Si le phénomène concerne une nappe à moins de 50 m de profondeur les tranches de profondeur 50-100 et 100-200 m ne seront pas affectées par cet aléa.

4.8.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

La cartographie de cet aléa repose essentiellement sur la cartographie nationale de sensibilité aux remontées de nappe (*BRUGERON et al., 2018*). Cette cartographie distingue 2 types de zones : les « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe », pour lesquelles la différence de cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est négative, et les « zones potentiellement sujettes aux inondations de caves », pour lesquelles la différence entre la cote altimétrique du sol et la cote du niveau maximal piézométrique interpolé est comprise entre 0 et 5 m, et les zones sans débordement au-delà (cf. Figure 25).

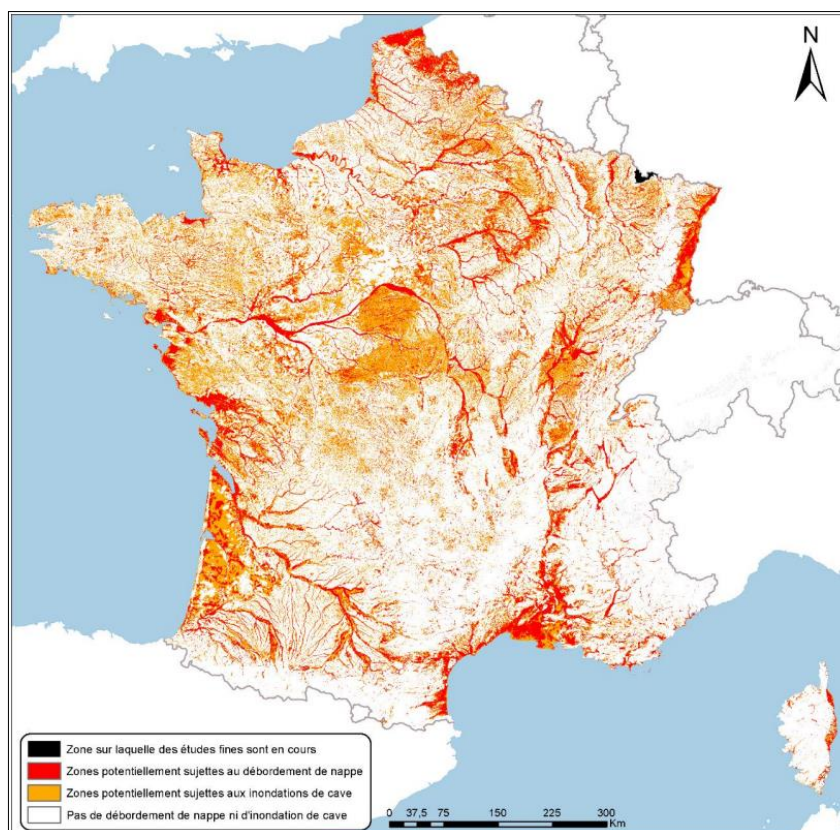


Figure 25 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe (résultat brut) (BRUGERON et al., 2018)

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.

Cette zonation ne s'applique pas dans les secteurs où :

- les terrains affleurants imperméables (car ils empêchent le débordement en surface de nappes potentiellement captives sous-jacentes :
 - Données issues du masque « Imperméable » de la BD LISA.
- les terrains affleurants de type karstique dont la forte hétérogénéité des écoulements empêche leur intégration au sein de cette approche globale :
 - Données issues de la BDLISA niveau 3, milieu 3 et ordre 1 (entités karstiques affleurantes).
- 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 :
 - Données issues du Corine Land Cover 2018 (entités 111 et 112).

4.8.4. Cartographie de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection »

La cartographie de cet aléa pour la gamme de profondeur 10-50 m est présentée ci-dessous (cf. Figure 26) :



Figure 26 : Cartographie de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 16) :

Tableau 16 : Evolution des emprises des niveaux d'aléa du phénomène « Problèmes liés à la réinjection »

Problème lié à la réinjection	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	46 388	20 414,8	63,8
	Faible (1)	81 659	11 597	36,2

4.8.5. Cotation de l'aléa « Problèmes liés à la réinjection »

Le guide méthodologique propose 5 niveaux de susceptibilité (0, 1, 3, 7 et 18) pour les cartes régionales (cf. 4.8.2). Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 17 :

Tableau 17 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Problèmes liés à la réinjection » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa											Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Problèmes liés à la réinjection	Initiale	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	0	2	0
	Révisée	0	1	-	3	-	-	-	7	-	-	18	18			36	0
	Région Hauts-de-France	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1			2	0

4.9. ALEA « BISEAU SALE »

Cet aléa a été évalué par le BRGM.

4.9.1. Description du phénomène et occurrences

En zone côtière, la nappe d'eau douce est en contact direct avec la nappe d'eau salée plus dense. La surexploitation, ou le défaut d'alimentation d'une nappe à la suite d'une période moins pluvieuse, sont des facteurs qui contribuent à la pollution d'une nappe d'eau douce par de l'eau salée utilisée pour l'irrigation, l'industrie ou l'eau potable ; et, surtout, entraînent un 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 « une barrière hydraulique ». 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, « surmontant » 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.

4.9.2. Qualification du phénomène

Le phénomène « Biseau salé » a été qualifié comme suit, conformément aux préconisations du guide méthodologique et de son addendum :

- **Aléa moyen (4)** : présence d'un aquifère présentant des intrusions salines avérées ;
- **Aléa faible (1)** : présence d'un aquifère pouvant potentiellement présenter des intrusions salines ;
- **Aléa nul (0)** : le biseau salé n'est pas présent 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.

4.9.3. Données utilisées et traitement

La méthodologie appliquée pour ce phénomène est conforme au guide de 2015 et à son addendum de 2023.

La région Hauts-de-France ne dispose pas, actuellement, de données permettant d'identifier et de cartographier cet aléa. Des études ont montré l'existence de teneurs en sel dans la nappe littorale de la baie de Somme (BAULT *et al.*, 2017), mais cela n'a pas permis d'affirmer la présence d'un biseau salé. En effet, ces teneurs pourraient être le résultat de « possibles

inondations de la plaine maritime du Marquenterre par la mer » (CZERNICHOWSKI-LAURIOL, 1996). D'après l'étude sur la vulnérabilité des aquifères côtiers bas-normands face aux intrusions salines (LAURENT *et al.*, 2017), les formations aquifères sableuses situées sur les littoraux sont des aquifères particulièrement vulnérables aux intrusions salines. En lien avec ces résultats, la largeur de la formation des « dunes littorales », retrouvée sur la côte du Pas-de-Calais et de la Somme, a été utilisée pour déterminer une distance, depuis le trait de côte, d'existence potentielle d'intrusion saline. Une zone tampon de 2 kilomètres a ainsi été appliquée au trait de côte.

Une vérification de la présence d'entités hydrogéologiques aquifères sur le trait de côte a été faite. Ainsi, ont été retenues les entités aquifères au sein desquelles un biseau salé peut se développer :

- L'aquifère des « Sables quaternaires » ;
- L'aquifère de la Craie du Séno-Turonien ;
- L'aquifère du Cénomanien ;
- L'aquifère de l'Albien ;
- L'aquifère du Jurassique.

Enfin, la comparaison entre cette zone tampon et le MNT 25 m de la région a permis de retirer les zones où le biseau salé ne peut pas se trouver en raison de la topographie. Il s'agit des secteurs du Cap Gris Nez, du Cap Blanc Nez, de Boulogne-sur-Mer, d'Étaples et des falaises de craie du sud du département de la Somme. La variation d'échelle entre le MNT 25 et les mailles de 500 m de la grille entraîne la prise en compte de terrains dont la topographie peut être supérieure.

Le résultat est présenté dans la cartographie suivante (Figure 27).

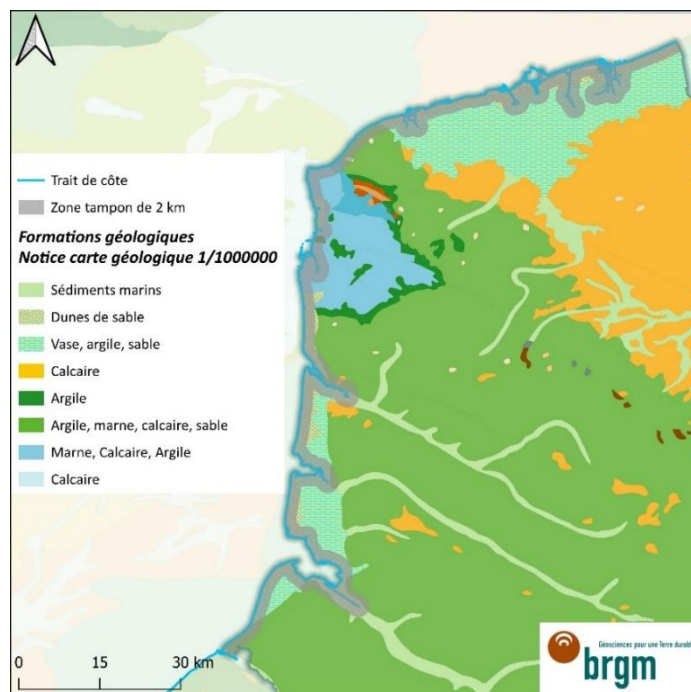


Figure 27 : Cartographie de la zone tampon de 2 km sur la géologie du littoral des Hauts-de-France

4.9.4. Cartographie de l'aléa « Biseau salé »

La cartographie de cet aléa pour les 3 gammes de profondeur est présentée ci-dessous (cf. Figure 28, Figure 29 et Figure 30) :

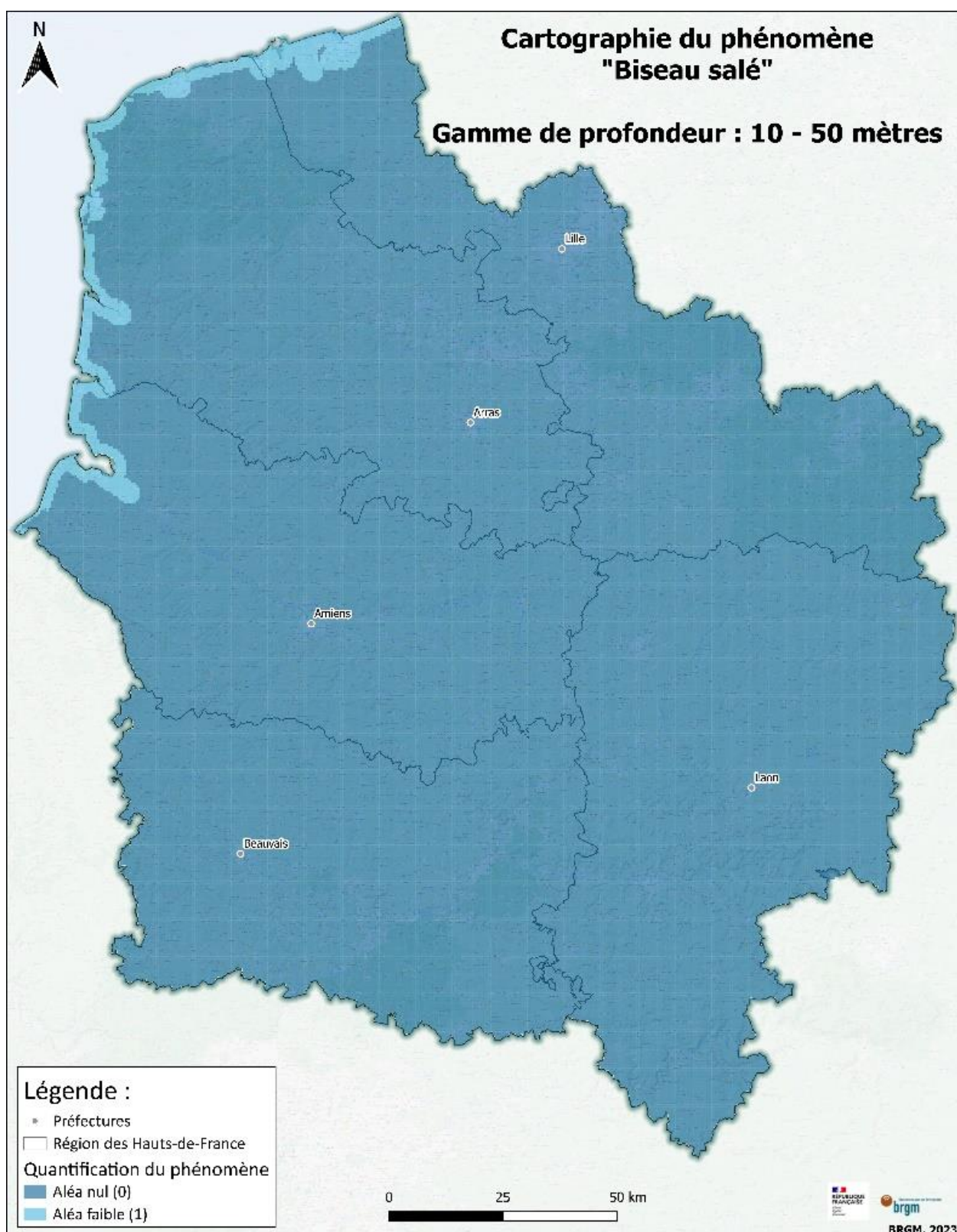


Figure 28 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-50 m

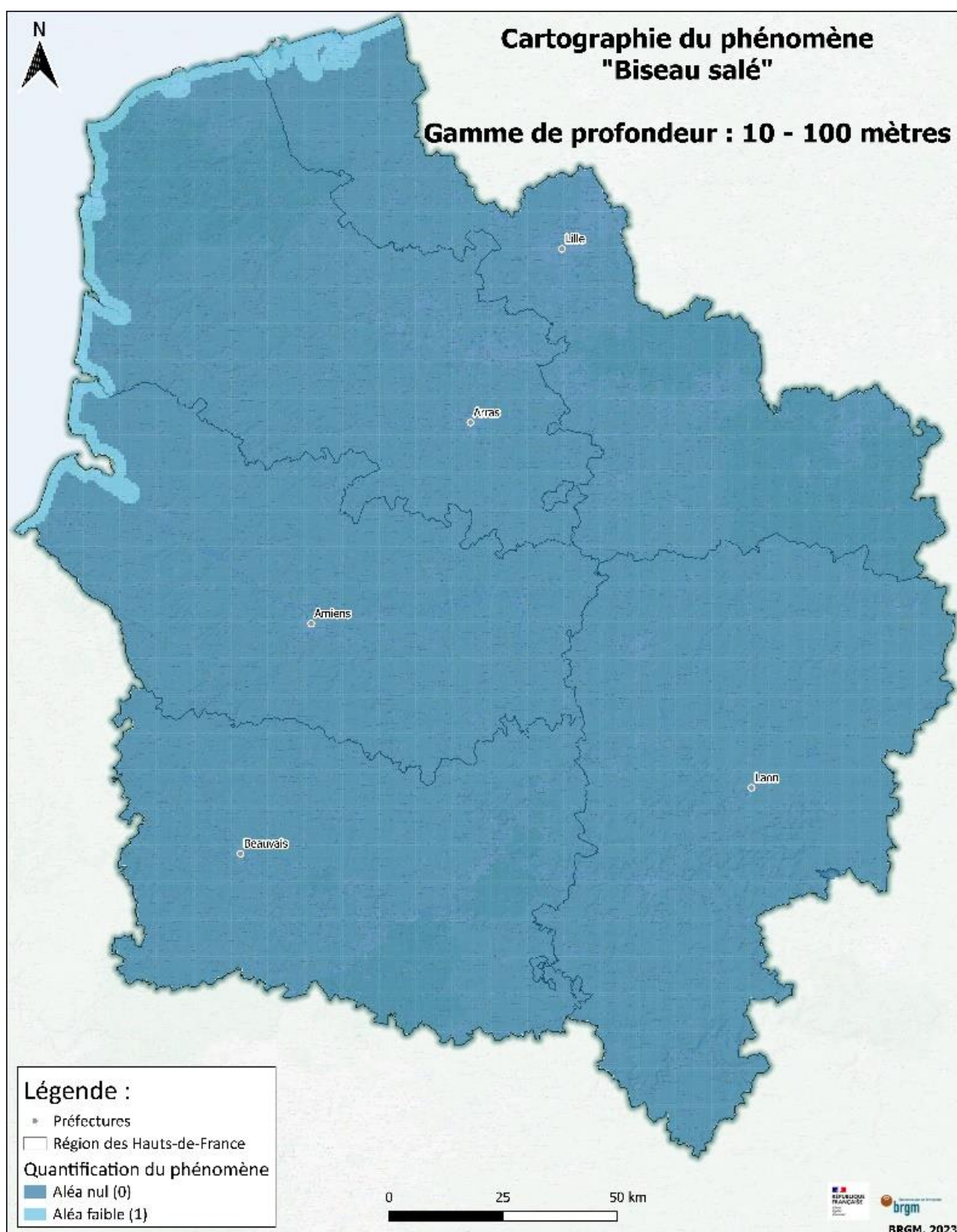


Figure 29 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-100 m

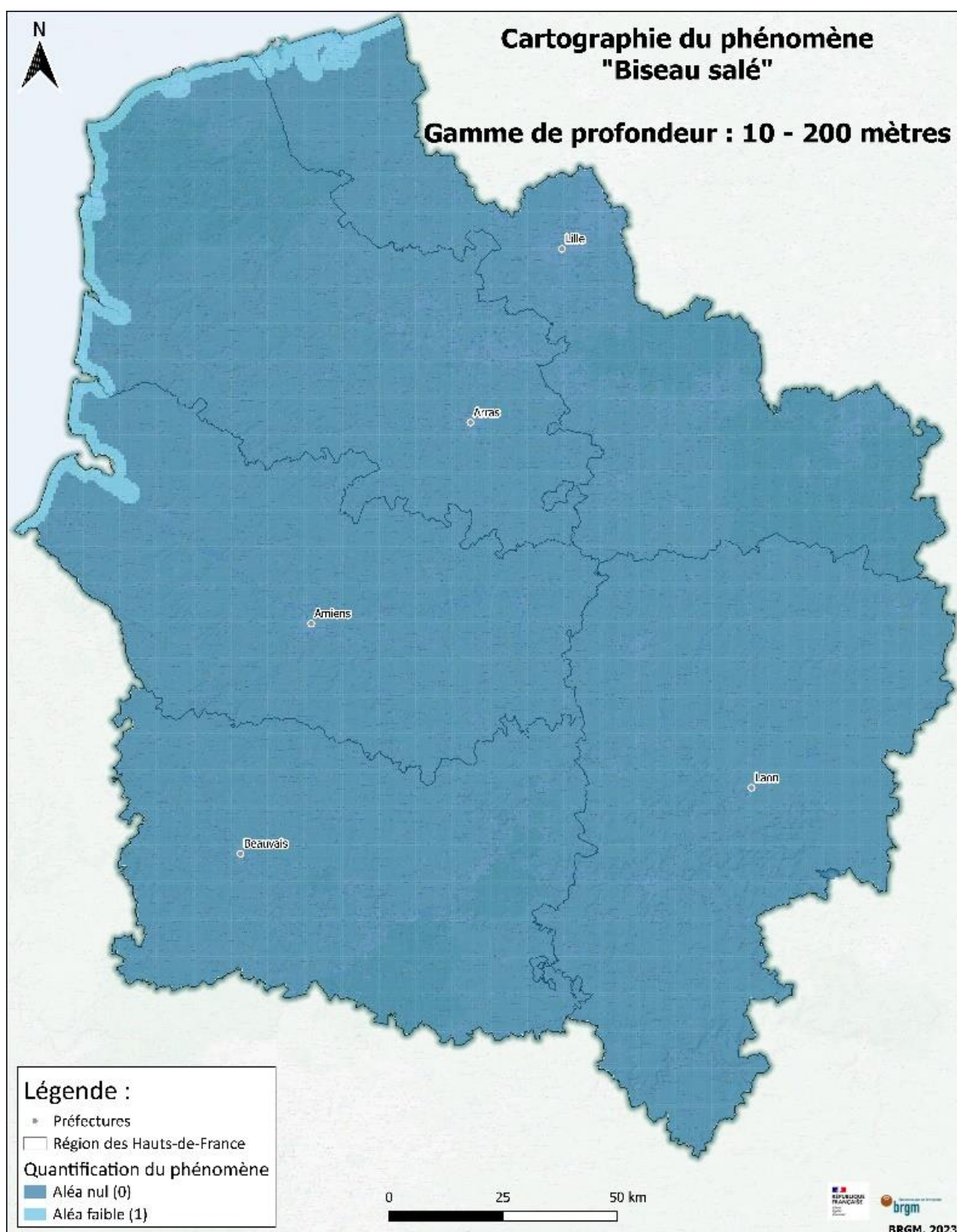


Figure 30 : Cartographie de l'aléa « Biseau salé » en région Hauts-de-France pour la gamme de profondeur 10-200 m

La répartition des emprises des niveaux d'aléa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 18) :

Tableau 18 : Evolution des emprises des niveaux de susceptibilité du phénomène « Biseau salé »

Biseau salé	Niveau d'aléa	Nombre de mailles (500 x 500 m)	Surface (km ²)	Pourcentage de couverture (%)
10-50 m	Nul (0)	125 415	31 353,8	97,9
	Faible (1)	2 632	658	2,1
10-100 m	Nul (0)	125 277	31 319,3	97,8
	Faible (1)	2 770	692,5	2,2
10-200 m	Nul (0)	125 271	31 317,8	97,8
	Faible (1)	2 776	694	2,2

4.9.5. Cotation de l'aléa « Biseau salé »

Le guide méthodologique propose 3 niveaux de susceptibilité (0, 1, et 4) pour les cartes régionales (cf. 4.9.2) selon le niveau de connaissance de la présence territoriale de ce phénomène. Les valeurs attribuées aux niveaux d'aléa de ce phénomène sur le territoire des Hauts-de-France sont présentées dans le Tableau 19 :

Tableau 19 : Cotation de la susceptibilité du phénomène « Biseau salé » et facteur aggravant – Comparaison des cartes initiales et révisées

Phénomène redouté	Carte	Niveau d'aléa					Note maximale	Facteur aggravant		Résultat maximum	
		0	1	2	3	4		Doublet	SGV	Doublet	SGV
Biseau salé	Initiale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Révisée	0	1	-	-	4	4	4	0	16	0
	Région Hauts-de-France	0	1	-	-	-	1			4	0

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

5.1. PRISE EN COMPTE DE LA CARTOGRAPHIE ISSUE DE LA PHASE 1

L'addendum au guide méthodologique, diffusé en 2023 (MET, 2023), a entraîné la révision de la méthodologie de cartographie des phénomènes. Dans un souci d'harmonisation, et en accord avec l'addendum, ces modifications ont été appliquées également sur le secteur du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais, modifiant de fait la cartographie réglementaire qui avait été obtenue à l'issue de la phase 1 (ABAD et BOURHIS, 2022).

Ainsi, pour 7 phénomènes, la cohérence des données avec la nouvelle méthodologie a été vérifiée sur le secteur du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais et, le cas échéant, modifiée pour obtenir *in fine* une carte régionale harmonisée. Les 7 phénomènes impactés sont :

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

Pour ce qui est du phénomène « Biseau salé », il n'était pas pris en compte dans l'étude précédente puisque le secteur du Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais n'est pas en zone côtière.

Cette première phase a été réalisée en raison de l'existence d'un phénomène spécifique au contexte minier du bassin houiller qui est « Présence et émission de gaz de mine », phénomène associé à celui de l'« Affaissement / effondrement lié aux cavités minières »⁵. La méthodologie de cartographie de ce phénomène majeur n'a pas été modifiée par l'addendum de 2023. Ainsi, les niveaux d'aléas obtenus pour ce phénomène lors des travaux de la Phase 1 sur le secteur du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (ABAD et BOURHIS, 2022) ont été intégrés et surimposés aux résultats de la phase 3.

Les cartes ci-dessous présentent les cartographies finales du phénomène « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » pour les gammes de profondeur 10-50, 10-100 et 10-200 m (cf. Figure 31, Figure 32 et Figure 33).

⁵ Pour plus d'informations concernant la méthodologie employée, se référer au rapport issu de la phase 1 (ABAD et BOURHIS, 2022)

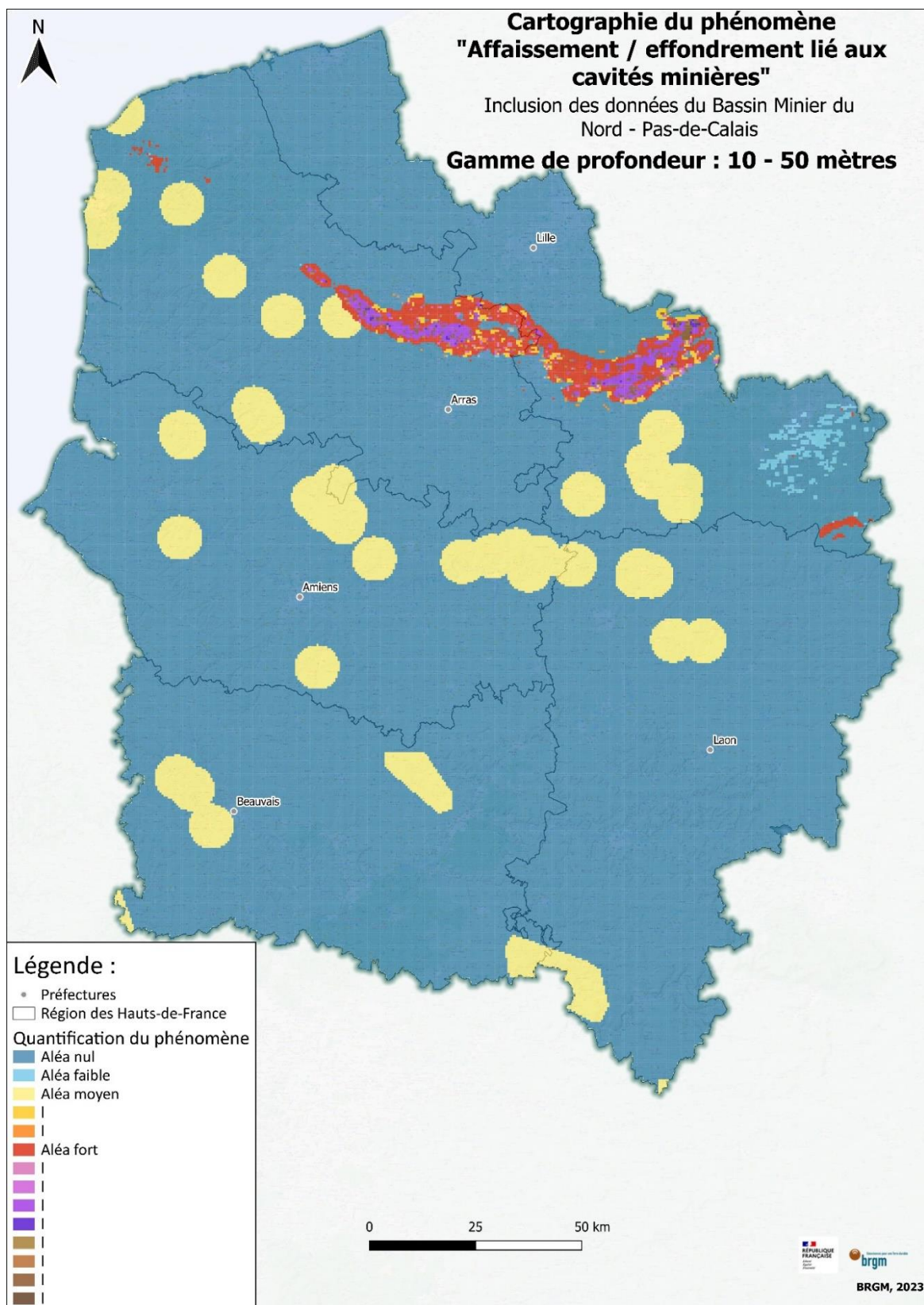


Figure 31 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-50 m

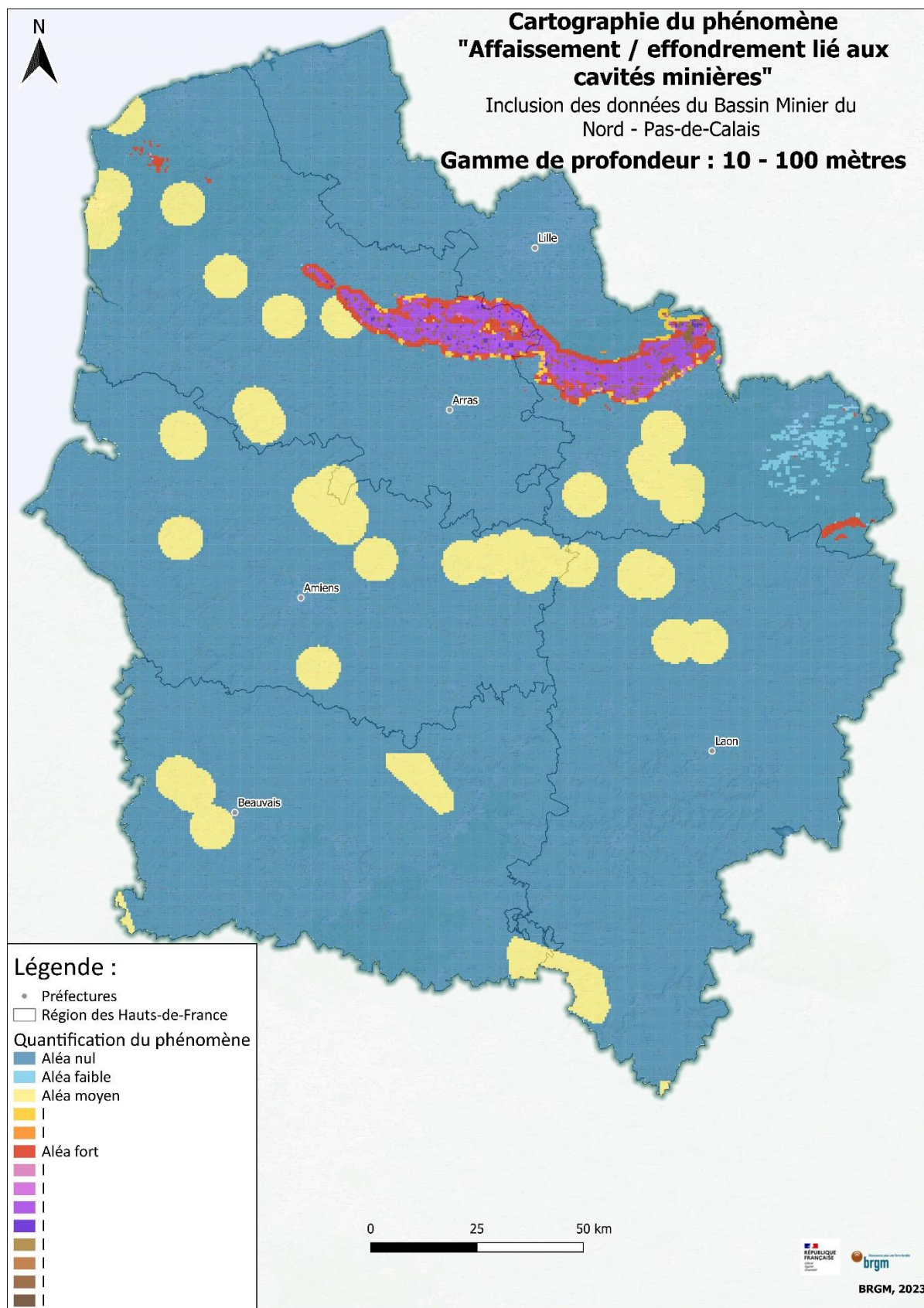


Figure 32 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-100 m

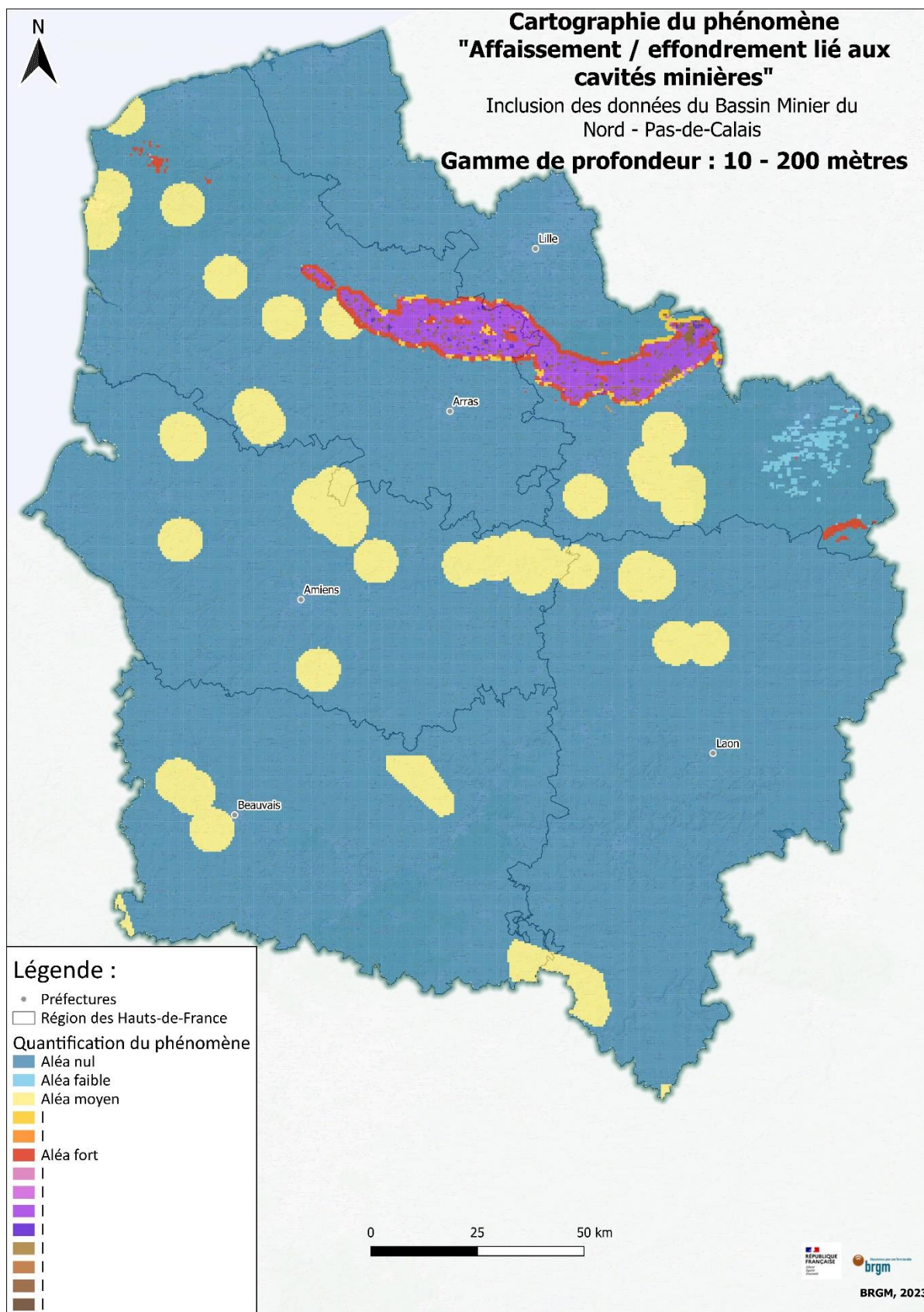


Figure 33 : Cartographie de l'aléa « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » en région Hauts-de-France, suite à l'inclusion des données du Bassin Houiller, pour la gamme de profondeur 10-200 m

5.2. PRESENTATION DES RESULTATS

Conformément à la méthodologie exposée dans le chapitre 3.2 du présent rapport, des notes finales ont été calculées par maille (maille de 500 x 500 m) en fonction de la cotation attribuée (niveaux d'aléa et facteurs aggravants), aboutissant à un classement en zone verte, orange ou rouge. Ainsi, six cartes ont été réalisées en fonction de la tranche de profondeur (10-50 m, 10-100 m et 10-200 m) et du type d'ouvrage géothermique envisagé : échangeur ouvert (doublet géothermique) ou échangeur fermé (sonde géothermique verticale).

Les six cartes réalisées pour la région Hauts-de-France sont présentées dans l'Annexe 1. Il s'agit à ce stade de propositions de cartes pour la révision des cartes réglementaires, issues de l'application du guide national, de son addendum, et d'un dialogue avec les acteurs. Les cartes définitives seront publiées dans un rapport qui sera entériné par un arrêté préfectoral à l'issue d'une phase de consultation pilotée par les services de l'Etat.

La répartition des superficies des zones vertes, orange et rouges est indiquée dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 20) :

Tableau 20 : Répartition des zones vertes, orange et rouges de la carte révisée dans les Hauts-de-France (2023) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015)

Type d'usage	Profondeur	Carte révisée			Carte initiale (10-200 m)		
		Zone verte (%)	Zone orange (%)	Zone rouge (%)	Zone verte (%)	Zone orange (%)	Zone rouge (%)
Sondes géothermiques verticales (SGV) <i>Echangeur fermé</i>	10 – 50 mètres	83,2	14,2	2,6	93,5	6,3	0,2
	10 – 100 mètres	81,0	15,9	3,1			
	10 – 200 mètres	79,4	17,4	3,2			
Doublets géothermiques <i>Echangeur ouvert</i>	10 – 50 mètres	85,1	12,4	2,5	93,9	6,1	0,0
	10 – 100 mètres	86,9	10,2	2,9			
	10 – 200 mètres	85,7	11,3	3,0			

La proportion de zones vertes est légèrement supérieure pour les doublets géothermiques. Pour chacun des types d'ouvrage, la proportion de zones vertes, orange et rouges est quasiment identique selon les trois gammes de profondeur considérées.

En comparaison avec la carte initiale, les zones orange et rouges ont augmenté de façon significative. En effet, pour les doublets géothermiques, il n'existait pas de zones rouge dans la carte nationale réalisée en 2015. L'apparition de ces zones rouge est notamment due aux phénomènes liés aux évaporites, aux sites et sols pollués et au phénomène « Présence et émission de gaz de mine » dans le bassin houiller. Pour les sondes géothermiques verticales, ces zones ne représentaient que 0,2 % de la surface régionale. Ces proportions, après révision et pour la

profondeur 10-200 m, ont augmenté jusqu'à 3 % pour les échangeurs ouverts et 3,2 % pour les échangeurs fermés. Les zones orange sont quant à elles passées, pour la profondeur 10-200 m, de 6 à 11 % pour les échangeurs ouverts et de 6 à 17 % pour les échangeurs fermés. Rappelons que cette augmentation ne constitue pas un frein au développement de la GMI car dans la zone orange, pour chaque installation, l'attestation de compatibilité du projet par un expert agréé sera demandée, réduisant ainsi la prise de risques liée au contexte géologique.

Les ratios de population couverts par les zones vertes, orange et rouges sont présentés ci-dessous (cf. Tableau 21) :

Tableau 21 : Ratios de population impactés par les zones vertes, orange et rouges de la carte révisée dans les Hauts-de-France (2023) selon les types de réalisations géothermiques et selon les profondeurs, comparaison avec la carte initiale (2015). La population est calculée à partir de la maille IRIS

Type d'usage	Profondeur	Carte révisée			Carte initiale (10-200 m)		
		Zone verte (%)	Zone orange (%)	Zone rouge (%)	Zone verte (%)	Zone orange (%)	Zone rouge (%)
Sondes géothermiques verticales (SGV) <i>Echangeur fermé</i>	10 – 50 mètres	57,1	39,7	3,3	81,7	18,2	0,2
	10 – 100 mètres	50,9	39,0	10,2			
	10 – 200 mètres	49,3	39,4	11,3			
Doublets géothermiques <i>Echangeur ouvert</i>	10 – 50 mètres	57,9	39,0	3,1	79,7	20,3	0,0
	10 – 100 mètres	53,5	37,8	8,7			
	10 – 200 mètres	52,4	37,8	9,8			

Ainsi, pour les doublets géothermiques, la zone verte impacte entre 52 et 58 % de la population régionale totale, la zone orange entre 38 et 39 % et la zone rouge entre 3 et 10 %. Pour les sondes géothermiques verticales, ces proportions sont respectivement : entre 49 et 57 %, 39-40 % et entre 3 et 11 % de la population totale des Hauts-de-France.

6. Conclusion

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

Il existe une carte initiale, réalisée à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée « *Carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (GMI)* ». Un guide d'élaboration de cette carte a été élaboré par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) en juillet 2015. Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié. En 2023, cette méthodologie a été révisée et complétée dans un addendum (*MTE, 2023*). Cette révision fait suite aux retours d'expérience des territoires ayant déjà réalisé leur cartographie réglementaire.

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.

Une première phase de révision régionale a eu lieu en 2019 et concernait le bassin minier du Nord–Pas-de-Calais (*ABAD et BOURHIS, 2022*). Cette exploitation intensive de houille a entraîné l'apparition d'un phénomène associé qui est « Présence et émission de gaz de mine ». Ainsi, l'existence de ce phénomène a nécessité la réalisation d'une révision spécifique de ce secteur avant de se consacrer au reste de la région Hauts-de-France, territoire dans lequel ce phénomène n'existe pas.

Dans l'objectif de finaliser la carte régionale sur les Hauts-de-France, la DGPR et l'ADEME 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 Hauts-de-France.

L'élaboration de la carte des Hauts-de-France tient compte de 9 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Conformément au guide méthodologique de 2015 (*MEDDE, 2015*) et de son addendum (*MET, 2023*), les phénomènes retenus en Hauts-de-France sont :

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

Ces 9 phénomènes ont été cotés séparément selon des niveaux établis sur chacune des 128 047 mailles de 500 m de côté couvrant la région des Hauts-de-France. Ils ont ensuite été pondérés par un facteur dit aggravant, inhérent aux techniques de GMI mises en œuvre, et sommés afin d'aboutir à des cartes répertoriant les trois zones (rouge, orange, verte).

Concernant le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais, un travail spécifique a été mené pour vérifier la cohérence des données avec la nouvelle méthodologie présentée dans l'addendum de 2023. Ainsi, pour 7 phénomènes de ce secteur, la cohérence des données avec la nouvelle méthodologie a été vérifiée et, le cas échéant, modifiée pour obtenir *in fine* une carte régionale harmonisée. Les 7 phénomènes impactés sont :

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

Pour ce qui est du phénomène « Biseau salé », il n'était pas pris en compte dans l'étude précédente puisque le secteur du Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais n'est pas en zone côtière.

La méthodologie de cartographie du phénomène « Affaissement / effondrement lié aux cavités minières » n'a pas été modifiée par l'addendum de 2023. Ainsi, les niveaux d'aléas obtenus pour ce phénomène lors des travaux de la Phase 1 sur le secteur du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (ABAD et BOURHIS, 2022), prenant donc en compte le phénomène associé qui est « Présence et émission de gaz de mine », ont été intégrés et surimposés aux résultats de la phase 3.

Cette méthodologie conduit à produire six cartes de zonage réglementaire. Elles correspondent à deux types d'usages géothermiques : exploitation par doublet sur aquifère (échangeur ouvert) et par sonde géothermique verticale (échangeur fermé), et à trois gammes de profondeur (10-50 m, 10-100 m et 10-200 m).

Par rapport à la carte nationale initiale, la zonation des cartes réglementaires des Hauts-de-France est distincte pour les trois gammes de profondeur. Les données et les connaissances acquises localement sur la région ont été prises en compte. La précision apportée par la carte révisée concerne de fait tous les phénomènes redoutés notamment de par l'utilisation des atlas hydrogéologiques, des cartes d'aléas produites à des échelles locales (cavités non-minières, cavités minières, mouvement de terrain), d'informations plus précises traitées en détail (localisation des sites et sols pollués dans la BD BASOL mise à jour, données locales de la BSS) et par la prise en compte de la géométrie des formations dès que cela était possible pour tous les phénomènes (en particulier pour les formations évaporitiques et la mise en communication des aquifères).

Pour un système géothermique donné (doublets géothermiques ou SGV), les cartes obtenues sont ainsi différentes d'une tranche de profondeur à l'autre. Néanmoins, quelle que soit la tranche de profondeur (10-50, 10-100 et 10-200 m), pour les doublets géothermiques, la zone verte représente globalement 85-86 %, la zone orange 10-12 % et la zone rouge 2-3 % de la surface totale de la région Hauts-de-France, tandis que pour les SGV les proportions sont respectivement : 79-83 %, 14-17 % et 2-3 %.

En terme de ratios de population impactés par ces zones, pour les doublets géothermiques la zone verte impacte entre 52 et 58 % de la population régionale totale, la zone orange 38-39 % et la zone rouge entre 3 et 10 %. Pour les SGV ces proportions sont respectivement : entre 49 et 57 %, 39-40 % et entre 3 et 11 % de la population totale des Hauts-de-France.

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 (GMI) pour la région Hauts-de-France seront mises à disposition sur le site internet www.geothermies.fr.

7. Bibliographie

ABAD, J., BOURHIS, F. avec la collaboration de **SZCZYGLOWSKI, M., MOSSMANN, J-R., PARMENTIER, M.** et **MANLAY, A.** (2022) – Cartes des zones réglementaires à la géothermie de minime importance. Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais. Région Hauts-de-France. Rapport final. BRGM/RP-70704-FR, 102 p., 52 ill., 20 tabl., 1 ann, <[RP-70704-FR](#)>.

ALLIER, D., CHRÉTIEN, P. avec la collaboration de **BARATON, A., LEVEAU, E., MINARD, D.** et **TOURLIÈRE, B.** (2009) – Atlas hydrogéologique numérique de l'Aisne – Notice. Rapport final. BRGM/57439-FR, 158 p., 65 ill., 10 tabl., 6 ann, <[RP-57439-FR](#)>.

BAULT, V., FOLLET, R., LAURENT, A., TOURLIÈRE, B. avec la collaboration de **LEVEAU, E.** et **WILLEFERT, V.** (2012) – Atlas hydrogéologique numérique de l'Oise. Phase 3 : Notice. Rapport final. BRGM/RP-61081-FR, 320 p., 81 ill., 55 tabl., 2 ann., 1 CD-ROM, 1 carte A0, <[RP-61081-FR](#)>.

BAULT, V., BOURGINE, B., CARY, L., GOURCY, L., KOROTCHANSKY, A., WINCKEL, A. avec la collaboration de **DECOUCHON E.** et **LINGLIN C.** (2017) – Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre, en lien avec les marais arrière-littoraux. Rapport final. BRGM/RP-67430-FR, 298 p., 128 ill., 12 tabl., 10 ann., 1 DVD, <[RP-67430-FR](#)>.

BRIAIS, J. (2015) – Le Cénozoïque du bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence. Sciences de la Terre. Université de Rennes 1.

BRUGERON, A., BESSIERE, H., BOURGINE, B. et **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., <[RP-65452-FR](#)>.

BURGEAP-ISSEP-IFP (1999) – Charbonnages de France, Service Patrimoine Nord-Pas-de-Calais, Département Environnement et Arrêt des Exploitations, Etude hydraulique, hydrogéologique et hydrochimique du Bassin minier charbonnier du Nord-Pas-de-Calais – Rapport final provisoire (étude 3H).

COULOMBEAU, C (1976) – Étude et recherche des dépôts de craie phosphatée en Picardie. BRGM/76-RDM-001-FE, 88 p., 3 pht., 18 cartes, <[76-RDM-001-FE](#)>.

CRAMPON, N., CAOUS, J.Y., LEPLAT, J. et **MANIA, J.** (2006) – Chapitre IV - Flandres, Artois - Ardennes. In *Aquifères et Eaux Souterraines en France*, Roux, Jean-Claude (dir.), vol. 1, Orléans : AIH-IAH-BRGM Editions, pp. 330-397.

CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I. (1996) – Les Aquifères Littoraux de la Région Picardie. BRGM/RR-38981-FR, 15 p., 2 ill., <[RR-38981-FR](#)>.

DESCAMPS, F., DEWAIDE, L., LEFEBVRE, C., PACYNA, D., VANDYCKE, S. (2022) – Les cavités souterraines en Wallonie et en Hauts-de-France, Rapport de Synthèse. Module 3, activité 1, du projet interreg RISSC.

INERIS (2007). Bassin houiller du Nord Pas-de-Calais, Définition de l'aléa « gaz de mine » en vue de la réalisation d'un Plan de prévention des Risques Miniers, Rapport méthodologique - Rapport DRS-08-90083-08361A de l'INERIS, Direction des Risques du Sol et du Sous-sol, avec la participation de GEODERIS, Pokryszka Z, 22 décembre 2007.

LAURENT, A., LE COZANNET, G., COUEFFE, R., SCHROETTER, J-M., CROISET, N. et LIONS, J. (2017) – Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale. Rapport final. BRGM/RP-66052-FR, 189 p., 103 ill., 6 annexes, <[RP-66052-FR](#)>.

LAURENT, A. (2021) – Modélisation géologique 3D du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais et de son substratum dévonien-carbonifère inférieur : vers une meilleure définition des réservoirs géothermiques profonds. Sciences de la Terre. Université de Lille. NNT : 2021LILUR058. tel-03644435.

LICOUR, L. (2012) – Relations entre la géologie profonde et le comportement hydrogéologique du réservoir géothermique du Hainaut (Belgique). Caractérisation de l'aquifère dans la région de Saint-Ghislain. Université de Mons.

LICOUR, L. (2014) – The geothermal reservoir of Hainaut: the result of thermal convection in a carbonate and sulfate aquifer. GEOLOGICA BELGICA (2014) 17/1: 75-81.

MAQSOU, A., BRACQ, P., CRAMPON, N., COLBEAUX, J.P. (1996) – La craie du bassin Artois-Picardie peut-elle être karstifiée ? Annales de la Société Géologique du Nord (SGN). T.4 (2^{ème} série), p. 99-109.

MEDDE (2015) – Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. 83 p., 50 fig., 3 ann., <[addendum-guide-delaboration-de-la-carte-des-zones-reglementaires-de-la-tele-gmi-mtes](#)>.

MEILLIEZ, F. (2016) – Le Cambrésis masque-t-il un lien ou une discontinuité structurale entre l'Artois et l'Ardenne ? Annales de la Société Géologique du Nord (SGN). T.23 (2^{ème} série), p. 17-29.

MET (2023) – Addendum au « Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance », <[guide-delaboration-de-la-carte-des-zones-reglementaires-de-la-tele-gmi-mtes](#)>.

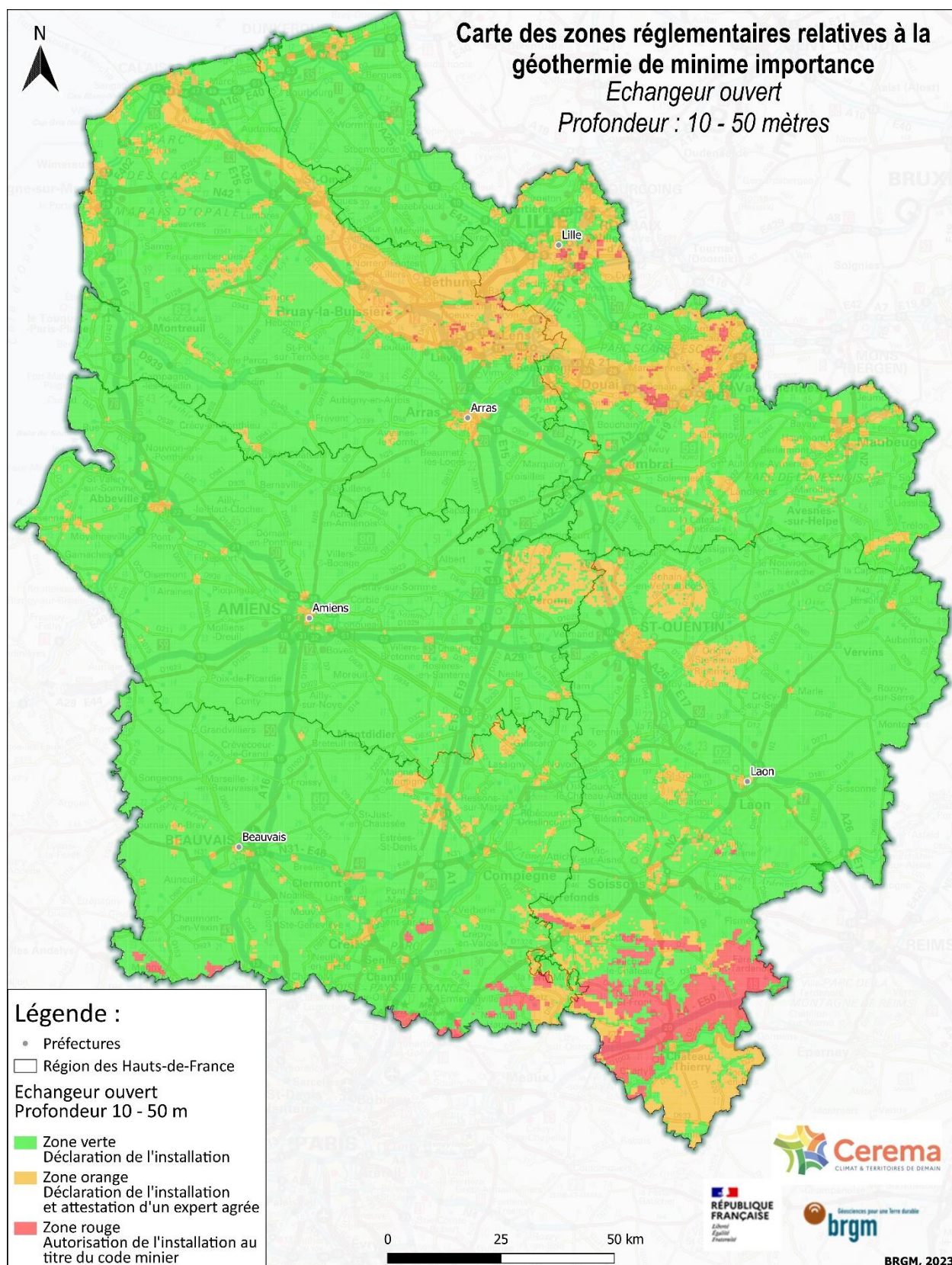
PICOT, J. et PIRA, K. (2011) – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais. Rapport final. BRGM/RP-60244-FR, 2 tomes, 274 p., 90 fig., 19 tabl., 10 ann., <[RP-60244-FR](#)>.

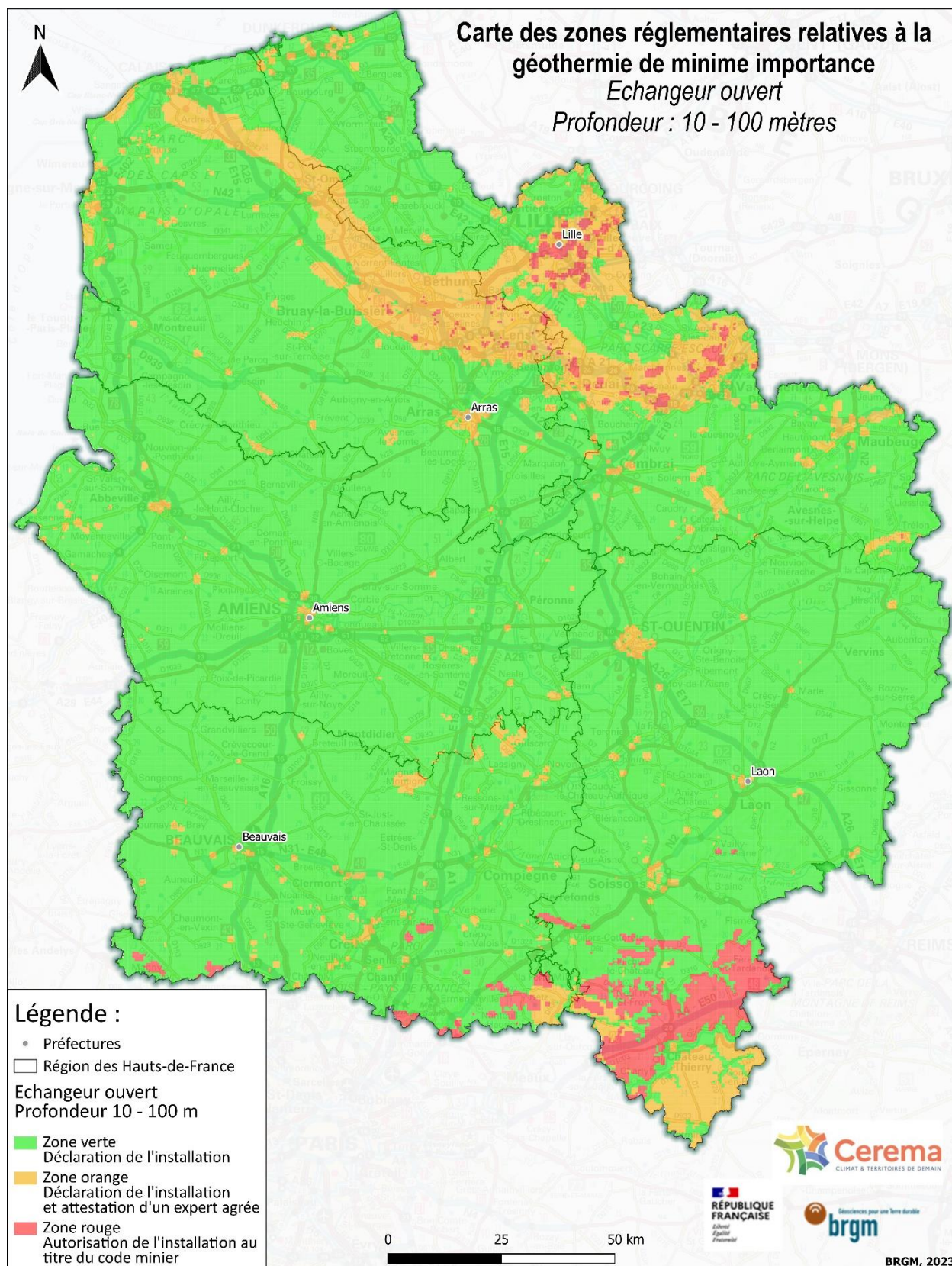
RICOUR, J. et LEPLAT, J. (1990) – Direction de la voirie et des transports - Surveillance piézométrique de la nappe de la craie et suivi expérimental des carrières souterraines sur le site de Lezennes. BRGM/RR-31239-FR, 16 p., 2 pht., 2 cartes, <[RR-31239-FR](#)>.

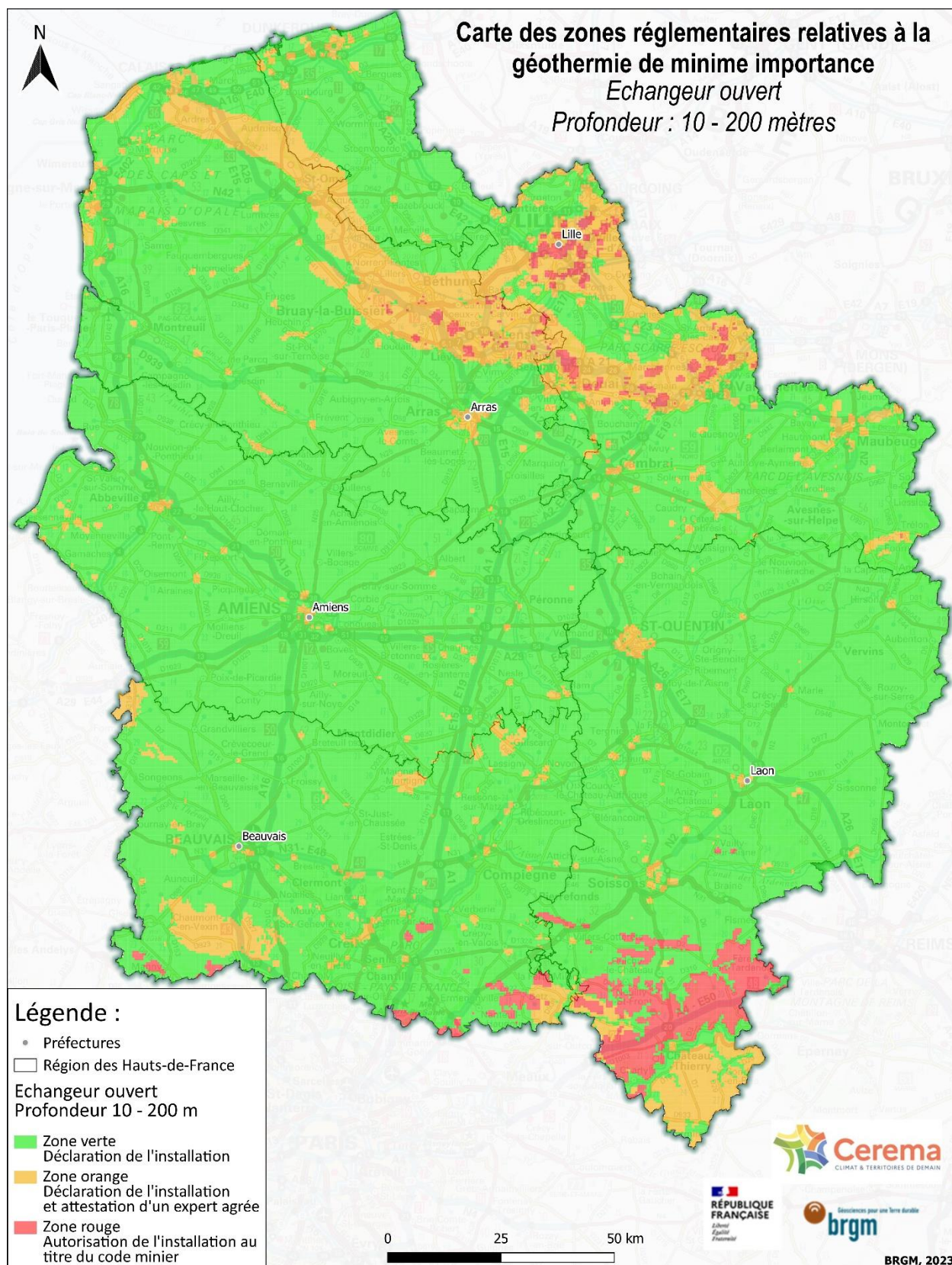
SEGUIN, J.J., CASTILLO, C. et ARNAUD, L. (2015) – Modélisation des nappes de l'Albien et du Néocomien. Rapport final. BRGM/RP-64873-FR, 271 p., 152 fig., 21 tabl., 8 ann., <[RP-64873-FR](#)>.

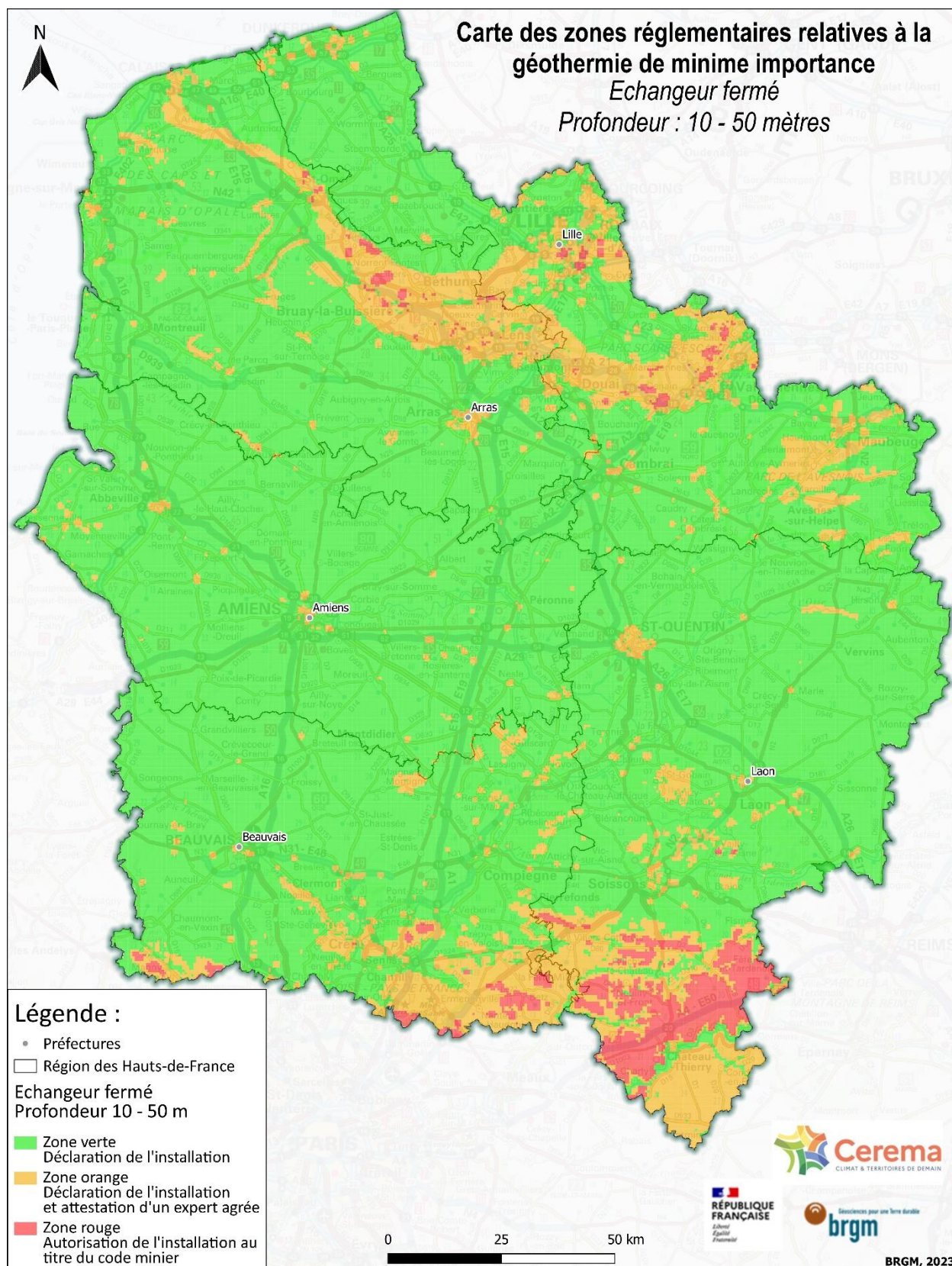
8. Annexes

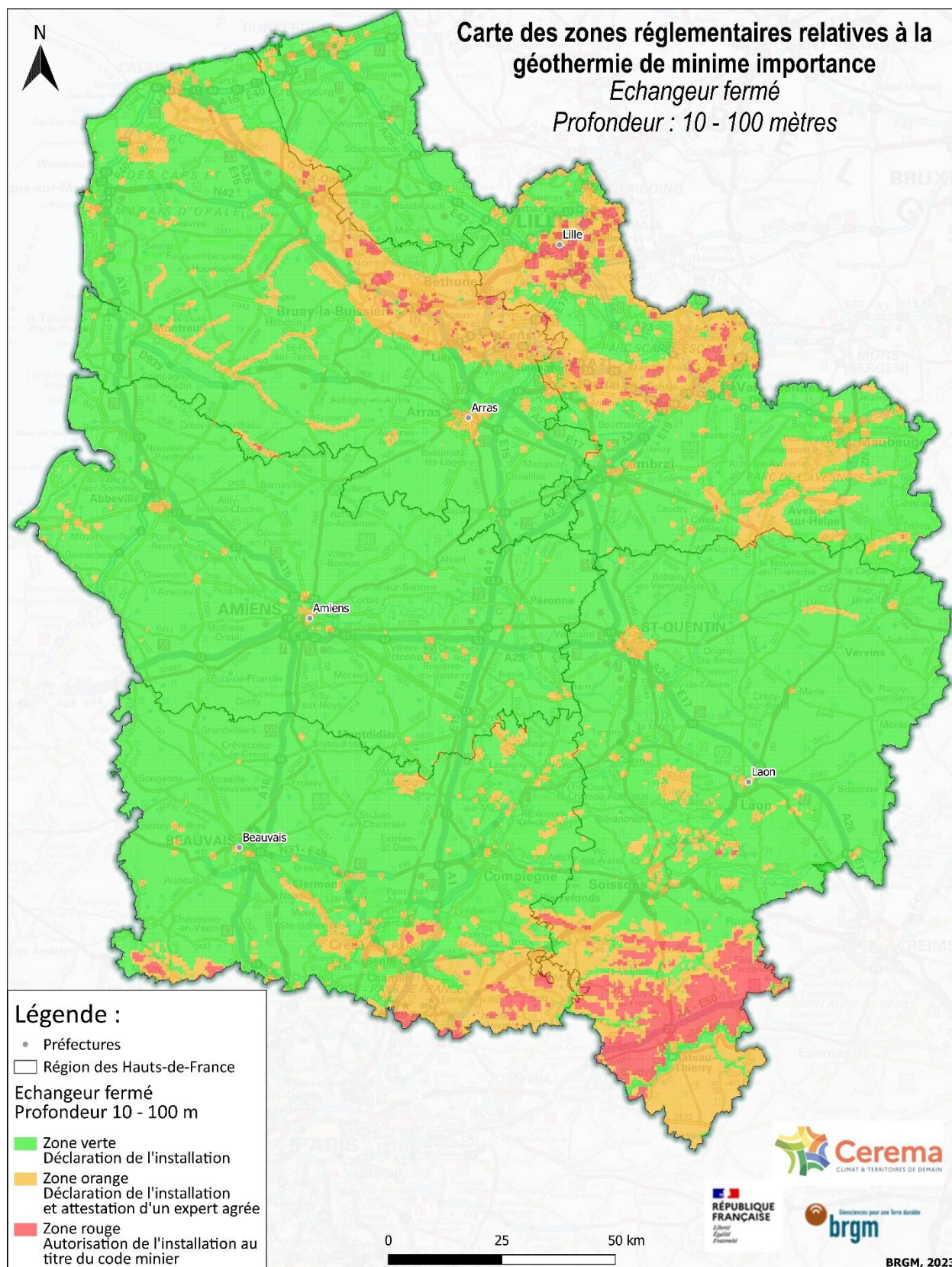
Annexe 1 Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance dans les Hauts-de-France

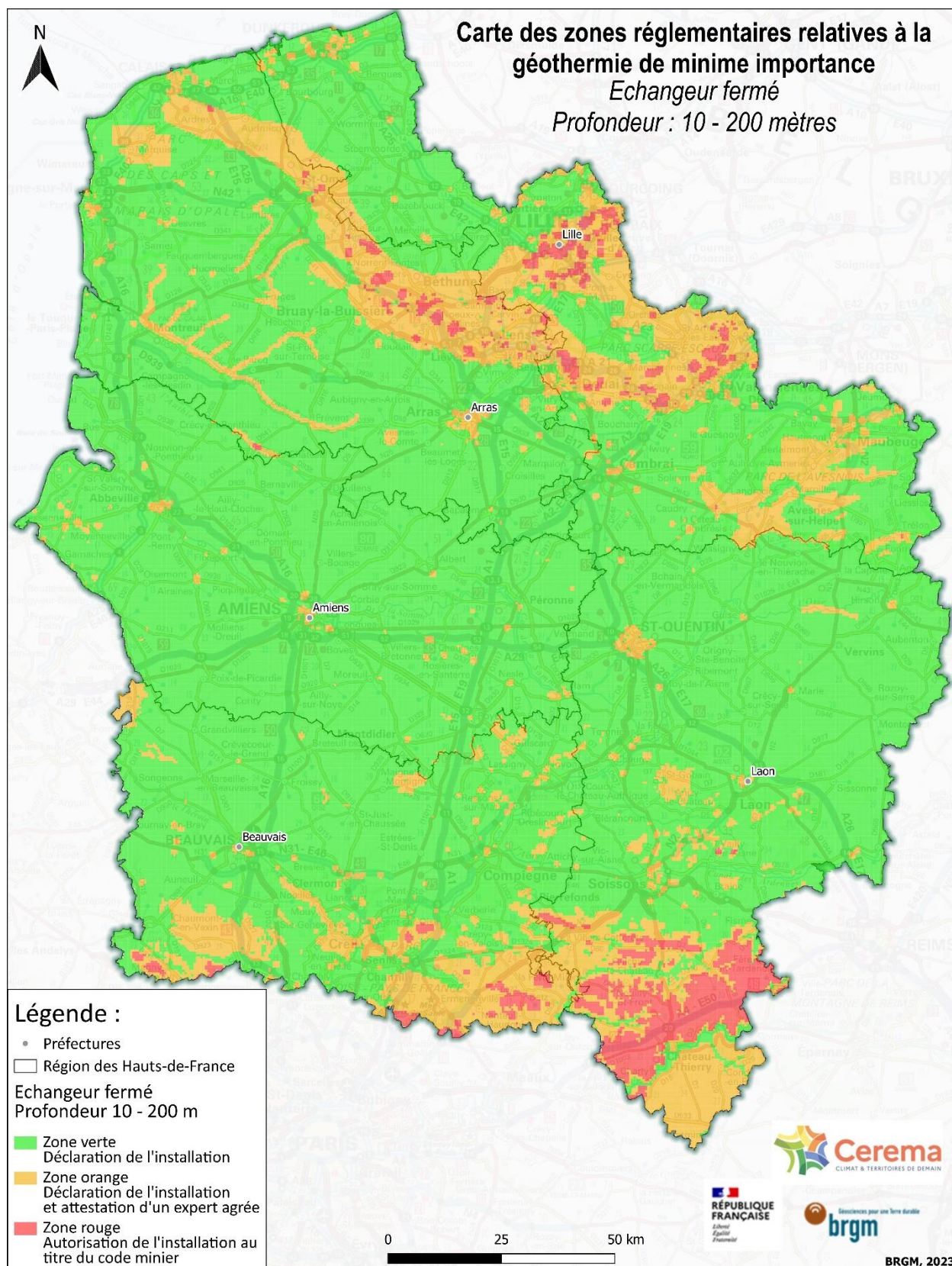














**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*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 Hauts-de-France

Arteparc Bâtiment A

2 rue des Peupliers

BP 10406

59814 – Lesquin Cedex - France

Tél. : 03 20 19 15 40

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm