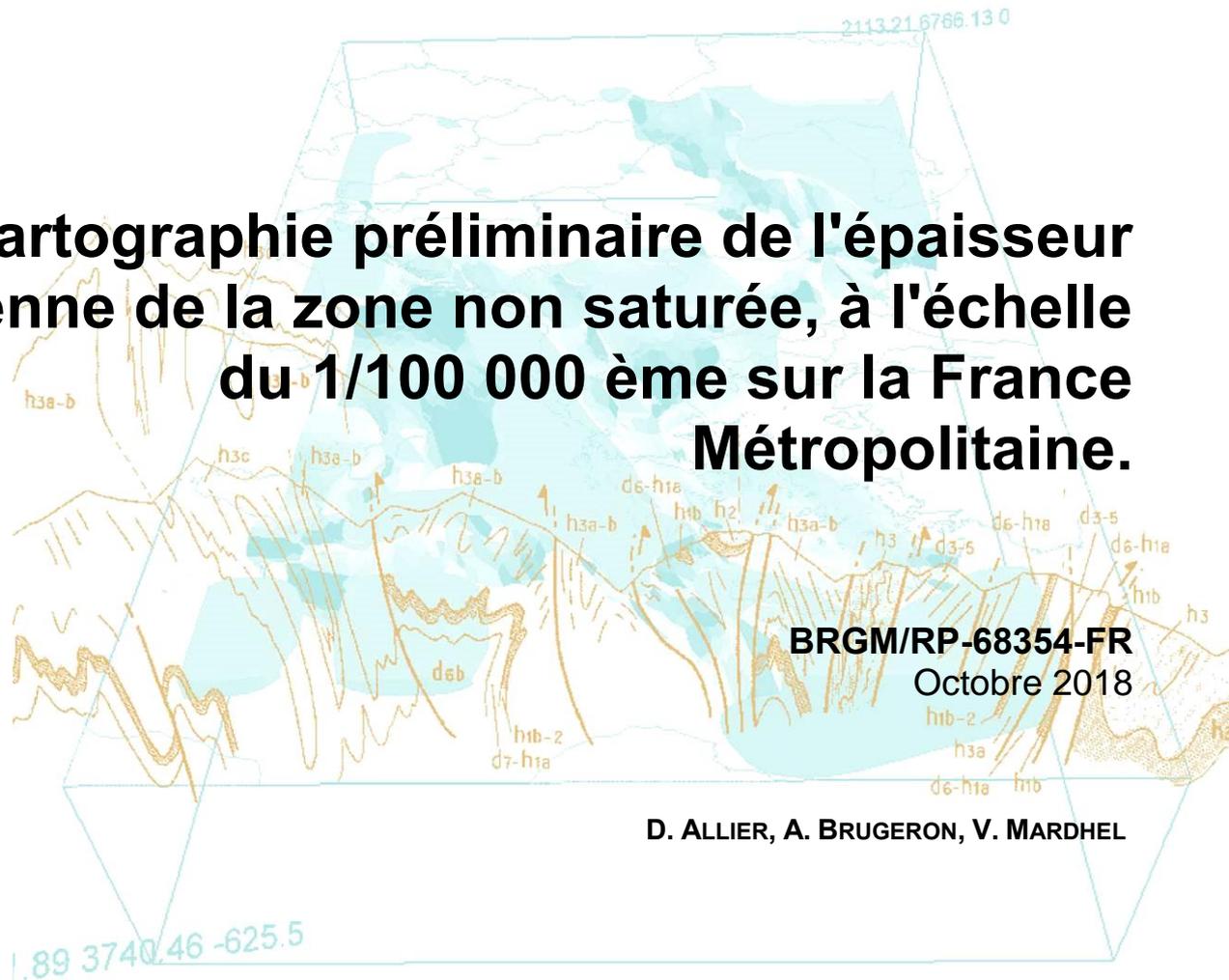




Cartographie préliminaire de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, à l'échelle du 1/100 000 ème sur la France Métropolitaine.



BRGM/RP-68354-FR
Octobre 2018

D. ALLIER, A. BRUGERON, V. MARDHEL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Ce document a été vérifié par : Pinson Stéphanie, Hydrogéologue date : 18/12/2018

Approbateur :

Nom : L. Gourcy Fonction : Responsable d'unité Date : 19/12/2018 Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié
par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots clés : Zone non saturée, nappe, niveau piézométrique, France

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

D. Allier, A. Brugeron, V. Mardhel (2018) – Cartographie préliminaire de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, à l'échelle du 1/100 000 ème sur la France Métropolitaine. Rapport BRGM/RP-68354-FR, 20 p., 11 fig.

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

Sommaire

1. Introduction	5
2. Données utilisées	6
2.1. OUVRAGES RECENSES DANS LA BANQUE DE DONNEES DU SOUS-SOL.....	6
2.2. PIEZOMETRES (SOURCE DE DONNEES : ADES)	7
2.3. CARTES PIEZOMETRIQUES	10
2.3.1. Recueil et analyse critique des données	10
2.3.2. Préparation de données	12
2.4. AJOUT DE POINTS DE CALAGE	14
3. Estimation de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée	15
3.1. INTERPOLATION SPATIALE.....	15
3.2. MASQUE INDIQUANT LES ZONES OU L'INTERPOLATION N'EST PAS VALIDE	15
3.3. INCERTITUDES SUR LA CARTE OBTENUE	17
4. Conclusion/Discussions	20

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de répartition des 131 820 points d'eau issus de la BSS	7
Illustration 2 : Carte de répartition des 2755 piézomètres présentant une chronique de plus de 5 ans (source : portail ADES)	8
Illustration 3 : Chronique piézométrique exprimée en profondeur relative (m) par rapport au repère de mesure du piézomètre.....	9
Illustration 4 : Chronique exprimée en cote NGF (m) du piézomètre.....	9
Illustration 5 : Répartition des 155 cartes piézométriques disponibles pour l'étude	11
Illustration 6 : Niveau moyen des nappes en cote NGF par interpolation des cartes piézométriques.....	13
Illustration 7 : Répartition des points issus des couples HE/BE des cartes piézométriques avec l'exemple de la Région Basse-Normandie.....	14
Illustration 8 : Carte géologique de la France au millionième (©BRGM)	16
<i>Illustration 9 : Carte du niveau moyen des nappes réalisée à partir de l'ensemble des données ponctuelles(12/2012) - en grisé les zones où la méthode ne s'applique pas</i>	<i>17</i>
Illustration 10 : Carte présentant la densité des piézomètres issus de la base ADES	18
Illustration 11 : Carte présentant la densité des points d'eau issus de la BSS pour lesquels une mesure de niveau d'eau existe	19

Carte préliminaire de l'épaisseur moyenne de la ZNS

1. Introduction

Sur le territoire français métropolitain, de nombreuses informations relatives à la profondeur des nappes sont disponibles : cartes piézométriques, suivi ponctuel sur un piézomètre, données obtenues via la déclaration d'un ouvrage (puits, forage, etc.).

Ces données, ponctuelles ou surfaciques, sont bancarisées dans différentes bases de données et sont diffusées via plusieurs portails (ADES : <http://www.adeseaufrance.fr/>, Banque de données du sous-sol-BSS : <http://infoterre.brgm.fr/>, cartes piézométriques sur les SIGES, par exemple : <http://sigescen.brgm.fr/>).

Bien que disparates, elles donnent une indication de la profondeur de la nappe et à l'aide des techniques de géostatistiques, il est possible de les exploiter pour en tirer, en tout point du territoire, une estimation de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (ZNS).

Cette estimation, réalisée par le BRGM, pourra être utilisée à l'échelle nationale voire régionale comme un indicateur spatial dans les études de vulnérabilité des eaux souterraines, dans l'analyse des phénomènes de remontées de nappe¹ et pour diverses problématiques (étude des zones humides, risques d'effondrement, ...).

Avertissement : Ce rapport décrit un travail réalisé en grande partie sur la période 2011-2013. La collecte de données date entièrement de cette période. D'autres données ont été acquises depuis et pourraient permettre d'affiner ce travail.

¹ Nota bene : il existe une carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe, disponible sur <http://www.georisques.gouv.fr> (Brugeron et al., 2018)

2. Données utilisées

2.1. OUVRAGES RECENSES DANS LA BANQUE DE DONNEES DU SOUS-SOL

Le Code Minier (Titre VIII du Code Minier Français, Articles 131 à 136) rend obligatoire la déclaration des ouvrages d'une profondeur supérieure à 10 m et les nouvelles dispositions de la Loi sur l'Eau entraînent également la déclaration des ouvrages « eau » sans distinction de profondeur. Dans le cadre déclaratif prévu par la loi, l'appellation d'ouvrage s'applique à divers types de travaux : carrière, puits, tunnel, sondage, forage, source captée...

Le BRGM est chargé, par ses ministères de tutelle, de gérer ces informations sur le sous-sol et de les mettre à disposition d'un large public. De ce fait, l'ensemble des dossiers sont disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) qui est in fine une base déclarative. Les informations données sur les ouvrages en BSS sont renseignées uniquement à la création de l'ouvrage mais ne sont pas systématiquement actualisées au cours de la vie de l'ouvrage (type d'exploitation, activité, état...)

Des données plus spécifiques aux ouvrages d'eau suivis sont également disponibles dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES, cf. paragraphe suivant).

Les ouvrages décrits dans ces deux bases de données sont des forages (pour différents types d'usages : irrigation des cultures, production d'eau pour la consommation humaine, l'abreuvement animal, surveillance des nappes, géothermie,...), des puits, des sources (aménagées ou non), des piézomètres², des qualitomètres (stations de suivi de la qualité des eaux). L'interrogation d'un point sur un portail web (<http://infoterre.brgm.fr>, <http://ades.eaufrance.fr>) donne accès aux informations de ce point d'eau : coupe géologique et technique, données relatives à la quantité, à la qualité, etc.

Tous les ouvrages « eau » recensés dans la BSS et possédant une valeur de profondeur d'eau ont été extraits de la base de données. Cela représente 139 975 points, pour la zone étudiée (France métropolitaine, extraction faite en 2011).

Ces données ont ensuite été analysées et éventuellement corrigées, si nécessaire. À titre d'exemple, les valeurs de profondeur qui paraissaient incohérentes (erreur de saisie dans la BSS, confusion entre profondeur de l'eau et de l'ouvrage, etc...) ont été corrigées, quand cela était possible, ou supprimées.

Après cette phase de vérification, il reste 131 820 points d'eau sur lesquels des données de niveau d'eau existent ponctuellement ou sur une certaine période de suivi (Illustration 1).

² Un piézomètre est un dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en point donné de l'aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. (Source : *Dictionnaire français d'hydrogéologie* par G. Castany et J. Margat)

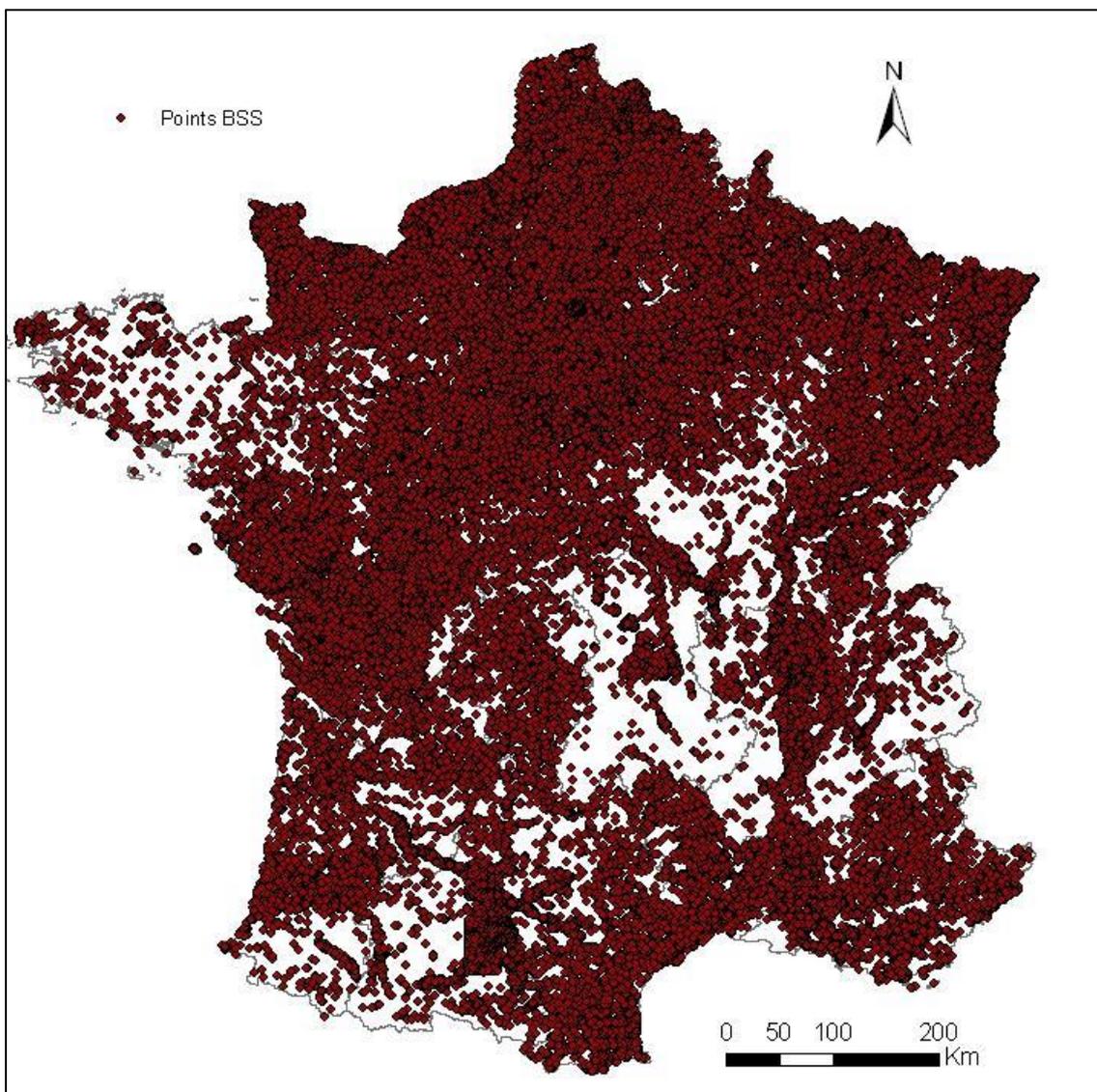


Illustration 1 : Carte de répartition des 131 820 points d'eau issus de la BSS

La répartition de ces points montre une hétérogénéité spatiale, avec moins de points dans les zones de socle (massif central, massif armoricain) et de montagne (Alpes, Pyrénées). La totalité de ces 131 820 points sont rassemblés dans une base de données géographiques (géodatabase ©ESRI) dans laquelle sont renseignés la profondeur d'eau, l'altitude, le code BSS unique, les coordonnées associées ainsi que la date de mesure du niveau d'eau.

2.2. PIEZOMETRES (SOURCE DE DONNEES : ADES)

[ADES](#) est la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines qui rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Les données extraites pour cette étude proviennent des 3 900 piézomètres répartis sur l'ensemble du territoire qui mesurent à pas de temps régulier le niveau de l'eau et dont les données étaient disponibles en 2011 (date de l'extraction).

L'illustration 2 présente la répartition des 2755 piézomètres pour lesquels une chronique de mesures régulières existe depuis plus de 5 ans. La répartition spatiale de ces piézomètres est hétérogène, avec une densité de points plus faibles dans les zones d'aquifères de socle et les aquifères intensément plissés de montagne que dans les secteurs de plaines alluviales (Alsace, embouchure de la Garonne, vallées de la Saône et du Rhône) et des grands bassins sédimentaires.

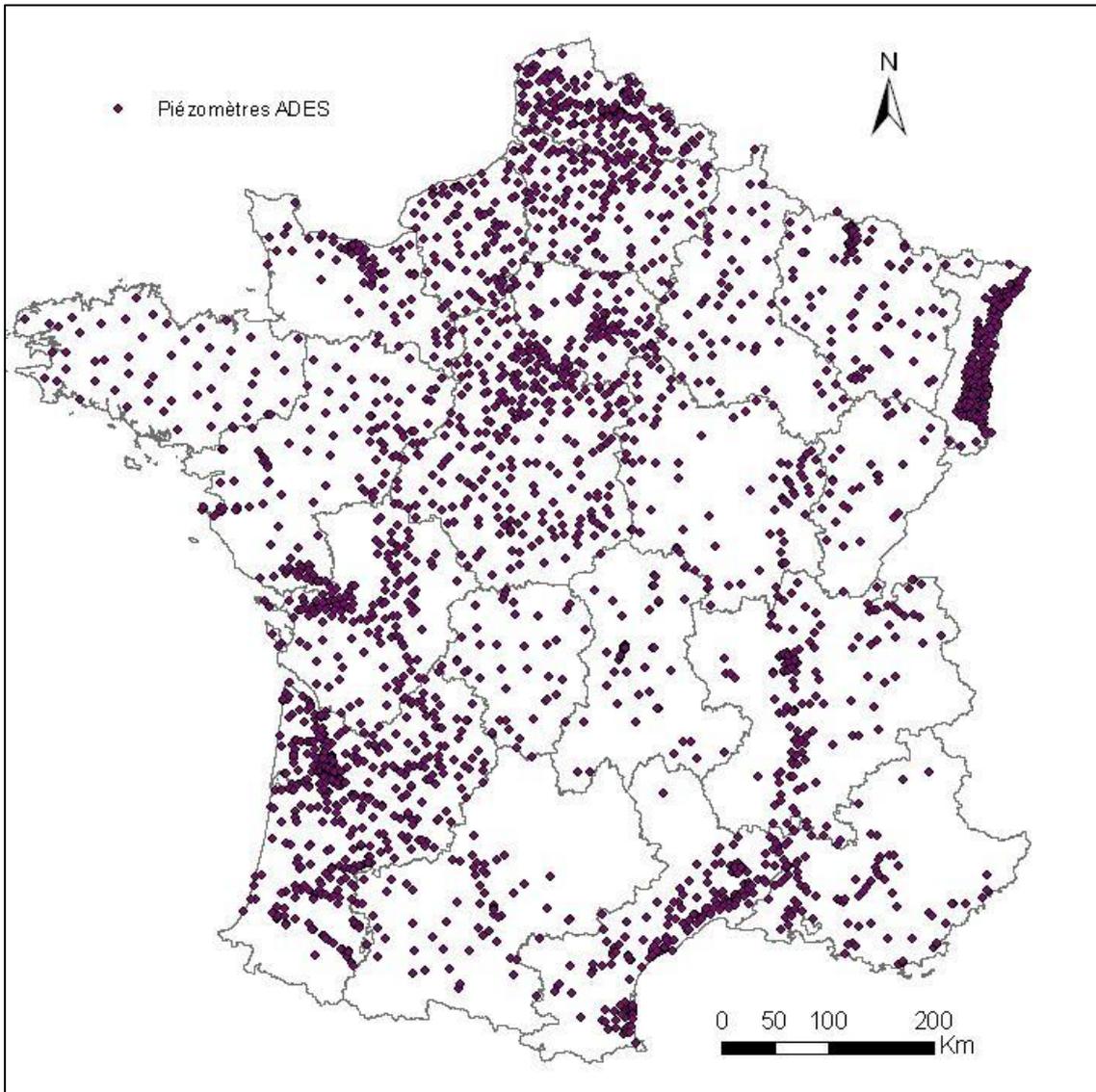


Illustration 2 : Carte de répartition des 2755 piézomètres présentant une chronique de plus de 5 ans (source : portail ADES)

Cette banque de données permet donc d'obtenir une chronique piézométrique pour chacun des piézomètres suivis : c'est-à-dire un relevé, en fonction du temps, des niveaux de l'eau, contenus dans un système aquifère, constatés à un point d'eau donné, que celui-ci soit un piézomètre réservé à ce suivi ou bien un forage ou un puits. La chronique est continue ou discontinue. Certains suivis sont réalisés sur des points qui peuvent être influencés par des pompages.

L'exemple suivant montre la chronique piézométrique du piézomètre de St-Martin-Chennetron qui capte la nappe des calcaires de Champigny. Cet ouvrage est situé à 143,3 m NGF d'altitude, la hauteur du repère de mesure (haut du tubage ou margelle du puits) est à 0,85 m au-dessus du sol. La valeur représentée dans ce type de chronique piézométrique correspond soit à une profondeur relative du niveau de la nappe par rapport au repère de mesure (cf. Illustration 3), soit à une cote altimétrique du niveau de la nappe, en mètres NGF³ (Illustration 4).

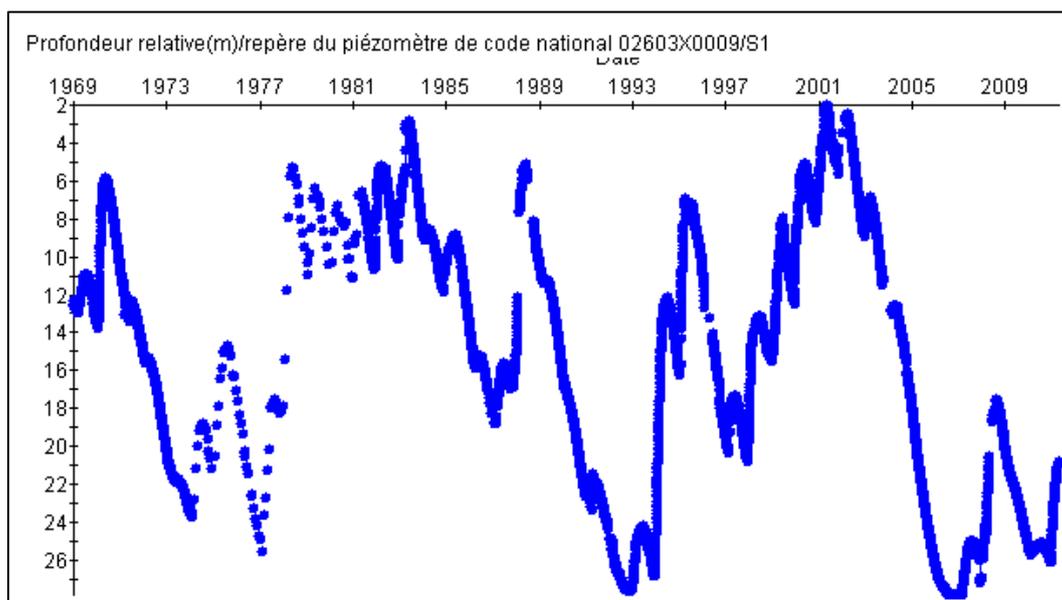


Illustration 3 : Chronique piézométrique exprimée en profondeur relative (m) par rapport au repère de mesure du piézomètre

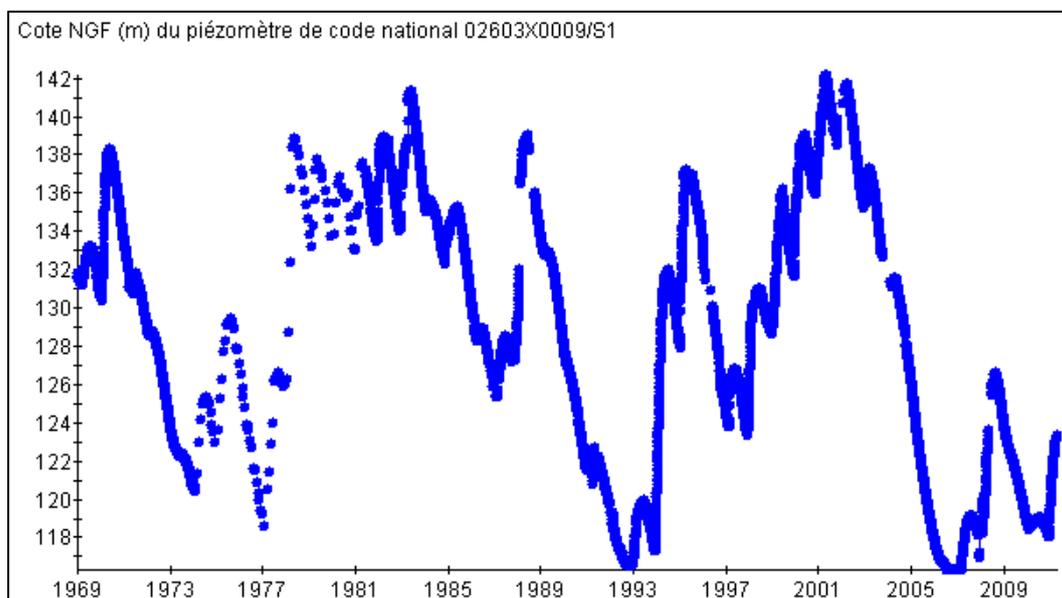


Illustration 4 : Chronique exprimée en cote NGF (m) du piézomètre

³ NGF : Nivellement Général de la France

Ces chroniques permettent donc d'obtenir l'état du niveau de la nappe de manière plus ou moins continue sur la période de suivi (dans l'exemple précédent, 40 ans de suivi). Il est possible à partir de là d'effectuer une analyse statistique sur les fluctuations de cette nappe et de calculer : la cote minimale observée, la cote maximale, la cote moyenne.

Ces données statistiques ont été intégrées pour tous les piézomètres dans la géodatabase qui contient déjà les données acquises sur les points d'eau disponibles en BSS. Pour les piézomètres d'ADES, la valeur de la cote moyenne sera utilisée pour l'interpolation (cf 3.1).

2.3. CARTES PIEZOMETRIQUES

Les cartes piézométriques représentent la surface piézométrique d'une nappe par des lignes équipotentiellles (construites elles-mêmes par une interpolation de mesures ponctuelles). L'utilisation de ces cartes piézométriques pour l'établissement du niveau moyen des nappes a deux avantages majeurs :

- elles sont issues d'études locales, faites à partir de données synchrones (l'ensemble des données sont acquises lors d'une campagne sur une période de temps relativement courte) ;
- lors de leurs tracés, elles ont fait l'objet d'une expertise d'un hydrogéologue.

2.3.1. Recueil et analyse critique des données

Les cartes piézométriques ont été recueillies en 2011 auprès des Directions Régionales du BRGM. L'ensemble de ces données (Illustration 5) représentent une centaine de cartes couvrant la quasi-totalité du Bassin parisien, une grande partie du Bassin aquitain, les zones sédimentaires des anciennes régions Poitou-Charentes et Lorraine, du département de Loire-Atlantique ainsi que les zones alluviales des anciennes régions Franche-Comté, Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes.

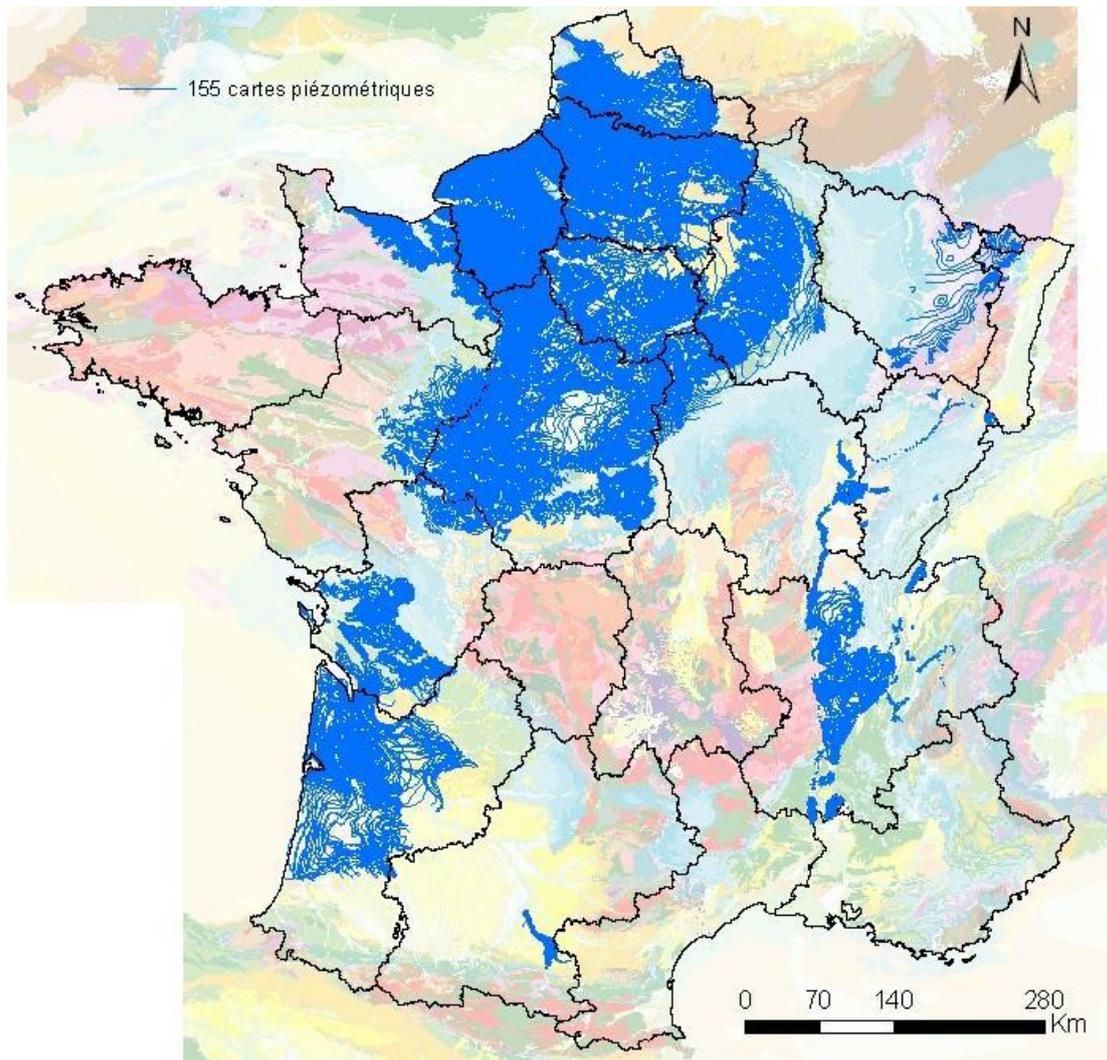


Illustration 5 : Répartition des 155 cartes piézométriques disponibles pour l'étude

La principale contrainte de l'utilisation d'un grand nombre de cartes piézométriques est l'hétérogénéité des données :

- toutes ces cartes n'ont pas été réalisées la même saison ou la même année, elles ne traduisent donc pas les mêmes conditions climatiques ;
- ces cartes n'ont pas été réalisées avec la même précision, certaines ont été produites à partir de beaucoup plus de points de mesures que d'autres, elles seront donc plus précises ou, en tout cas, auront une part d'incertitude plus restreinte ;
- certaines cartes sont très anciennes, pour des nappes qui ont fortement évolué depuis.

Ce problème d'hétérogénéité a été en partie compensé par une sélection des données utilisées, pour ne garder que celles des cartes les plus pertinentes : suppression des cartes piézométriques réalisées sur des nappes captives profondes, des données trop anciennes ou trop imprécises.

2.3.2. Préparation de données

L'étape suivante consiste à transformer ces données d'isolignes en données continues par interpolation spatiale, pour obtenir, en tout point de la carte, une valeur du niveau moyen de la nappe (Illustration 6). Plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées, le choix s'est arrêté sur l'outil « Topo to Raster » (ArcGis®) créé pour convertir des isolignes en raster.

Un des objectifs de l'étude est d'obtenir une cartographie de la profondeur moyenne de la nappe. Pour ce faire et pour chaque nappe renseignée, des cartes de moyennes eaux (ME) ont été calculées :

- ✓ soit à partir des cartes piézométriques élaborées en moyennes eaux directement disponibles (fournies par l'hydrogéologue du BRGM régional),
- ✓ soit à partir des cartographies en situation de hautes eaux (HE) et de basses eaux (BE).
 - lorsque celles-ci sont disponibles, chaque carte est interpolée puis utilisée pour calculer une carte des ME en utilisant tout simplement la moyenne des deux grilles d'interpolation.
 - lorsque celles-ci ne sont pas disponibles, la carte piézométrique la plus pertinente est utilisée (HE ou BE d'une année moyenne).

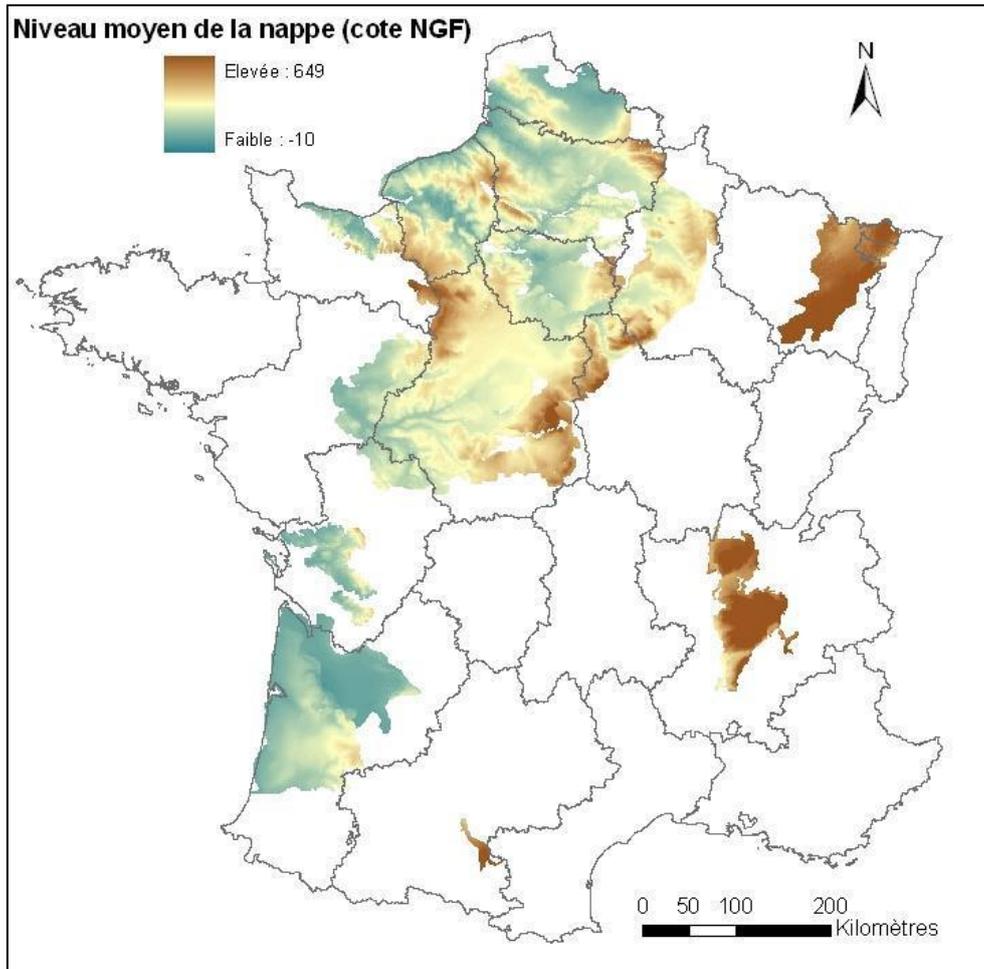


Illustration 6 : Niveau moyen des nappes en cote NGF par interpolation des cartes piézométriques

Les données linéaires sont transformées en données ponctuelles pour construire, avec les points d'eau, les cartes de profondeur d'eau moyenne. Les valeurs de niveau piézométrique sont obtenues en créant un maillage de points tous les 2 500 mètres le long de ces isopièzes en y attribuant la valeur de la cote piézométrique (Illustration 7).

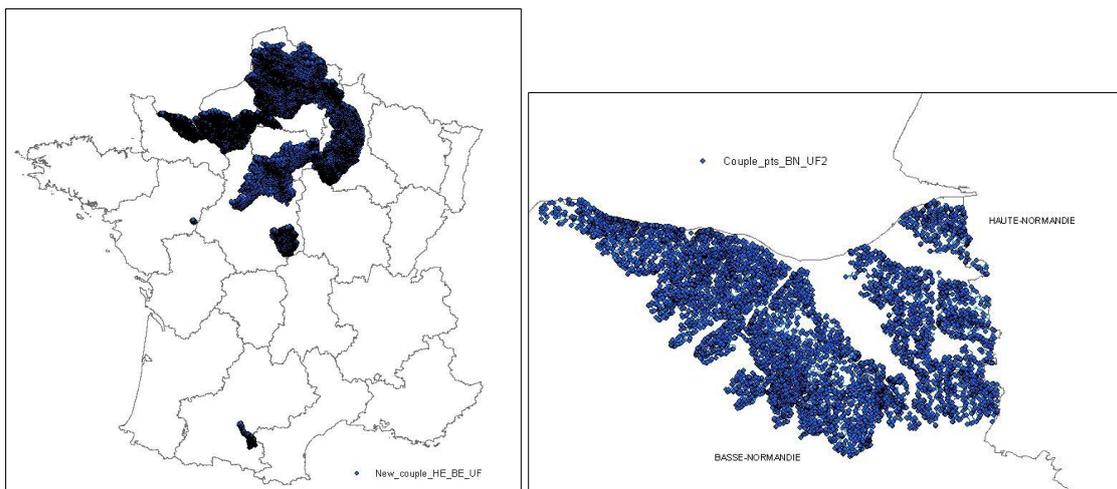


Illustration 7 : Répartition des points issus des couples HE/BE des cartes piézométriques avec l'exemple de la Région Basse-Normandie.

2.4. AJOUT DE POINTS DE CALAGE

Afin de densifier les points de mesures, des points de calages sont calculés à partir des cotes de cours d'eau et des cotes de plans d'eau inférieurs à 200 m².

- Pour les cours d'eau, considérés ici par simplification, comme les exutoires des nappes superficielles, les points sont créés tous les 250 mètres et une valeur nulle a été attribuée à la profondeur d'eau ainsi qu'au battement.
- Pour les plans d'eau de superficie inférieure à 200 m², considérés par simplification, comme des zones d'affleurement de la nappe, une valeur nulle a été attribuée à la profondeur d'eau ainsi qu'au battement pour chaque point.

Les points de calages ainsi créés (48 681 issus des plans d'eau et 347 616 issus des rivières principales) sont ajoutés aux points issus d'ADES, de la BSS et des courbes isopièzes. Ils serviront lors de l'interpolation du niveau moyen de la nappe.

Les points de calage correspondant aux cours d'eau et aux plans d'eau n'ont été utilisés que dans certains contextes hydrogéologiques (relations nappe/rivière supposées) et essentiellement dans le Bassin parisien.

3. Estimation de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée

3.1. INTERPOLATION SPATIALE

La détermination de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée se fait en croisant les données des cartes piézométriques (50 215 points de profondeurs d'eau obtenus à partir des isopièzes), des points BSS (131 820 points référencés comme points d'eau issus de la Banque Sous-Sol) ainsi que des points ADES (2 755 piézomètres possédant des chroniques de plus de 5 ans).

- Les 50 215 points issus des isopièzes ont été obtenus en créant des points à pas régulier (tous les 2 500 mètres) avec la valeur de profondeur d'eau de l'isopièze.
- Les 131 820 points issus de la BSS sont le résultat d'une importante correction des valeurs de profondeurs d'eau : les valeurs fausses ont été corrigées quand cela était possible ou supprimées. Ces données de profondeur issues de la BSS sont asynchrones et peuvent représenter des situations de basses eaux ou de hautes eaux.
- Les 2 755 piézomètres ont aussi fait l'objet de corrections avec la suppression dans les chroniques piézométriques des années à valeurs aberrantes.
- Par endroit des points de calage issus des plans d'eau et des rivières principales ont été ajoutés.

L'intégralité de ces points, soit 184 790, ont permis, à l'aide de la méthode de krigeage, d'établir un niveau moyen de la nappe sur l'ensemble de la France métropolitaine. Ce travail a été réalisé avec l'extension ArcGIS Geostatistical Analyst (©ESRI).

3.2. MASQUE INDIQUANT LES ZONES OU L'INTERPOLATION N'EST PAS VALIDE

Certaines zones du territoire français métropolitain disposent d'une très faible densité de données liées souvent aux formations géologiques s'y trouvant.

Comme indiqué au paragraphe 2, les zones de socle et d'intensément plissé de montagnes ne disposent pas d'une densité de données suffisante pour que l'interpolation donne un résultat satisfaisant.

Un masque (zone grisée) a donc été appliqué à la carte résultante de l'interpolation. Ce masque est déduit de la carte géologique de la France à l'échelle du millionième (Illustration 8).

Carte préliminaire de l'épaisseur moyenne de la ZNS

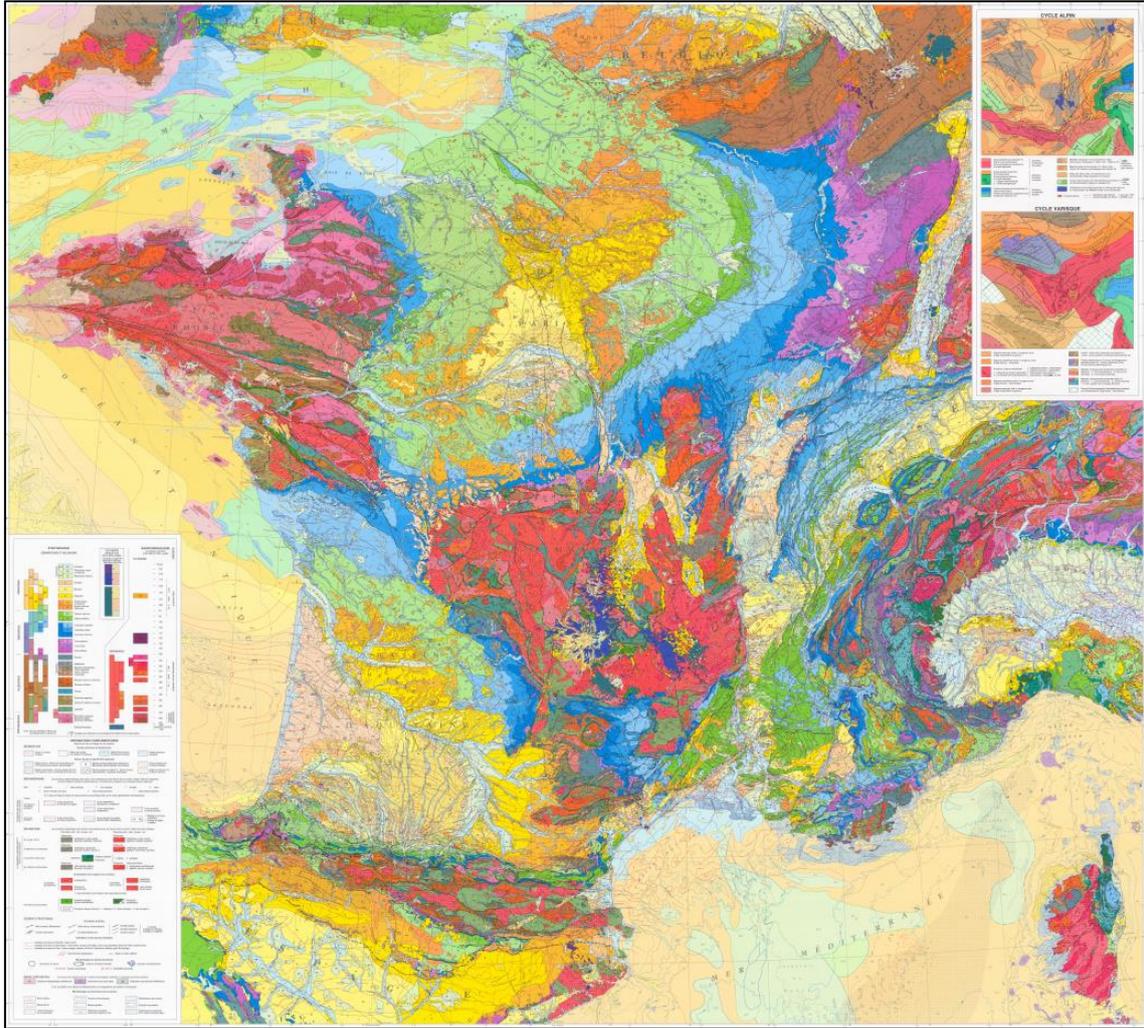


Illustration 8 : Carte géologique de la France au millionième (©BRGM)

Le résultat final de la carte d'épaisseur de ZNS est visible sur l' Illustration 9.

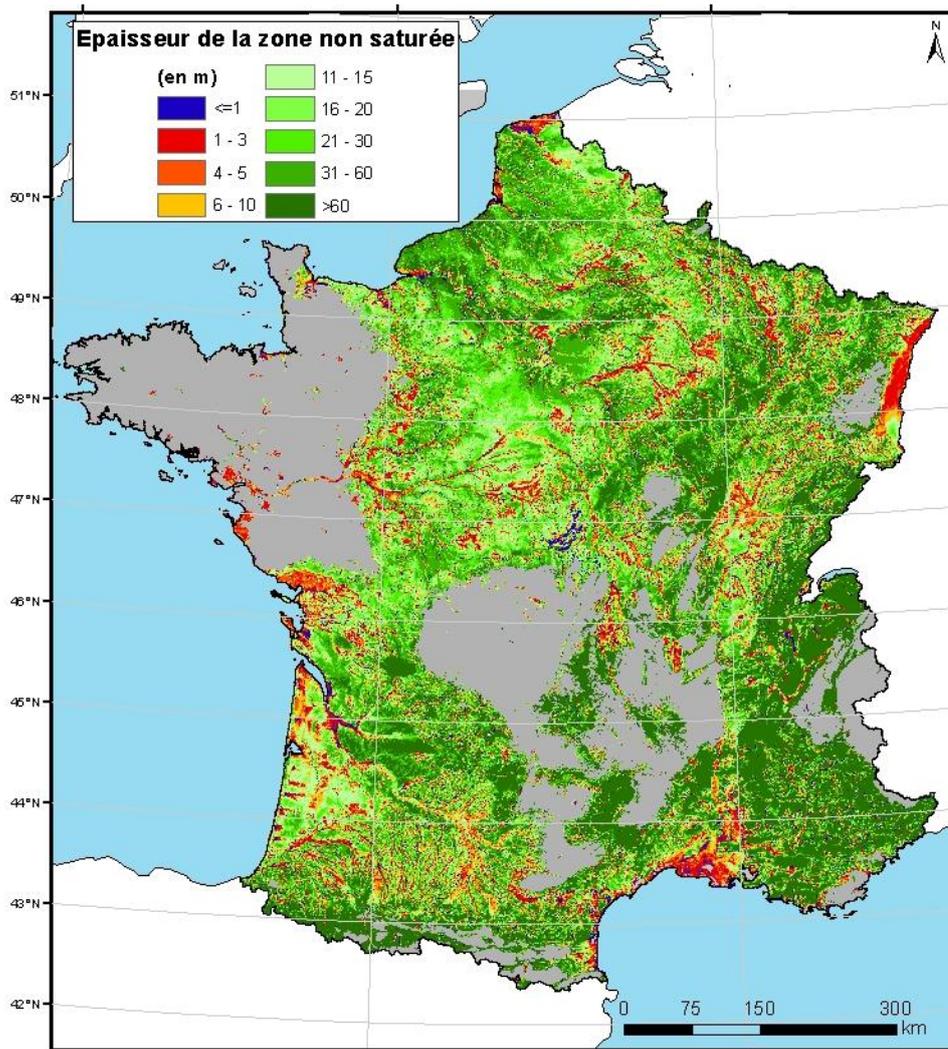


Illustration 9 : Carte du niveau moyen des nappes réalisée à partir de l'ensemble des données ponctuelles (au 12/2012) - en grisé les zones où la méthode ne s'applique pas

3.3. INCERTITUDES SUR LA CARTE OBTENUE

La qualité de l'interpolation est étroitement dépendante de la connaissance d'un certain nombre de données de base, dont :

- la valeur de la cote moyenne du niveau piézométrique, qui est à la fois mesurée par rapport à un niveau de référence (altimétrie) et géoréférencée (en longitude et latitude),
- la présence d'un nombre suffisant de points d'eau au sein d'un secteur hydrogéologique homogène, pour que la valeur du niveau de la nappe puisse être considérée comme représentative.

Or la densité des points de suivi des fluctuations de la nappe (piézomètres ADES) est faible voire très faible dans certains secteurs (comme le massif central : cf. Illustration 10).

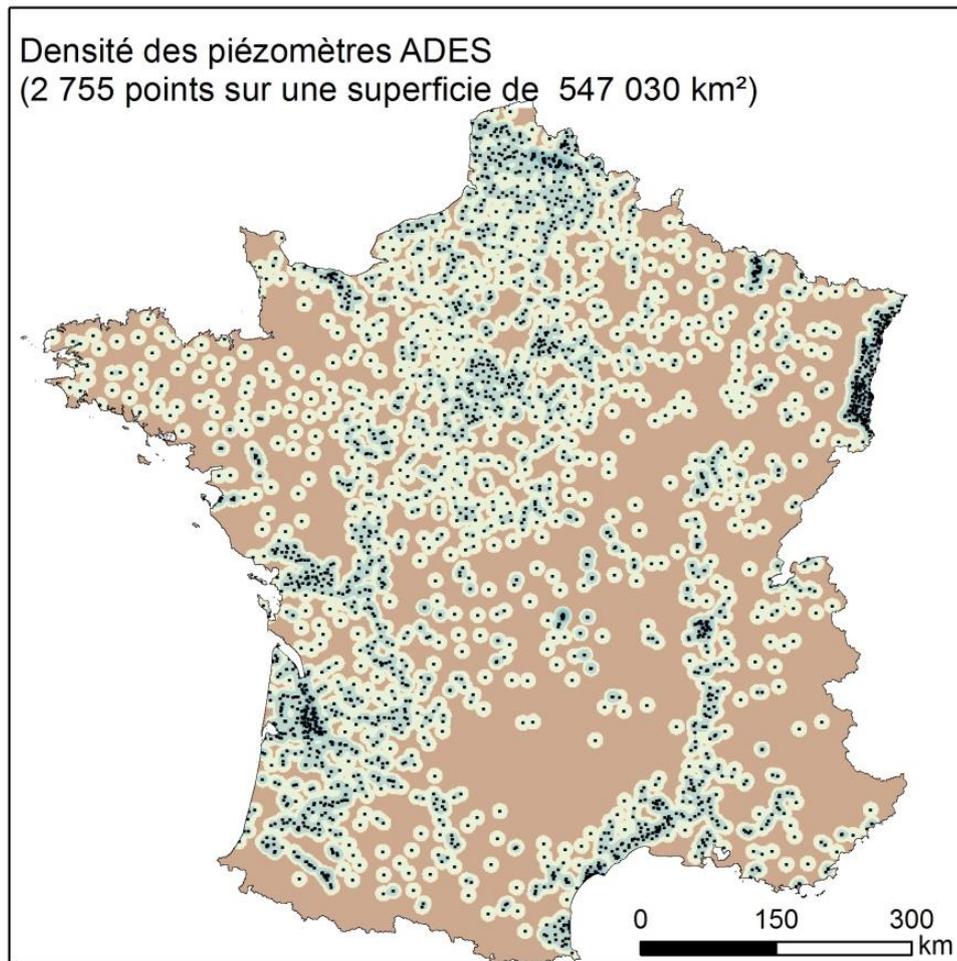


Illustration 10 : Carte présentant la densité des piézomètres issus de la base ADES

La densité des points d'eau (puits, forages, ...de la BSS) est plus importante, mais est aussi très hétérogène à l'échelle du territoire et les données associées ne nous renseignent que sur une profondeur d'eau mesurée à une date quelconque.

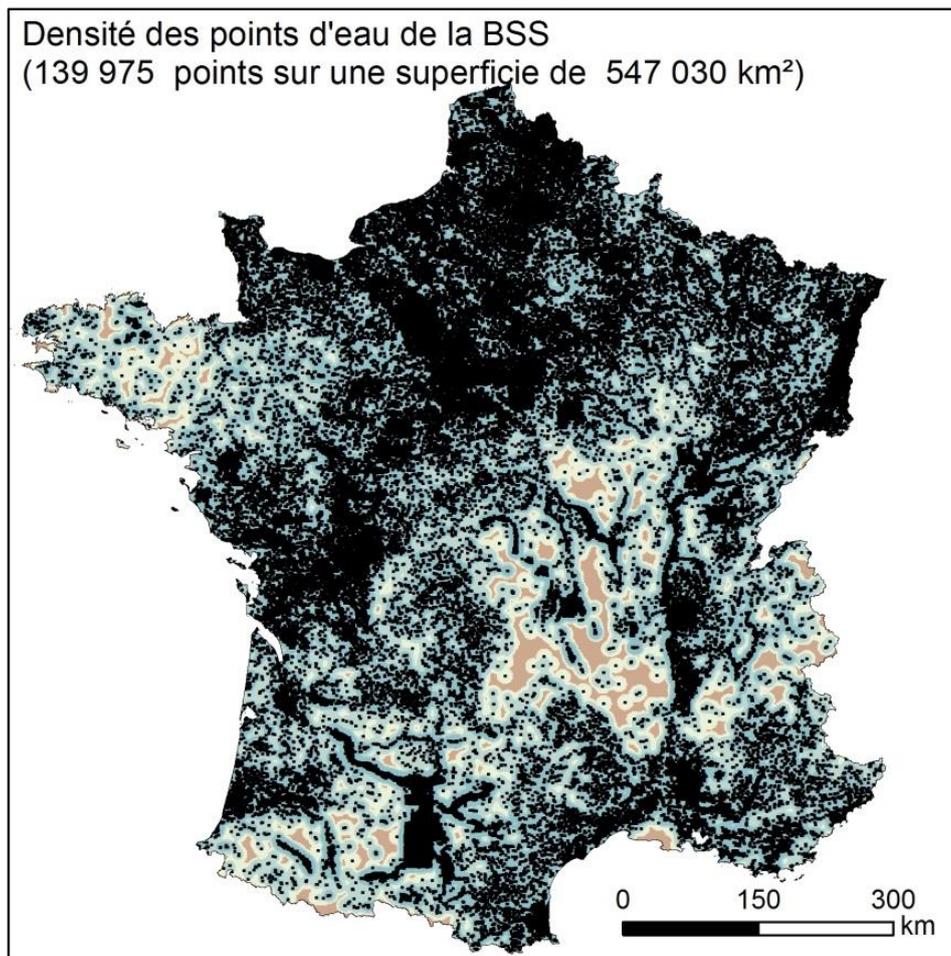


Illustration 11 : Carte présentant la densité des points d'eau issus de la BSS pour lesquels une mesure de niveau d'eau existe

La méthode souffre aussi de l'imprécision des données de base. Malgré tous les efforts de correction lors de la phase de collecte, les données de la BSS peuvent être mal géoréférencées, l'altitude du lieu de mesure est souvent mal connue (la précision de la BD ALTI ©IGN, qui est le modèle numérique de terrain utilisé, est de + ou - 2,5 m en altitude), des erreurs ont pu se produire, lors de la saisie des profondeurs d'eau.

Les données d'ADES peuvent aussi être entachées d'erreurs de mesure et de saisie. Quant aux cartes piézométriques vectorisées, elles sont très hétérogènes (dates différentes, variabilité du nombre de points de mesure utilisé, ancienneté des études, etc.)

4. Conclusion/Discussions

L'estimation de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée réalisée fournit une simple indication à l'échelle nationale, à partir des données disponibles en bases de données. Le rendu cartographique a été réalisé en considérant comme unité de base une maille carrée de 100 mètres. Cette carte n'est exploitable qu'à une échelle inférieure au 1/100 000^{ème}, pour des études à l'échelle nationale ou régionale.

Ce rapport décrit un travail réalisé en grande partie sur la période 2011-2013. La collecte de données date entièrement de cette période. D'autres données ont été acquises depuis et pourraient permettre d'affiner ce travail.

Pour les problématiques liées au risque d'inondation par remontées de nappe, une carte des cotes maximales probables des nappes a été réalisée (Brugeron et al., 2018)⁴, elle permet d'établir une carte de sensibilité aux remontées de nappe disponible sur <http://www.georisques.gouv.fr/>.

Pour des travaux à une échelle plus locale, d'autres études sont en cours de finalisation, elles permettront de proposer une méthode géostatistique plus aboutie et des recommandations en terme de validation de données. Une cartographie plus précise a ainsi été réalisée sur l'agglomération de Rennes (Pinson et Bault, 2019)⁵, en Alsace (Tillier et al., 2019)⁶ et sur le bassin versant de la Thève (Bessière et Tillier, 2018)⁷. Pour ces trois exemples, une campagne d'acquisition de données a été menée afin de densifier les points de mesures de niveau d'eau, nécessaires à l'interpolation.

Un projet est en cours sur l'ensemble du bassin Loire-Bretagne avec l'agence de l'eau Loire Bretagne pour déterminer les épaisseurs minimales et maximales de la zone non saturée. La méthode géostatistique mise en place - interpolation multivariable par co-krigeage avec le logiciel Isatis (édité par la société Geovariances) – permet de contrôler la surface des hautes eaux par celle des basses eaux, limitant ainsi les erreurs d'interpolation.

⁴ BRUGERON A., BESSIERE H., BOURGINE B., STOLLSTEINER P. (2018) – Étude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale. Rapport final BRGM/RP-65452-FR

⁵ Pinson S., Bault V. et al. (2019) Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole, Projet PHOEBUS. Rapport final BRGM/RP-68599-FR

⁶ Tillier L., Bessière H., Brugeron A., Bourguin B., Foumelis M. - Mise en place d'une méthodologie de cartographie de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale – Application à la nappe d'Alsace au Sud de Strasbourg. Rapport final BRGM/RP-68600-FR

⁷ Bessière H., Tillier L. (2018) – Cartographie du risque d'inondation par remontée de nappe sur le bassin versant de la Thève. Rapport final. BRGM/RP-68115-FR.



**Centre scientifique et technique
Direction D3E**

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