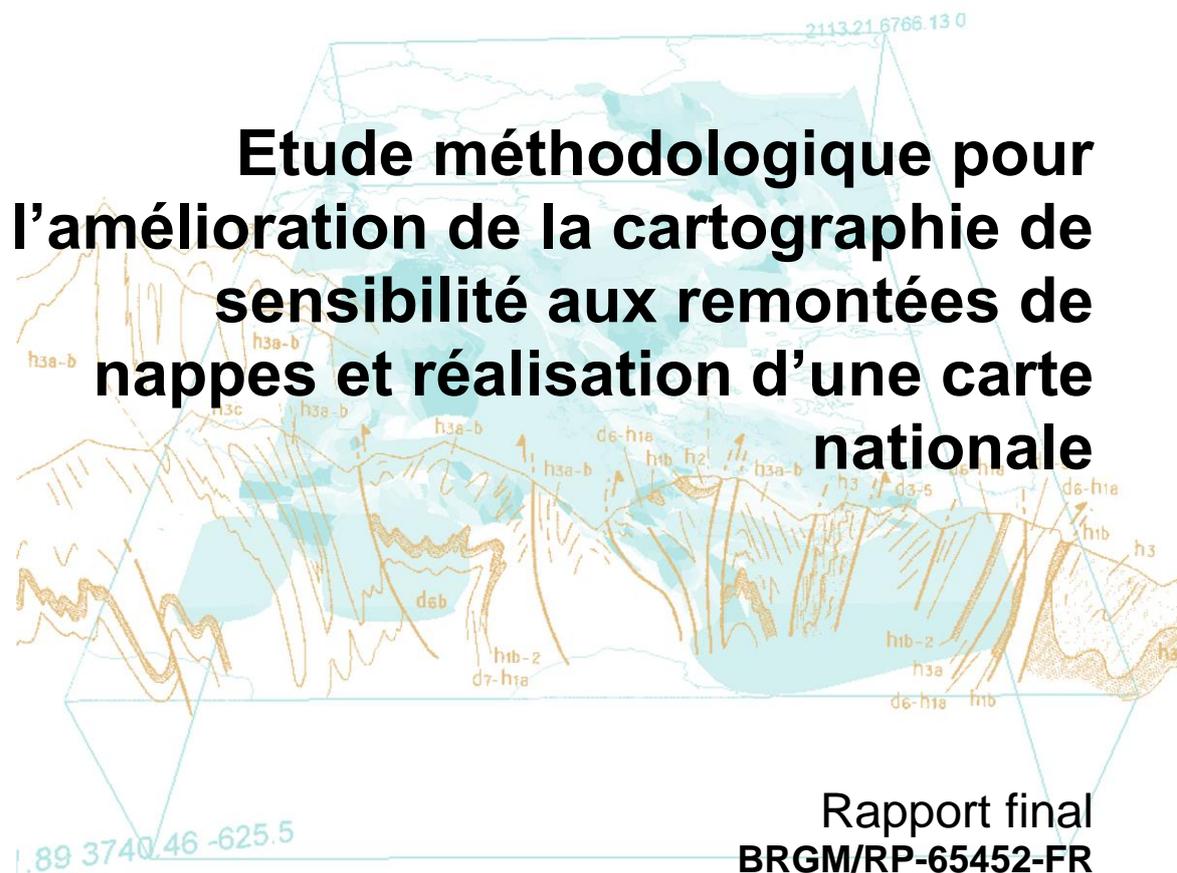


Document public



Etude 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
Janvier 2018

Etude 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
Janvier 2018

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2017

A. Brugeron, H. Bessière, B. Bourguin, P. Stollsteiner

Vérificateur :

Nom : D. ALLIER

Date : 13/02/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : L. GOURCY

Date : 21/02/2018

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Inondation, nappe phréatique, nappe libre, aquifère, cartographie, niveau d'eau, interpolation, incertitudes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : A. Brugeron, H. Bessiere, B. Bourguine, P. Stollsteiner (2017) – Etude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale - BRGM/RP-65452-FR

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La directive du parlement européen relative à l'évaluation et la gestion des risques inondation et sa transposition en droit français (loi du 12 juillet 2010) prévoient, d'ici 2018, une mise à jour de la cartographie d'enveloppe approchée des inondations potentielles par remontée de nappe (EAIPrn) support de l'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI). Dans cette optique, le MTES (Ministère de la transition écologique et solidaire) a demandé en première phase, au BRGM d'améliorer, valider et fiabiliser la méthode de cartographie de la sensibilité des territoires au « risque d'inondation par remontée de nappe » à l'échelle nationale.

L'étude bibliographique menée dans le cadre de ce projet a permis de constater que la plupart des études sur cette problématique reposaient sur des approches adaptées à des échelles de travail locales et que peu d'approches globales à des échelles nationales ont été menées à ce jour. Seul le Royaume-Uni a, suite aux inondations par remontée de la nappe de la craie en 2000 et 2001, décidé d'analyser cette problématique de manière globale.

La réalisation de la carte française a reposé principalement sur l'exploitation de données piézométriques et de leurs conditions aux limites d'origines diverses (BSS, ADES, déclarations CATNAT, résultats de modèles hydrodynamiques, isopièzes, EAIPce, EAIPsm¹...) qui, après avoir été validées ont permis par interpolation de définir les isopièzes des cotes maximales probables, elles-mêmes permettant par soustraction aux cotes du Modèle Numérique de Terrain (RGE ALTI®) d'obtenir ainsi les valeurs de débordement potentielles.

La méthodologie utilisée a été validée en comité d'experts fin 2016. Une première version de la carte a été envoyée début 2017 pour examen et consultation aux services déconcentrés de l'Etat (DREAL et DDT essentiellement) et aux directions régionales du BRGM. Une demande de données complémentaires a été lancée par la même occasion. Suite aux différents retours obtenus, des modifications ont été effectuées au second semestre 2017.

Malgré les diverses comparaisons et corrections apportées, la réalisation de la carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe reste un exercice délicat qui « in fine » comporte de fortes incertitudes. Ces incertitudes, voire erreurs, sont notamment dues à :

- une accumulation d'informations manquantes, incomplètes ou imprécises,
- l'ordre de grandeur des valeurs recherchées,
- la complexité des milieux mis en jeu.

Par suite de ces différentes remarques, il n'a pas été possible de réaliser une interpolation avec des mailles de dimension inférieure à 250 m. En outre, la carte réalisée n'est pas valide pour les zones karstiques (manifestant un comportement particulier et relativement mal connu sur certains secteurs), les zones urbaines (dont les aménagements modifient les écoulements souterrains) et les secteurs après mine (subissant des modifications des écoulements souterrains dues aux pompages des eaux d'exhaure ou à l'arrêt des pompages). Le rendu cartographique a donc été réalisé en considérant comme unité de base une maille carrée de 250 mètres.

¹BSS, ADES, EAIPce, EAIPsm : cf. Glossaire

Cette carte n'est exploitable, au stade actuel, qu'à une échelle inférieure au 1/100 000^{ème}.

La carte doit être accompagnée pour sa lecture et son interprétation de différents masques à surimposer :

- le masque sur les zones karstiques ;
- le masque sur les zones urbaines ;
- le masque des EAIP cours d'eau et submersion marine afin de faire apparaître les inondations liées aux phénomènes superficiels ;
- le masque des secteurs imperméables (basés sur la BDLisa référentiel hydrogéologique) où des inondations par remontée de nappe ne sont pas susceptibles de se produire ;
- le masque des secteurs après mine (une zone a pu être recensée dans le cadre de cette étude dans le secteur du bassin houiller lorrain).

Une estimation de la fiabilité des résultats a été réalisée en s'appuyant sur différents critères : fiabilité du Modèle Numérique de Terrain et fiabilité des données eaux souterraines, elle-même basée sur la fiabilité de la donnée source utilisée et la distance à la donnée source la plus proche. Il s'en est suivi la qualification de la fiabilité globale de la cartographie suivante : « forte », « moyenne », « faible » ou « inconnue » ; indexée à chaque point de la grille au pas de 250 m.

Si la carte proposée pour la métropole et la Corse, permet de localiser les zones où il y a de fortes probabilités d'observer des débordements par remontée de nappe, l'absence de données en Guyane et le très faible nombre de données disponibles aux Antilles ou à la Réunion, données qui sont de plus limitées aux zones côtières et peu élevées, ne permettent pas de compléter efficacement les EAIPce déjà définies. Seules les bandes côtières pourront donc, a priori, faire l'objet d'un ajout.

Même si la complexité des systèmes ne permettra probablement jamais de réaliser une carte nationale EAIPn avec une précision équivalente aux EAIPce, celle-ci pourrait être améliorée par l'utilisation de données plus précises et sans lacunes (cote des ouvrages, précision du MNT...) mais surtout par l'ajout de points de suivis complémentaires. On peut, entre autres, penser à tous les ouvrages suivis localement (collectivités ou leurs mandataires, installations classées, aéroports, EDF, ...) qui ne figurent dans aucune base de données nationale et qui n'ont pas pu être récupérée lors de la phase de consultation.

Par conséquent, il pourra être envisagé des corrections et/ou modifications de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappe suite :

- à une amélioration de la couche des EAIP cours d'eau et submersion marine ;
- à la mise à disposition de données piézométriques provenant de réseaux complémentaires (en région parisienne par exemple) ;
- au rattachement finalisé des données piézométriques aux entités hydrogéologiques ;
- au nivellement complet des points de mesure.

Cependant, des améliorations peuvent d'ores et déjà être envisagées à une échelle locale, par adaptation des méthodes d'interpolation par exemple ; en ciblant les régions où la fiabilité globale des résultats est jugée « forte » voire « moyenne ». L'exploitation et le traitement des données et cartographies sur les zones humides, existantes à l'échelle régionale, seraient également pertinent.

Sommaire

1. Introduction	12
1.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE	12
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	12
1.3. LES PHENOMENES DE REMONTEES DE NAPPES.....	12
1.4. CARTE DE SENSIBILITE AUX REMONTEES DE NAPPES	13
2. Etat des lieux et recherche bibliographique.....	15
2.1. INTRODUCTION.....	15
2.1. BILAN SUR LE RAPPORTAGE DES CARTES D'ALEA ET DE RISQUE D'INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE A LA COMMISSION EUROPEENNE	15
2.2. FOCUS SUR LES TRAVAUX MENES AU ROYAUME UNI.....	16
2.2.1. Première approche globale: Jacob, 2004	17
2.2.2. Deuxième approche globale: BGS, 2008.....	19
2.3. SELECTION D'AUTRES REFERENCES	23
2.3.1. Ukraine.....	23
2.3.2. Allemagne	23
2.4. BILAN ET PERSPECTIVES POUR UNE APPROCHE A L'ECHELLE NATIONALE	23
3. Matériel et supports méthodologiques.....	26
3.1. TYPES D'AQUIFERE ETUDIES.....	26
3.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DYNAMIQUE DES NAPPES	28
3.3. CRITERES UTILISES POUR EVALUER LES ZONES POTENTIELLEMENT INONDABLES PAR REMONTEES DE NAPPE.....	29
3.3.1. Potentiel d'infiltration	29
3.3.2. Types de cycles hydrodynamiques.....	30
3.4. DONNEES UTILISEES	31
3.4.1. Données associées aux points d'eau	31
3.4.2. Référentiel BDLISA	38

3.4.3. Enveloppes approchées d'Inondation Potentielle « cours d'eau » (EAIPce) et « submersion marine » (EAIPsm)	39
3.4.4. Modèle numérique de terrain (MNT)	40
3.4.5. Données complémentaires	41
4. Elaboration de la carte de sensibilité aux remontées de nappe	46
4.1. ETAPE 1 : ESTIMATION DU NIVEAU MAXIMAL PROBABLE DES NAPPES.	46
4.1.1. Analyse des points collectés et choix des points à retenir.....	46
4.1.2. Niveau maximal probable des nappes	48
4.1.3. Analyse des cartes piézométriques	51
4.1.4. Utilisation des EAIPce et EAIPsm.....	53
4.1.5. Exploitation des données historiques	57
4.1.6. Exploitation des modèles hydrodynamiques.....	59
4.2. ETAPE 2 : INTERPOLATION DU NIVEAU MAXIMAL PROBABLE	68
4.3. ETAPE 3 : CORRECTIONS LIEES AUX FACTEURS PENTE ET TERRAINS AFFLEURANTS IMPERMEABLES.....	70
4.3.1. Zones de faible pente	70
4.3.2. Terrains affleurant imperméables	71
4.4. CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES AUX REMONTEES DE NAPPE	72
4.4.1. En métropole et Corse.....	72
4.4.2. Autres territoires	78
5. Estimation de la fiabilité des résultats.....	80
5.1. PARAMETRES INFLUENÇANT LA REALISATION ET L'EXPLOITATION DE L'INTERPOLATION.....	80
5.1.1. Distance entre les points	80
5.1.2. Modèle Numérique de Terrain	82
5.2. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR ESTIMER LE NIVEAU DE FIABILITE DE LA CARTOGRAPHIE.....	84
5.2.1. Fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine » utilisées.....	84
5.2.2. Fiabilité vis-à-vis du Modèle Numérique de Terrain	86
5.2.3. Fiabilité globale	87
5.2.4. Proposition de représentation cartographique	88
6. Contrôle des résultats.....	90
6.1. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE ISSUE DU MODELE POITOU-CHARENTES [DOUEZ O. ET AL. (2011)]	90

6.2. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLEMENT HUMIDES.....	92
6.2.1. La carte des milieux potentiellement humides	92
6.2.2. Comparaison sur certains secteurs	93
6.3. COMPARAISON AVEC LES SITES « DECLARATIONS CATASTROPHES NATURELLES ».....	96
6.4. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE ZNS LITTORAL MNT5M.....	97
6.5. RETOURS DES REGIONS	100
7. Conclusions et recommandations	107
8. Références bibliographiques	109

Liste des figures

Figure 1 : Carte de sensibilité aux remontées de nappes (2011)	14
Figure 2 : Carte de répartition des « zones d'émergence de nappe » proposée par Jacob (2004) au Royaume-Uni	18
Figure 3 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé et reposant sur une formation imperméable (d'après BGS)	20
Figure 4 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS)	21
Figure 5 : Carte hydrogéologique structurale de la France métropolitaine (J.Margat, 1986)	27
Figure 6 Cartographie issue de la BDLisa des zones de karst affleurant.....	28
Figure 7 : Schéma d'interconnexion entre BSS, BSS EAU et ADES	32
Figure 8 : Evolution du nombre de points d'eau en BSS EAU depuis juin 2012	33
Figure 9 : Etat des lieux sur le descriptif des points d'eau de la BSS EAU (état en mars 2015)	33
Figure 10 : Localisation des points d'eau bancarisés dans ADES ayant au moins une mesure piézométrique (avant et après nettoyage)	35
Figure 11 : Localisation des points BSSEAU ayant au moins une mesure piézométrique et ne faisant pas partie d'un réseau dans ADES	36
Figure 12 : Carte de répartition des 205 445 points d'eau issus de la BSS et ne faisant pas partie d'ADES ni de BSS EAU ayant au moins une mesure de niveau d'eau	37
Figure 13 : Représentation cartographique des entités hydrogéologiques de la BDLISA version 1 selon les critères a) Potentialités aquifères et b) Type de formation géologique.....	38

Figure 14 : Carte des EAIP « cours d'eau » et « submersion marine »	40
Figure 15 : Les zones hydrographiques (©BDCarthage)	42
Figure 16 : Carte du trait de côte Histolitt® (SHOM)	43
Figure 17 : Répartition des cartes piézométriques disponibles pour l'étude	44
Figure 18 : Sélection finale des points d'eau pour la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe	47
Figure 19 : Points d'eau sélectionnés représentés selon leur niveau de fiabilité.....	48
Figure 20 : Exemple de calcul du battement maximum sur un point d'eau qui bénéficie d'une chronique piézométrique de longue durée.	49
Figure 21 : Localisation des cartes piézométriques retenues	52
Figure 22 : Extrait de la conversion des vecteurs EAIPce et EAIPsm en points de contours et de remplissage pour les besoins de l'interpolation.....	54
Figure 23 : Voisinage pour le calcul des EAIP intérieurs	55
Figure 24 : Visualisation 3D d'un secteur près de Wimereux (62), où les EAIPsm remontent dans les pentes ou entourent de petits reliefs.....	56
Figure 25 : Zoom sur Ambleteuse, où on voit les EAIP SM remonter les pentes	57
Figure 26 : Carte des communes et lieux précis ayant fait l'objet d'une déclaration de catastrophe naturelle au titre des inondations par remontée de nappe	58
Figure 27 : Présentation du modèle maillé de la vallée de la Somme avec les zones de débordement.....	60
Figure 28 : Résultats des zones de débordement du modèle maillé de la vallée de la Somme.....	61
Figure 29 : Présentation du modèle de l'agglomération lyonnaise. Cartographie de la profondeur de la nappe selon le scénario d'une crue centennale	62
Figure 30 : Résultats du modèle hydrogéologique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. (Figure du haut : résultats sur la totalité des couches modélisées ; Figure du bas : résultats hors socle et Cénomaniens)	64
Figure 31 : Carte des zones de débordement du modèle de la Craie du NPC pendant la période des hautes eaux de 2001.	65
Figure 32 : Résultats du modèle de Guadeloupe et extension des EAIP de Grande Terre.	67
Figure 33 : Discrimination des zones de pente inférieure ou égale à 10 % (en vert) et supérieure à 10% (en rouge) (source : BDALTI®)	71
Figure 34 : Cartographie des terrains affleurants imperméables d'après la BDLISA (France métropolitaine).....	72
Figure 35 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe (résultat brut).....	74
Figure 36 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant le masque des zones considérées comme imperméables.....	75

Figure 37 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant l'élimination des zones à forte pente et les masques des secteurs considérés imperméables (marron) et des EAIPce et EAIPsm (bleu)	76
Figure 38 : Distance entre les données utilisées pour l'interpolation : à gauche données modèles hydrodynamiques et isopièzes ; à droite données BSS EAU	80
Figure 39 : Distance entre les données utilisées pour l'interpolation : à gauche données ADES ; à droite données points d'eau (ADES + BSS EAU) et isopièzes.....	81
Figure 40 : Distance minimale entre 2 données eau souterraine (toute origine confondue)	82
Figure 41 : Précision du MNT BDALTI®, selon les Erreurs Moyennes Quadratiques en mètres (Source : IGN).....	83
Figure 42 : Carte de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine ».....	85
Figure 43 : Carte de fiabilité vis-à-vis de la précision altimétrique du MNT du RGE ALTI® (Source : IGN).....	87
Figure 44 : Carte de fiabilité globale pour la méthode employée	88
Figure 45 : Proposition de représentation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe avec des niveaux de fiabilité différentes selon les différentes classes proposées.....	89
Figure 46 : Comparaison avec la carte des profondeurs de la nappe issue du modèle hydrodynamique de Poitou-Charentes	91
Figure 47 : Délimitation des zones potentiellement humides (MEEM/DEB).....	93
<i>Figure 48 : Comparaison de la carte des zones humides (droite) et de la carte des remontées de nappes (gauche) en Sologne et en Beauce.</i>	<i>94</i>
Figure 49 : Comparaison de la carte des zones humides (droite) et de la carte des remontées de nappes (gauche) à proximité de l'île de France.....	95
Figure 50 : Comparaison de la carte des zones humides (bas) et de la carte des remontées de nappes (haut) en Champagne.	96
Figure 51: Exemple de recoupement des communes CATNAT par remontée de nappe (couches SIG de la CCR et du BRGM dossiers antérieurs à 2012) avec les zones inondables calculées.....	97
Figure 52 Comparaison de la carte de sensibilité aux remontées de nappe (à droite) avec la carte ZNSlittoral MNT 5 m de la DREAL Normandie (à gauche)	99
Figure 53 Comparaison avec la cartographie ZNSLittoralMNT5m	100
Figure 54 Zones de remontée de nappe au niveau des points hauts topographiques dues a des incohérence au niveau de la couche EAIP (ce ou sm) et du manque de donnée piézométrique autour	106
Figure 55 : Schéma d'évaluation du niveau moyen de la nappe de socle.....	113
Figure 56 : Droites de corrélation altitude rivières-piézo, d'après Wyns et al. (2004)	114
Figure 57 : Nuage de corrélation entre Z piézo (ordonnée) et surface de base des rivières (abscisse), calculé sur les piézomètres de socle, données métropole.	116
Figure 58 : Variogramme de la différence entre Z piézo et Z niveau de base des rivières en domaine de socle (métropole)	116

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Tableau synthétique sur le rapportage européen des cartes d'inondation par remontée de nappe (from EU WGF17 presentation, mars 2015)	16
Tableau 2 : Sélections des mesures piézométriques considérées dans l'étude en fonction de leur statut et de leur qualification	34
Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique de la plaine de Caen.....	63
Tableau 4 : Nombre de points de chaque type disponibles (hors EAIP).....	69
Tableau 5 : Modalité d'attribution des classes de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine »	85
Tableau 6 : Modalité d'attribution des classes de fiabilité globale pour la méthodologie proposée.....	87
Tableau 7 Tableau synthétisant les retours des régions sur la cartographie de sensibilité aux remontées de nappe	105

Glossaire

ADES : Banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

BSS : Banque de données du Sous-Sol

BSS EAU : Informations sur les eaux souterraines au sein de la BSS

EAIPce : Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles par débordement de Cours d'Eau

EAIPsm : Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles par Submersion Marine

EAIPrn : Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles par Remontée de Nappe

EPRI : Evaluation Préliminaire des Risques d'Inondation

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PPR : Plan de Prévention des Risques

PSS : Plan des Surfaces Submersibles

TRI : Territoire à Risque d'Inondation

1. Introduction

1.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Cette étude entre dans le cadre de la préparation du 2^e cycle de mise en œuvre de la directive du parlement européen et du Conseil relative à l'évaluation et la gestion des risques inondation et de sa transposition en droit français (loi du 12 juillet 2010). Celles-ci prévoient, d'ici 2018, une mise à jour de la cartographie d'enveloppe approchée des inondations potentielles par remontée de nappe (EAIPrn) support de l'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI). En raison du retard dans la cartographie des aléas « inondation par remontée de nappe », aucun territoire à risques d'inondation (TRI) n'a été retenu au titre de cet aléa dans le 1^{er} cycle de gestion.

Il s'agit donc, en première phase, objet du présent rapport, d'améliorer, valider et fiabiliser la méthode de cartographie de la sensibilité des territoires au « risque d'inondation par remontée de nappe » à l'échelle nationale.

Lors d'une deuxième phase, cette cartographie sera exploitée avec une cartographie détaillée pour la réalisation et la validation d'une EAIPrn permettant de prendre en compte les aléas de remontée de nappe dans la révision des EPRI.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude est l'identification et la délimitation de l'emprise maximale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappes, dans le cadre de l'EPRI pour le risque d'inondation par remontée de nappes.

La consolidation au niveau national de cette évaluation préliminaire par analyse régionale et la production de cartographies plus précises, à l'échelle des secteurs à enjeux, ne font pas l'objet de cette étude.

Le présent rapport détaille les données utilisées, qui sont de nature et de qualité très hétérogènes, les méthodes de détermination des critères et les résultats obtenus.

Il est important de savoir que ces résultats basés sur une analyse par interpolation de données souvent très imprécises et provenant parfois de points éloignés les uns des autres, ne procurent que des indications sur des tendances et ne peut être utilisée localement à des fins de réglementation. Pour ce faire, des études ponctuelles détaillées devront être menées.

1.3. LES PHENOMENES DE REMONTEES DE NAPPES

Dans certaines conditions, une élévation exceptionnelle du niveau de la nappe entraîne un type particulier d'inondation : une inondation « par remontée de nappe ».

La plupart des cas de phénomènes de remontées de nappes ayant entraîné des dommages ont été généralement relevés dans les deux contextes suivants :

- au sein d'aquifères calcaires ou crayeux, représentant une masse régionale importante. C'est le cas par exemple des calcaires jurassiques du Callovo-Oxfordien de la région de Caen, de la craie de Picardie, du Nord et de Champagne pour l'essentiel.

Le relativement faible coefficient d'emmagasinement (ratio entre la quantité d'eau qui imprègne la roche et le volume de celle-ci) de ces calcaires entraîne alors une forte remontée de la nappe, en réponse à des épisodes pluvieux anormalement soutenus qui généralement se succèdent sur plusieurs années consécutives. La nappe peut alors atteindre la surface du sol. Mais certains phénomènes peuvent entraîner brutalement une partie de la masse d'eau stockée dans l'aquifère vers les cours d'eau et provoquer des crues importantes et durables dans le temps (plusieurs mois) dans les cours d'eau

- au sein d'aquifères plus perméables (coefficient d'emmagasinement plus élevé) mais de manière plus limitée dans l'espace où, en raison de la présence d'un substratum imperméable, le surplus d'eau ne peut que remonter vers la surface et provoquer une inondation. Cela a été notamment le cas de certaines buttes tertiaires du Bassin parisien.

En revanche lorsque la nappe est naturellement très proche de la surface, comme dans l'exemple de la nappe des sables des Landes de Gascogne où le coefficient d'emmagasinement et la perméabilité de la formation sont élevés, la montée du niveau de la nappe consécutive aux pluies est limitée. En effet l'écoulement de la nappe se fait assez rapidement, pourvu que le secteur soit proprement drainé. Ce sont donc des secteurs qui, bien que soumis à un fort aléa ne sont pas sujets à un « risque » important (le ratio distance à la nappe/fluctuation de la nappe est assez fort, les deux termes étant faibles). D'ailleurs l'habitat n'y comporte généralement aucun sous-sol et les canaux de drainage y sont traditionnellement entretenus.

Dans la suite de l'étude, seul l'aléa est cartographié et pas le risque. Ces zones apparaîtront donc comme sensibles aux remontées de nappes.

L'aléa « Remontées de nappes » est donc souvent corrélé avec l'élévation du niveau des cours d'eau, mais l'inverse n'est évidemment pas vrai.

Trois paramètres sont particulièrement importants dans le déclenchement et la durée de ce type d'inondation :

- une suite d'années à pluviométrie excédentaire, entraînant des niveaux d'étiages de plus en plus élevés,
- une amplitude importante de battement annuel de la nappe, dépendant étroitement du pourcentage d'interstices de l'aquifère,
- un volume global important d'eau contenue dans la nappe, à l'intérieur des limites du bassin versant d'un cours d'eau (le volume contributif de la nappe à l'échelle du bassin versant hydrogéologique).

1.4. CARTE DE SENSIBILITE AUX REMONTEES DE NAPPES

Les zones sensibles au phénomène de remontées de nappe sont consultables sur le site du BRGM : www.inondationsnappes.fr (Cf. Figure 1).

Toutefois ce site devrait être prochainement fermé par suite d'un regroupement général des sites portant sur les risques naturels et technologiques dans un portail d'accès unique qui est déjà actuellement actif (<http://www.georisques.gouv.fr/>). Le transfert du site « remontée de nappe » dans ce site « géorisque » est réalisé dans le cadre de cette étude.

La carte de sensibilité aux remontées de nappe actuellement disponible a été réalisée en 2005 (BRGM/RP-54414-FR) puis actualisée en 2011 (BRGM/RP-59890- FR).

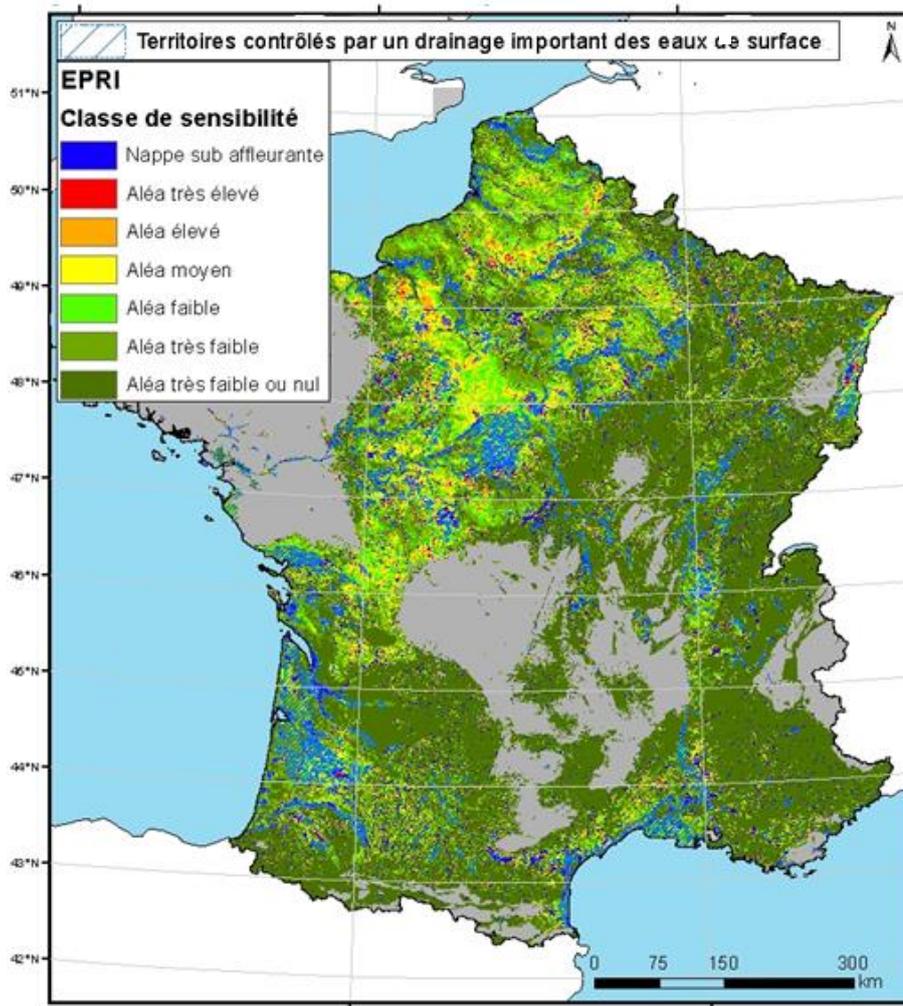


Figure 1 : Carte de sensibilité aux remontées de nappes (2011)

Pour établir cette carte de sensibilité aux remontées de nappes en 2005, une distance moyenne du sol à la nappe et une demi-amplitude moyenne de la nappe avaient été estimées. Les secteurs les plus sensibles aux remontées de nappe avaient été déterminés en fonction du ratio (épaisseur de la zone non saturée / demi-battement).

En 2011, la sensibilité des nappes aux remontées s'appuyait sur une analyse multicritère faisant notamment intervenir le niveau moyen des nappes, le battement maximum, le potentiel d'infiltration et ce après avoir analysé la cyclicité et l'inertie des nappes.

Les résultats ont été rapportés par maille de 250 m x 250 m, mais ne peuvent pas être utilisés à grande échelle (supérieur au 1/100 000^{ème}) en raison du manque de précision des paramètres du calcul. L'évaluation précise des critères principaux cités ci-avant supposerait en effet une connaissance détaillée de la piézométrie et des paramètres hydrodynamiques (coefficient d'emménagement, perméabilité, ...), données souvent indisponibles.

2. Etat des lieux et recherche bibliographique

2.1. INTRODUCTION

Afin de répondre au mieux à la directive Européenne, il est apparu intéressant de s'informer sur le travail réalisé dans les autres pays de la communauté Européenne. Une revue bibliographique a ainsi été réalisée, via internet et les principaux journaux internationaux traitant d'hydrogéologie, fournissant principalement des références d'études locales ou régionales. Un nombre très restreint de références d'études méthodologiques s'appliquant à l'échelle nationale a pu être collecté.

2.1. BILAN SUR LE RAPPORTAGE DES CARTES D'ALEA ET DE RISQUE D'INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE A LA COMMISSION EUROPEENNE

Lors du 17ème meeting du WGF (EC Floods Working Group) en mars 2015, une synthèse générale sur l'état d'avancement du rapportage, par l'ensemble des Etats membres, des cartes d'aléa et de risque d'inondation a été présentée par la Commission Européenne.

Pour la problématique spécifique des inondations par remontée de nappe, celle-ci pointe du doigt la très faible quantité de cartes produites (*cf.* Tableau 1). En effet, cette analyse basée sur les données de 26 Etats membres montre que seuls 5 d'entre eux ont rapporté une cartographie des inondations par remontées de nappes.

Parmi ces 5 résultats positifs, seuls deux d'entre eux (Belgique et Hongrie) présentent des cartographies basées sur une approche a priori statistique (avec période de retour). A noter que les périodes de retour ne sont pas les mêmes entre les deux pays, pour ce qu'ils considèrent comme la cartographie de « probabilité faible ».

MS	Low probability		Medium probability		High probability	
	Return Period (years)	Percentage probability	Return Period (years)	Percentage probability	Return Period (years)	Percentage probability
AT	Not mapped					
BE	100		25 to 50		10	
BG	Not reported					
CY	Not mapped					
CZ	Not mapped					
DE	Not mapped					
DK	Assessed but not in detailed maps					
EE	Not mapped					
EL	Not mapped					
ES	Not mapped					
FI	Not mapped					
FR	Not mapped					
HR	Not assessed					
HU	1000	1‰				
IE	Not mapped					
IT	Not mapped					
LT	Not mapped					
LU	Not mapped					
LV	Not mapped					
MT	Not mapped					
NL	Not mapped					
PL	Not mapped					
PT	Not mapped					
RO	Mapped but no explicit information on scenarios					
SE	Not mapped					
SI	Not mapped					
SK	Not mapped					
UK	Proxy for low probability map without a calculated return period					

Tableau 1 : Tableau synthétique sur le rapportage européen des cartes d'inondation par remontée de nappe (from EU WGF17 presentation, mars 2015)

Le Royaume-Uni, qui fait l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant, considère les résultats de sa cartographie des zones d'inondations par remontée de nappe comme étant à probabilité faible, sans pour autant définir une période de retour.

Cette cartographie fournie par l'Agence Environnementale du Royaume-Uni s'appuie très largement sur la carte de susceptibilité vis-à-vis des inondations par remontée de nappe produite par le BGS (British Geological Survey) en 2008 dont la méthodologie est détaillée dans le chapitre 2.2.2. Elle sert également aux autorités locales afin de mettre en place les évaluations préliminaires de risque d'inondation, imposées par la législation du royaume et conformément aux exigences de la Directive européenne Inondation.

2.2. FOCUS SUR LES TRAVAUX MENES AU ROYAUME UNI

C'est donc principalement au Royaume Uni l'on trouve les publications les plus détaillées sur les méthodologies proposées pour la résolution de ce problème. Elles font suite aux inondations qui se sont produites durant les hivers 2000/2001 et 2002/2003 dans le sud-est du pays.

Il est à noter toutefois que ces approches méthodologiques à l'échelle nationale ne concernent que des aquifères crayeux. On se référera notamment aux articles suivant :

- **Jacobs (2004)** - Strategy for Flood and Coastal Erosion Risk Management: Groundwater Flooding Scoping Study (LDS23).
- **Morris et al. (2007)** – Towards groundwater flood risk mapping. Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 40, 203-211.
- **BGS (2008)** : Susceptibility to groundwater flooding methodology, site internet :
- **Cobby et al. (2009)** – Groundwater flood risk management: advances towards meeting the requirements of the EU floods directive. Journal of flood risk management 2, 111-119.
- **Defra and Environmental agency (2010)** - Developing a prototype tool for mapping flooding from all sources - Phase 1: Scoping and conceptual method development. Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Programme. Project: SC080050/R1. ISBN: 978-1-84911-186-7
- **McKenzie and Ward (2015)** - Estimating numbers of properties susceptible to groundwater flooding in England. British Geological Survey. Open Report, OR/15/016. 16pp.

Ces références peuvent être complétées par des méthodologies à l'échelle des bassins versants :

- **Finch et al. (2004)** - The spatial distribution of groundwater flooding in a chalk catchment in southern England. Hydrological Processes 18, 959–971 (2004).
- **Hugues et al. (2011)** - Flood risk from groundwater: examples from a Chalk catchment in southern England. Journal of Flood Risk Management (2011) 1-13.

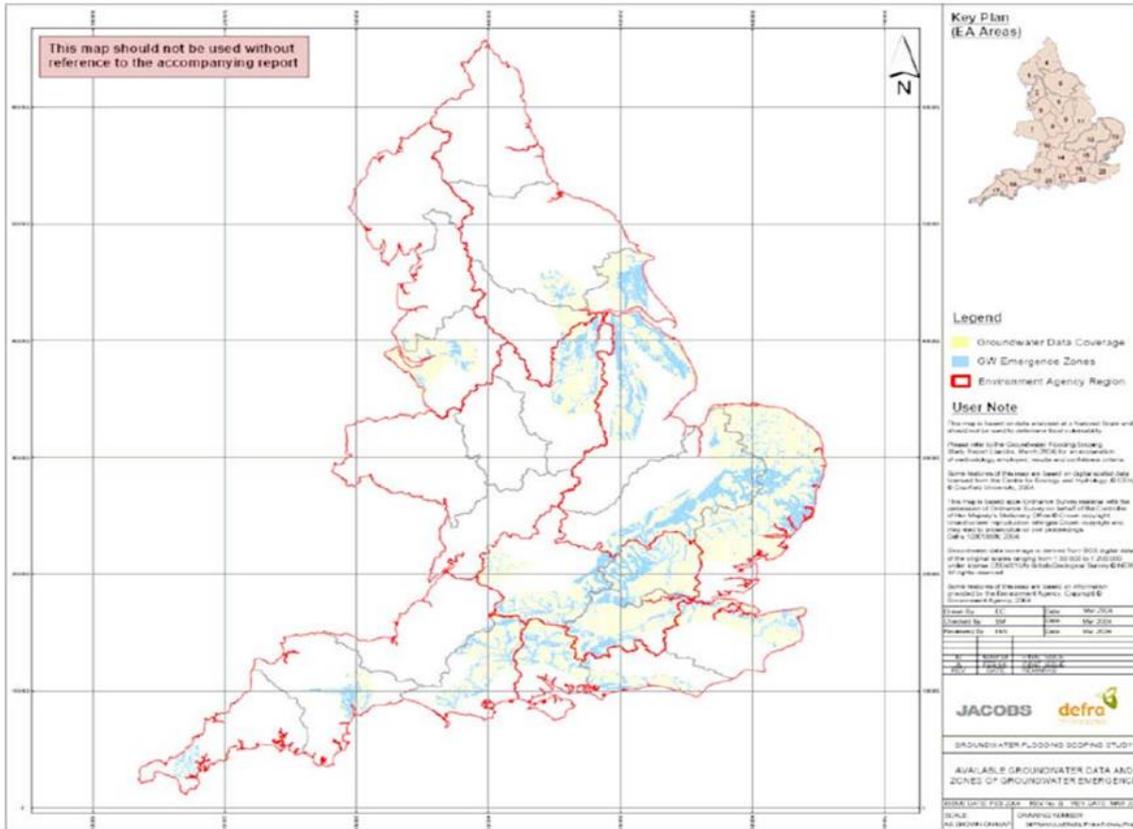
Deux approches peuvent résumer l'ensemble de ces articles.

2.2.1. Première approche globale: Jacob, 2004

Objectif

Son objectif porte sur la production de « Groundwater Emergence Maps », qui identifient des zones au sein des formations sédimentaires consolidées où les niveaux piézométriques, pour un hiver comparable à celui de 2000/2001, seraient à moins de 2 m de la surface du sol.

Le résultat sous forme de carte (*cf.* Figure 2) est très proche des observations réalisées dans les zones crayeuses mais il n'y a pas de distinction suivant l'origine des inondations, cours d'eau ou remontée de nappes.



Groundwater Emergence Map reproduced from Jacobs (2004) taken from <http://www.defra.gov.uk/enviro/fcd/policy/strategy/ha5xcha.pdf>

Figure 2 : Carte de répartition des « zones d'émergence de nappe » proposée par Jacob (2004) au Royaume-Uni

Données utilisées et démarche réalisée

Une 1^{ère} étape a consisté à réaliser une surface interpolée du niveau moyen de la nappe de la craie. Cette interpolation de type TIN (Triangular Irregular Network) a été effectuée en s'appuyant sur une compilation de cartes piézométriques existantes (datées de 1968 à 1986).

Ensuite, cette surface interpolée a été croisée avec le Modèle Numérique de Terrain (MNT) disponible au pas de 50m (0,1 m de résolution verticale) pour définir la profondeur moyenne de la nappe.

En parallèle, une base de données nationale a été créée intégrant les zones ayant subi des remontées de nappe en 2000/2001 (équivalent CAT-NAT), basée sur des données d'origines diverses (Environment Agency, Fire Service...) et permettant ainsi de définir les limites des zones inondées (uniquement dans les zones habitées).

Les zones équivalentes CAT-NAT ont été utilisées pour caler l'interpolation de la profondeur de la nappe en situation extrême cette fois-ci. Les observations des inondations de 2000/2001 ont montré des niveaux de nappe qui ont augmenté de 20m. Se basant sur cette observation de terrain, des cotes maximale « GEM (20m rise) » ont ainsi été déterminées en considérant simplement la profondeur moyenne interpolée de la nappe augmentée de 20m.

Enfin, certains filtres ont été appliqués afin d'exclure des résultats de cette analyse (i) les zones où la nappe est captive (sur la base des données du BGS) et (ii) les zones déjà classées à risque « inondation par la rivière ».

Une des limites de cette approche est qu'elle s'intéresse uniquement aux inondations par remontée de la nappe contenue dans les formations crayeuses. L'approche du BGS (2008) décrite dans le chapitre suivant, tente de considérer l'ensemble des contextes favorisant ce type de phénomène, en incluant notamment les aquifères superficiels sur substratum imperméable.

2.2.2. Deuxième approche globale: BGS, 2008

Cette approche avait comme objectif de produire une carte nationale de susceptibilité vis-à-vis des inondations par remontée de nappe. Cette carte présente à la fois les zones non sujettes et celles susceptibles d'être la cible de ce phénomène.

Une étape préalable a consisté à déterminer les contextes favorisant ce type d'événement au Royaume-Uni. Deux modèles conceptuels ont ainsi été définis.

Inondation d'une nappe libre superficielle sur substratum imperméable (contexte A)

Un 1^{er} type correspond à l'inondation par remontée d'une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé, d'extension limitée et reposant sur une formation imperméable (cf. Figure 3).

Ce phénomène est principalement observé au sein des nappes d'accompagnement de cours d'eau en domaine de socle, généralement peu étendues latéralement.

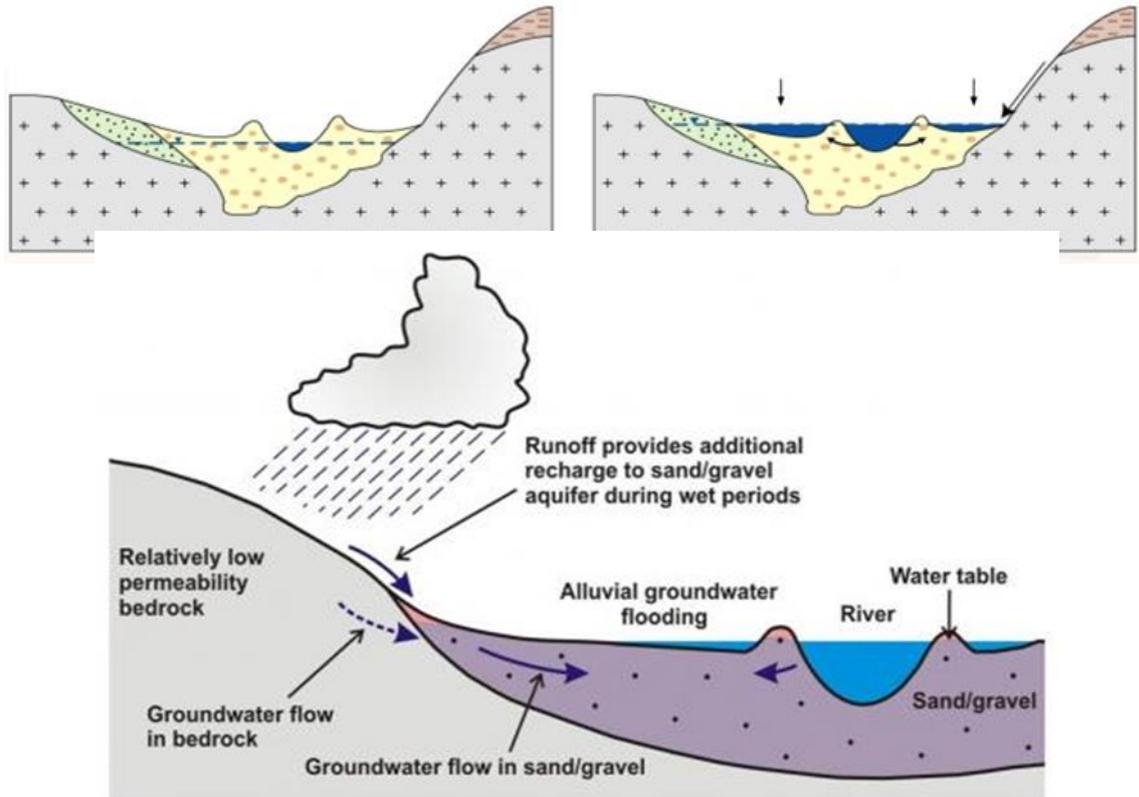


Figure 3 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé et reposant sur une formation imperméable (d'après BGS)

Ce type de nappe superficielle reposant sur une formation imperméable peut engendrer des inondations par remontée de nappe du fait :

- de leur capacité de stockage très limitée,
- de leur recharge directe importante suite à des épisodes pluvieux conséquents et continus,
- de leur caractère souvent très perméable qui favorise ainsi la connexion hydraulique avec les drains de surface type rivière.

Les niveaux piézométriques sont généralement très peu profonds tout au long de l'année et réagissent très rapidement aux épisodes pluvieux intenses dans la zone de recharge de l'aquifère.

La montée du niveau de la rivière, en réponse à ces pluies intenses à l'intérieur du bassin versant, peut provoquer également des circulations d'eau en direction de la nappe, ayant comme conséquence la montée du niveau piézométrique.

Les digues naturelles ou artificielles présentes le long du cours d'eau peuvent permettre la montée du niveau de la rivière, sans provoquer de débordement. Cette montée des eaux va favoriser la montée du niveau de la nappe d'accompagnement jusqu'à provoquer, dans les points bas situés derrière les digues, un débordement. Ce débordement « souterrain » précède généralement l'inondation de surface (par débordement de la rivière) et rallonge la durée de l'inondation dans la zone impactée.

Cependant, les inondations constatées dans ce contexte peuvent être de durée relativement courte, en comparaison du second type d'inondation décrit plus bas. En effet, la rivière, lorsqu'elle retrouve ses niveaux initiaux, draine rapidement l'aquifère perméable.

La principale difficulté est qu'il est généralement difficile de distinguer l'inondation induite par la remontée de nappe de celle induite par la crue de la rivière ou par des épisodes pluvieux intenses.

Inondation d'une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeur (contexte B)

Le 2nd type recensé concerne les inondations par remontée d'une nappe libre contenue dans un aquifère majeur, généralement de durée longue et d'emprise régionale, et en réponse à des épisodes pluvieux extrêmes.

En France, ce phénomène concerne les aquifères calcaires ou crayeux, représentant une masse régionale importante. C'est le cas par exemple des calcaires jurassiques du Callovo-Oxfordien de la région de Caen et de la craie de Picardie, du Nord et de Champagne pour l'essentiel.

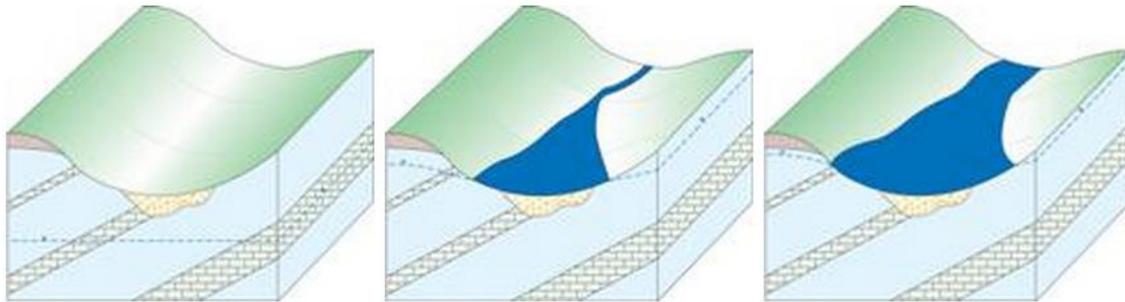


Figure 4 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS)

Ce type d'inondation apparaît lorsque les caractéristiques suivantes sont rencontrées :

- des niveaux de la nappe particulièrement hauts ;
- un taux d'humidité élevé dans la zone non saturée ;
- des épisodes pluvieux intenses et répétés sur plusieurs années consécutives.

Les battements de ce type de nappe peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres.

Des écoulements significatifs sont alors observés dans les vallées sèches, même éloignées des plaines d'inondation. Dans ce type de contexte, l'écoulement en rivière est le reflet de la pluviométrie intense mais également de l'apport souterrain.

A noter que certains phénomènes peuvent entraîner brutalement une partie de la masse d'eau stockée dans l'aquifère vers les cours d'eau et provoquer des crues en surface importantes et durables dans le temps (plusieurs mois).

Données utilisées et démarche réalisée:

Hypothèse de départ : les zones où affleurent des formations à faible perméabilité sont masquées et donc non visibles, car considérées comme n'étant pas sujettes à ce type d'inondation.

1^{ère} étape : elle a consisté à identifier les zones à contexte A et B précédemment décrits. Pour se faire, le BGS a utilisé la carte nationale à index de perméabilité. Il s'agit d'une cartographie, basée sur la géologie au 1/50000, qui définit, pour chaque formation affleurante, un indice de perméabilité maximum et un indice de perméabilité minimum, selon cinq classes pour chacun des deux.

Pour le contexte A, ont été sélectionnés tous les dépôts superficiels ayant un indice de perméabilité maximum classé en très élevé ou élevé, et reposant sur des formations à indice de perméabilité minimum classé en très faible et faible.

Pour le contexte B, ont été sélectionnées toutes les formations aquifères ayant un indice de perméabilité maximum classé à très élevé et élevé, en enlevant les zones recouvertes par des dépôts superficiels à indice de perméabilité maximum classé en très faible et faible.

2^{ème} étape : La profondeur relative du niveau piézométrique induisant ce type d'inondation est calculée de deux manières différentes selon les contextes :

- Contexte A :
 - comme la relation nappe/rivière est supposée forte pour ce type de contexte, une zone tampon de 500m le long du linéaire de cours d'eau est réalisé et les zones préalablement identifiées qui seraient en dehors de ce buffer sont exclues;
 - en l'absence de données de forage, une interpolation de type « River Base Line » est réalisée (elle s'appuie sur le réseau de drainage comme point de contrainte, cf. 4.2) ;
 - puis l'épaisseur de ZNS est calculée en croisant avec le MNT.
- Contexte B:
 - la surface représentant le niveau piézométrique minimum est calculée, en combinant les cartes piézométriques, les niveaux piézométriques mesurés ponctuellement et le niveau de base de la rivière pour rendre compte de l'aspect « arqué » de cette surface sous les interfluves ;
 - les battements de la nappe sont ensuite considérés pour estimer le niveau piézométrique maximum et calculer l'épaisseur de ZNS.

3^{ème} étape : les classes de représentation sont ensuite définies de la façon suivante :

- A : Zone susceptible d'être inondée en surface par remontée de la nappe d'eau souterraine ;
- B : Zone pouvant être le lieu d'inondation de biens situés immédiatement en-dessous du niveau du sol (type cave), par remontée de la nappe d'eau souterraine ;
- C : Zone peu susceptible d'être le lieu d'inondation par remontée de la nappe d'eau souterraine ;
- D : Zone considérée comme n'étant pas sujette à ce type d'inondation

4^{ème} Etape : les résultats sont enfin validés sur la base des zones déclarées en inondation par remontée de nappe.

2.3. SELECTION D'AUTRES REFERENCES

2.3.1. Ukraine

Chebanov *et al.* (2011) - Zoning groundwater flooding risks in the cities and urban agglomeration areas of Ukraine. Risk in Water Resources Management (Proceedings of Symposium H03 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011) (IAHS Publ. 347, 2011).

Cet article propose une analyse statistique multicritères sur les problèmes de remontée de nappes dans les principales agglomérations du pays. Cette analyse s'appuie sur des jeux de données très précis et donc difficiles à intégrer dans une méthodologie de cartographie à l'échelle nationale.

2.3.2. Allemagne

Becker *et al.* (2011) - On the Determination of Groundwater Levels for Hazard Maps of Groundwater Head Rise Induced by High Water. *Wasswirtschaft* (article en allemand).

Cet article propose une comparaison de deux méthodes pour caractériser et cartographier les zones à risque d'inondation par remontée de nappe, à une échelle encore une fois très localisée. L'une d'entre elle mobilise des moyens de simulation hydrodynamique numérique inadaptés pour une approche nationale.

2.4. BILAN ET PERSPECTIVES POUR UNE APPROCHE A L'ECHELLE NATIONALE

De manière générale, cet inventaire permet de mettre en lumière le fait que peu d'approches globales à des échelles nationales ont été menées à ce jour. Les études menées sur cette problématique d'inondation par remontée de nappe proposent souvent des approches adaptées à des échelles de travail locales. Une exception notable concerne le Royaume-Uni qui, après les inondations par remontée de la nappe de la Craie ayant touché un quart Sud-Est du royaume en 2000 et 2001, ont décidé d'analyser cette problématique de manière globale.

La méthode proposée en 2011 pour la réalisation de l'évaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes en France n'a été appliquée qu'au domaine sédimentaire. Les analyses menées par le BGS en 2008 montrent bien que le contexte de socle ne doit pas être exclu de ces travaux, quand bien même la qualité et la quantité de données disponibles ne soient pas suffisantes. Ils ont ainsi défini deux approches différentes, l'une bénéficiant de jeu de données étoffés (contexte B), l'autre s'appuyant sur des hypothèses fortes pour initier l'interpolation d'une surface piézométrique dans un contexte mal connu (contexte A). Il paraît intéressant d'utiliser le nouveau référentiel hydrogéologique français BDLISA pour distinguer ces contextes, d'autant qu'un effort conséquent a été mené pour cartographier les alluvions dans sa dernière version, publiée en août 2015. De même, l'ordonnancement relatif des couches permet d'identifier les zones sous couverture d'imperméable.

Lors de la première étude réalisée en France en 2011, les unités de base utilisées pour la restitution des résultats étaient les unités fonctionnelles (UF). Elles étaient issues du croisement du référentiel hydrogéologique BDRHFV1 (désormais obsolète et remplacé par BDLISA), des zones hydrographiques de la BD Carthage et d'un travail de cartographie des fonds de vallée. Il n'est pas certain que conserver ce type de restitution soit toujours pertinent car l'agrégation des

résultats d'interpolation par UF ajoute un nouveau degré d'imprécision sur une approche déjà caractérisée par des incertitudes conséquentes à cette échelle de travail nationale.

Le BGS s'est également appuyé sur un inventaire des zones historiquement touchées par des inondations par remontée de nappe. Ces zones ont servi de points de calage pour leur interpolation, ce qui se distingue de la méthode française de 2011 qui ne s'appuyait sur ces données que pour vérifier les résultats de calcul *a posteriori*. Les utiliser plutôt comme données d'entrée pour améliorer, du moins localement, la qualité de l'interpolation de la surface piézométrique « extrême » paraît plus pertinent.

Il en est de même pour les zones déjà identifiées comme potentielles de débordement d'après les simulations des modèles hydrodynamiques. Là encore, s'en servir comme données d'entrée du calcul semble aller dans le sens d'une amélioration de la précision des résultats. Notons toutefois que ces modèles se situent généralement dans des zones particulièrement bien connues, avec déjà une quantité d'informations conséquente (cartes piézométriques, réseau de points dense...).

Enfin, le mode de représentation en 4 classes proposé par le BGS semble particulièrement adapté à l'objectif fixé dans cette étude, et tout particulièrement la distinction entre les débordements visibles en surface et les inondations de cave.

3. Matériel et supports méthodologiques

3.1. TYPES D'AQUIFERE ETUDIES

La carte de sensibilité aux remontées de nappe consiste à identifier et délimiter l'emprise maximale des zones sensibles aux remontées de nappe et compléter ainsi les zones délimitées par les débordements de cours d'eau et les invasions marines.

Contrairement à certains autres pays Européens, il existe, en France, une grande diversité dans les grands types de gisements d'eau souterraine que l'on rencontre sur le territoire national:

- des aquifères de socle, en général de petite extension ;
- des aquifères sédimentaires avec nappes libres, d'extension variable ;
- des aquifères sédimentaires avec nappes captives ;
- des aquifères alluviaux ;
- et des zones karstiques.

Dans cette étude, on ne s'intéressera, principalement, qu'à la dynamique des nappes libres. Les nappes captives profondes sont en effet peu influencées par les cycles climatiques.

De potentialité beaucoup plus restreinte (quelques m³/h au plus), les ressources des formations de socle sont étroitement liées au degré de fracturation de ce réservoir.

Les réservoirs des nappes alluviales sont quant à eux, représentés par des sables et graviers occupant le lit majeur des grandes vallées (Loire, Allier...). Les nappes alluviales sont peu épaisses et leur régime est très influencé par celui des cours d'eau. Les aquifères alluviaux en étroite relation avec un cours d'eau peuvent être alternativement drainés, alimentés (ou réalimentés) par le cours d'eau suivant la période de l'année.

La karstification est un ensemble de processus d'érosion effectués par l'eau souterraine qui se charge en CO₂ essentiellement produit dans les sols. Ce gaz se transforme en acide dans l'eau et dissout les roches carbonatées en particulier lorsqu'elles sont fracturées. Ces vides forment des aquifères dits « karstiques » dans lesquels l'eau peut circuler très rapidement, s'accumuler et émerger par l'intermédiaire de sources dont le débit moyen peut atteindre plusieurs m³/s. Le fonctionnement de ces aquifères ne peut être déduit que d'une analyse fine des chroniques de débits aux émergences, renforcée éventuellement par le contrôle de paramètres chimiques. C'est pourquoi les aquifères karstiques ne sont pas traités dans cette étude.

La Figure 5 ci-dessous montre la localisation des différents types d'aquifères en France métropolitaine.

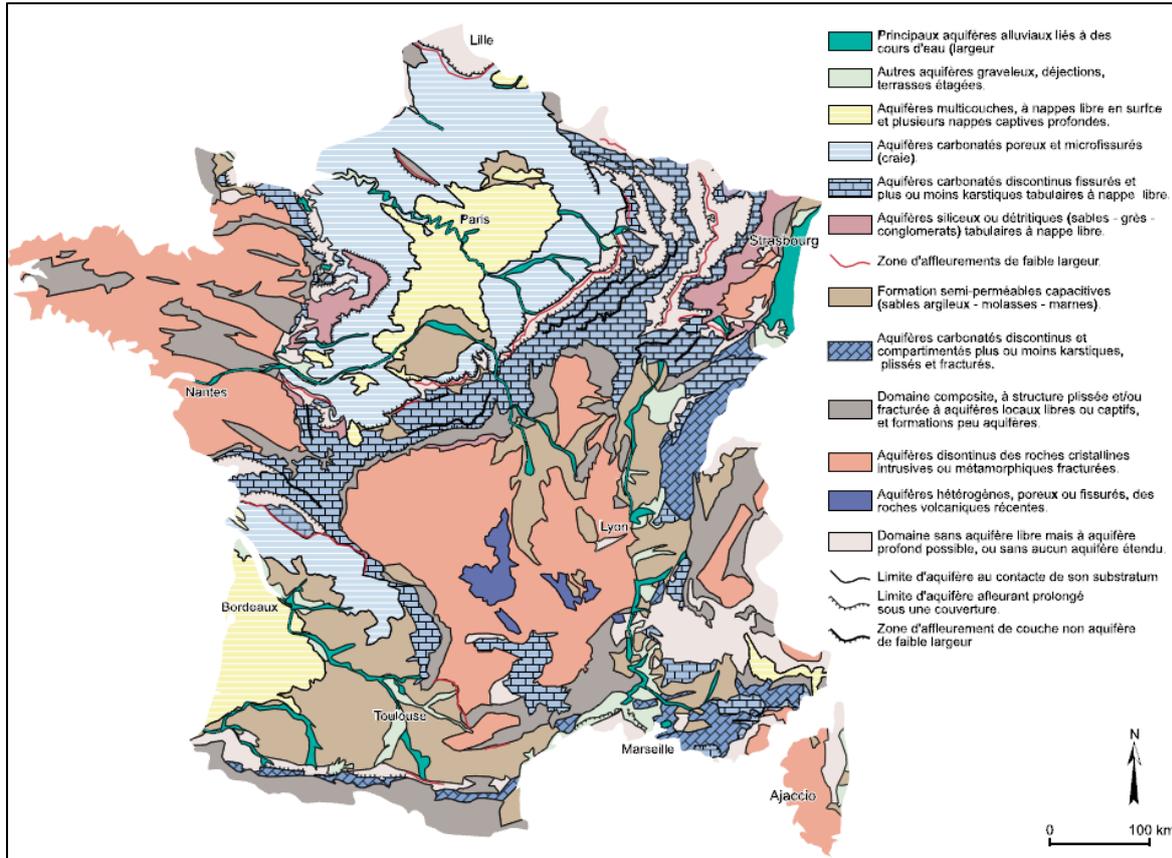


Figure 5 : Carte hydrogéologique structurale de la France métropolitaine (J. Margat, 1986)

Contextes hydrogéologiques particuliers non pris en compte dans la suite de l'étude

En ce qui concerne les aquifères karstiques, caractérisés par une dualité des écoulements, avec des écoulements au sein d'un réseau de conduits karstiques mais également au sein d'une matrice fissurée, les méthodes classiques de détermination de l'aléa inondation ne pourront pas être menées. **Ils ne seront donc pas traités dans le cadre de cette étude.** Un masque couvrant ces zones devra être appliquée sur la carte finale. Au besoin, une cartographie des zones de karst est disponible dans la BDLISA version 2 (Figure 6), téléchargeable sur le site du SANDRE² ou sur le site internet de la BDLISA³.

² <http://www.sandre.eaufrance.fr/>

³ <http://bdlisa.eaufrance.fr/>

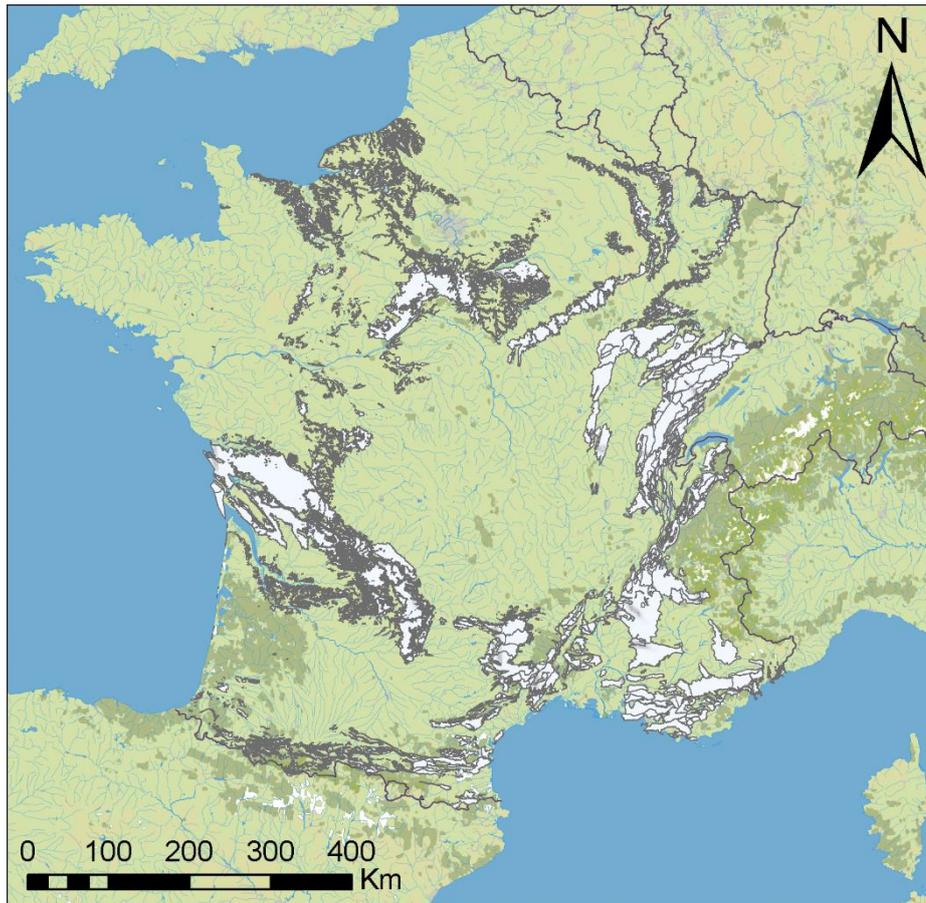


Figure 6 Cartographie issue de la BDLisa des zones de karst affleurant

Concernant les zones urbaines, la présence de bâti souterrain (fondations de bâtiments, parkings, lignes de métro, canalisations de grand diamètre) influence les écoulements et les amplitudes des aquifères. Etablir des zonages suivant le niveau de sensibilité aux remontées de nappes en zone urbaine nécessite donc une étude particulière. **L'approche nationale décrite dans le présent rapport ne permet pas d'établir ces zonages particuliers car le niveau de détail des données sources n'est pas adapté et l'information sur les infrastructures n'est pas prise en compte.**

Les caractéristiques particulières des secteurs de l'après-mine ne sont également pas intégrées dans la méthode globale décrite dans la suite du rapport. Le caractère non stabilisé des niveaux des nappes contenues en leur sein, suite à l'arrêt des activités d'extraction minière, fait que l'analyse des données historiques n'est pas pertinente pour en extrapoler une situation future de niveau extrême. Les niveaux en constante hausse, ne sont généralement toujours pas stabilisés. L'exploitation de ces données telle que prévue dans l'approche nationale, ne permet donc pas d'estimer un niveau maximum extrême réaliste.

3.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DYNAMIQUE DES NAPPES

La dynamique d'une nappe à surface libre, en milieux poreux, c'est-à-dire la façon dont elle va réagir soit à une action exercée sur elle (recharge, prélèvements) soit, au contraire, à une absence d'influence ("tarissement" en l'absence de recharge et de prélèvements) est sous la dépendance :

- de la perméabilité K et du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques variant spatialement) ;
- de la géométrie de l'aquifère : une extension (définie dans un cas simple par une longueur L) et une épaisseur (définie dans un cas simple par une épaisseur moyenne E) ;
- de la position des limites et des conditions qui y prévalent ;
- des connexions plus ou moins importantes de la nappe avec un réseau hydrographique et du plus ou moins grand développement de ce réseau ;
- des caractéristiques de la zone non saturée (épaisseur et nature), déterminant le temps d'arrivée à la nappe de la lame d'eau infiltrée à la surface
- du contexte géomorphologique.⁴

Ces données, nécessaires pour simuler l'évolution d'une nappe à l'aide d'un modèle numérique, sont très disparates et rarement disponibles. La méthode usuelle, pour estimer les caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère, est l'interprétation des données de pompages d'essais (qui consiste à suivre le rabattement pendant et après un pompage). Or les coûts de réalisation de forages et a fortiori de pompages d'essais sont élevés. Ils ne permettent en général pas de multiplier les observations et de prendre ainsi en considération les hétérogénéités du milieu et les variations spatiales des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère.

La dynamique des nappes peut toutefois être évaluée par une approche indirecte basée sur l'observation de ses fluctuations (type de cycle et amplitude des fluctuations).

Ce sont ces critères, décrits ci-après, qui vont être utilisés pour l'estimation du risque d'inondation par remontée de nappes.

3.3. CRITERES UTILISES POUR EVALUER LES ZONES POTENTIELLEMENT INONDABLES PAR REMONTEES DE NAPPE

Cette évaluation nécessite le recoupement d'un grand nombre de données de natures très différentes : des données d'observations ponctuelles à un instant t , des données de suivi (chroniques piézométriques), des cartes piézométriques locales (réalisées à une période donnée, en hautes eaux et/ou en basses eaux), des données qualitatives disponibles sur tout le territoire (potentiel d'infiltration, référentiel hydrogéologique, ...). L'utilisation de ces différentes sources de données et l'augmentation du nombre de points suivis ont permis d'approfondir les méthodes utilisées entre 2002 et 2011.

Afin d'évaluer les zones potentiellement inondables par remontées de nappes, différents critères ont donc été couplés comme le niveau maximal probable des nappes, le battement maximum des nappes, le potentiel infiltrant du sol et sous-sol, les données historiques et celles issues de modèles hydrodynamiques.

3.3.1. Potentiel d'infiltration

Pour qu'une inondation par remontée de nappe puisse survenir, il faut pouvoir accumuler suffisamment d'eau provenant des précipitations, dans le cas d'un aquifère proche de la surface, jusqu'à provoquer un débordement. Les zones à forte sensibilité aux remontées de nappe vont

⁴ Pour plus de détails, se reporter au rapport suivant : Seguin J.J., Wuilleumier A., 2006. Exploitabilité des ressources en eaux souterraines en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre. BRGM/RP-55188-FR

donc se situer là où les eaux de pluies vont pouvoir s'infiltrer pour alimenter les nappes. Le caractère infiltrant des terrains encaissants sera pris en compte à partir des caractéristiques des entités hydrogéologiques affleurantes de la BDLisa et d'un critère sur la pente : un terrain à forte pente, même très infiltrant, favorisera le ruissellement par rapport à l'infiltration.

3.3.2. Types de cycles hydrodynamiques

On peut distinguer les nappes:

- à cycles annuels : par exemple les nappes du Jurassique supérieur et du Dogger en Poitou-Charentes, ...
- à cycles pluriannuels : par exemple la nappe des Calcaires de Beauce,
- à cycles courts intégrés dans des cycles longs, par exemple de nombreuses nappes en contexte crayeux.

Ces différences de comportement sont liées à la plus ou moins grande inertie des nappes. Les remontées de nappes, provoquant des dégâts matériels, se produisent surtout dans les secteurs où la variation annuelle de la nappe peut être importante (de l'ordre de la dizaine de mètres), et là où cette variation se surimpose à une fluctuation interannuelle (c'est ce que l'on appelle « l'effet mémoire » de l'aquifère).

Suivant le type de comportement, la longueur de la série nécessaire à une évaluation probabiliste fiable diffère. En considérant que les enveloppes maximales probables doivent et peuvent être définies correctement au moyen d'un événement dont la période de retour est, au minimum, centennale, il serait nécessaire de disposer d'au moins 30 années de données pour un piézomètre possédant un cycle annuel et d'une longueur n fois supérieure pour un cycle pluriannuel de n années.

3.4. DONNEES UTILISEES

3.4.1. Données associées aux points d'eau

Source des données disponibles

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 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...) et sont souvent très incomplètes.

Des données plus spécifiques aux ouvrages d'eau sont également disponibles dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES), site du Système d'Information sur l'Eau.

• Liens entre la BSS, la BSS EAU et ADES

La BSS EAU est une base de données interopérable qui communique quotidiennement avec les bases de données BSS et ADES. La Figure 7 ci-dessous présente le schéma simplifié du contenu des bases et des échanges dynamiques qui sont actuellement en place.

Le schéma est à lire de la gauche vers la droite et présente trois parties distinctes dédiées respectivement à la BSS, la BSS EAU et ADES.

- 1) La création d'un nouvel ouvrage est réalisée dans la BSS (Banque de données sur le Sous-Sol). Cette création d'ouvrage est réalisée par le BRGM dans un outil interne et résulte d'un processus déclaratif (déclaration titre du code minier, code de l'environnement). Les informations essentielles d'identification de l'ouvrage y sont saisies (attribution du code BSS, coordonnées géographiques de l'ouvrage, altitude au sol de l'ouvrage, données attributaires telles une coupe technique, une coupe géologique).
- 2) Lorsqu'un ouvrage présente une relation avec les eaux souterraines, il est défini en BSS comme étant un « point d'eau » ; cet ouvrage est alors créé de manière automatique et dynamique en BSS EAU ; plusieurs informations saisies en BSS sont récupérées en BSS EAU : le code BSS, les coordonnées géographiques, la commune et l'altitude au sol.

Le renseignement des données en BSS EAU est réalisé exclusivement par le BRGM. Les données concernent le descriptif de tous les points d'eau, les données piézométriques ainsi que le matériel piézométrique (utilisé sur le réseau de surveillance national sous maîtrise d'ouvrage BRGM). Cette saisie est effectuée en interne via une application ACCESS.

Nb : les producteurs de données piézométriques autres que le BRGM ne peuvent saisir leurs données en BSS EAU. Ils sont contraints d'utiliser des outils de saisie alternatifs

autres (base de données locale Molosse par exemple) et alimentent ainsi directement la base de données ADES.

- 3) Tout producteur de données quantitative (piézométrie) ou qualitative a la possibilité d'ajouter depuis le site producteur ADES un point d'eau à son réseau de surveillance. Lorsqu'un point d'eau est rattaché à un réseau de surveillance sur ADES, plusieurs données saisies en BSS EAU sont automatiquement transférées sur ADES : les données du descriptif du point d'eau en particulier.

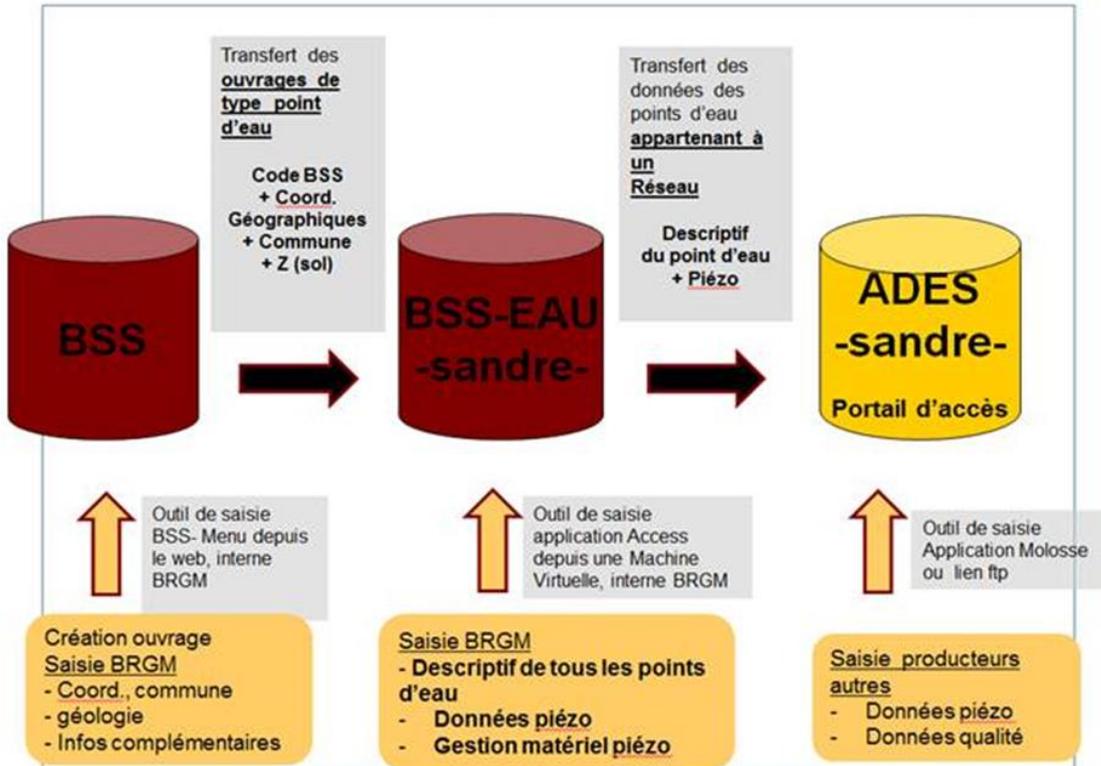


Figure 7 : Schéma d'interconnexion entre BSS, BSS EAU et ADES

- **Ouvrages recensés dans la BSSEAU**

La Figure 8 montre l'évolution du nombre de points d'eau en BSS EAU depuis juin 2012. Le nombre de points d'eau en BSS EAU augmente sur cette période à une moyenne d'environ 7500 points d'eau par an.

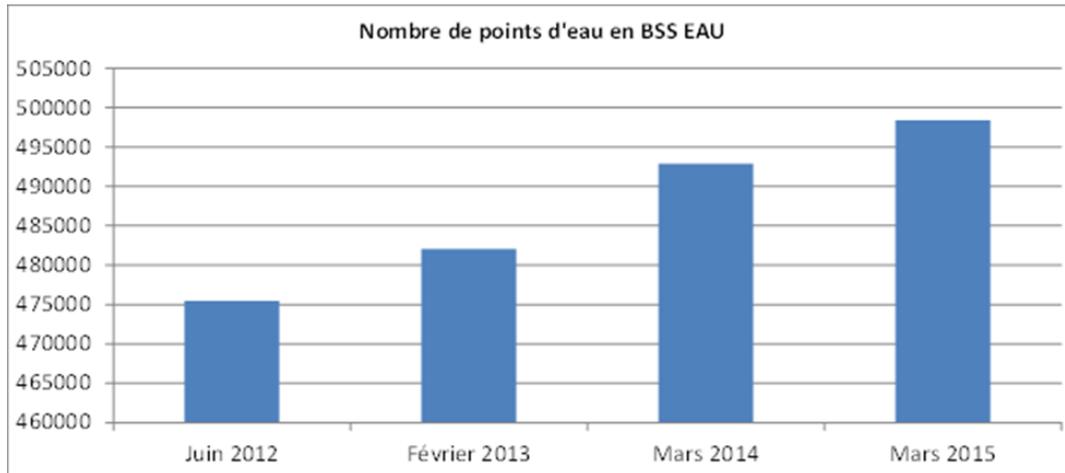


Figure 8 : Evolution du nombre de points d'eau en BSS EAU depuis juin 2012

Un bilan a été réalisé sur différents champs du descriptif des points d'eau de la BSS EAU afin d'identifier le nombre de points d'eau non renseignés. La Figure 9 présente le résultat de ce bilan.

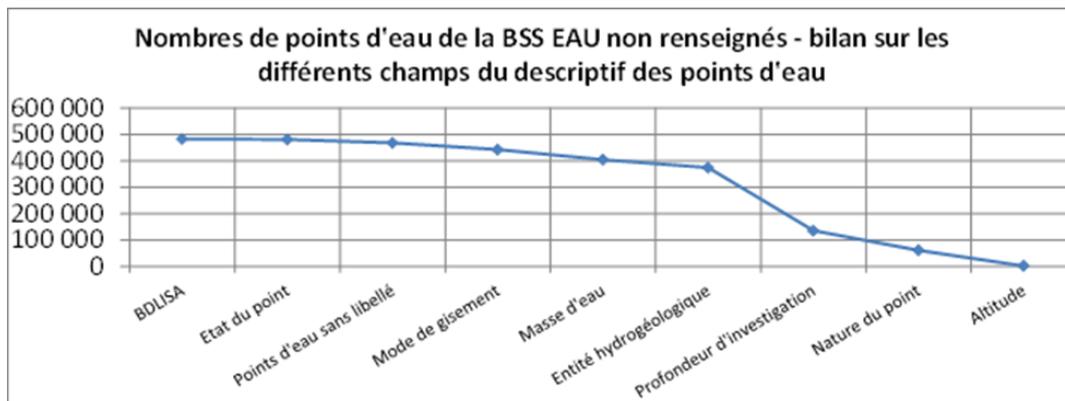


Figure 9 : Etat des lieux sur le descriptif des points d'eau de la BSS EAU (état en mars 2015)

La Figure 9 montre que les champs du descriptif des points d'eau les moins bien renseignés sont l'entité BDLISA (cf. 3.4.2), l'état du point d'eau, le libellé et le mode de gisement.

Les ouvrages 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 piézomètres⁵ (stations de suivi des niveaux d'eau) et des qualitomètres (stations de suivi de la qualité des eaux). Pour ces deux derniers types de points d'eau, les informations des descriptifs des points d'eau et des données sur les niveaux d'eau associés pour les piézomètres sont également consultables sur ADES (<http://ades.eaufrance.fr>). L'interrogation sur un ouvrage sur un portail web (<http://infoterre.brgm.fr>), donne accès aux informations sur ce point d'eau : coupe géologique et technique, données relatives à la quantité, à la qualité, etc.

⁵ Un piézomètre est un dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un 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)

Ouvrages recensés et points collectés pour l'étude

• Piézomètres (source de données : 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 sur des points d'eau appartenant à des réseaux de mesure régulièrement suivis. Ces données proviennent notamment de piézomètres répartis sur l'ensemble du territoire sur lesquels sont mesurés à pas de temps régulier le niveau de l'eau.

Pour les besoins de cette étude, une extraction des piézomètres présents dans ADES et de leurs chroniques piézométriques respectives a donc été réalisée en août 2015 et en excluant toutefois les mesures qualifiées d'incorrectes ou d'incertaines. Seules les mesures appartenant aux classes en vert dans le Tableau 2 ont été considérées pour les calculs statistiques réalisés par la suite.

		QUALIFICATION				
		0	1	2	3	4
		Non définissable	Correcte	Incorrecte	incertaine	Non qualifié
STATUT						
brute	1	X				X
contrôlée niveau 1	2		X	X	X	
contrôlée niveau 2	3		X	X	X	
donnée interprétée	4		X	X	X	

Tableau 2 : Sélections des mesures piézométriques considérées dans l'étude en fonction de leur statut et de leur qualification

Cette banque de données permet donc d'obtenir une chronique piézométrique : c'est-à-dire un relevé, en fonction du temps, des niveaux de l'eau contenue dans un système aquifère, constatés à un point d'eau donné, que celui-ci soit un piézomètre réservé à ce suivi mais aussi un forage, un puits... La chronique est continue ou discontinue.

Dans un premier temps, cette extraction comporte 3858 ouvrages avec chronique. Plusieurs nettoyages manuels ont ensuite été effectués, afin de supprimer notamment les ouvrages caractérisés comme captant une nappe captive, les ouvrages ayant des chroniques erronées, les ouvrages présentant des chroniques trop influencées par des pompes voisines...etc... Ces travaux de nettoyage ont restreint la sélection des ouvrages réellement pertinents pour le cadre de l'étude au nombre de 2898 (2611 en métropole et 287 dans les DOM).

La Figure 10 présente la répartition de ces piézomètres. Elle montre une hétérogénéité spatiale, avec moins de piézomètres dans les zones d'aquifères de socle (Massif central et Massif armoricain) et dans les DOM (uniquement en bordure littorale pour la Réunion et la Guyane, quasi-exclusivement en Grande-Terre pour la Guadeloupe).

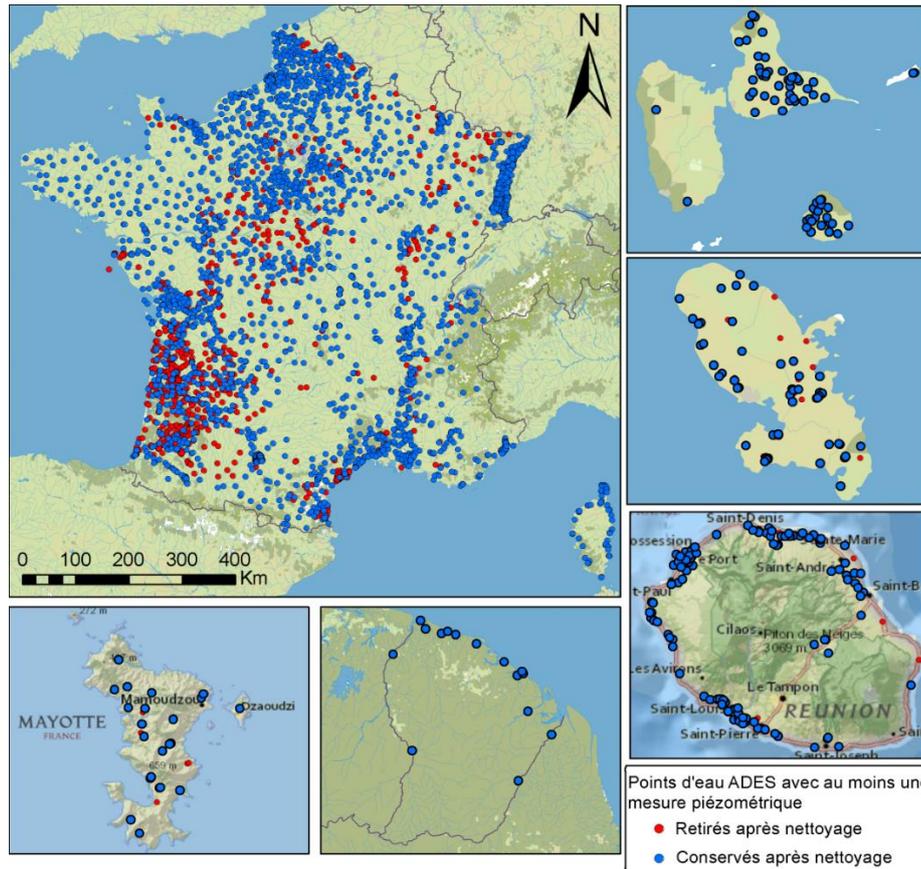


Figure 10 : Localisation des points d'eau bancarisés dans ADES ayant au moins une mesure piézométrique (avant et après nettoyage)

• **Points d'eau de la BSS EAU**

En plus des points déjà bancarisés dans ADES, 14222 points d'eau ayant au moins une mesure de niveau d'eau ont été extraits de la BSS EAU en octobre 2015 (cf. Figure 11).

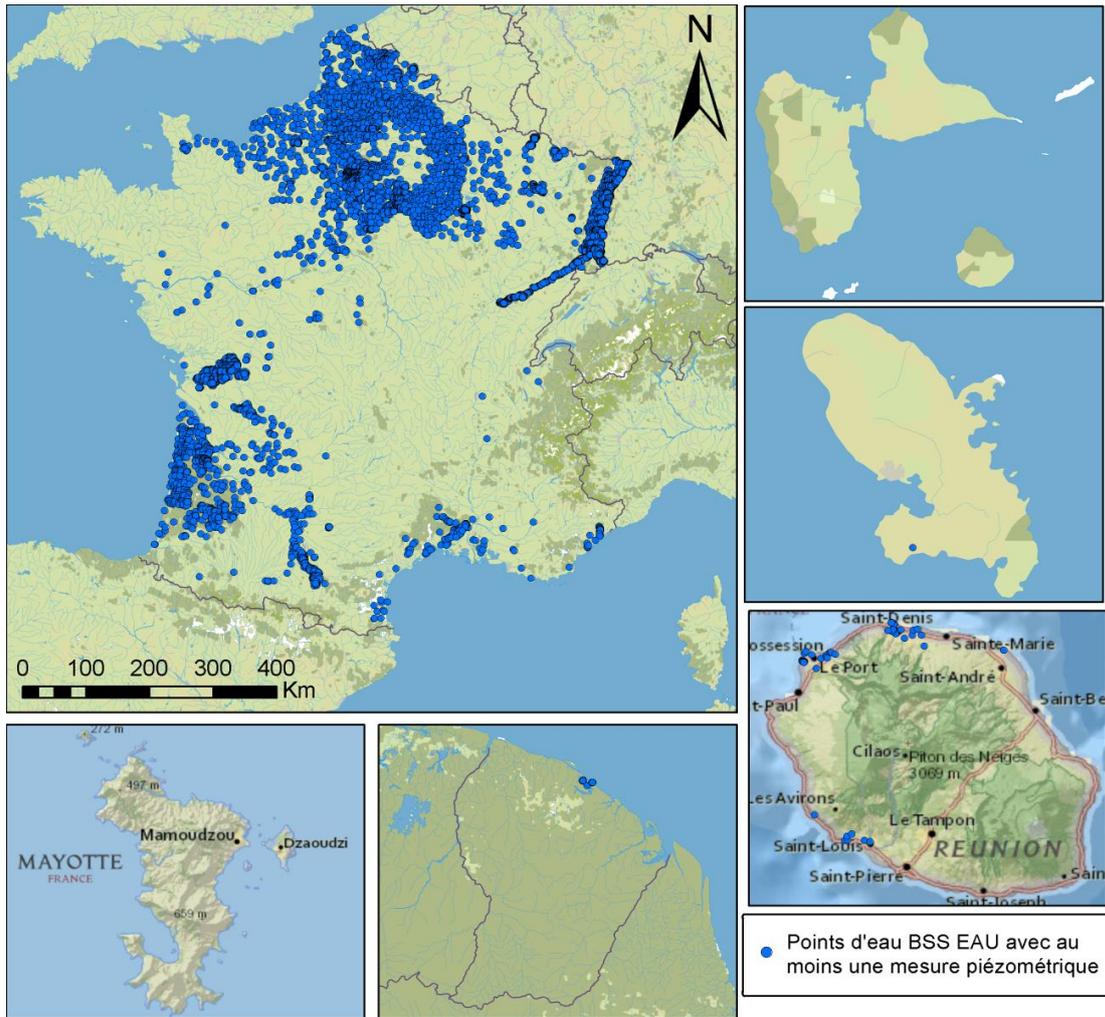


Figure 11 : Localisation des points BSSEAU ayant au moins une mesure piézométrique et ne faisant pas partie d'un réseau dans ADES

Ces points d'eau, capitalisant des données historiques et ne faisant pas partie d'un réseau de surveillance quantité ADES, peuvent parfois présenter des chroniques piézométriques pluriannuelles intéressantes.

Il faut noter cependant l'extrême hétérogénéité de la couverture du territoire (les points sont essentiellement localisés dans le bassin Seine-Normandie, en Alsace et en Aquitaine), avec, de nouveau, un niveau de couverture très faible dans les zones de socle et dans les DOM.

• Ouvrages de la BSS

Une extraction de tous les ouvrages « eau » possédant une valeur de profondeur d'eau recensés dans la BSS mais ne faisant pas partie d'ADES ou de la BSS EAU a été réalisée en octobre 2015. Cela représente 205 445 points avec au moins une mesure de niveau d'eau (cf. Figure 12).

La répartition de ces points montre une hétérogénéité spatiale, avec moins de points dans les zones de socle. La totalité de ces 205 445 points a été rassemblée dans une base de données géographique (géodatabase) dans laquelle sont renseignés le code BSS de l'ouvrage, la

profondeur d'eau, le niveau d'eau et la date de mesure de celui-ci, l'altitude et les coordonnées associées.

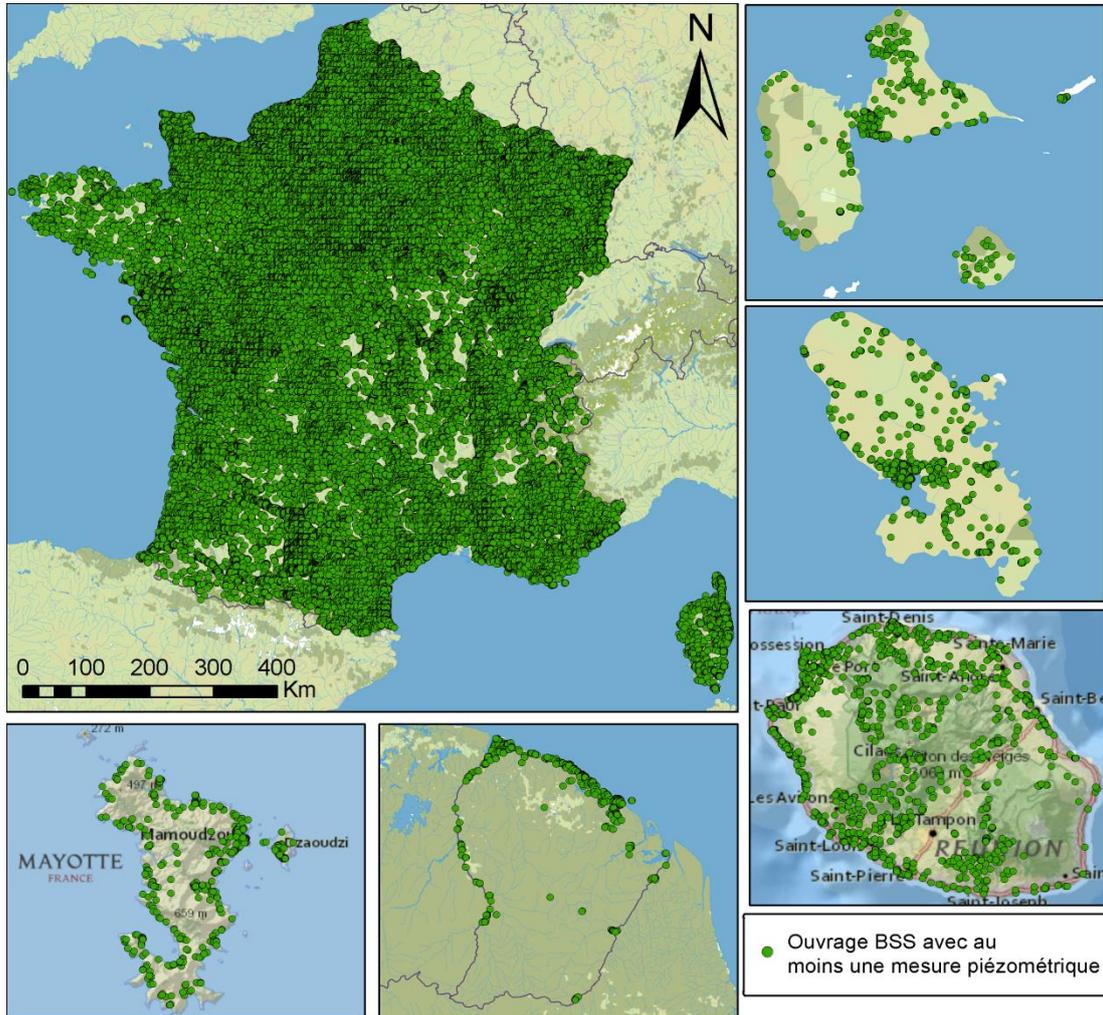


Figure 12 : Carte de répartition des 205 445 points d'eau issus de la BSS et ne faisant pas partie d'ADES ni de BSS EAU ayant au moins une mesure de niveau d'eau

A première vue, cette extraction apparaît intéressante pour l'établissement d'une méthodologie nationale car (i) le nombre de points est important et (ii) leur répartition géographique est assez homogène (hors zones de socle).

Cependant, une analyse plus fine a permis de démontrer que leur utilisation n'était pas envisageable pour la problématique de l'étude, ces points étant d'un niveau de fiabilité très faible. En effet :

- de fortes incertitudes subsistent sur la localisation, les caractéristiques et l'altimétrie des ouvrages recensés ;
- une large majorité de ces points ne fait l'objet d'aucune description précise ;
- contrairement aux points d'eau présents dans ADES et dans BSS EAU, il est particulièrement difficile de savoir à quelle profondeur la nappe est captée ;
- La mesure piézométrique est généralement réalisée immédiatement après la foration et ne retranscrit donc pas le niveau statique réel de la nappe captée.

Enfin, 95% de ces points ne présentent qu'une seule mesure piézométrique. Sans entité hydrogéologique associée et sans information sur la profondeur de l'ouvrage, il est difficile d'agrèger des mesures uniques issues de points d'eau différents pour tenter d'approcher une valeur maximum qui caractériserait la nappe captée.

Les points et données issus de cette extraction, présentés ici à titre indicatif, n'ont donc pas été intégrés dans la méthodologie nationale de cartographie des zones de remontée de nappe.

3.4.2. Référentiel BDLISA

Le référentiel hydrogéologique utilisé en 2011 était celui de la Base de Données du Référentiel Hydrogéologique de France, Version 1 puis version 2 (BDRHF_V2), mais depuis 2012, la BDLISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) est devenue le nouveau référentiel hydrogéologique français.

La version 1 de la BDLISA a été publiée en août 2015 (cf. Figure 13). Dans les premiers temps, c'est cette version qui a été utilisée pour la présente étude. Une légère mise à jour de cette cartographie a néanmoins été réalisée, s'appuyant sur les travaux alors en cours en 2017 pour la version 2 de BDLISA dont la diffusion est prévue début 2018.

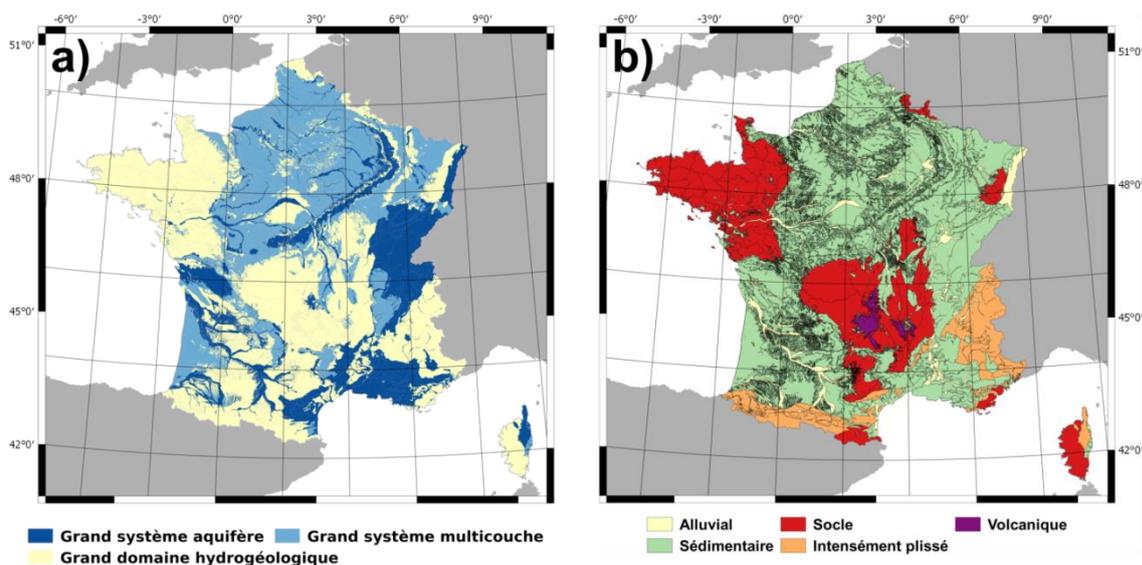


Figure 13 : Représentation cartographique des entités hydrogéologiques de la BDLISA version 1 selon les critères a) Potentialités aquifères et b) Type de formation géologique

Son mode de construction et ses caractéristiques intrinsèques présentent des intérêts multiples pour la détermination des terrains potentiellement favorables à des débordements par remontée de nappe. En effet :

- l'ensemble du territoire national est couvert (à l'exception de Mayotte) ;
- les contours et caractéristiques des principales formations alluviales aquifères sont intégrées dans le référentiel ;
- les formations alluviales moins productrices sont également cartographiées, comme entités complémentaires ;

- l'ordonnancement relatif retranscrivant qualitativement la superposition des entités hydrogéologiques permet de localiser les zones où affleurent des terrains imperméables et donc de les identifier comme zone sans risque d'inondation par remontée de nappe ;
- parmi les propriétés intrinsèques des entités hydrogéologiques BDLISA, celles décrivant le caractère captif ou libre de la nappe est présent.

Initialement, le choix des points d'eau à retenir pour les interpolations devait s'appuyer sur ce référentiel, car il permet de facilement sélectionner les formations aquifères affleurantes. Cependant, seule une toute petite partie des points d'eau existants était, lors de la réalisation de l'étude, rattachée aux entités de la BDLISA. Il n'a donc pas été possible d'exploiter pleinement le référentiel, du fait de ces rattachements points d'eau/BDLISA très incomplets.

Néanmoins, les attributs de caractérisation des différentes entités hydrogéologiques ont pu être exploitées à deux étapes de la méthodologie employée :

- pour distinguer les terrains sédimentaires de ceux de contexte de socle (ayant fait l'objet de méthode d'interpolations différenciées – cf. paragraphe 4.2) ;
- pour identifier les secteurs affleurants imperméables où des phénomènes de remontée de nappe ne peuvent théoriquement pas avoir lieu.

3.4.3. Enveloppes approchées d'Inondation Potentielle « cours d'eau » (EAIPce) et « submersion marine » (EAIPsm)

Les zones potentiellement inondables par débordement de cours d'eau (EAIPce) et par submersion marine (EAIPsm) nous ont été fournies par la DGPR dans le cadre d'une convention en date du 15 juillet 2015 (cf. Figure 14).

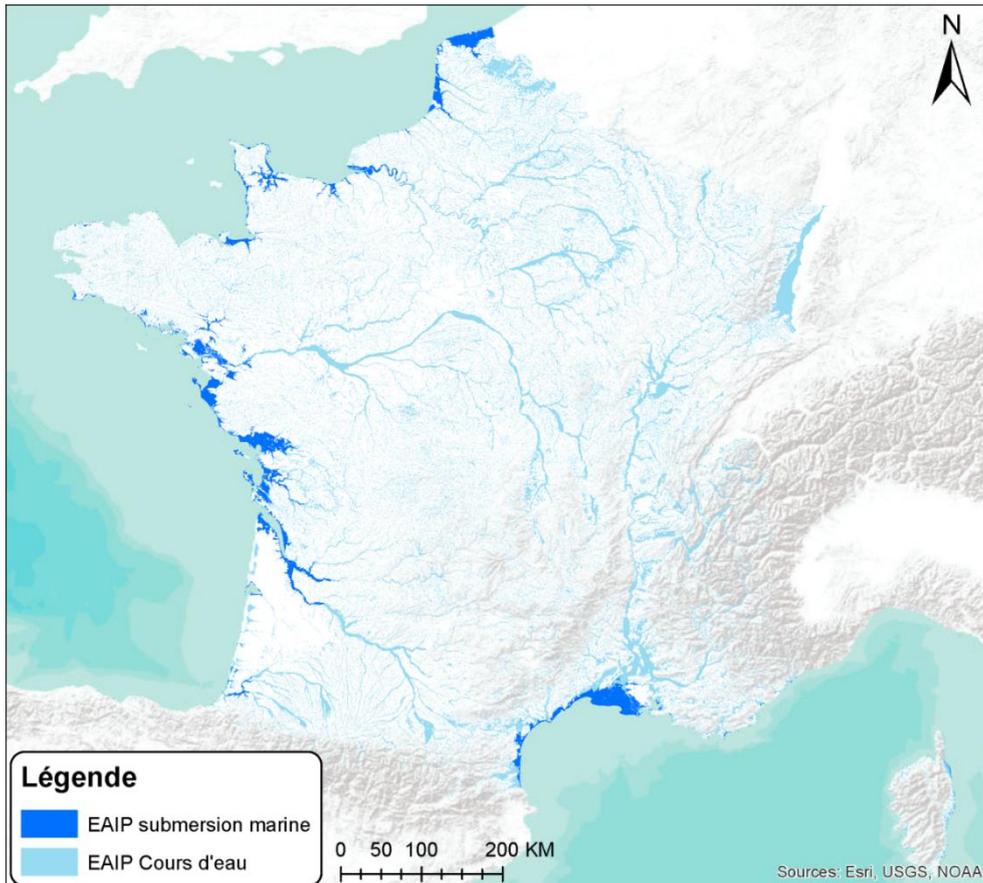


Figure 14 : Carte des EAIP « cours d'eau » et « submersion marine »

Ces zones constituent l'enveloppe maximale des inondations potentielles décrites dans les différents documents référents existants dans ce domaine tels que Atlas, PPR, PSS...

Les EAIPce ont été collectées et complétées, en tant que de besoin, par le CEREMA avec, notamment, l'aide d'un logiciel qui permet de tracer une évaluation de l'emprise des inondations dans un fond de vallée pour une hauteur d'eau fixée. Chaque tronçon, hormis sa partie terminale amont, figurant dans le référentiel BD Carthage® a fait ainsi l'objet d'un tracé EAIPce.

Il convient ici de noter l'ambiguïté qui peut exister entre inondations par débordement de cours d'eau avec inondations par remontée de nappe et la difficulté de les différencier. En effet si l'on considère certains aquifères particuliers tel que ceux situés dans la craie comme ceux de la Somme, de Champagnes Ardennes ... ou de Grande Terre (Guadeloupe), voire avec une autre particularité les aquifères karstiques, les crues ne sont pas constituées d'eau de ruissellement mais essentiellement d'eau provenant du débordement de nappe.

3.4.4. Modèle numérique de terrain (MNT)

Pour les besoins de l'étude, le MNT de la BDALTI® au pas de 25 m a été utilisé comme source de données principale.

Cependant, au vue de l'hétérogénéité de la distribution spatiale des données « eau souterraine » utilisées pour l'interpolation de la cote piézométrique, cette résolution n'a pas pu être conservée. La grille du MNT a donc fait l'objet d'un rééchantillonnage, aboutissant à une version agrégée à

la maille de résolution 250 m (la valeur rapportée étant la moyenne des valeurs du MNT au pas de 25 m).

C'est cette version agrégée qui a été comparée à la grille interpolée du niveau piézométrique, de même résolution, pour déterminer les zones potentiellement sujettes à des remontées de nappe.

3.4.5. Données complémentaires

Bassins versants topographiques

Selon la codification et la définition du Sandre, « l'ensemble du territoire français est divisé en zones élémentaires appelées zones hydrographiques. **Leurs limites s'appuient sur celles des bassins versants topographiques (en tout ou partie) ».**

Une zone hydrographique est entièrement comprise dans une limite de bassin hydrographique et sert, avec d'autres éléments, à la délimitation de zones de programmation ou réglementaires diverses comme les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux, les zones sensibles, les masses d'eau citées dans la Directive Cadre Européenne du 23 octobre 2000.

Une zone hydrographique couvre, en partie ou en totalité, le territoire d'une ou plusieurs communes. Inversement, le territoire d'une commune est soit inclus en totalité au sein d'une zone hydrographique soit scindé entre plusieurs zones.

Les zones hydrographiques utilisées dans cette étude sont issues du découpage de la BD Carthage 2009. Elles découpent le territoire d'étude en 6188 polygones (cf. Figure 15).

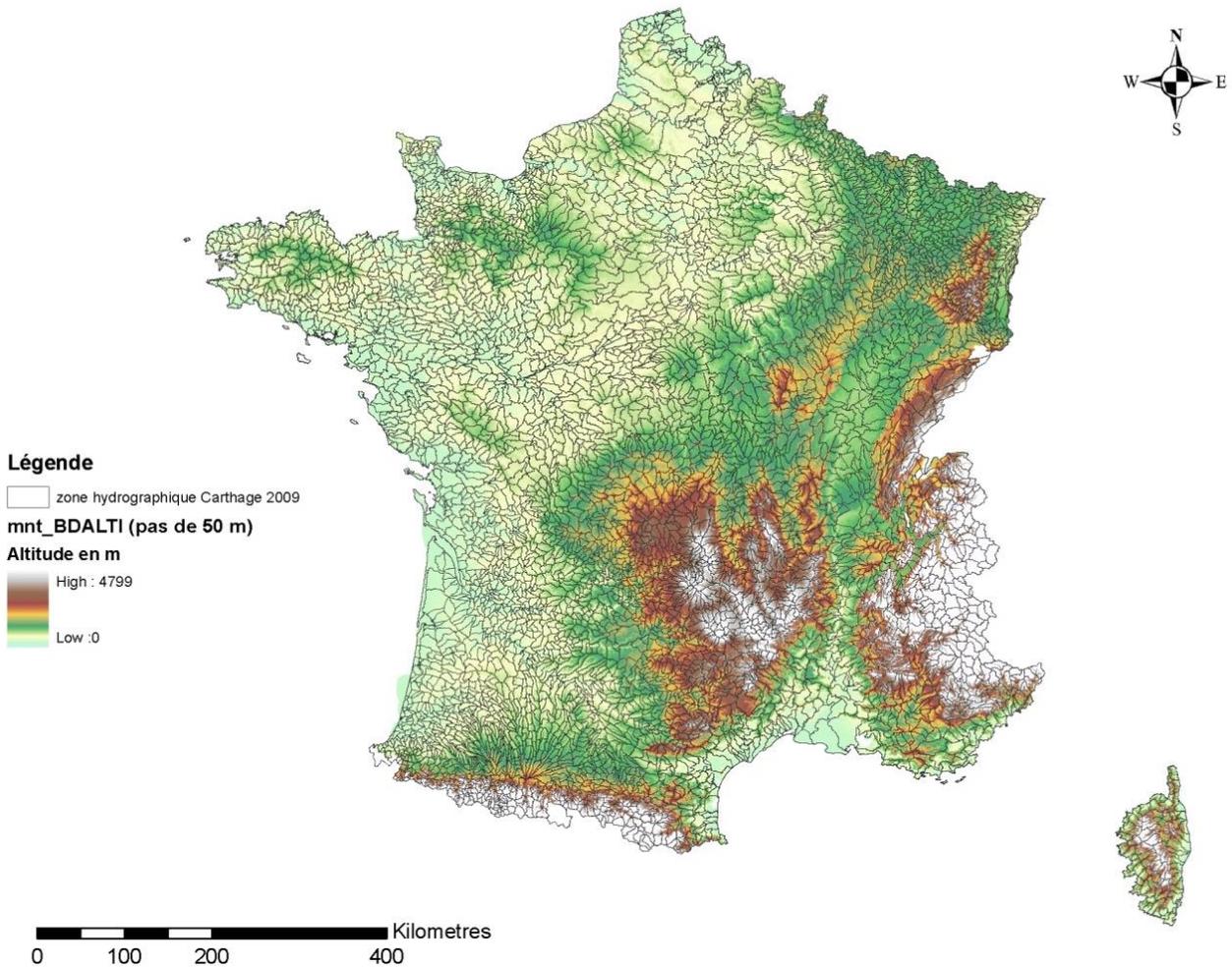


Figure 15 : Les zones hydrographiques (@BDCarthage)

Trait de côte Histolitt®

Le trait de côte Histolitt® est un produit du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)⁶, coédité avec l'Institut Géographique National (IGN) et disponible en licence ouverte sur le portail data.gouv.fr (cf. Figure 16).

⁶ Établissement public de l'État à caractère administratif (EPA) sous tutelle du ministère de la défense et opérateur public pour l'information géographique maritime et littorale de référence

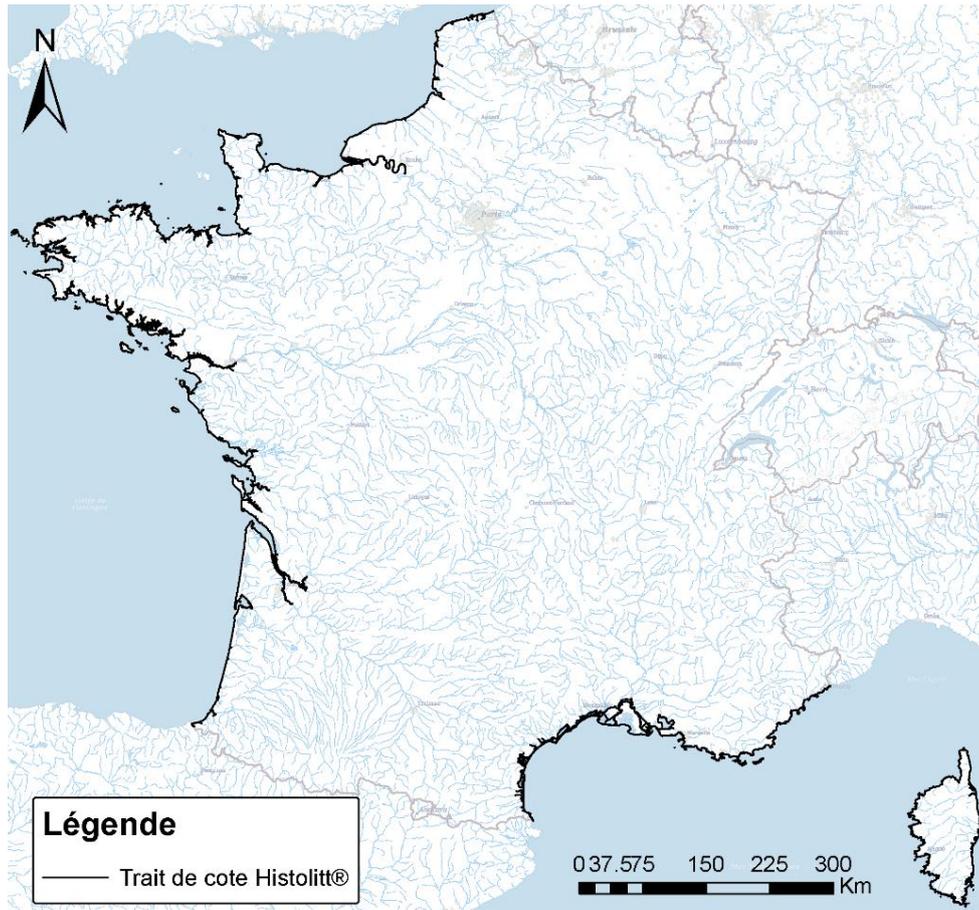


Figure 16 : Carte du trait de côte Histolitt® (SHOM)

Il correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer).

Dans la présente étude, il a été utilisé pour contraindre l'interpolation en bordure littoral, en créant des points de « forçage » le long de ce trait de côte et en leur affectant l'altitude du MNT de la BDALTI® au pas de 25m.

Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques représentent la surface piézométrique d'une nappe **par des lignes équipotentiels** (construites elles-mêmes par une interpolation de mesures ponctuelles). L'utilisation de ces cartes piézométriques pour l'établissement du niveau 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 un pas de temps relativement court) et lors de leurs tracés, elles ont fait l'objet d'une expertise d'un hydrogéologue.

Les cartes piézométriques ont été recueillies auprès des Directions Régionales du BRGM. L'ensemble de ces données (cf. Figure 17) représente une centaine de cartes couvrant la quasi-totalité du Bassin parisien, une grande partie du Bassin aquitain, les zones sédimentaires de la région Poitou-Charentes, du département de Loire Atlantique et de la région Lorraine ainsi que les zones alluviales des régions Franche-Comté, Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes.

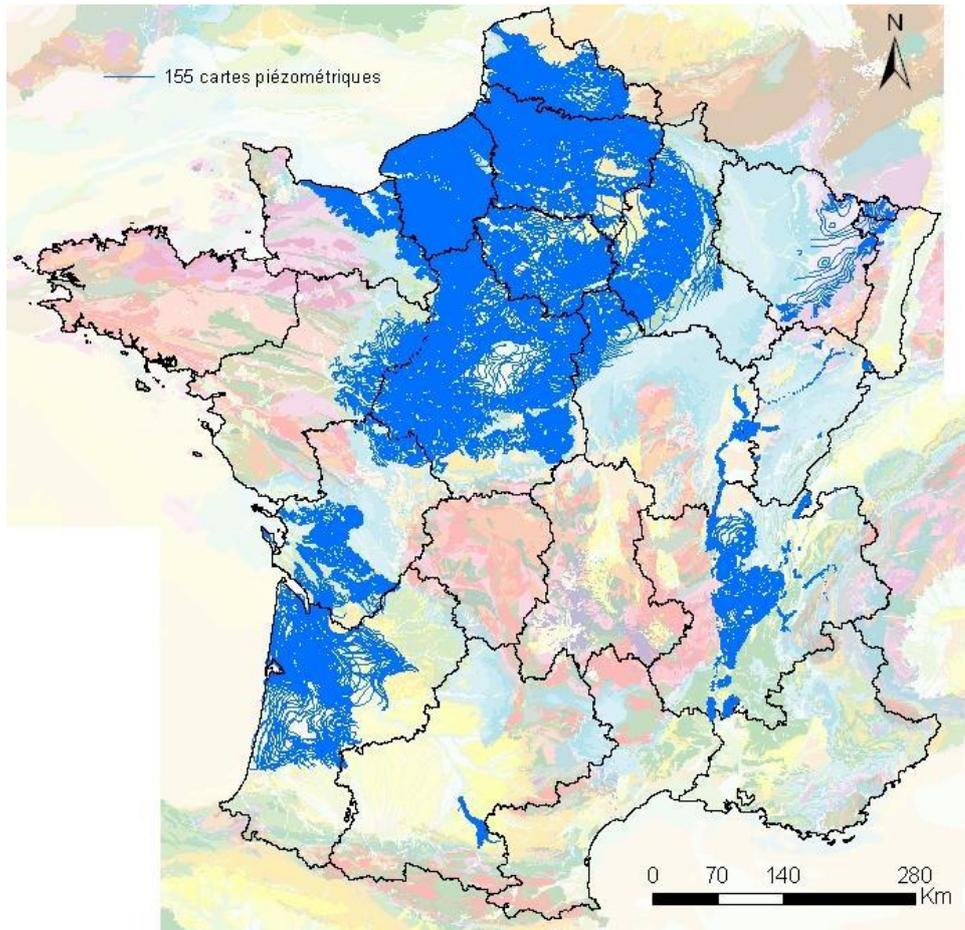


Figure 17 : Répartition des cartes piézométriques disponibles pour l'étude

Données historiques d'inondations par remontée de nappe

Les données historiques, principalement les arrêtés « catastrophe naturelle » (CATNAT) peuvent être de bonnes indications sur les communes touchées par le passé par des inondations par remontées de nappes. Ce critère a tout de même ses limites ; en effet toutes les communes touchées par des inondations par remontées de nappes n'ont pas fait l'objet d'une procédure de déclaration en arrêté CATNAT (notamment si les zones touchées ne représentent pas un enjeu particulier ou pour peut-être ne pas ternir l'image de la commune) et à l'inverse certains arrêtés CATNAT ne font pas la distinction entre inondation par ruissellement et inondation par remontées de nappes.

Certains rapports d'expertise réalisés par les antennes régionales du BRGM, souvent peu de temps après les inondations, ont été consultés pour valider ou non l'existence du phénomène de remontées de nappe, à l'échelle communale.

Un inventaire et géoréférencement des zones inondées, examinées lors des expertises faites par le BRGM suite à des demandes liées aux arrêtés Cat Nat, ont été réalisés pour les années 2013 et 2014.

Modèles hydrodynamiques du BRGM

Des modèles hydrodynamiques ont été mis en œuvre par le BRGM sur l'agglomération lyonnaise [Seguin J.J. (2002)], la vallée de la Somme [Amraoui N. *et al.* (2002), Amraoui N. *et al.* (2004)], les aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives [Croiset N. *et al.* (2013)], la Craie Séno-Turonienne du Nord-Pas-de-Calais [Bessière H. *et al.* (2015)]. Certains de ces modèles hydrodynamiques ont été ré-exploités pour répondre aux objectifs de cette étude : mettre en évidence les zones préférentielles de remontées de nappes.

Le code de calcul retenu dans le cadre de ces modélisations est MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) [Thiery D. (1990)].

Le code MARTHE fournit pour chaque maille et chaque couche modélisée les charges (niveaux piézométriques) et les débits de débordement. Ces deux paramètres ont été exploités dans le cadre de cette étude et notamment la différence entre la côte et la charge dans les aquifères superficiels. Les sorties du modèle ont été demandées à des dates correspondant aux périodes de hautes eaux (avril 2001 pour la Craie du Nord-Pas-de-Calais et pour le bajocien-bathonien de Basse Normandie).

4. Elaboration de la carte de sensibilité aux remontées de nappe

4.1. ETAPE 1 : ESTIMATION DU NIVEAU MAXIMAL PROBABLE DES NAPPES

4.1.1. Analyse des points collectés et choix des points à retenir

Travaux de correction

Une première étape a donc consisté à éliminer les points qui ne correspondent pas aux objectifs de l'étude ainsi que tout point pouvant perturber ou fausser les résultats. Ce travail a été réalisé sur les extractions BSS EAU et ADES, l'extraction BSS ayant été éliminée de la méthodologie nationale.

Les opérations de sélection ont permis d'éliminer :

- les doublons entre les différentes sources (BSS EAU et ADES),
- les points n'ayant pas de date de mesure,
- les points d'eau captant des nappes captives.

Par suite de l'absence d'information sur l'aquifère capté le dernier tri a été rendu particulièrement long et délicat. En effet du au changement de version de référentiel hydrogéologique qui est actuellement en cours, le rattachement est effectué en priorité, sur les points présents dans ADES et, n'est quasiment pas démarré sur les autres points de la BSS EAU. Aussi pour certains de ces points d'eau, la détection du mode de gisement (captif ou libre) n'a pu être réalisée que grâce à des contrôles complémentaires réalisés dans le but de détecter les points susceptibles de fausser les interpolations.

Vu le nombre de points, il a été nécessaire de définir des critères permettant une détection semi-automatique des points douteux. Ces critères ont concerné les paramètres suivants :

- | | | |
|--|---------|----------|
| - cote moyenne de l'eau : | Critère | <0 m NGF |
| - différence (cote sol MNT- cote de l'ouvrage) : | Critère | > 10 |
| - différence (cote de l'ouvrage/ cote du sol), | Critère | > 10 |
| - profondeur de l'ouvrage, | Critère | >100 m |
| - battement maximal | Critère | >30 m |
| - écart-type des mesures de niveau d'eau | Critère | >10 |

Certaines erreurs provenaient de l'absence d'une information telle que par exemple la cote de l'ouvrage ou la cote du sol, elles ont pu être rattrapées aisément. D'autres auraient nécessité beaucoup plus de temps pour être corrigés. Les points paraissant les moins fiables ont été éliminés.

Pour ceux ayant une longue chronique, et vu le peu de points de ce type, il a été retenu d'essayer de les récupérer en effectuant les corrections nécessaires. La plupart de ces corrections ont consisté à visualiser la chronique piézométrique afin :

- d'éliminer une, voire quelques, mesures aberrantes,

- d'éliminer le point car influencé par des pompages ou niveau d'eau en cours de remontée suite à des arrêts de pompage,
- d'éliminer le point suite à de l'artésianisme.

La Figure 18 présente les 17 114 points d'eau avec mesures piézométriques ayant un intérêt pour la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe en France, une fois l'ensemble des opérations de corrections réalisé.

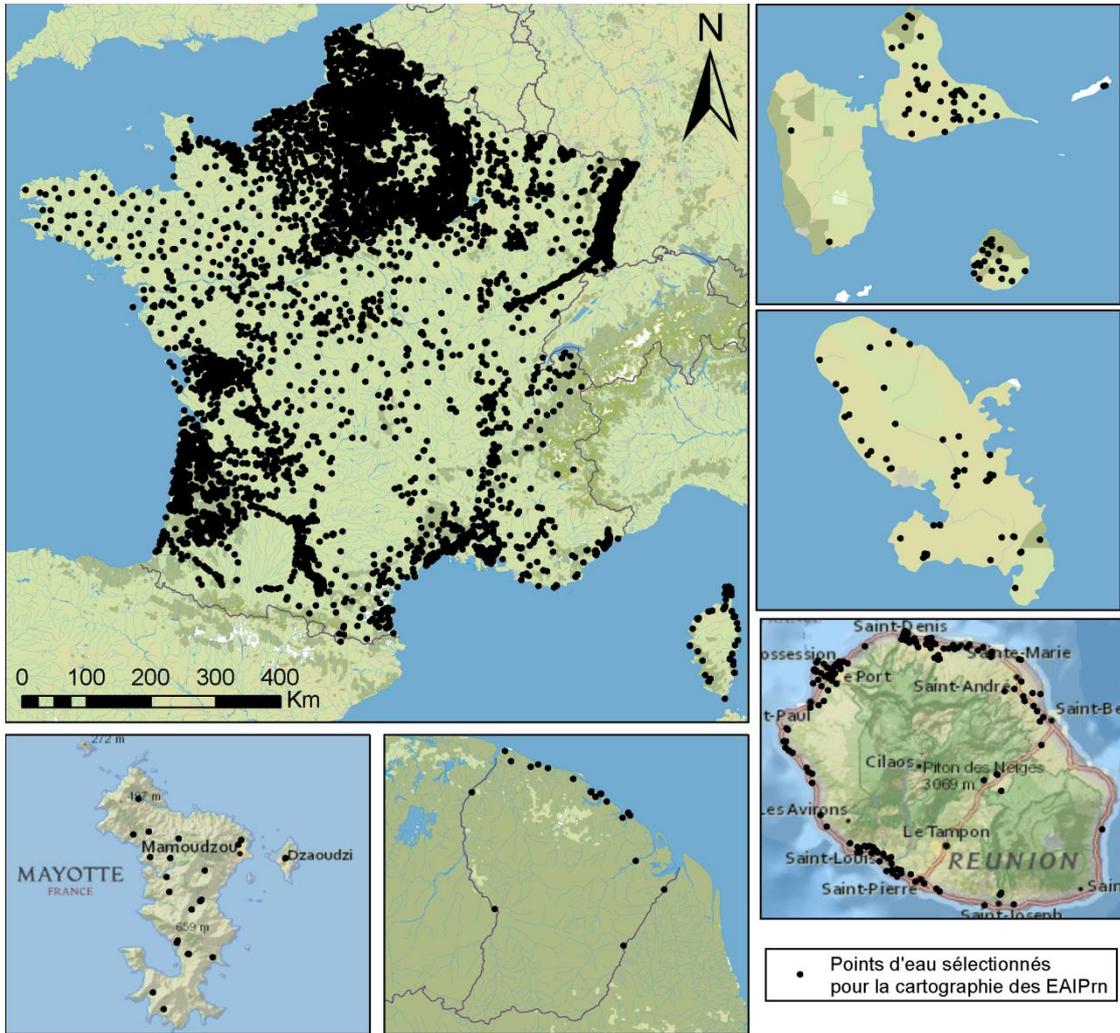


Figure 18 : Sélection finale des points d'eau pour la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe

Evaluation du niveau de fiabilité du point d'eau

Il a été procédé à une évaluation de la représentativité des mesures de chaque point d'eau en considérant la durée d'observation du point (D, en années) et le nombre de mesures réalisées.

Les points d'eau ayant moins de 9 années d'observation ou moins de 120 valeurs en moyenne par an, ont été classés en fiabilité faible. Les autres points d'eau ont été classés en fiabilité forte.

En effet il a été considéré que moins de 9 ans de données et/ou moins de 120 valeurs/an n'étaient pas suffisantes pour définir statistiquement une évaluation de niveau de période de retour 100 voire 500 ans.

La répartition des points d'eau en fonction de leur degré de fiabilité est proposée en Figure 19.

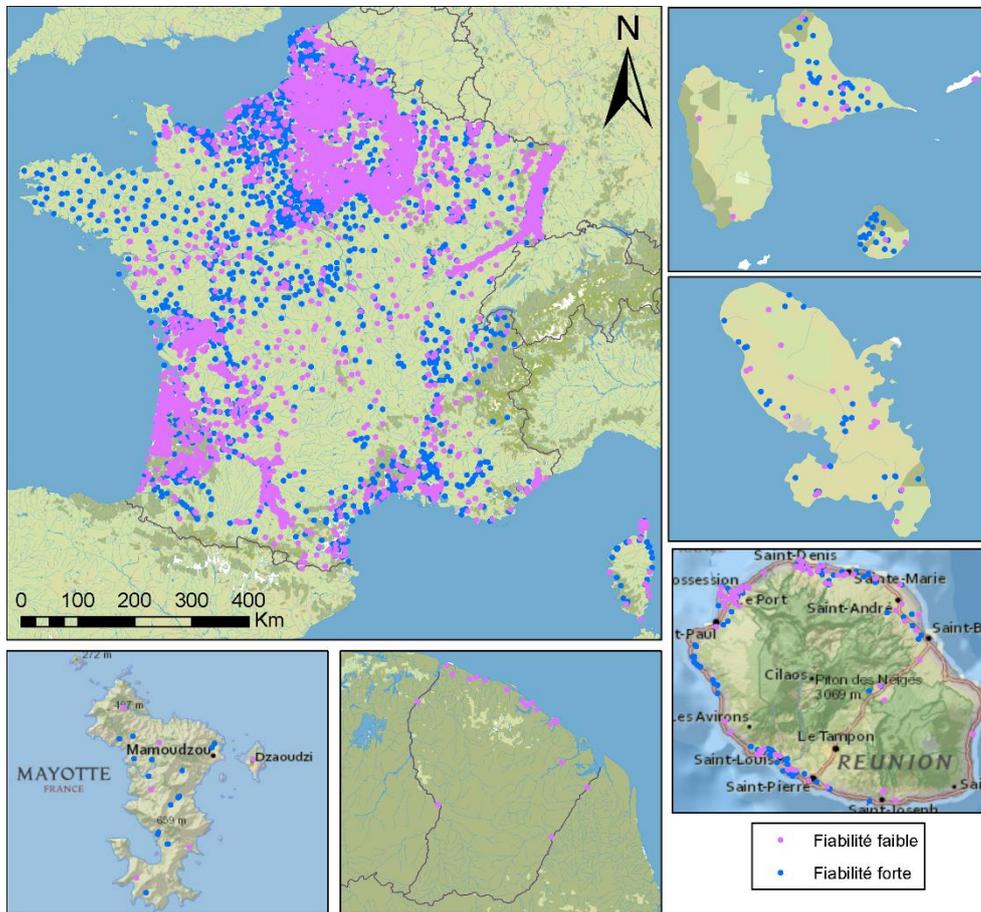


Figure 19 : Points d'eau sélectionnés représentés selon leur niveau de fiabilité

Au total, sur les 17 114 points d'eau préalablement sélectionnés :

- 3 672, soit environ 21%, sont classés en fiabilité forte (dont 3 479 en métropole) ;
- 13 442, soit environ 79%, sont classés en fiabilité faible (dont 13 237 en métropole).

A noter qu'en Guyane, aucun ouvrage n'a été classé en fiabilité forte, du fait de chroniques piézométriques trop courtes. Il en est de même pour Basse-Terre en Guadeloupe.

4.1.2. Niveau maximal probable des nappes

Principe

Ce niveau peut être défini à partir du niveau moyen, de l'amplitude de variation, elle-même obtenue à partir de l'amplitude maximale mesurée sur une période de suivi et d'une évaluation probabiliste pour une période de référence donnée.

Le niveau des nappes s'exprime en cote (altitude, par rapport au niveau de la mer, du toit de la nappe) ou en profondeur relative par rapport à un repère de mesure ou au sol (distance entre le repère de mesure, le sol et le toit de la nappe).

Pour chacun des points collectés, il a été procédé au calcul :

- des niveaux minimal, moyen et maximal,
- de l'écart-type des mesures
- du battement maximal.

Le battement maximum caractérise la fluctuation extrême du niveau de la nappe, calculé à partir des valeurs maximum et minimum enregistrées dans une chronique piézométrique pour un point d'eau suivi sur une période donnée (cf. Figure 20).

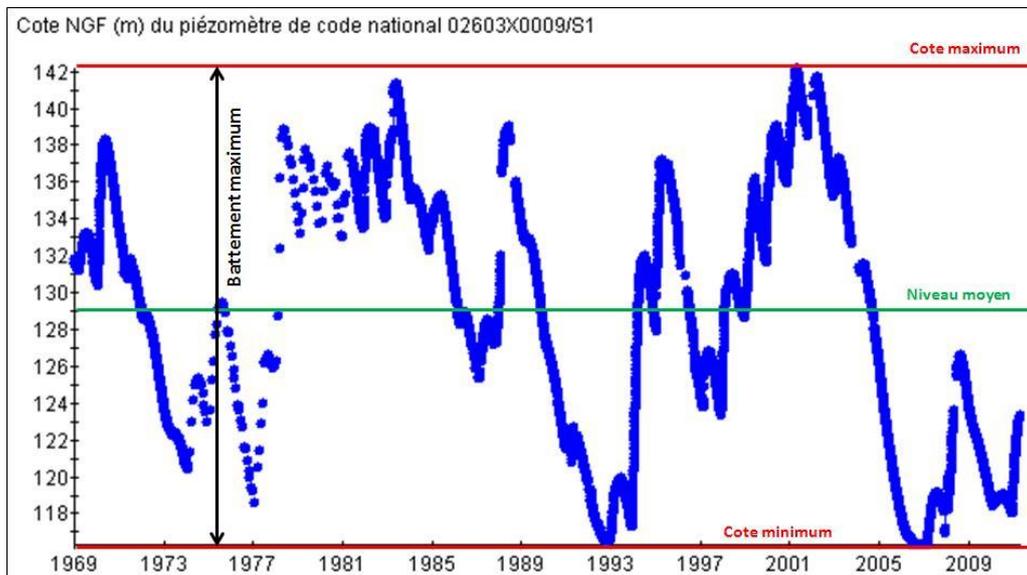


Figure 20 : Exemple de calcul du battement maximum sur un point d'eau qui bénéficie d'une chronique piézométrique de longue durée.

L'objectif de l'étude étant la détermination des zones potentiellement inondables par remontée de nappe, il convient de définir des niveaux correspondant à des périodes de retour très élevées. Celles-ci, si l'on se base sur la fréquence retenue pour les EAIPce, devraient être comprises entre cent et cinq cent ans.

Les niveaux piézométriques étant le résultat d'une somme d'événements, il est apparu acceptable, comme hypothèse, de considérer que ces niveaux suivent une loi du type normal ou dit de Gauss. Trois types de loi de Gauss sont généralement envisageables pour ce type de paramètres : la loi normale, la loi Racine Gauss ou la loi Log Gauss. Ces trois possibilités fournissent des valeurs sensiblement identiques pour des fréquences courantes à rares (période de retour inférieure ou égale à 20 ans), elles divergent toutefois pour des périodes de retour supérieures. Nous avons fait le choix de conserver la plus courante c'est-à-dire en considérant que les niveaux piézométriques maxima suivent une loi normale ou loi de Gauss.

D'après la définition de la loi de Gauss on peut estimer les valeurs fréquentielles maximales de période de retour T par la relation :

$$Z_{\max}(T) = Z_{\text{moy}} + V_g(T) * E_c \quad \text{avec :}$$

- $Z_{max}(T)$: niveau maximal de période de retour T (m NGF),
- Z_{moy} : niveau moyen (m NGF),
- $Vg(T)$: variable de Gauss pour une période de retour T
- Ec : Ecart-type de la distribution.

Ou si l'on considère qu'il est préférable de réaliser l'estimation à partir de la valeur maximale mesurée durant une période d'observation de durée D (en années) :

$$Z_{max}(T) = Z_{max}(D) + Vg(T, D) * Ec \quad \text{avec :}$$

Pour T=100 ans : $Vg \# 2,07 - 0,454 * \ln(D)$

C'est cette dernière formule qui a été utilisée pour l'estimation des niveaux maximaux de période de retour 100 ans.

Méthodologie appliquée en fonction du niveau de fiabilité du point

Pour les points de fiabilité forte, ce calcul du $Z_{max}(T)$ a été réalisé directement à partir des données découlant des bases BSS EAU et ADES.

Pour les points de fiabilité faible (qui n'ont donc pas suffisamment de mesures piézométriques permettant la réalisation d'une évaluation statistique), une approche a été mise en œuvre pour préalablement associer chacun d'entre eux à un point de fiabilité forte voisin le plus pertinent et utiliser les informations de ces points fiables pour approcher un niveau maximal probable. Cette association a été réalisée en plusieurs phases.

Phase 1 :

Dans un premier temps, tous les points, qu'ils soient de fiabilité faible ou forte, sont associés à un bassin versant de surface (tiré de la BD Carthage).

Puis la distance de chaque point au cours d'eau le plus proche à l'intérieur de ce bassin versant est calculée.

Pour chaque point à fiabilité faible :

- on cherche les points à indice de fiabilité forte associés au même cours d'eau et au même bassin versant de surface ;
- parmi ces points, on choisit celui dont le niveau piézométrique moyen est le plus proche du niveau piézométrique moyen du point de fiabilité forte.

Quand l'association est trouvée, la correction suivante est appliquée sur la mesure piézométrique maximum du point de fiabilité faible :

$$\mathbf{Z_{max}(T) \text{ du point peu fiable} = \text{Niveau maxi observé du point peu fiable} + (Z_{max}(T) \text{ du point fiable associé} - \text{Cote moyenne du point fiable associé})}$$

La formule choisie est volontairement maximisante étant donné l'objectif de la cartographie. A titre d'information, cette correction a pu être réalisée sur 6532 points de fiabilité faible en France métropolitaine, soit environ 49% de la sélection.

Phase 2 :

Pour chaque point à fiabilité faible n'ayant pas pu être corrigé en phase 1 :

- on cherche les points à indice de fiabilité forte associés au même bassin versant de surface mais pas au même cours d'eau ;
- parmi ces points, on choisit celui dont le niveau piézométrique moyen est le plus proche du niveau piézométrique moyen du point de fiabilité faible.

Quand l'association est trouvée, la correction suivante est appliquée sur la mesure piézométrique maximum du point de fiabilité faible :

$$\mathbf{Z_{max}(T) \text{ du point peu fiable} = Niveau \text{ maxi observé du point peu fiable} + (Z_{max}(T) \text{ du point fiable associé} - Cote \text{ moyenne du point fiable associé})}$$

A titre d'information, cette correction a pu être réalisée sur 6080 points de fiabilité faible en France métropolitaine, soit environ 46% de la sélection.

Phase 3 :

Pour chaque point à fiabilité faible n'ayant pas pu être corrigé en phases 1 et 2 :

- on cherche le point à indice de fiabilité forte le plus proche (qui ne sera pas associé au même bassin versant de surface) ;

Quand l'association est trouvée, la correction suivante est appliquée sur la mesure piézométrique maximum du point de fiabilité faible :

$$\mathbf{Z_{max}(T) \text{ du point peu fiable} = Niveau \text{ maxi observé du point peu fiable} + (Z_{max}(T) \text{ du point fiable associé} - Cote \text{ moyenne du point fiable associé})}$$

A titre d'information, cette correction a permis de corriger les 625 points de fiabilité faible en France métropolitaine restant à l'issue des deux précédentes phases, soit environ 5% de la sélection. Il est certain que cette dernière association présente un fort degré d'incertitude.

4.1.3. Analyse des cartes piézométriques

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 ni 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'interprétation plus restreinte ;
- certaines cartes sont très anciennes, pour des nappes et des bassins versants 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 (pas de risque de remontée de nappe), des données trop anciennes ou trop imprécises mais également des cartes réalisées en basses ou moyennes eaux.

In fine cela revient à ne conserver que les cartes dont les délimitations sont reportées sur la Figure 21.

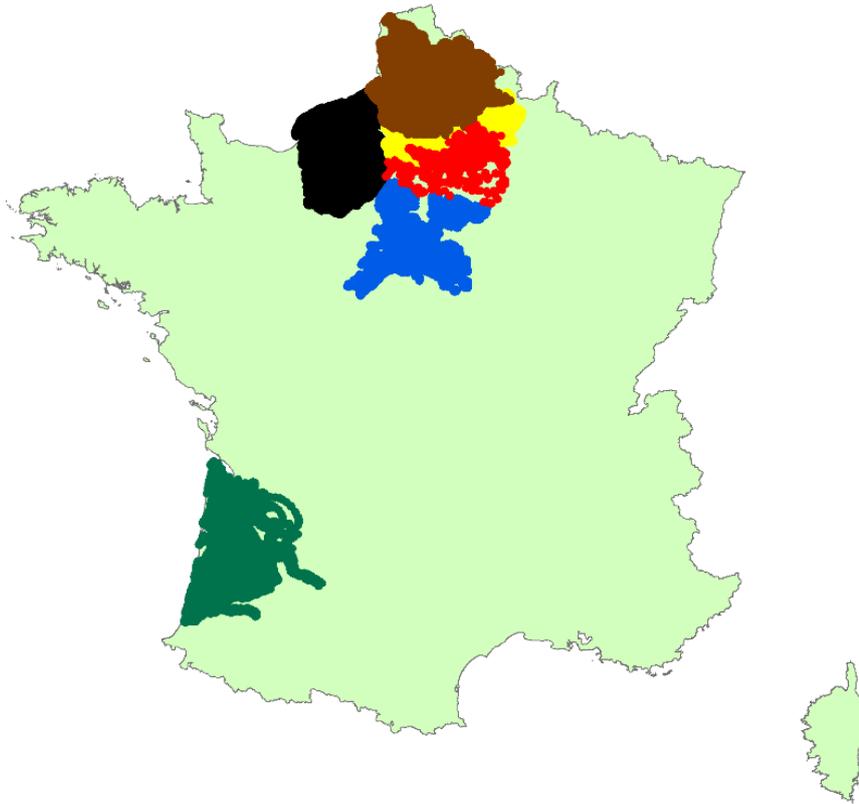


Figure 21 : Localisation des cartes piézométriques retenues

Afin de densifier les points de mesures en complément des données issues de la BSS EAU et d'ADES, des points de calages ont été calculés à partir des isopièzes réalisées en hautes-eaux. Les données linéaires ont été transformées en données ponctuelles puis transformées en niveau maximal probable selon le principe suivant :

- estimation de la période de retour des isopièzes ; lorsqu'elle n'était pas connue, elle a été évaluée en s'appuyant sur les calculs de $Z_{max}(T)$ réalisés sur les piézomètres présents dans ADES et BSS EAU de fiabilité forte dans la zone concernée (cf. paragraphe 4.1.2).
- attribution d'un coefficient correcteur par carte variant entre 1,00 (pour une carte de hautes eaux centennales, HE2001 dans le Nord) et 1.01 (exemple de la carte de HE1967 calcaire de Champigny).

L'attribution du coefficient correcteur est réalisé selon un ajustement fréquentiel graphique à partir des points ADES fiables et représentatifs à proximité selon le principe suivant :

- Calcul du Z_{ref} pour les points ADES à proximité (cote maximale pour la période de retour souhaitée) : $Z_{ref} = F(Z_{max} ; D)$
- Calcul du ratio Z_{ref}/Z_{iso} pour chaque point ADES à proximité
- Calcul du coefficient moyen
- $Z_{ref} iso = coef\ moyen \times Z_{iso}$

La carte piézométrique du Lutétien/Cuisien a été traitée différemment. En effet, les points de la campagne piézométrique hautes-eaux étant disponibles en base, ils ont été utilisés directement après ajustement par un coefficient correcteur selon le même principe.

4.1.4. Utilisation des EAIPce et EAIPsm

Création des points EAIPce et EAIPsm

Dans le cadre des échanges nappe-rivière, il y a généralement continuité entre les niveaux des nappes superficielles et les niveaux d'eau superficielle (cf. contextes A et B, paragraphe 2.2.2). Afin de densifier les points de mesures, des points de calages, tant pour les cours d'eau que pour les lacs ou le bord de mer, ont donc été calculés à partir de ces enveloppes EAIP « cours d'eau » et « submersion marine ».

Un travail de filtre a été mené en amont sur ces enveloppes EAIP pour retirer tous les polygones faisant moins d'un hectare. En plus d'alourdir sensiblement le jeu de données, il n'est pas apparu pertinent de les conserver vu que le résultat final est une grille à la maille de 250m x 250m, soit 6,25 ha.

Le choix a été donc fait de créer des points tous les 100m le long des contours EAIP et tous les 250m à l'intérieur de ces contours (cf. Figure 22). L'objectif est d'éviter toute variation « artefact » à l'intérieur de ces contours à l'issue de l'interpolation, étant considéré que ces EAIP sont supposés être également les lieux de potentielles remontées de nappe en lien avec des inondations de cours d'eau.

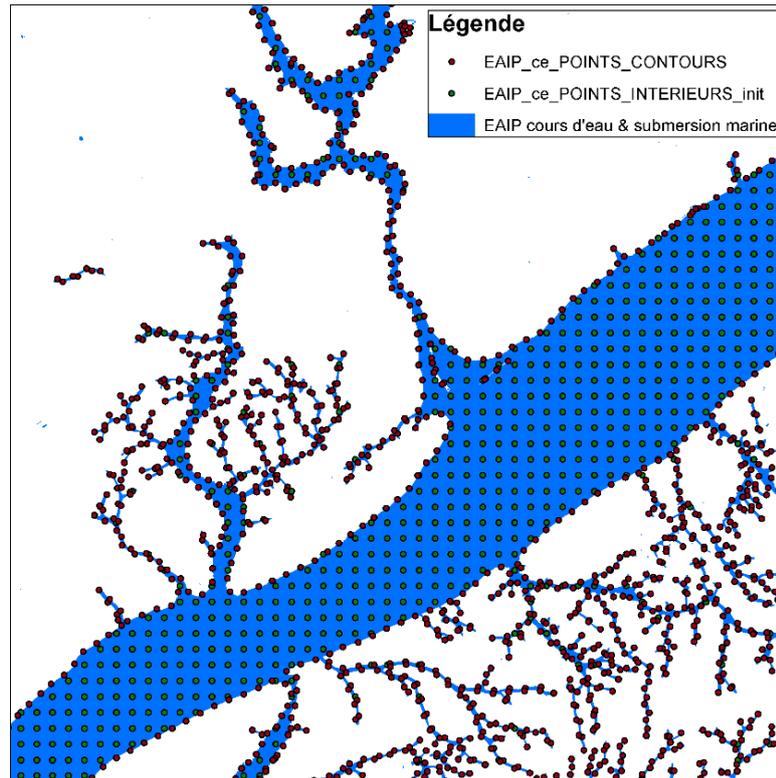


Figure 22 : Extrait de la conversion des vecteurs EAIPce et EAIPsm en points de contours et de remplissage pour les besoins de l'interpolation

Ces points contours ont reçu comme altitude la cote de la maille correspondante du MNT BDALTI® au pas de 25 m. Une interpolation a ensuite permis d'affecter une cote aux points intérieurs.

Interpolation des points EAIP « intérieurs » à partir des points EAIP « contours »

Le but de cette interpolation est d'obtenir une surface « piézométrique » homogène et stable à l'intérieur des polygones enveloppe des EAIPce et EAIPsm de façon à bien contraindre les interpolations ultérieures qui auront lieu à l'extérieur de ces polygones.

Le logiciel GDM (<http://gdm.brgm.fr>), développé par le BRGM, a été utilisé pour l'interpolation. Un krigeage avec variogramme linéaire a été réalisé en prenant comme entrée les points EAIP « contours ». La cote interpolée est la cote du MNT 25 m de la BD ALTI. Cette cote est interpolée au droit d'un maillage de points espacés de 250 m à l'intérieur des contours. Ainsi :

- 1 349 678 points EAIPce « intérieurs » sont interpolés à partir des 3 937 919 points EAIPce « contours »
- 151 867 points EAIPsm « intérieurs » sont interpolés à partir des 317 545 points EAIPsm « contours »

Pour ce krigeage la méthode « krigeage linéaire sans dérive » est utilisée. Les paramètres de calcul sont spécifiés sur la Figure 23. Le voisinage d'interpolation est choisi suffisamment grand pour garantir l'interpolation partout à l'intérieur des polygones EAIP.

Choix du voisinage d'interpolation

Voisinage unique
 Voisinage glissant

Nb maximum de points présélectionnés (NPWMAX) :

Nb maximum de points du voisinage (NPMAX) :

Type voisinage glissant

Voisinage rectangulaire : Taille en X : M
 Taille en Y : M

Sélection par octants : Nombre de points requis :
 Nombre maxi de points / octant :
 Taille maximum en X : *
 Taille maximum en Y : * M

Voisinage circulaire : Rayon : M

Seuil de fusion de deux points expérimentaux

Fusion si distance inférieure à : * M

OK Annuler

Figure 23 : Voisinage pour le calcul des EAIP intérieurs

L'interpolation est réalisée séparément pour les EAIPce et pour les EAIPsm.

La vérification des données d'entrée conduit à identifier quelques zones dans lesquelles ces données semblent entachées d'erreur. Ceci est observé principalement dans le secteur de Wimereux (62). Dans ce secteur les polygones d'EAIPsm apparaissent remonter dans les pentes, voire entourer certains petits reliefs (cf. Figure 24 et Figure 25). Ceci génère des cotes piézométriques maximales anormalement hautes lors de l'interpolation finale. Ces erreurs n'ont pas été corrigées car elles proviennent de données sources qui nous ont été transmises par la DGPR.

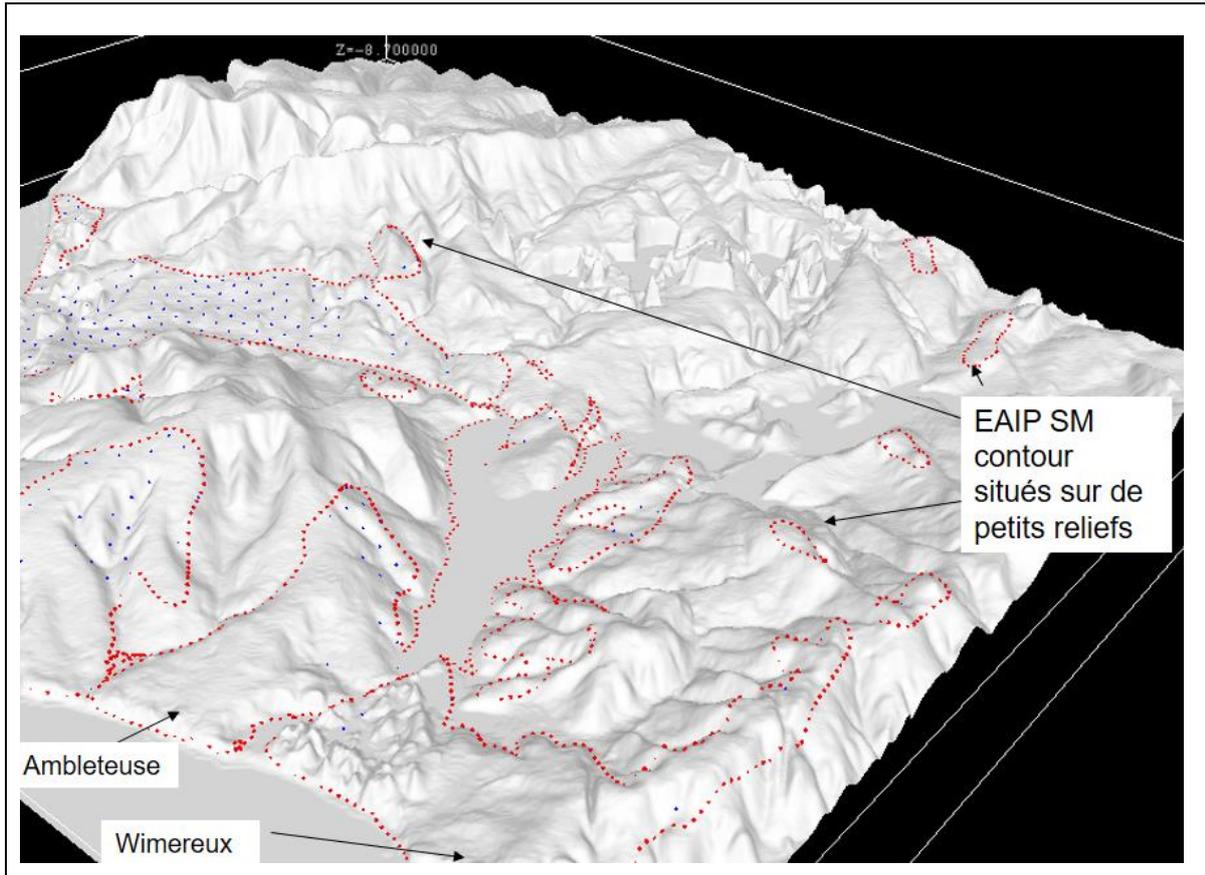


Figure 24 : Visualisation 3D d'un secteur près de Wimereux (62), où les EAIPsm remontent dans les pentes ou entourent de petits reliefs

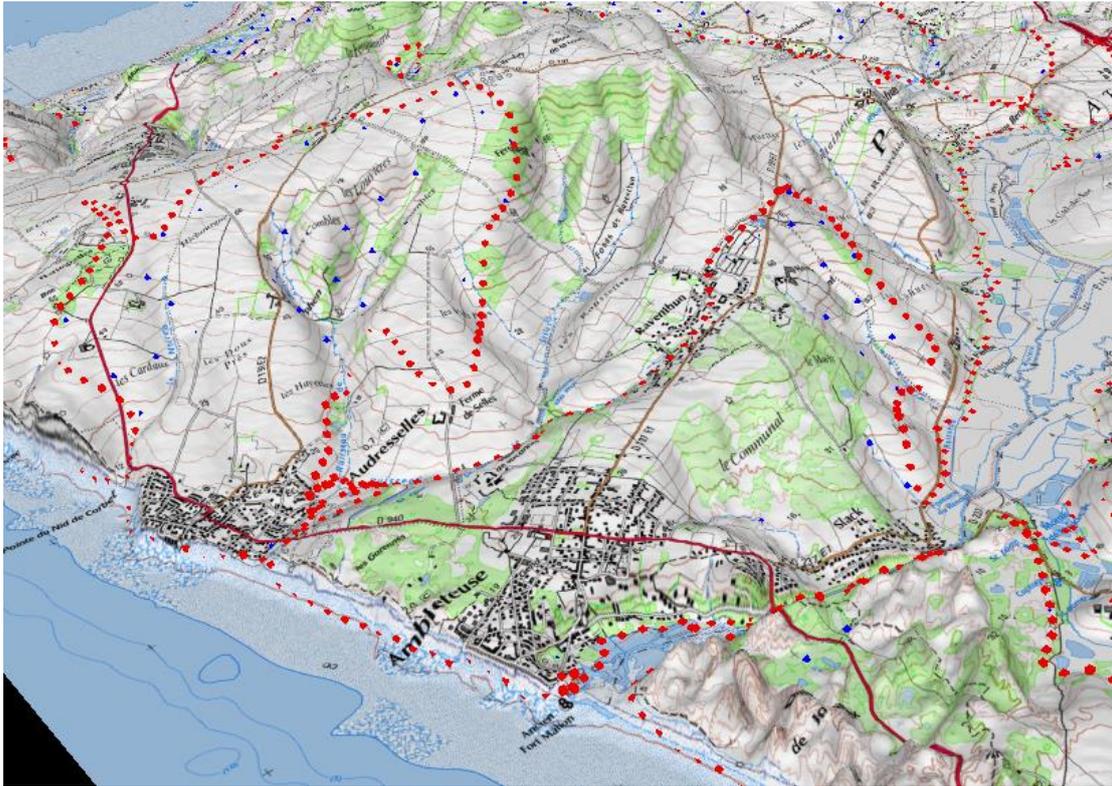


Figure 25 : Zoom sur Ambleteuse, où on voit les EAIP SM remonter les pentes

Discussion sur l'utilisation des points EAIPce et EAIPsm

L'utilisation de ces enveloppes comme points de forçage de l'interpolation peut laisser penser qu'un phénomène de remontée de nappe accompagne systématiquement un débordement de cours d'eau ou une submersion marine. C'est évidemment surestimer ce phénomène puisque, dans de nombreux cas, la connexion entre le cours d'eau et la nappe n'existe pas, ou du moins, n'est pas totale. Ce systématisme induit par l'utilisation de ces enveloppes dans la méthode tend donc finalement à maximiser les zones cartographiées potentiellement sujettes aux remontées de nappe.

Pour les besoins de l'étude, à savoir aboutir à une cartographie nationale la plus exhaustive possible des zones potentiellement sujettes aux inondations par remontées de nappe, ce risque de surestimation a été jugé acceptable. Néanmoins, il est par la suite préconisé d'appliquer, sur la cartographie finale, un masque correspondant aux EAIP « cours d'eau » et « submersion marine », pour n'afficher réellement que les zones en sus (cf. chapitre 4.4).

A noter qu'un choix a été fait de ne pas corriger en amont les diverses imprécisions détectées dans ces EAIP (tracés de canaux intégrés aux EAIP « cours d'eau », hétérogénéité des sources de données utilisées pour construire ces enveloppes, enveloppes « trouées » par des mailles de modélisation qui auraient dues être nettoyées, zones de submersion marine dans des points hauts topographiques etc.

4.1.5. Exploitation des données historiques

Pour affiner les résultats, il est possible d'intégrer les données historiques et de notamment prendre en compte les communes ayant enregistré un arrêté catastrophe naturelle (CATNAT)

« inondation par remontées de nappes ». Ces communes CATNAT vont venir appuyer les autres critères lors de la sélection des zones sensibles. De même, les communes qui ont fait l'objet d'un PPRI dans lequel étaient mentionnés des phénomènes de remontées de nappes ont été cartographiées.

La Figure 26 ci-dessous permet de localiser les 1103 dossiers CATNAT « inondation par remontées de nappes » recensés pour l'étude. Un inventaire des zones inondées, examinées lors des expertises faites par le BRGM suite à des demandes liées aux arrêtés Cat Nat, ont été réalisés pour les années 2013 jusqu'à début 2015. Les zones concernées ont été digitalisées afin de définir des points de calage précis pour la cartographie de remontée de nappe.

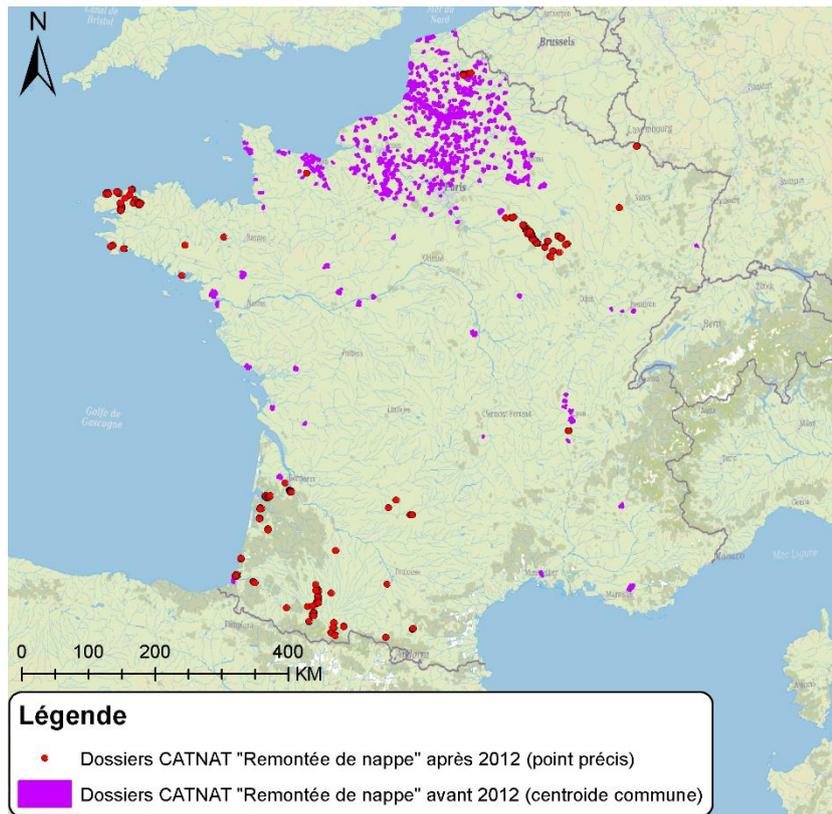


Figure 26 : Carte des communes et lieux précis ayant fait l'objet d'une déclaration de catastrophe naturelle au titre des inondations par remontée de nappe

Toutefois si les informations historiques collectées pour les années 2013 et 2014 ont été exploitées et utilisées comme points complémentaires ayant une cote égale à la cote du sol, les informations antérieures ne fournissaient pas les coordonnées des points de débordement de la nappe mais seulement les coordonnées du centroïde de la commune. Ces points ne peuvent donc pas servir de points complémentaires et ne peuvent être exploités que pour un contrôle qualitatif global à l'échelle d'une commune.

Ainsi, 323 points CATNAT précisément localisés ont donc pu être intégrés comme point de forçage pour l'interpolation, en leur attribuant une cote de référence égale à celle du MNT + 0,5 m.

4.1.6. Exploitation des modèles hydrodynamiques

Les résultats des différents modèles ont été utilisés pour compléter le semi de points des niveaux maxima probables. Seul le modèle existant en région Poitou Charente n'a pas été intégré au moment de l'interpolation, mais a été conservé à titre de contrôle des résultats. Les résultats sont illustrés pour les périodes de plus hautes eaux connues. Les périodes de retour estimées des différents modèles ne sont pas identiques mais il a été choisi d'intégrer le maximum de données à disposition avec une période de retour de 100 ans au minimum.

Sur les différentes figures ci-après schématisant les résultats des modèles hydrodynamiques :

- le niveau piézométrique dans les aquifères superficiels est noté Z_{max} (m NGF). On calcule donc pour chaque maille du modèle la différence entre la cote topographique et le Z_{max} associé. Pour des valeurs de Cote Topo- Z_{max} négatives, il existe donc un débordement de la nappe. Pour des valeurs de Cote Topo- Z_{max} comprises entre 0 et 2 m il peut soit avoir des inondations de caves, soit des débordements de nappe car cela correspond à la marge d'erreur du modèle. Pour des valeurs de Cote Topo- Z_{max} comprises entre 2 et 5 m, des inondations de caves sont possibles ;
- apparaissent également les EAIP cours d'eau et submersion marine ;
- figurent les communes où des inondations par remontée de nappe ont été répertoriées dans les arrêtés catastrophe naturelle (Communes_RN).

Pour l'interpolation finale des cotes maximales, seules les mailles avec débit de débordement positif ont été traitées ; la valeur du MNT 25 m a été affectée aux centres de ces mailles à débordement.

Le modèle hydrodynamique de la vallée de la Somme

Le modèle a été développé par le BRGM et le CETMEF [Amraoui N. *et al.* (2002), Amraoui N. *et al.* (2004)] suite aux importantes crues survenues dans la vallée de la Somme entre la fin de l'hiver 2000 et le printemps 2001.

Cette étude a été réalisée en deux temps, une première phase en 2001-2002, avec la réalisation d'un modèle maillé (maille de 500 m) en régime permanent ; puis une seconde phase en 2004 avec la réalisation, grâce aux chroniques de piézométrie et de débit de la Somme et de ces affluents, d'un calage en régime transitoire au pas de temps mensuel sur une période allant de juin 1995 à juillet 2001 (la maille passe à 100 m au niveau du fond de vallée).

Un scénario correspondant à une crue de période de retour mille ans a été simulé et les résultats de ce scénario ont été exploités pour cartographier les zones de débordement et déterminer un niveau piézométrique maximal.

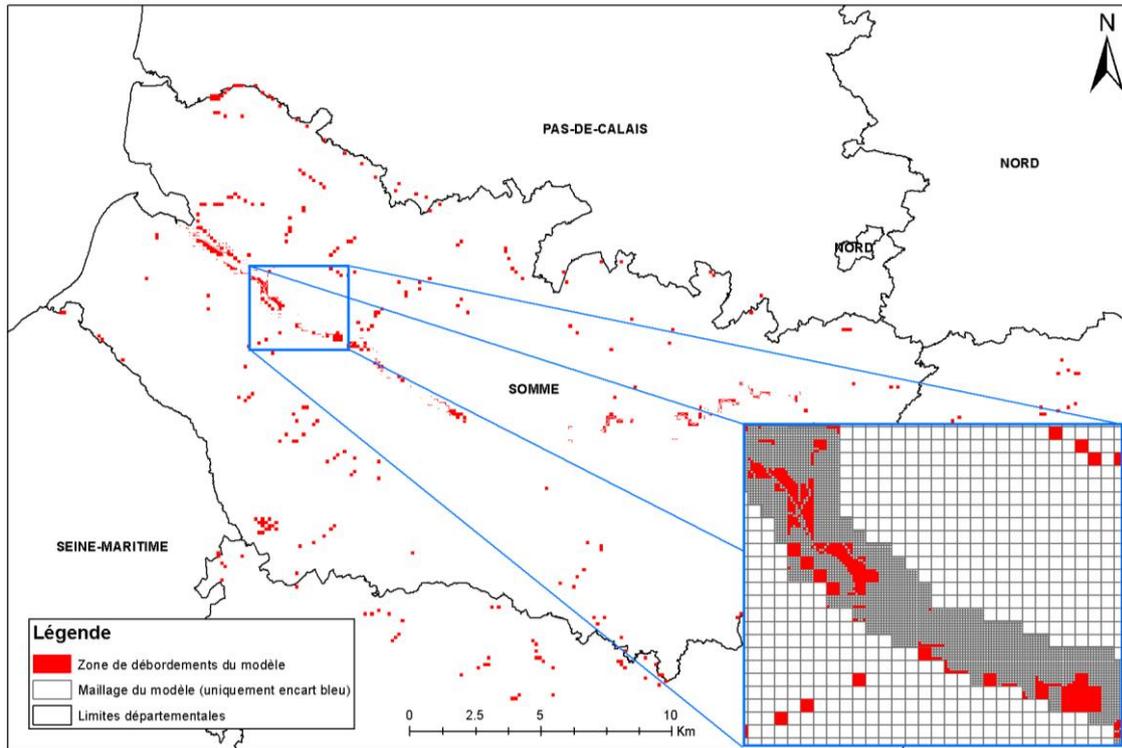


Figure 27 : Présentation du modèle maillé de la vallée de la Somme avec les zones de débordement

Les zones de débordement par remontée de nappe (cf. Figure 27 et Figure 28) se raccrochent aux EAIP, elles sont légèrement plus étendues en amont du bassin versant et en tête des sous bassins.

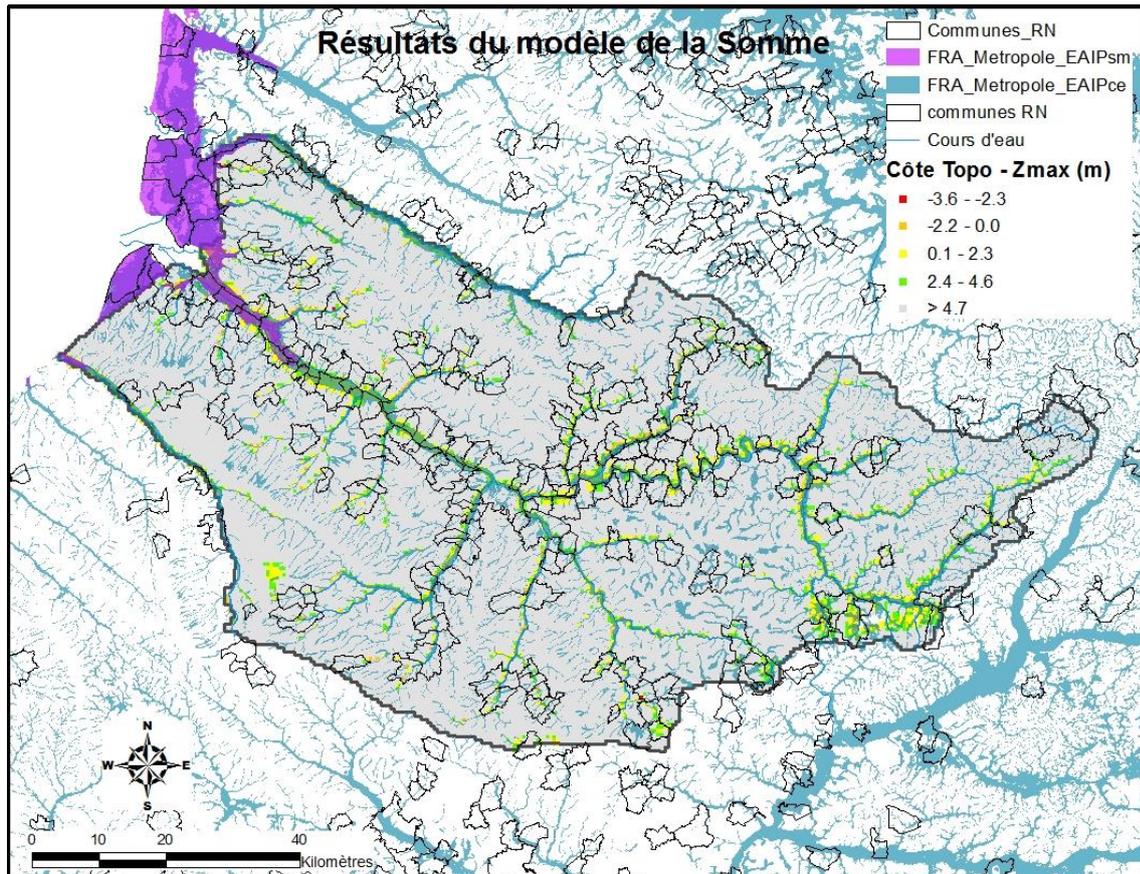


Figure 28 : Résultats des zones de débordement du modèle maillé de la vallée de la Somme

Le modèle hydrodynamique de l'agglomération lyonnaise

Il a été développé par le BRGM en partenariat avec le Grand Lyon dans le cadre d'une convention pluriannuelle de Recherche et Développement partagés [Seguin J.J. (2002)]. Ce modèle couvre approximativement les communes de la Communauté Urbaine de Lyon. Cette modélisation en régime transitoire a été réalisée à partir de données au pas de temps mensuel sur une période de 5 ans (2000-2004) issues des chroniques piézométriques disponibles auxquelles ont été ajoutées entre 2006 et 2008 des données au pas de temps journalier.

Pour cette présente étude seule la modélisation d'une crue centennale a été prise en compte. Les zones de débordement (*cf.* Figure 29) sont toutes incluses dans les enveloppes EAIP.

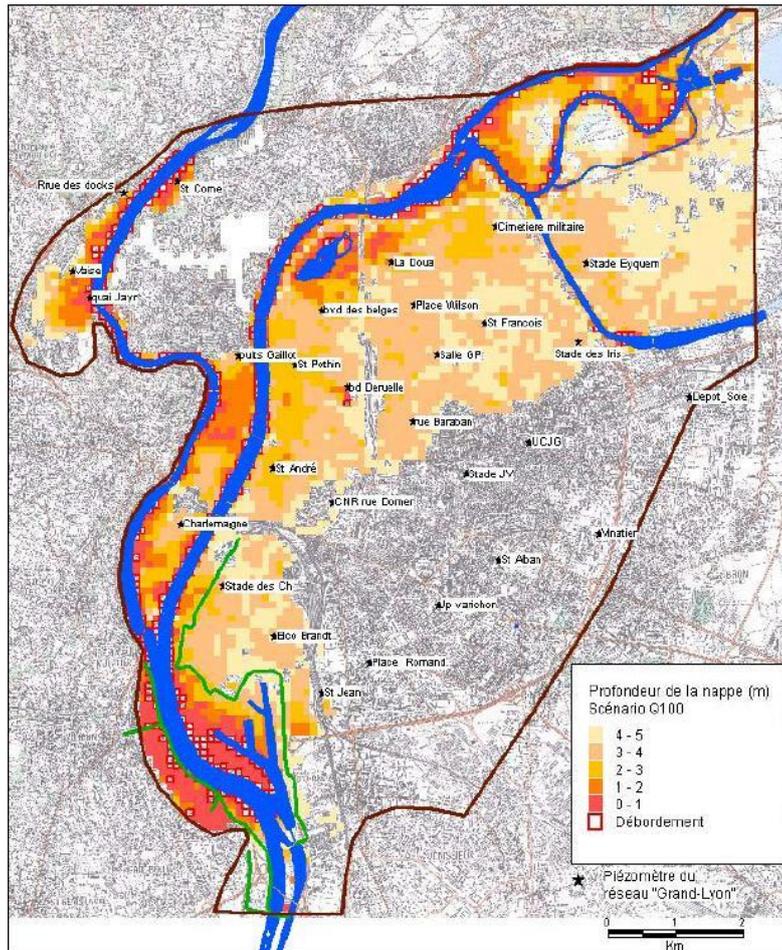


Figure 29 : Présentation du modèle de l'agglomération lyonnaise. Cartographie de la profondeur de la nappe selon le scénario d'une crue centennale

Modèle des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives

Le BRGM a réalisé un modèle hydrogéologique maillé portant sur les aquifères de la plaine de Caen-Argentan et le bassin de la Dives.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire sur 17 années (1994-2010) au pas de temps mensuel, s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales disponibles, ainsi que sur 61 chroniques piézométriques et 36 chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique.

Le modèle hydrogéologique comprend donc **10 couches**. Le Tableau 3 présente ces différentes couches.

	Formations hydrogéologiques	Potentiel aquifère
1	Alluvions	Aquifère
2	Craie du Cénomanién	Aquifère
3	Formations du Crétacé infra-cénomanién et Kimméridgien	Multicouche localement aquifère
4	Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur	Aquifère
5	Marnes du Callovo-oxfordien	Aquitard
6	Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	Aquifère
7	Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	Aquitard
8	Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcién	Aquifère
9	Formations Lias infra-Toarcién et du Trias	Multicouche localement aquifère
10	Socle	Aquifère mineur

Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique de la plaine de Caen

Il a été choisi d'utiliser une discrétisation en mailles carrées de 1 km de côté sur la majeure partie de l'extension du modèle et sur une partie de la zone d'étude, dans laquelle une plus grande précision était recherchée, les mailles mesurent 200 m de côté.

Les mailles à débordement, lors de la simulation des hautes eaux 2001, apparaissent en rouge dans la Figure 30.

Toute la partie sud- sud-ouest du modèle correspond à la couche de socle (couche 10 du modèle). Il existe des fortes incertitudes concernant l'épaisseur de la couche aquifère ainsi que sa perméabilité. De ce fait, les débordements modélisés dans cette couche n'ont pas été pris en compte pour la carte de remontée de nappe.

D'autre part, dans le Cénomanién (couche 2 du modèle), les débordement observés sont en grande partie dus à des sources qui prennent naissance à la base de la couche qui repose sur des formations imperméables [cf. Croiset N. et al. (2013)]. Ces sources ne sont pas prises en compte dans la cartographie de remontée de nappe. Les débordements de la couche du Cénomanién ont donc été exclus.

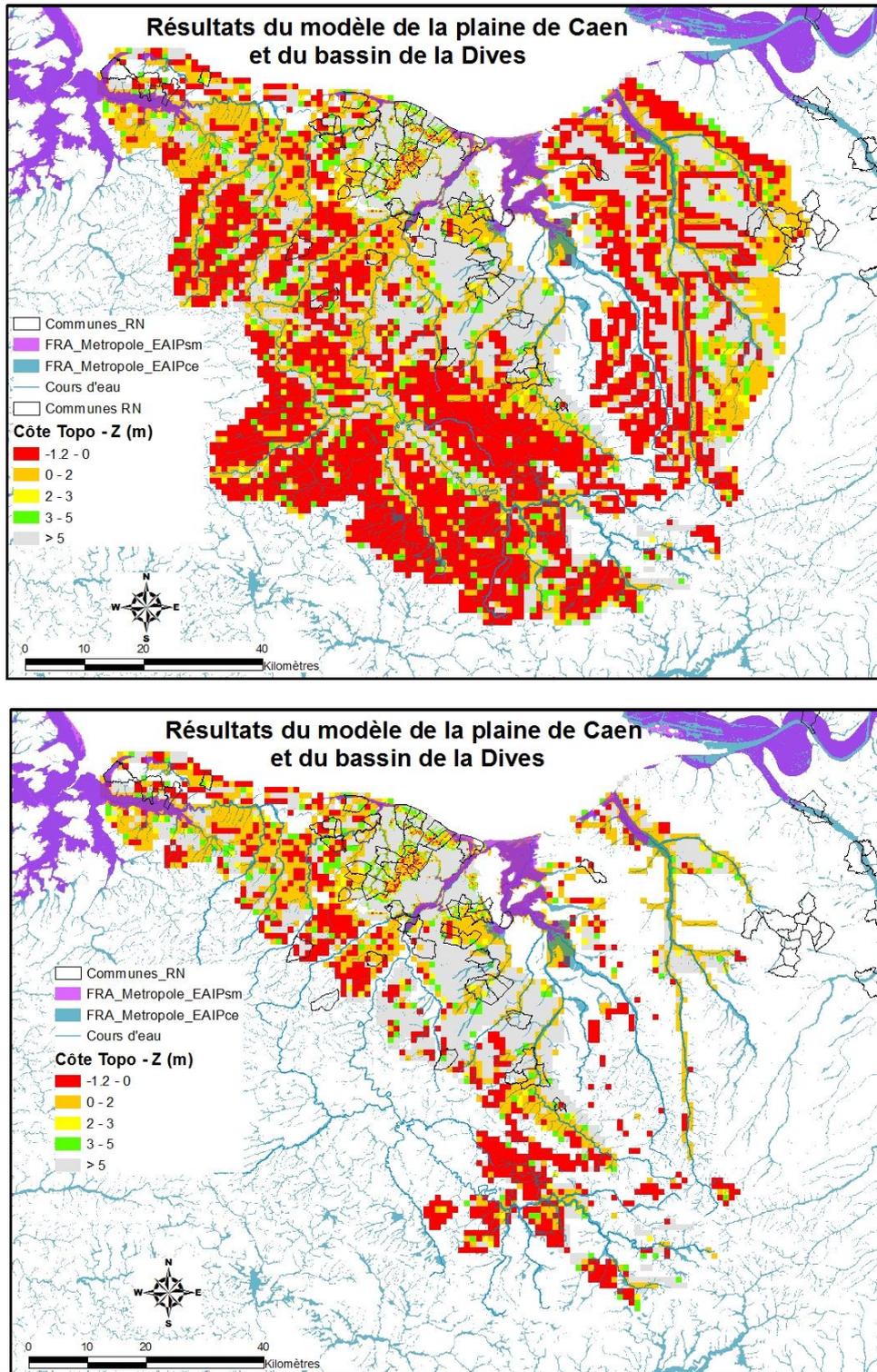


Figure 30 : Résultats du modèle hydrogéologique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. (Figure du haut : résultats sur la totalité des couches modélisées ; Figure du bas : résultats hors socle et Cénomanien)

Le modèle de la Craie Séno Turonienne du Nord-Pas-de-Calais

Le modèle de la Craie du Nord-Pas-de-Calais a été calé en régime transitoire de 1982 à 2012 au pas de temps mensuel. Le maillage principal est de 500 m x 500 m. Un maillage carré uniforme de 100 m x 100 m a été utilisé sur une zone affinée autour des champs captant de la métropole Lilloise.

La Figure 31 ci-dessous présente différence entre la cote topographique et le niveau piézométrique calculé par le modèle pendant la période de hautes eaux de 2001 (HE 2001).

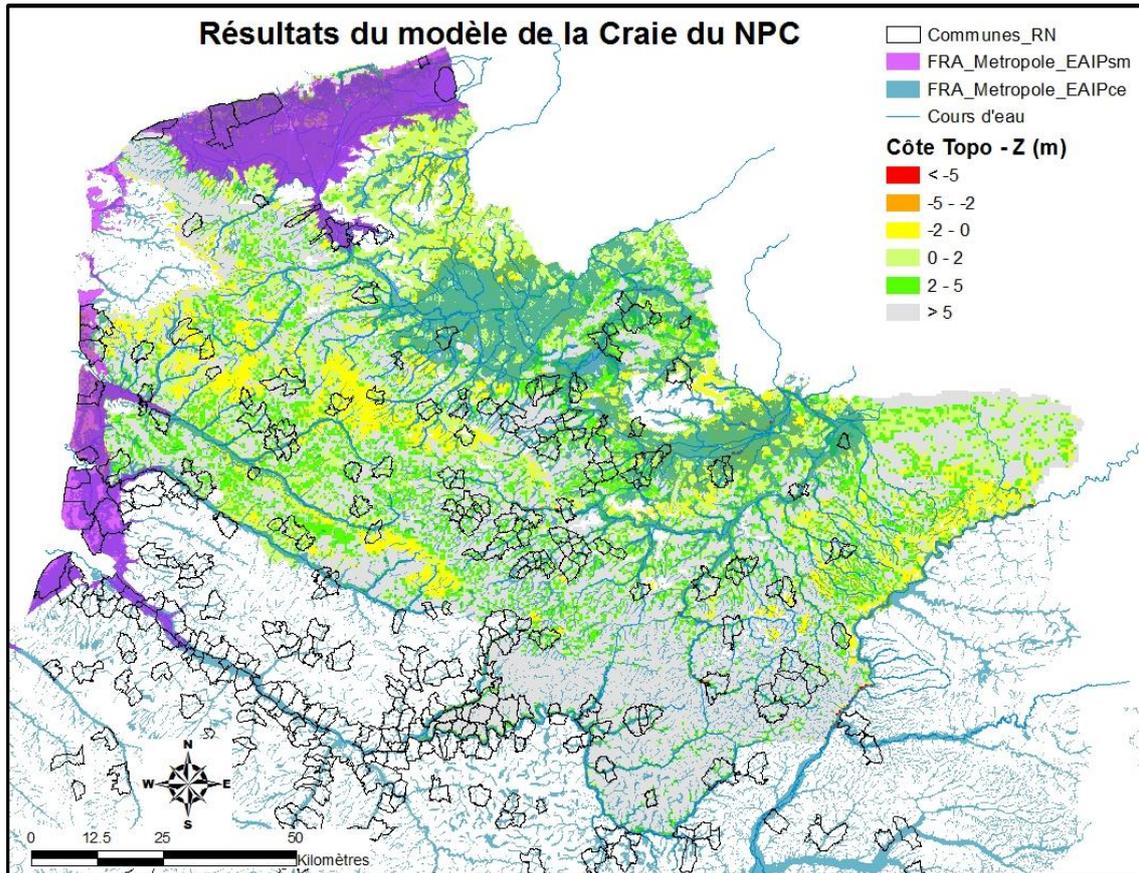


Figure 31 : Carte des zones de débordement du modèle de la Craie du NPC pendant la période des hautes eaux de 2001.

Dans la couche des alluvions, pendant les hautes eaux 2001, un certain nombre de mailles saturées en eau induisent un débordement dans la zone affinée autour de la Scarpe canalisée et du canal de la Deûle. Les zones de débordement au niveau des sables littoraux au nord et à l'ouest sont recouvertes par les EAIP submersion marine.

Dans la couche des limons, la superficie des zones de débordement est importante dans la situation des hautes eaux 2001. La couche mince des limons peut vite se retrouver saturée et engendrer des zones de débordement relativement vastes. On retrouve alors un bloc au Nord saturé en eau.

Des incertitudes subsistent au niveau des couches superficielles (limons et alluvions) car il n'existe pas de données de calage. Cela induit des biais au niveau des cotes de débordement. Le choix a donc été fait de ne prendre en compte les résultats du modèle dans cette région mais

plutôt la carte piézométrique hautes-eaux de 2001 qui couvre la nappe de la craie et qui sert de référence pour les PPR.

Modèle de Grande-Terre en Guadeloupe

Le BRGM a réalisé un modèle de simulation des écoulements souterrains de Grande-Terre. Le calage a été fait en régime transitoire et en mode diphasique pour tenir compte du contexte insulaire de Grande-Terre où la nappe d'eau douce repose sur l'eau de mer salée. Le modèle réalisé est un modèle à mailles carrées de taille identique (20355 mailles de 200 m de côté) tridimensionnel avec prise en compte d'un biseau salé. Le modèle est calé sur une période de 20 ans (1985-2005) sur un réseau de 51 points d'eau de référence dont 46 ont une chronique suffisamment longue et représentative du comportement de la nappe pour permettre le calage du modèle. Les calculs hydrodynamiques (calcul de la charge hydraulique dans chaque maille de la grille) ont été réalisés au pas mensuel.

Les zones de débordement du modèle de Grande-Terre sont pratiquement toutes incluses dans les enveloppes EAIP cours d'eau et submersion marine. Par ailleurs, sur cette partie de la Guadeloupe, il existe une zone qui est particulièrement sensible aux inondations, il s'agit de la région des « grands fonds » qui représente environ un tiers de Grande-Terre. Cette région, entièrement calcaire, comporte des thalwegs dont les parties amont sont des vallées à fond plat qui ne « coulent » que suite à des fortes pluies provoquant des débordements généralisés de la nappe des calcaires.

Ces débordements de nappe ont donné lieu à des reconnaissances de terrain permettant de définir l'extension des zones inondables. Par suite de l'absence de thalweg, ces zones inondables n'ont pas été entièrement cartées en tant que EAIPce par le volet eaux de surface, aussi nous a-t-il paru intéressant de les intégrer au volet « remontée de nappe ».

L'ensemble de ces informations ont été reportées sur la Figure 32.

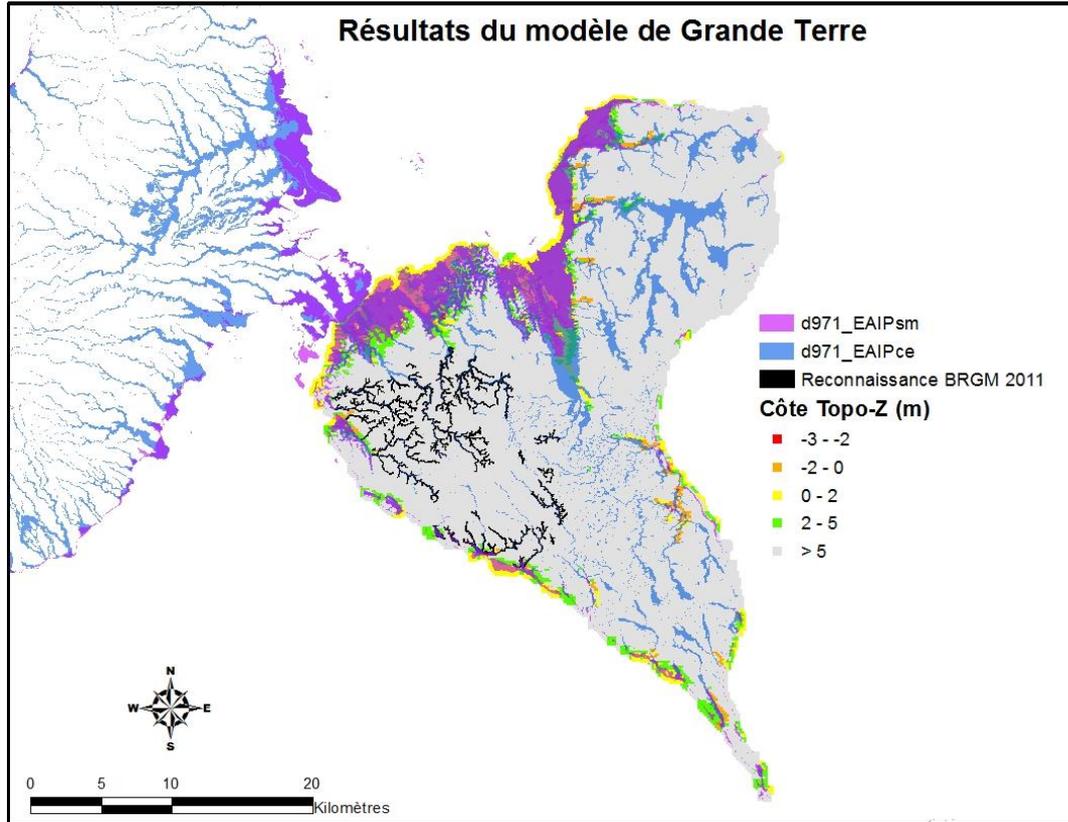


Figure 32 : Résultats du modèle de Guadeloupe et extension des EAIP de Grande Terre.

4.2. ETAPE 2 : INTERPOLATION DU NIVEAU MAXIMAL PROBABLE

Pour définir, à partir des points présélectionnés, les zones sensibles au phénomène de remontée de nappe il convient, dans un premier temps, de définir, par maille, le niveau maximal probable de la nappe.

Pour cela 3 méthodes d'interpolation ont été testées :

- l'interpolation directe de la piézométrie par krigeage,
- l'interpolation indirecte de la piézométrie en la contraignant à respecter globalement la forme de la surface de base du niveau des rivières, ceci avec deux variantes :
 - o la méthode proposée par R. Wyns (BRGM/RP-52731-FR)
 - o une méthode dérivée de la méthode R. Wyns, basée sur un krigeage avec dérive externe.

Ces opérations sont réalisées grâce au logiciel GDM (<http://gdm.brgm.fr>) développé par le BRGM. Les données préparées sous ArcGis sont exploitées par GDM afin d'interpoler la cote piézométrique maximale en tout point d'une maille de 250 m.

Après différents tests, c'est finalement la même méthode (le krigeage linéaire) qui a été utilisée pour le domaine sédimentaire et pour le domaine de socle. Les autres essais, moins concluants, d'interpolation pour le domaine de socle (krigeage avec dérivée externe) sont décrits en annexe 1. Le krigeage avec dérive externe ne donnait pas des résultats significativement meilleurs et générait quelques artefacts.

La variable interpolée est la variable « Z MAX », calculée de différentes manières en fonction de la source de données utilisée :

- pour les piézomètres issus de BSS EAU et ADES et les points issus des cartes piézométriques, c'est la valeur de la cote piézométrique maximale observée majorée par un coefficient pour ramener la fréquence de l'évènement à une « centennale » (cf. 4.1.1) ;
- pour les points de débordement tirés des modèles, c'est la valeur du MNT 25 m qui a été affectée à ces points;
- pour les points EAIPce et EAIPsm type contours (cf. § 4.1.4) et ceux le long du trait de côte, c'est la valeur de la cote altimétrique issue du MNT 25 m;
- pour les points EAIPce et EAIPsm intérieurs, c'est la valeur de la cote altimétrique interpolée (cf. § 4.1.4) ;
- pour les points « CATNAT », c'est la valeur de la cote altimétrique issue du MNT 25 m majorée de 0,5m.

Pour ces différents points on dispose également d'un champ précisant leur contexte (sédimentaire ou socle).

Outre les EAIP CE ou SM (4 255 464 points au total), on dispose du nombre de points suivants (Tableau 4) :

Origine des points	Nb de points en contexte Sédimentaire	Nb de points en contexte Socle
ADES	2 272	339
BSS EAU	14 045	60
CATNAT	213	110
Isopièzes	461 282	0
Modèle	3 766	0
Total	481 578	663

Tableau 4 : Nombre de points de chaque type disponibles (hors EAIP)

Il est clair qu'en domaine de socle les données sont très peu nombreuses et que les résultats seront principalement conditionnés par les points « EAIP ».

En domaine sédimentaire ce sont les isopièzes existantes qui auront un point prépondérant par rapport aux autres données « factuelles » (ADES, BSS EAU).

Une sélection est effectuée pour traiter séparément les points « Sédimentaire » et « Socle » de façon à ne pas risquer d'influencer l'interpolation de la cote piézométrique maximale « socle » par des données « sédimentaire » et réciproquement.

La méthode d'interpolation retenue est le **krigeage linéaire sans dérive**. L'interpolation est alors réalisée par krigeage linéaire, séparément pour le domaine sédimentaire et pour le domaine de socle. Cette méthode présente l'avantage d'être assez robuste et en général bien adaptée pour l'interpolation de surfaces piézométriques. Pour réaliser l'interpolation en un point donné, on doit spécifier les paramètres de voisinage, c'est-à-dire indiquer combien de points doivent être utilisés et jusqu'à quelle distance de recherche. Comme dans certaines zones on dispose d'une faible densité de données, un voisinage assez grand a été choisi afin que le calcul soit possible partout. Inversement si la densité de données est importante en certains endroits, il n'est pas pertinent d'aller chercher les informations trop loin et il suffit uniquement de retenir les données les plus proches. Afin d'obtenir le meilleur compromis entre ces deux situations, un voisinage « par octants » a été retenu.

Les mêmes paramètres d'interpolation sont utilisés dans les deux cas :

- Méthode d'interpolation : krigeage linéaire (krigeage avec variogramme linéaire sans dérive) : cette méthode est celle qui donne en général les meilleurs résultats, lorsqu'une analyse géostatistique calée avec un modèle de variogramme n'est pas possible ou n'a pas de sens. En effet cette méthode permet de « déclusteriser » les données lorsque celles-ci présentent des densités très différentes (beaucoup de données dans certaines zones, très peu dans d'autres).
- Voisinage : recherche par octants à l'intérieur d'un carré de 20km * 20km maxi. Les 24 points les plus proches sont choisis avec contrainte de 3 points voisins maxi par octant. Les points proches de moins de 50m sont fusionnés pour limiter les instabilités numériques (le système de krigeage n'est pas stable en cas de points trop proches). Ceci

permet de rechercher des données dans les différents secteurs de l'espace autour de chaque maille interpolée, et limite en même temps les artefacts liés aux données clusterisées,

- L'interpolation est limitée à l'intérieur des domaines « sédimentaire » ou « socle » par l'application d'un masque polygonal (enveloppes issues de BDLisa)

L'interpolation est réalisée à l'aide du logiciel GDM (<http://gdm.brgm.fr>) développé par le BRGM. Les résultats sont exportés vers ArcGis afin d'opérer les post-traitement (combinaison avec le MNT notamment) et la visualisation

4.3. ETAPE 3 : CORRECTIONS LIEES AUX FACTEURS PENTE ET TERRAINS AFFLEURANTS IMPERMEABLES

4.3.1. Zones de faible pente

Les secteurs les plus touchés par les phénomènes de remontées de nappe seront les terrains à faible pente, peu drainés. On peut ainsi supposer que les zones de pente supérieure à 10% ne sont, en principe, pas concernées par des inondations par remontée de nappe. La pente dérivée du modèle numérique de terrain au pas de 25 m (BDALTI®) est illustrée sur la Figure 33.

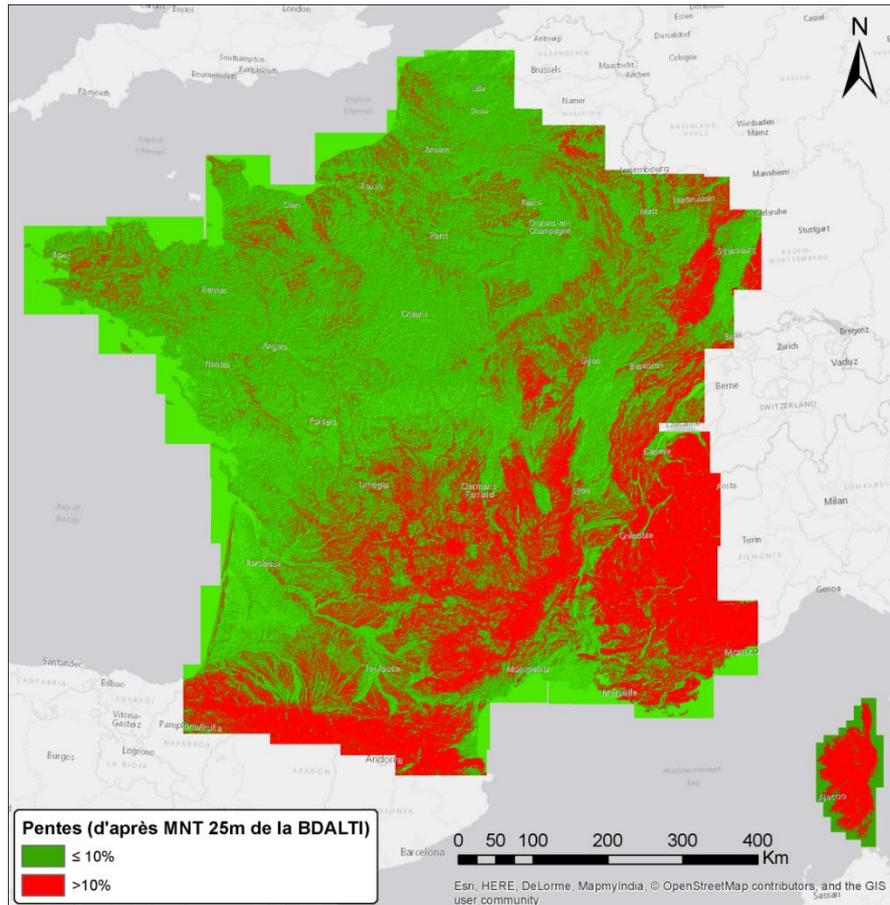


Figure 33 : Discrimination des zones de pente inférieure ou égale à 10 % (en vert) et supérieure à 10% (en rouge) (source : BDALTI®)

Ces zones à forte pente (en rouge sur la Figure 33) seront donc considérées comme n'ayant pas la possibilité d'être inondées par remontée de nappe.

4.3.2. Terrains affleurant imperméables

De même que les terrains à forte pente, les secteurs caractérisés par des terrains affleurants imperméables ne sont en théorie pas concernés par des débordements de nappe.

La localisation de ces terrains est approchée à l'aide du référentiel hydrogéologique BDLISA version 2, en deux étapes :

- Application de la surcouche des alluvions complémentaires (peu productifs mais perméables) sur les entités principales ;
- Détermination des formations géologiques caractérisées en imperméable et qui restent à l'affleurement malgré l'application de cette surcouche.

La cartographie des terrains affleurant imperméables résultant de cette approche est présentée en Figure 34.

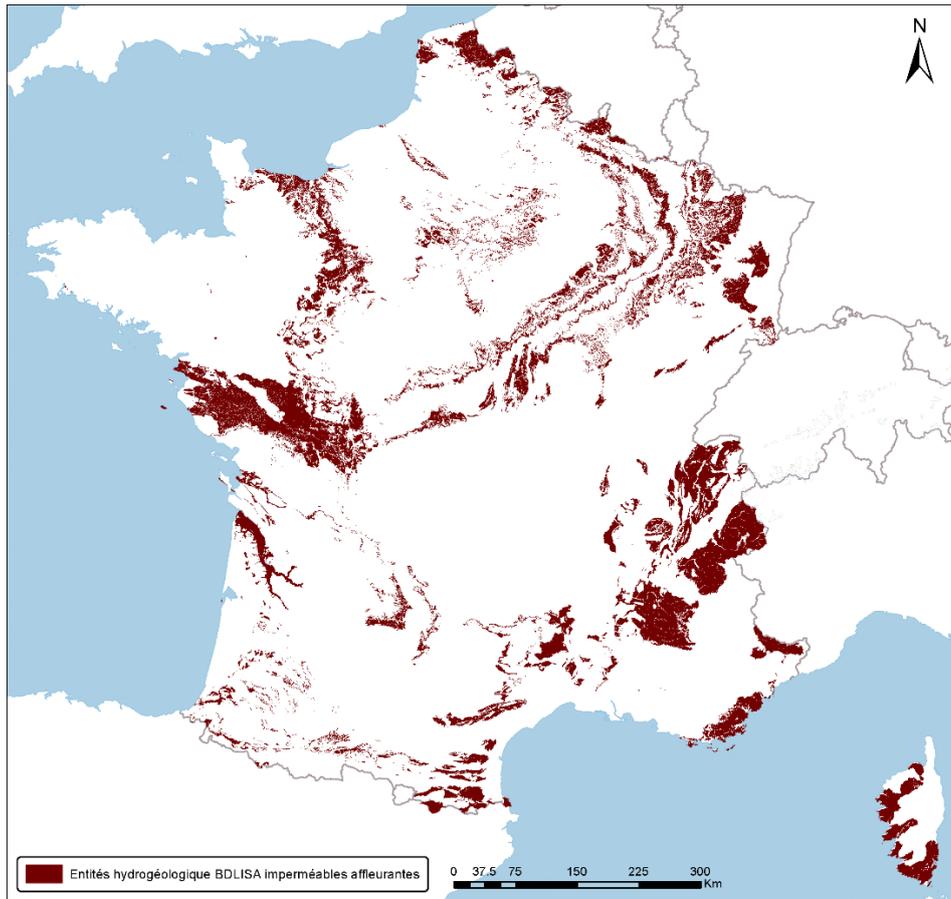


Figure 34 : Cartographie des terrains affleurants imperméables d'après la BDLISA (France métropolitaine)

Néanmoins, il n'est pas complètement exclu que des problématiques liées aux remontées de nappe aient lieu dans ces secteurs. Les entités BDLISA utilisées pour dépeindre ces zones particulières peuvent ne pas être complètement imperméables ou peuvent présenter à certains endroits une perméabilité plus élevée.

En limite de ces secteurs imperméables peuvent se produire des débordements de nappe importants. La proximité de ces secteurs peut même potentiellement exacerber le phénomène, par exemple en cas d'augmentation de la mise en charge d'une nappe éventuellement présente sous ces terrains imperméables.

Enfin, il faut noter également le risque existant de générer des zones de « faiblesse », et donc potentiellement sujettes à des débordements de nappe, lors d'aménagements souterrains sous la couche imperméable.

4.4. CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES AUX REMONTEES DE NAPPE

4.4.1. En métropole et Corse

La cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe va être obtenue, par maille de 250 m, par différence entre les cotes du MNT moyen agrégé par maille de 250 m et les cotes obtenues, suivant une grille de 250 m par interpolation des points de niveau maximal probable.

Cotes altimétriques du MNT – Cotes Points niveau maximal = Zones potentielles de débordement

Au regard des incertitudes liées aux cotes altimétriques, il a été décidé de proposer une représentation en trois classes qui sont :

- « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT et la cote du niveau maximal interpolée est négative ;
- « zones potentiellement sujettes aux inondations de cave » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT et la cote du niveau maximal interpolée est comprise entre 0 et 5 m ;
- « pas de débordement de nappe ni d'inondation de cave » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT et la cote du niveau maximal interpolée est supérieure à 5 m.

Trois cartes de métropole et Corse sont ainsi présentées dans les pages suivantes :

- la carte brute des zones potentiellement sujettes aux débordement de nappe, aux inondations de cave ou à aucun des deux phénomènes, sans les zones de fortes pentes (cf. Figure 35) ;
- la carte précédente sur laquelle a été appliqué un masque transparent des zones imperméables, c'est à dire des zones classées imperméables dans la BDLISA version 2 (cf. Figure 36) ;
- la carte précédente sur laquelle a été appliqué un masque occultant des zones EAIP cours d'eau et EAIP submersion marine, qui peuvent être les lieux de phénomènes combinés avec des remontées de nappe (cf. Figure 37).

Une méthode globale a été appliquée sur l'ensemble du territoire, qui n'est pas forcément adaptée aux contextes plus complexes des zones de karst, zones urbaines et zones après-mine nécessitant des approches plus fines. Dans ces zones, les résultats obtenus seront donc à prendre en compte avec circonspection.

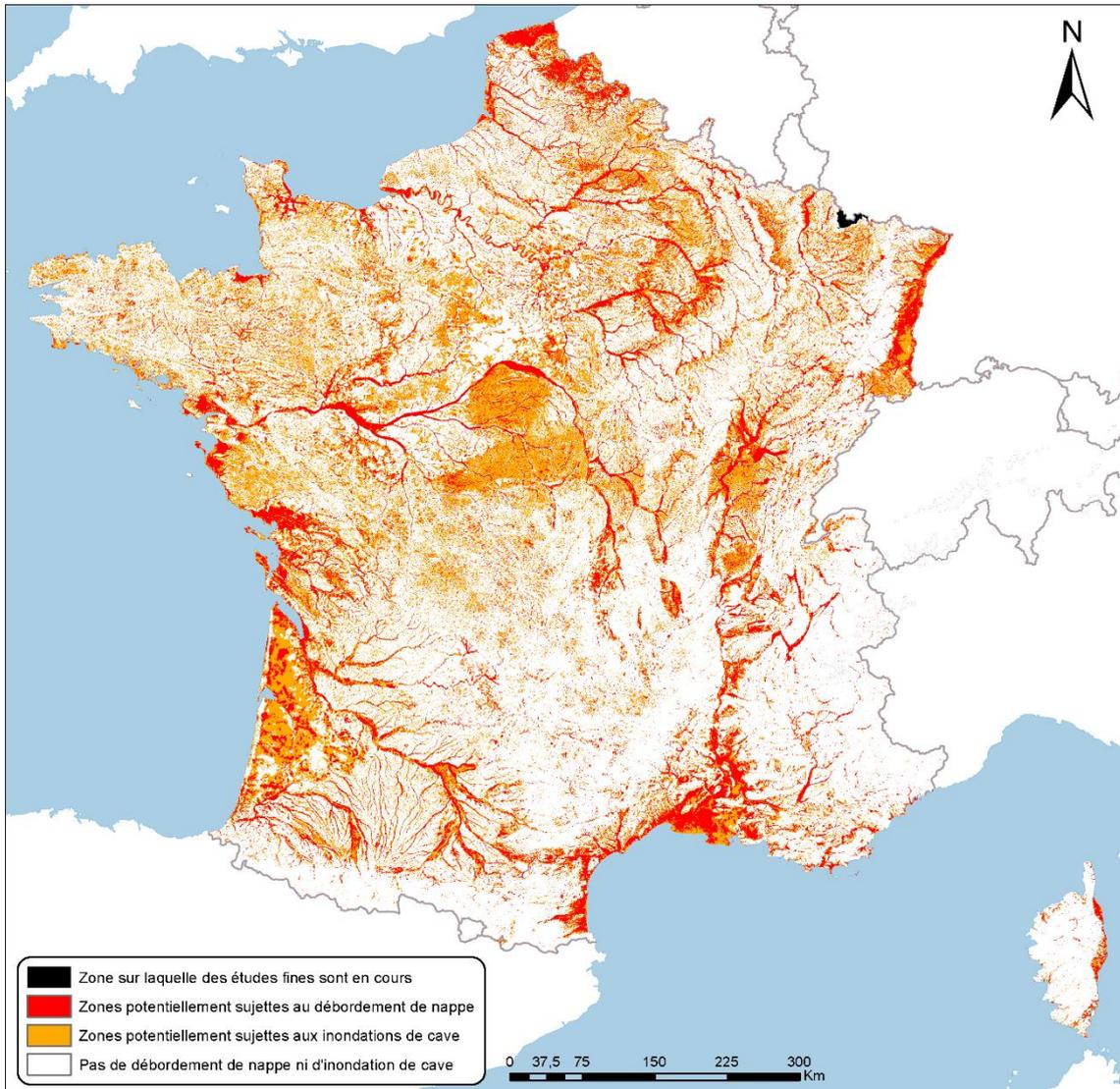


Figure 35 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe (résultat brut)

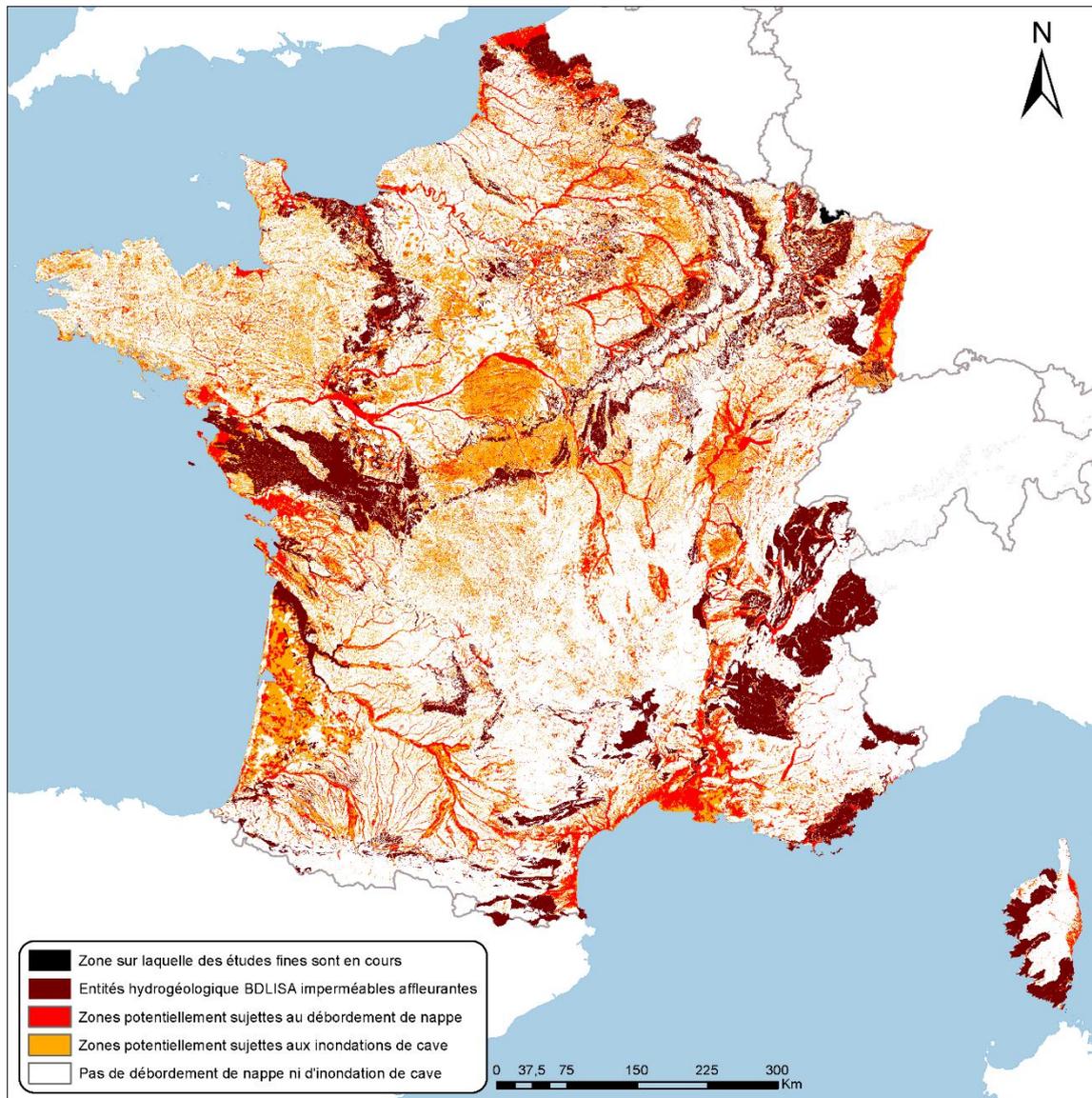


Figure 36 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant le masque des zones considérées comme imperméables

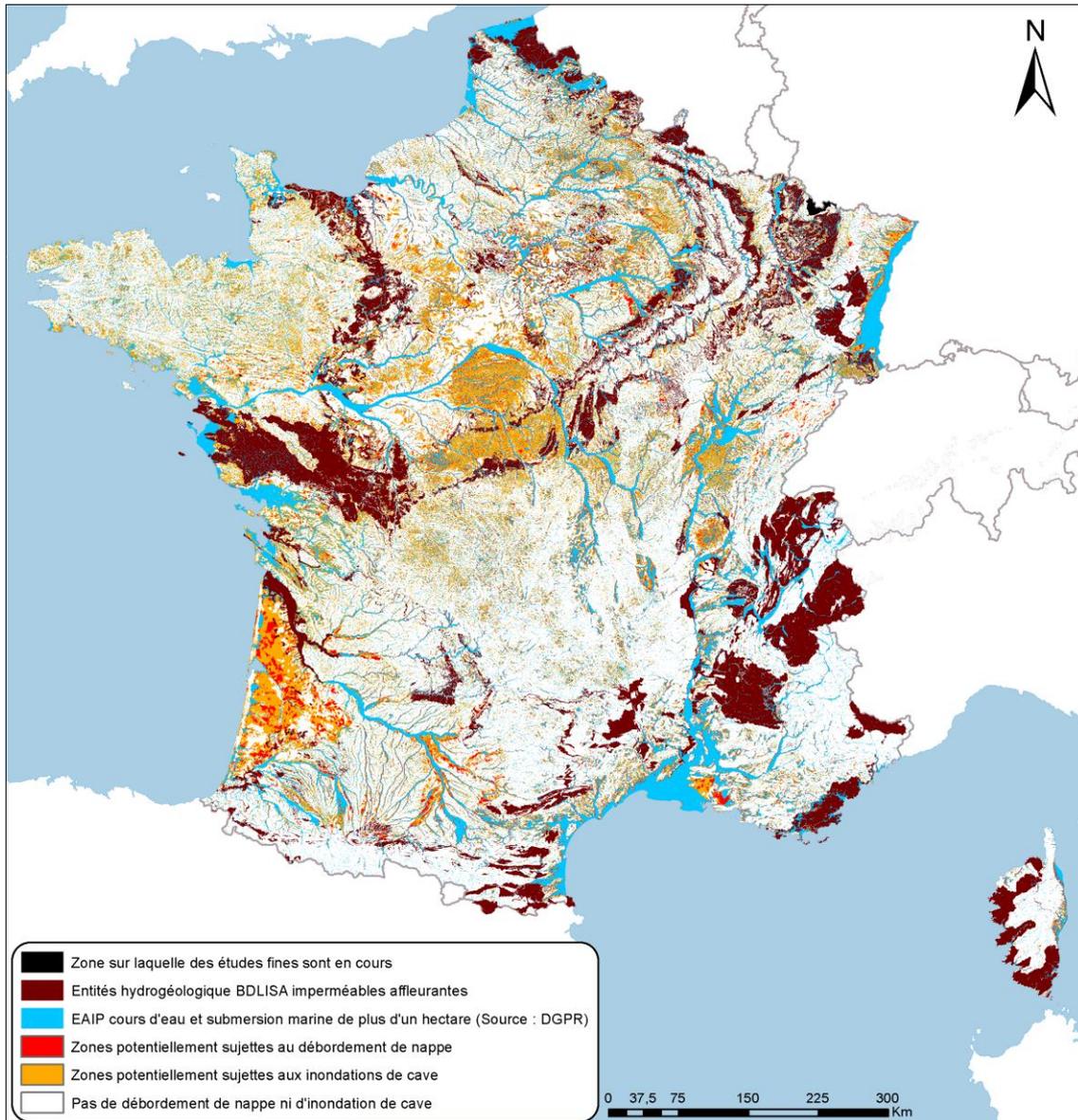


Figure 37 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant l'élimination des zones à forte pente et les masques des secteurs considérés imperméables (marron) et des EAIPce et EAIPsm (bleu)

Cette dernière carte apparaît comme la plus complète pour répondre à des besoins d'identification, à petite échelle (maximum 1/100 000), des zones potentiellement sujettes à des remontées de nappe. En plus du résultat brut de l'interpolation, elle intègre en effet en compléments d'autres informations à prendre en considération pour la lecture de la carte :

- les EAIPce et EAIPsm pouvant être des zones de remontée de nappe également et
- les terrains affleurants imperméables qui ne sont théoriquement pas des terrains favorisant les remontées de nappe mais qui peuvent localement en être le lieu, pour les raisons évoquées dans le chapitre 4.3.2.

Situation particulière de la nappe des grès du Trias inférieur (GTI) dans le secteur du bassin houiller lorrain

A la demande de la DREAL de bassin Rhin-Meuse, ce secteur a été représenté en noir sur les trois cartes précédentes et est légendé « Zone sur laquelle des études fines sont en cours ».

Les prélèvements en eau dans la nappe des grès du Trias inférieur (GTI) dans le secteur du bassin houiller lorrain sont en nette baisse, du fait d'une diminution des consommations en eau potable et industrielle observable depuis les années 1990. S'ajoutent à cela les exhaures arrêtées en raison de la fin de l'activité minière intervenue il y a plus de dix ans. Les évolutions techniques, socio-économiques, ainsi que les politiques publiques mises en place au cours des dernières années dans l'objectif de préserver les ressources naturelles ont conduit à une accentuation de la baisse des prélèvements d'eau. Il s'ensuit que la nappe des GTI dans ce secteur se reconstitue d'autant plus. En conséquence, les niveaux de la nappe remontent et il en sera ainsi jusqu'à ce qu'elle ait atteint un nouvel état d'équilibre moyen, à partir duquel elle pourra encore fluctuer en fonction des saisons et des années sèches ou humides. Des mesures compensatoires à l'arrêt des exhaures ont été prévues par l'ancien exploitant minier pour protéger les zones bâties affaissées des conséquences d'une recharge excessive de la nappe des GTI.

La situation piézométrique observée dans le passé récent n'est donc représentative ni de son niveau futur, qui restera influencé par les prélèvements anthropiques, ni de son niveau naturel (sans prélèvements). En conséquence, **la méthodologie présentée dans ce rapport n'est pas adaptée à ce cas particulier, ce qui explique qu'aucun résultat ne soit présenté sur ce secteur.**

Cependant, des études hydrogéologiques et des modélisations spécifiques sont en cours afin de caractériser au mieux ce phénomène de remontée de la nappe et la vulnérabilité qui en découle. Elles ont pour ambition d'intégrer au mieux le rôle que peuvent jouer certaines failles géologiques sur l'écoulement de la nappe d'eau souterraine, l'impact de l'anthropisation des milieux (berges aménagées, cours d'eau bétonné, ancienne zone marécageuse urbanisée, prélèvements anthropiques etc.) ainsi que les zones dont la sensibilité au phénomène de remontée de nappe résulte des affaissements miniers.

Les résultats de ce travail seront mis à disposition du public. Une première cartographie des zones soumises à la recharge de la nappe sur l'Ouest du bassin houiller (secteur de Creutzwald) a été communiquée en 2016. Une actualisation élargie à l'ensemble de la nappe « libre » du bassin houiller (Secteur Est, Centre et Ouest) est en cours.

Utilisation pratique de la carte de sensibilité aux remontées de nappe

L'utilisateur doit garder en mémoire la liste des recommandations suivantes pour toute utilisation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe :

1. L'exploitation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe n'est possible qu'à une échelle inférieure à 1/100 000. Autrement dit, pour des études locales, ayant besoin d'une résolution fine (échelle parcellaire ou au 1/25 000, au 1/50 000), cette carte nationale ne doit pas être utilisée.
2. Ajout du masque sur les secteurs avec terrains affleurants imperméables (fourni avec la carte, source BRGM)

Dans ces secteurs, la présence d'une couche imperméable empêche le débordement en surface de nappes captives pouvant présenter des niveaux piézométriques maximaux supérieurs au terrain naturel. Cependant, il n'est pas complètement exclu que des problématiques liées aux remontées de nappe aient lieu dans ces secteurs : non continuité des couches imperméables BD LISA, aménagements souterrains sous la couche imperméable, débordement plus important au niveau des limites perméables/imperméables, ...

3. Ajout des masques EAIPce et EAIPsm (fourni avec la carte, source DGPR)

Les contours et points intérieurs des EAIPce et sm ont été utilisés comme « points de forçage » pour l'interpolation du niveau maximal piézométrique probable → ces zones correspondent donc à des secteurs dans lesquels il peut y avoir concomitance de 2 phénomènes cumulatifs : débordement de cours d'eau + remontée de nappe ou submersion marine + remontée de nappe.

4. Ajout d'un masque sur les zones karstiques

Les aquifères karstiques présentent une forte hétérogénéité des écoulements et l'approche globale mise en œuvre ici ne peut pas avoir de réalité physique dans ces contextes spécifiques.

5. Ajout d'un masque sur les zones urbaines

Dans les zones urbaines, les écoulements souterrains sont perturbés par les différents aménagements souterrains. Ces perturbations piézométriques ne sont pas prises en compte dans l'approche globale mise en œuvre.

6. Ajout d'un masque sur les zones après-mine (masque dans le secteur du bassin houiller lorrain fourni avec la carte, source DREAL Grand Est)

Comme pour les zones urbaines, les modifications des écoulements souterrains dans les zones d'après-mine (pompage des eaux d'exhaure / arrêt des pompages) ne sont pas prises en compte dans cette approche globale.

4.4.2. Autres territoires

En ce qui concerne les autres DOM, il apparaît clairement que le peu de données disponibles ne permettent pas, hormis la « Grande-Terre en Guadeloupe » de tracer autre chose que l'influence des bandes côtières du littoral. En Guyane, la situation est encore aggravée par le manque quasi-total de données piézométriques mais elle est en partie compensée par la richesse des informations « eaux de surface ».

5. Estimation de la fiabilité des résultats

5.1. PARAMETRES INFLUENÇANT LA REALISATION ET L'EXPLOITATION DE L'INTERPOLATION

5.1.1. Distance entre les points

Les Figure 38 et Figure 39 présentent les distances minimales entre les différents types de points utilisés pour réaliser l'interpolation.

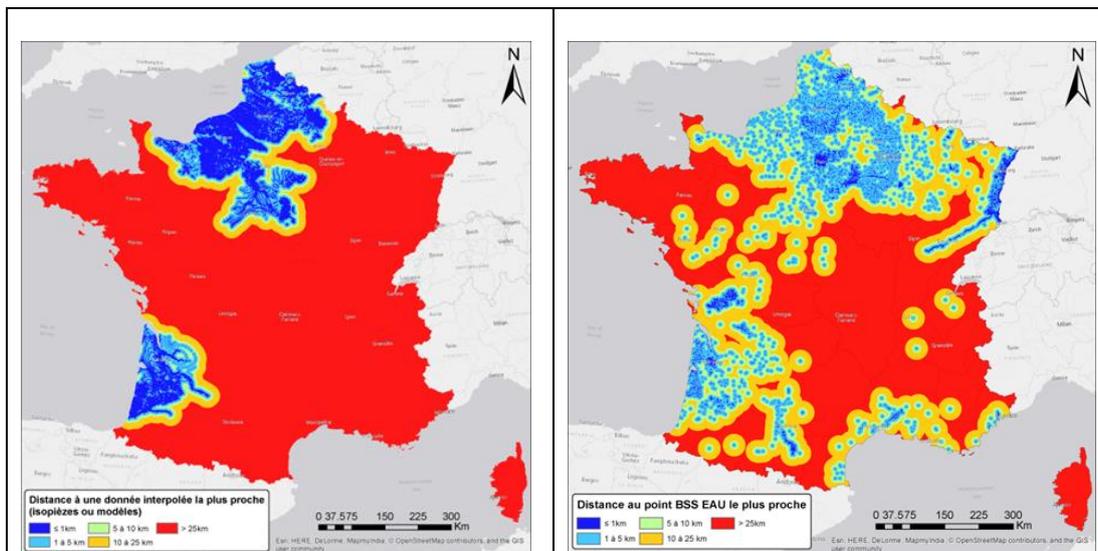


Figure 38 : Distance entre les données utilisées pour l'interpolation : à gauche données modèles hydrodynamiques et isopièzes ; à droite données BSS EAU

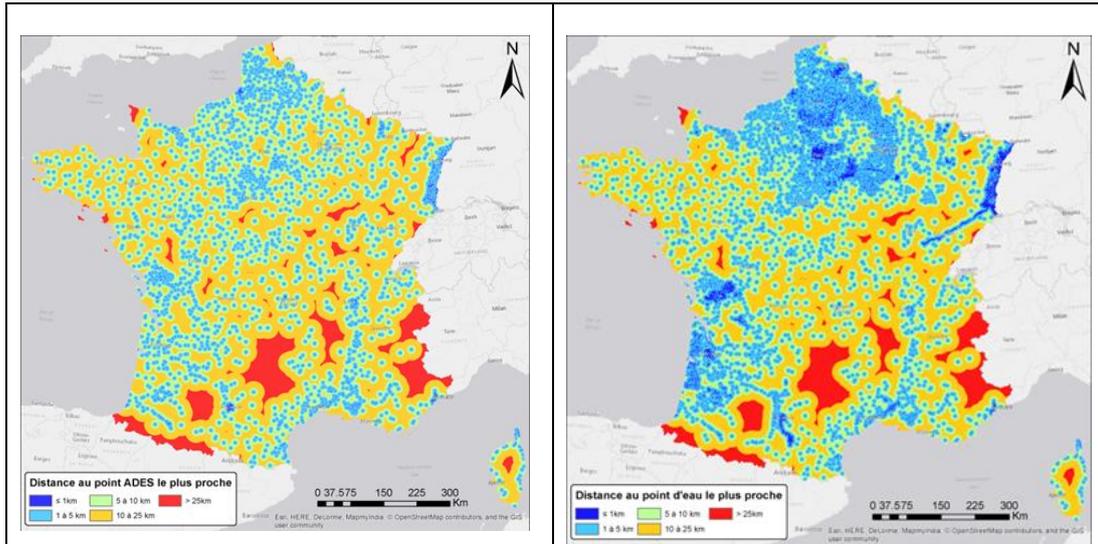


Figure 39 : Distance entre les données utilisées pour l'interpolation : à gauche données ADES ; à droite données points d'eau (ADES + BSS EAU) et isopièzes.

Ces cartes permettent de constater que :

- les modèles et courbes piézométriques permettent d'avoir des informations denses mais limitées en extension, (cf. Figure 38, a) ;
- les données BSSEAU sont moins denses et concernent les mêmes régions, (cf. Figure 38, b) ;
- les données ADES sont beaucoup mieux réparties mais ont des lacunes (cf. Figure 39) ;

La combinaison de ces diverses informations (cf. Figure 40) illustre bien le fait que des lacunes significatives de données caractérisent certaines régions et notamment celles dans le socle et/ou dans les régions montagneuses. Ces lacunes sont telles qu'elles rendent toute interpolation impossible ou, pour le moins d'un niveau de fiabilité très faible.

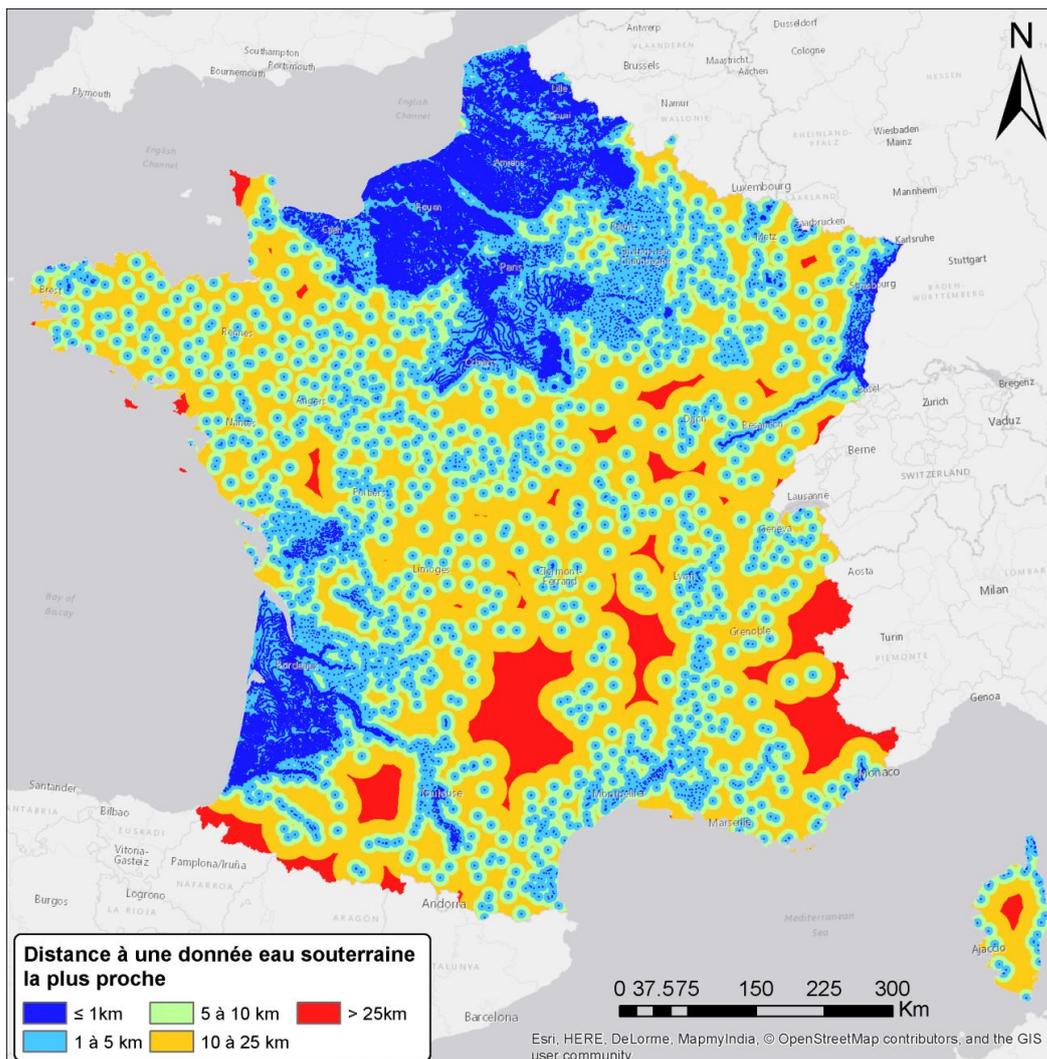


Figure 40 : Distance minimale entre 2 données eau souterraine (toute origine confondue)

5.1.2. Modèle Numérique de Terrain

Vu l'objectif et la méthode utilisée, il est apparu nécessaire d'examiner la fiabilité et la précision des données du Modèle Numérique de Terrain utilisé, car l'interpolation s'effectue sur la différence des niveaux terrain et piézométrique, ces derniers étant eux-mêmes obtenus à partir des calages altimétriques des piézomètres.

Un contact a été pris avec l'IGN afin de récupérer ces informations sur la précision des côtes altimétriques du MNT de la BD ALTI® au pas de 25 m qui est en fait une version sous-échantillonnée du RGE ALTI® 1m, obtenue par décimation (1 sur n). Ce dernier est issu de différentes sources de données et est calculé à partir de mesures plus ou moins denses. Il a donc une précision variable spatialement, qu'il est possible de transposer à des résolutions moins fines, telle que le 25 ou le 250 m.

Pour identifier localement le niveau de précision du MNT, un masque « source » est livré conjointement avec le MNT, qui renseigne essentiellement sur le mode d'acquisition (lidar, corrélation à partir de prise de vues aériennes, radar, BD ALTI® des versions antérieures...etc...)

mais aussi sur certains autres aspects, tels que la résolution des images, la densité des levés lidar, la nature de la BD ALTI®...etc...

Les codes de ce masque source sont nombreux et aucun élément quantitatif relatif à la précision pour chacun d'entre eux n'est véritablement disponible ; les spécifications du produit indiquent des précisions maximums (Erreurs Moyennes Quadratiques ou EMQ) pour chaque mode d'acquisition sans entrer dans les détails.

Actuellement, le MNT s'appuie sur près de 180 types de données source et l'IGN propose un regroupement, selon le critère précision, en quatre familles d'EMQ :

- EMQ < 30 cm ;
- EMQ < 70 cm ;
- 1 m < EMQ < 7 m ;
- 2 m < EMQ < 8 m ;

Le résultat sur tout le territoire national est indiqué sur la Figure 41.

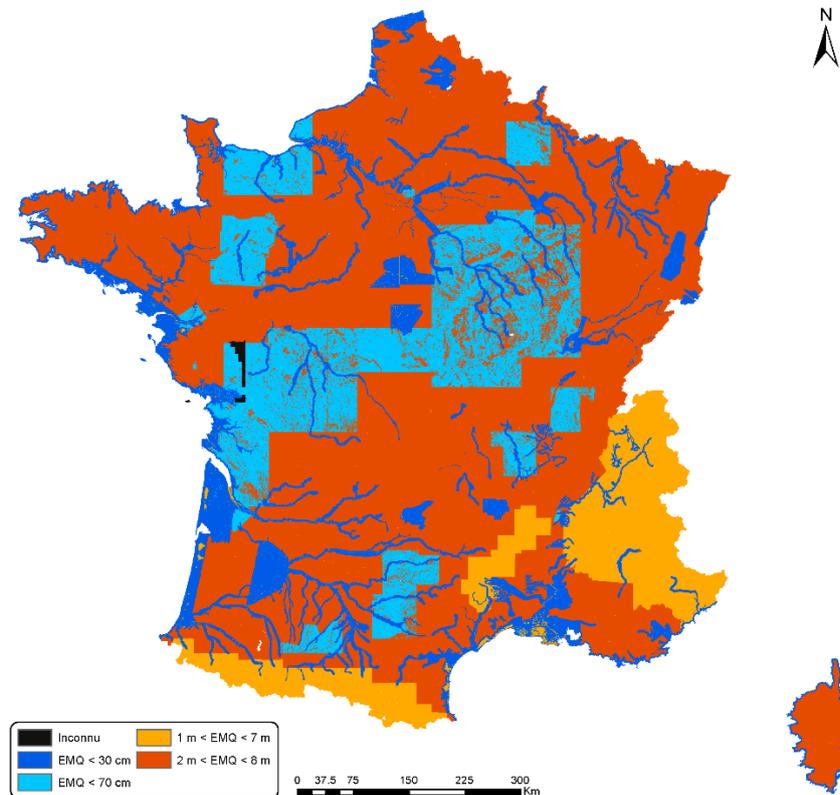


Figure 41 : Précision du MNT BDALTI®, selon les Erreurs Moyennes Quadratiques en mètres (Source : IGN)

Sur une très large majorité du territoire, l'EMQ sur la cote altimétrique du RGE ALTI® est supérieure à 1 m et peut aller jusqu'à 8 mètres. Cela montre finalement que, dans ces secteurs, les valeurs altimétriques des piézomètres ne sont garanties qu'avec une incertitude assez élevée. Contrairement à ce qui est généralement annoncé, les zones de montagne ne sont pas forcément les plus problématiques.

D'autres secteurs, en grande partie des fonds de vallées, présentent des valeurs altimétriques beaucoup plus précises (dans le pire de cas, avec une EMQ de 70cm), bénéficiant probablement de campagnes Lidar haute résolution.

5.2. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR ESTIMER LE NIVEAU DE FIABILITE DE LA CARTOGRAPHIE

5.2.1. Fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine » utilisées

Un calcul de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine » a été réalisé. Par données « eau souterraine », on entend les données utilisées pour l'interpolation du niveau piézométrique extrême ayant pour origine ADES, la BSS EAU, les cartes piézométriques, les modèles hydrodynamique et les points CATNAT.

Ce calcul intègre deux notions : la fiabilité de la donnée source et la distance euclidienne à la donnée source la plus proche.

La fiabilité de la donnée source

Une observation CATNAT sera logiquement d'une fiabilité très supérieure à celle d'un point d'eau ayant fait l'objet d'une mesure piézométrique unique.

Pour les besoins de l'exercice, la fiabilité des données source a été définie de la manière suivante :

- points d'eau ADES et BSS EAU ayant moins de 9 ans de données et/ou moins de 120 valeurs/an : fiabilité faible (cf. paragraphe 4.1.1) ;
- toutes les autres sources de données : fiabilité forte.

La distance euclidienne à la donnée source la plus proche

Plus cette distance est faible, plus la fiabilité de l'interpolation peut être considérée comme élevée.

Au regard de la résolution de travail, les classes de distance ont été définies de la manière suivante :

- < 2,5 km (soit 10 mailles) : fiabilité forte ;
- Entre 2,5 et 10 km : fiabilité moyenne ;
- > 10 km : fiabilité faible

Croisement et cartographie de cet indice de fiabilité

Le Tableau 5 ci-dessous révèle la façon dont ont été croisées ces deux notions pour aboutir à des classes de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine » :

		FIABILITE « TYPE DONNEE SOURCE »	
		FAIBLE	FORT
FIABILITE « DISTANCE A LA DONNEE SOURCE »	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE
	MOYEN	FAIBLE	MOYEN
	FORT	FAIBLE	FORT

Tableau 5 : Modalité d'attribution des classes de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine »

Lorsque la fiabilité de la donnée source est faible, le facteur distance à cette donnée n'influe pas et l'indice de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine » est systématiquement faible. Par contre, lorsque la fiabilité de la donnée source est élevée, le facteur distance à cette donnée devient prépondérant.

Le résultat cartographique pour cet indice est présenté en Figure 42.

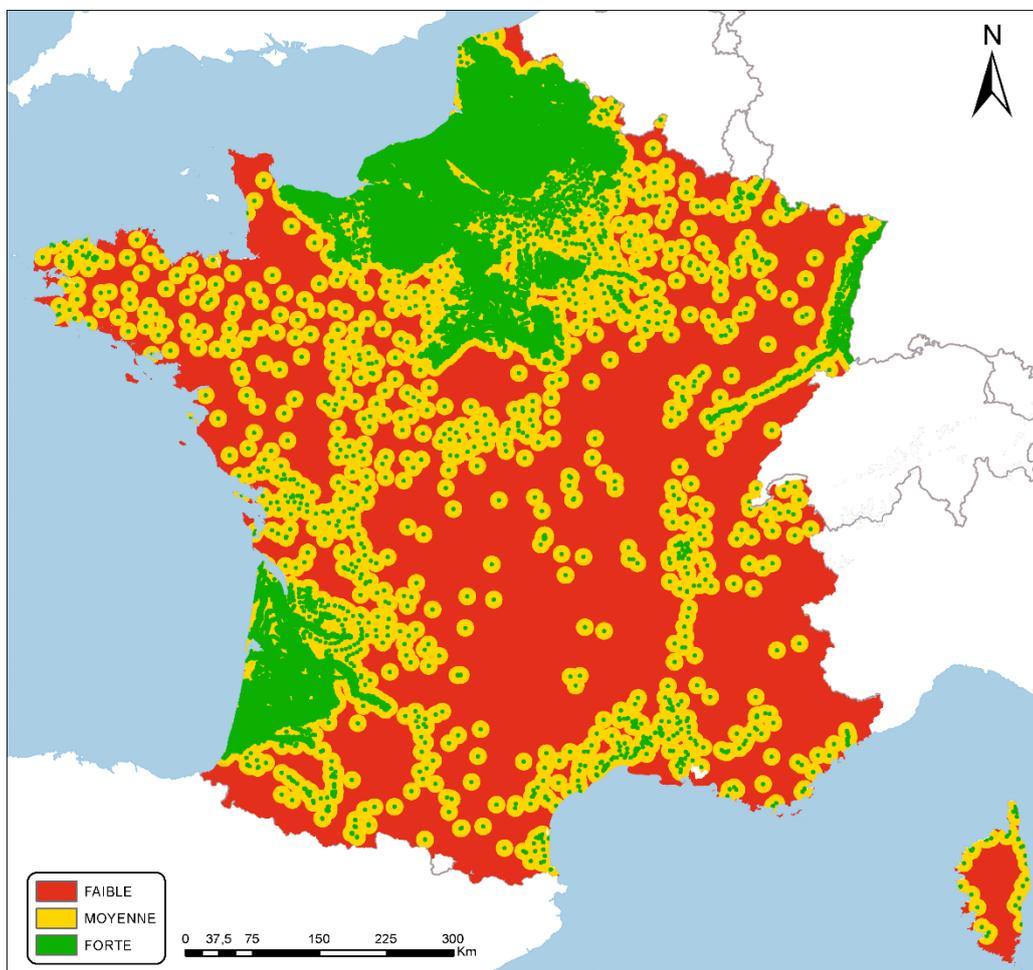


Figure 42 : Carte de fiabilité vis-à-vis des données « eau souterraine »

Les zones les mieux couvertes par des données « eau souterraine » sont les grands bassins sédimentaires de l'Aquitaine, de l'Alsace, de l'Ile-de-France, du Centre nord, de la Normandie et des Hauts-de-France.

A contrario, les régions souffrant d'une densité de points « eau souterraine » bien trop faible sont essentiellement les régions montagneuses en contexte de socle et (Auvergne, Alpes, Pyrénées, Massif armoricain, Corse...).

5.2.2. Fiabilité vis-à-vis du Modèle Numérique de Terrain

Pour les besoins de l'étude, les 4 classes d'EMQ détaillées dans le paragraphe 5.1.2 ont été regroupées en 2 grandes classes ; celle des EMQ inférieures à 70 cm, considérées comme de fiabilité élevée, et celle des EMQ comprises entre 1 et 8 m, avec un indice de fiabilité faible.

Un traitement de rééchantillonnage du masque source du MNT a été mené pour en produire une version à une résolution moins fine (maille de 250 m), par cohérence avec la résolution de la grille interpolée.

La carte de fiabilité en découlant est proposée sur la Figure 43 ci-dessous.

A noter la présence, par endroits, de zones pour lesquelles la classe d'EMQ n'a pas pu être définie (classe « inconnue » dans les Figure 41 et Figure 43).

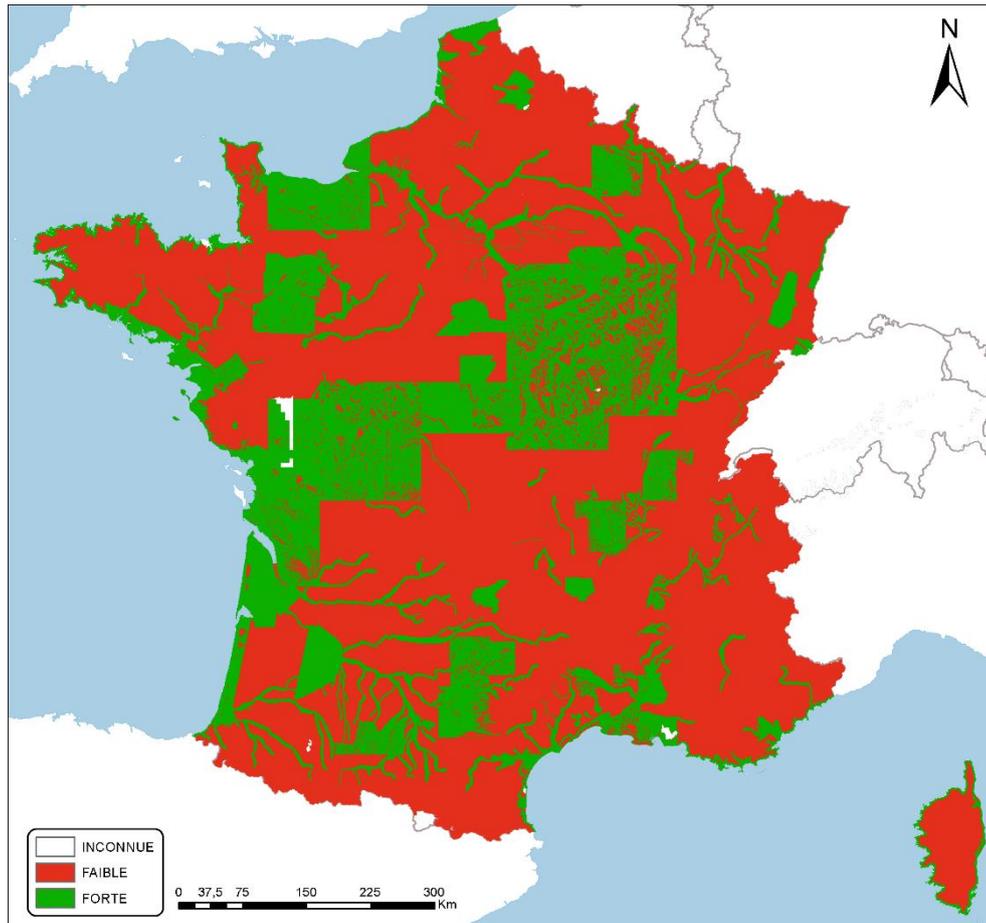


Figure 43 : Carte de fiabilité vis-à-vis de la précision altimétrique du MNT du RGE ALTI® (Source : IGN)

5.2.3. Fiabilité globale

Les deux indices de fiabilité décrits dans les chapitres précédents ont été croisés pour aboutir à un indice de fiabilité global. Les modalités d'attribution des classes de fiabilité globale sont décrites dans le Tableau 6 ci-dessous.

		FIABILITE VIS-A-VIS DU MNT	
		FAIBLE	FORT
FIABILITE VIS-A-VIS DES DONNEES « EAU SOUTERRAINE »	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE
	MOYEN	FAIBLE	MOYEN
	FORT	MOYEN	FORT

Tableau 6 : Modalité d'attribution des classes de fiabilité globale pour la méthodologie proposée

La représentation cartographique de cet indice de fiabilité global, mêlant fiabilité des données sources utilisées pour l'interpolation et fiabilité des cotes altimétriques du MNT du RGE ALTI®, est proposée en Figure 44.

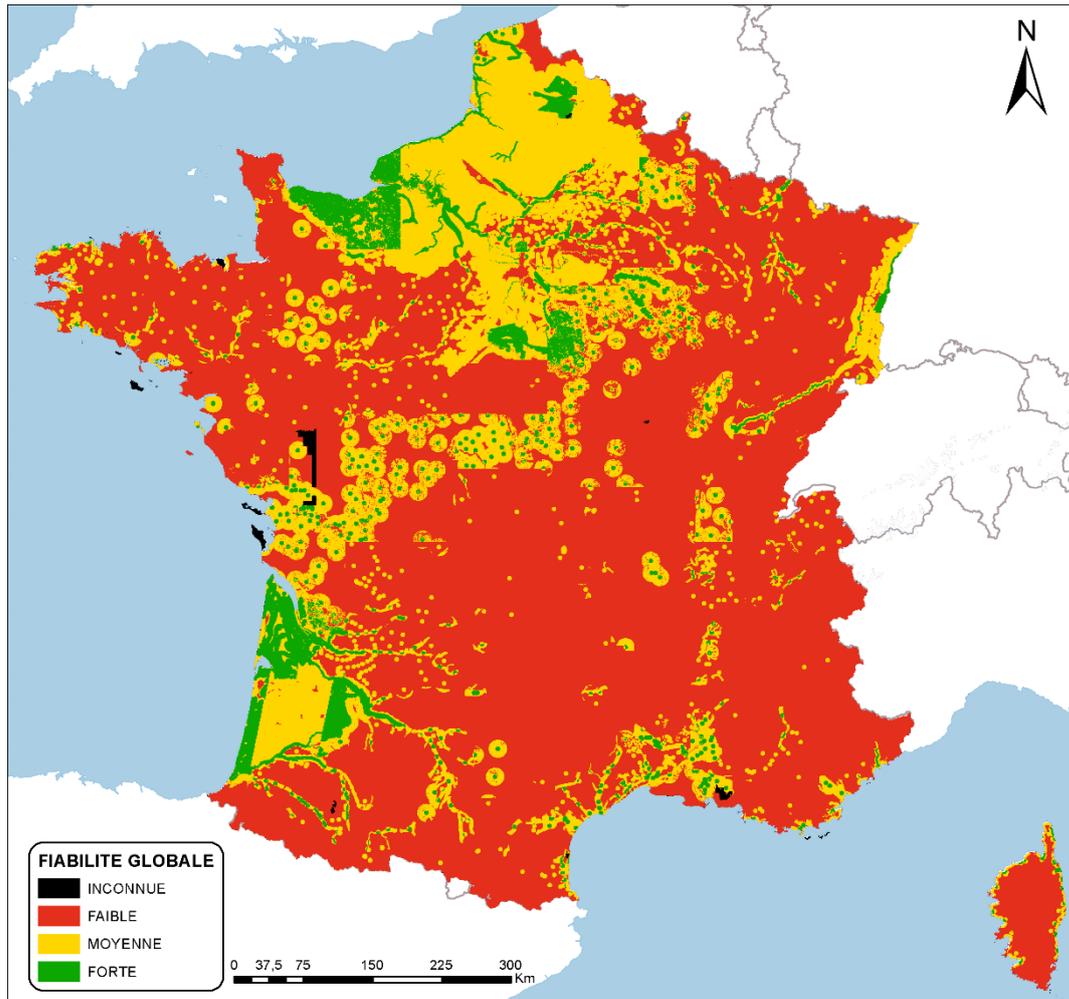


Figure 44 : Carte de fiabilité globale pour la méthode employée

Finalement, une très large majorité du territoire national est caractérisée par une fiabilité faible. Ceci peut s'expliquer de différentes manières : forte hétérogénéité spatiale pour les données « eau souterraine », densité de points insuffisante pour les besoins de l'exercice, précision altimétrique assez faible sur une large part du territoire....

5.2.4. Proposition de représentation cartographique

Un exemple de représentation cartographique de la carte de sensibilité aux remontées de nappe avec des niveaux de fiabilité différents (forte, moyenne et faible) selon les différentes classes proposées (débordements de nappe et inondations de caves) est proposée sur la Figure 47.

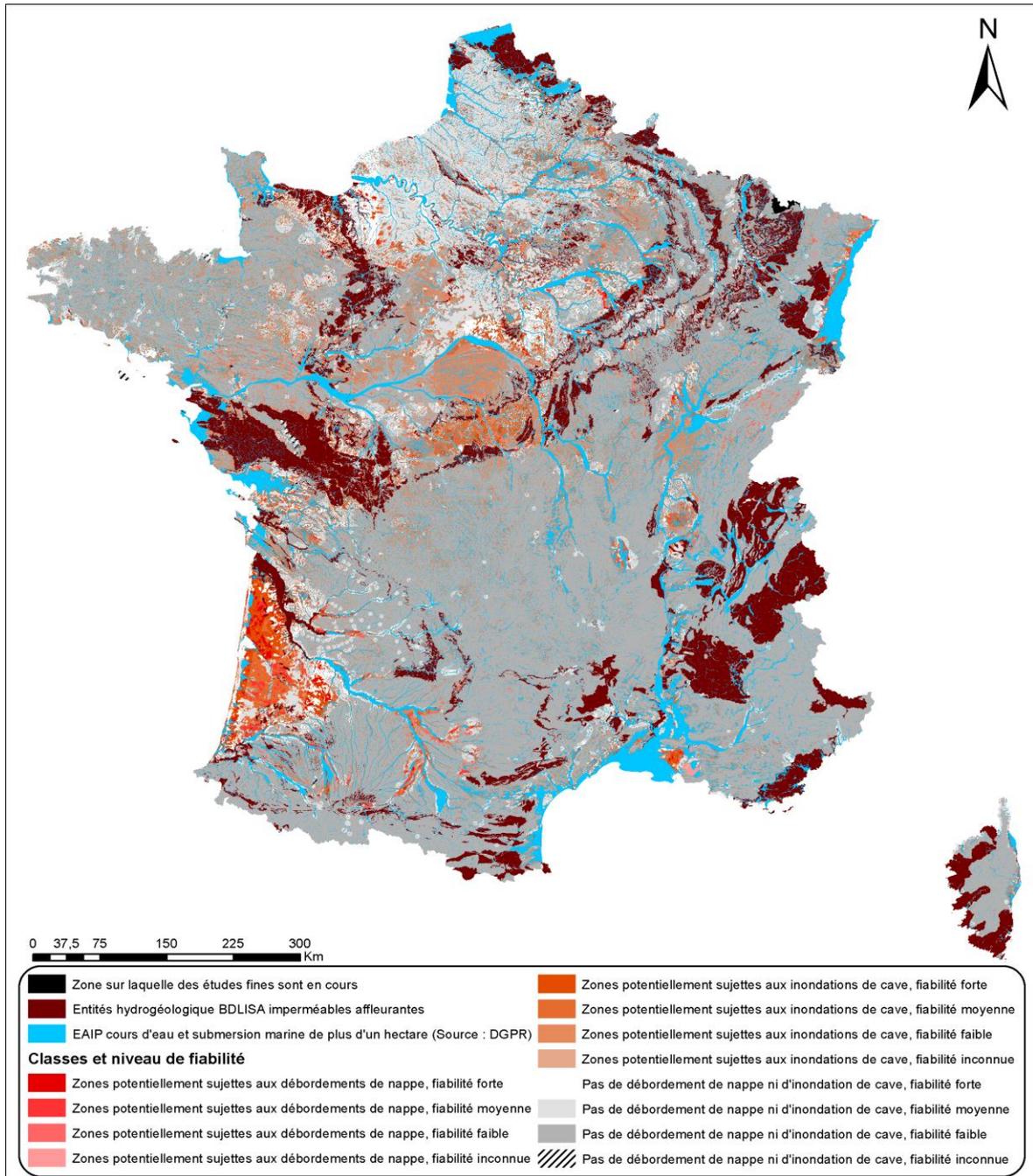


Figure 45 : Proposition de représentation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe avec des niveaux de fiabilité différents selon les différentes classes proposées

6. Contrôle des résultats

Une première série de contrôles a été réalisée à partir de la carte nationale des zones potentiellement humides et de la cartographie issue du modèle Poitou-Charentes.

Ensuite, une phase de consultation a été lancée auprès des organismes décentralisés du ministère et des directions régionales du BRGM. Le but était d'apporter des données complémentaires et des corrections à la première carte provisoire réalisée.

6.1. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE ISSUE DU MODELE POITOU-CHARENTES [DOUEZ O. ET AL. (2011)]

Il couvre la région Poitou-Charentes ainsi qu'une partie du département de la Vendée, au nord du Marais-Poitevin.

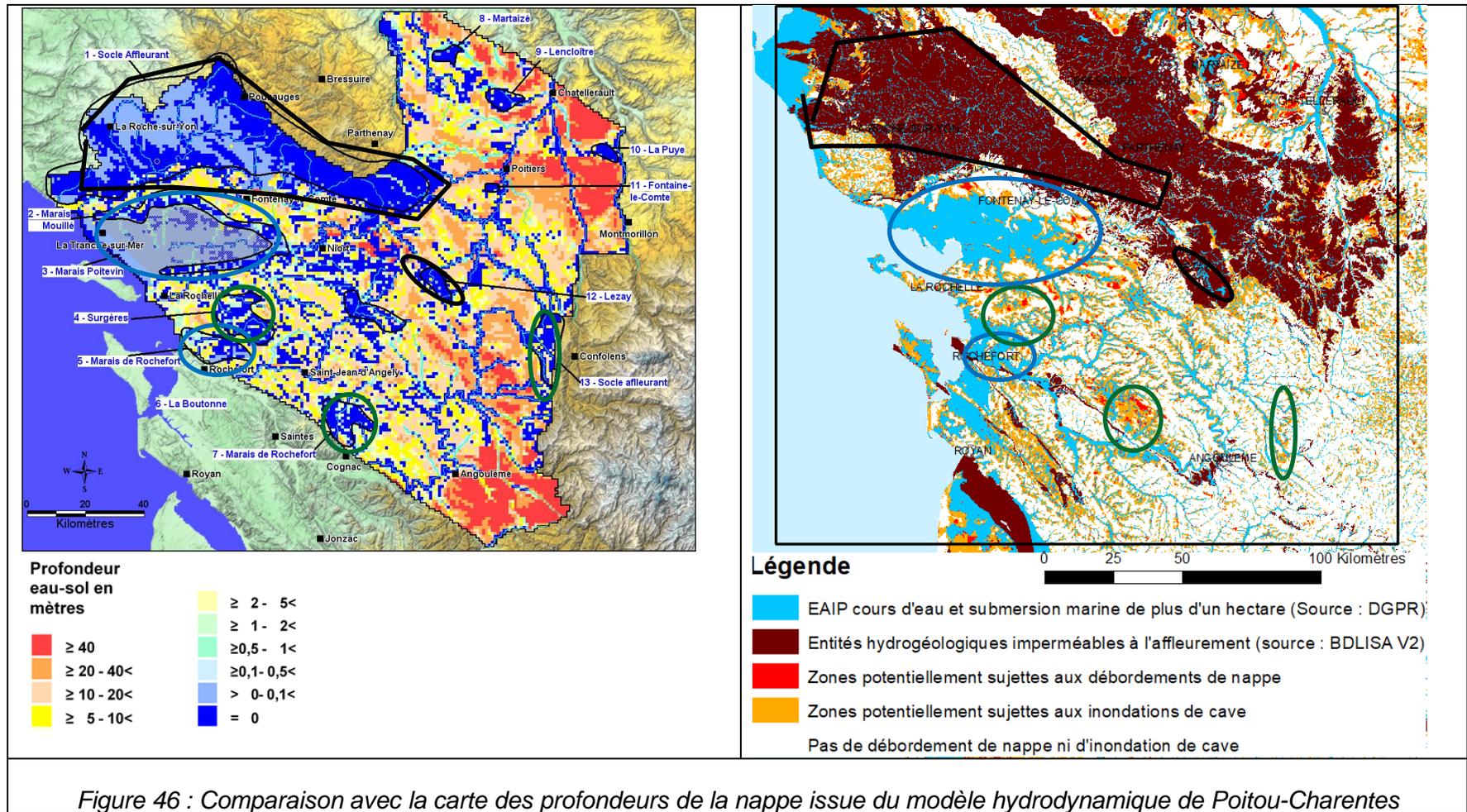
Ce modèle comporte 8 couches (de haut en bas) : Bri du Marais, Crétacé supérieur/altérites, Jurassique supérieur altéré (aquifère), Jurassique supérieur non altéré, Dogger (aquifère), Toarcien, Infra-Toarcien (aquifère) et le socle.

Le modèle du Jurassique couvre une superficie d'environ 19 300 km² et concerne l'ensemble des formations du Jurassique et une petite partie des formations du Crétacé. Concernant le maillage, la trame du kilomètre carré a été retenue.

Le calage en régime transitoire a été réalisé sur la période 2000-2007 au pas de temps mensuel et hebdomadaire sur les mois de juin à août, et en intégrant les prélèvements pour les usages AEP et irrigation dans la nappe et dans les cours d'eau.

En sortie, deux cartes ont été produites, pour cette étude : celle de la profondeur des nappes par rapport au sol (différence de la cote topographique issue du Modèle Numérique de Terrain avec la hauteur de nappe calculée par le modèle) et celle des mailles de débordement avec débits calculés par le modèle. La carte de profondeur de la nappe a été comparée avec la carte de sensibilité aux remontées de nappe. (cf. Figure 46).

Les comparaisons réalisées montrent une bonne cohérence au droit du milieu sédimentaire mais également au droit de la partie « socle » du modèle. Les cercles verts de la Figure 46 mettent en évidence les secteurs similaires pour les deux cartes dans la partie socle, elle-même recouverte en grande partie par les EAIPce (cercles bleus) et les zones imperméables à l'affleurement de la BDLisa (polygones noirs).



6.2. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLEMENT HUMIDES

6.2.1. La carte des milieux potentiellement humides

Il n'existe pas à l'échelle nationale de carte des zones humides. Des cartographies existent à l'échelle locale voire régionale avec des terminologies différentes selon les régions (zones humides potentielles, enveloppe de référence zone humide SAGE, zones humides probables, zones à dominante humide, enveloppes potentielles des zones humides...); ces cartes sont visibles sur un site dédié : <http://sig.reseau-zones-humides.org/>. L'information de connexion entre ces zones humides et la nappe d'eau souterraine n'est pas renseignée car méconnue pour nombre d'entre eux. Il n'a donc pas été possible d'exploiter des informations sur les zones humides pour la cartographie de remontée de nappe à l'échelle nationale.

Toutefois, une carte des milieux potentiellement humides a été produite par l'INRA (US InfoSol, Orléans) et AGROCAMPUS OUEST (UMR INRA AGROCAMPUS OUEST SAS, Rennes) à l'échelle nationale à la demande de la Direction de l'Environnement et de la Biodiversité du Ministère de l'Environnement. Un "milieu humide" est défini par le Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE) comme étant une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence d'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre.

La carte des milieux potentiellement humides modélise les enveloppes qui, selon les critères géomorphologiques et climatiques, sont susceptibles de contenir des zones humides au sens de l'arrêté du 24 juin 2008 modifié. La méthode ne tient compte ni des aménagements réalisés (drainage, assèchement, comblement), ni de l'occupation du sol (culture, urbanisation, ...), ni des processus pédologiques et hydrologiques locaux qui limiteraient le caractère effectivement humide de ces zones. Elle est illustrée sur la Figure 47.

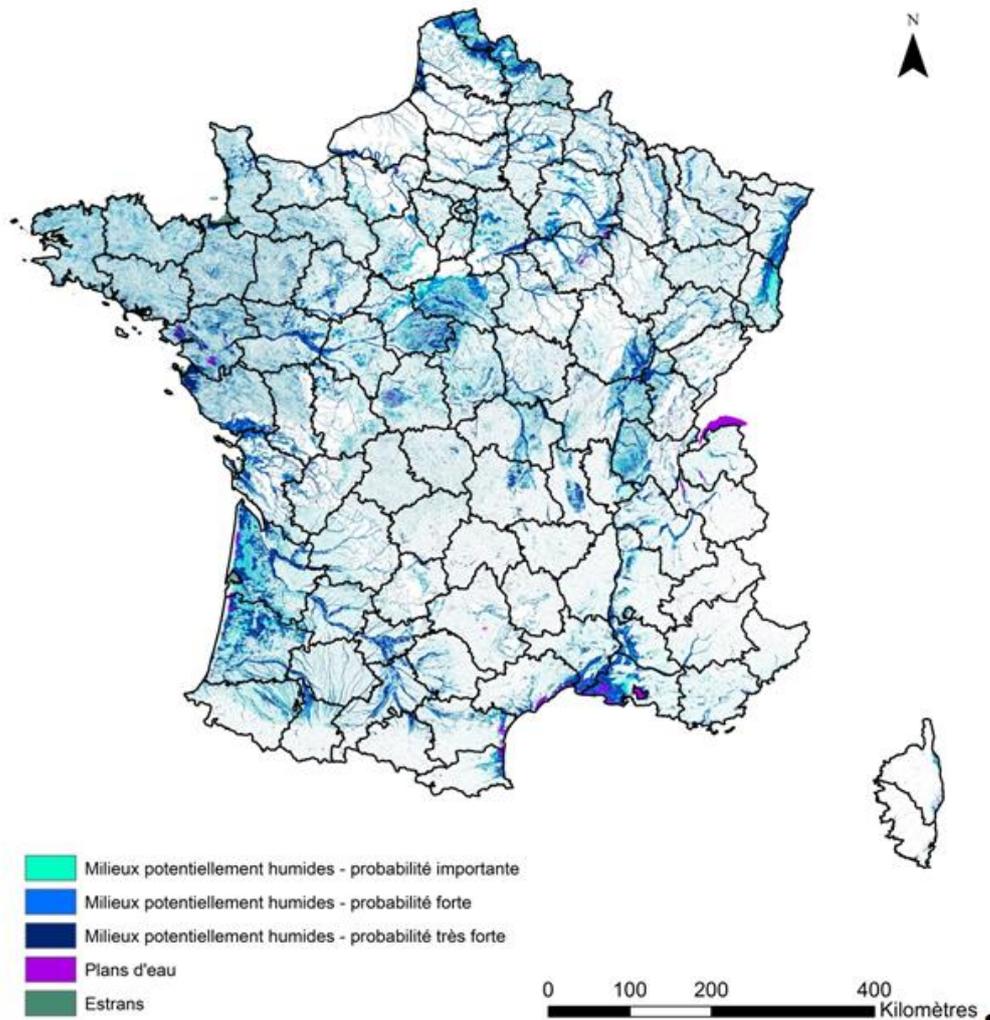


Figure 47 : Délimitation des zones potentiellement humides (MEEM/DEB)

6.2.2. Comparaison sur certains secteurs

La comparaison de cette carte avec la carte de remontée de nappe produite permet de distinguer rapidement 4 zones de divergence. Les Figure 48 à Figure 50 fournissent un agrandissement des 2 cartes de ces zones permettant d'illustrer quelques cas possibles de différences et vérifier s'il existe une, voire des, explications plausibles à celles-ci.

La symbologie des deux cartes a été mise en cohérence afin de faciliter la comparaison :

- en rouge : zones avec une probabilité très forte de contenir des zones potentiellement humides (ZPH) et les zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe ;
- en orange foncé et clair : zones avec une probabilité forte, respectivement importante, de contenir des zones potentiellement humides (ZPH) et zones potentiellement sujettes aux inondations de cave ;
- en blanc : milieu non humide (MNH) et pas de débordement ni d'inondation de cave.

Dans la méthodologie de cartographie des enveloppes des milieux potentiellement humides, deux indices ont été combinés :

- l'indice topo-climatique, qui est un dérivé de l'indice topographique de Beven et Kirkby (1979) et qui intègre le modèle numérique de terrain ;
- l'indice de la dénivelée au cours d'eau

En Beauce, c'est le second indice qui fait apparaître des zones humides potentielles, cette interprétation est contredite par la profondeur mesurée de la nappe qui se situe à une profondeur minimale de 10m (Figure 48).

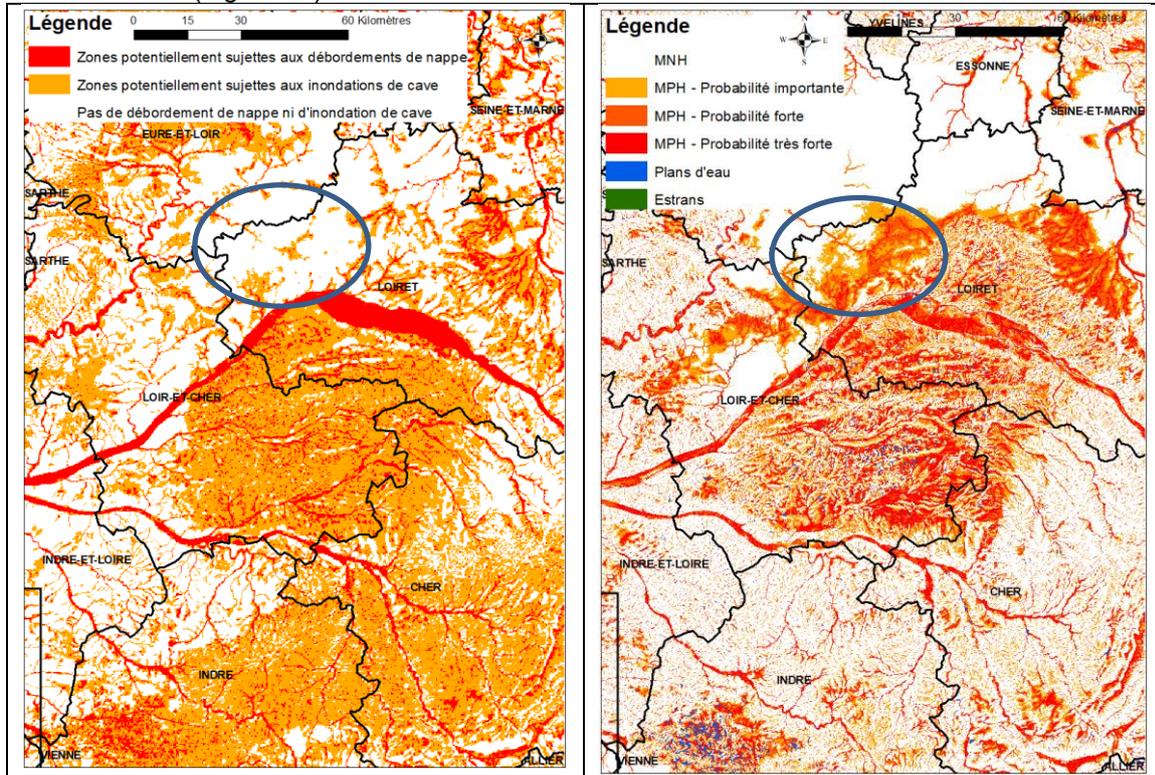


Figure 48 : Comparaison de la carte des zones humides (droite) et de la carte des remontées de nappes (gauche) en Sologne et en Beauce.

L'absence de remontée de nappe au droit de la zone entourée sur la Figure 49 provient de l'absence de point de mesure piézométrique rendant ainsi l'interpolation des niveaux impossibles.

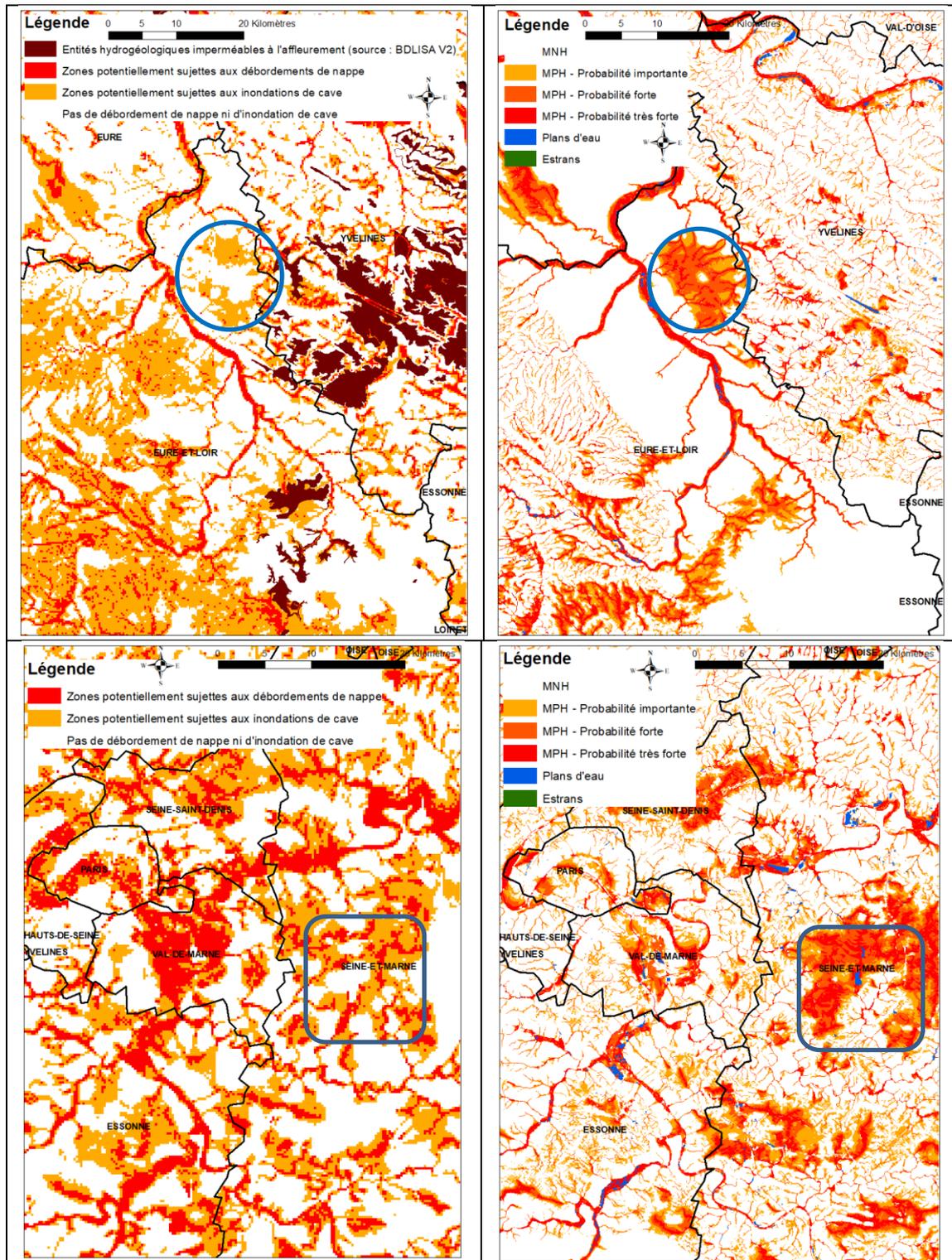


Figure 49 : Comparaison de la carte des zones humides (droite) et de la carte des remontées de nappes (gauche) à proximité de l'Île de France.

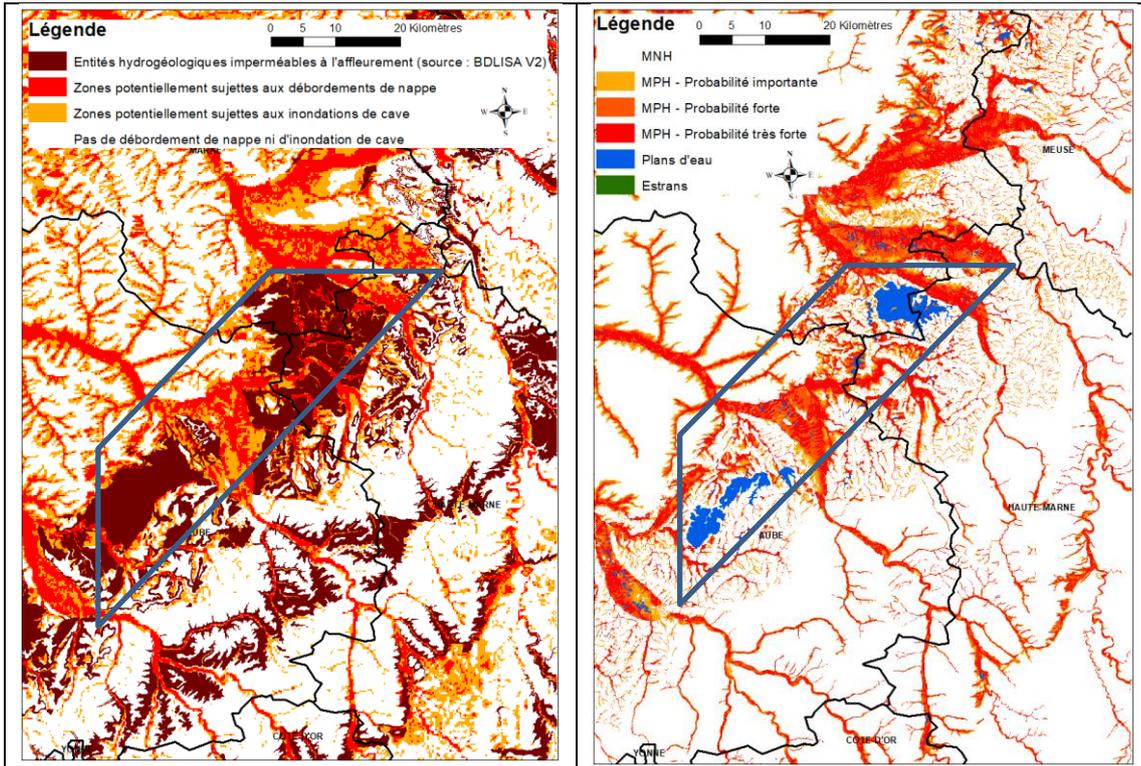


Figure 50 : Comparaison de la carte des zones humides (bas) et de la carte des remontées de nappes (haut) en Champagne.

Le tracé des lacs (zone potentiellement humide) n'apparaît pas en « zone remontée de nappe » sur la Figure 50 car ceux-ci ont été réalisés sur des terrains classés (très peu perméables) dans BDLISA.

6.3. COMPARAISON AVEC LES SITES « DECLARATIONS CATASTROPHES NATURELLES »

Les sites ayant subi des inondations par remontée de nappe depuis 2012 ont été utilisés comme points de forçage pour réaliser l'interpolation des niveaux piézométriques, source de la carte de remontée de nappe. Cependant, deux autres sources d'information ont été utilisées comme éléments de validation concernant les sites « déclarations catastrophe naturelles » :

- 1) la couche SIG de la CCR (Caisse Centrale de Réassurance) qui répertorie les communes (865 au total) ayant connu une déclaration Catnat par type d'inondation (débordement de cours, remontée de nappe ou submersion marine) ;
- 2) la couche SIG du BRGM listant les communes ayant été déclarées en catastrophe naturelle inondation par remontée de nappe jusqu'en 2011 (780 au total).

Ainsi sur la Figure 51 il a été reporté en gris les communes ayant fait l'objet d'une, au moins, demande de déclaration « CAT-NAT remontée de nappe » à partir de la couche de la CCR et en violet celles à partir de la couche BRGM jusqu'en 2011⁷.

⁷ Il convient toutefois de rappeler que les coordonnées de ces points ne correspondaient pas au site inondé mais seulement aux coordonnées du centroïde de la commune.

La vérification consiste à s'assurer que les communes, de ces deux sources d'information, soient toutes traversées, coupées par un trait ou contiennent, au moins, un point de remontée de nappe ou de débordement (EAIPce). Cette validation, qui reste toutefois assez approximative, est totalement satisfaite.

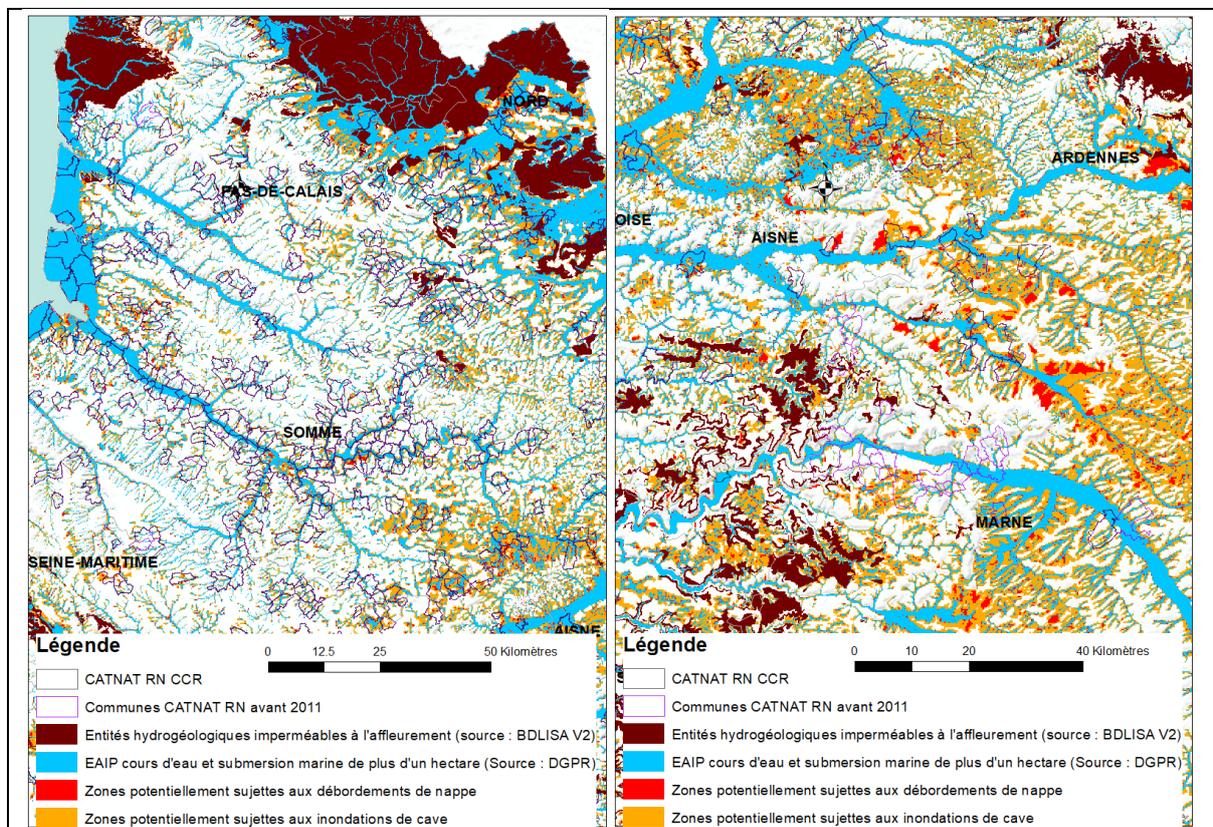


Figure 51: Exemple de recouplement des communes CATNAT par remontée de nappe (couches SIG de la CCR et du BRGM dossiers antérieurs à 2012) avec les zones inondables calculées.

6.4. COMPARAISON AVEC LA CARTOGRAPHIE ZNS LITTORAL MNT5M

La DREAL Basse-Normandie a mené une étude sur la variation de la zone non saturée (Z NS) dans l'espace rétro-littoral de la côte ouest de la Manche, entre le Cap de Flamanville et Granville (granite, schistes et grès briovériens et paléozoïques, landes sur sables tertiaires, colluvions de pentes, alluvions...). Les nappes prises en considération sont les nappes phréatiques, presque essentiellement localisées dans les formations superficielles et altérites du socle. L'objectif de cette étude est de cerner les espaces qui seront inondables par les nappes phréatiques à moyen et long terme le long des côtes basses de la Manche, dans les espaces rétro-littoraux, en lien avec l'élévation de la mer. Les enjeux le long des côtes de la Manche et du Calvados se chiffrant en milliard d'euros, la piézométrie y est élaborée à partir d'un MNT lidar au pas de 1m.

La cartographie ZNS Littoral a été établie à partir :

- de données recueillies sur le terrain ou par survol aérien pendant les inondations du printemps 2001 ;
- d'une enquête menée auprès de 600 communes du Calvados et de l'Orne (200 communes ont répondu), enquête qui a permis de recueillir un grand nombre

d'informations sur les niveaux atteints par les nappes en avril 2001, notamment dans les puits ;

- de tous les témoins (mares, sources, zones humides, traces du débordement temporaire des nappes) visibles sur les orthophotoplans de l'Orne, de la Manche et du Calvados ou mentionnés sur les cartes au 1/25 000 de l'IGN. Les orthophotoplans, qui sont des photographies aériennes orthorectifiées de grande précision, sont exploités à l'échelle du 1/1 000 pour une restitution des informations au 1/25 000.

Des données complémentaires ont été recueillies dans un grand nombre d'études, récentes ou anciennes, réalisées par des organismes privés ou publics parmi lesquels les Conseils généraux du Calvados et de l'Orne, la DDE14, le BRGM et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

La cartographie DREAL est une cartographie diffusée à l'échelle du 1/25 000 bien qu'il existe des cartographies plus précises, à l'échelle du 1/10 000 sur certains territoires côtiers.

Une comparaison entre la carte au 1/25 000 et la carte de sensibilité aux remontées de nappe a été faite pour vérification (Figure 52 et Figure 53). La symbologie des deux cartes ont été mise en cohérence pour faciliter l'exercice :

- en rouge : $ZNS < 0$ ou zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe
- en orange : $0 < ZNS < 5$ m ou zones potentiellement sujettes aux inondations de cave
- en blanc : $ZNS > 5$ m ou pas de débordement ni d'inondation de cave.

Les deux cartographies sont relativement convergentes sous condition de les visualiser à petite échelle (Figure 52), mais dès qu'elle se réduit à une échelle opérationnelle (en dessous du 25 000ème), des divergences apparaissent, parfois conséquentes (Figure 53).

La carte de sensibilité aux remontées de nappe décrit assez bien les risques le long des grands cours d'eau (aquifères alluviaux) et le fluvio-marin (pas toujours cependant) mais représente de manière moins performante des zones de débordement de nappe situées en plateau (plateaux où la nappe est perchée et située dans des altérites ou dans les limons recouvrant ces dernières), dans les versants recouverts d'altérites et de colluvions de pente et surtout le long des petits cours d'eau.

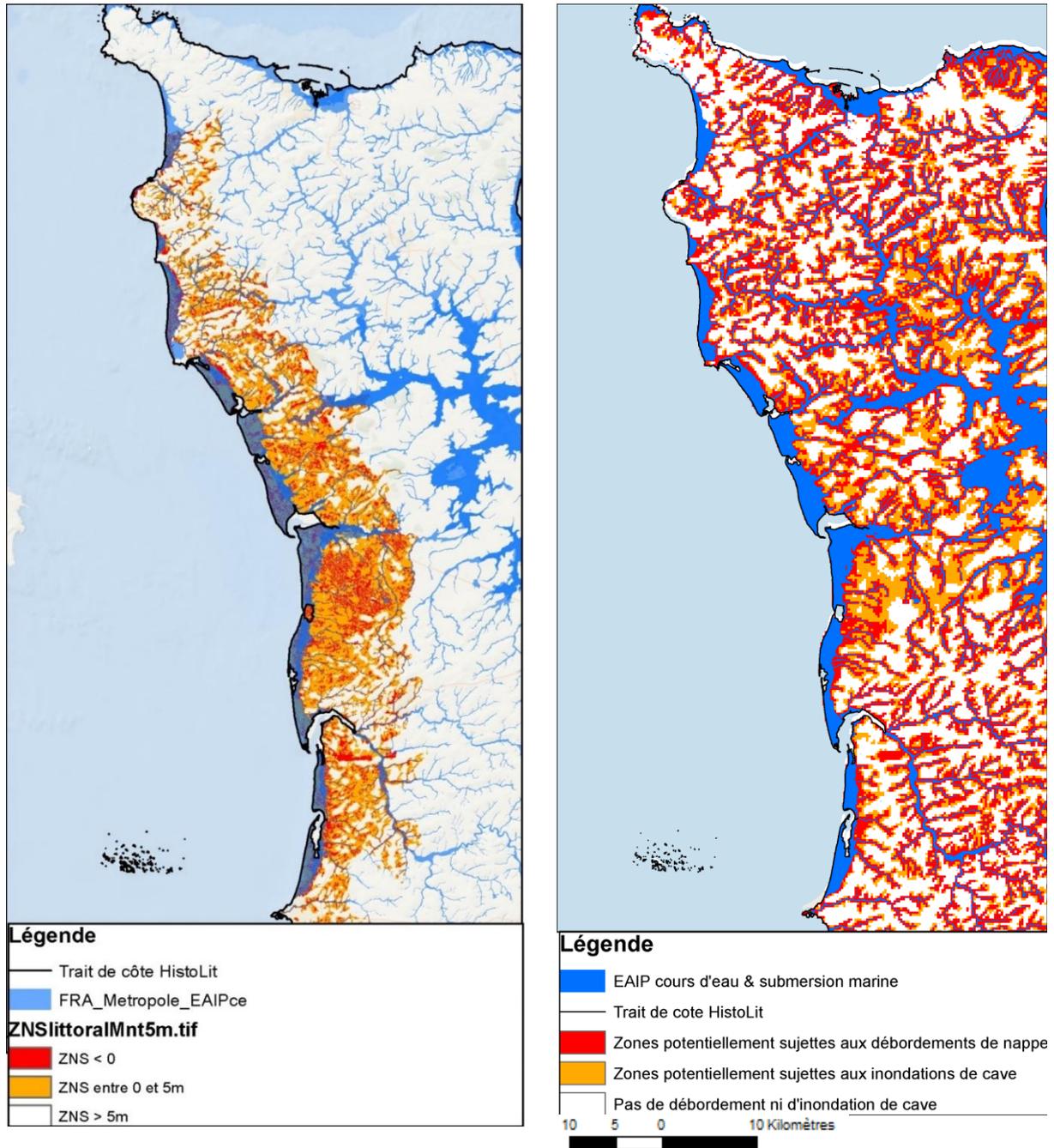


Figure 52 Comparaison de la carte de sensibilité aux remontées de nappe (à droite) avec la carte ZNSlittoral MNT 5 m de la DREAL Normandie (à gauche)

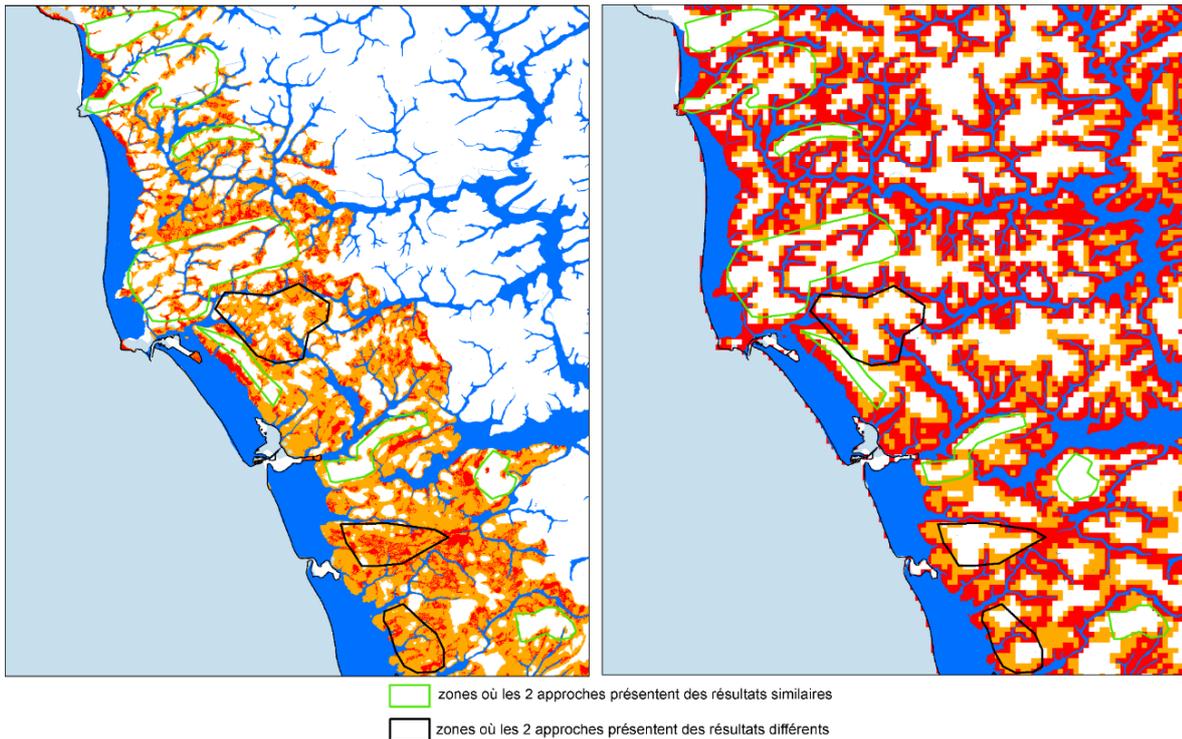
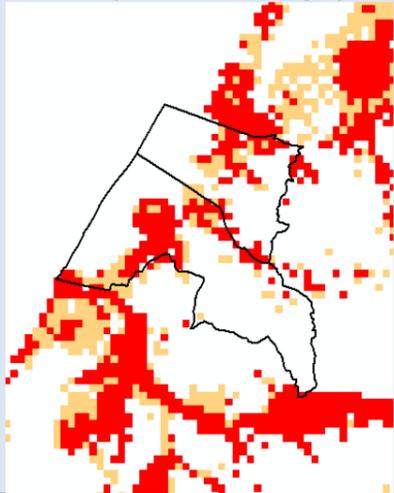
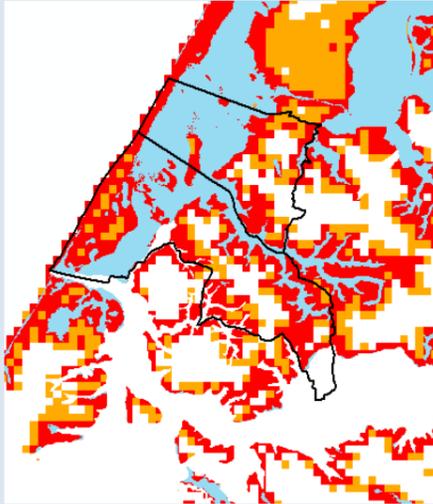
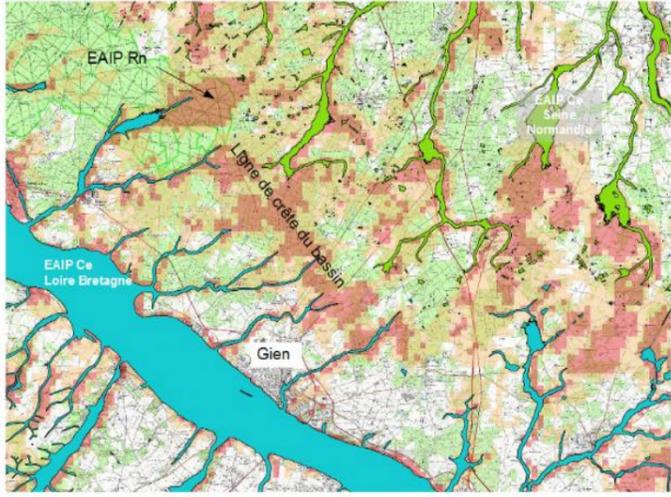
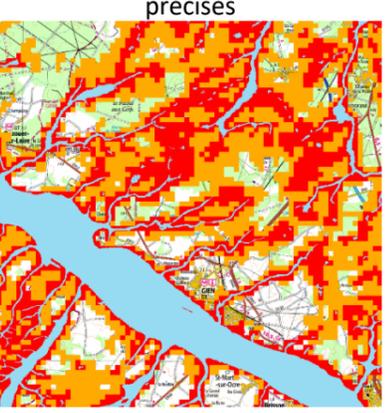


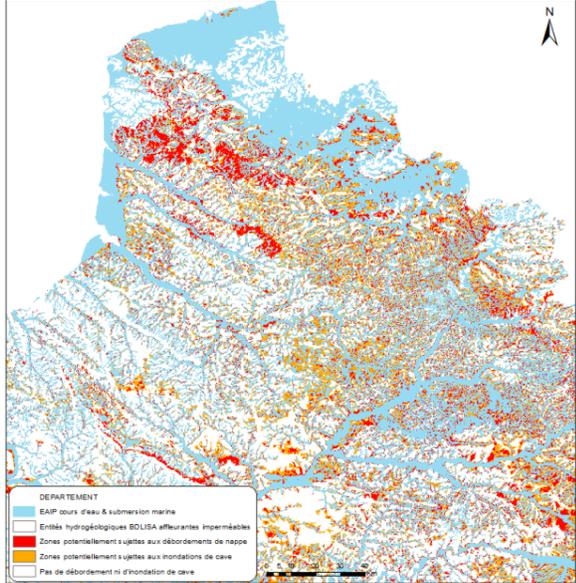
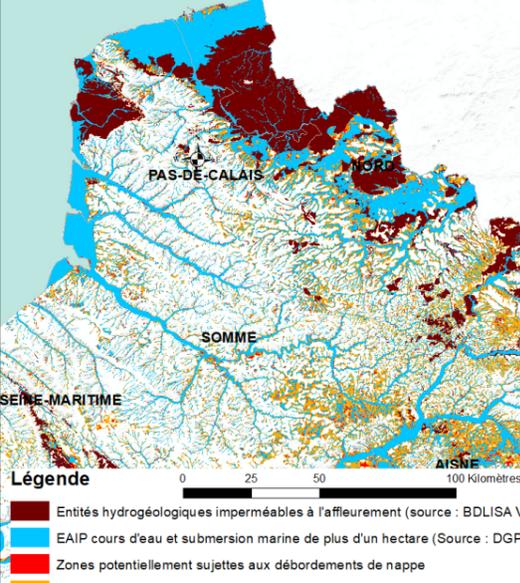
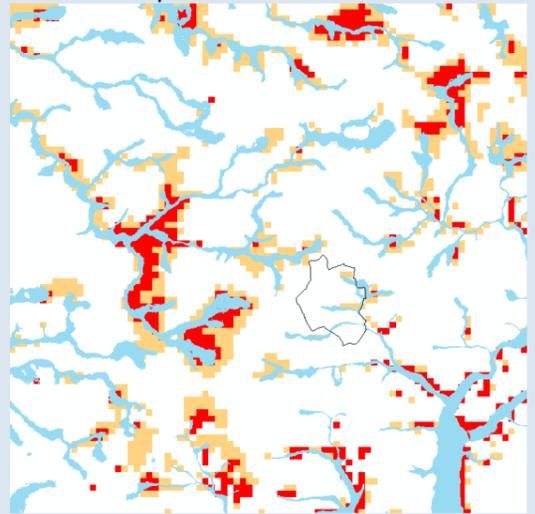
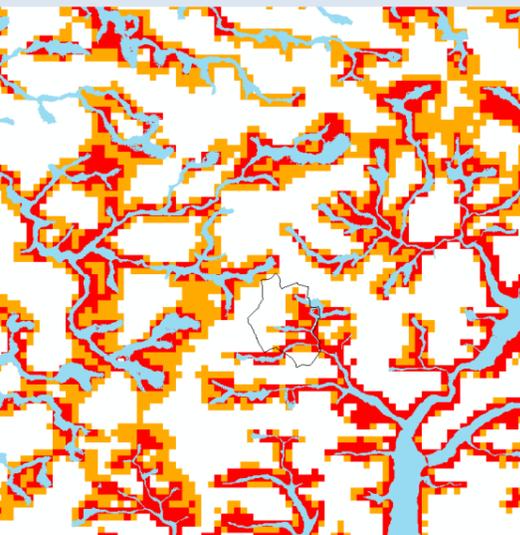
Figure 53 Comparaison avec la cartographie ZNSLittoralMNT5m

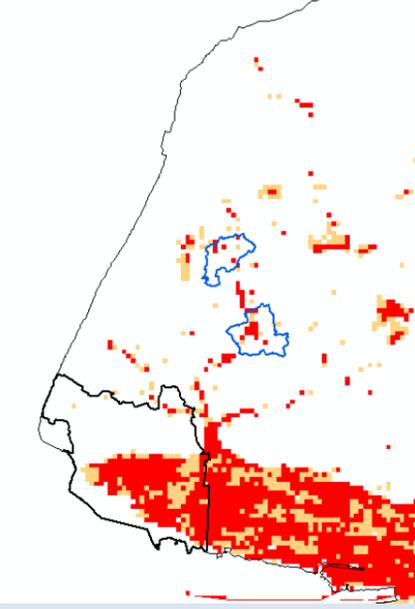
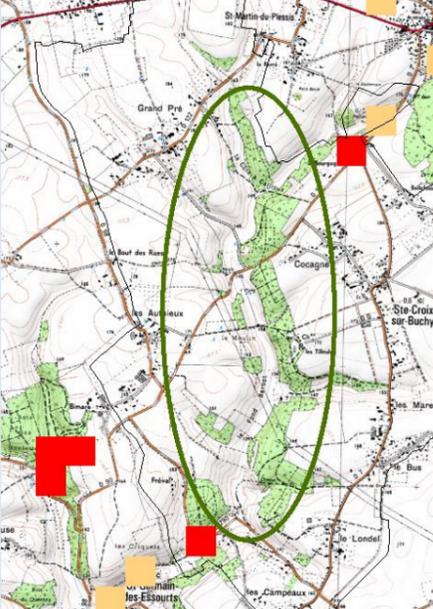
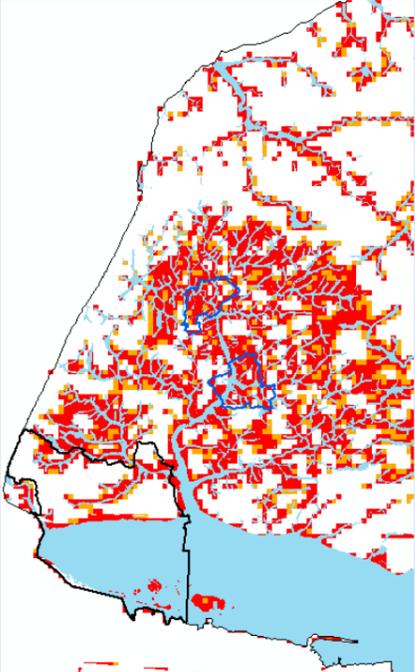
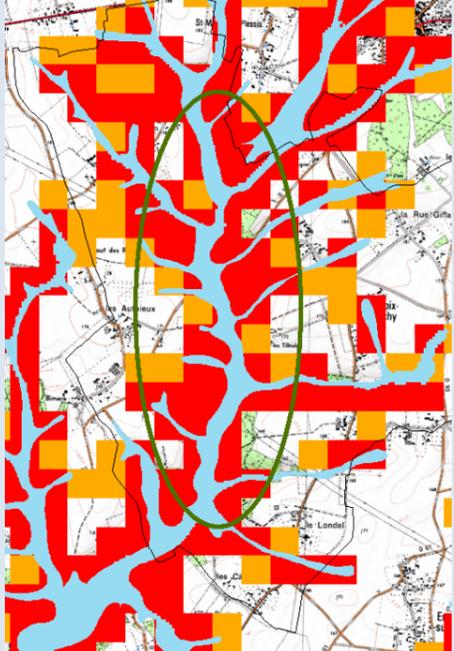
6.5. RETOURS DES REGIONS

Les retours des régions (BRGM et services déconcentrés de l'Etat) ont été synthétisés dans le Tableau 7 suivant. Il décrit les avis des différentes régions sur la première cartographie réalisée, les améliorations obtenues par rapport à la carte de 2011 et enfin les corrections apportées à la carte afin de corriger les anomalies relevées.

Région	Améliorations possibles	Améliorations réalisées	Nouvelles modifications apportées	Remarques
Aquitaine	<p>Il existe, sur les communes de Tarnos et Ondres, le long du littoral, des zones de remontée de nappes très problématiques et non cartographiées.</p> 		<p>ajout trait de côte Shom</p> 	
Bourgogne Franche-Comté	Présence de pixels rouges isolés au niveau des reliefs			liée probablement aux incertitudes sur le MNT
Bretagne	Une mosaïque de pixels de couleurs différentes	Les secteurs connus comme étant sensibles (baie du Mont St Michel, marais maritimes) sont bien identifiés.	modification de la méthode d'interpolation dans les zones de socle	
Bretagne	<p>Problème dans zones de marais, présence de pixels rouges isolés sur des falaises</p> <p>Beaucoup moins de zones sensibles aux remontées de nappe que sur l'ancienne cartographie des remontées de nappes</p>		ajout trait de côte Shom et meilleur délimitation des EAIP ce	
Centre	<p>Quelques secteurs où la carte proposée ne semble pas adaptée</p> <p>Le fait de travailler sur des mailles rend plus difficile la carte, notamment pour les cours d'eau et les vallons</p>	Les résultats sont corrects sur une bonne partie du territoire.		
Centre	<p>Problème au niveau de l'intégration du relief : des points hauts et lignes de crête</p> <p>Tenir compte également du relief en Sologne.</p>			Problème persistant lié aux manques de données, aux incertitudes (nivellement des points...) et au traitement à l'échelle national. Amélioration possible à l'échelle locale avec des techniques d'interpolation plus

				
Centre	<p>Problème d'identification de risque de remontée de nappe dans le secteur de la nappe de la Beauce puisque la Conie et l'Aigre sont deux cours d'eau de résurgence de nappe</p> <p>Sur le secteur entre Dreux et Chartres, le long de la RN154 vers Marville Moutiers Brulé, absence de remontée de nappe</p>			
Hauts de France	<p>Les résultats sont parfois étonnant sur les hauts de falaises littorales.</p> <p>Les zones de marais apparaissent parfois en rouge, et parfois non.</p>		<p>ajout trait de côte Shom</p> <p>meilleur délimitation des EAIP ce</p>	
Hauts de France	<p>il y a encore de nombreux artéfacts sur les plateaux.</p> <p>Les risques sur les têtes de vallées sont bien souvent surestimés.</p>	<p>La carte est bien meilleure que la précédente</p>	<p>prise en compte du masque sur des unités imperméable de la BDLisa</p>	
Hauts de France	<p>Il faudrait presque ne garder que ce qui est aquifère de la craie et enlever pratiquement tout ce qui est argile.</p>		<p>Retrait des résultats du modèle et intégration des données de campagne piézométrique HE 2001</p>	

				
<p>Ile De France</p>	<p>Le résultat paraît encore maximaliste par rapport aux observations qui ont pu être faites, notamment lors des très hautes eaux de 2002. Il est proposé :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'exclure les zones de remontées de nappe dans les caves - de retirer les zones EAIP cours d'eau - d'exclure les zones de plateaux où le risque est inexistant => en pratique, les secteurs « remontée de nappes » où la carte géologique harmonisée fait apparaître des limons (BD Charm) des plateaux ont été retirés. 			<p>affichage des masques EAIPce et des secteurs imperméables pour la lecture de la carte de sensibilité aux remontées de nappe</p>
<p>Limousin</p>	<p>Aléa remontée de nappe très faible, en revanche l'aléa inondation de caves est très prégnant => ZNS de 1 à 2m seulement Ces zones ne ressortent pas sur la carte</p>			<p>il n'est pas possible d'avoir une précision fine de l'ordre du mètre pour la carte à l'échelle nationale</p>

<p>Normandie</p>	<p>Manque certaines communes déclarées en Catnat en 2001. Sur les hauteurs du Havre en plateau, il y a régulièrement des inondations de cave. La carte ne couvre pas le littoral Villes côtières situées en fond de vallée + les mailles en fond de vallée de Seine ne ressortent pas sur la carte. Les zones d'inondation de vallée s'arrêtent à une certaine distance de la côte.</p>  		<p>Ajout trait de côte Shom et meilleure délimitation des EAIP ce</p>  	
-------------------------	--	--	--	--

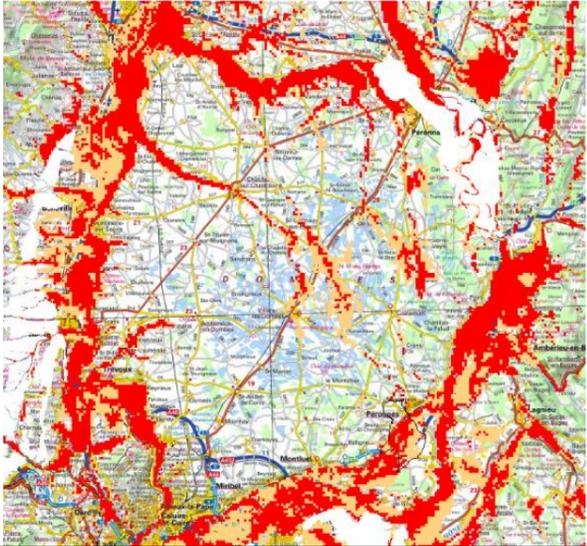
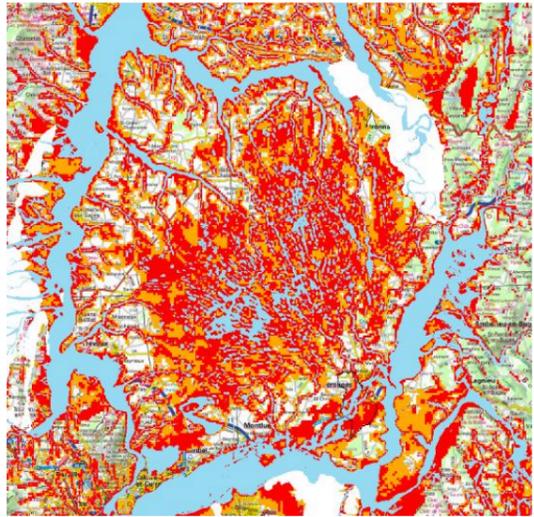
Poitou Charente	Le long des cours d'eau, on retrouve des zones largement surestimées par rapport notamment à la topographie/lit des cours d'eau			affichage des masques EAIPce
Poitou Charente	Problème de prise en compte du relief sur les plateaux Pas de nappe sur la formation du Santonien			liée probablement aux incertitudes sur le MNT et à l'échelle de traitement des données
Rhône Alpes	Problème au niveau des zones à mi pente qui ne devraient pas être concernées par une remontée de nappe + rupture brutale dans la plaine	Beaucoup mieux au niveau des versants		liée probablement à l'agrégation des données à la maille 250m pour les besoins de l'interpolation
Rhône Alpes	Amélioration à faire sur la Dombes il y a de nombreuses mailles isolées au milieu des montagnes 		Dombes mieux représenté par la meilleure délimitation des EAIP ce 	
Lorraine	Problème au niveau des anciens sites miniers Possibilité de mettre une zone grisée => à voir avec la DGPR			affichage d'un masque spécifique

Tableau 7 Tableau synthétisant les retours des régions sur la cartographie de sensibilité aux remontées de nappe

Certaines erreurs ne peuvent être corrigées car elles découlent d'erreurs au niveau de la donnée source même et du faible nombre de données dans certaines zones permettant de les compenser. Sur la Figure 54, on voit que la surface piézométrique (en bleu) peut dépasser la topographie en raison de points hauts EAIP et de l'absence de donnée piézométrique (piézomètre, carte piézométrique, etc...) entre deux données EAIP.

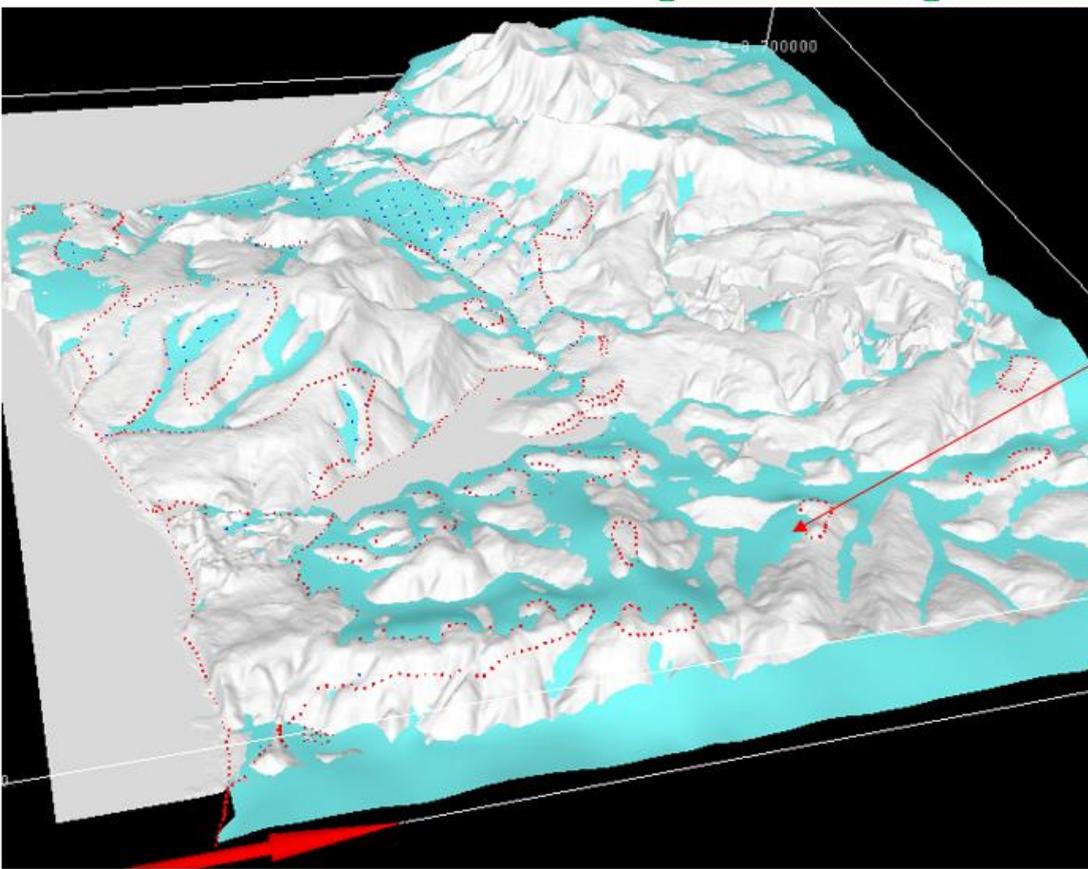


Figure 54 Zones de remontée de nappe au niveau des points hauts topographiques dues à des incohérence au niveau de la couche EAIP (ce ou sm) et du manque de donnée piézométrique autour

7. Conclusions et recommandations

Malgré, depuis 2011, une augmentation du nombre de points cotés et renseignés, une amélioration de la qualité des données et de la connaissance hydrogéologique des aquifères, la réalisation de la carte des zones potentiellement inondables par remontée de nappe reste un exercice délicat qui « in fine » comporte de fortes incertitudes.

Ces incertitudes, voire erreurs, sont notamment dû à :

- une accumulation d'informations manquantes, incomplètes ou imprécises,
- l'ordre de grandeur des valeurs recherchées, voisines du mètre voire moins, comparativement aux incertitudes des données d'entrée, exemple du Modèle Numérique de Terrain où l'incertitude est évalué en plaine à +/- 2 mètres...
- la complexité des milieux (hétérogène, non isotrope...) mis en jeu.

La carte proposée pour la métropole et la Corse, permet toutefois de localiser les zones où il y a de fortes probabilités d'observer des débordements par remontée de nappe. La qualité de l'information n'étant toutefois pas homogène et variant suivant la géologie, le relief et le nombre de points disponibles lors de l'interpolation. Les « zones de Socle » possédant moins de points de suivis et plus de relief sont ainsi plus délicates à définir.

Suite aux différentes remarques précédentes et à la taille des mailles utilisées lors de l'interpolation, le rendu cartographique a été réalisé en considérant comme unité de base une maille carré de 250 mètres, il ne devra pas être exploité, au stade actuel, avec une échelle inférieure au 1/100 000^{ème}.

Une estimation de la fiabilité des résultats a été réalisée en s'appuyant sur différents critères : fiabilité du Modèle Numérique de Terrain et fiabilité des données eaux souterraines ; elle même basée sur la fiabilité de la données source utilisée et la distance à la donnée source la plus proche. Il s'en est suivi la qualification de la fiabilité globale de la cartographie suivante : « forte », « moyenne », « faible » ou « inconnue » ; indexée à chaque point de la grille au pas 250 m.

Concernant les DOM, l'absence de données en Guyane et le très faible nombre de données disponibles aux Antilles ou à la Réunion, données qui sont de plus limitées aux zones côtières et peu élevées, ne permettent pas de compléter efficacement les *Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles par débordement de Cours d'Eau (EAIPce)* déjà définies. Seules les bandes côtières pourront donc, a priori, faire l'objet d'un ajout.

Ces éléments plaident pour une approche locale des phénomènes et de leur caractérisation. Cette cartographie nationale doit donc être considérée comme un outil d'identification maximisante de grandes zones potentiellement soumises à la remontée de nappe, à étudier localement. De même, elle ne peut être utilisée comme base pour la construction d'une *Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles (EAIP)*, au même titre que les phénomènes débordement des cours d'eau et submersion marine, ni comme source de données à une échelle locale.

Des améliorations peuvent d'ores et déjà être envisagées à une échelle locale, par adaptation des méthodes d'interpolation par exemple ; en ciblant les régions où la fiabilité globale des résultats est jugée « forte » voire « moyenne ». L'exploitation et le traitement des données et cartographies sur les zones humides, existantes à l'échelle régionale, seraient également pertinents.

L'utilisateur doit garder en mémoire la liste des recommandations suivantes pour toute utilisation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe :

1. L'exploitation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe n'est possible qu'à une échelle inférieure à 1/100 000. Autrement dit, pour des études locales, ayant besoin d'une résolution fine (échelle parcellaire ou au 1/25 000, au 1/50 000), cette carte nationale ne doit pas être utilisée.
2. Ajout du masque sur les secteurs avec terrains affleurants imperméables (fourni avec la carte, source BRGM)

Dans ces secteurs, la présence d'une couche imperméable empêche le débordement en surface de nappes captives pouvant présenter des niveaux piézométriques maximaux supérieurs au terrain naturel. Cependant, il n'est pas complètement exclu que des problématiques liées aux remontées de nappe aient lieu dans ces secteurs : non continuité des couches imperméables BD LISA, aménagements souterrains sous la couche imperméable, débordement plus important au niveau des limites perméables/imperméables, ...

3. Ajout des masques EAIPce et EAIPsm (fourni avec la carte, source DGPR)

Les contours et points intérieurs des EAIPce et sm ont été utilisés comme « points de forçage » pour l'interpolation du niveau maximal piézométrique probable → ces zones correspondent donc à des secteurs dans lesquels il peut y avoir concomitance de 2 phénomènes cumulatifs : débordement de cours d'eau + remontée de nappe ou submersion marine + remontée de nappe.

4. Ajout d'un masque sur les zones karstiques

Les aquifères karstiques présentent une forte hétérogénéité des écoulements et l'approche globale mise en œuvre ici ne peut pas avoir de réalité physique dans ces contextes spécifiques.

5. Ajout d'un masque sur les zones urbaines

Dans les zones urbaines, les écoulements souterrains sont perturbés par les différents aménagements souterrains. Ces perturbations piézométriques ne sont pas prises en compte dans l'approche globale mise en œuvre.

6. Ajout d'un masque sur les zones après-mine (masque dans le secteur du bassin houiller lorrain fourni avec la carte, source DREAL Grand Est)

Comme pour les zones urbaines, les modifications des écoulements souterrains dans les zones d'après-mine (pompage des eaux d'exhaure / arrêt des pompages) ne sont pas prises en compte dans cette approche globale.

8. Références bibliographiques

ALLIER D., TORMO F., BRUGERON a. (2011). *Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes.* Rapport BRGM/RP-59890-FR.

AMRAOUI N., GOLAZ C., MARDHEL V., NEGREL Ph., PETIT V., PINAULT J.L., POINTET T. (2002) – *Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme.* BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig., 11 tabl., 5 ann.

AMRAOUI N., WUILLEUMIER A., THIERY D., CAOUS J.Y., NOYER M.L., avec la collaboration de **GAUDEFROY M.J., (2004)** – *Mise à jour du modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport final des travaux de la phase 2.* BRGM/RP-53211-FR, 151 p., 19 fig., 4 tabl., 7 ann.

BARAN N., LOPEZ B., BOURGINE B., BRUGERON A. et GOURCY L. (2011) - *Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances.* Rapport final BRGM/RP-60402-FR ; 281p.

BERGERON C., DEHAYS H., POINTET T. (1983) – *Remontées des nappes d'eau souterraine, cause et effets.* Rapport BRGM 83 SGN 353 EAU

CGDD/SOeS, MNHN – ONZH (2009) - *Les milieux à composante humide - Version 2.* UE-SOeS, CORINE Land Cover, 2006 - MNHN, Sites d'Intérêt Communautaire, 10/2008 - MNHN, ZNIEFF 1 & ZNIEFF 2, 1999 - IGN : BD Carto®, 2000.

CROISET.N., WUILLEUMIER.A., BESSIERE.H., GRESSELIN.F., SEGUIN.J.J. (2013) - *Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : construction et calage du modèle hydrogéologique.* BRGM/RP-62648-FR

CETE (2012) – *Dossier 2012 119 - Directive inondation – cartographie- Mission n)6 « Remontée de nappe »*

DOUEZ O., BICHOT F., PETIT L. (2011) - *Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes.* BRGM/RP-59288-FR, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.

MACHARD DE GRAMONT H., MARDHEL V. (2006) - *Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine.* BRGM/RP-54414-FR.

MARDHEL V., NEGREL P., POINTET T. (2001) – *Première analyse des composantes des écoulements souterrains du bassin versant de la Somme en période de crue.* BRGM/RP-51030-FR

MOUGIN.B., THOMAS.E., WYNS.R., BLANCHIN.R., MATHIEU.F. (2004) - *Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse. Bassins versants : Le Yar (Côtes d'Armor), l'Horn (Finistère).* **BRGM/RP-52731-FR**

SEGUIN J.J. (2008) – *Connaissances hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise – Phase 4 – Modélisation hydrodynamique en régime transitoire au pas de temps journalier et simulation de l'impact sur la nappe de 3 scénarios de crue du Rhône et de la Saône.* BRGM/RP-56676-FR, 113 p., 45 fig., 14 tab., 4 ann.

SEGUIN J.J., WUILLEUMIER A. (2006) - *Exploitabilité des ressources en eaux souterraines en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre*. BRGM/RP-55188-FR

THIERY D. (1990) - *Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour un calcul Hydrodynamique des Ecoulements - version 4.3*. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

WUILLEUMIER A., ALLANIC C., BOUDET M., BOURGINE B., CROISSET N., MACHARD DE GRAMONT H., PANNET P., TOURLIERE B., DUGUE O (2013) - *Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique*. BRGM/RP-62002-FR

Annexe 1

Test de l'interpolation indirecte de la piézométrie

Méthode de R. Wyns (BRGM/RP-52731-FR)

Cette méthode a été développée pour évaluer le niveau moyen de la nappe en domaine de socle.

En l'absence de cartes piézométriques sur les zones de socle, l'altitude du toit de la nappe (ce qu'on appelle la piézométrie) a été modélisée en prenant comme référence le Modèle Numérique de Terrain (MNT) provenant de l'Institut Géographique National.

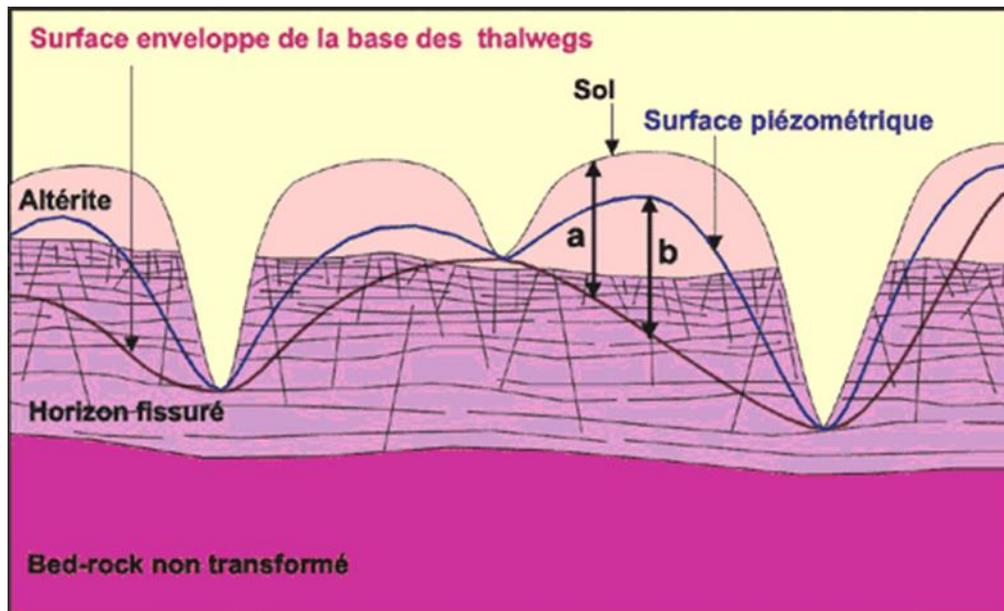


Figure 55 : Schéma d'évaluation du niveau moyen de la nappe de socle

Les niveaux d'eau ont été fournis par des mesures de la profondeur du niveau de nappe dans les forages, mais aussi par l'altitude du fond des thalwegs au droit des rivières permanentes. La méthode mise en œuvre pour estimer « la cote de la surface piézométrique en tous lieux d'un secteur de socle » a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns *et al.*, 2004).

En contexte de nappe libre, où la nappe fournit aux rivières les débits d'étiage, on peut considérer que les rivières permanentes représentent des segments d'affleurement de la surface piézométrique. Dans un secteur de socle donné, ces segments appartiennent donc tous à ce que l'on peut appeler la « surface enveloppe des rivières pérennes » (en trait noir sur la Figure 55). Les rivières représentent les points bas de la nappe, la surface piézométrique remonte sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. La surface piézométrique est donc toujours comprise entre la surface topographique (sol sur la Figure 55) et la « surface enveloppe des rivières pérennes ».

Une corrélation linéaire relie d'une part la différence entre l'altitude du sol et celle de la surface enveloppe des rivières (distance « a » sur la Figure 56) et d'autre part la différence entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface enveloppe des rivières (distance « b »).

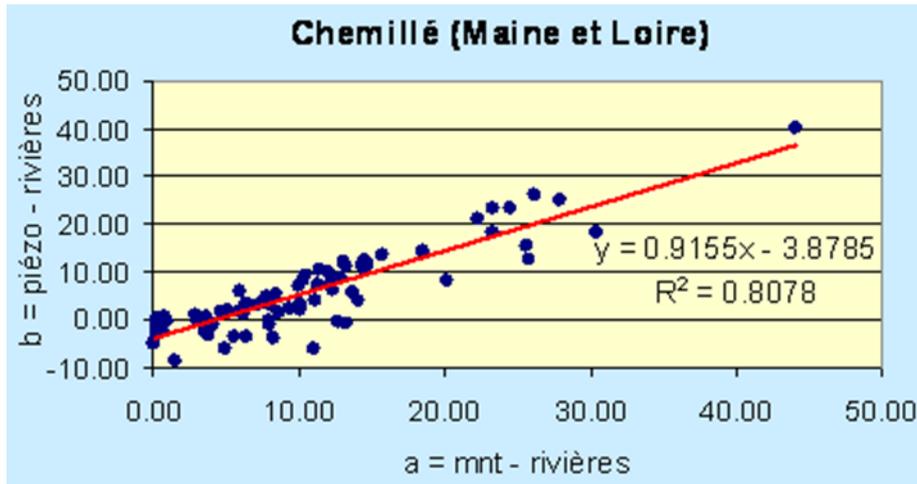


Figure 56 : Droites de corrélation altitude rivières-piézo, d'après Wyns et al. (2004)

L'équation de la droite de régression reliant les valeurs a et b permet en tout point de calculer l'altitude de la piézométrie, à partir d'une grille représentant le MNT et d'une grille représentant l'altitude de la surface enveloppe des rivières. On peut donc aussi calculer en tout point l'épaisseur de la Zone Non Saturée (ZNS), qui est la distance entre le sol et le niveau moyen de la nappe.

La pente de la droite de régression est inversement proportionnelle à la perméabilité en grand du massif. Ainsi dans le cadre de l'étude en domaine de socle, pour l'ensemble du Massif cadomien breton, sur chaque bassin versant la surface enveloppe des rivières pérennes a été obtenue de la manière suivante :

- à partir du réseau hydrographique pérenne issu de la BD Carthage, par échantillonnage d'un point tous les 50 mètres linéaires,
- par croisement du semis de points avec le MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne,
- par analyse variographique et krigeage de l'altitude de ce semis de points : on obtient une grille représentant l'altitude de la surface-enveloppe du réseau hydrographique pérenne.

Cette méthode permet d'obtenir un niveau moyen de la nappe en domaine de socle, mais en aucun cas une fluctuation de cette nappe.

Connaissant quelques piézomètres on peut établir une régression. Puis pour calculer la piézométrie en tout point d'une grille il suffit :

1. d'interpoler sur cette grille la surface de base du niveau des rivières à partir des points de rivière en connexion avec la nappe (pour lesquels cote piézométrique = cote topographique),
2. la cote topographique étant connue sur la grille, on peut en déduire le terme a = « Topo – Rivières » (correspondant à la variable X de la régression),
3. on en déduit la variable Y de la régression. (le b de la figure : « Piézo – Rivières ») et on en déduit finalement la cote piézométrique par « Piézo = b + cote rivière ».

Autre méthode testée pour l'étude

L'inconvénient de la méthode précédemment décrite est que la surface piézométrique déduite ne passe pas exactement par les mesures au droit des piézomètres puisque la régression ne passe pas exactement par tous les points.

Pour corriger cet inconvénient, une autre méthode d'interpolation a été testée, le « krigeage avec dérive externe ». Dans cette méthode, on utilise comme données :

- les points où on a mesuré la surface piézométrique,
- une grille appelée « dérive externe », connue en tout point, et qui donne la forme approximative de la surface piézométrique à un facteur près (pouvant varier d'un point à l'autre) : dans ce cas la grille utilisée est la surface de base du niveau des rivières.

Le krigeage avec dérive externe consiste à déformer cette surface « externe » pour la « plaquer » sur les données, tout en respectant la forme globale de la dérive externe et en passant exactement par les points de mesure.

Pour mettre en œuvre cette méthode dans le cas présent nous avons adopté la méthodologie suivante :

- tout d'abord la surface de base du niveau des rivières est construite en interpolant la cote piézométrique donnée par les points « AEIP » seuls,
- puis la bonne corrélation entre la piézométrie mesurée sur les piézomètres (BSS EAU et ADES) et cette variable est vérifiée,
- la différence « Piézo – Rivières » ainsi que son variogramme sont calculés en utilisant uniquement les données des piézomètres (BSS EAU et ADES) : ce variogramme doit être relativement stationnaire pour que la méthode soit applicable,
- enfin, la surface piézométrique est interpolée en prenant en compte conjointement la cote piézométrique des points et la grille de la surface de base des rivières, tout en s'appuyant sur le modèle de variogramme. Les paramètres de voisinage sont choisis de la même façon que pour l'interpolation directe en domaine sédimentaire.

Cette méthode offre l'avantage de respecter les données : la surface piézométrique passe par les points de donnée. Par contre cette méthode présente l'inconvénient d'être assez fragile numériquement lorsque le système d'équation mis en œuvre est mal conditionné (points de données répartis de façon très inhomogène – ce qui est le cas ici). Dans le cas présent la corrélation entre surface de base des rivières et cote piézométrique est très bonne (cf. Figure 57).

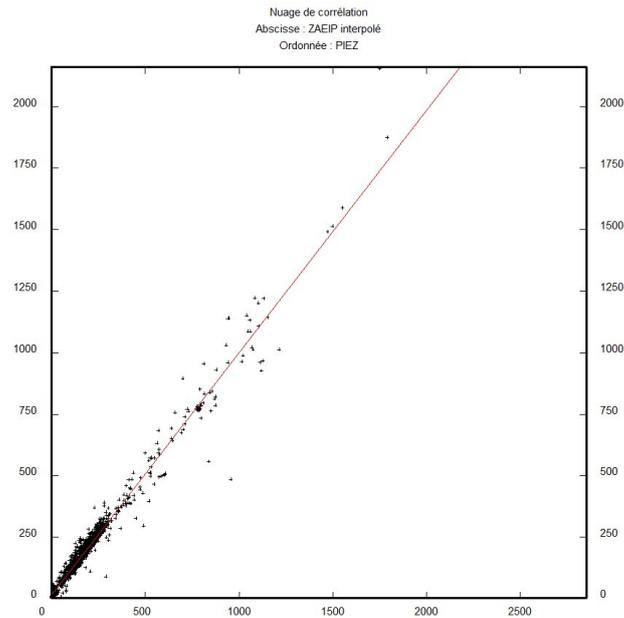


Figure 57 : Nuage de corrélation entre Z piézo (ordonnée) et surface de base des rivières (abscisse), calculé sur les piézomètres de socle, données métropole.

Toutefois le variogramme de la différence entre ces deux variables montre que la corrélation spatiale entre ces deux variables est assez faible dès 5 km de distance (le variogramme atteint déjà 75% de son palier à cette distance cf. Figure 58).

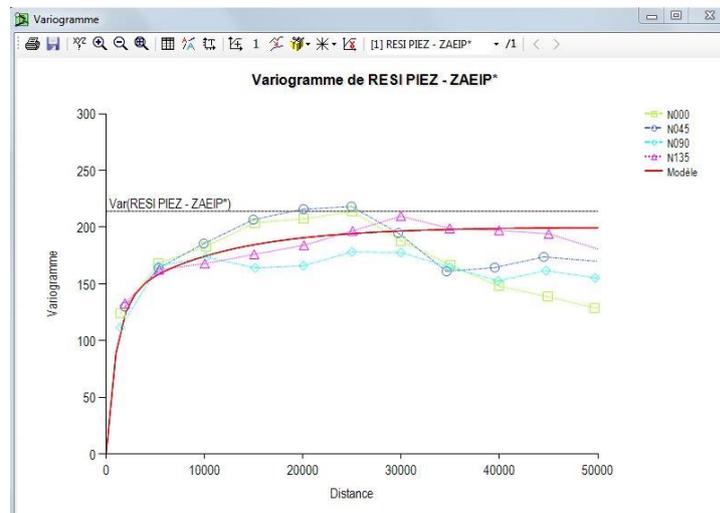


Figure 58 : Variogramme de la différence entre Z piézo et Z niveau de base des rivières en domaine de socle (métropole)

Ceci montre qu'il est difficile d'interpoler cette variable avec une précision « raisonnable » dès lors qu'il n'y a pas une donnée de piézomètre à moins de quelques kilomètres de distance.



**Centre scientifique et technique
Direction D3E**

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