

Document public



Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Région Ile de France

Rapport final

BRGM/RP-67102-FR

Juillet 2017



Document public

Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Région Ile de France

Rapport final

BRGM/RP-67102-FR

Juillet 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

J.-C. Martin, G. Badinier, A. Neveux, C. Kreziak*

(*) Cerema

Vérificateur :

Nom : P. Durst

Date : 16/08/2017

Signature :

Approbateur :

Nom : E. Gomez

Date : 20/08/2017

Signature :

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



Mots-clés : géothermie, risque géologique, cartographie, Code minier, minime importance, télédéclaration, cartes réglementaires, Ile de France.

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

J.-C. Martin, A. Neveux, G. Badinier, C. Kreziak (2016) – Cartes des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Région Ile de France. Rapport final BRGM/RP-67102-FR, 88 p., 57 ill., 3 ann.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

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 écologique et solidaire (MTES), notamment dans le cadre des actions de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Afin de favoriser le recours à la géothermie, de tenir compte des évolutions technologiques et de mieux prendre en compte l'incidence des installations sur l'environnement, la réglementation relative à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision en 2015 (décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015). Celle-ci a été accompagnée par une carte, à l'échelle nationale, indiquant les zones géographiques où peuvent exister des risques liés à la réalisation d'un forage géothermique. Elle est appelée carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Un guide d'élaboration de cette carte a été mis au point par le MTES (juillet 2015). Ce guide constitue la méthodologie fixée dans l'arrêté relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, pris en application de l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié.

La carte nationale tient compte de 9 phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux d'un forage géothermique ou lors de l'exploitation d'un gîte géothermique. Elle distingue trois zones selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier :

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

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

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

Dans l'objectif d'avoir une carte régionale de la région Ile de France plus précise, la DRIEE a demandé à la DTer Île-de-France du Cerema et au BRGM la transposition régionale de la cartographie réglementaire relative à la géothermie de minime importance. Les deux organismes ont effectué ce travail conjointement. La partie traitée par le BRGM a été financée par le BRGM sur ses crédits de Service Public et une aide financière apportée par l'ADEME Ile de France. La contribution du Cerema a été financée par la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (Direction de l'Eau et de la biodiversité) du MTES.

Sur la base de leurs connaissances régionales respectives, le Cerema a travaillé sur les phénomènes d'affaissement/effondrement liés aux cavités (hors mines) et sur les pollutions des sols et des nappes d'eau souterraines, tandis que le BRGM a travaillé sur les données relatives à la présence de gypse, à l'artésianisme, aux communications entre aquifères et aux remontées de nappe.

Les phénomènes retenus en Ile de France sont :

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

Au regard du contexte régional, il n'a pas été jugé nécessaire de cartographier les autres phénomènes (cavités minières et mouvements de terrain) envisagés dans le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires (MTES, 2015).

Le traitement plus approfondi des données des différents phénomènes retenus, le maillage de 100x100 m et le découpage en 3 tranches d'épaisseur (10-50, 10-100 et 10-200 m) a permis d'apporter une plus grande précision à la carte réglementaire de la région Ile de France.

Les superficies des différentes couleurs (vertes, orange et rouges), de chacune des cartes (cartes nationales et cartes régionales pour doublets et pour SGV), présentent quelques différences qui sont détaillées ci-après.

On constate pour les cartes régionales une forte augmentation des zones vertes (+ 39 % pour les doublets et + 25 % pour les SGV de la tranche 10-50 m) et une forte diminution des zones orange (- 85 % pour les doublets et - 70 % pour les SGV de la tranche 10-50 m). Par contre on constate une forte augmentation des zones rouges dans les deux cas, on passe de 0,1 % à 2 % pour les doublets, quelques soit la profondeur, et de 2 % à 5 et 6 % pour les SGV. Le pourcentage de zones vertes, pour les doublets, est ainsi passé de 67 % du territoire à respectivement 93, 92 et 90 % pour les 3 profondeurs. Pour les SGV, ce pourcentage est passé de 69 % du territoire à respectivement 86, 79 et 76 % pour les 3 profondeurs. Le pourcentage de zones orange est passé, pour les doublets, de 33 % du territoire à respectivement 5, 6, et 7 % pour les 3 profondeurs. Pour les SGV, ce pourcentage est passé de 29 % du territoire à respectivement 9, 16 et 18 % pour les 3 profondeurs. Par contre on observe une augmentation du pourcentage de zones rouges qui passent de 0,1 % du territoire à 2 % quelques soit la profondeur pour les doublets, et de 2 % à 5 % pour la tranche 10-50 m, et à 6 % pour les deux tranches de profondeur suivantes pour les SGV. Ce résultat s'explique d'une part par une meilleure localisation des zones à risque des formations de gypses en particulier, d'autre part par le fait que les niveaux d'aléa pour la carte nationale est différente de ceux de la carte régionale.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance	14
2.1. LE CODE MINIER.....	14
2.2. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES A PRENDRE EN CONSIDERATION 15	
3. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire.....	16
3.1. MOTIVATIONS ET ADAPTATION REGIONALE.....	16
3.2. METHODOLOGIE APPLIQUEE.....	16
4. Fiches des phénomènes redoutés	19
4.1. PHENOMENE « AFFAISSEMENT/SURRECTION LIE AUX FORMATIONS EVAPORITIQUES ».....	19
4.1.1. Description du phénomène et occurrences	19
4.1.2. Qualification du phénomène	29
4.1.3. Cotation et cartographie de l'aléa « affaissement/surrection lié aux évaporites » 30	
4.2. PHENOMENE « AFFAISSEMENT/EFFONDREMENT » LIE AUX CAVITES (HORS MINES)	33
4.2.1. Description du phénomène et occurrences	33
4.2.2. Qualification du phénomène	33
4.2.3. Données sources	34
4.2.4. Méthodologie de traitement.....	36
4.2.5. Cotation et cartographie de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ».....	37
4.3. PHENOMENE « POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE » 40	
4.3.1. Données sources	40
4.3.2. Méthodologie de traitement.....	41
4.3.3. Cotation et cartographie de l'aléa « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine ».....	43
4.4. PHENOMENE « ARTESIANISME »	45
4.4.1. Phénomène redouté	45
4.4.2. Qualification du phénomène	45
4.4.3. Données utilisées et traitement.....	45

4.4.4. Cotation et cartographie de l'aléa « artésianisme »	47
4.5. PHENOMENE « MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFERES ».....	49
4.5.1. Phénomène redouté	49
4.5.2. Qualification du phénomène	49
4.5.3. Données utilisées pour le traitement.....	49
4.5.4. Cotation et cartographie de l'aléa « mise en communication d'aquifères »50	
4.6. PHENOMENE « REMONTEE DE NAPPE ».....	52
4.6.1. Phénomène redouté	52
4.6.2. Qualification du phénomène	52
4.6.3. Données utilisées pour le traitement.....	52
4.6.4. Cotation et cartographie de l'aléa « remontée de nappe ».....	52
5. Cartes des zones réglementaires régionales relatives à la géothermie de minime importance.....	54
6. Comparaison des cartes régionales avec les cartes nationales	61
7. Conclusion	65
8. Bibliographie.....	66

Liste des illustrations

Illustration 1 - Cartes réglementaires nationales pour les systèmes fermés (à gauche) et ouverts (à droite).....	12
Illustration 2 - À droite, contours des anciennes carrières souterraines connues (source IGC Paris). À gauche, zonage réglementaire national ne retenant pas la présence de cavité	12
Illustration 3 - Les phénomènes redoutés et les facteurs aggravants utilisés pour la cartographie réglementaire régionale.	18
Illustration 4 - Les principales formations porteuses de gypse dans la série tertiaire du bassin de Paris (modifié d'après Briais, 2016).....	20
Illustration 5 - Répartition des LGV disponibles en Ile-de-France (en orange) et des forages de référence de la thèse de Briais (en bleu) utilisés pour le calcul des épaisseurs de gypse. En noir : zone d'étude du modèle BRGM de 2014. En rouge : limite du modèle réalisé dans ce travail (Ile-de-France).	21
Illustration 6 - Exemple d'une partie de la série du gypse Ludien (Priabonien) d'un LGV. Les codages utilisés dans la modélisation sont tirés de la colonne « Lithologie ». .	22
Illustration 7 - Localisation des LGV vérifiés au 23-05-2017 par rapport à la limite paléogéographique des lagunes de gypse LUDIEN (en rose). La limite bleue est la limite 100% calcaires représentant la limite d'extension des Calcaires de Champigny. Thèse Briais (2015).	23
Illustration 8 - Localisation des LGV vérifiés au 23-05-2017 par rapport à la limite paléogéographique des lagunes de gypse LUTETIEN (en violet-marron) de Robelin et al. (2014 - tiré de la Synthèse bassin de Paris de 1980).	23
Illustration 9 - Liste des grilles d'épaisseur de gypse (EPGY) modélisées sous GDM-Multilayer.	24
Illustration 10 - Schéma illustrant le fait que les forages utilisés dans le calcul des épaisseurs ne rencontrent parfois pas les niveaux de gypse (au niveau des forages S3 et S4, le risque est donc sous-estimé).	25
Illustration 11 - Modélisation du toit du Ludien d'Ile-de-France et localisation des logs validés contenant l'information « gypse ».	26
Illustration 12 - Modélisation du toit du Lutétien d'Ile-de-France et localisation des logs validés contenant l'information « gypse ».	27
Illustration 13 - Superposition des cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans les formations du Sannoisien, Ludien et Marinésien (toutes tranches d'épaisseur) et limite BDLISA utilisée (en noir). L'échelle d'épaisseur représentée varie de 0 à 15 m.	28
Illustration 14 - Superposition des cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses (toutes tranches d'épaisseur), limite d'extension de la zone lagunaire lutétienne (en marron ; issue de la synthèse bassin de Paris de 1980 et de Robelin et al. 2014) et limite BDLISA utilisée (en noir). L'échelle d'épaisseur représentée varie de 0 à 15 m.	29
Illustration 15 - Qualification de la prédisposition aux phénomènes de mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse en profondeur (méthode INERIS - 2014).	30
Illustration 16 - Cotation de l'aléa du phénomène « affaissement/surrection lié aux évaporites ».31	
Illustration 17 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 50 m).	31
Illustration 18 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 100 m).	32
Illustration 19 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 150 m).	32
Illustration 20 - Répartition des cavités (hors mines) connues Paris et petite couronne (source IGC Paris).....	34

Illustration 21 - Répartition des cavités présentes sur les départements des Yvelines, de l'Essonne et du Val d'Oise, communiquées par la DRIEE (source IGC Versailles).....	35
Illustration 22 - Localisation des données inventoriées sur la Seine-et-Marne	36
Illustration 23 - Cotation de l'aléa du phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »	38
Illustration 24 - Impact des contours de cavités connues sur le maillage régional	38
Illustration 25 - Carte de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »	39
Illustration 26 - Extrait de la fiche descriptive de la base des zones à risques de pollution des sols (DRIEE).....	41
Illustration 27 - Grille de quantification de la susceptibilité au phénomène « pollution des sols et des nappes d'eau souterraines ».....	42
Illustration 28 - Cotation de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine ».....	43
Illustration 29 - Carte de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »	44
Illustration 30 - Profondeur de la nappe de l'Oligocène.	46
Illustration 31- Profondeur de la nappe de l'Yprésien.	46
Illustration 32 - Cotation de l'aléa « phénomène artésianisme »	47
Illustration 33 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 50 m.	47
Illustration 34 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 100 m.	48
Illustration 35 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 200 m.	48
Illustration 36 - Cotation de l'aléa « phénomène de mise en communication d'aquifères »	50
Illustration 37 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-50 m.	50
Illustration 38 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-100 m.	51
Illustration 39 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-200 m.	51
Illustration 40 - Cotation de l'aléa « remontée de nappe ».....	53
Illustration 41 - Carte de l'aléa « remontée de nappe »	53
Illustration 42 - Carte réglementaire régionale 10-50 m pour doublets.	55
Illustration 43 - Carte réglementaire régionale 10-50 m pour SGV.	55
Illustration 44 - Carte réglementaire régionale 10-100 m pour doublets.	56
Illustration 45 - Carte réglementaire régionale 10-100 m pour SGV.	56
Illustration 46 - Carte réglementaire régionale 10-200 m pour doublets.	57
Illustration 47 - Carte réglementaire régionale 10-200 m pour SGV.	57
Illustration 48 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-50 m).	58
Illustration 49 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-50 m).	58
Illustration 50 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-100 m).	59
Illustration 51 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-100 m).	59
Illustration 52 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-200 m).	60
Illustration 53 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-200 m).	60
Illustration 54 - Rappel : extrait carte réglementaire nationale 10-200 m pour doublets.....	62

Illustration 55 - Rappel : extrait carte réglementaire nationale 10-200 m pour SGV.....	62
Illustration 56 - Schéma comparatif des résultats de la répartition des zones vertes, orange et rouges entre la carte nationale de la région Ile de France et les cartes régionales issues de la présente étude (doublet).....	63
Illustration 57 - Schéma comparatif des résultats de la répartition des zones vertes, orange et rouges entre la carte nationale de la région Ile de France et les cartes régionales issues de la présente étude (SGV).....	63

Liste des annexes

- Annexe 1 - METHODOLOGIE GDM-MULTILAYER (traitement des données gypse)
- Annexe 2 - Cartes des épaisseurs cumulées du gypse Sannoisien, Ludien et Marinésien
- Annexe 3 - Cartes des épaisseurs cumulées du gypse Lutétien et Bartonien inférieur

1. Introduction

Le développement des énergies renouvelables, dans le contexte de la transition énergétique, s'est imposé à un cadre réglementaire ancien et inadapté à la multiplication de nouveaux ouvrages impactant leur environnement par leur présence et leur usage. La réglementation relative à la géothermie de minime importance a fait l'objet d'une révision, dont l'une des évolutions est le recours à une cartographie réglementaire pour la mise en œuvre des installations petites ou modestes, visant à exploiter le potentiel calorifique du sol et des eaux souterraines.

L'élaboration de cette cartographie réglementaire s'appuie sur la méthodologie fixée dans l'arrêté du 25 juin 2015 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 (guide élaboré à partir des réflexions menées par le groupe de travail « Cartographie » mis en place par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie en mars 2014).

Cette cartographie tient compte d'un ensemble de phénomènes pouvant être rencontrés lors de la réalisation des travaux de forage ou lors de l'exploitation du gîte géothermique. Les conséquences considérées peuvent être d'ordre géologique (causant notamment en surface des désordres sur les bâtiments situés au voisinage du forage, ou la dégradation des ouvrages mis en place dans l'ouvrage souterrain), ou environnemental (notamment par la dégradation ou la pollution des eaux souterraines). Sa traduction s'exprime selon l'importance des enjeux au regard des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du Code minier, à travers l'identification de :

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

Une première cartographie, à l'échelle du territoire national, est en vigueur depuis le 1er juillet 2015 et disponible sous <http://www.geothermie-perspectives.fr>. Elle comprend deux couches d'information : une relative aux systèmes fermés (type Sondes Géothermiques Verticales) et une relative aux systèmes ouverts (pompages/réinjection en nappe) (Illustration 1).

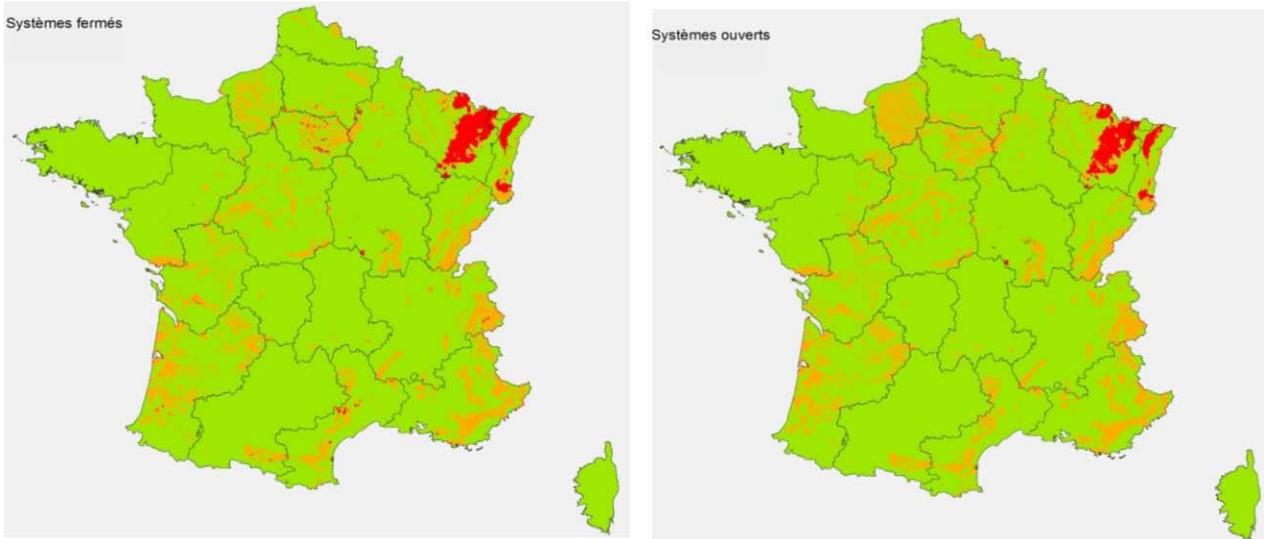


Illustration 1 - Cartes réglementaires nationales pour les systèmes fermés (à gauche) et ouverts (à droite).

Cette cartographie a vocation à être révisée localement, par l'apport de précisions en matière de connaissance et de localisation des phénomènes.

Pour la région Île-de-France, l'actualisation est réalisée conjointement par le BRGM et le Cerema et fait l'objet de ce rapport d'étude.

Cette actualisation vise en particulier à prendre en compte des phénomènes qui n'ont pas pu être intégré au niveau national ou qui l'ont été imparfaitement. On peut citer en particulier le cas des cavités souterraines d'origine non minière (anciennes carrières souterraines) largement répandues sur Paris et la petite couronne (Illustration 2).

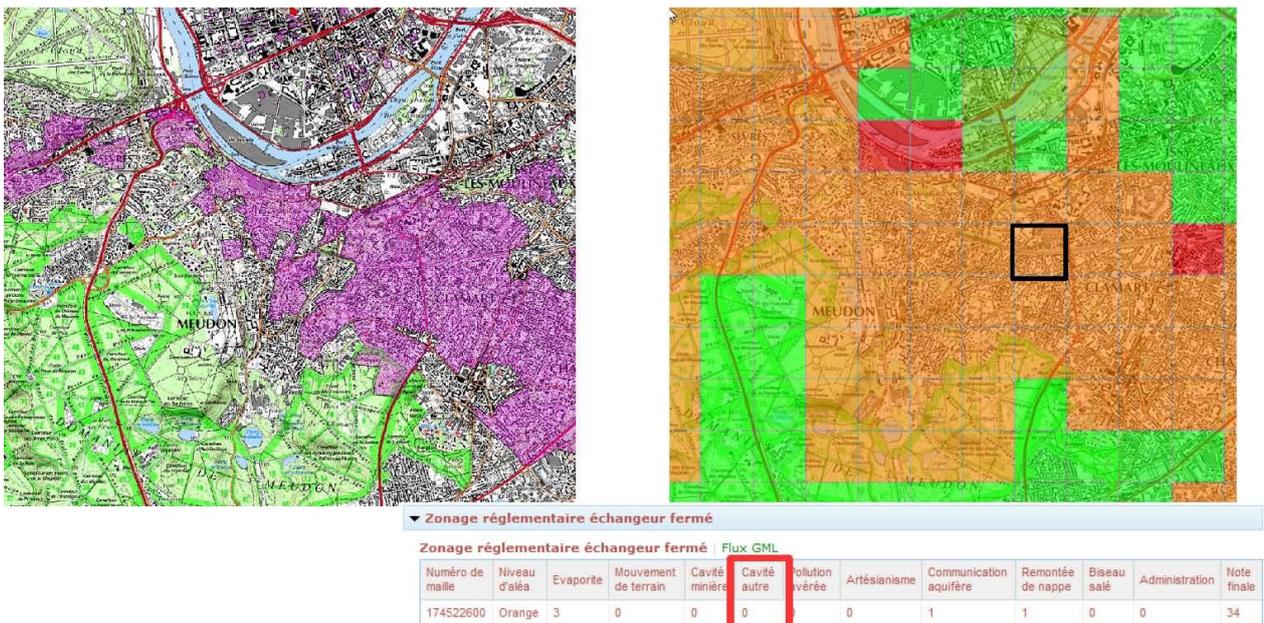


Illustration 2 - À droite, contours des anciennes carrières souterraines connues (source IGC Paris). À gauche, zonage réglementaire national ne retenant pas la présence de cavité

A la demande de la DRIEE, maître d’ouvrage de l’étude, et après concertation (réunion du 10 mars 2014), il a été arrêté une répartition des phénomènes à étudier entre le BRGM et le Cerema en s’appuyant en particulier sur l’état des connaissances territoriales des deux organismes.

Les phénomènes liés aux roches évaporitiques, à l’artésianisme, aux mises en communication entre aquifères et aux remontées de nappe ont été étudiés par le BRGM. Les phénomènes liés aux cavités (hors mines) et aux pollutions des sols et des nappes souterraines ont été étudiés par le Cerema. Au regard du contexte régional, il n’a pas été jugé nécessaire de cartographier les autres phénomènes (cavités minières et mouvements de terrain) envisagés dans le guide d’élaboration de la carte des zones réglementaires (MEDDE, 2015).

La partie traitée par le BRGM a été financé par le BRGM sur ses crédits de Service Public et une aide financière apportée par l’ADEME Ile de France. La contribution du Cerema a été financée par la Direction générale de l’aménagement, du logement et de la nature (Direction de l’Eau et de la biodiversité) du MTES.

Ce rapport expose les méthodologies utilisées pour la caractérisation des sept phénomènes redoutés pris en compte, et présente les six cartes réglementaires régionales réalisées pour les deux types d’usages géothermiques possibles, les sondes géothermiques verticales (échangeur fermé) et l’exploitation par doublets sur aquifère (échangeur ouvert), et pour trois gammes de profondeur (10-50 m, 10-100 m, 10-200 m).

La partie du projet traité par le BRGM a été suivi par le Comité de pilotage (COFIL) composé de la DRIEE, de l’ADEME Ile de France, du Cerema et du BRGM. Le Comité s’est réuni à 5 reprises selon les dates indiquées ci-après.

2016									2017					
Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
COFIL n°1 05-avr					COFIL n°2 23-sept			COFIL n°3 09-déc				COFIL n°4 07-avr		COFIL n°5 20-juin

2. Réglementation applicable à la géothermie de minime importance

2.1. LE CODE MINIER

La géothermie est réglementée par le Code minier qui considère comme des mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent. Le Code minier distingue la géothermie Haute Température (plus de 150 °C) et Basse Température (moins de 150 °C). Les installations de géothermie nécessitent des autorisations de recherche et d'exploitation. Les installations de moins de 200 m de profondeur et des températures inférieures à 25 °C bénéficient d'une dérogation, celles-ci sont soumises à une simple déclaration. Ces dernières sont appelées « géothermie de minime importance ».

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

Les critères de la géothermie de minime importance sont :

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

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) sont encadrés comme suit :

- préalablement aux travaux de forage, l'activité géothermique répondant aux critères de la géothermie de la minime importance doit être déclarée. Cette démarche doit être réalisée

sur le téléservice dédié, accessible sur le site « géothermie-perspectives.fr » ;

- les forages doivent être réalisés par une entreprise qualifiée selon les conditions techniques prévues par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance ;
- la localisation d'un échangeur doit répondre aux prescriptions définies par l'arrêté relatif aux prescriptions générales applicables. En outre, selon la localisation de l'échangeur au regard de la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance, une attestation de compatibilité est jointe à la déclaration. Cela est notamment requis lorsque le projet se situe dans la zone orange.

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

L'ensemble des informations nécessaires à ces démarches est disponible sur le site internet « geothermie-perspectives.fr ».

2.2. LES REGLEMENTATIONS TERRITORIALISEES A PRENDRE EN CONSIDERATION

Les forations envisagées dans le cadre de cette géothermie 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 SDAGE et les SAGE ainsi que les périmètres qui disposent de servitudes d'utilité publiques encadrant l'utilisation du sol et du sous-sol.

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

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

3. Méthodologie de réalisation de la carte réglementaire

3.1. MOTIVATIONS ET ADAPTATION REGIONALE

Au regard des forts enjeux existant en petite couronne parisienne (potentiel d'alimentation des bâtiments tertiaires et/ou de bâtiments de logements répondant à des normes énergétiques récentes), il est pressenti un fort développement de cette filière et des gains importants en termes de CO₂ évités et Tep substituées.

Cependant, des contraintes fortes existent ponctuellement (passés industriels, niveaux de nappes, roches évaporitiques) et la carte nationale, qui identifie des zones rouges, est jugée d'une précision insuffisante pour répondre aux attentes locales.

Enfin, il convient de souligner l'existence d'autres filières géothermiques en Île-de-France (alimentation de réseaux de chaleur par captage d'aquifères profonds tels que le Dogger), de telle sorte qu'une gestion administrative simple exempte de contre-exemple est indispensable à l'émergence de la géothermie de minime importance.

Au regard de ces éléments, une déclinaison régionale de la cartographie réglementaire est jugée nécessaire.

3.2. METHODOLOGIE APPLIQUEE

La réalisation de la carte régionale suit la méthode dictée par le guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance mis au point par le MEEM, et prend en considération les caractéristiques du sous-sol et des phénomènes redoutés pouvant être rencontrés lors de travaux de forage des échangeurs géothermiques de minime importance.

Le travail à l'échelle régionale doit permettre de prendre en compte la « relative bonne connaissance » du sous-sol francilien (de nombreuses bases de données étayées par de nombreuses investigations et travaux souterrains). Ainsi, la DRIEE a souhaité que la cartographie régionale soit réalisée selon une maille de 100X100 m en lieu et place de la maille de 500X500 m préconisée dans la méthodologie nationale. Ce choix conduit à un effet de zoom d'un coefficient 25. À l'échelle du territoire de la zone d'étude, le territoire est ainsi décomposé en 1.230.075 mailles de 10.000 m².

Les phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux (de type affaissement, mouvement de terrain, pollutions...) susceptibles d'être rencontrés par la réalisation d'un projet de géothermie de minime importance ont été identifiés. Pour chaque phénomène :

- le phénomène redouté est décrit et caractérisé par des niveaux aléas (faible, moyen, fort) lorsque les cartes d'aléas existent ou en termes de probabilité d'occurrence (susceptibilité) en l'absence d'une carte de l'aléa ;
- une valeur est attribuée à chaque niveau ;

- un facteur aggravant est ensuite attribué en fonction de son impact potentiel, ce facteur pouvant être différent selon la technique d'exploitation géothermique employée : l'échangeur fermé ou l'échangeur ouvert ;
- la disponibilité des données utilisées est précisée.

La carte révisée, appliquée à la région Ile de France, se compose de six cartes, car elle distingue pour chaque type d'échangeur (échangeur fermé, échangeur ouvert) trois intervalles de profondeur : 10-50 mètres, 10-100 mètres, 10-200 mètres.

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

Les phénomènes retenus sont :

- phénomène d'affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques
- phénomène d'affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines)
- phénomène de pollution
- phénomène lié à l'artésianisme
- phénomène de mise en communication d'aquifères
- phénomène de remontée de nappe

Dans le cas de la région Île-de-France, pour les phénomènes « affaissement/effondrement » et « pollution », les enjeux et facteurs préjudiciables se situent majoritairement à de faibles profondeurs (moins de 50 m). En conséquence, il n'a pas été jugé nécessaire de distinguer les susceptibilités par classes de profondeur : la susceptibilité de la tranche superficielle s'imposera donc aux classes plus profondes.

Le phénomène « d'affaissement/effondrement lié aux cavités minières » n'a pas été jugé pertinent du fait d'une part que le SIG Mines ne fait apparaître que des exploitations pétrolières profondes et d'autre part, que les zones de stockage de gaz sont déjà caractérisés par leur périmètre de servitudes.

De même, le phénomène « mouvements de terrain », à l'échelle choisie, ne semble pas pouvoir être déconnecté en Ile-de-France du phénomène « d'affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) » et n'a pas fait l'objet d'un traitement séparé, en accord avec le comité de pilotage.

Les éléments qui alimentent chacune des couches identifiant un phénomène particulier sont cotés en fonction de leur niveau d'aléa/susceptibilité vis-à-vis des travaux de forage à exécuter.

Une valeur de pondération, fonction de l'intensité des phénomènes redoutés (affaissement, effondrement, pollution...) pour la technique considérée (SGV ou système sur nappe), appelé facteur aggravant a ensuite été attribuée à chacun des phénomènes identifiés.

Le tableau de synthèse Ile de France avec les cotations proposées à chaque phénomène décrit dans l'analyse multicritère est présenté ci-après, par type d'échangeur.

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa										Facteur aggravant		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
1	Evaporites	0	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	6	10
2	Cavité (nm)	0	1	2	3	-	5	-	7	-	-	-	2	2
3	Cavité minière	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	MVT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Poll. SOL et EAU	0	1	-	-	4	-	6	-	-	-	10	3	3
6	Artésianisme	0	-	-	3	-	-	-	7	-	-	-	2	4
7	Comm. Aquif	0	1	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4	4
8	Remontée nappe	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	0

Valeur résultante par maille de 100 x 100 m :
 \sum (niveau d'aléa x facteur aggravant)



Illustration 3 - Les phénomènes redoutés et les facteurs aggravants utilisés pour la cartographie réglementaire régionale.

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

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

4. Fiches des phénomènes redoutés

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

4.1.1. Description du phénomène et occurrences

Il s'agit d'affaissement voire d'un effondrement ou une surrection des terrains de surface lié soit à la dissolution d'un niveau d'évaporite, soit au gonflement de ce niveau en 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.

a) Généralités

L'analyse et le traitement engagés des données font suite au travail effectué par le BRGM en 2014 (Robelin *et al.* - rapport BRGM/RP-63274-FR) sur le centre et l'Est de cette région. L'objectif est de réaliser, pour toute l'Ile-de-France, des cartes d'épaisseur de gypse pour 3 tranches de profondeurs (10-50 m, 10-100 m et 10-200 m) en s'appuyant sur les données des logs validés d'InfoTerre (LGV).

Les formations géologiques porteuses de gypse concernées pour ces profondeurs sont d'âge Cénozoïque. Il s'agit principalement des formations du Ludien (ou Priabonien : Marnes supragypseuses, Marnes et masses de gypse, Marnes infragypseuses), du Marinésien (4^{ème} masse de gypse) et du Lutétien supérieur à Bartonien inférieur (Marnes et Caillasses) (Illustration 4). du Ludien (ou Priabonien : Marnes supragypseuses, Marnes et masses de gypse, Marnes infragypseuses), du Marinésien (4^{ème} masse de gypse) et du Lutétien supérieur à Bartonien inférieur (Marnes et Caillasses) (Illustration 4). Les formations du Sannoisien, premières formations de la série dans lesquelles le gypse peut être rencontré lors d'un forage en Ile-de-France (Argiles vertes notamment), ont été prises en compte dans le calcul des épaisseurs de gypse, bien que les niveaux gypseux qu'elle contient ne soient pas épais.

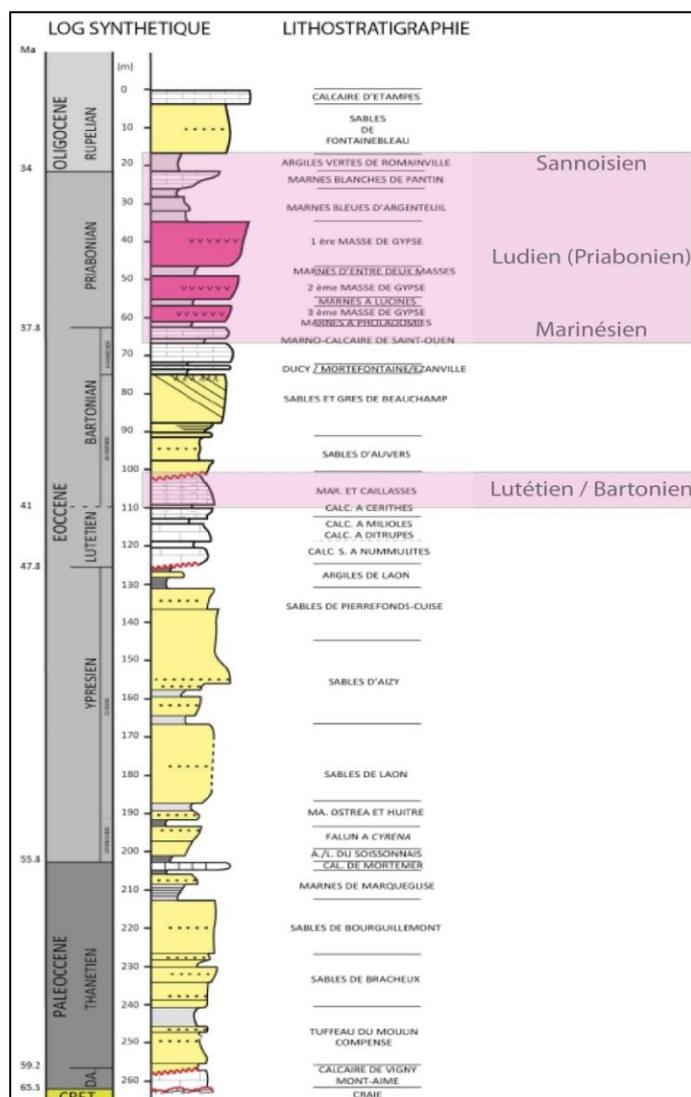


Illustration 4 - Les principales formations porteuses de gypse dans la série tertiaire du bassin de Paris (modifié d'après Briais, 2016).

b) Données utilisées

En Ile-de-France, la base de données des LGV compte environ 5400 forages. Certains de ces logs ont été révisés grâce aux travaux récents de la thèse de Briais (2016) qui a porté sur la révision de l'architecture sédimentaire des formations géologiques du Tertiaire du bassin de Paris. Grâce à la méthodologie de corrélation des diagraphies de forages (corrélation des surfaces-temps par la méthode de stratigraphie-séquentielle), l'architecture sédimentaire des formations géologiques d'environ 300 forages a été mise en cohérence en tenant compte des déformations tectoniques du bassin au cours des temps géologiques. Les résultats ont parfois permis de réattribuer des noms de formations géologiques dans certains forages (ex. : calcaires initialement codés en « Calcaire de St-Ouen » recodés en « Calcaires de Champigny »). L'illustration 5 présente la répartition des 300 forages de référence de la thèse de Briais (en bleu), des autres LGV disponibles (en orange) et de la zone d'étude du modèle réalisé en 2014 (en noir).

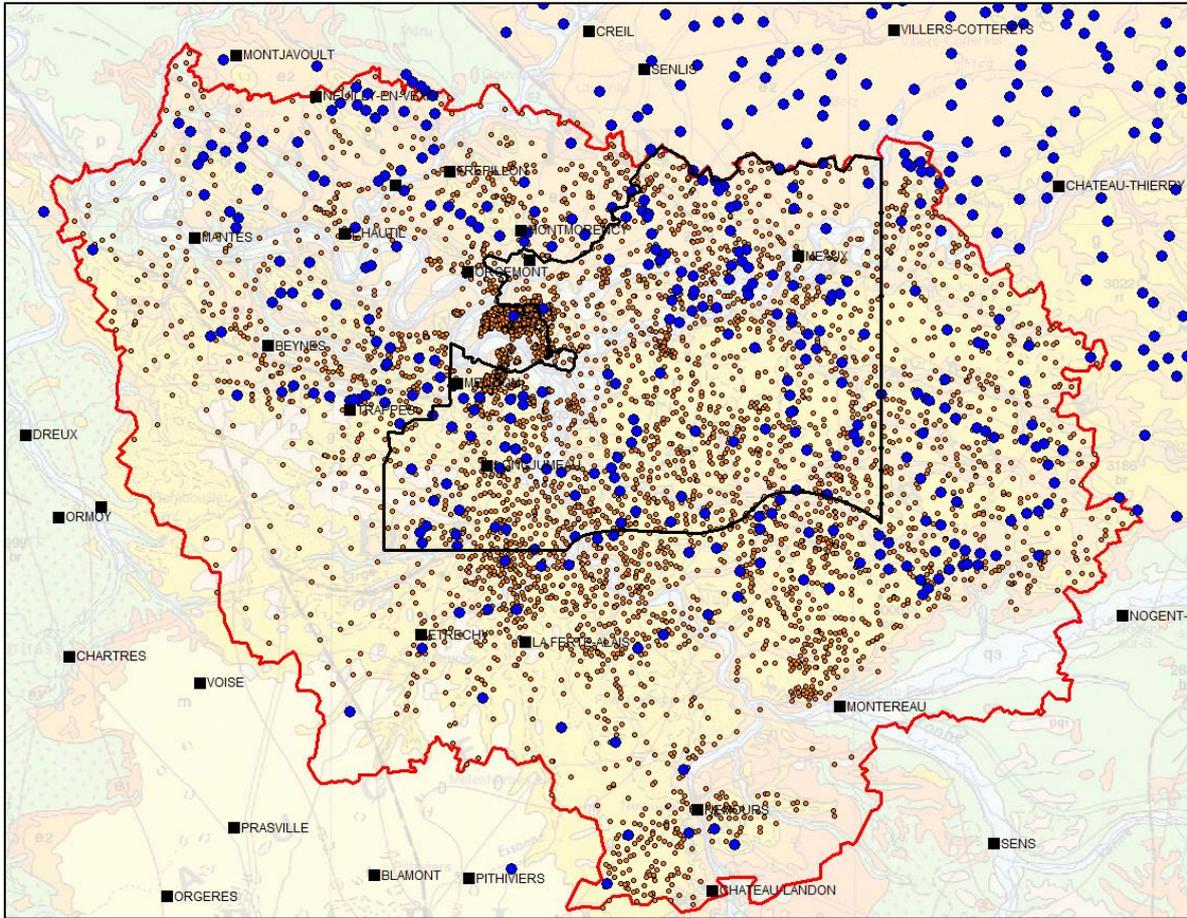


Illustration 5 - Répartition des LGV disponibles en Ile-de-France (en orange) et des forages de référence de la thèse de Briais (en bleu) utilisés pour le calcul des épaisseurs de gypse. En noir : zone d'étude du modèle BRGM de 2014. En rouge : limite du modèle réalisé dans ce travail (Ile-de-France).

Les données des LGV synthétisent, sous forme d'un log géologique numérique, les informations sur l'âge et la lithologie des formations rencontrées en forage. En ce qui concerne la lithologie « gypse », il est important de noter qu'il existe plusieurs types de descriptions, liées à la nature même du gypse : gypse, marne gypseuse, argilite gypseuse, grès gypsifère, dolomie gypsifère, etc. L'illustration 6 présente un exemple de LGV où le gypse est présent sous 2 formes : soit sous forme de banc massif (figurés roses), soit sous forme diffuse dans des marnes (figurés marron).

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie
52.60	Formation du Gypse, Première masse		Gypse; minces niveaux de marne argileuse à la base	Priabonien
54.00	Marnes d'entre-deux masses		Argile marneuse, feuilletée	
54.80			Marnes argileuses à gypse	
55.40			Argile marneuse, feuilletée	
57.00	Formation du Gypse, Deuxième masse		Gypse	
57.30			Argile marneuse, feuilletée	
			Gypse	

Illustration 6 - Exemple d'une partie de la série du gypse Ludien (Priabonien) d'un LGV. Les codages utilisés dans la modélisation sont tirés de la colonne « Lithologie ».

Lors du calcul des épaisseurs de gypse, il a été décidé de séparer le gypse en 2 grandes familles :

- Le gypse bien défini : la description du forage est précise et permet de repérer tous les bancs ou niveaux de gypse, indépendamment des autres lithologies.
- Le gypse diffus / mal défini : la description du forage est sommaire et il n'est pas possible de dire s'il existe des niveaux de gypse distincts ou si celui-ci est présent sous forme diffuse (codage « marne gypseuse », « argile gypseuse », « argilite gypseuse », « grès gypsifère », « dolomie gypseuse »).

Cette distinction a permis de quantifier et de distinguer, pour chaque forage, le gypse le plus susceptible de créer des désordres lors de sa dissolution (gypse bien défini/décrit en bancs massifs) du gypse présentant un risque incertain ou faible (gypse mal défini/diffus).

Afin de s'assurer que le codage des niveaux de gypse dans les LGV était le plus précis possible, une partie des forages contenant le code « gypse » a été vérifiée et parfois corrigée en se basant sur les forages de référence de la thèse de Briaux. Les cartes paléogéographiques réalisées pour le Ludien (Briaux) et pour le Lutétien (rapport BRGM de Robelin *et al.*, 2014 et Synthèse bassin de Paris, 1980) ont également permis de cibler les zones à contrôler en priorité, à savoir les parties nord, est et centrale de l'Île-de-France. Les Illustration 7 et Illustration 8 montrent la répartition des LGV qui ont été vérifiés (carrés verts : forages vérifiés et retenus dans le modèle ; carrés rouges : forages non retenus) et des LGV contenant l'information « gypse » (ronds roses) par rapport aux limites paléogéographiques du gypse ludien (Illustration 7) et lutétien (Illustration 8). Les points noirs sont les LGV qui n'ont pas été vérifiés.

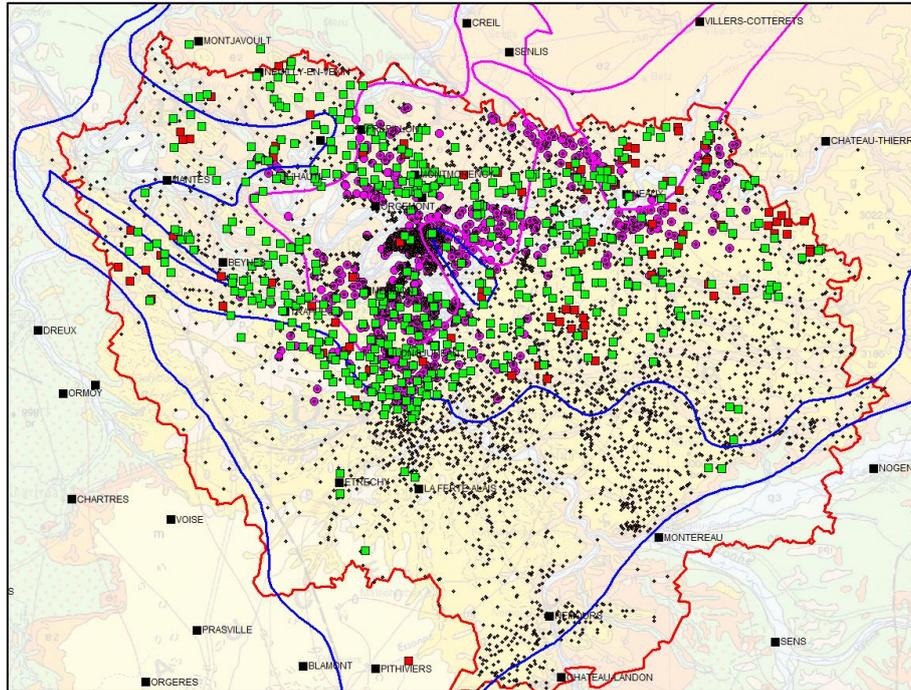


Illustration 7 - Localisation des LGV vérifiés au 23-05-2017 par rapport à la limite paléogéographique des lagunes de gypse LUDIEN (en rose). La limite bleue est la limite 100% calcaires représentant la limite d'extension des Calcaires de Champagne. Thèse Briais (2015).

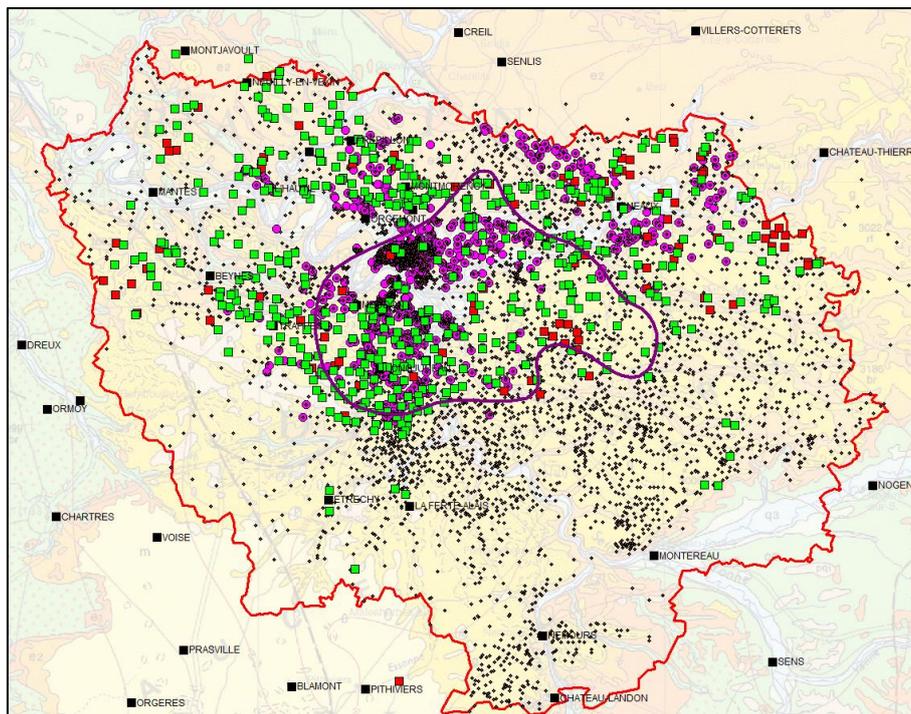


Illustration 8 - Localisation des LGV vérifiés au 23-05-2017 par rapport à la limite paléogéographique des lagunes de gypse LUTETIEN (en violet-marron) de Robelin et al. (2014 - tiré de la Synthèse bassin de Paris de 1980).

Les cartes d'épaisseur présentées à ce jour ont donc été réalisées en prenant en compte 459 LGV vérifiés (carrés verts des Illustration 7 et Illustration 8), 4600 LGV non vérifiés

(points noirs des Illustration 7 et Illustration 8) et en éliminant 47 LGV de mauvaise qualité (carrés rouges : manque d'information géologique fiable). Le contrôle qualité effectué sur les forages a pu être réalisé dans le cadre et avec le financement du projet LOGISO (projet de service public financé par le BRGM).

c) Méthodologie

La méthodologie de réalisation des cartes d'épaisseur cumulée de gypse a été effectuée avec le logiciel GDM-Multilayer (<http://gdm.brgm.fr/>). Les résultats de cette méthode intègrent :

- **les tranches de profondeurs à considérer** : selon les recommandations issues du « Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires » (rapport du Ministère de Juillet 2015), le gypse doit être distingué pour 3 tranches de profondeurs : 10-50m, 10-100m et 10-200m. Afin d'avoir des données encore plus précises, nous avons réalisé les calculs pour 4 tranches :
 - 0-25m ;
 - 25-50m ;
 - 50-100m ;
 - 100-200m.

- **le type de gypse décrit en forage** :
 - Bien défini ou pur ;
 - Mal défini ou diffus.

- **la formation géologique (ou l'ensemble de formation) dans laquelle on trouve le gypse** :
 - Formations géologiques du Ludien (ou Priabonien), du Sannoisien et du Marinésien : codage « **LPSM** » dans GDM-Multilayer ;
 - Formation géologique des Marnes et Caillasses : codage « **CAIL** » dans GDM-Multilayer.

En combinant ces différentes informations, 16 grilles d'épaisseur de gypse ont été réalisées (Illustration 9).

## EPGY-PUR_000-25m_CAIL	## EPGY-DIFFUS_000-25m_CAIL
## EPGY-PUR_000-25m_LPSM	## EPGY-DIFFUS_000-25m_LPSM
## EPGY-PUR_025-50m_CAIL	## EPGY-DIFFUS_025-50m_CAIL
## EPGY-PUR_025-50m_LPSM	## EPGY-DIFFUS_025-50m_LPSM
## EPGY-PUR_050-100m_CAIL	## EPGY-DIFFUS_050-100m_CAIL
## EPGY-PUR_050-100m_LPSM	## EPGY-DIFFUS_050-100m_LPSM
## EPGY-PUR_100-150m_CAIL	## EPGY-DIFFUS_100-150m_CAIL
## EPGY-PUR_100-150m_LPSM	## EPGY-DIFFUS_100-150m_LPSM

Illustration 9 - Liste des grilles d'épaisseur de gypse (EPGY) modélisées sous GDM-Multilayer.

Afin de réaliser des cartes d'épaisseurs, les calculs d'épaisseur de gypse ont été réalisés en prenant en compte l'ensemble des 5059 LGV disponibles, vérifiés ou non vérifiés. Il est important de noter que certains forages ne traversent pas toute la tranche à considérer (0-25 m, 25-50 m, 50-100 m ou 100-150 m). L'illustration 10 présente les différents cas de figures d'occurrence de gypse en forage (selon leur profondeur). L'épaisseur de gypse peut ainsi être sous-estimée par rapport à l'épaisseur de gypse réellement présente dans la tranche.

Les données de la carte de l'aléa évaporites ont bien été calculées pour une profondeur de 10-150 m. Celles-ci ont ensuite été affectées à la tranche 10-200 m de la carte réglementaire. En effet, les observations ont montré qu'il n'existait pas de niveaux géologiques contenant des évaporites au-delà de 150 m en Ile de France.

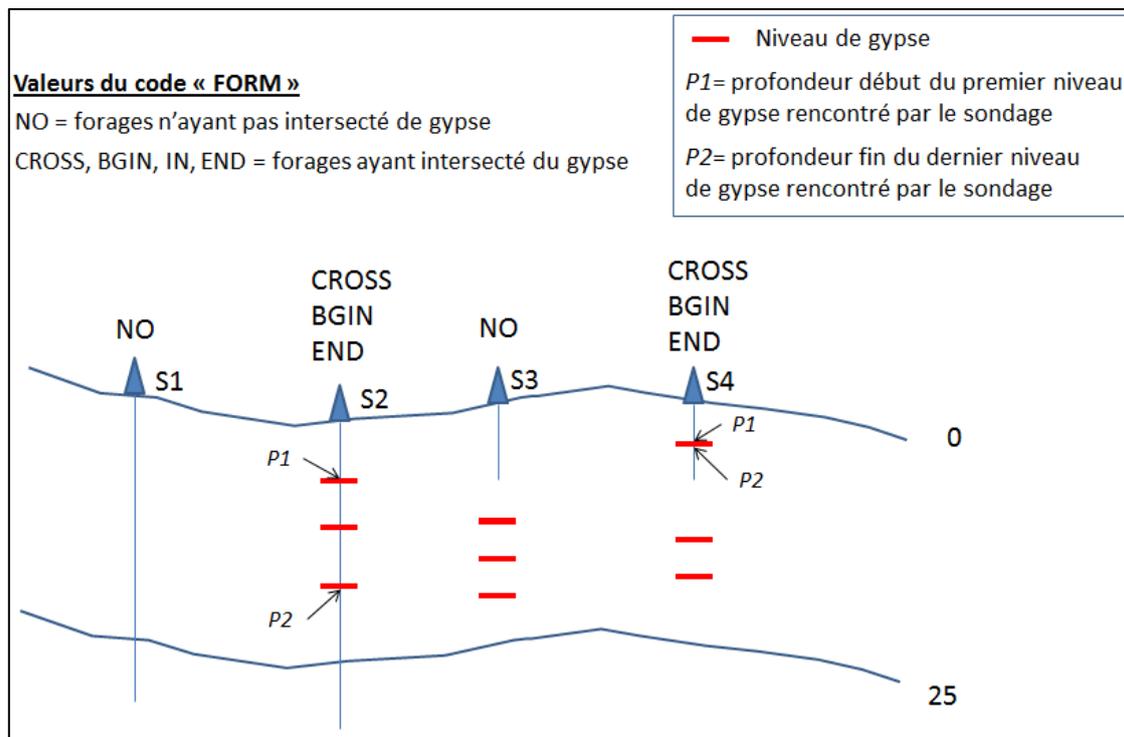


Illustration 10 - Schéma illustrant le fait que les forages utilisés dans le calcul des épaisseurs ne rencontrent parfois pas les niveaux de gypse (au niveau des forages S3 et S4, le risque est donc sous-estimé).

Dans l'exemple présenté sur l'illustration 10, les forages S3 et S4 ne traversent pas l'intégralité de la tranche (ici tranche 0-25 m). Le forage S3 n'a pas rencontré de gypse, mais il est possible que du gypse soit encore présent sous le forage. Le forage S4, pour sa part, traverse un niveau de gypse mais il est possible qu'il existe encore d'autres niveaux de gypse sous la fin de forage. Dans les deux cas les épaisseurs de gypse intersectées par les forages sont des épaisseurs minimales.

Pour évaluer le risque de sous-estimation de l'épaisseur totale de gypse dans la tranche, on calcule le pourcentage de tranche intersectée par le forage. Si le forage traverse 100 % de la tranche (cas des forages S1 et S2), on est certain d'avoir identifié la totalité du gypse dans la tranche. Par contre s'il ne traverse qu'une faible proportion de la tranche de terrain, l'épaisseur exacte de gypse dans la tranche est connue de manière très incertaine, sauf si la formation gypsifère considérée est entièrement traversée (paragraphe suivant).

En plus de la prise en compte de l'épaisseur de tranche traversée, il faut tenir compte de la succession (âge) des terrains rencontrés dans le forage. Par exemple si on s'intéresse au gypse des Marnes et Masses de gypse du Ludien et que les sondages S3 et S4 se terminent dans l'Auversien, on est certain d'avoir identifié toutes les occurrences de gypse ludien car celles-ci sont situées au-dessus de l'Auversien. En conséquence même si les forages S3 et S4 n'ont pas traversé toute la tranche, l'épaisseur totale de gypse ludien a dans ce cas été correctement estimée (ce qui ne sera pas le cas si on s'intéresse aux Marnes et Caillasses).

Pour chaque grille fournie (Illustration 9), le logiciel GDM-Multilayer a calculé, pour chaque forage, le pourcentage de la tranche traversée. Cette information pourrait être représentée cartographiquement afin de vérifier les zones où l'épaisseur de gypse aurait pu être sous-estimée (forage trop peu profonds). Les informations sur la profondeur du premier niveau de gypse (P2 de l'illustration 10) et du dernier niveau de gypse (P2 de l'illustration 10) sont également disponibles dans des bases XLS et ACCESS.

La méthodologie GDM-Multilayer est fournie en annexe 1.

d) Résultats

Afin d'avoir une première idée de la profondeur des niveaux de gypse rencontrés en forages en Ile-de-France, nous avons effectué, en décembre 2016, une modélisation de la profondeur du toit des 2 formations porteuses de gypse (Illustration 11 : toit du Ludien ; Illustration 12 : toit des Marnes et Caillasses).

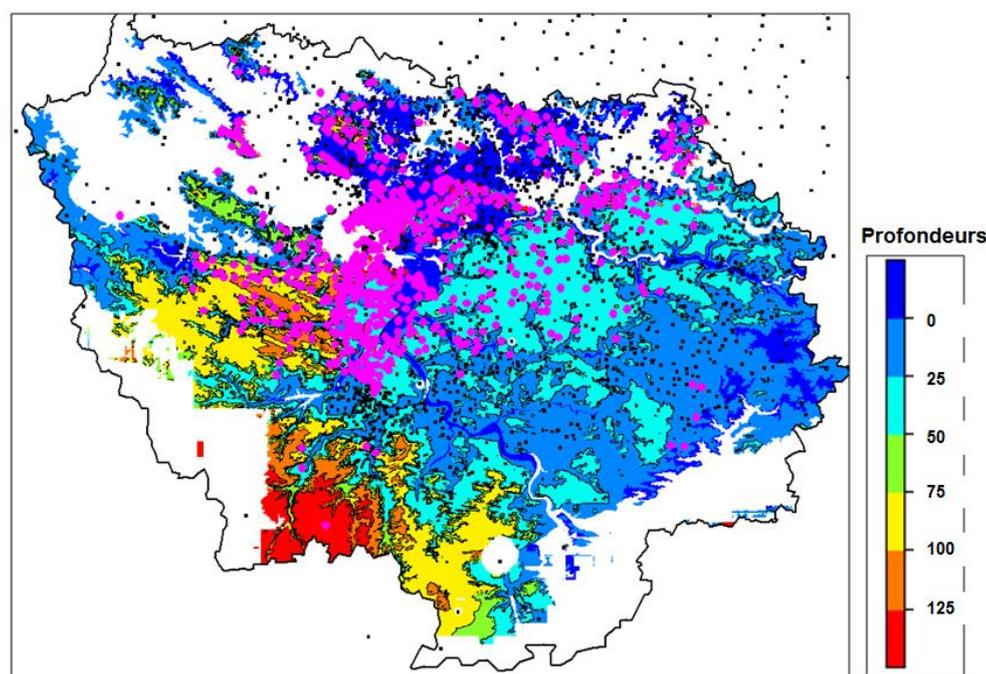


Illustration 11 - Modélisation du toit du Ludien d'Ile-de-France et localisation des logs validés contenant l'information « gypse ».

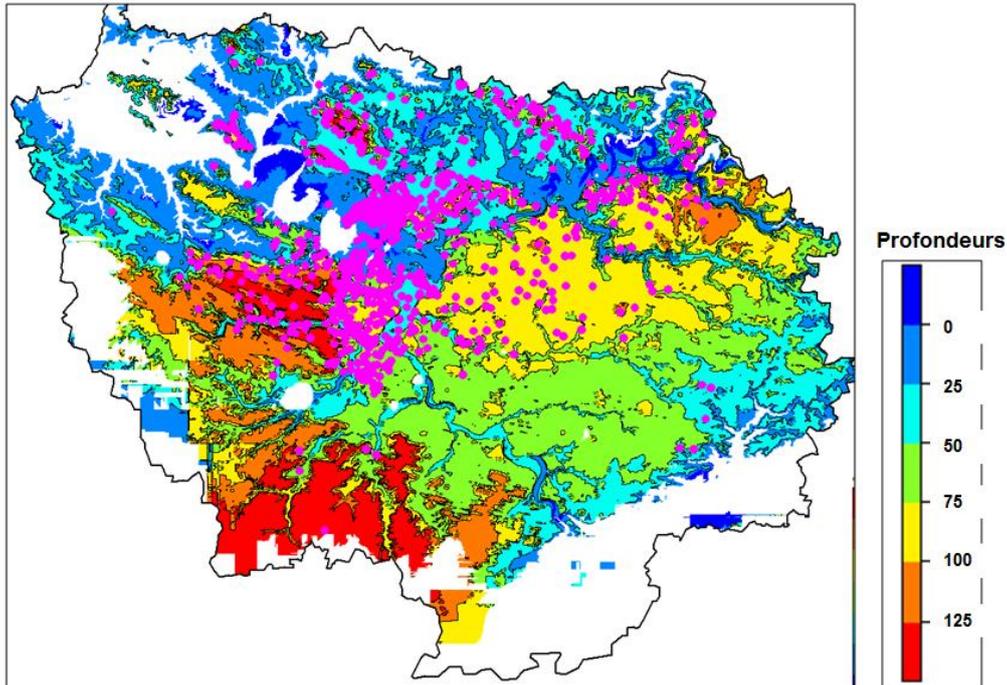


Illustration 12 - Modélisation du toit du Lutétien d'Ile-de-France et localisation des logs validés contenant l'information « gypse ».

Les cartes d'épaisseurs cumulées de gypse ont été réalisées en intégrant les limites d'extension de la base de données hydrogéologique « BDLISA » afin de limiter l'extrapolation.

Ces limites sont :

- pour le Ludien : utilisation de la limite des Marnes infragypseuses.
- pour les Marnes et Caillasses : utilisation de la limite des Marnes et Caillasses.

Nous attirons l'attention sur le fait que ces cartes ont été réalisées avec les données disponibles et que les extrapolations effectuées par GDM-Multilayer ont pu engendrer de légères surépaisseurs de gypse, notamment lorsque l'on s'éloigne des données de forages. Les valeurs donnant une épaisseur de gypse < 0,1 m ont été supprimées.

L'illustration 13 représente la superposition des 4 cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans les formations « LPSM » (Ludien-Priabonien-Sannoisien-Marinésien ; voir Illustration 4) pour les 4 tranches de profondeur. La limite noire représente la limite BDLISA des Marnes infragypseuses utilisée pour limiter les calculs.

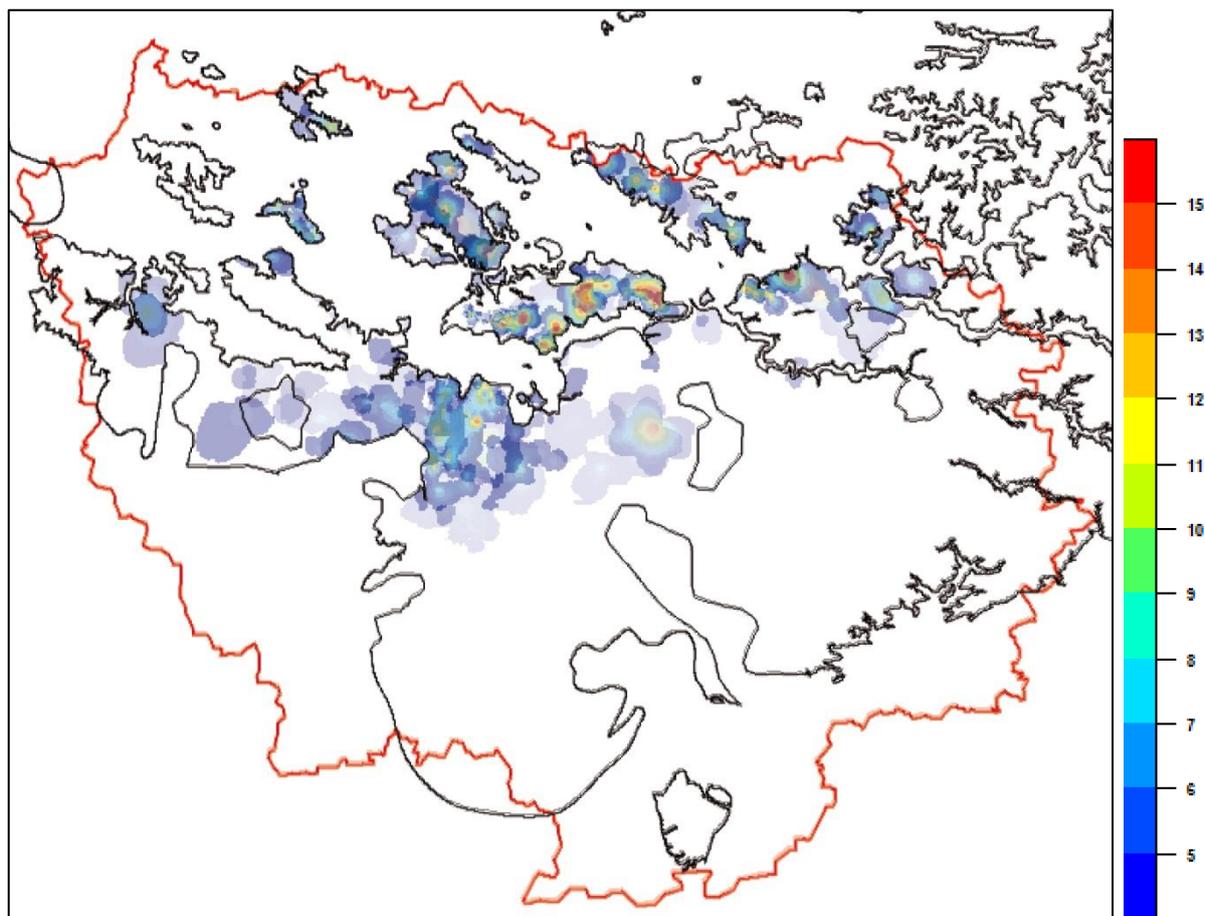


Illustration 13 - Superposition des cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans les formations du Sannoisien, Ludien et Marinésien (toutes tranches d'épaisseur) et limite BDLISA utilisée (en noir). L'échelle d'épaisseur représentée varie de 0 à 15 m.

L'illustration 14 représente la superposition des 4 cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans la formation « CAIL » (Marnes et Caillasses) pour les 4 tranches de profondeur. La limite noire représente la limite BDLISA des Marnes et Caillasses utilisée pour limiter les calculs. La modélisation montre que des épaisseurs non négligeables de gypse sont présentes sur les bordures Ouest et Est de l'Île-de-France (au-delà de la limite proposée dans la Synthèse bassin de Paris de 1980).

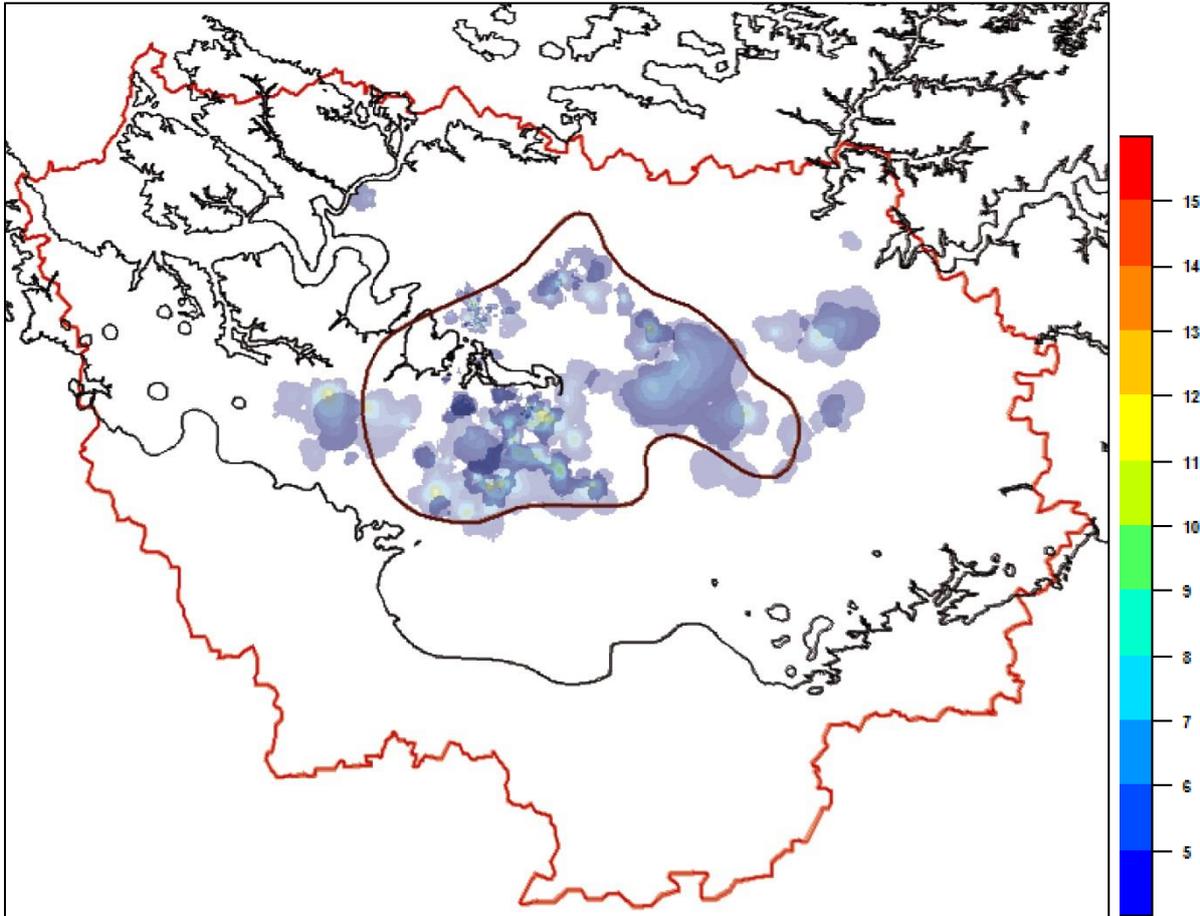


Illustration 14 - Superposition des cartes d'épaisseurs de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses (toutes tranches d'épaisseur), limite d'extension de la zone lagunaire lutétienne (en marron ; issue de la synthèse bassin de Paris de 1980 et de Robelin et al. 2014) et limite BDLISA utilisée (en noir). L'échelle d'épaisseur représentée varie de 0 à 15 m.

Les cartes d'épaisseurs détaillées sont présentées en annexe 2.

4.1.2. Qualification du phénomène

La qualification du phénomène affaissement/surrection lié aux formations évaporitiques s'est appuyée sur la méthode développée par l'INERIS sur les communes de Sevrans, Villepinte et Tremblay dans le département de la Seine-Saint-Denis (rapport DRS-13-130829-04972B, avril 2014). Cette méthode applique un coefficient de prédisposition aux phénomènes de mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse en profondeur selon le ratio **épaisseur de gypse / épaisseur de couverture** comme indiqué sur l'illustration 15.

Cinq niveaux de prédisposition ont été définies :

- Niveau 0 : prédisposition nulle ;
- Niveau 1 : prédisposition très peu sensible ;
- Niveau 2 : prédisposition peu sensible ;
- Niveau 3 : prédisposition sensible ;
- Niveau 4 : prédisposition très sensible.

- Masses de gypse du Ludien

Prédisposition à l'aléa « mouvements de terrain » lié à la dissolution du gypse		Contexte hydraulique	
		Potentiel de dissolution limité	Potentiel de dissolution avéré
Épaisseur cumulée de gypse ϵ	$e < 1 \text{ m}$	Nulle	Nulle
	$1 \text{ m} \leq e < 3,5 \text{ m}$	Peu Sensible	Sensible
	$e \geq 3,5 \text{ m}$	Sensible	Très Sensible

Tableau 6 : qualification de la prédisposition basée sur les critères principaux

- Niveaux gypseux du Lutétien

Prédisposition à l'aléa « mouvements de terrain » lié à la dissolution du gypse		Contexte hydraulique	
		Circulation conforme à la piézométrie régionale	Circulation privilégiée d'eau (gradient élevé)
[Rapport] épaisseur cumulée de gypse / profondeur (e/p)	$e/p < 0,08$	Nulle	Nulle
	$0,08 \leq e/p < 0,2$	Très Peu Sensible	Peu Sensible
	$e \geq 0,2$	Peu Sensible	Sensible

Illustration 15 - Qualification de la prédisposition aux phénomènes de mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse en profondeur (méthode INERIS - 2014).

4.1.3. Cotation et cartographie de l'aléa « affaissement/surrection lié aux évaporites »

La susceptibilité du phénomène « affaissement/surrection lié aux niveaux évaporitiques » a été estimée pour les trois gammes de profondeur : 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m.

On présente ci-après les cotations affectées à chaque niveau d'aléa.

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa										Facteur aggravant		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
1	Evaporites	0	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	6	10

Rapport épaisseur / profondeur	Aléa	
$e/p = 0$	Nul	0
$e/p < 0,08$	Faible	1
$0,08 \leq e/p < 0,2$	Moyen	5
$e/p \geq 0,2$	Fort	7

Niveau d'aléa	Nul	Faible	Moyen	Fort
		0	1	5
Doublet (x6)	0	6	30	42
SGV (x10)	0	10	50	70

Illustration 16 - Cotation de l'aléa du phénomène « affaissement/surrection lié aux évaporites ».

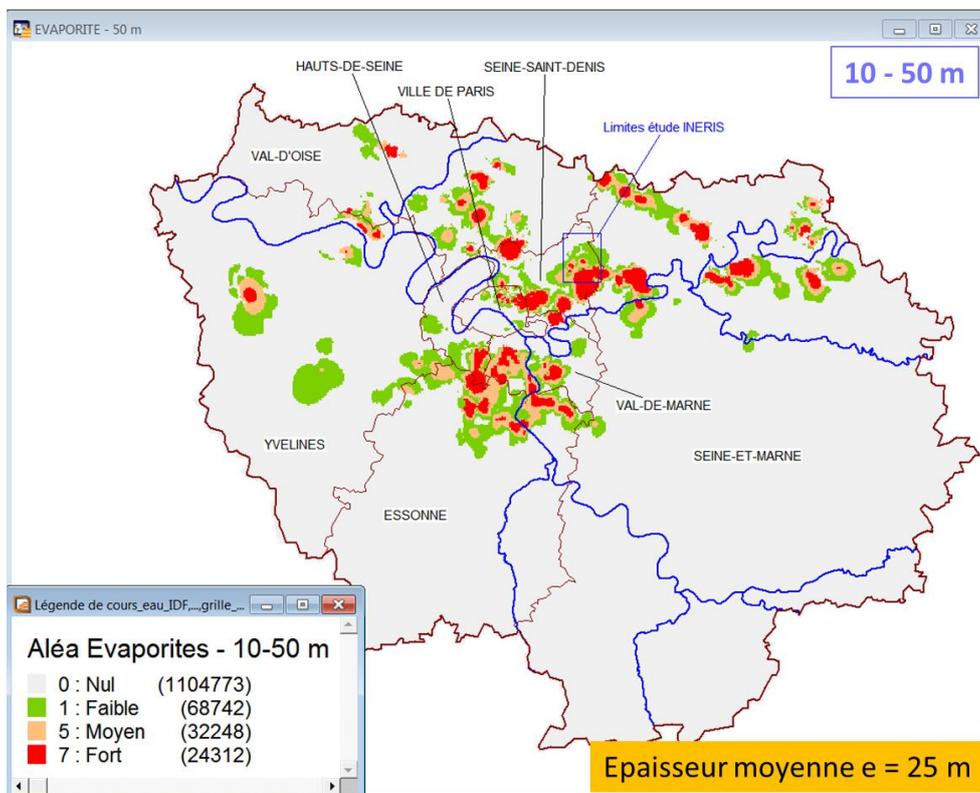


Illustration 17 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 50 m).

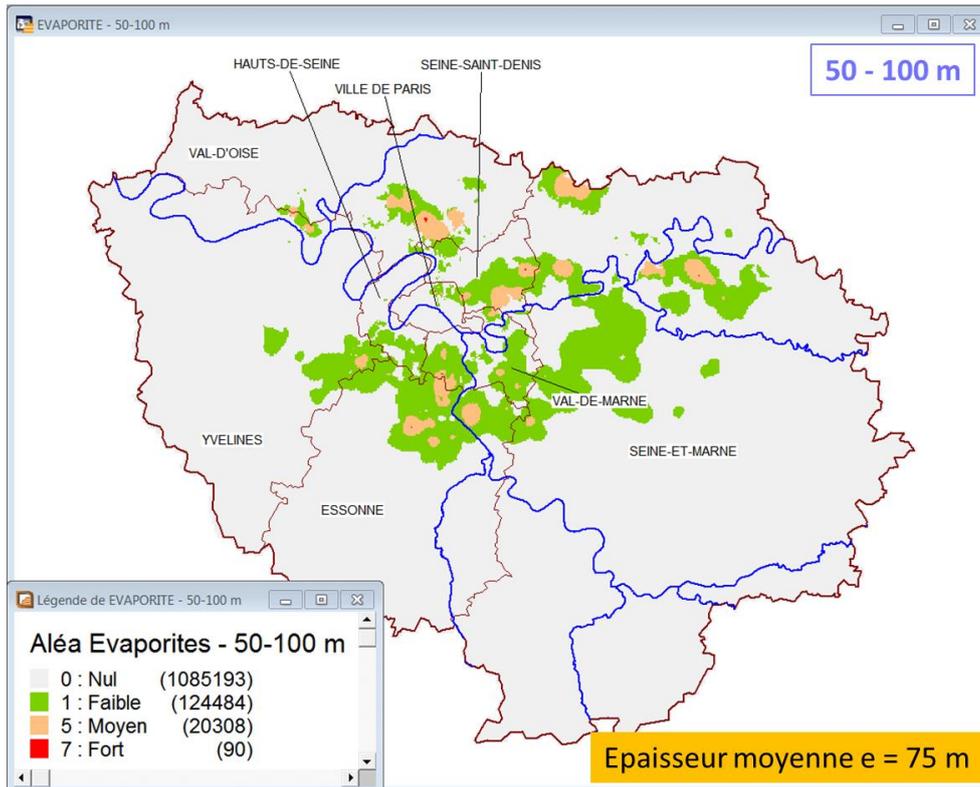


Illustration 18 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 100 m).

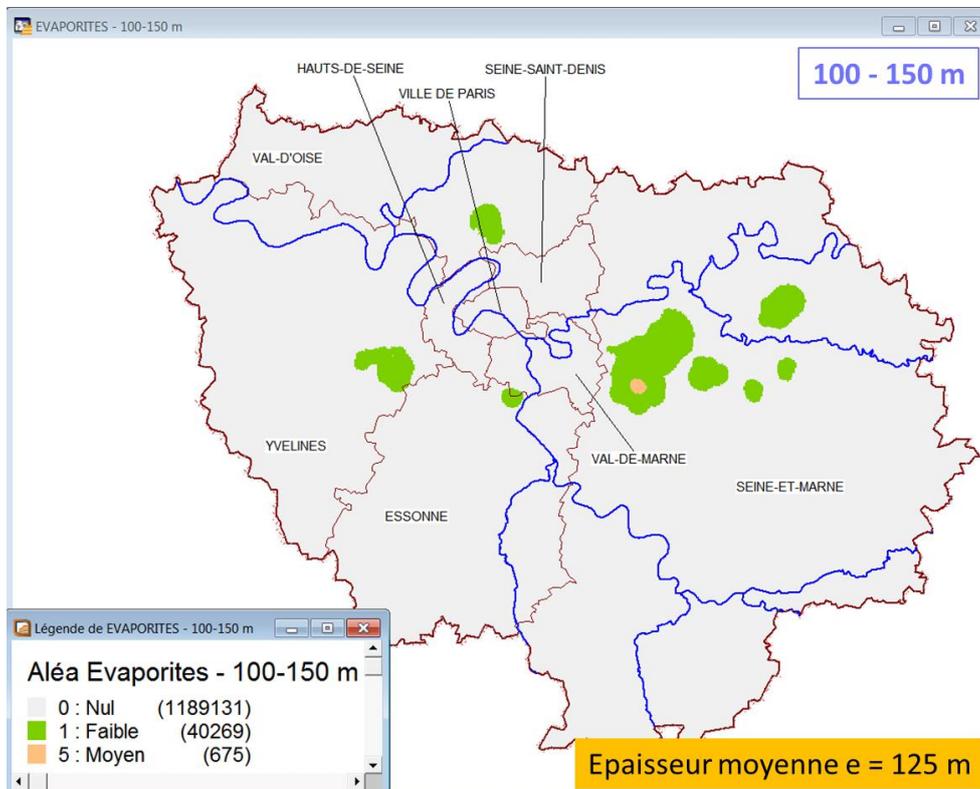


Illustration 19 - Carte de l'aléa évaporites (profondeur 10 à 150 m).

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

4.2.1. Description du phénomène et occurrences

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

4.2.2. Qualification du phénomène

Selon le guide méthodologique, les données à recenser sont par ordre de priorité :

- les cartes d'aléas existantes sur toute la région Ile de France. Sur la région Ile de France, il existe plusieurs types de cartographies :
 - les cartes d'aléas ou réglementaires des PPR,
 - les cartes d'aléas hors PPR,
 - des cartes d'aléas départementales à l'échelle du 1/50 000.
- les événements ponctuels recensés essentiellement à partir de la base de données du BRGM (Bdcavité).

Pour ce phénomène, ce n'est pas le niveau de l'aléa qui entre en jeu mais le type de phénomène, c'est-à-dire s'il s'agit d'un :

- effondrement localisé,
 - affaissement progressif,
 - mouvement résiduel.
- les formations sensibles au phénomène de la karstification (calcaires).

4.2.3. Données sources

En Île-de-France, l'existence de services dédiés à l'inventaire des cavités souterraines liées notamment aux anciennes extractions de matériaux s'est traduit par une structuration particulière de la donnée. En effet, sur les départements de Paris et de la petite couronne (92, 93 et 94), l'Inspection Générale des Carrières de la ville de Paris inventorie et cartographie les cavités souterraines. En grande couronne parisienne (78, 91 et 95), cette mission est réalisée par l'Inspection Générale des Carrières de Versailles (service du Conseil Départemental des Yvelines). Seul le département de la Seine et Marne n'est pas couvert par un service dédié à l'inventaire des vides souterrains.

En conséquence, pour les cavités (hors mines), la collecte de données a consisté à interroger directement les services en charge des territoires concernés.

Paris et petite couronne :

L'inspection Générale des Carrières nous a transmis en août 2014, une couche SIG (format shp) avec un contour correspondant à la fusion de l'ensemble des carrières connues, des terrains exposés à un risque de cavité et de l'enveloppe des zones d'aléa (Illustration 20).

Ce contour ne concerne pas les zones susceptibles d'être affectées par des phénomènes de dissolution du gypse qui sont traités par le BRGM et font l'objet d'une cartographie distincte au sein de l'Inspection Générale des Carrières de Paris.

Le contour fourni a été livré dans le système de projection Lambert 93. Le contour figuré est réputé valide à l'échelle du 1/20.000.

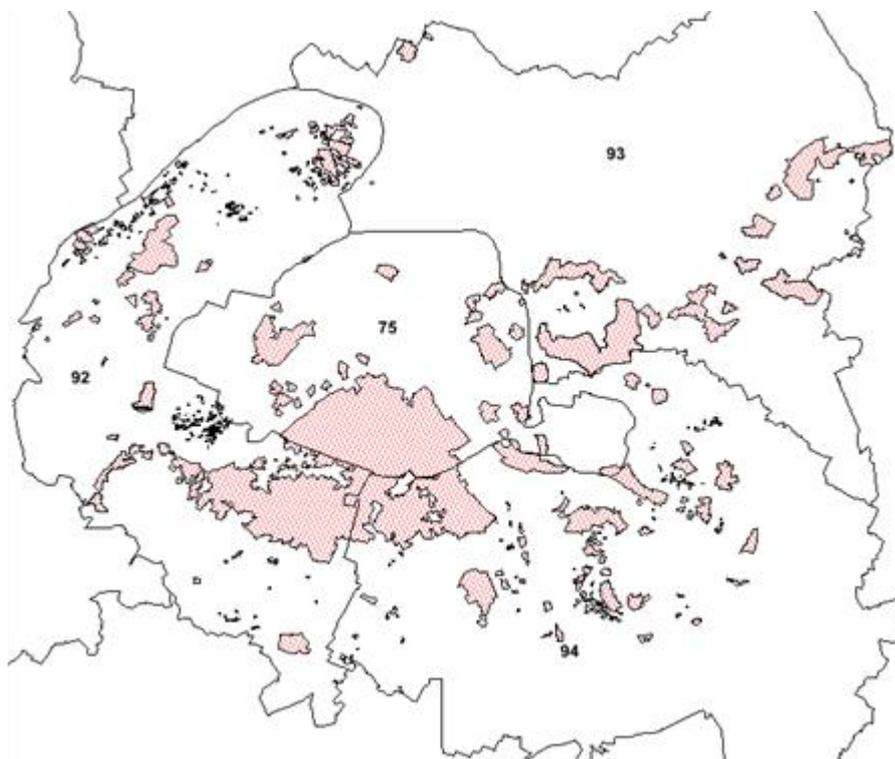


Illustration 20 - Répartition des cavités (hors mines) connues Paris et petite couronne (source IGC Paris)

Grande couronne (hors 77) :

Les données élaborées par l'Inspection Générale des Carrières de Versailles, nous ont été transmises par la DRIEE (SPRN - pôle risques et aménagement).

Les couches SIG fournies (1 par département) comprennent un contour individualisé pour chaque cavité (plusieurs contours peuvent exister sur une seule et même commune). Les données attributaires associées précisent la nature du matériau exploité, la valeur administrative du zonage, sa surface et la commune de rattachement.

De même que précédemment, les contours fournis ont été considérés valides à l'échelle du 1/20.000 (Illustration 21).

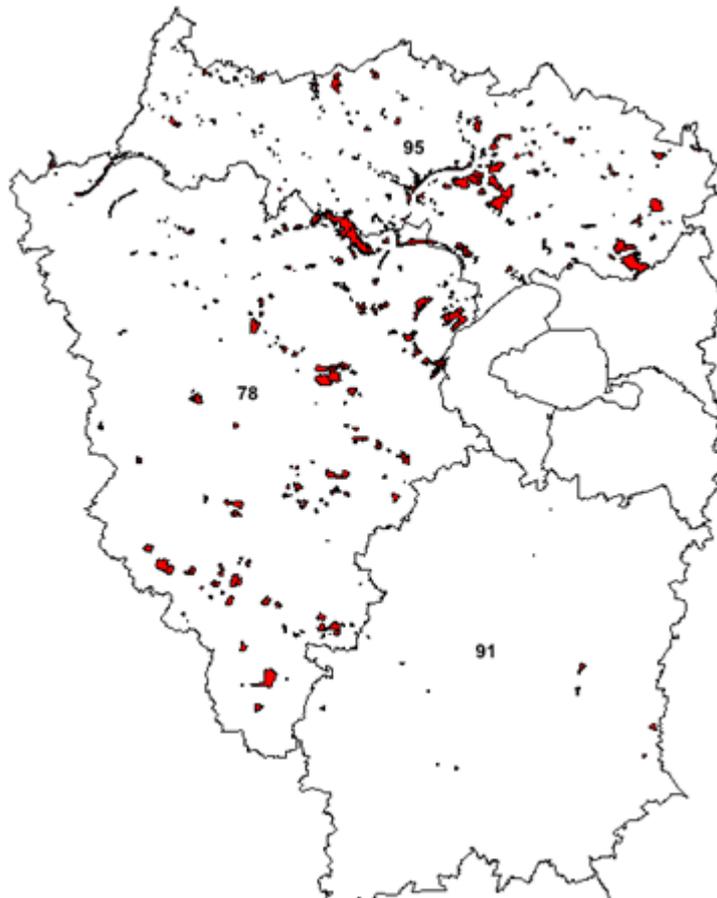


Illustration 21 - Répartition des cavités présentes sur les départements des Yvelines, de l'Essonne et du Val d'Oise, communiquées par la DRIEE (source IGC Versailles)

Département de la Seine-et-Marne

En l'absence de service dédié à la gestion des vides souterrains sur ce département, les données exploitées proviennent de l'inventaire réalisé, en 2007, conjointement par le BRGM et le LREP (actuellement DTer IdF du Cerema). Le travail réalisé à l'époque visait à inventorier les cavités souterraines connues au travers d'une enquête envoyée aux collectivités et aux organismes sachant. Cette base de données a été élaborée dans le cadre de l'inventaire national BDcavités afin de mémoriser de façon homogène l'ensemble des informations disponibles et de contribuer au porté à connaissance (Cf. méthodologie de la BDcavités).

Les données issues de l'enquête se présentent soit sous la forme de contours calés géographiquement lorsque les plans des anciennes carrières étaient disponibles (quelques carrières de gypse au Nord du département et des exploitations d'argile au Sud) soit sous forme de points correspondant aux entrées des cavités ou à leur centroïde approché (Illustration 22).

Les contours peuvent être considérés valides à l'échelle du 1/20.000. Les incertitudes de localisation des données ponctuelles sont précisées dans la base source.

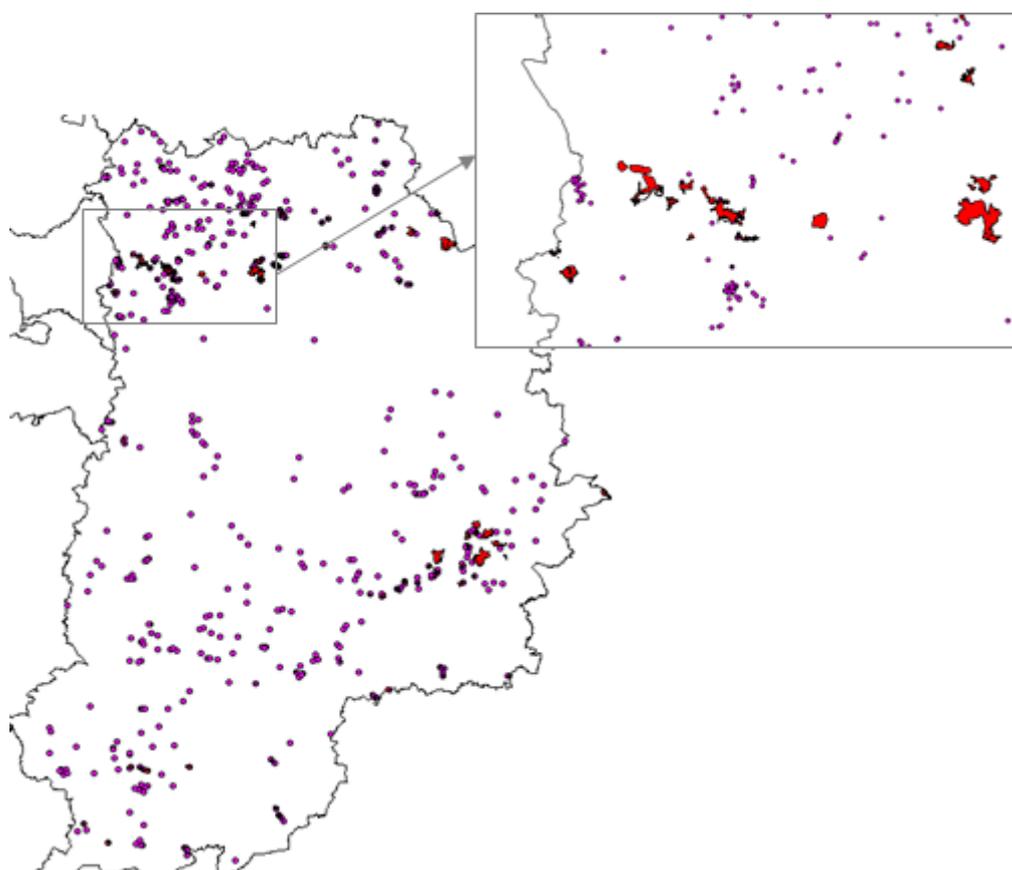


Illustration 22 - Localisation des données inventoriées sur la Seine-et-Marne

4.2.4. Méthodologie de traitement

Au regard de l'hétérogénéité des données sources deux approches distinctes ont été retenues :

Qualification de la susceptibilité des contours de cavités :

Au droit des contours fournis, la présence de vide est jugée avérée (cavité connue, aléa défini, désordres antérieurs ...), de plus au regard du contexte des cavités franciliennes, la probabilité de venu au jour de désordres peut être considérée comme très élevée sur la maille retenue pour l'étude (100mX100m).

En conséquence, il est retenu une susceptibilité très forte d'être confrontée à un phénomène d'effondrement, ce qui conduit à retenir une pondération de 7 pour ces contours.

Qualification de la susceptibilité des informations ponctuelles :

La démarche mise en œuvre s'appuie sur le principe proposé dans le guide de la méthodologie régionale.

L'incertitude attachée à chaque information ponctuelle a été prise en compte en créant un tampon (surface circulaire centré sur le point) d'un rayon égal à la précision de positionnement géographique du point augmenté de 50 m.

Ces surfaces étant délimitées, la qualification de la susceptibilité induite est appréciée en comptabilisant le nombre de surface (tampon) intéressant une maille donnée.

Cependant, dans la mesure où la dimension de la maille de référence a été modifiée, la pondération proposée dans le guide de la méthodologie régionale a été ajustée. En effet, le ratio de surface attaché au passage d'une surface de 25.000 m² à une surface 10.000 m² se traduit mathématiquement par une forte diminution de densité pour un même nombre de contours (tampons).

De plus, du fait du grand nombre de contours (tampons) induits par des cavités d'origine naturelle (karst) comptabilisés sur certains secteurs, nous avons jugés nécessaire d'introduire une classe supplémentaire par rapport à la trame proposée dans le guide.

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

La majeure partie des cavités souterraines liées à d'anciennes extractions de matériaux se situant dans la tranche de profondeur 0-50 m, l'aléa déterminé a été appliqué aux 3 tranches de profondeur considérées par la méthodologie (10-50, 10-100 et 10-200 m).

Le niveau d'aléa/susceptibilité du phénomène a été attribué selon la grille suivante :

Nombre de tampons comptabilisés par maille de 100X100	Niveau d'aléa/Susceptibilité du phénomène	Coefficient de pondération de la maille
1 et 2	Susceptibilité faible	1
3 et 4	Susceptibilité moyenne	2
5, 6 et 7	Susceptibilité forte	3
> ou = 8	Susceptibilité très forte	5

La synthèse des qualifications de susceptibilité et pondérations associées pour les deux configurations (contours connus et extrapolés sous forme de tampon) est donnée dans la grille ci-dessous (Illustration 23) :

Niveau d'aléa/Susceptibilité du phénomène	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Densité de contours extrapolés (tampons)	0	1	2	3	5
Contours connus					7

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa											Facteur aggravant	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
2	Cavité (nm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	2	2

Niveau d'aléa	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort
	0	1	2	3	5	7
Doublet (x2)	0	2	4	6	10	14
SGV (x2)	0	2	4	6	10	14

Illustration 23 - Cotation de l'aléa du phénomène « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) »

Les pondérations déterminées ci-dessus ont été appliquées aux mailles de la région Île-de-France : la maille se voit affectée du coefficient de susceptibilité le plus fort rencontré en un quelconque contour présent sur la maille (Illustration 24).

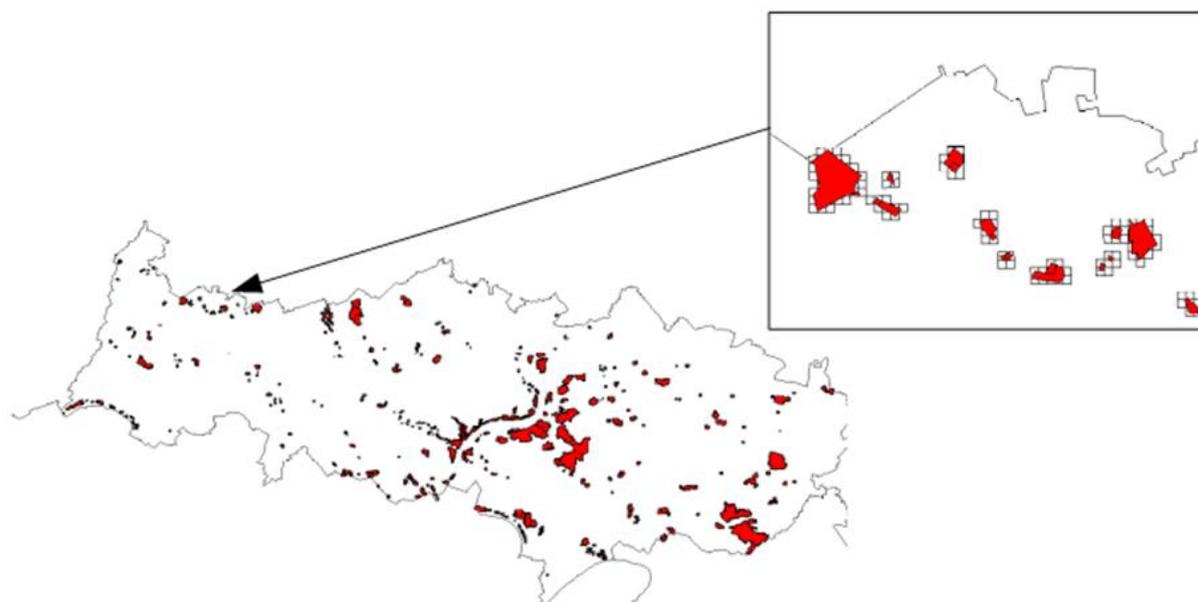


Illustration 24 - Impact des contours de cavités connues sur le maillage régional

La transcription à l'échelle régionale des différents contours et informations ponctuelles collectés donne lieu à la carte régionale ci-dessous (Illustration 25).

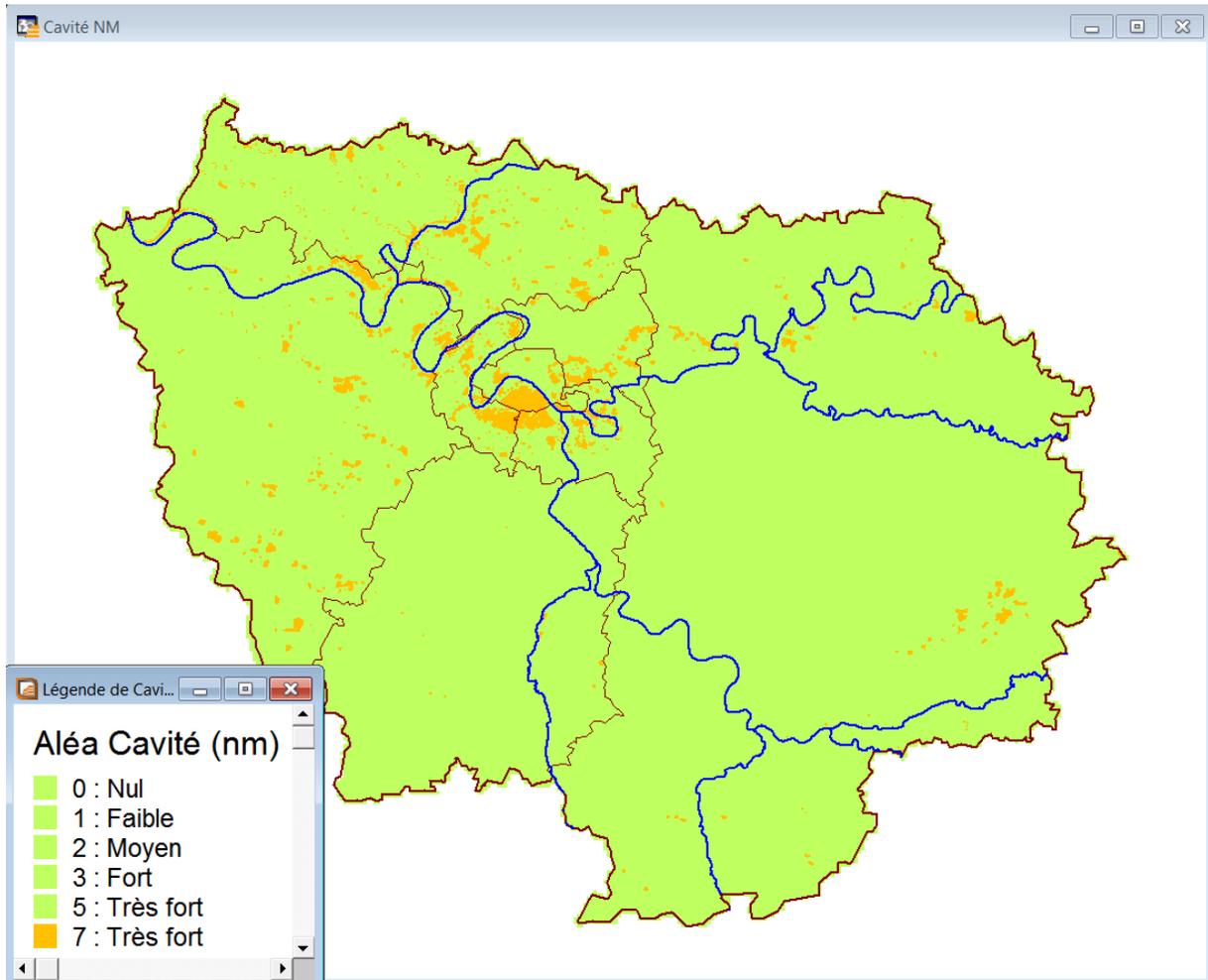


Illustration 25 - Carte de l'aléa « affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines) ».

L'examen de cette figure permet d'identifier :

- un tropisme des cavités d'origine anthropique par rapport à Paris : les extractions de pierre de construction ont été aménagées au plus près de la zone d'usage ;
- une disposition des cavités en cohérence avec les gisements : bassin argileux dans l'Est de la Seine et Marne, exploitations de gypse dans les buttes témoins disposées selon une direction Nord-ouest – Sud-est en partie nord de la région, extractions du Calcaire Grossier en partie Nord de la région et dans la vallée de la Seine où il se trouve proche de l'affleurement ;
- des zones karstiques générant des niveaux de susceptibilité moyenne au sein du plateau Briard et au nord de la Goëlle ;
- une répartition éparse de cavités en vallée de Chevreuse et au Nord du plateau beauceron clairement identifié dans les Yvelines mais pas ou peu retrouvées en Essonne : il est probable qu'il s'agisse d'un défaut de connaissance plus qu'une absence réelle de cavités.

4.3. PHENOMENE « POLLUTION DES SOLS ET DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE »

4.3.1. Données sources

Pour le phénomène de « pollution des sols et des nappes d'eau souterraines », le guide méthodologique préconise de prendre en compte la base BASOL (regroupant les sites et sols pollués appelant une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif) et de la croiser avec la BD-LISA (Base de données des Limites des Systèmes Aquifères) permettant d'identifier les aquifères potentiellement impactés.

Cependant, au niveau régional, les services de l'État (DRIEE) ont agrégé et consolidé les informations disponibles sur les sites et sols pollués sous la forme d'une base de données dédiée (Illustration 26) : la base de données des zones à risques de pollution des sols (et des nappes). Cette information étant jugée plus précise que les données nationales, elle a été retenue pour ce travail.

La base des zones à risques de pollution recense les activités industrielles existantes ou historiques sur lesquels la DRIEE a connaissance d'une pollution avérée ou non exclue. Chaque site est associé à un contour correspondant au périmètre du site industriel à l'origine de la pollution avérée ou potentielle. Ceci ne signifie pas que les pollutions sont restreintes à ce périmètre ou qu'inversement elles affectent l'intégralité du site. Cependant dans le cadre de cette étude et à défaut d'informations complémentaires, il a été retenu que les périmètres identifiés correspondent aux contours des zones de pollutions avérées ou potentielles.

Les informations associées à chaque contour renseignent sur les typologies de polluants, les cibles impactées (sols et/ou nappes) et le contexte du site (pollution avérée, non exclue ou site réhabilité).

La base exploitée est datée de 2014 et intègre 800 sites dont un peu plus de 650 sont le siège d'une pollution avérée. Les contours contenus dans la base intègrent les données de la base nationale BASOL.

http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/18/Zones_SSP.map

Cette base de données a pour vocation de recenser au format SIG les zones à risque de pollution des sols grâce à la connaissance acquise par l'inspection dans le cadre de ses missions.

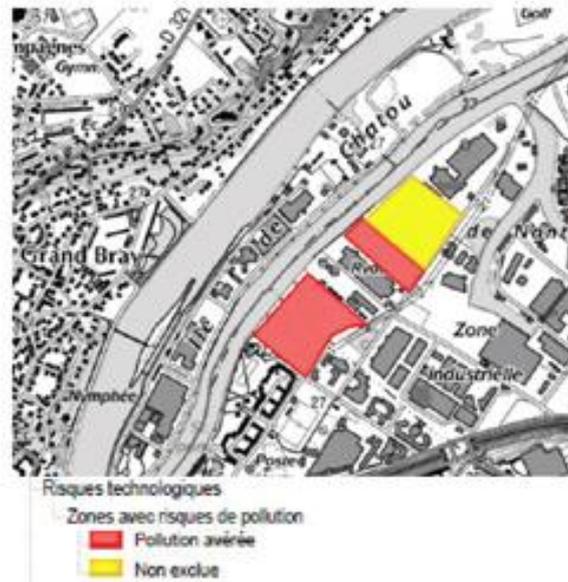


Illustration 26 - Extrait de la fiche descriptive de la base des zones à risques de pollution des sols (DRIEE)

4.3.2. Méthodologie de traitement

Dans le guide méthodologique, il est préconisé d'établir un tampon de 50 m de large autour des informations ponctuelles de la base de données BASOL afin de tenir compte de l'incertitude de localisation.

Dans le cas de la région Île-de-France, la base de données utilisée fournit des périmètres d'incidence calés sur l'emprise des installations source de pollution. En conséquence, il ne nous a pas semblé nécessaire d'augmenter ces emprises.

Les contextes locaux pouvant être assez variés, il n'a pas été extrapolé de panaches de pollution se propageant au-delà de l'emprise des sites.

Pour les périmètres des zones polluées ou potentiellement polluées, le guide méthodologique préconise de prendre en considération la nature de la pollution (métallique ou autre), la présence potentielle d'une nappe et les éventuelles réhabilitations.

Dans la base de données fournie par la DRIEE, certaines informations complémentaires sont spécifiées (type d'usage du site après remédiation notamment) et une appréciation de la probabilité peut être indiquée (pollution avérée, pollution non exclue). Afin de prendre en compte l'ensemble des informations et de les pondérer en fonction de leur probabilité, il a été retenu une qualification de la susceptibilité en examinant successivement les paramètres suivants :

- pollution des sols (avérée, non exclue) ;
- impact sur les nappes (avérée, non exclue, exclue) ;
- pollution métallique (oui/non) ;
- réhabilitation (niveau d'usage).

S'agissant de la réhabilitation des sites, il a été retenu qu'un site « réhabilité » ne signifiait pas « exempt de toute pollution » ; aussi, en accord avec la DRIEE, un site réhabilité permettant une activité de type habitation (ou équivalent) a été maintenu avec une susceptibilité faible.

Les sites ayant fait l'objet d'une réhabilitation permettant une activité équivalente au site d'origine, ont été affectés d'une susceptibilité d'un niveau juste inférieur à celle identifiée avant réhabilitation.

Enfin, les sites faisant l'objet d'une description du type « réhabilitation en cours », « à venir » ou « usage selon réhabilitation », ont été considérés comme non réhabilités.

La grille décisionnelle de pondération de la susceptibilité au phénomène « pollution des sols et des nappes d'eau souterraines » est représentée sur l'illustration 27.

Phénomène pollution des sols et des nappes		Niveau d'aléa/Susceptibilité du phénomène	Pollution d'origine non métallique ou mercure	Niveau d'aléa/Susceptibilité du phénomène	Si Réhabilitation	Niveau d'aléa/Susceptibilité du phénomène
Pollutions des sols avérées	Impacts sur la nappe avérés	6	oui	Très fort (10)	activité ou équivalent	Fort (6)
			non	Fort (6)	habitation ou équivalent	Faible (1)
	Impacts sur la nappe non exclus	4	oui	Fort (6)	activité ou équivalent	Moyen (4)
			non	Moyen (4)	habitation ou équivalent	Faible (1)
			oui	Fort (6)	activité ou équivalent	Moyen (4)
			non	Moyen (4)	habitation ou équivalent	Faible (1)
Impacts sur la nappe exclus	1		Faible (1)		Faible (1)	
Pollutions des sols non exclus	Impacts sur la nappe avérés	6	oui	Très fort (10)	activité ou équivalent	Fort (6)
			non	Fort (6)	habitation ou équivalent	Faible (1)
	Impacts sur la nappe non exclus	1	oui	Moyen (4)	activité ou équivalent	Moyen (4)
			non	Faible (1)	habitation ou équivalent	Faible (1)
			oui	Faible (1)		Faible (1)
			non	Faible (1)		Faible (1)
Impacts sur la nappe exclus	1		Faible (1)		Faible (1)	
Pollutions des sols avérées ou non exclus	Absence de nappe	1		Faible (1)		Faible (1)

Illustration 27 - Grille de quantification de la susceptibilité au phénomène « pollution des sols et des nappes d'eau souterraines »

La synthèse des susceptibilités et pondération en fonction des différentes configurations identifiées est résumée dans le tableau ci-dessous :

Contexte	Aléa/Susceptibilité	Pondération de la maille
- Pas de pollution répertoriée	Nul	0
- Impact sur la nappe exclu - Impact sur la nappe non exclu par une pollution métallique - Réhabilitation faite en vue d'un usage type habitation ou équivalent pour toute pollution avérée ou non exclue	Faible	1
- Sol pollué et impact sur la nappe non exclu d'une pollution métallique - Pollution des sol non exclus et impact sur la nappe non exclu d'une pollution non métallique - Réhabilitation pour un usage d'activité ou équivalent	Moyen	4
- Impact sur la nappe avérée par une pollution métallique - Impact sur la nappe non exclu d'une pollution non métallique - Pollution non métallique avérée de la nappe réhabilitée pour un usage d'activité ou équivalent	Fort	6
- Pollution avérée de la nappe, d'origine non métallique (ou mercure) sans réhabilitation	Très fort	10

4.3.3. Cotation et cartographie de l'aléa « Pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »

De même qu'indiqué dans le paragraphe 3.3, la pondération établie ci-dessus a été appliquée à l'ensemble des mailles contenant un contour issu de la base de données sur les zones à risques de pollution des sols (Illustration 28).

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa										Facteur aggravant		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
5	Poll. SOL et EAU	0	1	-	-	4	-	6	-	-	-	10	3	3

Niveau d'aléa	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort
	0	1	4	6	10
Doublet (x3)	0	3	12	18	30
SGV (x3)	0	3	12	18	30

Illustration 28 - Cotation de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine ».

La carte régionale qui en découle (Illustration 29) met en avant une concentration plus importante de sites pollués en petite couronne parisienne (jonction de la Seine Saint-Denis et des Hauts de Seine, Val de Marne) et le long de la vallée de la Seine.

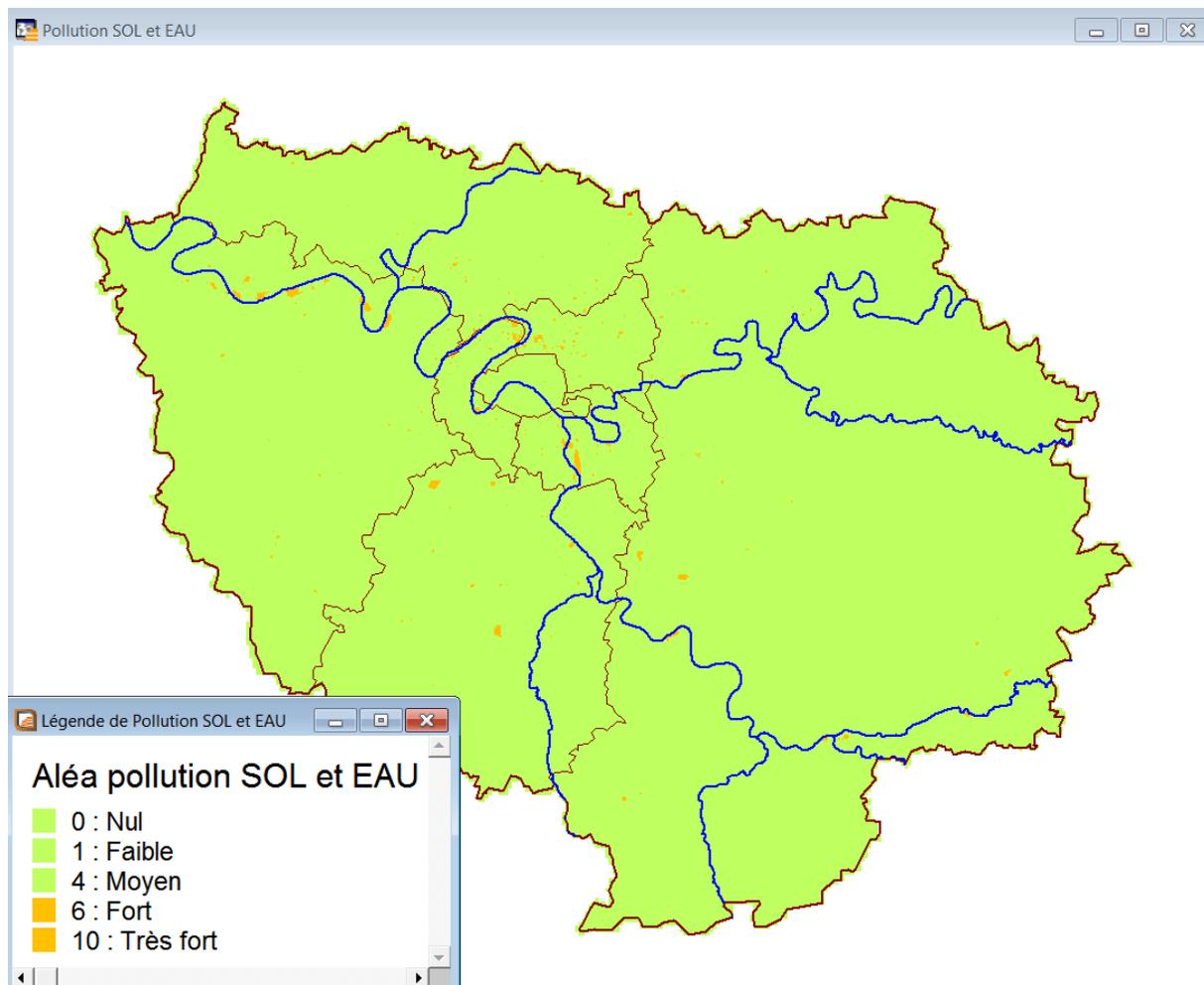


Illustration 29 - Carte de l'aléa « pollution des sols et des nappes d'eau souterraine »

4.4. PHENOMENE « ARTESIANISME »

4.4.1. Phénomène redouté

Définition de l'artésianisme : aptitude d'un aquifère captif à permettre la remontée d'eau spontanée par des ouvrages (puits, forages).

Cette remontée d'eau en surface peut ainsi entraîner des écoulements d'eau sur le sol, et/ou une déstabilisation d'une formation superficielle. L'aquifère concerné a ainsi une surface piézométrique située au-dessus de la surface du sol. Il n'existe pas de carte à l'échelle nationale de ce phénomène actuellement en France.

4.4.2. Qualification du phénomène

La cartographie du phénomène a été réalisée à partir de la différence entre la piézométrie observée et la topographie du terrain. Pour un forage donné, il y a artésianisme si d'une part la profondeur du forage atteint au moins le toit de l'aquifère, d'autre part si la piézométrie de la nappe est supérieure à la topographie du terrain.

4.4.3. Données utilisées et traitement

Pour la région Ile de France, on dispose des cartes piézométriques suivantes :

- Oligocène : nappe de Beauce en HE 2002 (DREAL Centre),
- Oligocène : Yvelines Sud 1981 et Saclay 1999,
- Eocène supérieur : nappe du Champigny HE 2004, et nappe de Beauce HE 2002 (DREAL),
- Eocène moyen : calcaires du Lutétien HE 2014,
- Eocène inférieur : sables de l'Yprésien HE 2014.

Seules les nappes de l'Oligocène et de l'Yprésien présentent un artésianisme bien identifié.

Pour ces deux aquifères, on présente, sur les Illustration 30 et Illustration 31, la profondeur de la nappe en distinguant les zones où la nappe est à plus de 4 m du sol, à moins de 4 m du sol et au-dessus du sol (secteur artésien). Les secteurs artésiens sont principalement situés dans les vallées.

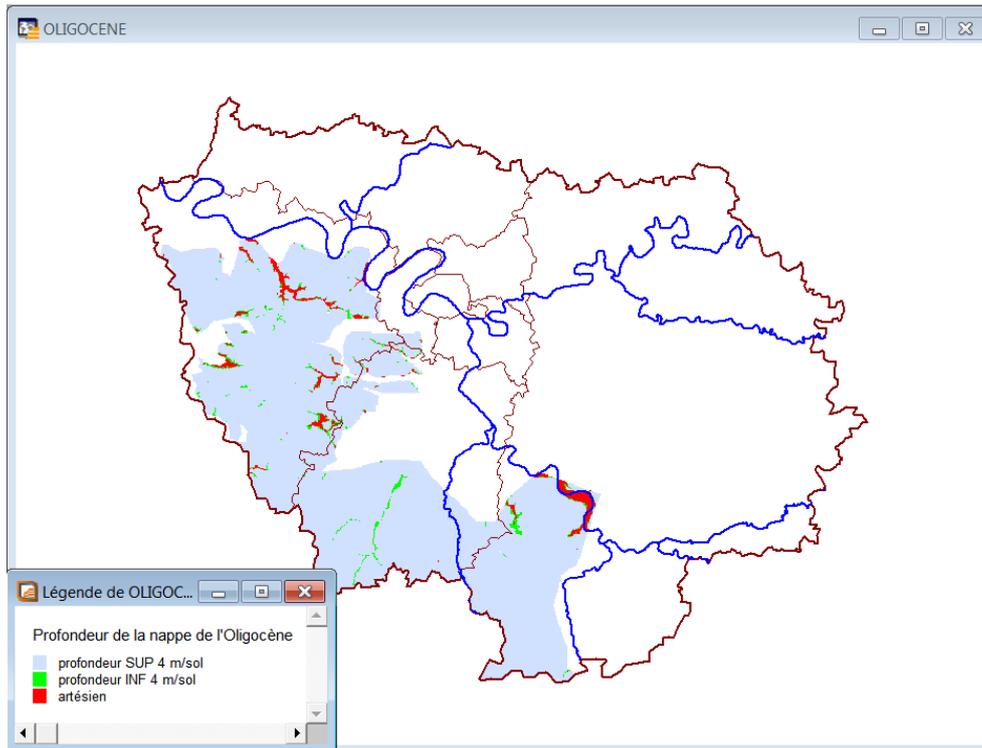


Illustration 30 - Profondeur de la nappe de l'Oligocène.

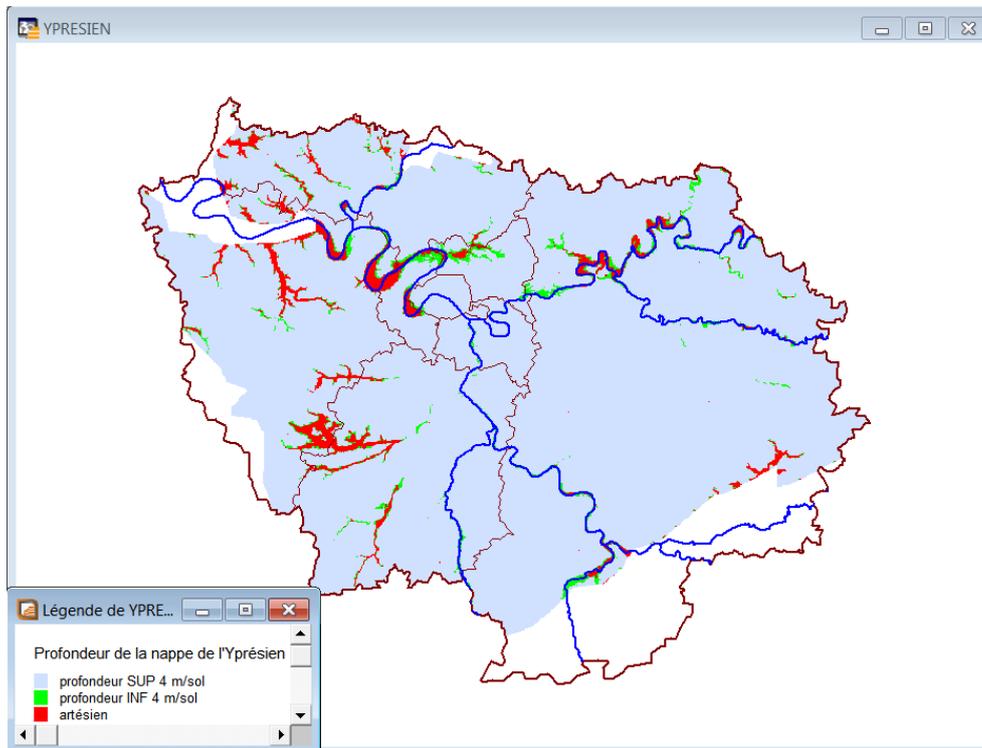


Illustration 31- Profondeur de la nappe de l'Yprésien.

4.4.4. Cotation et cartographie de l'aléa « artésianisme »

Pour établir la carte réglementaire, chaque niveau d'aléa été affecté d'une valeur d'autant plus élevée que le niveau est fort.

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa											Facteur aggravant	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
6	Artésianisme	0	-	-	3	-	-	-	7	-	-	-	2	4

Niveau d'aléa	Nul	Faible	Fort
		0	3
Doublet (x2)	0	6	14
SGV (x4)	0	12	28

Illustration 32 - Cotation de l'aléa « phénomène artésianisme ».

La susceptibilité du phénomène est cartographiée pour les trois gammes de profondeur 10-50 m, 10-100 m et 10-200 m (voir Illustration 33, Illustration 34 et Illustration 35). La cotation du niveau d'aléa sera égale à 3 (niveau faible) pour un seul aquifère artésien rencontré, et de 7 (niveau fort) pour 2 aquifères artésiens rencontrés.

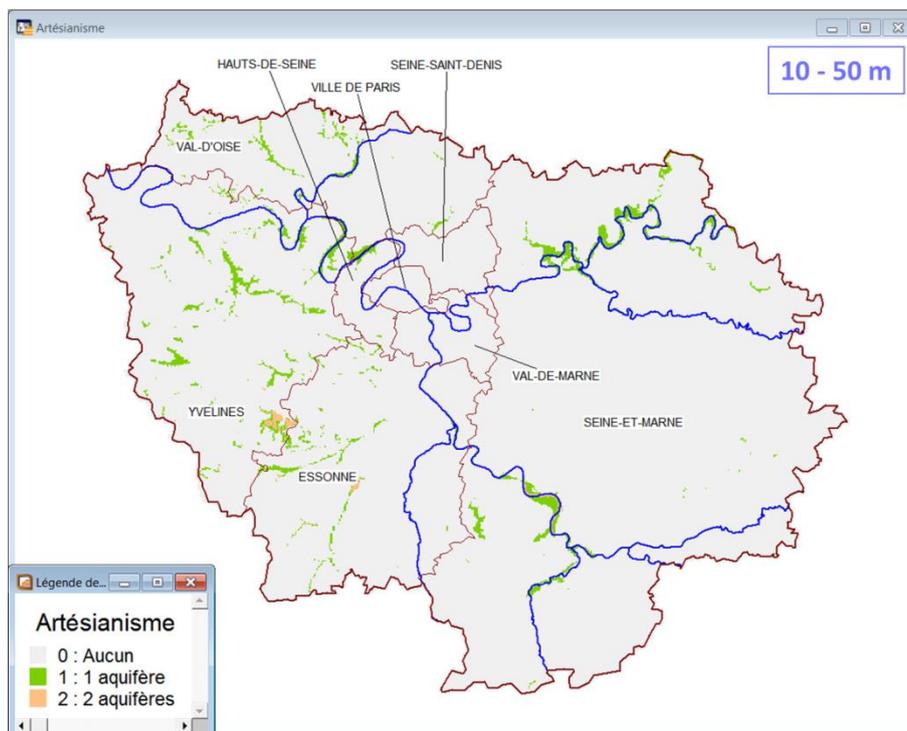


Illustration 33 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 50 m.

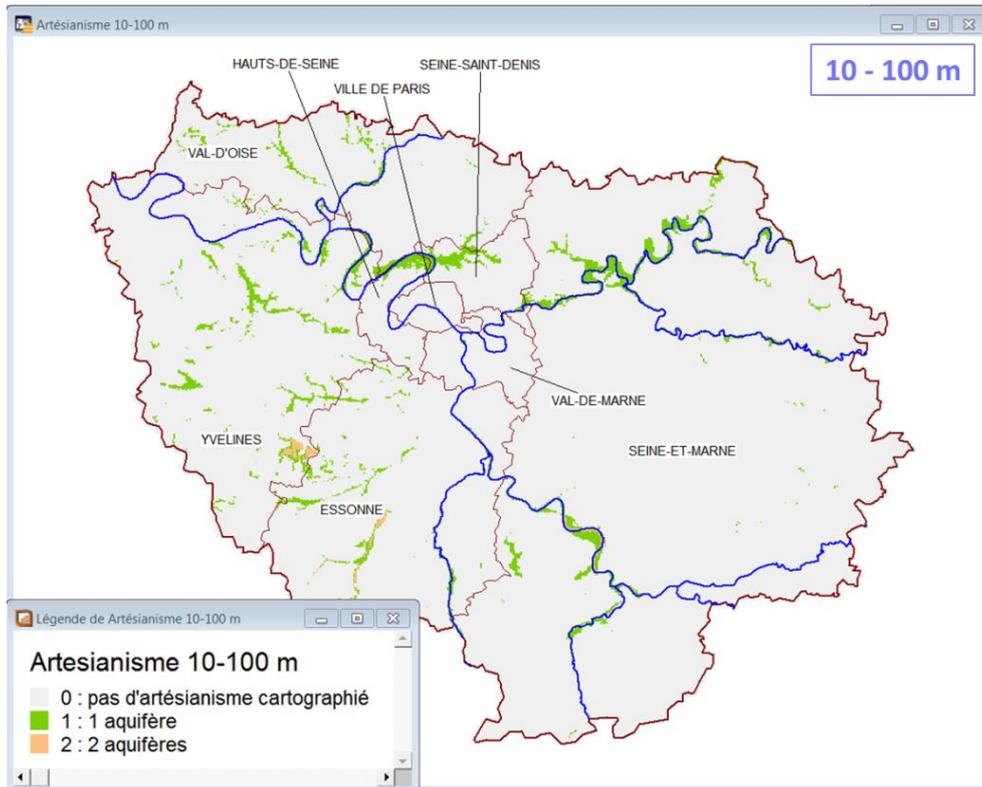


Illustration 34 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 100 m.

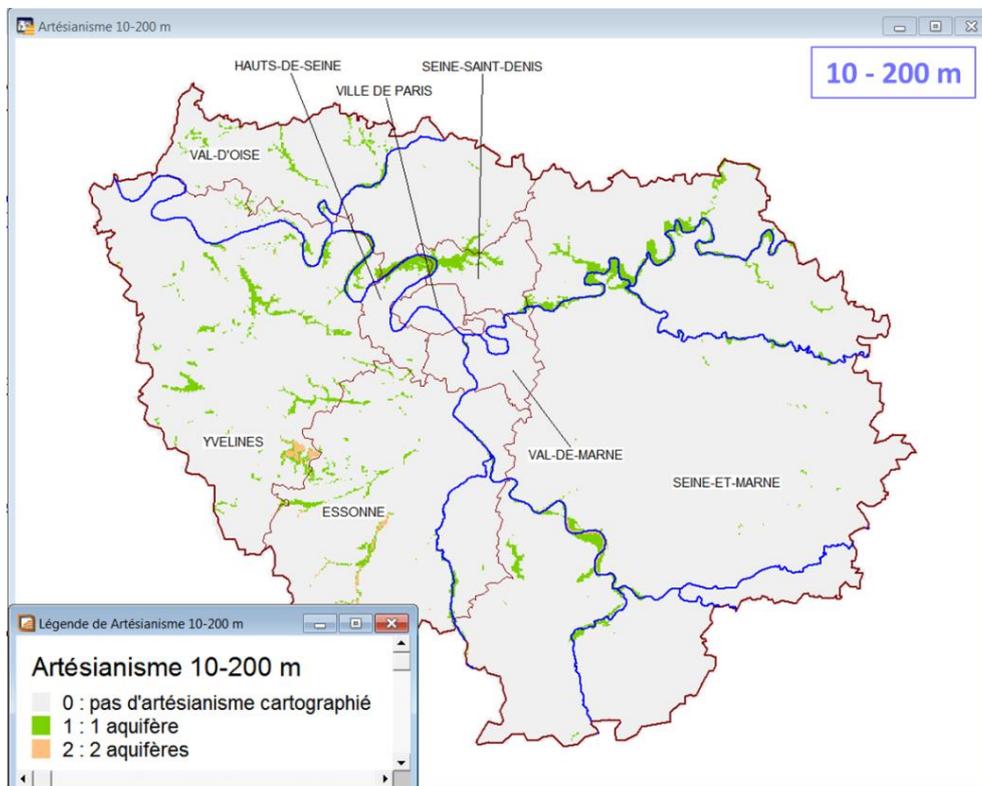


Illustration 35 - Carte du nombre d'aquifères artésiens rencontrés sur une profondeur 10 - 200 m.

4.5. PHENOMENE « MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFERES »

4.5.1. Phénomène redouté

Le phénomène redouté est la mise en communication verticale entre deux aquifères suivie d'un écoulement de l'eau d'un aquifère dans un autre pouvant entraîner :

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

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

4.5.2. Qualification du phénomène

Il n'existe pas de carte régionale du phénomène de mise en communication entre aquifères.

La qualification du phénomène est donc basée sur la probabilité d'avoir au moins deux aquifères dans l'intervalle de profondeur considéré.

L'aquifère de l'Albien, considéré comme stratégique, fera l'objet d'une cotation particulière.

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

4.5.3. Données utilisées pour le traitement

L'identification des aquifères potentiellement en communication sera fait à partir des données du modèle géologique du tertiaire du bassin de Paris. Les aquifères suivants ont été retenus : les nappes de l'Oligocène, du Champigny, de Saint-Ouen/Auversien, du Lutétien, du Cuisien/Yprésien, de la Craie et de l'Albien.

4.5.4. Cotation et cartographie de l'aléa « mise en communication d'aquifères »

Dans la cotation ci-après, l'aquifère stratégique considéré est celui de l'Albien dont le toit est situé à moins de 200 m de profondeur dans la partie nord-ouest de l'Ile de France.

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa											Facteur aggravant	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV
7	Comm. Aquif	0	1	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4	4

Niveau d'aléa	Nul	Aquifère non stratégique	Aquifère stratégique
		0	1
Doublet (x4)	0	4	16
SGV (x4)	0	4	16

Illustration 36 - Cotation de l'aléa « phénomène de mise en communication d'aquifères ».

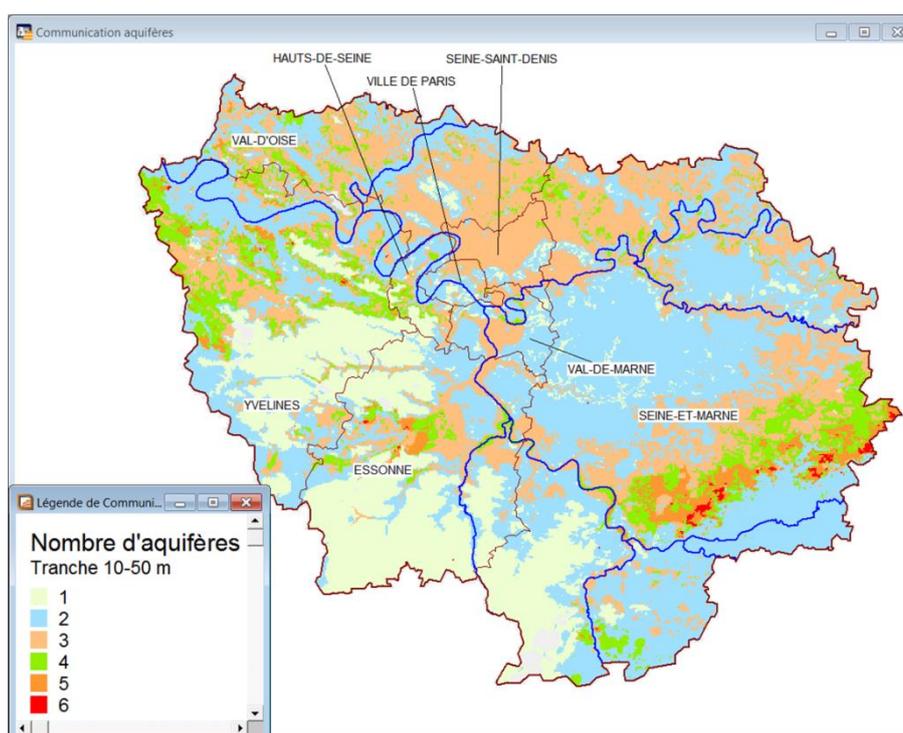


Illustration 37 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-50 m.

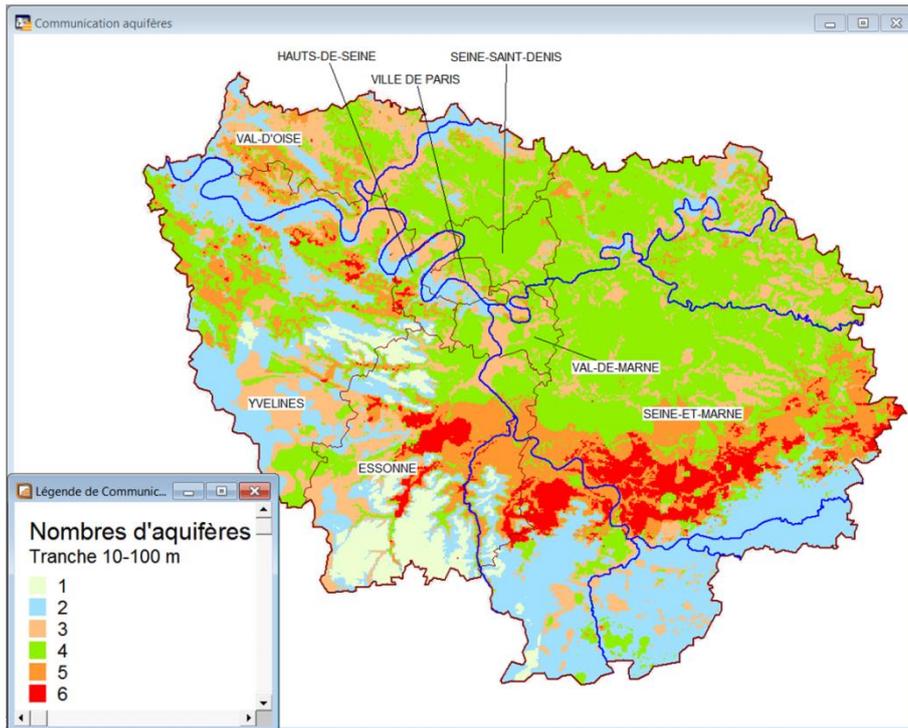


Illustration 38 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-100 m.

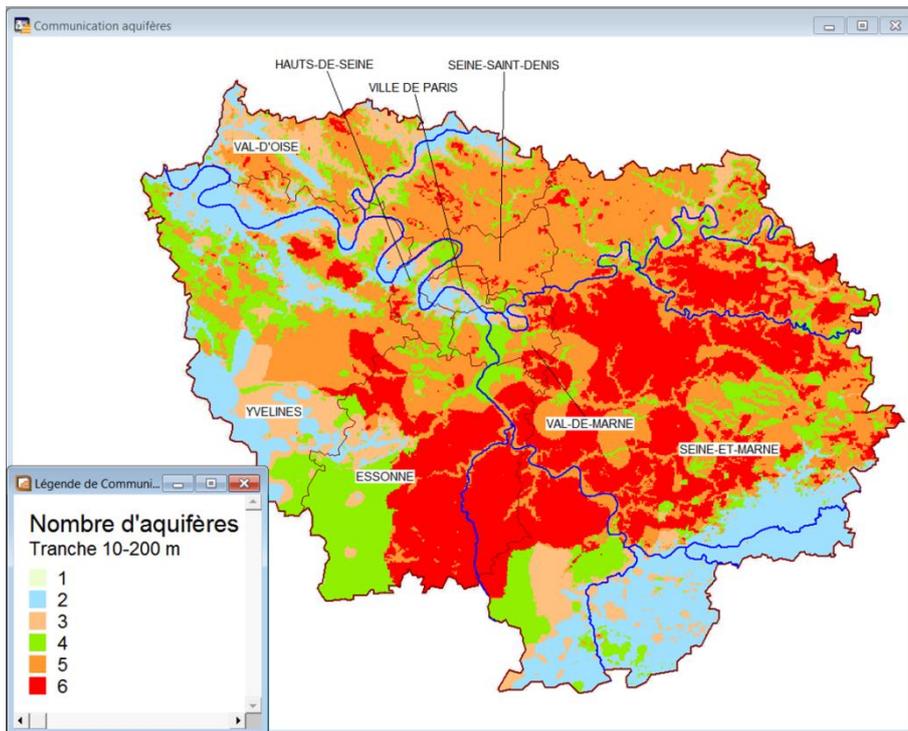


Illustration 39 - Carte du nombre d'aquifères traversés sur une profondeur de 10-200 m.

4.6. PHENOMENE « REMONTEE DE NAPPE »

4.6.1. Phénomène redouté

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

4.6.2. Qualification du phénomène

Une étude sur les risques d'inondation par remontée de nappe en France a été réalisée par le BRGM pour le MEDDE (Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine, BRGM/RP54414-FR, 2006) et a fait l'objet d'une diffusion des résultats dans le site internet <http://www.inondationsnappes.fr>.

La qualification du phénomène d'inondation par remontée de nappe à l'échelle régionale est basée sur les données de cette étude. Elle est la même qu'à l'échelle nationale et est conforme au guide méthodologique.

Il a été distingué :

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

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

4.6.3. Données utilisées pour le traitement

Les données proviennent de l'étude citée ci-avant.

4.6.4. Cotation et cartographie de l'aléa « remontée de nappe »

Pour établir la carte réglementaire, chaque niveau a été affecté d'une valeur d'autant plus élevée que le niveau est fort.

Les valeurs de niveau d'aléa/susceptibilité fournies par le guide (0 et 1) ont été retenues :

Niveaux aléa / susceptibilité	Nul	Faible
Valeur du niveau	0	1

N° phénomène	Phénomène redouté	Niveaux aléa											Facteur aggravant		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DOUBLET	SGV	
8	Remontée nappe	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	0

Niveau d'aléa	Nul	Possible
		0
Doublet (x2)	0	2
SGV (x0)	0	0

Illustration 40 - Cotation de l'aléa « remontée de nappe ».

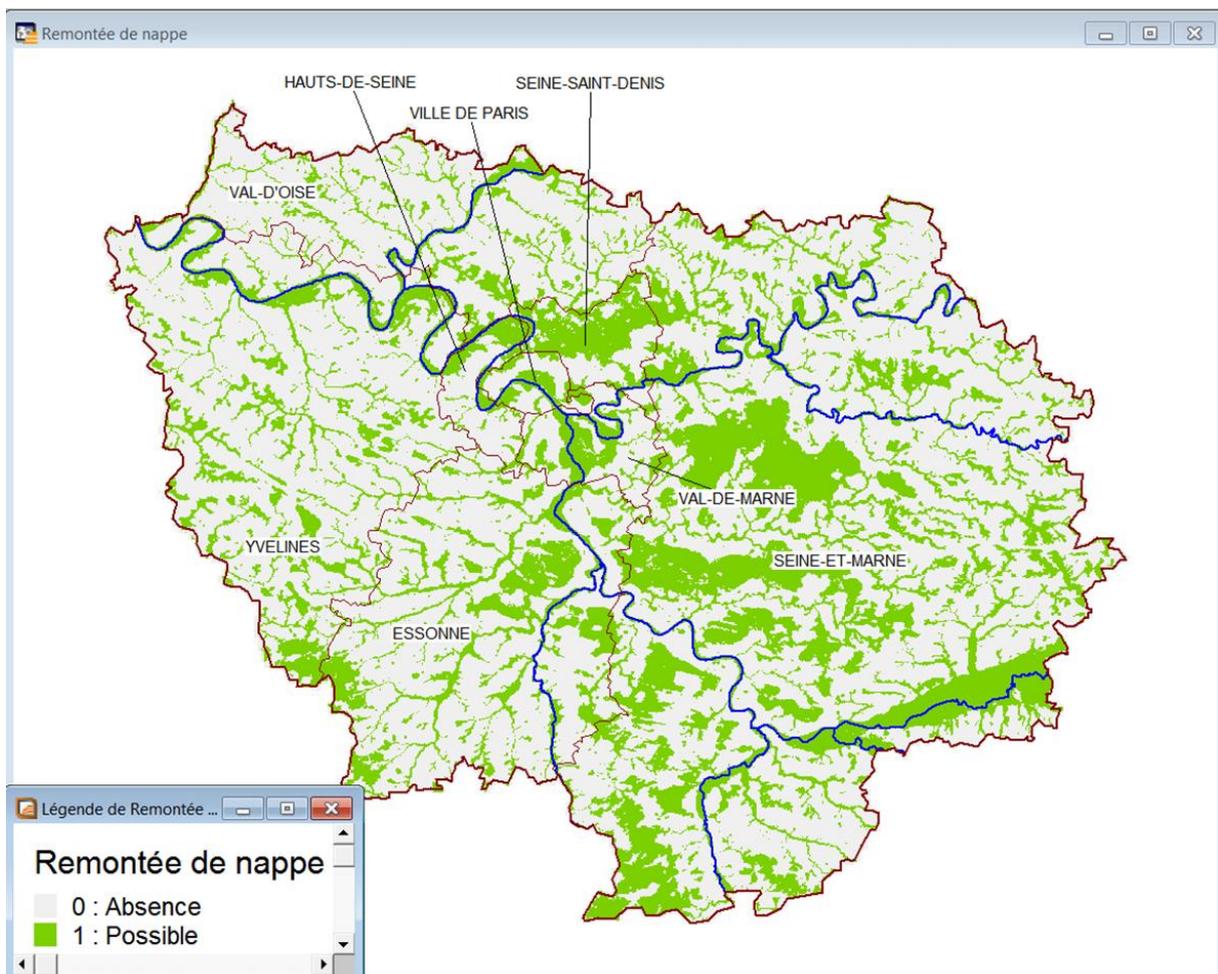


Illustration 41 - Carte de l'aléa « remontée de nappe ».

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

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

Les six cartes réalisées sont présentées ci-après.

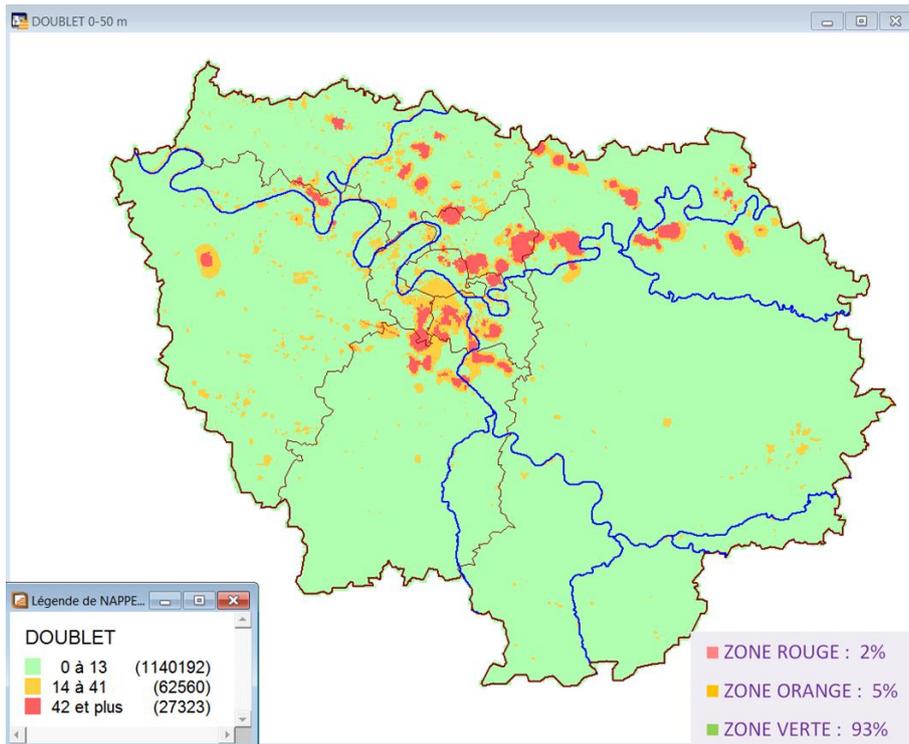


Illustration 42 - Carte réglementaire régionale 10-50 m pour doublets.

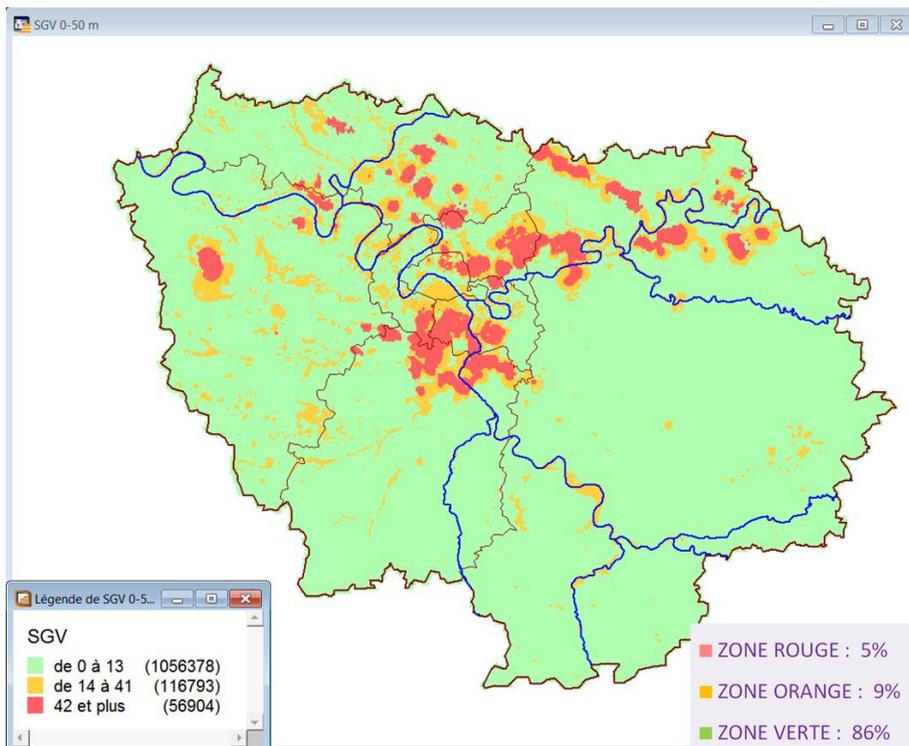


Illustration 43 - Carte réglementaire régionale 10-50 m pour SGV.

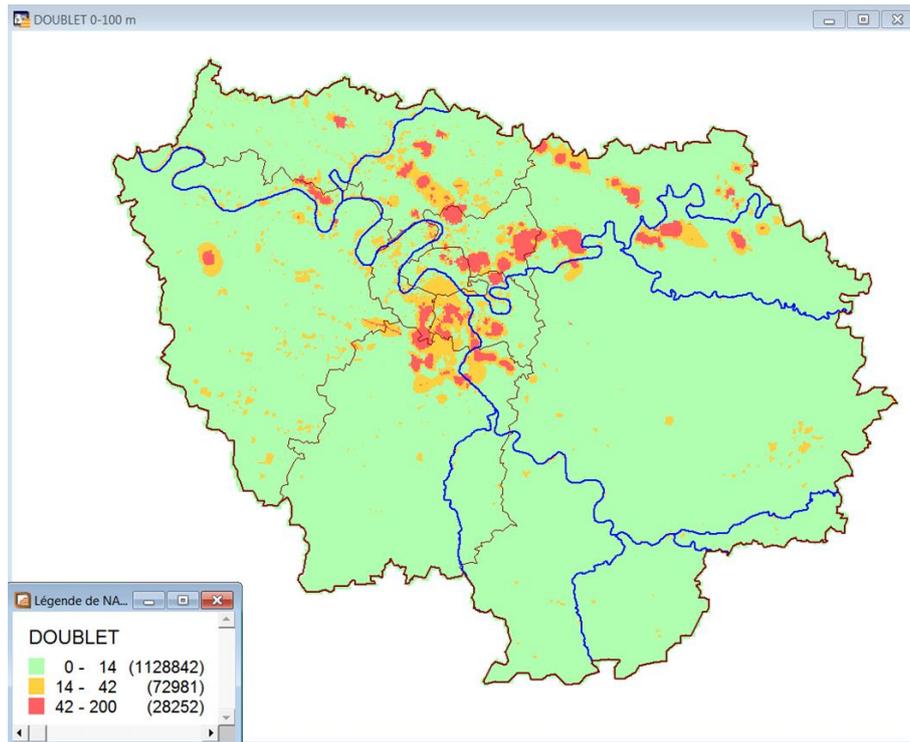


Illustration 44 - Carte réglementaire régionale 10-100 m pour doublets.

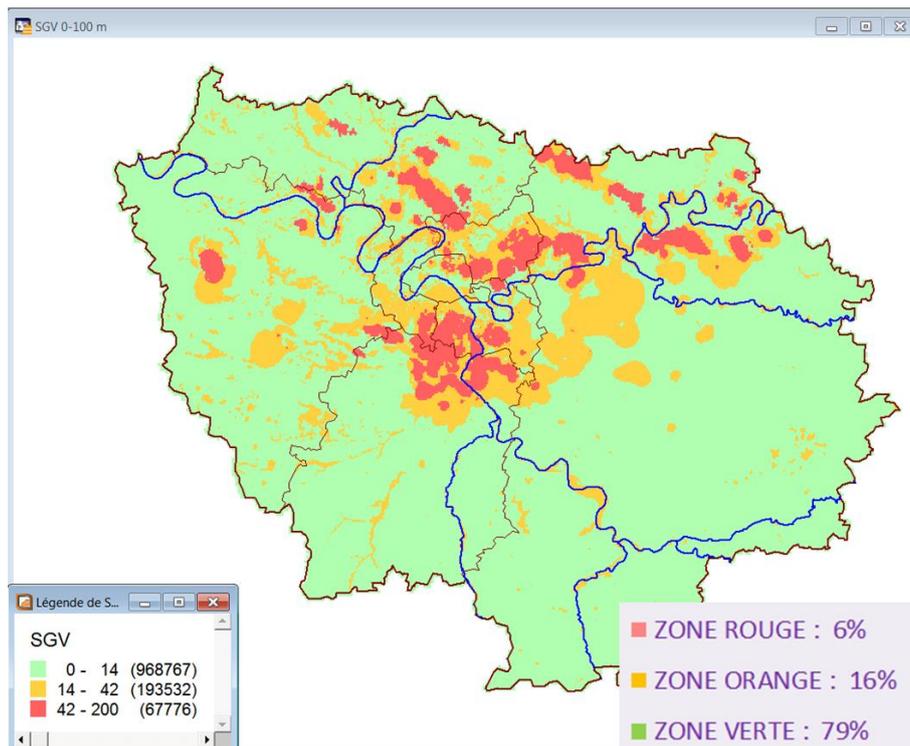


Illustration 45 - Carte réglementaire régionale 10-100 m pour SGV.

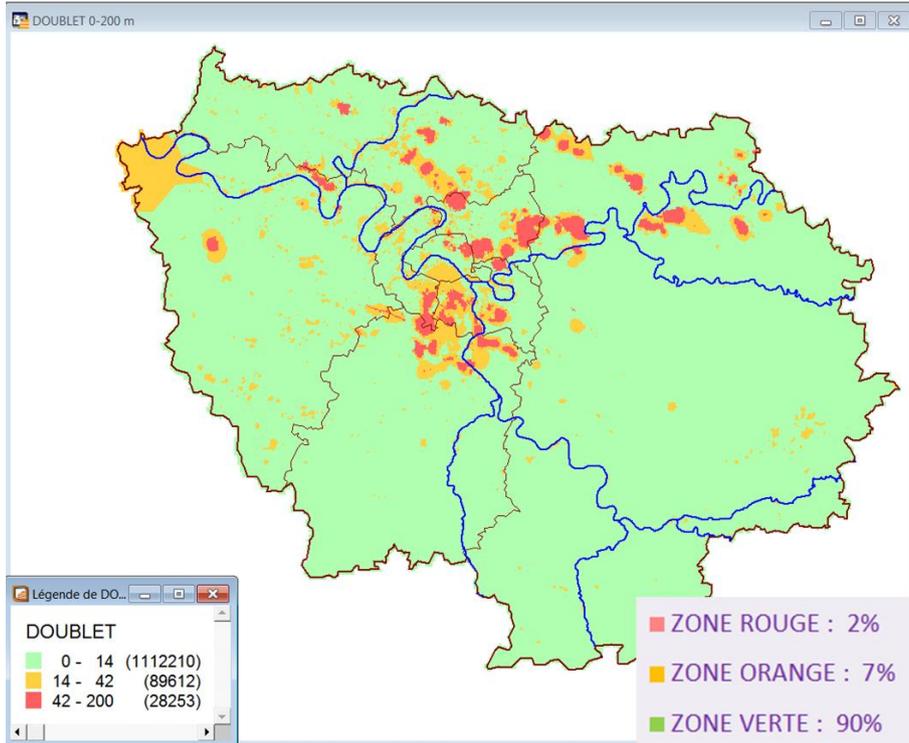


Illustration 46 - Carte réglementaire régionale 10-200 m pour doublets.

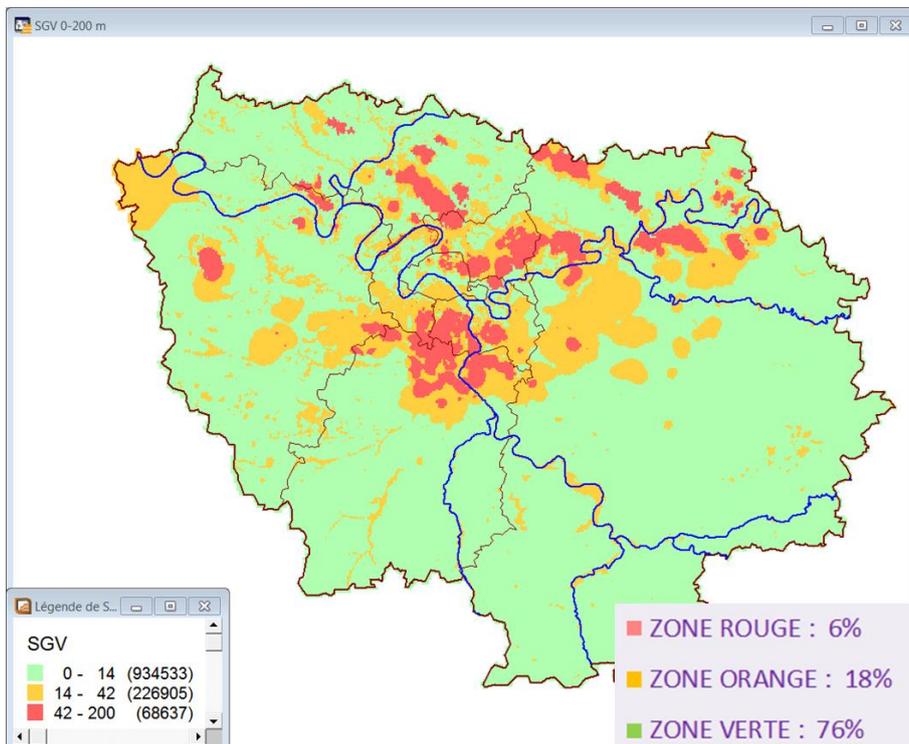


Illustration 47 - Carte réglementaire régionale 10-200 m pour SGV.

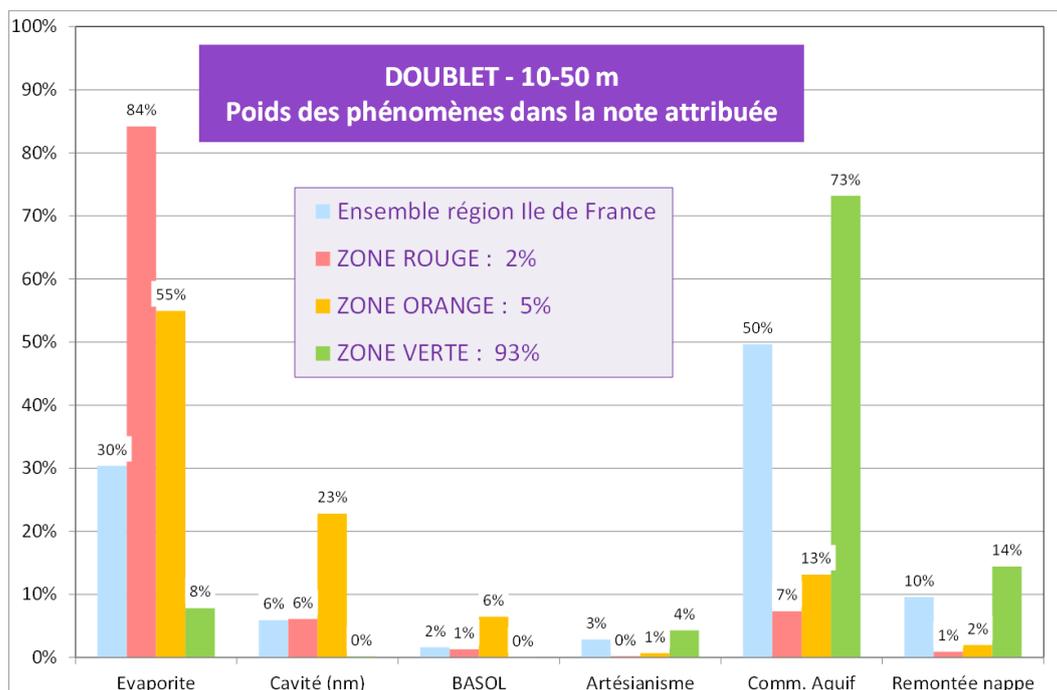


Illustration 48 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-50 m).

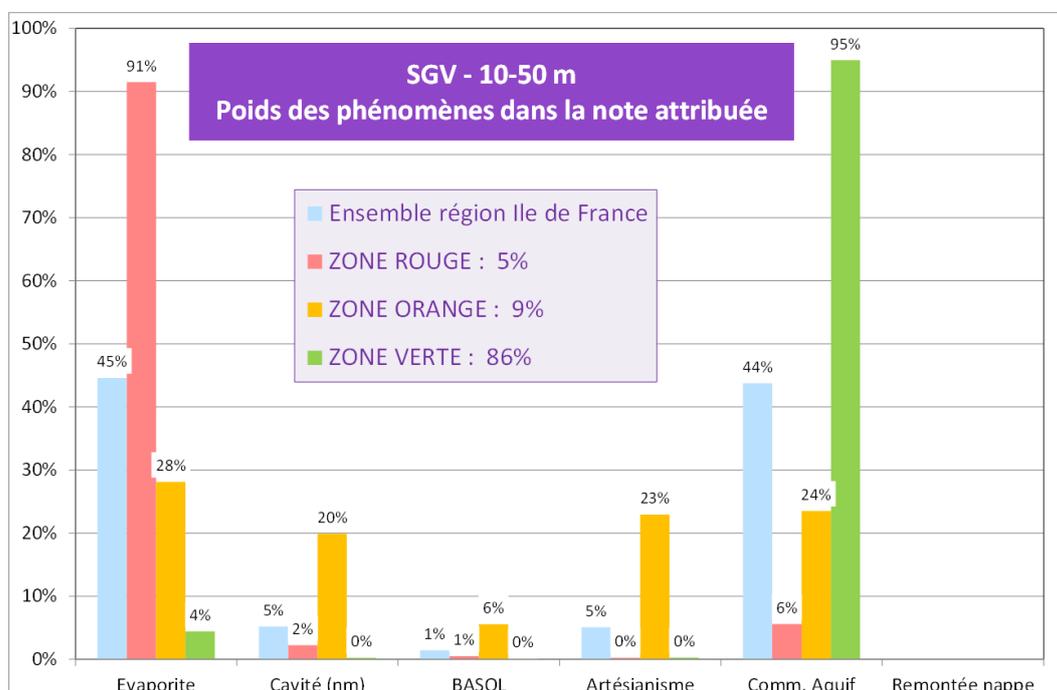


Illustration 49 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-50 m).

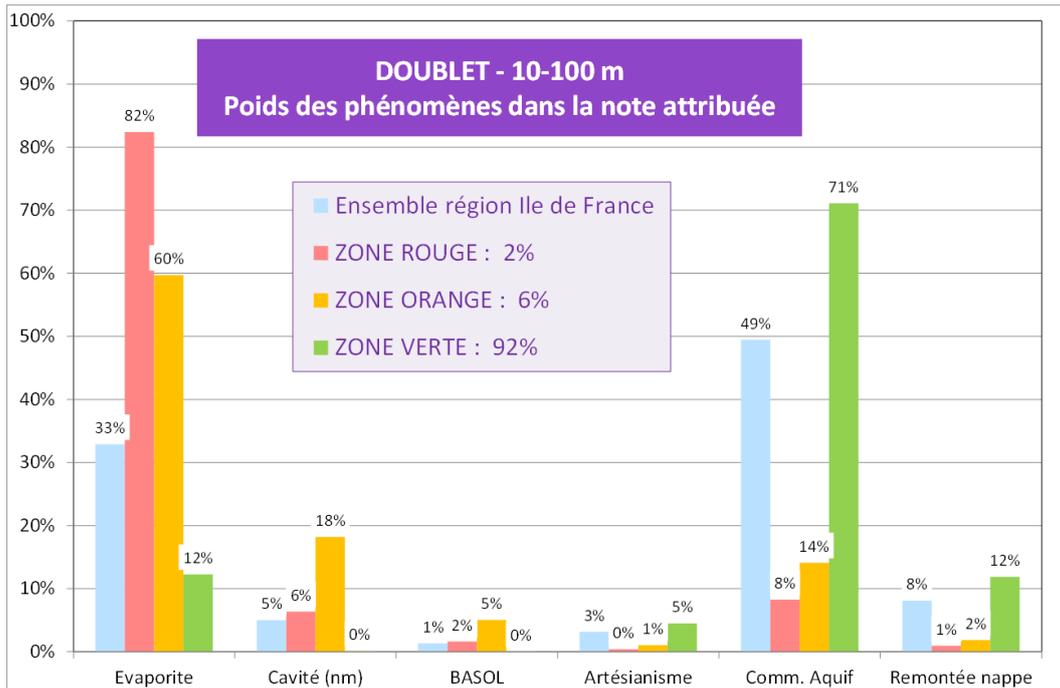


Illustration 50 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-100 m).

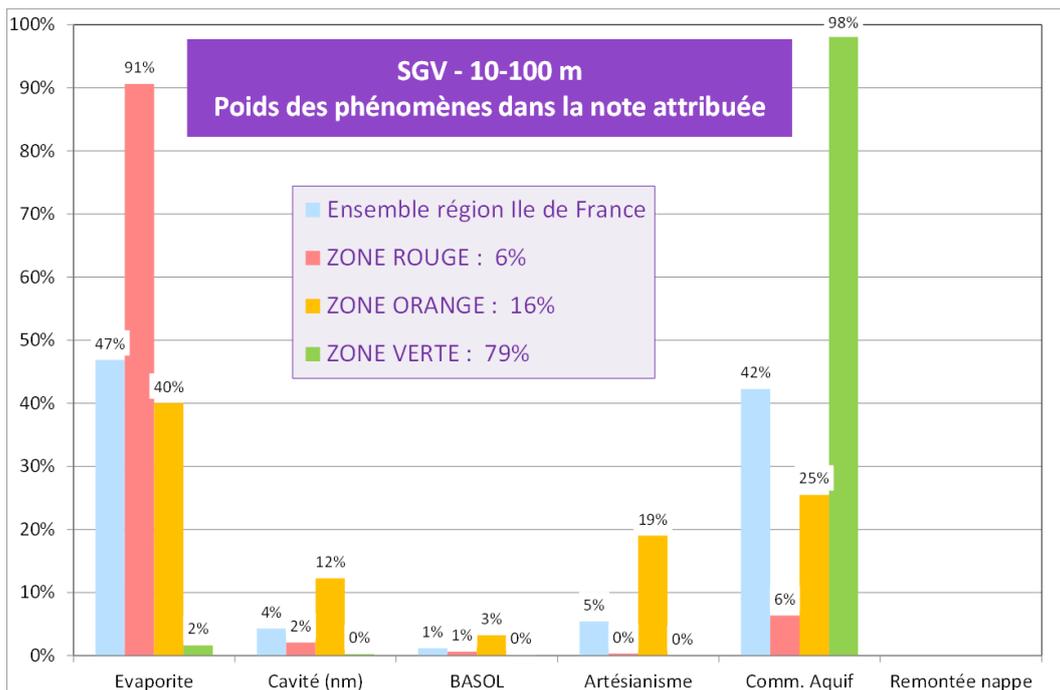


Illustration 51 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-100 m).

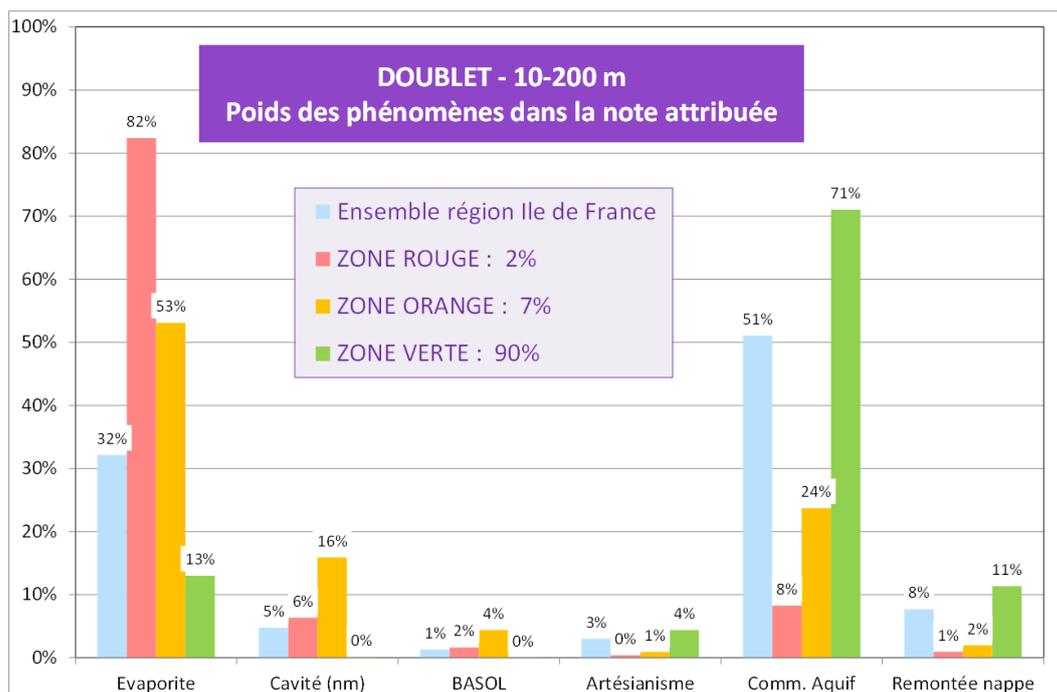


Illustration 52 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (doublets - 10-200 m).

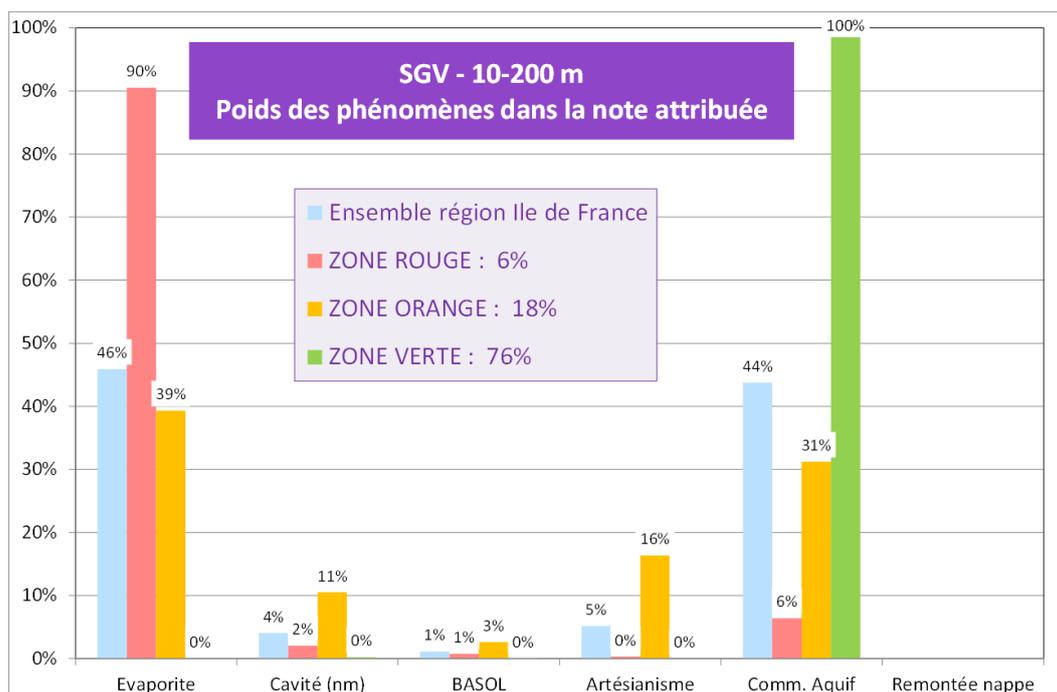


Illustration 53 - Poids des phénomènes dans la note total attribuée (SGV - 10-200 m).

6. Comparaison des cartes régionales avec les cartes nationales

Le traitement plus approfondi des données des différents phénomènes retenus, le maillage de 100x100 m et le découpage en 3 tranches d'épaisseur (10-50, 10-100 et 10-200 m) a permis d'apporter une plus grande précision à la carte réglementaire de la région Ile de France. Entre les cartes nationales (doublets et SGV) et les cartes régionales, on constate une forte augmentation des zones vertes (+ 39 % pour les doublets et + 25 % pour les SGV de la tranche 10-50 m) et une forte diminution des zones orange (- 85 % pour les doublets et - 70 % pour les SGV de la tranche 10-50 m). Par contre on constate une forte augmentation des zones rouges dans les deux cas, on passe de 0,1 % à 2 % pour les doublets, quel que soit la profondeur, et de 2 % à 5 et 6 % pour les SGV. Le pourcentage de zones vertes, pour les doublets, est ainsi passé de 67 % du territoire à respectivement 93, 92 et 90 % pour les 3 profondeurs. Pour les SGV, ce pourcentage est passé de 69 % du territoire à respectivement 86, 79 et 76 % pour les 3 profondeurs. Le pourcentage de zones orange est passé, pour les doublets, de 33 % du territoire à respectivement 5, 6, et 7 % pour les 3 profondeurs. Pour les SGV, ce pourcentage est passé de 29 % du territoire à respectivement 9, 16 et 18 % pour les 3 profondeurs. Par contre on observe une augmentation du pourcentage de zones rouges qui passent de 0,1 % du territoire à 2 % quel que soit la profondeur pour les doublets, et de 2 % à 5 % pour la tranche 10-50 m, et à 6 % pour les deux tranches de profondeur suivantes pour les SGV. Ce résultat s'explique d'une part par une meilleure localisation des zones à risque des formations de gypses en particulier, d'autre part par le fait que les niveaux d'aléa pour la carte nationale est différente de ceux de la carte régionale.

On rappelle, sur les Illustration 54 et Illustration 55, les résultats des cartes réglementaires nationales, et sur les Illustration 56 et Illustration 57 les schémas comparatifs des pourcentages des différentes zones.

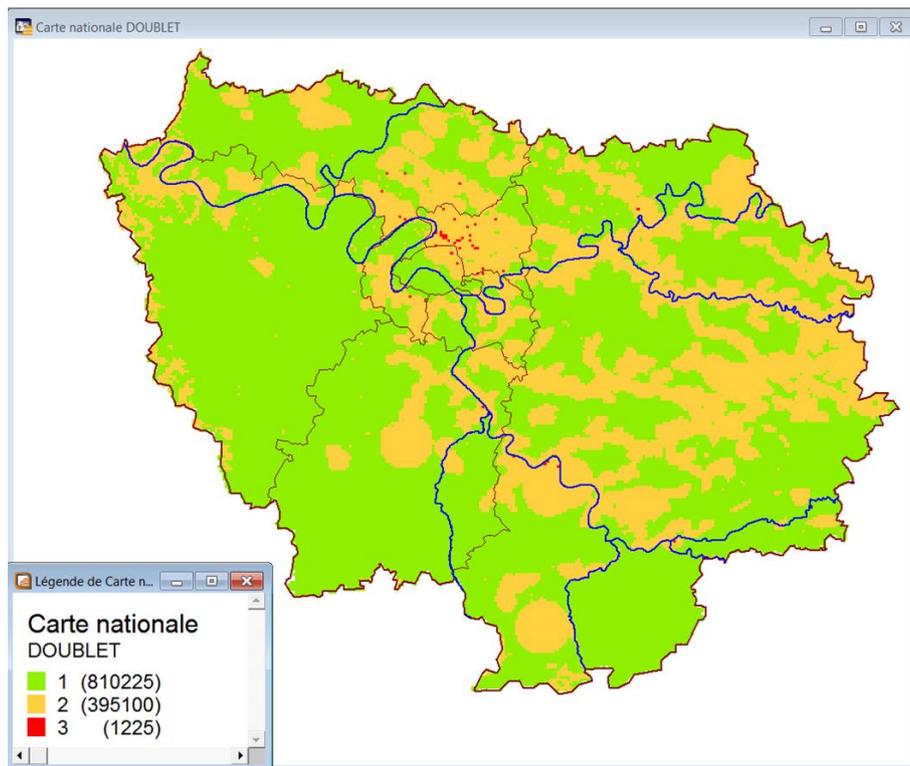


Illustration 54 - Rappel : extrait carte réglementaire nationale 10-200 m pour doublets.

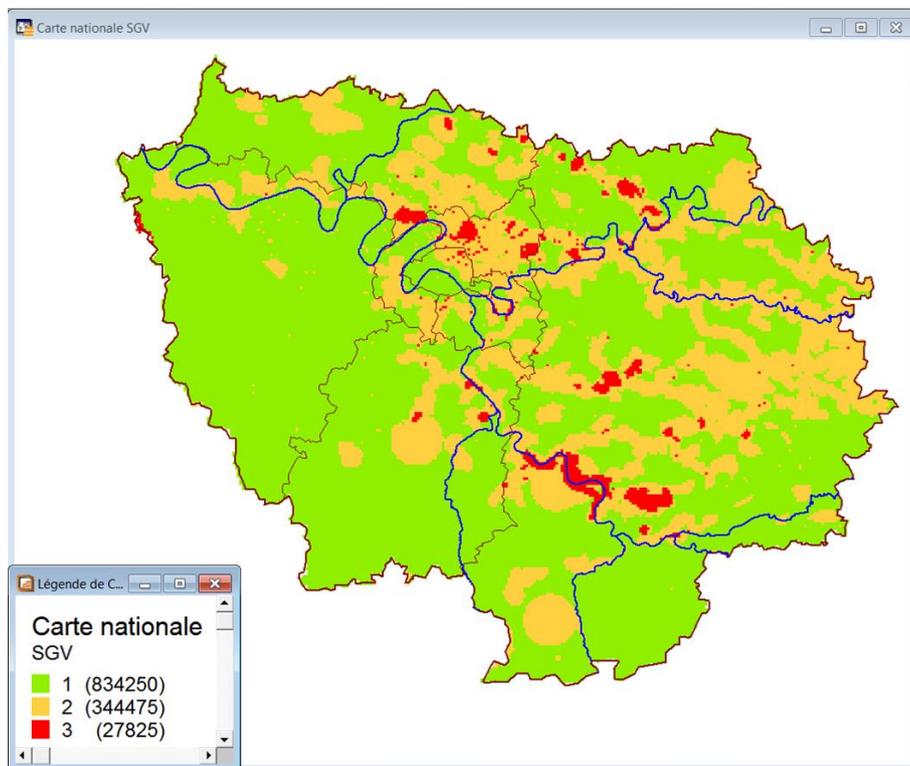


Illustration 55 - Rappel : extrait carte réglementaire nationale 10-200 m pour SGV.

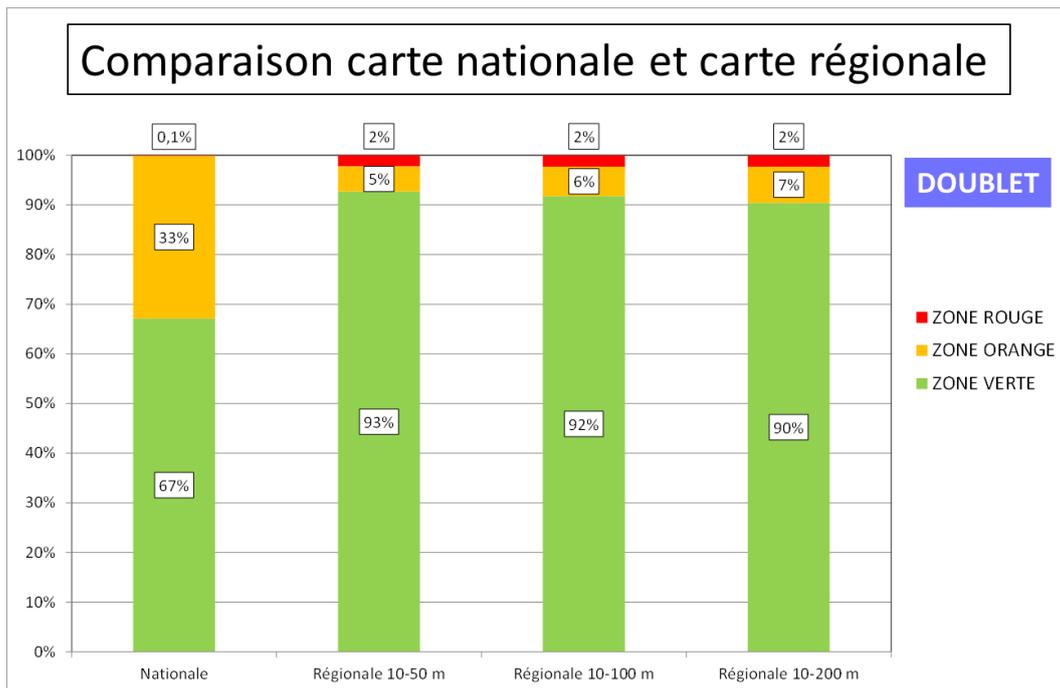


Illustration 56 - Schéma comparatif des résultats de la répartition des zones vertes, orange et rouges entre la carte nationale de la région Ile de France et les cartes régionales issues de la présente étude (doublet).

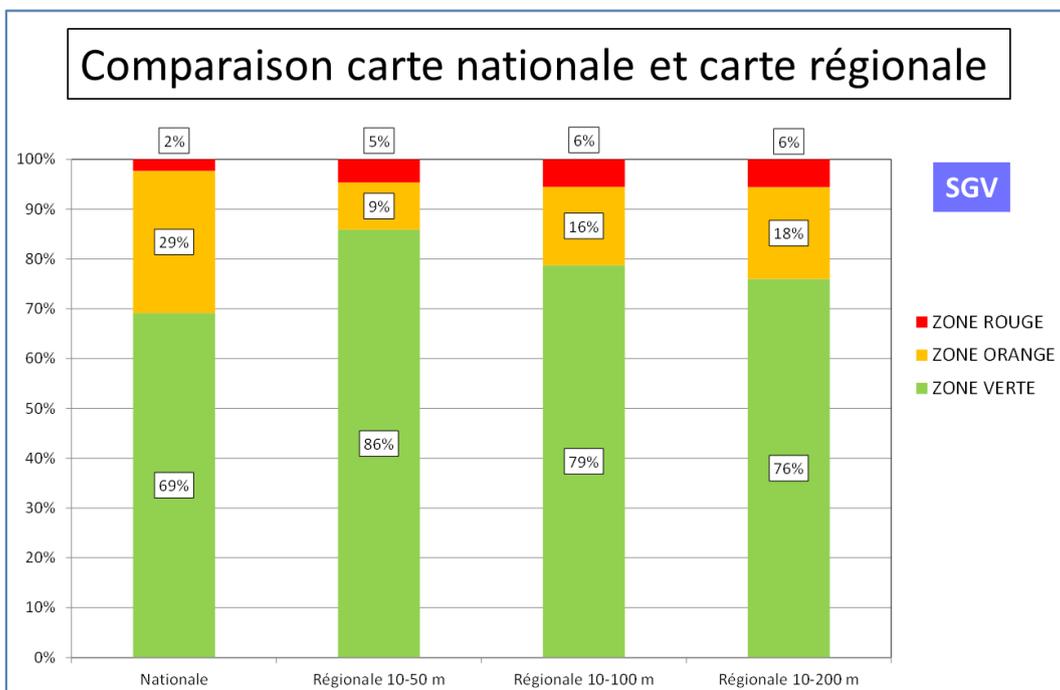


Illustration 57 - Schéma comparatif des résultats de la répartition des zones vertes, orange et rouges entre la carte nationale de la région Ile de France et les cartes régionales issues de la présente étude (SGV).

7. Conclusion

La transposition régionale de la carte réglementaire nationale a été réalisée conjointement par le Cerema et le BRGM. La prise en compte d'un maillage plus fin (100 m x 100 m) et le découpage en 3 tranches de profondeur (10-50 m, 10-100 m, 10-200 m) a sensiblement amélioré la précision de la carte réglementaire Ile de France.

Le résultat final a vu une forte augmentation de la superficie des zones vertes (zone à simple déclaration). On passe ainsi de 67 % de zones vertes pour les doublets de la carte nationale à 93, 92 et 90 %, selon la profondeur, pour la carte régionale. Pour les SGV, la superficie des zones vertes passe de 69 % à respectivement 86, 79 et 76 %, selon la profondeur, pour la carte régionale. Corrélativement, on obtient une forte diminution de la superficie des zones orange (nécessité de l'intervention d'un expert agréé). On passe ainsi de 33 % de zones orange pour les doublets de la carte nationale à 5, 6 et 7 %, selon la profondeur, pour la carte régionale. Pour les SGV, la superficie des zones orange passe de 29 % à respectivement 9, 16 et 18 %, selon la profondeur, pour la carte régionale. Les zones rouges (installations soumises au régime d'autorisation) prennent par contre une relative importance. On passe ainsi de 0,1 % de zones rouges pour les doublets de la carte nationale à 2 %, quel que soit la profondeur, pour la carte régionale. Pour les SGV, la superficie des zones rouges passe de 2 % à respectivement 5, 6 et 6 %, selon la profondeur, pour la carte régionale.

Comme le prévoit l'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, ce projet de carte régionale sera soumis, par la DRIEE, à l'avis du conseil régional et des comités de bassin, puis le projet de carte retenu sera soumis à la consultation du public.

Un arrêté préfectoral décidera de la mise à disposition du public par voie électronique sur le site www.geothermie-perspectives.fr pour son application dans le cadre de la réglementation de la géothermie de minime importance.

8. Bibliographie

CEREMA

Guide méthodologique « Méthodologie de construction de la cartographie des zonages réglementaires relative à la géothermie de minime importance », mars 2014, Cerema-BRGM-ADEME.

M. Herbaux, C. Kreziak (Cerema), P. Durst, D. Midot, S. Schomburgk, J.C. Martin, R. Cochery, G. Fourniguet, A.V. Barras (BRGM) - 2015 - Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance – BRGM-CEREMA.

Base de données sur les zones à risques de pollution des sols - juin 2014 - DRIEE.

Fiche métadonnées « Terrain exposé à un risque (hors dissolution du gypse anté-ludien) » - juin 2014 - IGC Paris.

BRGM

Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (juillet 2015) - Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

Carte piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin parisien - rapport BRGM/RP-64887-FR - octobre 2015.

Modélisation géométrique des formations géologiques ante-ludiennes porteuses de gypse en région Ile-de-France - rapport BRGM/RP-63274-FR - avril 2014.

Annexe 1 - METHODOLOGIE GDM-MULTILAYER (traitement des données gypse)

Introduction

La méthodologie de calcul est basée sur l'exploitation des données des sondages « LGV » (logs géologiques « vérifiés ») après réinterprétation récente d'un certain nombre d'entre eux pour tenir compte des dernières avancées sur la connaissance des formations du Tertiaire (thèse Briais, 2016).

Dans le cas présent le projet bénéficie de la réinterprétation de 459 forages sur 5059. Les forages « LGV » sont codés selon des lexiques qui permettent d'identifier deux informations fondamentales pour notre étude :

- l'indication de la lithologie de chaque passe de forage
- l'indication de la stratigraphie, c'est-à-dire l'âge des formations

En plus de ces informations on dispose évidemment des coordonnées de départ du forage ainsi que des profondeurs début et fin de chaque passe.

Les 5059 forages LGV sont introduits dans le logiciel GDM (<http://gdm.brgm.fr/>) développé par le BRGM. Ce logiciel permet le traitement de données de sondage afin « d'extraire » des sondages des « tranches » de terrain vérifiant certaines propriétés (profondeur, épaisseur, lithologie, teneur en polluant, etc...). Ce logiciel permet ensuite l'interpolation de ces propriétés, le calcul de volumes, la représentation cartographique en plan, coupe ou 3D, etc. Il dispose également d'une bibliothèque de fonctions et d'une interface de programmation qui permet de réaliser des calculs spécifiques et/ou d'enchaîner plusieurs opérations « standard ».

Pour les besoins du projet et pour automatiser au mieux la production des résultats sur les 16 grilles évoquées en début de document, un algorithme spécifique a été développé. Le traitement comporte 3 étapes :

- préparation des données
- extraction des épaisseurs de gypse pur ou diffus au droit de chaque sondage
- interpolation des épaisseurs de gypse

Première étape : préparation des données

Les données à utiliser sont extraites des bases de données BRGM :

- sondages LGV (table stratigraphie et table lithologie)
- limites d'extension « BDLISA » et limite d'extension IDF
- modèle numérique de terrain

Pour les sondages LGV, un prétraitement est réalisé de façon à « fusionner » les descriptions lithologiques et les descriptions stratigraphiques. Par exemple pour le sondage 0153-6X-0391, la description du sondage en terme de niveau stratigraphique se présente comme ci-dessous :

0156_3X_0391_Strati

INDICE	XL93	YL93	Z_ORIGINE
1 01536X0391	646352.0	6879063	70.00000

Passes de 01536X0391

0

	PROF DEBUT	PROF FIN	Code strati	Nom Formation
1	0.000	0.40000	00100	Sol
2	0.400	9.00000	21120	Marnes et masses du gypse
3	9.000	11.20000	21150	Marnes à Pholadomya ludensis
4	11.200	16.50000	F0001145	Calcaire de Saint-Ouen s.l.
5	16.500	24.30000	22680	Calcaire de Saint-Ouen
6	24.300	26.00000	F0001145	Calcaire de Saint-Ouen s.l.
7	26.000	28.40000	23260	Sables du Guépelle
8	28.400	36.40000	23030	Sables et grès auversiens
9	36.400	60.00000	24150	Marnes et caillasses lutéliennes
10	60.000	71.50000	24210	Calcaire grossier s.l. d'Ile-de-France
11	71.500	73.50000	24510	Glauconie grossière
12	73.500	77.80000	25040	Argiles de Laon
13	77.800	83.00000	25260	Sables de Cuise-La-Motte

La description lithologique du même forage est plus détaillée :

0156_3X_0391_Litho

INDICE	XL93	YL93	Z_ORIGINE
1 01536X0391	646352.0	6879063	70.00000

Passes de 01536X0391

0

	PROF DEBUT	PROF FIN	Code Litho	Description litho
1	0.000	0.40000	S452	Sol
2	0.400	2.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
3	2.200	2.60000	S338	gypse
4	2.600	3.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
5	3.200	4.20000	S338	gypse
6	4.200	9.00000	S240	marne gypseuse
7	9.000	11.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
8	11.200	14.00000	S234	calcaire
9	14.000	16.50000	S010	argile gypseuse
10	16.500	24.30000	S250	calcaire à silix
11	24.300	26.00000	S237	marne (33%<CO3<66%)
12	26.000	28.40000	S087	sable
13	28.400	32.00000	S093	sable fin
14	32.000	34.50000	S445	sable fin argileux
15	34.500	36.40000	S093	sable fin
16	36.400	37.50000	S238	Marne sableuse
17	37.500	42.50000	S234	calcaire
18	42.500	45.90000	S240	marne gypseuse
19	45.900	48.80000	S235	calcaire argileux (80%<CO3<90%)
20	48.800	56.40000	S234	calcaire
21	56.400	60.00000	S238	Marne sableuse
22	60.000	61.60000	S235	calcaire argileux (80%<CO3<90%)
23	61.600	62.80000	S414	calcaire sableux
24	62.800	63.60000	S237	marne (33%<CO3<66%)
25	63.600	64.40000	S414	calcaire sableux
26	64.400	65.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
27	65.200	71.50000	S414	calcaire sableux
28	71.500	73.50000	S098	sable glauconieux
29	73.500	77.80000	S003	argile sableuse
30	77.800	81.00000	S093	Sable fin grisâtre.
31	81.000	83.00000	S003	argile sableuse

Si on compare les deux tables, on constate par exemple que pour la formation « Marnes et Masses du gypse » intersectée par le forage de 0,4m à 9m de profondeur, on a identifié 4 lithologies successives : marne de 0,4 à 2,2m de profondeur, gypse de 2,2 à 2,6m, puis marne à nouveau de 2,6 à 3,2m et enfin gypse puis marne gypseuse :

01536x0391					01536x0391				
	INDICE	XL93	YL93	Z_ORIGINE		INDICE	XL93	YL93	Z_ORIGINE
1	01536x0391	646352.0	6879063	70.00000	1	01536x0391	646352.0	6879063	70.00000
Passes de 01536x0391					Passes de 01536x0391				
0.4					0.4				
	PROF DEBUT	PROF FIN	Code strati	Nom Formation		PROF DEBUT	PROF FIN	Code Litho	Description litho
1	0.000	0.40000	00100	Sol	1	0.000	0.40000	S452	Sol
2	0.400	9.00000	21120	Marnes et masses du gypse	2	0.400	2.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
3	9.000	11.20000	21150	Marnes à Pholadomya ludensis	3	2.200	2.60000	S338	gypse
4	11.200	16.50000	F0001145	Calcaire de Saint-Ouen s.l.	4	2.600	3.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
5	16.500	24.30000	22680	Calcaire de Saint-Ouen	5	3.200	4.20000	S338	gypse
6	24.300	26.00000	F0001145	Calcaire de Saint-Ouen s.l.	6	4.200	9.00000	S240	marne gypseuse
7	26.000	28.40000	23260	Sables du Guépelle	7	9.000	11.20000	S237	marne (33%<CO3<66%)
8	28.400	36.40000	23030	Sables et grès auversiens	8	11.200	14.00000	S234	calcaire
9	36.400	60.00000	24150	Marnes et caillasses lutésiennes	9	14.000	16.50000	S010	argile gypseuse
10	60.000	71.50000	24210	Calcaire grossier s.l. d'Ile-de-France	10	16.500	24.30000	S250	calcaire à silex
11	71.500	73.50000	24510	Glauconie grossière	11	24.300	26.00000	S237	marne (33%<CO3<66%)

Les deux tables sont alors fusionnées en fonction de la profondeur de façon à obtenir une seule table contenant l'ensemble des informations concaténées :

- lithologie
- stratigraphie
- avec en plus la description lithologie initiale

D'autre part, le champ « code strati » étant trop détaillé par rapport aux besoins de l'étude, on crée un nouveau champ permettant de simplifier la lecture et l'exploitation de la table. On définit ainsi un nouveau code « stratigraphie simplifiée » contenant 5 valeurs :

- « SUP » pour toutes les formations au-dessus des marnes ludiennes,
- « LPSM » pour les formations gypsifères du Ludien, Priabonien, Sannoisien et Marinésien
- « AUV » pour les formations non gypsifères de l'Auverisien
- « CAIL » pour les formations des marnes et caillasses
- « INF » pour toutes les formations situées sous « CAIL ».

Le résultat des prétraitements est visualisé sur l'illustration de la page suivante. On note par exemple dans le forage une passe de 3,2 à 4,2m, soit 1 m d'épaisseur de code « Litho+Strati » = « S338LPSM », donc une passe de gypse « pur » située dans les formations ludiennes ou sannoisiennes ou marinésiennes. Juste en dessous, on observe une passe de 4,2 à 9m (soit 4,8m d'épaisseur) de « S240LPSM », ce qui correspond à du gypse « diffus » (voir liste des codes pour le gypse diffus du tableau de la page suivante). Il ne reste plus qu'à exploiter ce type d'information pour extraire les épaisseurs de gypse « pur » ou « diffus » dans les différentes formations d'intérêt et dans les différentes tranches de profondeur.

01536X0391						
INDICE	XL93	YL93	Z_ORIGINE			
1	01536X0391	646352.0	6879063	70.00000		
Passes de 01536X0391						
PROF DEBUT	PROF FIN	Code strati	Strati Simplifiée	Code Litho	Litho+Strati	Description
0.000	0.40000	00100	SUP	S452	S452SUP	Sol
0.400	0.40000	21120	SUP	S237	S237SUP	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
0.400	2.20000	21120	LPSM	S237	S237LPSM	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
2.200	2.60000	21120	LPSM	S338	S338LPSM	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
2.600	3.20000	21120	LPSM	S237	S237LPSM	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
3.200	4.20000	21120	LPSM	S338	S338LPSM	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
4.200	9.00000	21120	LPSM	S240	S240LPSM	Marne beige tendre à pâteuse, à niveaux de gypse blanc.
9.000	11.20000	21150	LPSM	S237	S237LPSM	Marne. Niveaux des Marnes à pholadomyes ?
11.200	14.00000	F0001145	LPSM	S234	S234LPSM	Calcaire blanc légèrement induré. Traces de gypse d'après le log descriptif.
14.000	16.50000	F0001145	LPSM	S010	S010LPSM	Argile calcaire à marne verdâtre, pâteuse, à gypse blanc.
16.500	24.30000	22680	LPSM	S250	S250LPSM	Calcaire rosé induré à silex.
24.300	26.00000	F0001145	LPSM	S237	S237LPSM	Niveau de marne.
26.000	28.40000	23260	AUV	S087	S087AUV	Sable fin beige à blanchâtre, parfois un peu argileux, à passées de grès fin brun à cin
28.400	32.00000	23030	AUV	S093	S093AUV	Sable fin beige à blanchâtre, parfois un peu argileux, à passées de grès fin brun à cin
32.000	34.50000	23030	AUV	S445	S445AUV	Sable fin beige à blanchâtre, parfois un peu argileux, à passées de grès fin brun à cin
34.500	36.40000	23030	AUV	S093	S093AUV	Sable fin beige à blanchâtre, parfois un peu argileux, à passées de grès fin brun à cin
36.400	37.50000	24150	CAIL	S238	S238CAIL	Marne sableuse
37.500	42.50000	24150	CAIL	S234	S234CAIL	Calcaire beige à microfissures, ou vacuolaire. Gypse abondant
42.500	45.90000	24150	CAIL	S240	S240CAIL	Niveau de marne. Gypse abondant. Présence d'un banc de calcaire vers 43.5m.
45.900	48.80000	24150	CAIL	S235	S235CAIL	Calcaire beige à mouchetures noires, en plaquettes, plus argileux au sommet.
48.800	56.40000	24150	CAIL	S234	S234CAIL	Calcaire beige à mouchetures noires, en plaquettes, plus argileux au sommet.
56.400	60.00000	24150	CAIL	S238	S238CAIL	Marne sableuse gris verdâtre glauconieuse.
60.000	61.80000	24210	INF	S235	S235INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
61.800	62.80000	24210	INF	S414	S414INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
62.800	63.60000	24210	INF	S237	S237INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
63.600	64.40000	24210	INF	S414	S414INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
64.400	65.20000	24210	INF	S237	S237INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
65.200	71.50000	24210	INF	S414	S414INF	Calcaire sableux beige ou verdâtre, glauconieux, de plus en plus sableux vers la base
71.500	73.50000	24510	INF	S098	S098INF	Sable grossier gris à galets noirs, glauconie.
73.500	77.80000	25040	INF	S003	S003INF	Argile sableuse brune pâteuse.
77.800	81.00000	25260	INF	S093	S093INF	Sable fin grisâtre.
81.000	83.00000	25260	INF	S003	S003INF	Argile sableuse brune pâteuse.

Fusion lithologie + stratigraphie. Exemple du sondage 0153-6X-0391.

Code Litho (lexique LGV)	Description	Gypse pur	Gypse diffus
S338	gypse	X	
S240	marne gypseuse		X
S010	argile gypseuse		X
S043	argilite gypseuse		X
S124	grès gypsifère		X
S303	dolomie gypseuse		X

Codes lithologiques correspondant au gypse pur ou au gypse diffus.

Deuxième étape : extraction des épaisseurs de gypse pur ou diffus au droit de chaque sondage

Pour chaque tranche de profondeur (exemple 0-25m), l'algorithme développé identifie si le forage qui intersecte ou pas cette tranche :

- Si le forage intersecte toute la tranche :
 - o % de la tranche intersecté = 100%

- On cumule les épaisseurs de formations gypsifères (gypse pur d'un côté, gypse diffus d'un autre) situées dans la formation demandée (« LPSM » ou « CAIL »)
- Si le forage intersecte une partie de la tranche (il n'est pas assez profond), on regarde dans quelle formation il se termine :
 - Si le forage se termine dans une formation plus ancienne que la formation demandée (exemple sondage se terminant dans « INF » alors qu'on calcule l'épaisseur de gypse dans « CAIL »), on est certain d'avoir identifié toutes les passes de gypse dans la tranche. Sinon il y a risque de présence de gypse sous la fin de forage. Cette information est stockée dans le fichier résultat
 - On cumule également les épaisseurs de gypse diffus ou pur rencontrées par le forage
- Si le forage n'intersecte pas du tout la tranche, c'est qu'il n'est pas assez profond (par exemple sondage de 10m et tranche calculée 25-50m). Dans ce cas, le % intersecté vaut 0 et l'épaisseur de gypse est indéterminée. Toutefois si le forage se termine dans une formation plus ancienne que la formation demandée, l'épaisseur de gypse sera de 0
- Lorsque le sondage intersecte des passes de gypse dans une tranche donnée, on note à titre de renseignement la profondeur début du premier niveau de gypse trouvé ainsi que la profondeur fin du dernier niveau de gypse. Cela permet ensuite de vérifier ou d'interpréter certains résultats si nécessaire.

En sortie de cet algorithme on obtient une table « points » contenant les champs suivants (une table pour chaque tranche de profondeur, pour chaque type de gypse (pur ou diffus), et pour chaque formation (« LPSM » ou « CAIL »), soit 16 tables au total :

- Indice du point BSS
- Coordonnées du point
- Profondeur d'entrée du premier niveau de gypse et profondeur de sortie du dernier niveau de gypse
- Epaisseur cumulée des niveaux de gypse intersectés dans la tranche (EPGY)
- % de longueur de tranche intersectée dans le forage
- Dernière formation rencontrée dans le forage

Troisième étape : Interpolation des épaisseurs de gypse

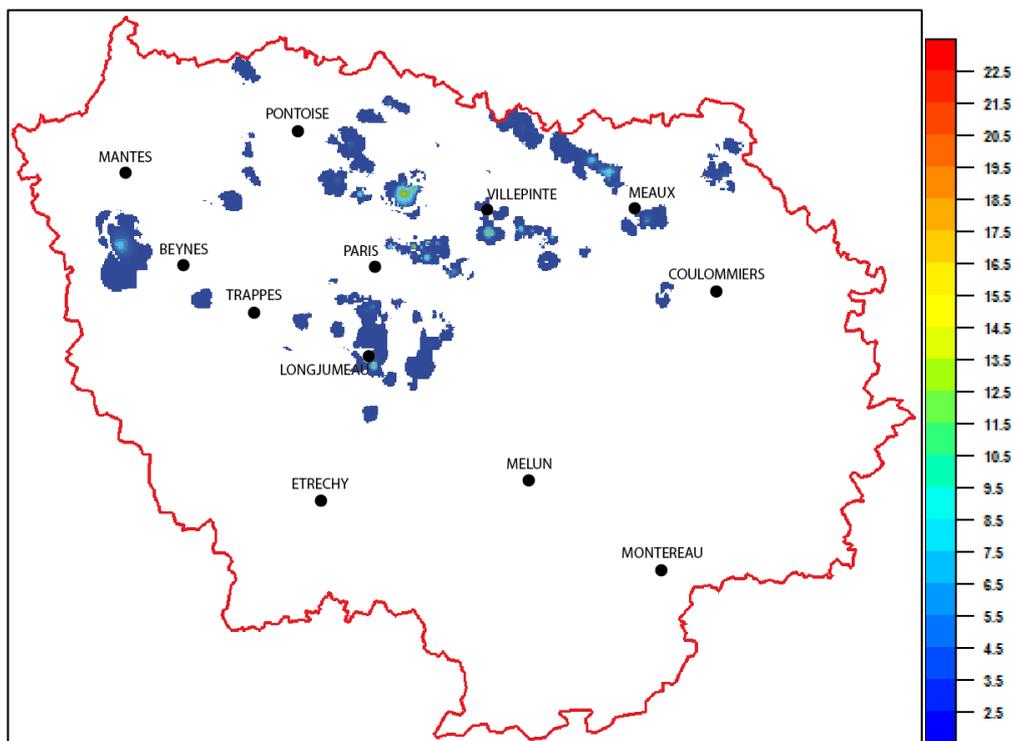
La variable « EPGY » est alors interpolée pour chacun des 16 cas de figure précédent. L'interpolation est contrainte dans l'emprise d'existence de la formation (« LPSM » ou « CAIL ») issue de BDLISA et tronquée à la limite de l'île de France.

L'interpolation est effectuée par krigeage linéaire sans dérive. Pour interpoler en un nœud de grille donnée on utilise les données les plus proches, en faisant en sorte de prendre au maximum 4 données dans chacun des 8 secteurs angulaires autour du nœud de grille (recherche dite « par octants », avec 8 secteurs angulaires de 45° et 4 points maximum par octant, soit un maximum de 32 données voisines). En fin de traitement les zones où l'épaisseur de gypse est égale à 0 ou inférieure à 0,1 m sont « effacées » de façon à ne restituer que les zones de présence de gypse.

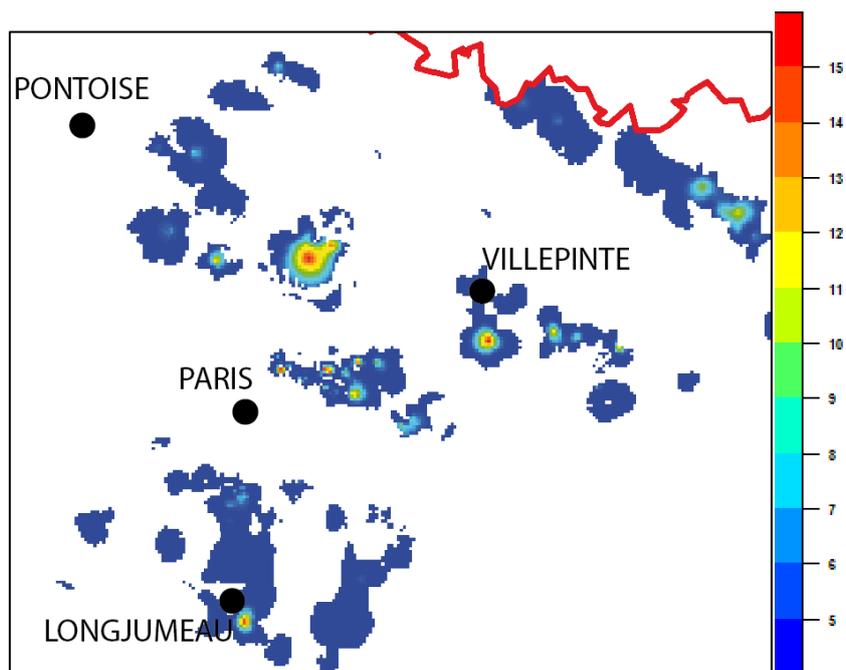
Annexe 2 - Cartes des épaisseurs cumulées du gypse Sannoisien, Ludien et Marinésien

(Argiles vertes, Marnes Blanches de Pantin, Marnes Bleues d'Argenteuil, Marnes et Masses du gypse, Marnes infragypseuses, 4^{ème} Masse de gypse)

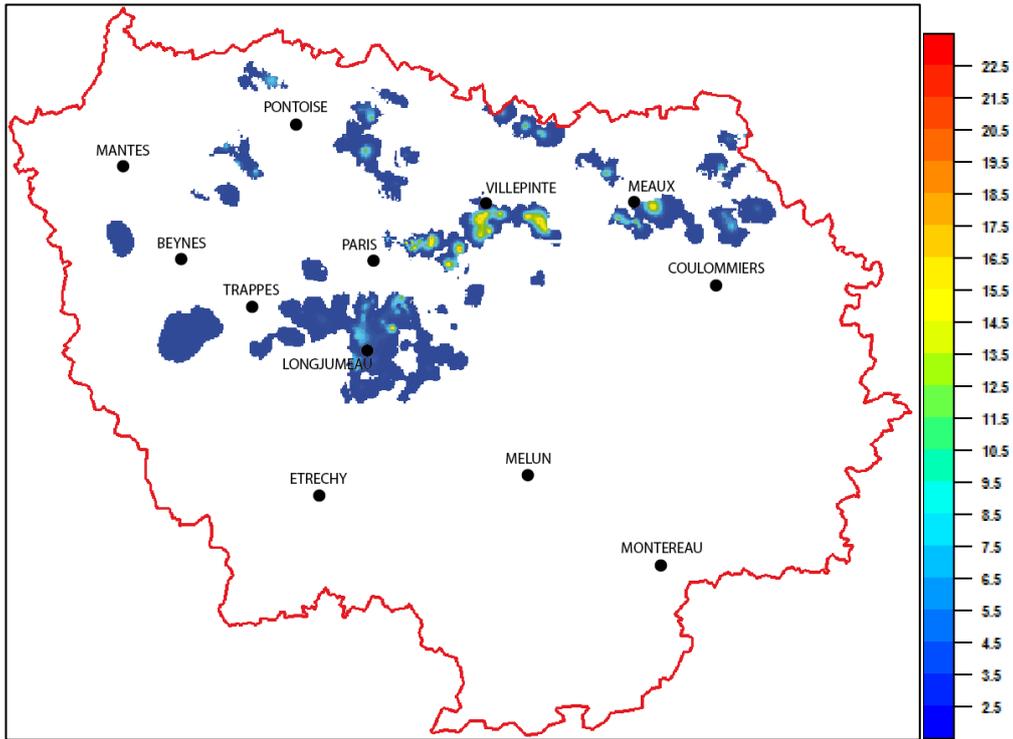
1 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 0-25m (épaisseur min = 0 et max = 25m) :



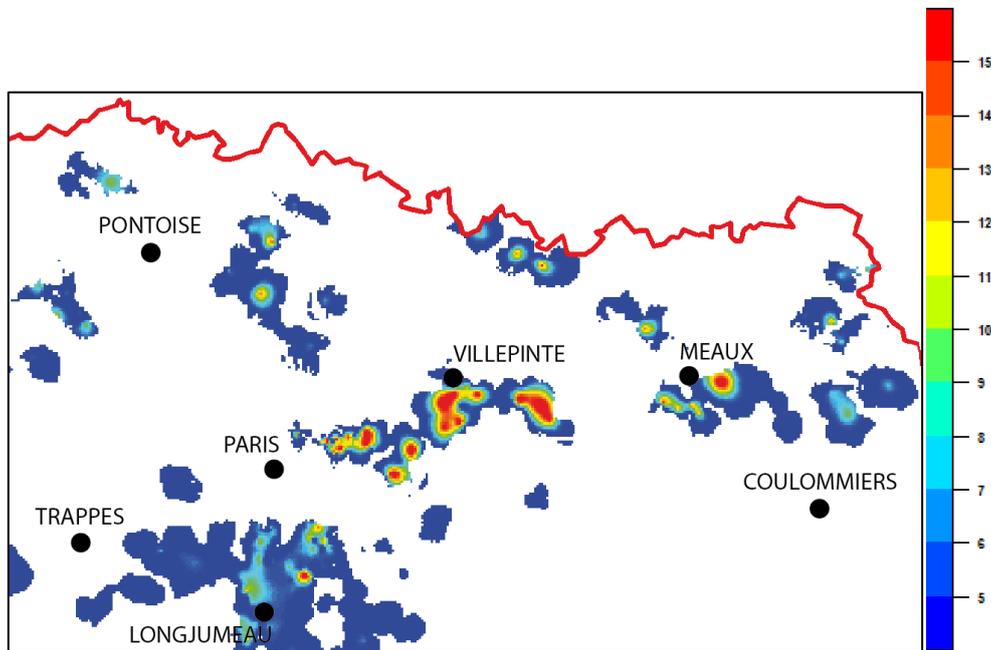
Zoom et changement d'échelle :



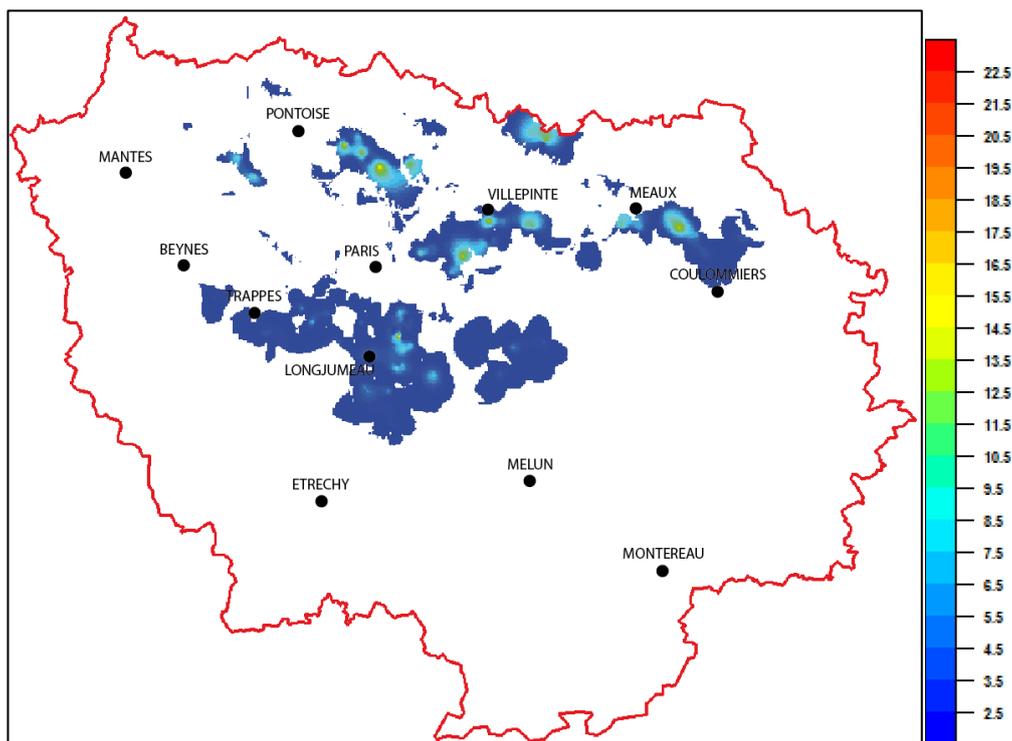
2 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 25-50m (épaisseur min = 0 et max = 23,2m) :



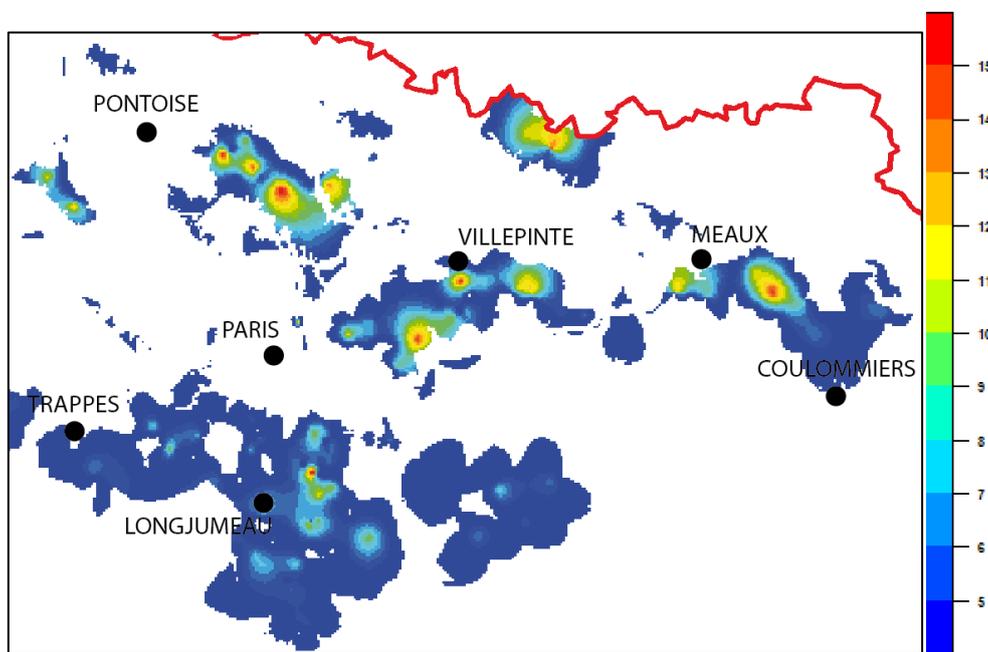
Zoom et changement d'échelle :



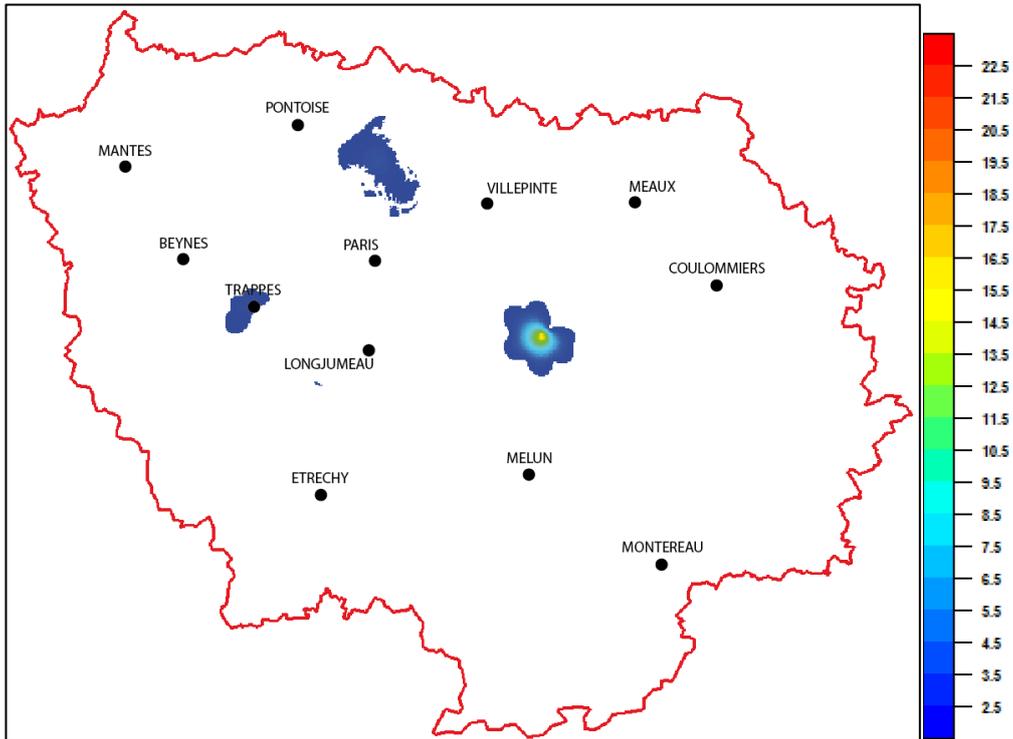
3 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 50-100m (épaisseur min = 0 et max = 19,5m) :



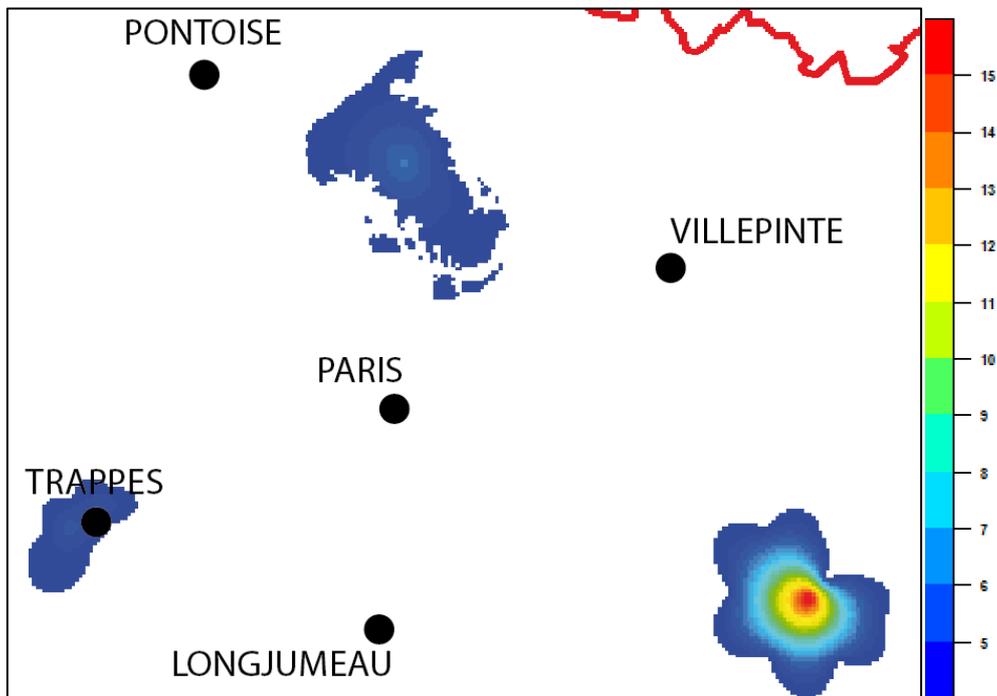
Zoom et changement d'échelle :



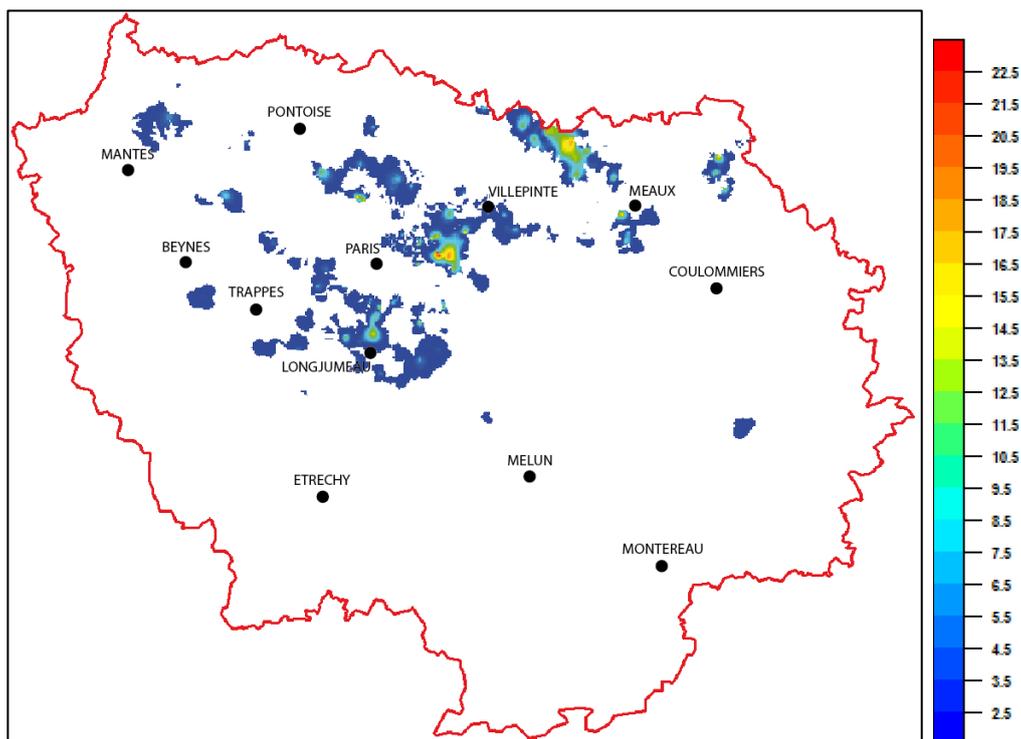
4 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 100-150m (épaisseur min = 0 et max = 16,5m) :



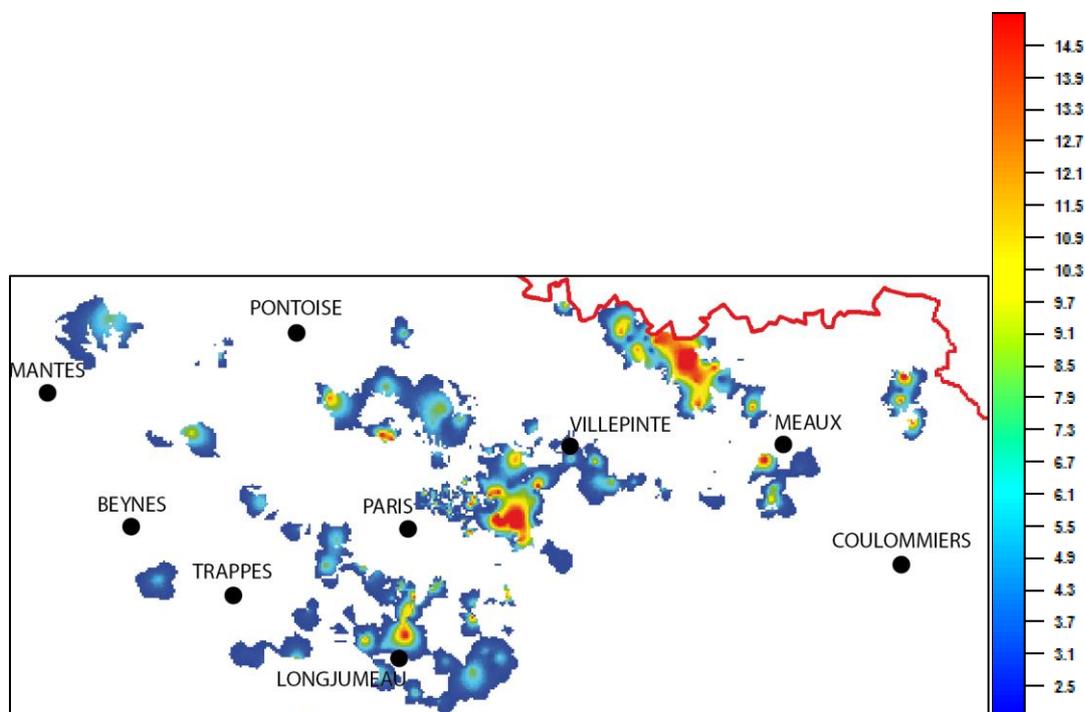
Zoom et changement d'échelle :



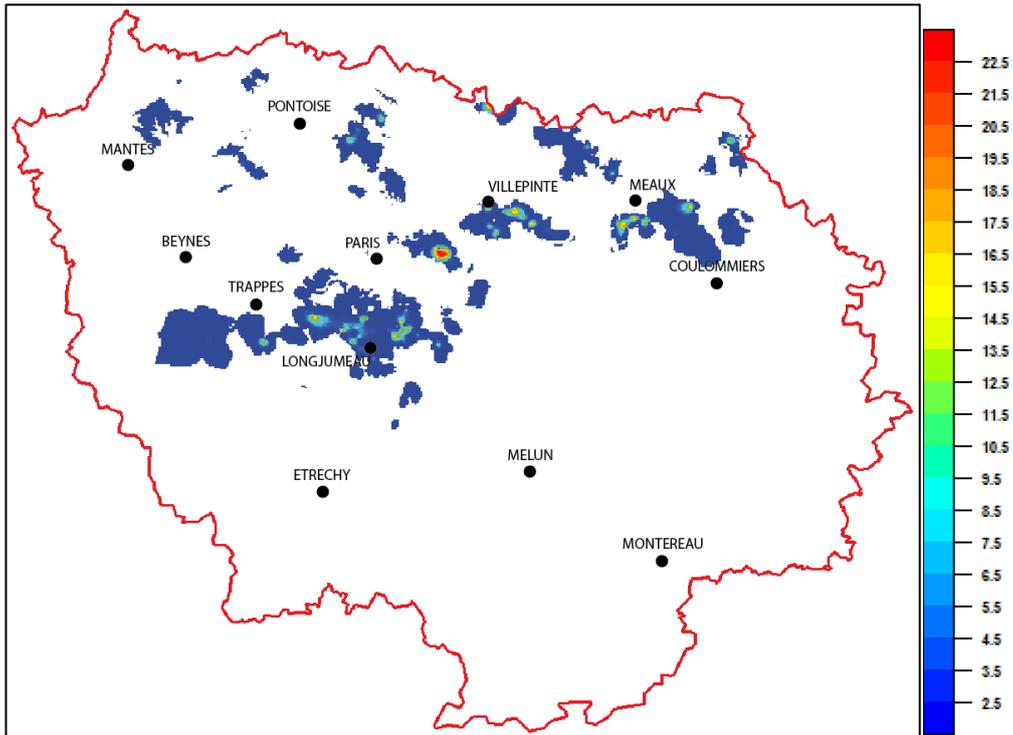
5 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 0-25m (épaisseur min = 0 et max = 22,5m) :



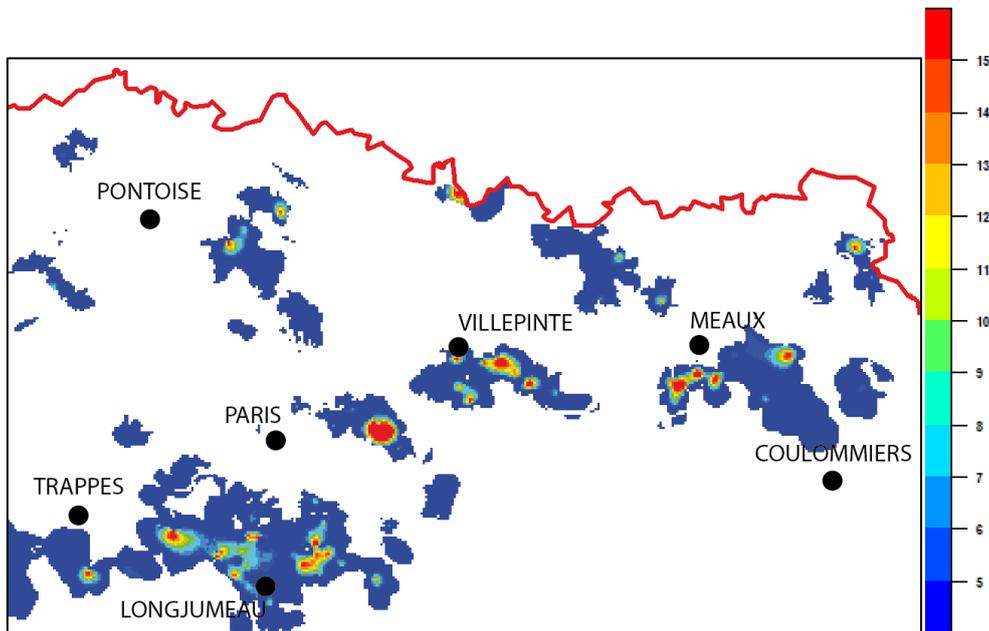
Zoom et changement d'échelle :



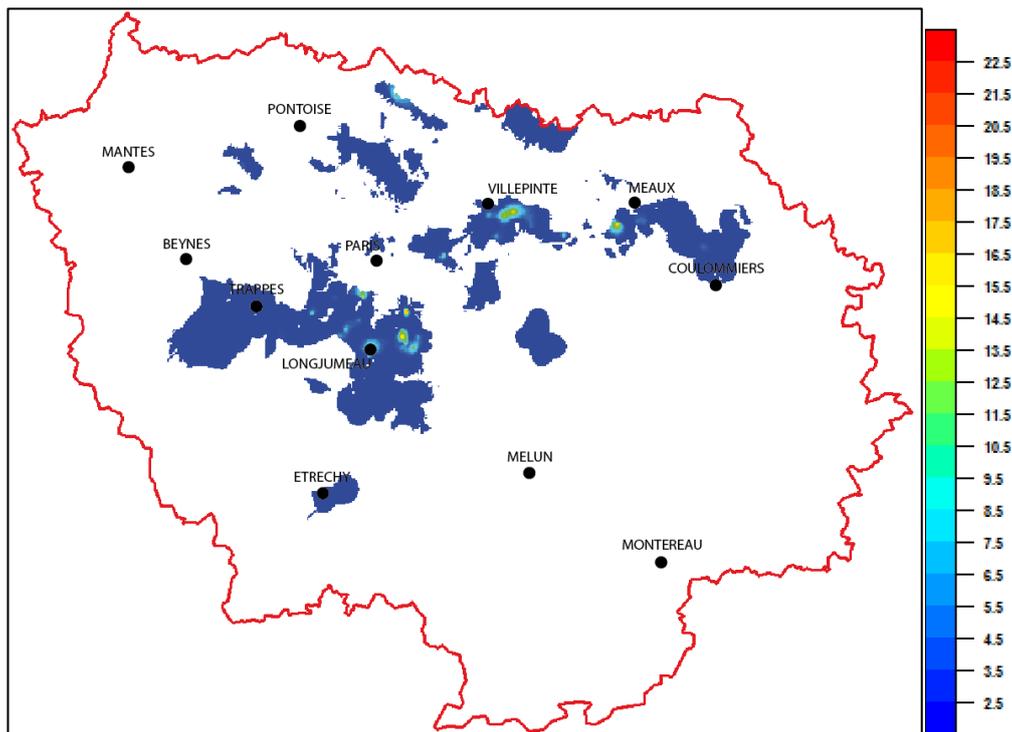
6 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 25-50m (épaisseur min = 0 et max = 25m) :



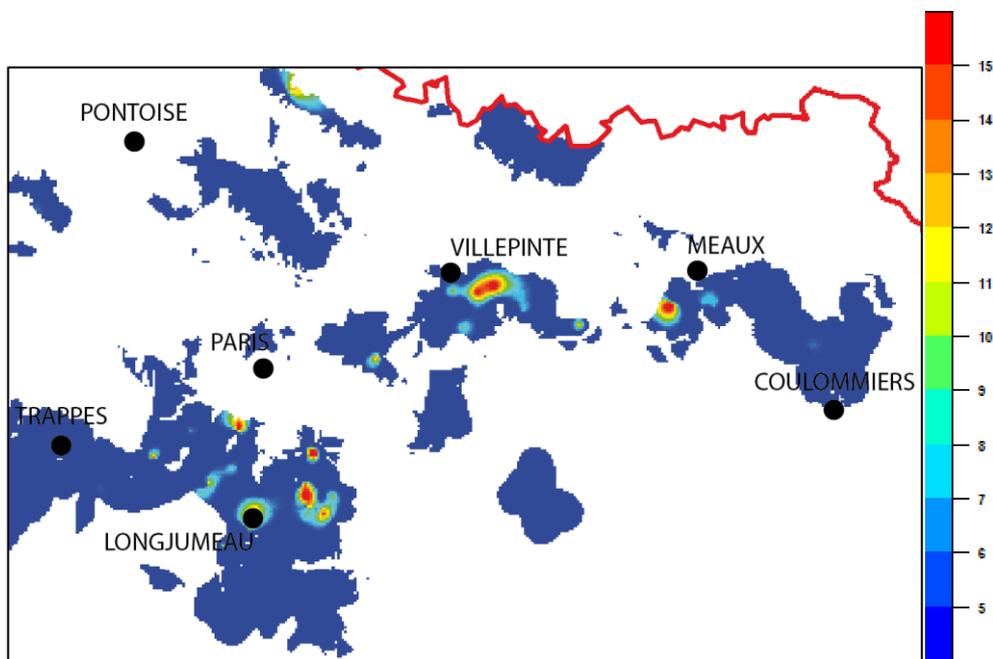
Zoom et changement d'échelle :



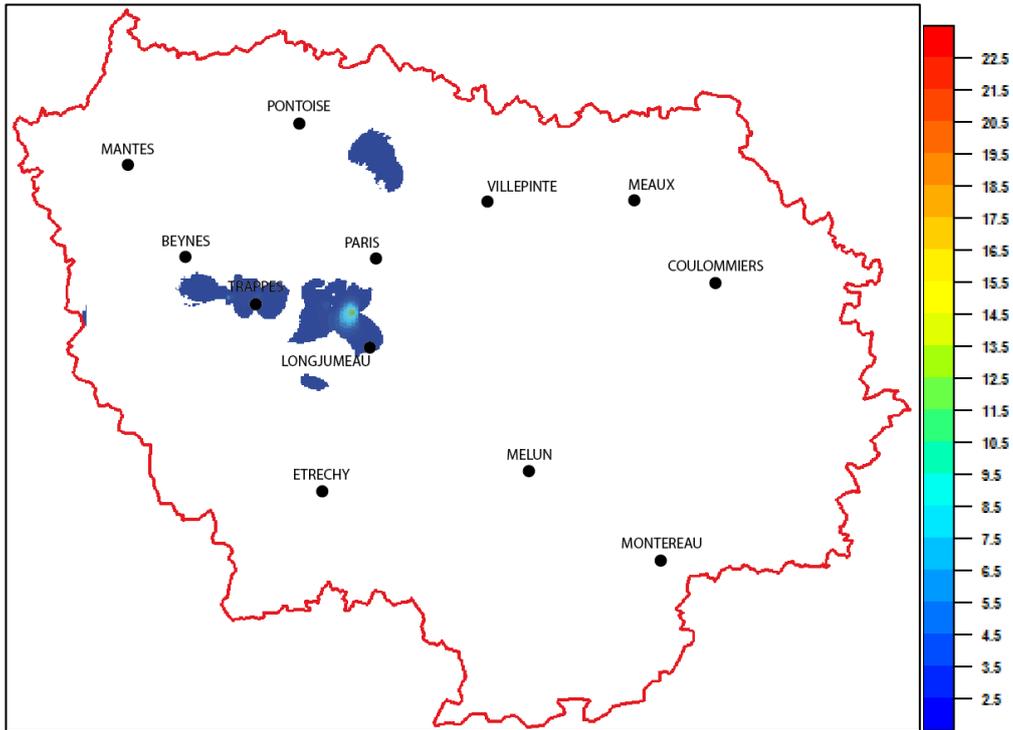
7 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 50-100m (épaisseur min = 0 et max = 28,2m) :



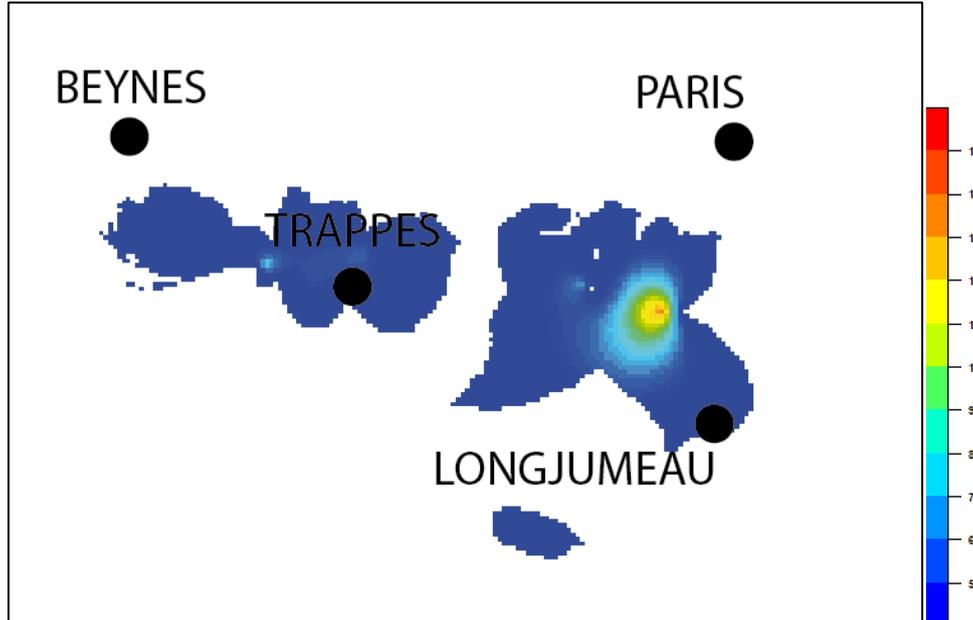
Zoom et changement d'échelle :



8 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans le Ludien et le Marinésien, pour la tranche 100-150m (épaisseur min = 0 et max = 13m) :



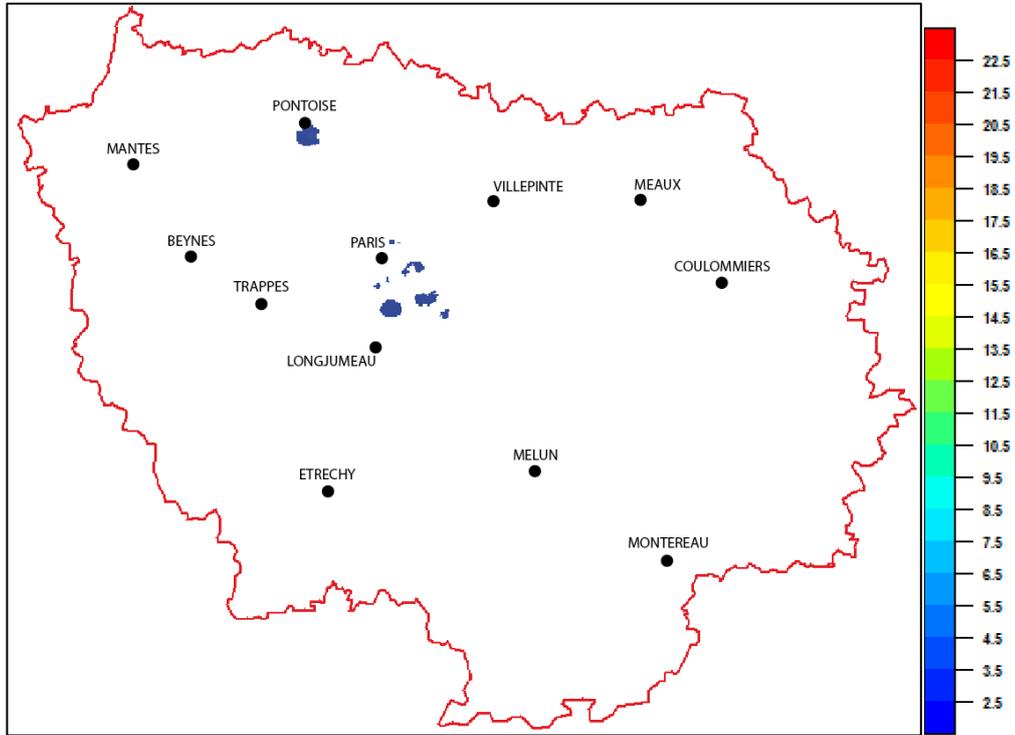
Zoom et changement d'échelle :



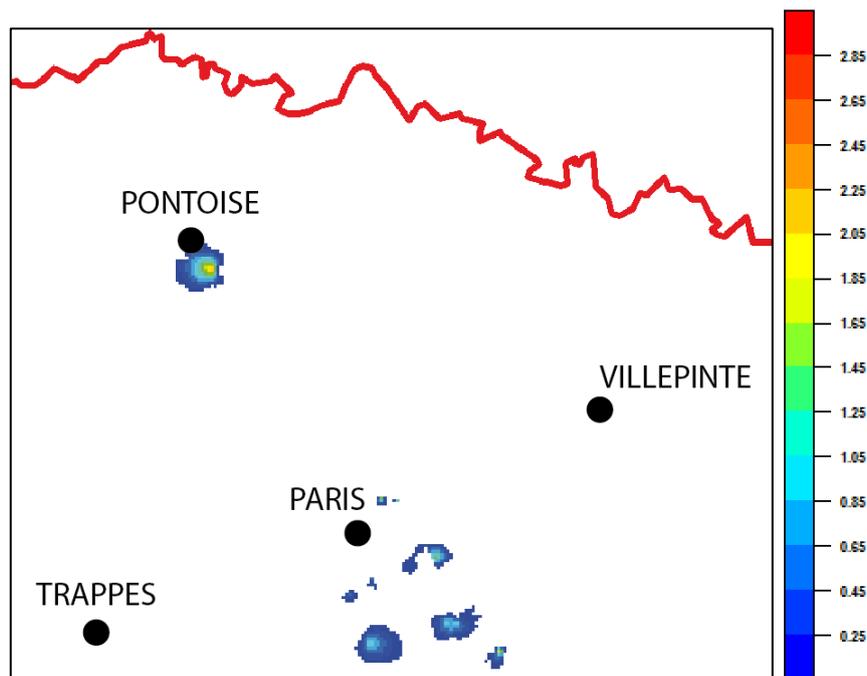
Annexe 3 - Cartes des épaisseurs cumulées du gypse Lutétien et Bartonien inférieur

(Marnes et Caillasses)

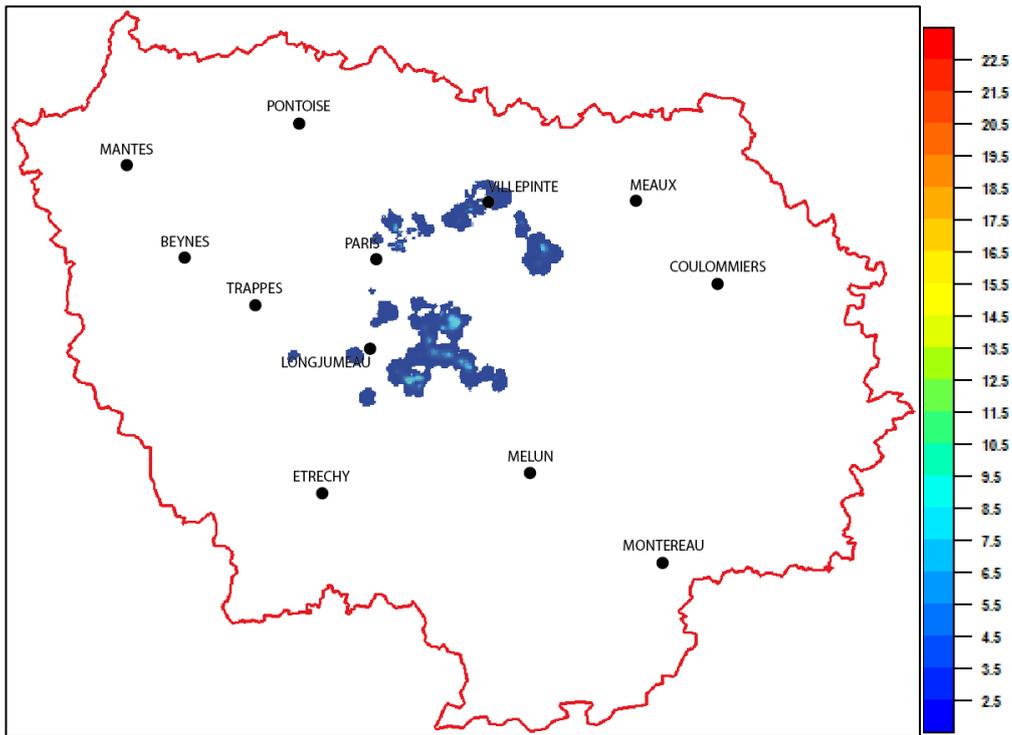
1 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 0-25m (épaisseur min = 0 et max = 2,5m) :



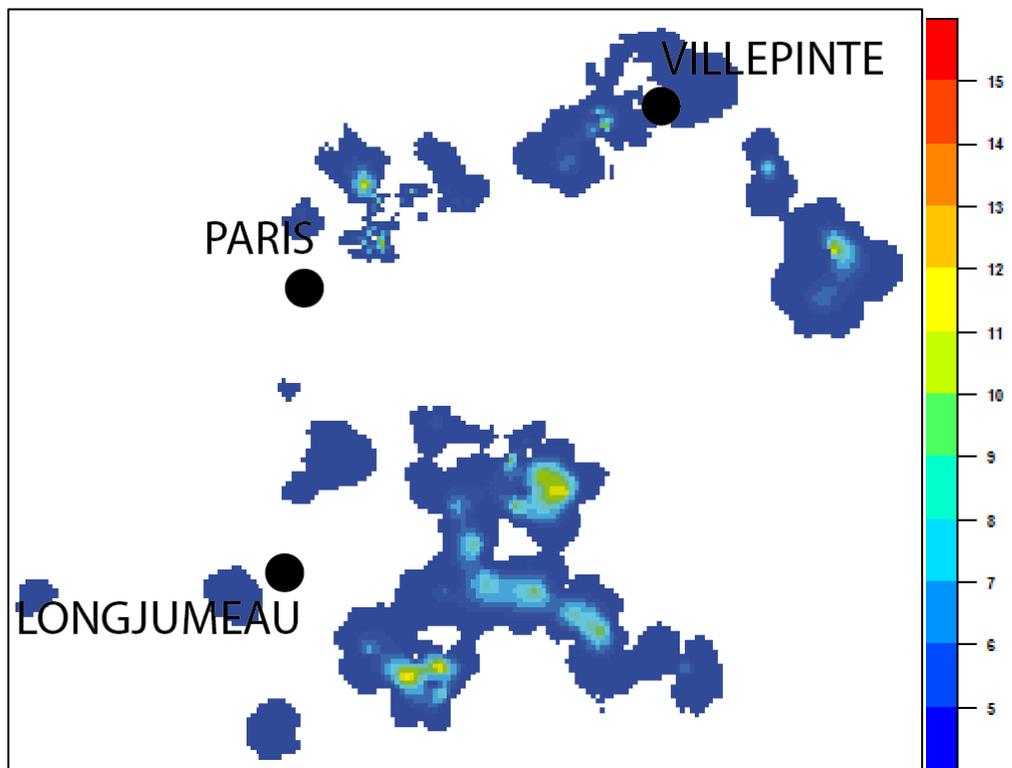
Zoom et changement d'échelle :



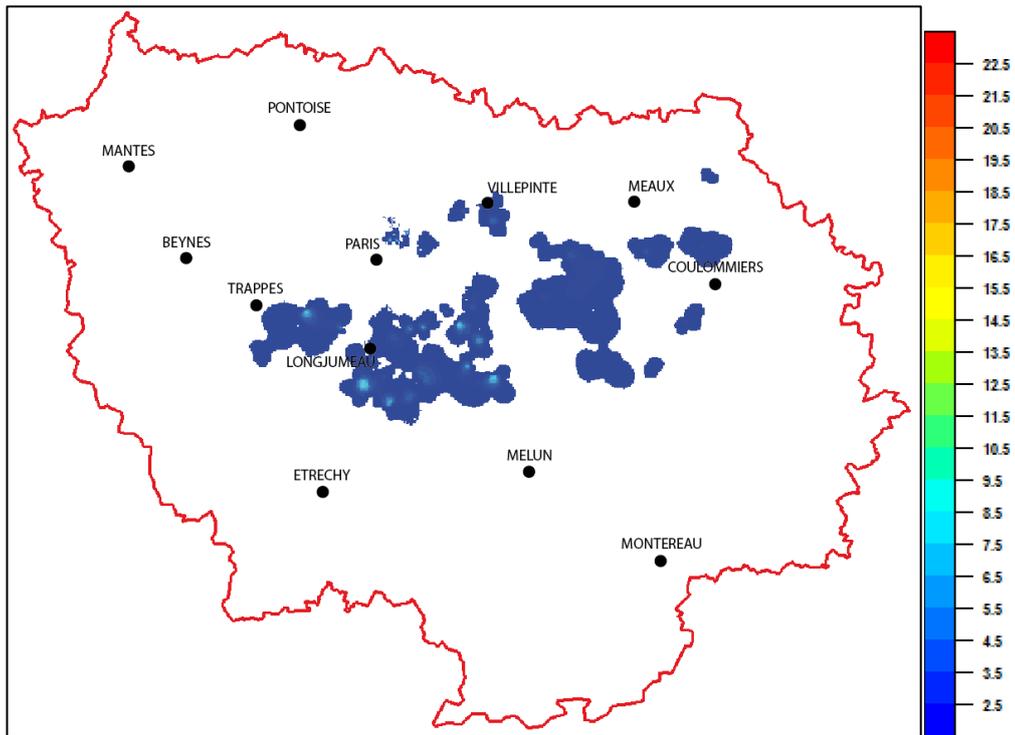
2 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 25-50m (épaisseur min = 0 et max = 13,7m) :



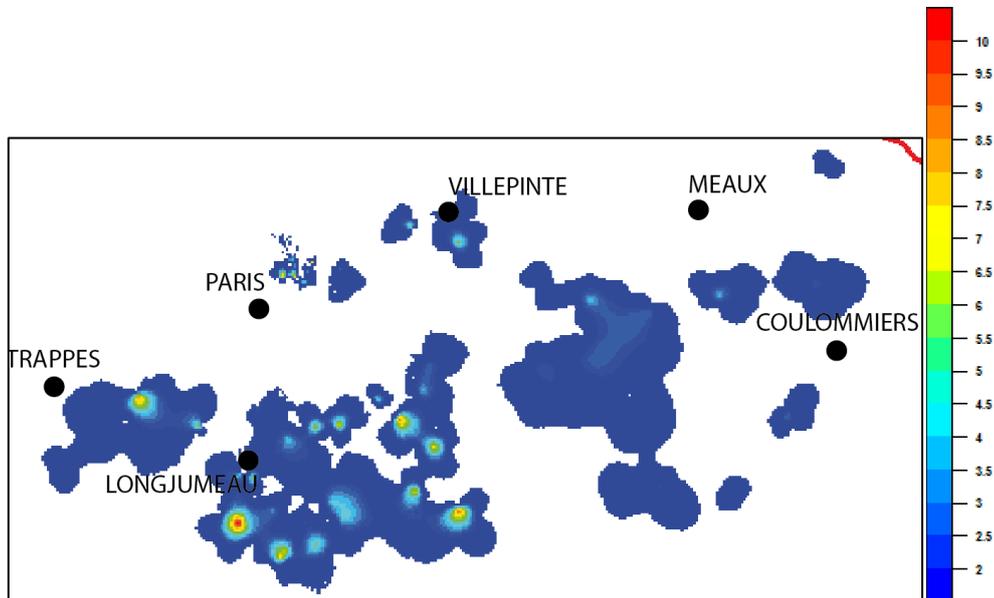
Zoom et changement d'échelle :



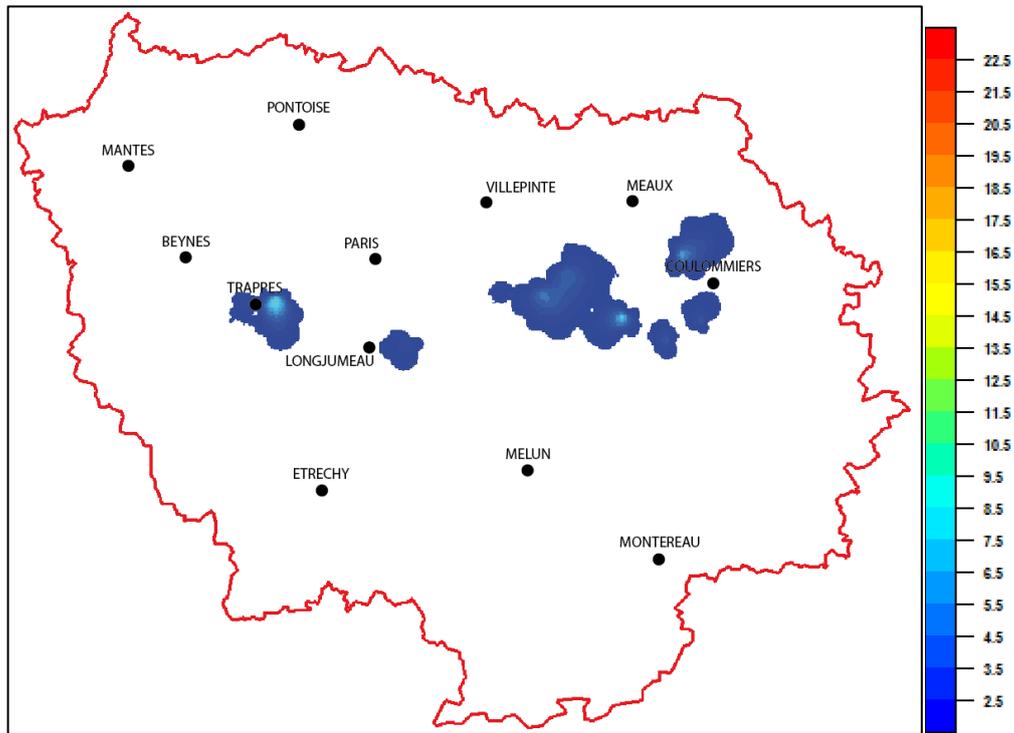
3 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 50-100m (épaisseur min = 0 et max = 11,8m) :



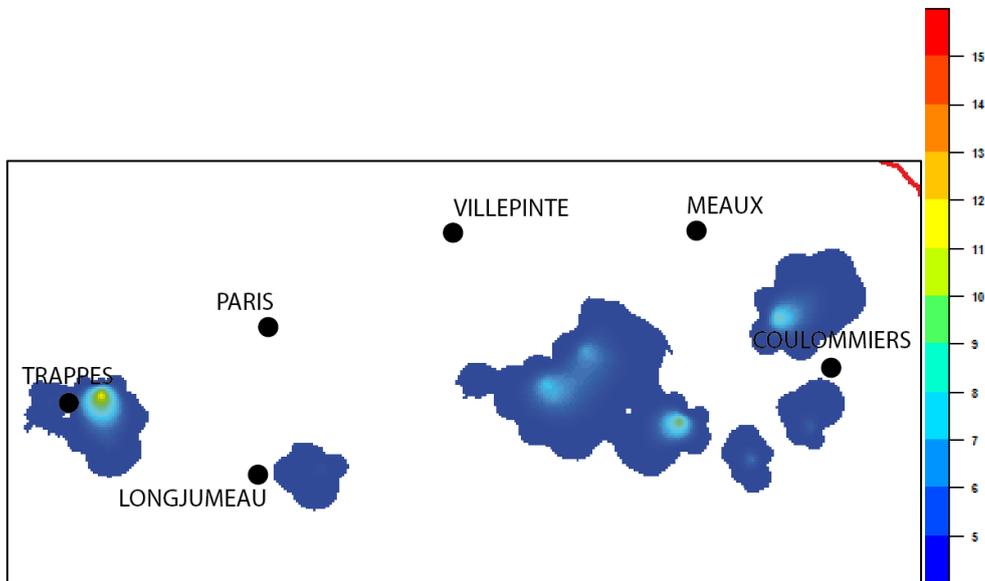
Zoom et changement d'échelle :



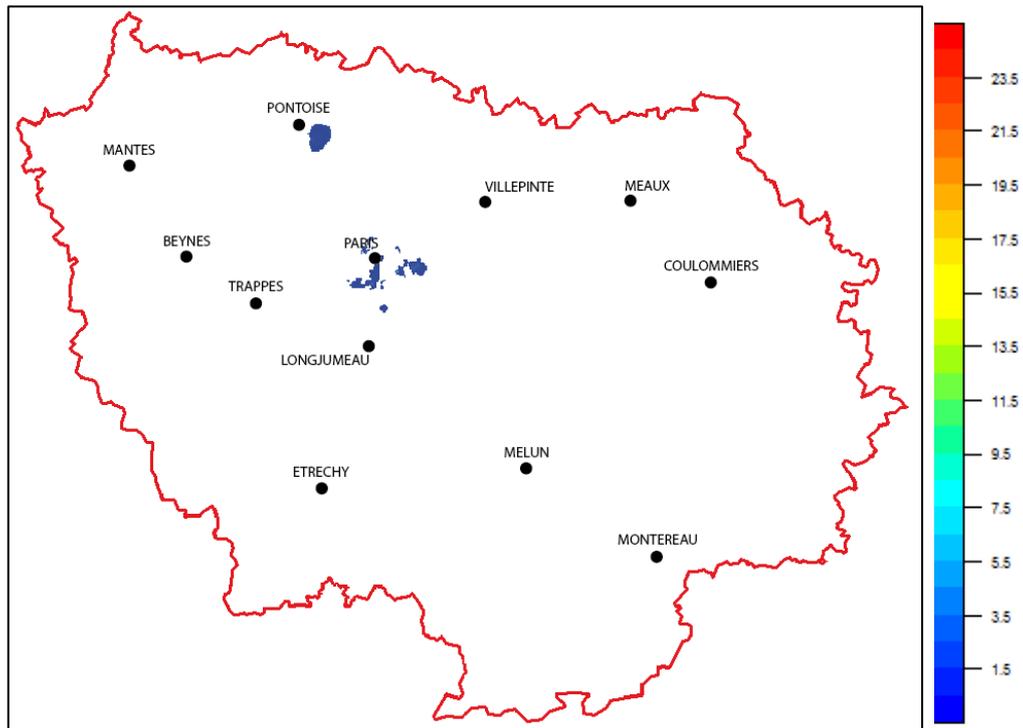
4 - Epaisseur cumulée de gypse bien défini dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 100-150m (épaisseur min = 0 et max = 10m) :



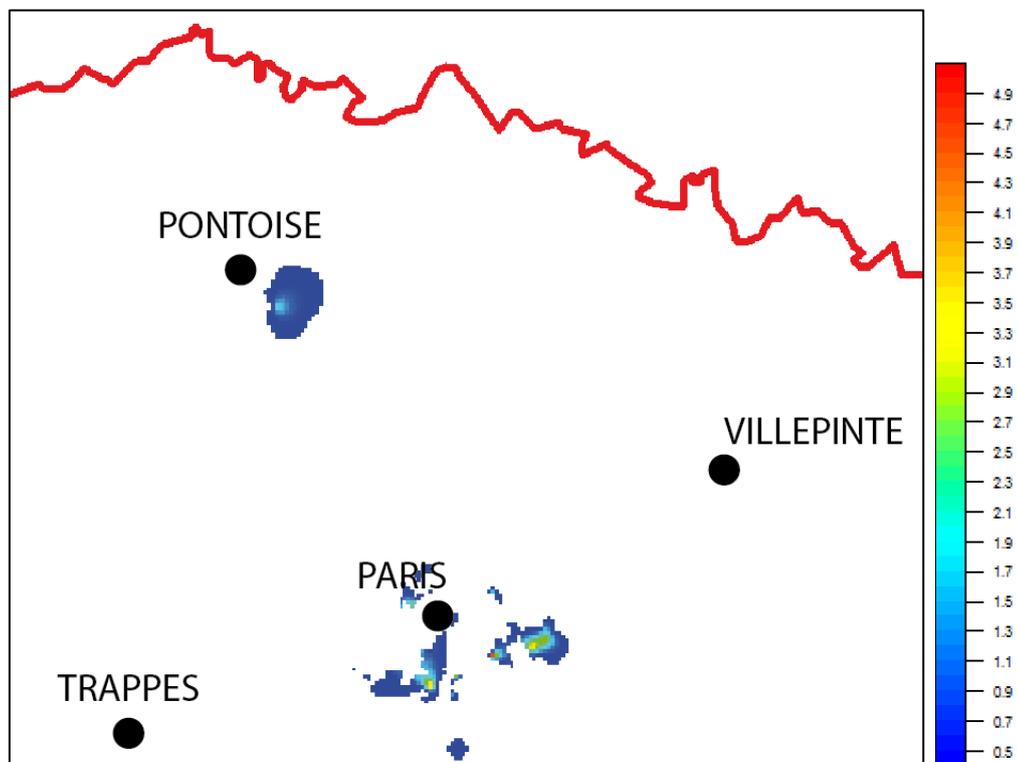
Zoom et changement d'échelle :



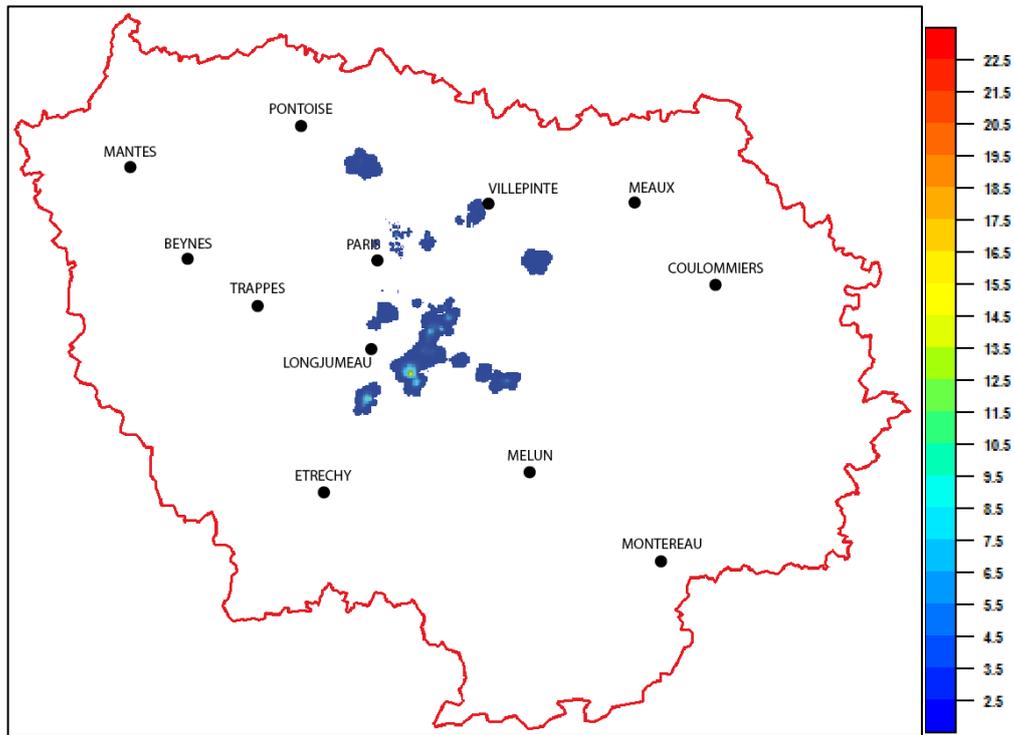
5 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 0-25m (épaisseur min = 0 et max = 4,53m) :



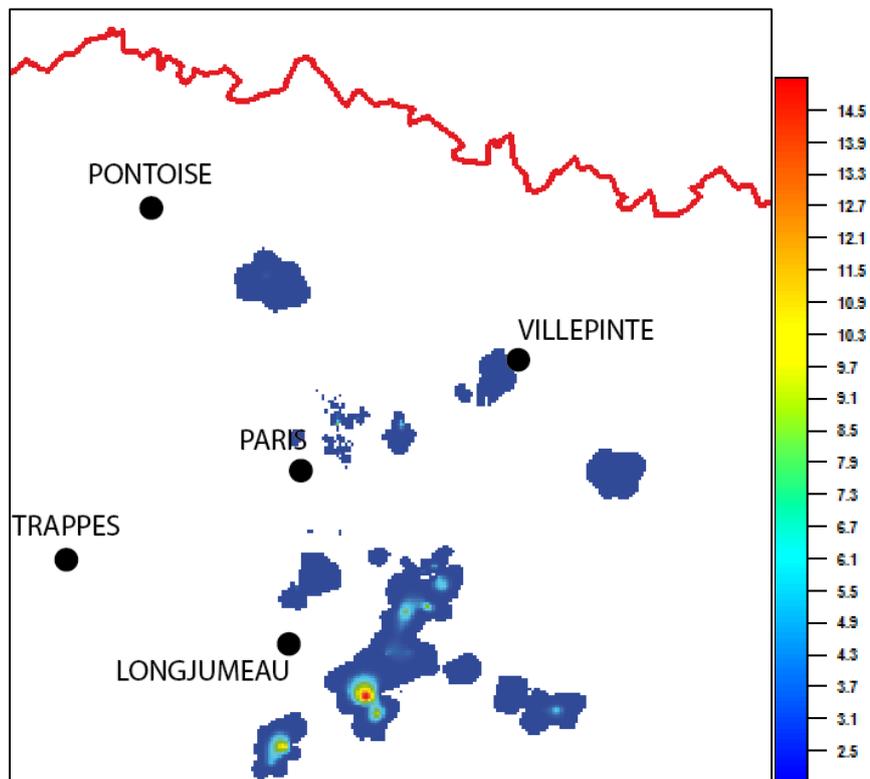
Zoom et changement d'échelle :



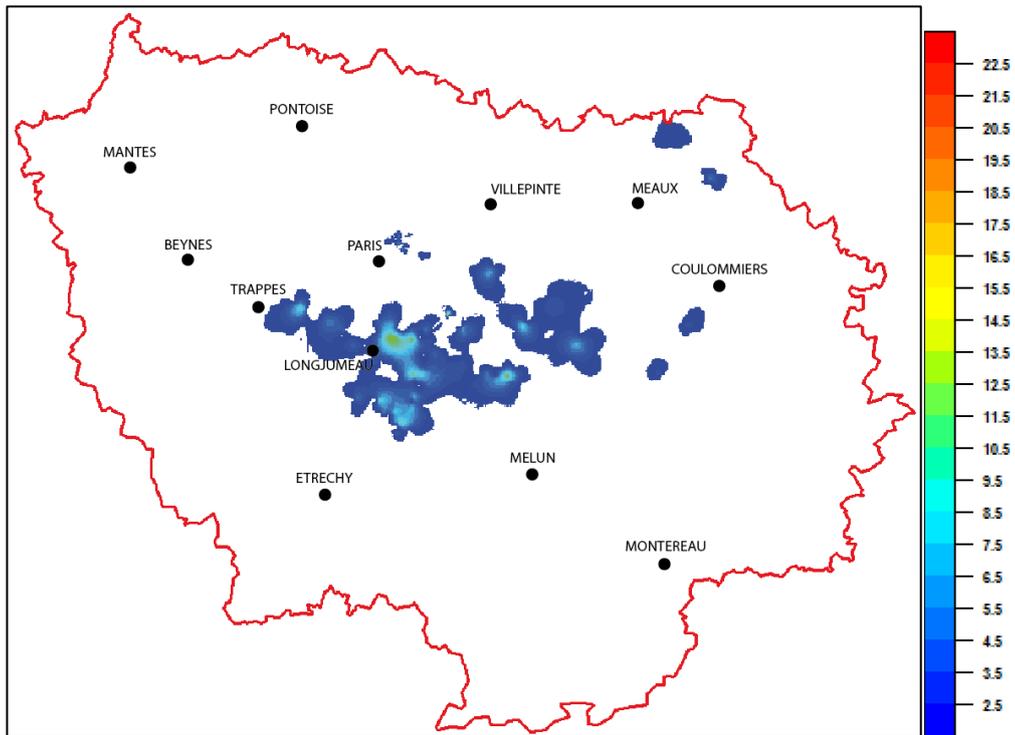
6 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 25-50m (épaisseur min = 0 et max = 17m) :



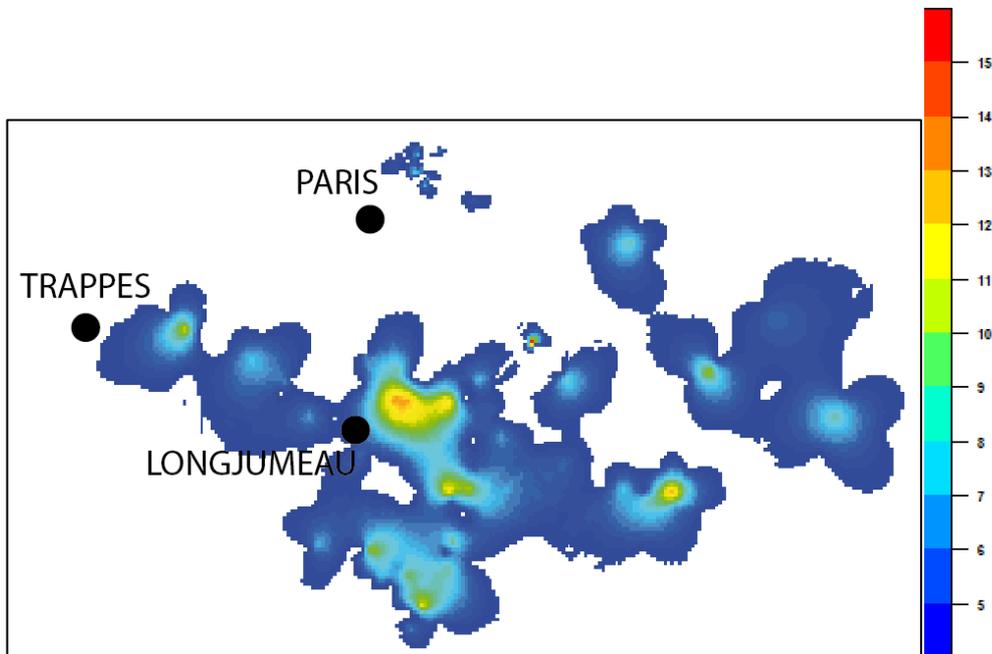
Zoom et changement d'échelle :



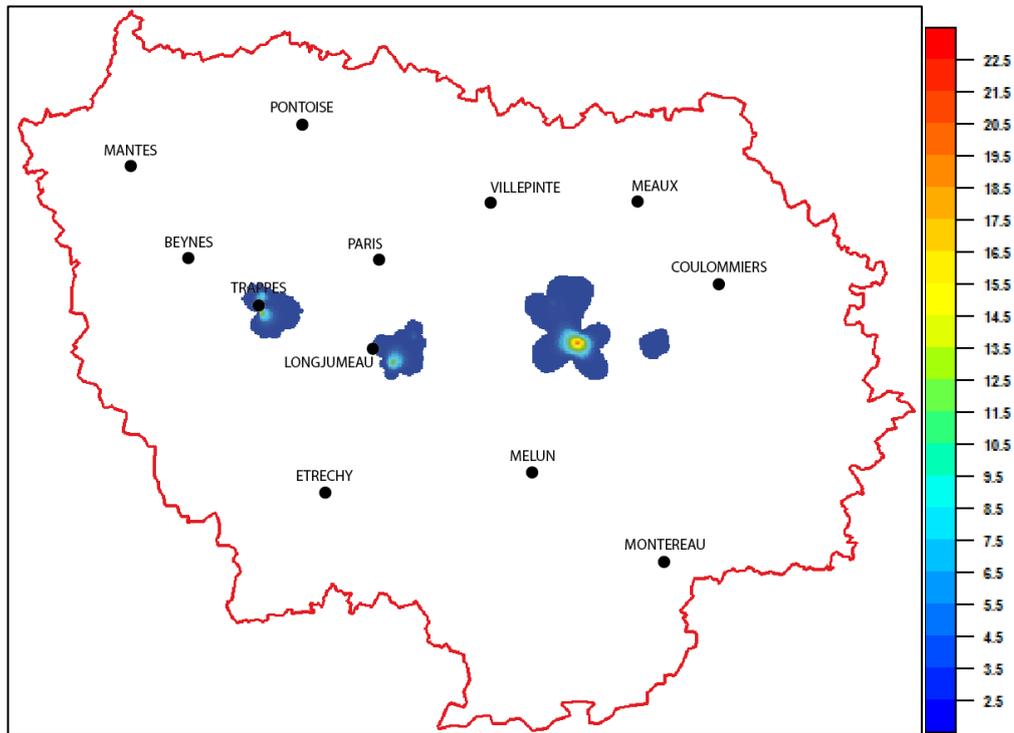
7 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 50-100m (épaisseur min = 0 et max = 20,8m) :



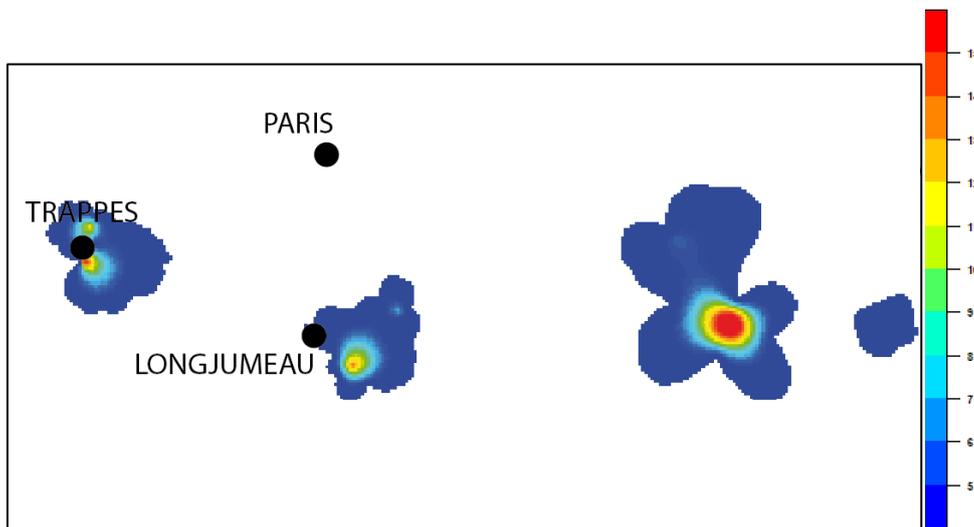
Zoom et changement d'échelle :



8 - Epaisseur cumulée de gypse mal défini ou diffus dans les Marnes et Caillasses, pour la tranche 100-150m (épaisseur min = 0 et max = 22,9m) :



Zoom et changement d'échelle :





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