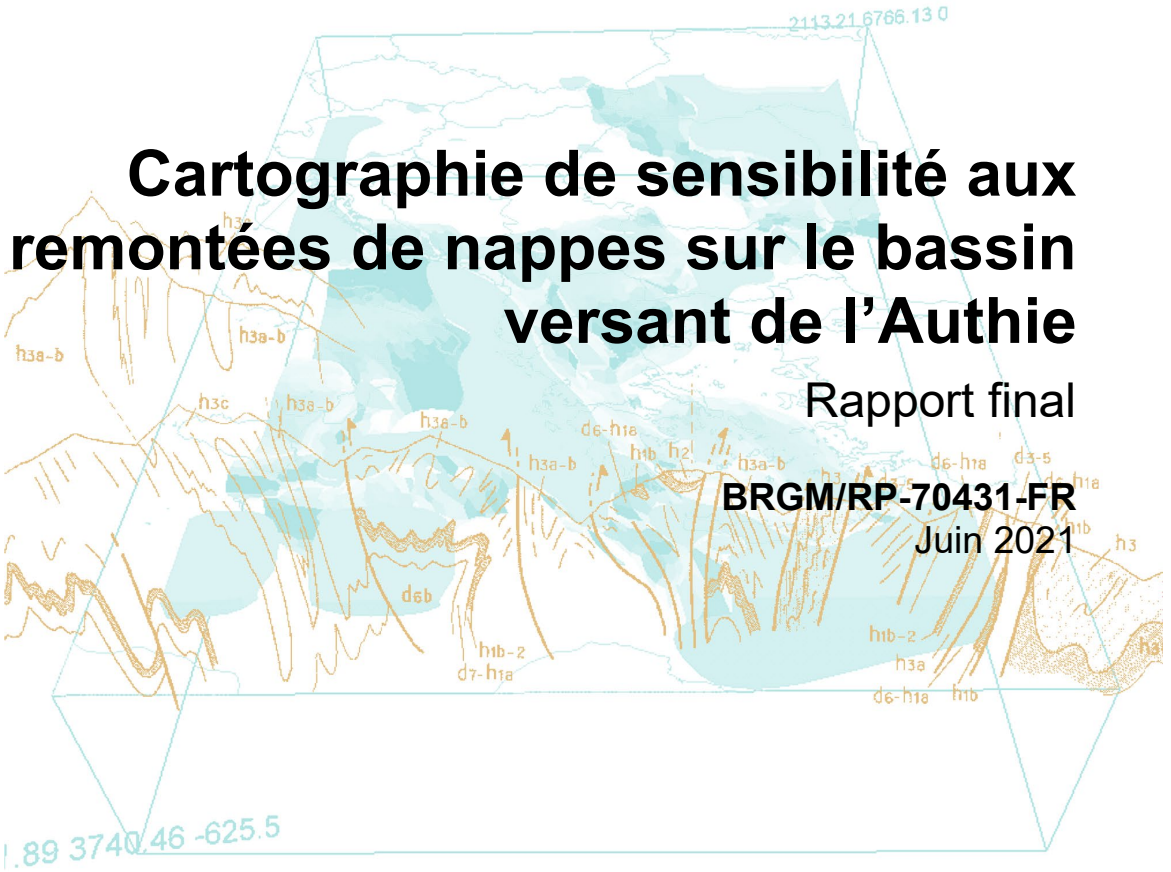
Document public



Cartographie de sensibilité aux remontées de nappes sur le bassin versant de l'Authie

Rapport final

BRGM/RP-70431-FR
Juin 2021

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFÈTE
DE LA SOMME

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Cartographie de sensibilité aux remontées de nappes sur le bassin versant de l'Authie

Rapport final

BRGM/RP-70431-FR
Juin 2021

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2019-2020

H. Bessière, A. Brugeron, R. Cochery, Y. Assy, V Bault

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : L. Gourcy	Nom : Patrick Charbonnier
Fonction : Responsable unité	Fonction : Directeur Adjoint Centre, Nord et Est
Date : 01/07/2021	Date : 14/07/2021
Signature :	Signature :

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

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Inondation, remontée de nappe, cartographie sensibilité, Bassin versant de l'Authie

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

H. Bessière, A. Brugeron, R. Cochery, Y. Assy, V. Bault. (2021) – Cartographie de sensibilité aux remontées de nappes sur le bassin versant de l'Authie. Rapport final. BRGM/RP-70431-FR, 122 p., 67 ill.,8 tabl., 2 ann.

© BRGM, **2021**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de l'étude d'opportunité pour la réalisation du Plan De Prévention des Risques Naturels de la vallée de l'Authie, la DDT de la Somme a demandé au BRGM d'étudier l'aléa inondation par remontées de nappes à l'échelle du bassin versant de l'Authie. Cette cartographie s'est appuyée sur la méthodologie de cartographie développée à l'échelle locale par le BRGM récemment (Bessière et al., 2020).

A l'échelle du bassin de l'Authie, peu de chroniques piézométriques de longue durée sont disponibles. Cependant, ont été utilisées les données pertinentes des campagnes piézométriques hautes eaux de la nappe de la craie de 2001 et 2002, pour lesquelles une période de retour de 100 ans a été attribuée et la carte piézométrique de 2016 des sables du Marquenterre. En outre, des données historiques de remontées de nappes, issues d'enquêtes menées auprès des collectivités ont été intégrées. Parallèlement, un travail de traitement des données relatives aux eaux de surface susceptibles d'être intégrées dans la cartographie car en communication avec les nappes superficielles du bassin, a été mené à la fois à partir de bases de données diverses mais également d'images satellites. Le traitement de ces données s'est avéré complexe dû au manque de disponibilité de certaines images liée à la couverture nuageuse importante sur le secteur et à l'humidité importante des sols qui fait ressortir ces zones comme potentiellement inondables.

Pour chaque donnée utilisée, une caractérisation de sa fiabilité a été faite à partir d'informations diverses associées à celle-ci. Les trois niveaux de fiabilité attribués (faible, moyen, fort) ont servi de base à l'analyse géostatistique à la fois pour la modélisation (krigeage ordinaire avec contraintes) de la surface piézométrique maximale mais aussi pour le calcul d'une grille de fiabilité.

L'échelle d'utilisation préconisée de la carte élaborée est le 1/50 000 voire 1/25 000 sur les secteurs présentant le moins d'incertitudes. Il a été proposé une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappes avec quatre classes de sensibilité dépendantes de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux :

- aléa fort = Zones très sensibles : niveau de la nappe au-dessus du sol,
- aléa moyen = Zones sensibles : niveau de la nappe entre 0 et 2,5 m de profondeur,
- aléa faible = Zones peu sensibles : niveau de la nappe entre 2,5 et 5 m de profondeur,
- Pas de débordement : niveau de la nappe à plus de 5 m de profondeur.

Le résultat est bon sur la majorité de la zone d'étude, et globalement satisfaisant ailleurs. Des problèmes subsistent toutefois et sont liés aux différences de comportement des types de données en entrée, et à l'absence de données hors cours d'eau dans certaines zones (notamment sur les plateaux dans la partie amont – sud-est – du bassin versant).

La grille de fiabilité calculée a été croisée avec la carte de l'écart-type de krigeage pour définir les zones pouvant bénéficier d'une amélioration en terme de qualité/présence de mesures du niveau de la nappe et/ou d'un affinement possible de la carte de sensibilité.

Les zones pour lesquelles le niveau de confiance est le plus élevé sont le Marquenterre et la basse vallée de l'Authie. Globalement, les secteurs des plateaux crayeux ont un niveau de confiance faible, essentiellement du fait d'une très faible densité de données disponibles.

La carte présentée dans ce rapport permet d'apporter une aide à la décision quant à l'identification des zones nécessitant une cartographie plus fine et plus locale. Cependant, elle ne saurait être utilisée de façon isolée sans y juxtaposer une carte des zones d'intérêt pour la collectivité avec éventuellement un plan d'urbanisme associé.

Ce type d'approche géomatique est quasi-systématiquement soumis à une somme d'incertitudes d'origines diverses, induisant des biais parfois importants dans certaines zones du secteur investigué. Il faut donc considérer ces limitations lorsqu'une exploitation de ce type de résultats est entreprise. Surtout, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, cette approche cartographique doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure à celle préconisée et se substituer à des études plus locales.

En conclusion, la carte de sensibilité n'est pas utilisable directement pour un Plan de Prévision de Risque. Il est nécessaire de réaliser des expertises complémentaires par un hydrogéologue afin d'y apporter des corrections et des données complémentaires. Elle est cependant un bon indicateur pour définir les secteurs favorables à l'établissement d'un PPR.

Sommaire

1. Introduction 11

2. Contexte géologique et hydrogéologique du bassin de l'Authie 15

2.1. PLATEAU DE LA CRAIE 15
2.1.1. Géologie 15
2.1.2. Hydrogéologie 16
2.1.3. Hydrographie et relation nappe-rivière 19

2.2. MARQUENTERRE 20
2.2.1. Géologie 20
2.2.2. Hydrogéologie 21
2.2.3. Hydrographie et relation nappe-rivière 25
2.2.4. Relation avec la mer 25

2.3. CARTE HYDROGEOLOGIQUE GLOBALE 26

2.4. UN CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE FAVORABLE AUX REMONTEES DE NAPPE 26

3. Collecte et traitement des données 29

3.1. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES 29
3.1.1. Les données topographiques : le RGE Alti au pas de 5 m 29
3.1.2. Les points d'eau souterraine des banques de données nationales 30
3.1.3. Les cartes et campagnes piézométriques en période de hautes eaux 34
3.1.4. Les points BSS (hors ADES et BSS EAU) 37
3.1.5. Enquête, réunions de travail et données historiques 38
3.1.6. Sources 44
3.1.7. Données de la BD TOPAGE® 45
3.1.8. Images satellite 49
3.1.9. Autres données collectées 50

3.2. EVALUATION DE LA FIABILITE 51
3.2.1. Synthèse de la fiabilité en fonction des données 51
3.2.2. Détails sur l'évaluation de la fiabilité des points d'eau des bases nationales 53
3.2.3. Détails sur l'évaluation de la fiabilité des données de la BD TOPAGE®..54

3.3. TRAVAIL D'ASSOCIATION DES POINTS 55

4. Traitement des images satellites 61

4.1. LA DETECTION DES SURFACES EN EAU 61

4.2. ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES 63

5. Estimation de la côte piézométrique extrême 67

5.1. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FORTE 67

5.2. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FAIBLE AVEC CHRONIQUE DE DONNEES COURTES 70

5.2.1. Application de la méthodologie développée par Bessière *et al.* (2019) ... 70

5.2.2. Amélioration de la méthode 71

5.3. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FAIBLE AVEC VALEUR UNIQUE ET LES DONNEES EXTRAITES DES CARTES PIEZOMETRIQUES 73

5.4. SYNTHESE DE L'ESTIMATION DU ZT100 PAR SOURCE DE DONNEES 74

6. Interpolation de la cote piézométrique extrême 77

6.1. DESCRIPTION DE LA METHODE 77

6.2. PREPARATION DES DONNEES 77

6.3. VARIOGRAMME 78

6.4. APPORT DES POINTS DE CONTRAINTE 82

6.5. ESTIMATION DU NIVEAU D'EAU ET DERIVES 86

7. Réalisation de la carte de sensiblité aux remontées de nappe 89

7.1. ELABORATION DE LA CARTE 89

7.2. EVALUATION DU NIVEAU DE CONFIANCE DES RESULTATS 91

7.2.1. Grille de fiabilité des points 91

7.2.2. Carte d'écart type de krigeage 93

7.2.3. Calcul d'un indice de confiance 94

7.3. VALIDATION ET LIMITES D'UTILISATION 98

8. Conclusions et discussions 99

9. Bibliographie 101

Liste des figures

Illustration 1 : Etude d'opportunité pour la réalisation du plan de prévention des risques naturelles de la vallée de l'Authie (source : Service risques et sécuroté routière)..... 11

Illustration 2 : Extrait de la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappes au niveau du bassin versant de l'Authie avec (figure du haut) et sans (figure du bas) la couche des EAIPce et EAIPsm (source : rapport BRGM/RP-65452-FR et http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inondations/cartographie_remontee_nappe) 13

Illustration 3 : Représentation simplifiée de la méthodologie déployée par la réalisation de la carte de remontée de nappe..... 14

Illustration 4 : Coupe hydrogéologique de la vallée de la Maye à Arry (source : Bault et al., 2017) 16

Illustration 5 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres du bassin amont de l'Authie..... 18

Illustration 6 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres du bassin aval de l'Authie. 18

Illustration 7 : Débits moyens mensuels de l'Authie à Dompierre-sur-Authie calculés sur la période 1963-2020 (source : Banque Hydro) 19

Illustration 8 : Modèle conceptuel de l'hydrosystème du Marquenterre (source : Bault et al., 2017). 21

Illustration 9 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres de la plaine du Marquenterre, de 2016 à 2017 (source : Bault V., 2017) 23

Illustration 10 : Relations entre les eaux souterraines et les zones humides dans la plaine maritime du Marquenterre, au droit des marais de Quend et de Villers-sur-Authie (source : Bault et al., 2017)..... 24

Illustration 11 : Coupe hydrogéologique présumée du massif dunaire entre Quend Plage et Monchaux (source : Bault et al. 2017)..... 24

Illustration 12 : Coupe hydrogéologique des marais arrière-littoraux nord entre Quend (La Gare) et Villers-sur-Authie (source : Bault et al., 2017)..... 25

Illustration 13 : Carte des entités affleurantes sur le bassin de l'Authie issues de la BDLisa..... 26

Illustration 14 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS) . 27

Illustration 15 : Exemple de chronique piézométrique montrant deux cycles de variation de la nappe (un annuel et un pluri-annuel) dont les effets, en s'additionnant, peuvent engendrer des débordements par remontée de nappe 28

Illustration 16 : Données topographiques issues du RGE Alti 5m sur le bassin de l'Authie 29

Illustration 17 : Carte relative à la précision altimétrique du RGE Alti 5m sur le bassin de l'Authie. 30

Illustration 18 : Données piézométriques issues des bases de données nationales sur le bassin de l'Authie 32

Illustration 19 : Chroniques avant (à gauche) et après la suppression des outliers (à droite). ... 33

Illustration 20 : Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie (équidistance 5m) – Hautes eaux du printemps 2001 (Caous et al., 2001) 34

Illustration 21 : Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie – Hautes eaux du printemps 2009 (Cardin et al., 2009)..... 35

Illustration 22 : Cartes piézométriques HE 2001 de la craie et 2016 du Marquenterre 36

Illustration 23 : Points complémentaires issus des campagnes piézométriques HE de la craie 2001 et du Marquenterre 37

Illustration 24 : Points tirés de la BSS (hors ceux déjà dans ADES ou dans BSS EAU) localisés dans ou à proximité du bassin versant de l'Authie 38

Illustration 25 : Communes pour lesquelles le BRGM possède des informations relatives aux inondations par remontées de nappes 41

Illustration 26 : Exemple de scan d'un plan cadastral, commune de Doullens 42

Illustration 27 : Points tirés des enquêtes menées auprès des communes du bassin..... 43

Illustration 28 : Données d'inondation historique recensées sur la bassin de l'Authie..... 44

Illustration 29 : Inventaire des sources sur le bassin de l'Authie..... 45

Illustration 30 : Localisation des points retirés de la sélection des surfaces hydrographiques selon le critère de position topographique..... 47

Illustration 31 : Localisation des réservoirs type « barrage » recencés dans le Référentiel des Obstaclement à l'Ecoulement, au sein ou proche du bassin versant de l'Authie48

Illustration 32 : Points sélectionnés issus de la BD TOPAGE® 49

Illustration 33 : Inventaire des zone à dominante humide sur le bassin de l'Authie..... 51

Illustration 34 : Répartition des données d'entrée par origine pour le bassin de l'Authie 53

Illustration 35 : Logigramme des différentes phases d'association des points (source : « Guide méthodologique pour l'établissement de carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale », Bessière et al., 2020) 57

Illustration 36 : Localisation des points peu fiables selon le point fiable associé 58

Illustration 37 : Localisation des points peu fiables selon leur méthode d'association 59

Illustration 38 : Série temporelle de rétrodiffusion SAR avec les statistiques associées (moyenne, moyenne augmentée et diminuée de l'écart type) et le seuil de détection de surfaces en eau (-15 dB habituellement)..... 62

Illustration 39 : Différents masques réalisés basés sur les données Sentinel-1 (période de 2015 à 2018) – en blanc les surfaces en eau permanentes extraites pour l'Authie. 63

Illustration 40 : Analyse des différents traitements réalisés à partir des masques, de la délimitation des surfaces en eau pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'avril 2015 à juillet 2018 65

Illustration 41 : Points résultants du traitement des images satellite..... 66

Illustration 42 : Report des niveaux humides de période de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés après ajustement d'une loi GEV (00248X0005/P1). 68

Illustration 43 : Estimation de la cote piézométrique maximale pour les points eaux souterraines à fiabilité forte..... 69

Illustration 44 : Exemple de corrélation des chroniques point fiable, en haut, et point peu fiable associé, en bas, selon l'approche de Bessière et al. (2019) 71

Illustration 45 : Exemple de corrélation des chroniques point fiable, en haut, et point peu fiable associé, en bas, selon la nouvelle approche 72

Illustration 46 : Estimation de la cote piézométrique maximale pour les points eaux souterraines à fiabilité faible 72

Illustration 47 : Localisation des points avec valeur unique corrigée par un coefficient correcteur74

Illustration 48 Exemple de point de source Timeseries (timeseries_db18_con10_485)..... 78

Illustration 49 : Histogramme ZT100 79

Illustration 50 : Variogramme directionnel ZT100 80
Illustration 51 : Exemple de variable présentant une dérive liée aux coordonnées 81
Illustration 52 : Variogramme moyen (hypothèse d'isotropie) de ZT100 calculé 81
Illustration 53 : Carte des erreurs réduites résultant de la validation croisée 82
Illustration 54 : Interpolation au droit d'un point..... 83
Illustration 55 : Carte du niveau d'eau ZT100 (1ère interpolation)..... 84
Illustration 56 : Carte de l'écart-type de krigeage du niveau d'eau ZT100..... 85
Illustration 57 : Carte des différences ZT100_KO - ZT100_Contrainte..... 86
Illustration 58 : Carte du niveau piézométrique estimé par krigeage (ZT100_Krigé)..... 87
Illustration 59 : Carte des zones de sensibilité de remontée de nappe (ZT100_Krigé - MNT)... 88
Illustration 60 : Carte de l'aléa remontée de nappe sur le bassin de l'Authie obtenue par comparaison entre le MNT et le niveau piézométrique extrême interpolé par méthode géostatistique..... 90
Illustration 61 : Variogramme omni directionnel de l'indice de fiabilité des données 92
Illustration 62 : Carte représentant la grille de fiabilité moyenne des points utilisés pour l'interpolation du niveau piézométrique extrême sur le bassin de l'Authie 93
Illustration 63 : Carte des écarts-type de krigeage induits par l'interpolation géostatistique du niveau piézométrique extrême 94
Illustration 64 : Représentation de l'indice de confiance global sur la cartographie des zones sensibles au remontées de nappe..... 95
Illustration 65 : Vue 3D l'indice de confiance global sur la cartographie des zones sensibles au remontées de nappe..... 97
Illustration 66 : Exemple de validation à partir de photo - Photographie par Phot'R (sur nampont-nempont.com)..... 98
Illustration 67 Enquête sur les remontées de nappe envoyée aux communes..... 109

Liste des tableaux

Tableau 1 Piézomètres suivis sur le bassin de l'Authie 17
Tableau 2 : Organisation des réunions de travail par communauté de communes..... 40
Tableau 3 : Critères retenus pour la sélection des surfaces hydrographiques de la BD TOPAGE® 46
Tableau 4 : Evaluation de la fiabilité par source de données..... 52
Tableau 5 : Fiabilité appliquée aux tronçons de cours d'eau retenus, provenant de la BD TOPAGE® 54
Tableau 6 : Fiabilité appliquée aux surfaces hydrographiques retenues provenant de la BD TOPAGE® 55
Tableau 7 : Niveaux maxima probables de période de retour 100 ans 69
Tableau 8 : Evaluation de la fiabilité par source de données..... 75
Tableau 9 : Tableau combinant le critère d'écart-type d'interpolation avec celui sur la fiabilité . 94

Liste des annexes

Annexe 1 Enquête sur les remontées de nappe du bassin versant de l'Authie 103
Annexe 2 Informations inondation remontée de nappe à partir des plans cadastraux 111

1. Introduction

La DDTM de la Somme a commandité une étude d'opportunité pour réaliser un plan de prévention des risques interdépartementaux sur la vallée de l'Authie. Trois aléas y sont intégrés : ruissellement, débordement de cours d'eau et remontée de nappes.

À partir d'un diagnostic territorial précis à l'échelle du bassin versant de l'Authie, cette étude a pour ambition :

- de présenter les caractéristiques physiques du périmètre d'étude,
- d'établir un état des lieux de l'exposition du territoire aux risques d'inondations,
- de déterminer les zones les plus sensibles aux risques d'inondations,
- d'analyser la pertinence de prescription d'un plan de prévention des risques naturels interdépartemental sur les communes les plus impactées par le phénomène d'inondation.

Cette étude concerne les 164 communes du bassin versant de l'Authie dont 81 communes dans le département de la Somme et 83 communes dans le département du Pas-de-Calais (cf. Illustration 1).

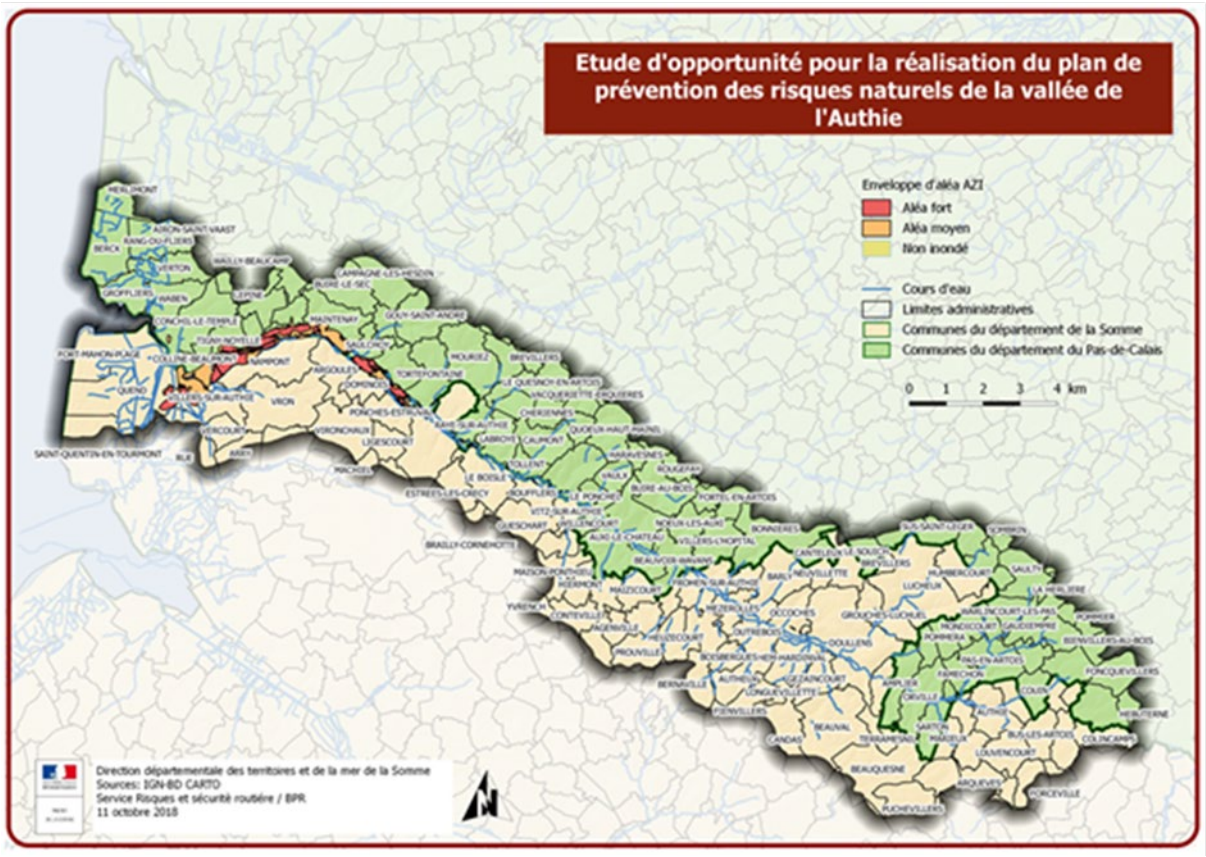


Illustration 1 : Etude d'opportunité pour la réalisation du plan de prévention des risques naturelles de la vallée de l'Authie (source : Service risques et sécuroté routière).

Le BRGM est en charge de réaliser la préfaisabilité du PPRI pour l'aléa remontée de nappes uniquement. Il s'agit, plus précisément pour le BRGM, de réaliser une cartographie de sensibilité aux inondations par remontée de nappes sur le bassin versant de l'Authie sur la base de ce qui

a été réalisé à l'échelle nationale (Brugeron et al., 2017) et des développements méthodologiques récents à l'échelle locale (Bessière et al., 2020).

Cette étude permettra ainsi d'affiner les secteurs potentiellement sujets au débordement de nappes et inondations de cave à partir des risques de remontée nappe identifiés sur la carte nationale (http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inondations/cartographie_remontee_nappe et Illustration 2). Cette carte ne peut être exploitée à une échelle supérieure au 1/100 000. La cartographie nationale intègre les zones potentiellement inondables par débordement de cours d'eau (EAIPce) et par submersion marine (EAIPsm) comme condition limite aux débordements. Ces couches ont été fournies par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du Ministère de la Transition Ecologique. Ces couches sont alors à prendre en considération pour la lecture de la carte.

Le fond de la vallée de l'Authie est globalement situé dans une zone considérée comme de « sensibilité très élevée » à « sensibilité moyenne » aux remontées de nappe (Illustration 2). Mais ces secteurs sont recouverts par les EAIPce et EAIPsm. Il est alors nécessaire de repréciser ces zones avec des données complémentaires et d'intégrer des données actualisées si elles sont disponibles.

Des cartes de fiabilité avaient été associées mais celles-ci montrent que la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappes peut être améliorée, en particulier par l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) plus précis ou encore par la consolidation de la surface piézométrique interpolée. Une fiabilité faible avait été attribuée pour le MNT et fiabilité forte pour les données eaux souterraines.

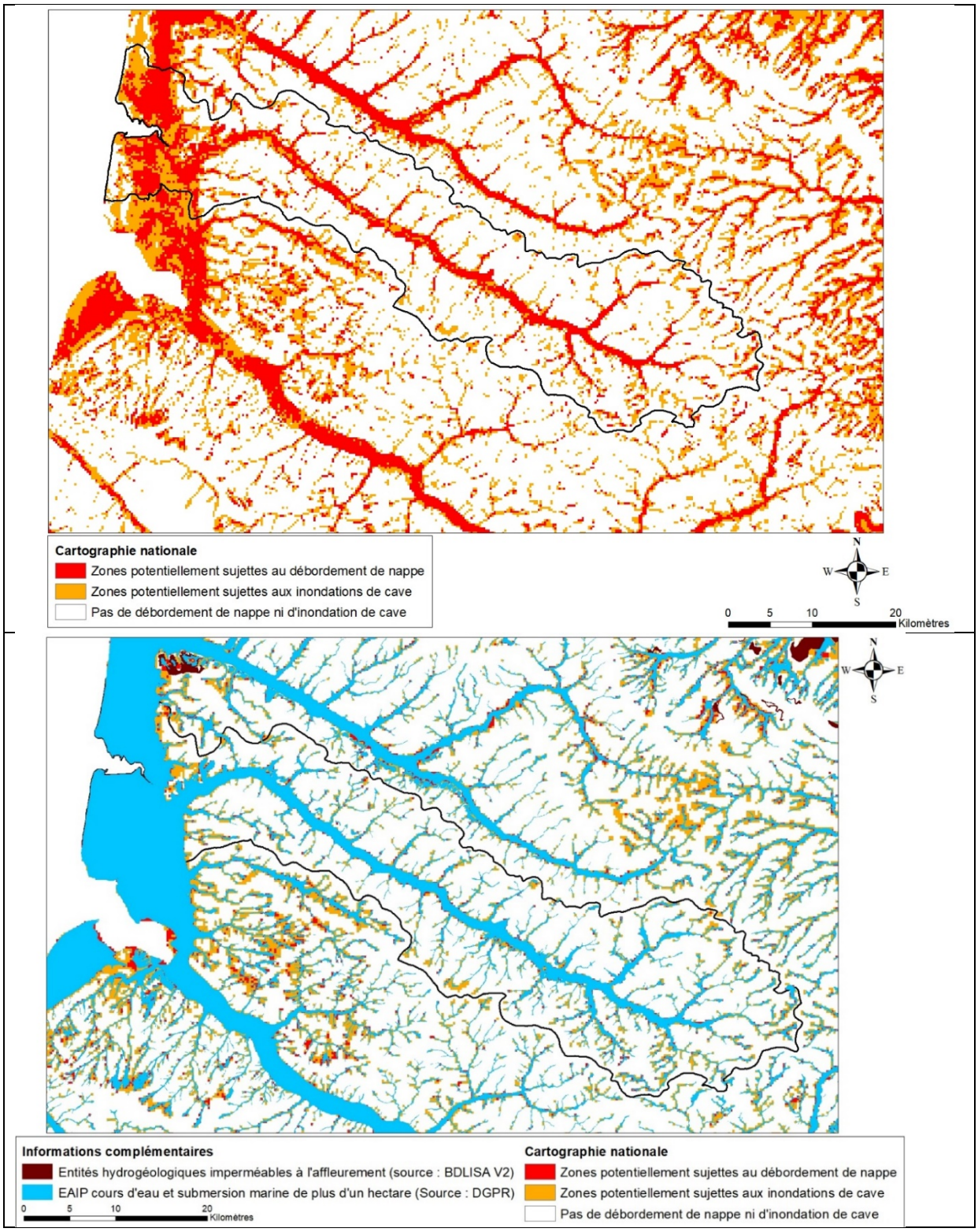


Illustration 2 : Extrait de la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappes au niveau du bassin versant de l'Authie avec (figure du haut) et sans (figure du bas) la couche des EAIPce et EAIPsm (source : rapport BRGM/RP-65452-FR et http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inondations/cartographie_remontee_nappe)

La réalisation de la carte de remontée de nappes sur le bassin versant de l'Authie, suit les différentes étapes préconisées dans le guide pour l'établissement d'une cartographie des zones sensibles aux inondations par remontée de nappes à l'échelle locale (cf. organigramme simplifié Illustration 3) :

- Etape 1 : Contexte hydrogéologique et préparation du jeu de données,
- Etape 1 bis : Utilisation et traitement de l'imagerie satellite (optionnel),
- Etape 2 : Estimation de la cote piézométrique maximale,
- Etape 3 : Analyse géostatistique et interpolation de la surface piézométrique,
- Etape 4 : Production d'une carte de sensibilité aux remontées de nappes.

La réalisation de cartes de remontée de nappes est conditionnée par la disponibilité des données et informations exploitables sur les niveaux des nappes du secteur étudié en situation de hautes, voire très hautes, eaux.

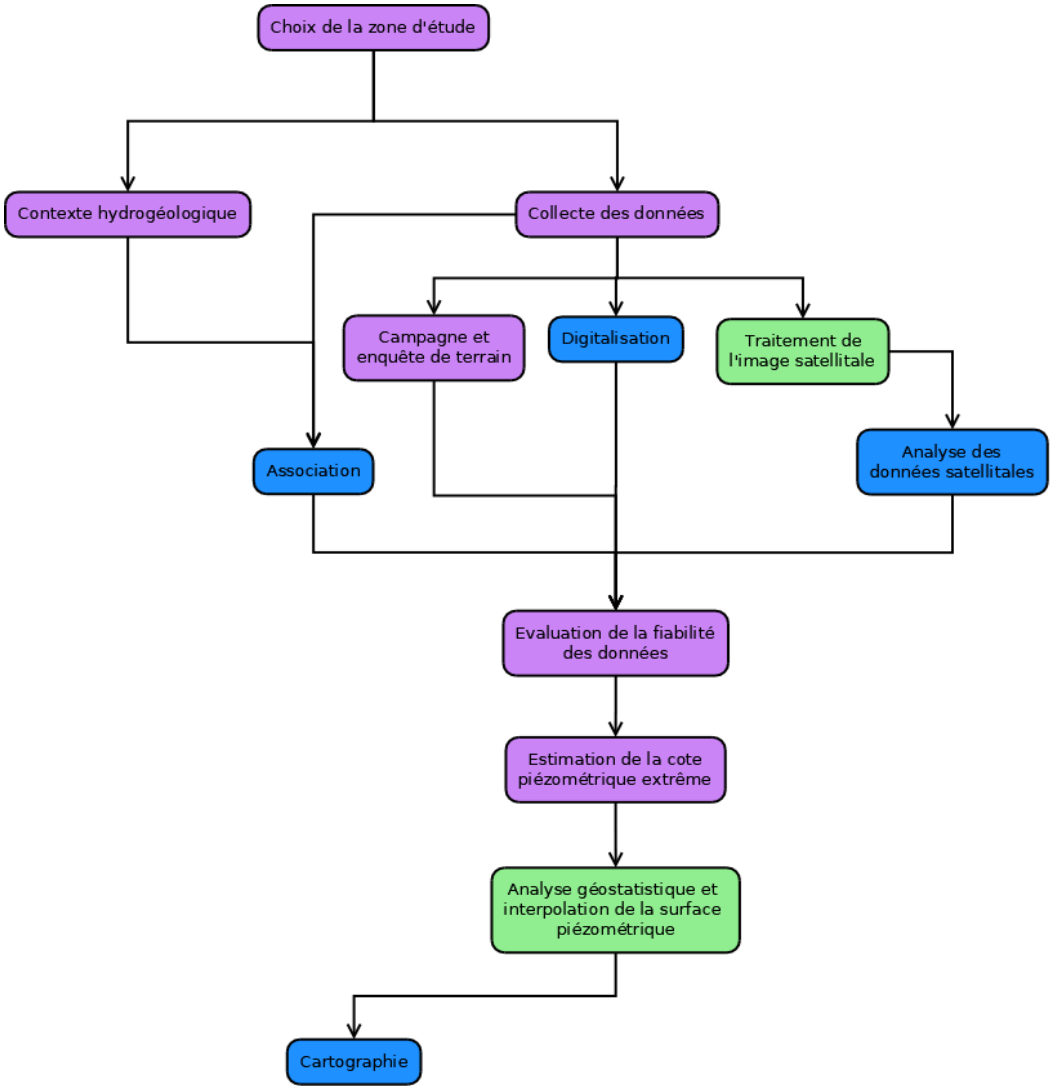


Illustration 3 : Représentation simplifiée de la méthodologie déployée par la réalisation de la carte de remontée de nappe

2. Contexte géologique et hydrogéologique du bassin de l'Authie

L'Authie s'écoule à travers les plateaux crayeux de l'Artois, de l'Amiénois et du Ponthieu, globalement du sud-est vers le nord-ouest ; vers la plaine côtière du Marquenterre.

2.1. PLATEAU DE LA CRAIE

2.1.1. Géologie

Durant le Crétacé supérieur, entre -93,5 et -65,5 millions d'années, le nord de la France est recouvert par une mer modérément profonde (150 mètres). Cette période se caractérise par le dépôt de marnes, appelées dièves vertes et bleues, durant le Turonien inférieur et moyen puis d'une épaisse couche de craie, durant le Turonien supérieur et le Sénonien, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de puissance.

La fin du Crétacé (-65,5 millions d'années) marque le retrait de la mer et l'émersion totale de la région. Les eaux de pluie vont alors faire subir à la craie une profonde érosion. L'altération de ces niveaux va aboutir progressivement à la formation d'argiles à silex au sommet des formations crayeuses.

La mer revient brièvement pour déposer les sables de Bracheux durant le Thanétien (-58,7 à -55,8 millions d'années) et les argiles de Saint-Aubain datant de l'Yprésien inférieur (-55,8 à -55,0 millions d'années). La mer se retire enfin et l'érosion reprend.

Durant l'Eocène et l'Oligocène (-55,8 à -23,0 millions d'années), le soulèvement des Alpes affecte les dépôts crayeux qui se déforment alors en une succession de plis, synclinaux (gouttières) et anticlinaux (bombements), orientés nord-ouest/sud-est. Le compartiment crayeux occidental du Marquenterre s'abaisse d'environ 10 mètres, en un unique bloc affecté par un léger pendage vers le littoral.

A partir du Quaternaire (-1,8 millions d'années), les périodes froides, périglaciaires ou glaciaires, et tempérées se succèdent. Lors des épisodes glaciaires, les vents soufflant sur les plaines remanient les sables de Bracheux datant du Thanétien et déposent une couche de limons sur les vastes plateaux crayeux. La fonte des glaciers, durant les périodes de réchauffement, engendre des débâcles permettant aux vallées de se creuser dans le substratum crayeux. La paléo-vallée de l'Authie se met ainsi en place au sein d'un synclinal encadré par les anticlinaux du Ponthieu et du Pas de l'Artois. Enfin, en période tempérée, le niveau marin remonte et des alluvions graveleuses (alluvions anciennes) se déposent dans les vallées humides.

La période postglaciaire (à partir de (-8 000 ans BP[1]) est caractérisée par un réchauffement général et par une remontée progressive, en plusieurs phases successives du niveau marin. Le niveau de base constitué par la mer étant remonté, la sédimentation reprend en vallée. Les sols tourbeux et argileux se mettent en place dans les fonds de vallées humides de l'Authie et de ses affluents. Ces alluvions récentes continuent de se déposer actuellement.

[1] BP = Before Present, échelle de temps utilisée en géologie et archéologie et considérant la date de démarrage au 1er janvier 1950

Le paysage actuel est caractérisé par des plateaux crayeux généralement recouverts de limons pléistocènes. En partie avale et sur l'amont en rive gauche, les sables du Thanétien ont été remaniés avec les limons, constituant une couverture limono-sableuse très perméable. Sur les flancs de vallée, s'observe une succession de formations géologiques, du Sénonien au Turonien moyen. Les dièves du Turonien moyen et inférieur, constituées de marnes blanches verdâtres, affleurent en bas des pentes nord de la vallée de l'Authie et de ses affluents de rive droite. Les vallées sont beaucoup plus creusées au nord qu'au sud. Les fonds de vallée sont tapissés d'alluvions.

2.1.2. Hydrogéologie

Au droit des plateaux, la craie constitue un aquifère puissant, recouvert par une couche limono-sableuse infiltrante. Dans la vallée structurante de l'Authie, les alluvions anciennes, constituées de graviers et de sables, constituent des aquifères peu épais, inférieurs à 10 mètres. Le substratum des aquifères alluviaux est constitué des formations crayeuses également perméables et la nappe alluviale se retrouve en continuité avec la nappe de la craie. La nappe de la craie est libre sous les plateaux et les coteaux et est considérée comme captive en vallée sous les alluvions récentes, argileuses et tourbeuses (Illustration 4).

L'aquifère de la craie est très sollicité et représente la principale ressource en eau potable de la région. La nappe du bassin de l'Authie est sollicitée essentiellement sur le plateau du Ponthieu par des captages agricoles.

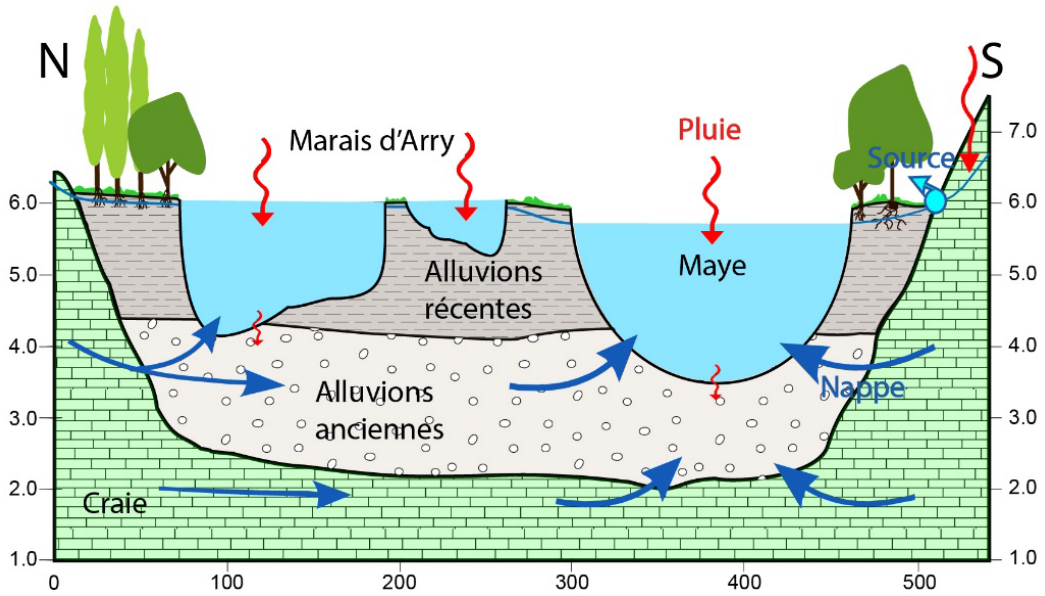


Illustration 4 : Coupe hydrogéologique de la vallée de la Maye à Arry (source : Bault et al., 2017)

a) *Chroniques piézométriques*

Dans le cadre du réseau piézométrique régional (Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du BRGM Picardie - 0100000021 - RESOUPBRGMPIC), le BRGM assure actuellement pour l'Office Français de la Biodiversité (OFB), le suivi et la gestion de plusieurs ouvrages au droit du bassin versant de l'Authie (Tableau 1).

Tableau 1 Piézomètres suivis sur le bassin de l'Authie

Code BSS	Commune	Début	Fin
BSS000CJBM (00234X0204/S1)	Vron (80815)	14/01/1970	16/04/1998
BSS000CJNS (00238X0037/F)	Arry (80030)	15/05/1998	
BSS000CJSH (00241X0012/P1)	Buire-le-Sec (62183)	20/03/1972	
BSS000CJZZ (00243X0028/F)	Capelle-lès-Hesdin (62212)	19/04/1995	28/05/2008
BSS000CKEP (00245X0002/S1)	Vironchaux (80808)	28/01/1966	15/10/2014
BSS000CKEQ (00245X0003/P)	Ligescourt (80477)	24/04/2008	
BSS000CKPU (00248X0005/P1)	Haravesnes (62411)	05/01/1970	14/01/2016
BSS000DFNF (00341X0012/S1)	Autheux (80042)	08/01/1965	30/10/2015
BSS000DFPV (00341X0050/PZ1)	Autheux (80042)	22/04/1966	
BSS000DFRP (00342X0025/S1)	Neuvillette (80596)	12/01/1970	
BSS000DGGH (00346X0011/S1)	Beauval (80071)	12/01/1970	
BSS000DGLX (00348X0024/H1)	Vauchelles-lès-Authie (80777)	08/01/1970	25/12/2006
BSS000DGQG (00351X0030/P)	Hénu (62430)	28/11/1997	28/11/2001

Tableau n°1 : suivi et gestion de plusieurs ouvrages au droit du bassin versant de l'Authie

Le comportement des piézomètres, implantés sur le plateau ou dans des vallées, est similaire (Illustration 5 et Illustration 1). Les cycles annuels (hautes eaux / basses eaux), caractérisés par un transfert très rapide dans les fissures et fractures, sont bien marqués et se superposent à des cycles pluriannuels, du fait d'un transfert plus lent dans les pores (Illustration 5). D'après la modélisation réalisée en 2012 sur l'ouvrage d'Haravesnes (Allier et al, 2012), la fonction de transfert lente est de 1100 jours et la fonction rapide de 240 jours, avec un pic au bout de 50 jours. On retrouve au travers de ces deux fonctions de transfert la double cyclicité des fluctuations de la nappe : un cycle annuel (hautes eaux/basses eaux) et un cycle interannuel, caractéristique d'une forte inertie de la nappe.

La profondeur des eaux souterraines est très variable : 50 à 60 m sous les plateaux, 20 à 30 m sous les coteaux et moins de 2 m en vallées humides. La partie est du bassin, suivie par les piézomètres à Autheux (plateau) et Haravesnes (vallon sec), témoigne d'une amplitude des fluctuations plus importante que celle mesurée dans la partie ouest du bassin, à Neuvillette (vallon sec) et à Beauval (vallon sec). En vallée de l'Authie, la nappe est considérée comme subaffleurante en amont de Tigny-Noyelle. Les battements en vallées restent contraints par la mise en pression des eaux souterraines sous les tourbes de surface.

On observe une période de très hautes eaux bien marquée sur tous les piézomètres, mais également sur certains piézomètres l'année 1995 pour laquelle le niveau peut être parfois plus important qu'en 2001.

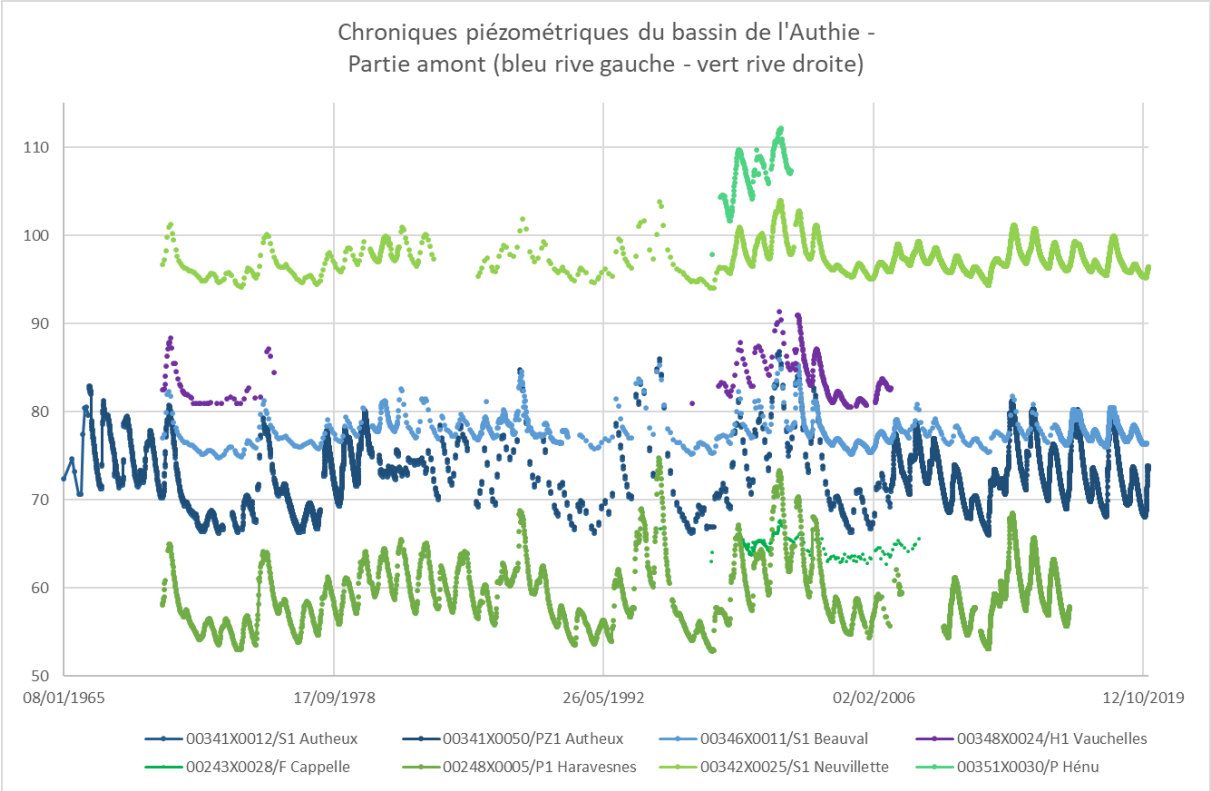


Illustration 5 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres du bassin amont de l'Authie.

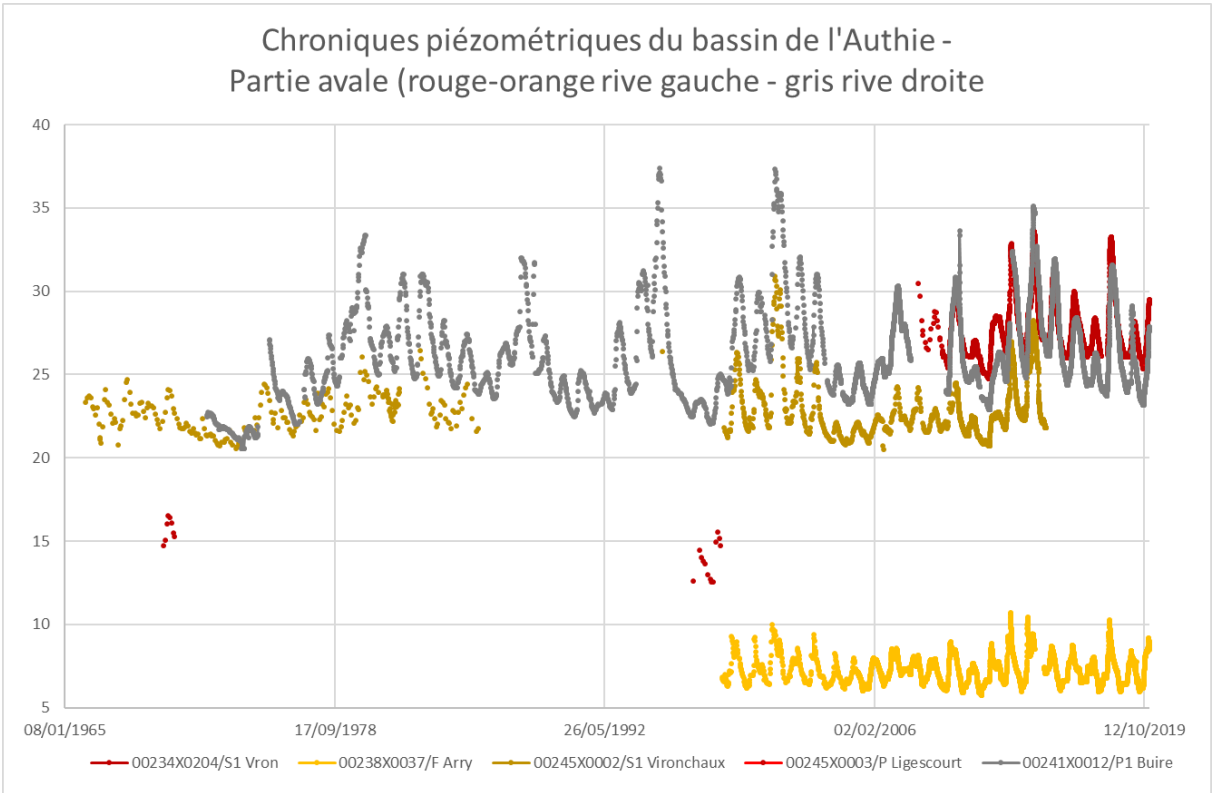


Illustration 6 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres du bassin aval de l'Authie.

a) *Cartes piézométriques*

Plusieurs cartes piézométriques régionales couvrent le bassin :

- hautes eaux 1995 ;
- basses eaux 1997 ;
- très hautes eaux 2001-2002 ;
- basses eaux 2005 ;
- moyennes eaux 1960-2007 ;
- hautes eaux et basses eaux 2009,
- hautes et basses eaux 2016 – Marquenterre et Ponthieu ;

La nappe de la craie est alimentée directement par les précipitations locales, qui traversent la couverture limoneuse très infiltrante. Les bassins versants hydrogéologiques se superposent globalement aux bassins versants topographiques. Ainsi, les écoulements principaux s'effectuent depuis les plateaux et convergent vers les vallées humides. Les vallées humides jouent un rôle prédominant en drainant la nappe de la craie et des alluvions et en constituant un niveau de base. Vers l'ouest, les lignes de courant rejoignent la plaine maritime.

2.1.3. Hydrographie et relation nappe-rivière

L'Authie est un fleuve côtier qui forme la frontière entre le département de la Somme et du Pas-de-Calais. D'une longueur d'environ 100 km, ce cours d'eau prend sa source sur la commune de Coigneux à 98 m d'altitude dans le département de la Somme et se jette dans la Manche entre Berck et Fort-Mahon. Trois affluents principaux se jettent dans le fleuve : la Quilienne et la Grouche en rive droite ainsi que la Gezincourtoise en rive gauche. En aval, le Fliers en rive droite alimente l'estuaire. La superficie totale du bassin versant est de 984 km².

Le débit du cours d'eau est suivi à la station hydrométrique de Dompierre-sur-Authie (mise en service en 1963), la superficie du bassin jaugé est de 796 km². Les débits moyens mensuels sont calculés sur la période 1963-2020 (Illustration 7). Le module de l'Authie est de 7,78 m^3/s et le débit instantané maximal de 26,70 m^3/s a été enregistré le 21/03/2001 (données Banque Hydro).

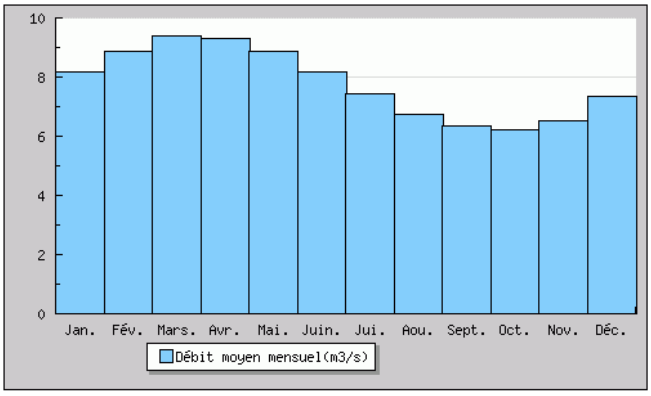


Illustration 7 : Débits moyens mensuels de l'Authie à Dompierre-sur-Authie calculés sur la période 1963-2020 (source : Banque Hydro)

L'Authie et ses affluents ont creusé leur vallée au sein de la craie et ont déposé des alluvions. Les alluvions anciennes, composées de graviers et de sables, sont surmontées d'alluvions récentes tourbeuses. En vallées humides, les cours d'eau et les marais se sont installés au sein des formations alluviales. Les tourbes récentes sont présentes sur 4 à 6 m et les alluvions anciennes peuvent atteindre 6 m dans la vallée de l'Authie.

Les relations entre eaux superficielles et souterraines dépendent de la profondeur des marais et des cours d'eau ou de la perméabilité des alluvions superficielles tourbeuses (Illustration 4). La nappe de la craie donne naissance à de nombreuses sources qui participent à l'alimentation des eaux superficielles. Ces sources apparaissent en tête de vallées humides, en limite des alluvions peu perméables, ou au centre des vallées humides lorsque la nappe se met en charge sous les alluvions récentes. Les marais se comportent comme des éponges entre la nappe et les cours d'eau : ils permettent ainsi de réguler les débits des cours d'eau et de retarder les sécheresses et les inondations.

2.2. MARQUENTERRE

2.2.1. Géologie

Lors de l'ouverture de la Manche, l'ouest du plateau du Ponthieu s'est affaissé d'une dizaine de mètres, à partir d'une faille nord-sud appelée « falaise morte » (Illustration 8). Depuis 120 000 ans, cette plate-forme se remblaie successivement, par les apports de la mer (graviers et sables) et des rivières (argiles et tourbes).

Lors d'une période tempérée, le niveau marin remonte. Le compartiment occidental abaissé, correspondant à l'actuel Marquenterre, se remblaie avec des cailloutis et galets de silex, appelés formations de Rue, déposés par les courants marins directement sur le toit de la craie.

Le maximum glaciaire survient il y a environ 20 000 ans BP. D'épaisses calottes de glace recouvrent le nord de l'Europe et le niveau de la mer est alors 120 mètres plus bas qu'actuellement. Le paysage entre les côtes françaises et anglaises ressemble à une plaine occupée par le large fleuve « Manche » qui s'écoule à plus de 100 km du littoral moderne. L'Authie creuse son lit au sein des formations de Rue et de la craie pour rejoindre ce fleuve. La paléo-vallée de l'Authie est toujours visible sur le toit de la craie, sous les terrains du Quaternaire et les formations de Rue non érodées affleurent aujourd'hui sous forme de buttes peu élevées et allongées de direction nord-est, appelés foraines. Cette dernière période froide se termine il y a 11 800 ans BP.

La période postglaciaire est caractérisée par un réchauffement général et par une remontée progressive, en plusieurs phases successives et jusqu'à la falaise morte, du niveau marin. Au début de l'Holocène (-8 000 ans BP), le niveau marin se situait 20 mètres en-dessous de celui actuel. La plate-forme crayeuse affaissée, à l'ouest de la falaise morte, est remblayée progressivement au cours des transgressions et régressions marines. La succession des dépôts marins (sables silteux) et continentaux (argiles et tourbes) témoignent de ces oscillations du niveau marin : argiles tourbeuses inférieures (- 8 000 ans BP), sables du Marquenterre ou sables pissards (-8 000 à -4 000 ans BP), argiles et tourbes supérieures (-4 000 à -2 800 ans BP).

La mise en place du massif dunaire remonterait à 2 000 ans, suite au retrait de la mer, et a progressé au fil du temps.

Le paysage actuel a été soumis à une forte modification humaine. Le retrait récent de la mer et des travaux d'endiguement à partir de 1163 permettent d'isoler la plaine maritime du Marquenterre des intrusions marines. Le paysage subit les aménagements humains et la baie de l'Authie, comme celle de la Somme, se remplit progressivement.

Aujourd'hui, la craie se retrouve recouverte d'environ 20 m de dépôts sédimentaires : succession de graviers, sables et argiles. Les formations tourbeuses de surface de la plaine maritime se

rattachent aux alluvions récentes de la vallée de l'Authie. La mise en place de ces sols tourbeux permet l'installation des marais arrière-littoraux.

Le long du littoral, le massif dunaire s'installe et se développe vers l'est depuis 2 000 ans. Récemment, il a été partiellement stabilisé par la plantation de végétaux.

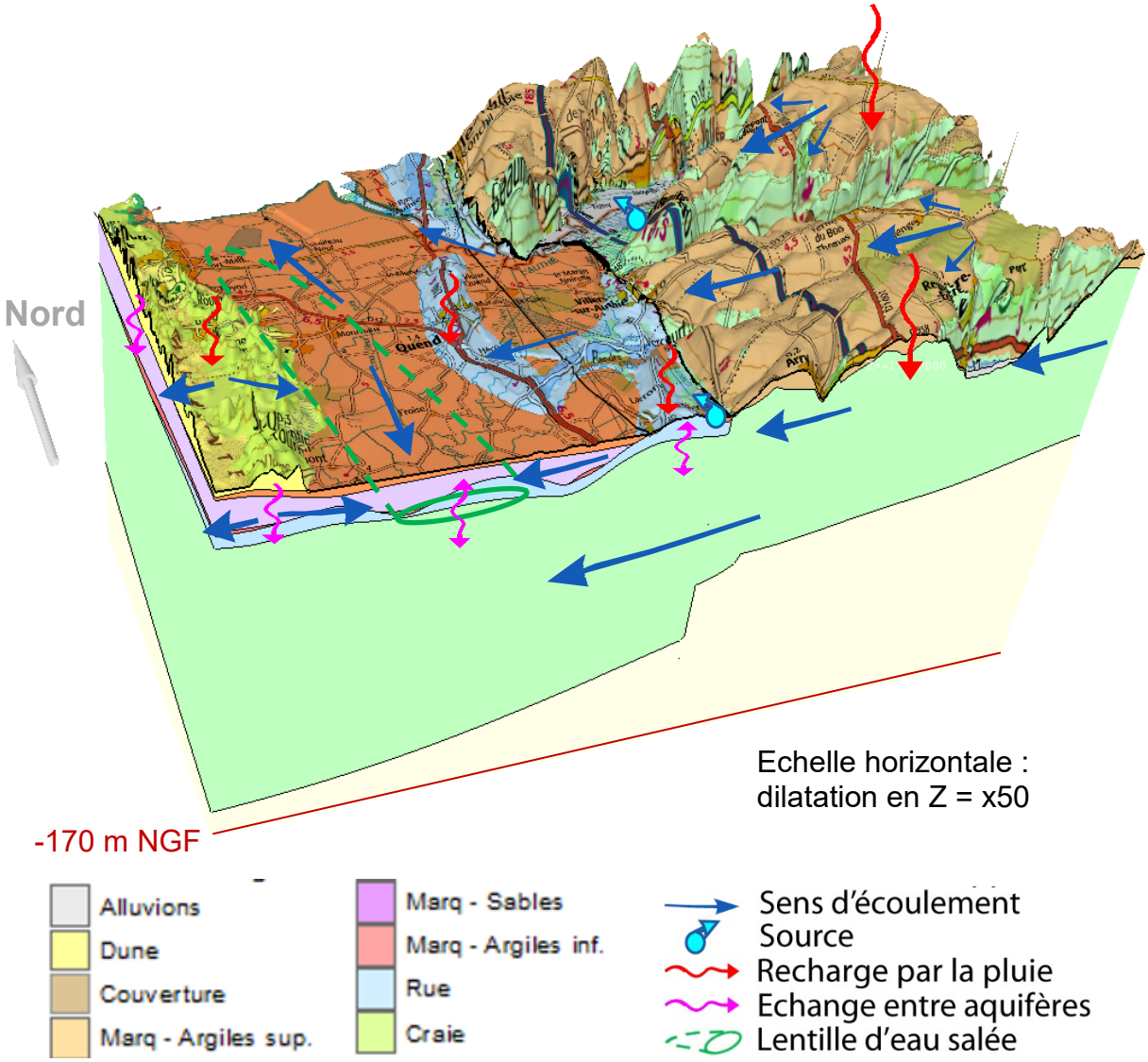


Illustration 8 : Modèle conceptuel de l'hydrosystème du Marquenterre (source : Bault et al., 2017).

2.2.2. Hydrogéologie

Au droit du Marquenterre, la succession de niveaux perméables et imperméables permet l'interprétation suivante (Illustration 8) :

- Aquifère des dunes, présent uniquement au sein du massif dunaire ;
- Aquiclude des argiles et tourbes supérieures du Marquenterre, constituant le sol de la plaine maritime sauf au droit des dunes et des foraines ;
- Aquifère des sables du Marquenterre ;
- Aquiclude des argiles tourbeuses inférieures du Marquenterre, discontinu et peu épais ;
- Aquifère des formations graveleuses de Rue, affleurant sous forme de buttes ou foraines ;
- Aquifère de la craie.

La faille nord-sud, appelée falaise morte, a abaissé le compartiment crayeux ouest d'une dizaine de mètres et permet la juxtaposition latérale des aquifères de la craie en amont et des aquifères des formations graveleuses de Rue et des sables du Marquenterre en aval. D'après les différents résultats de l'étude sur le Marquenterre (Bault et al., 2017), cette faille ne constitue pas un axe imperméable ou drainant et la nappe de la craie du Ponthieu est en continuité latéralement avec les nappes des formations de Rue et des sables du Marquenterre.

Au droit de la plaine maritime, les aquifères de la craie, des formations graveleuses de Rue, des sables du Marquenterre et des alluvions anciennes sont considérés comme étant en continuité hydraulique, en absence de véritables niveaux imperméables les isolant. Ces aquifères renferment donc une unique nappe. Au droit des marais arrière-littoraux, la nappe se retrouve captive sous les tourbes superficielles. Elle est libre au centre de la plaine maritime, en absence de couverture imperméable suffisamment épaisse, et lorsque les formations graveleuses de Rue affleurent sous forme de cordons appelés foraines.

A l'ouest, l'aquifère des dunes abrite une nappe libre, de faible importance, et alimentée uniquement par la pluviométrie locale. La nappe affleure dans la plaine sableuse centrale à la faveur des pannes qui s'écoulent ensuite vers la plaine maritime. Au droit de ce massif dunaire, la nappe du Marquenterre est semi-captive sous les argiles supérieures.

a) *Chroniques piézométriques*

Dans le cadre de l'étude du Marquenterre, dix piézomètres ont été équipés de capteurs de niveau, de température et de conductivité (Illustration 9). Ils ont suivi sur une année la nappe de la craie sur le plateau du Ponthieu, au droit des zones humides et en profondeur au centre de la plaine maritime.

Les niveaux statiques se rencontrent entre 0,5 et 2,5 m de profondeur et jusqu'à 8 m au sein des foraines. Les cycles saisonniers reproduisent, de façon très amortie, les variations inertielles de la nappe libre de la craie du plateau du Ponthieu. Au centre de la plaine maritime, les niveaux piézométriques sont également réactifs aux pluies efficaces. Ainsi, les cycles saisonniers se superposent à des pics ponctuels liés aux pluies.

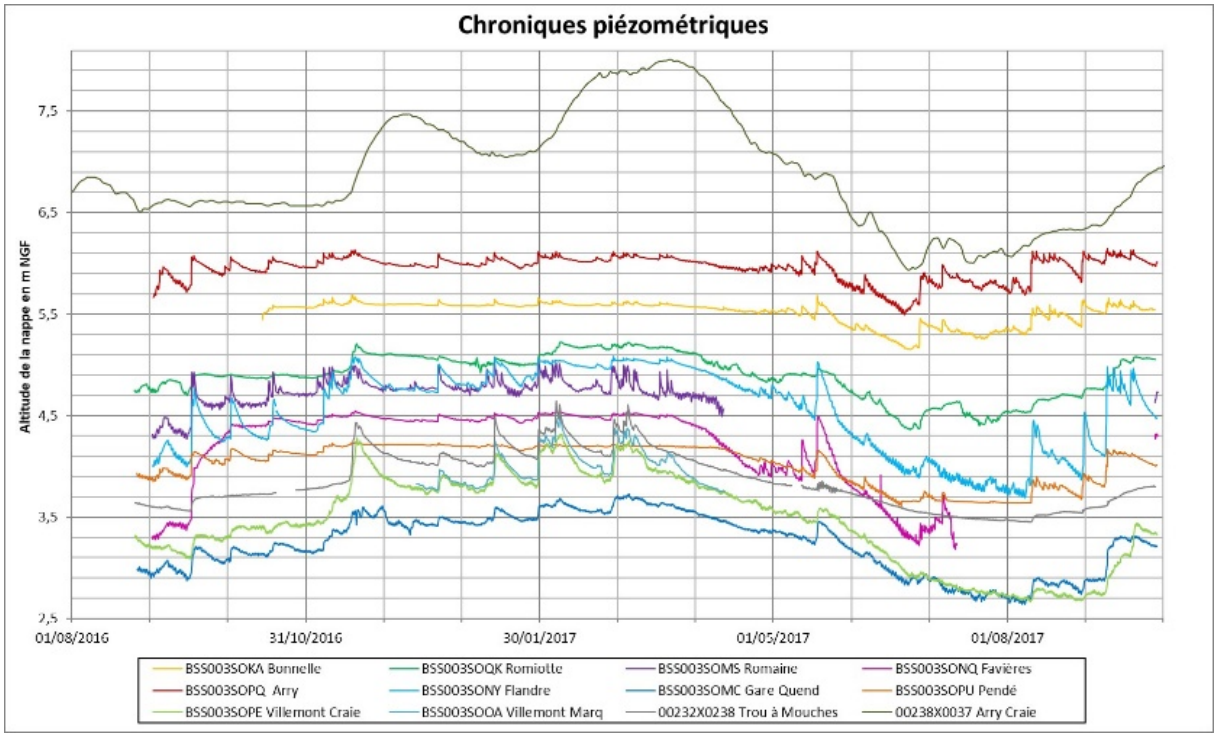


Illustration 9 : Fluctuations des niveaux piézométriques enregistrés à différents piézomètres de la plaine du Marquenterre, de 2016 à 2017 (source : Bault V., 2017)

b) *Cartes piézométriques*

Les eaux souterraines sont alimentées par la nappe de la craie en bordure du plateau du Ponthieu, par les nappes alluviales des vallées humides et directement par la pluviométrie (Illustration 8 et Illustration 10). La nappe s'écoule lentement vers l'ouest à partir de la falaise morte et vers l'est depuis le massif dunaire. Les écoulements convergent vers une dépression située au centre de la plaine maritime, où les niveaux s'établissent en 2016 à une altitude de 4,3 mètres NGF en hautes eaux et de 3,7 mètres NGF en basses eaux. Le point de partage des eaux de cette dépression se situe à proximité de Monchaux ; les eaux souterraines se dirigent alors au nord vers la baie d'Authie et au sud vers la baie de Somme, uniques exécutoires de la nappe. Le gradient hydraulique est très faible au centre de la plaine maritime (0,2 ‰), du fait d'une topographie quasiment plate et d'un très faible drainage.

A l'aplomb du massif dunaire, la nappe du Marquenterre est alimentée uniquement par les apports de la nappe perchée des dunes, par drainance descendante à travers des horizons argileux (Illustration 8 et Illustration 11). Les eaux souterraines s'infiltrent lentement, à travers des horizons argileux présents sous les dunes, vers les sables, graviers et craie sous-jacents. Cet apport d'eau permet la formation d'un dôme piézométrique, d'altitude approximative 4,5 à 6 mètres. La présence de cette barrière entre la mer et la nappe de la plaine maritime empêche les eaux de la mer de s'infiltrer dans les terrains perméables et de saliniser les eaux souterraines.

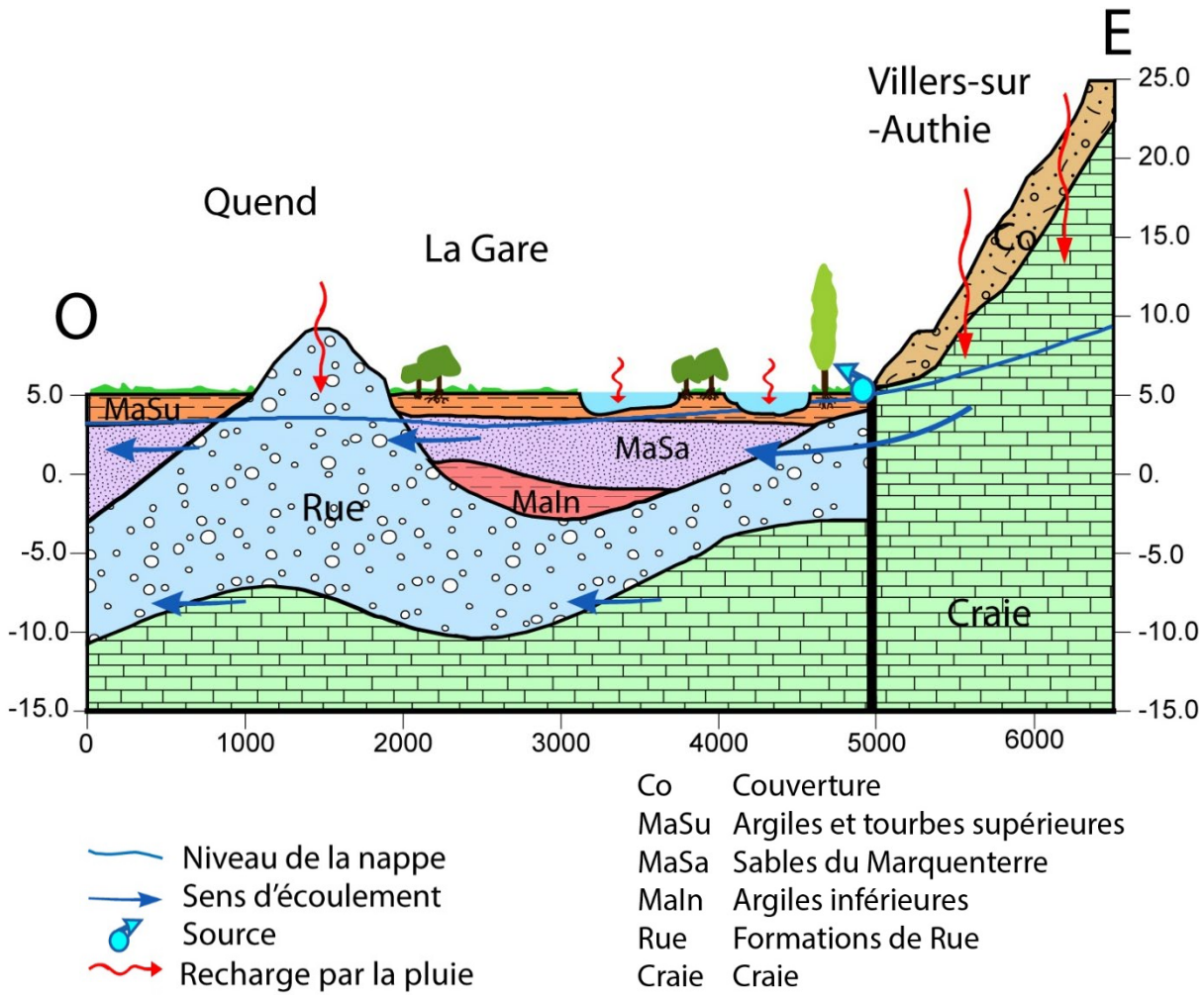


Illustration 10 : Relations entre les eaux souterraines et les zones humides dans la plaine maritime du Marquenterre, au droit des marais de Quend et de Villers-sur-Authie (source : Bault et al., 2017).

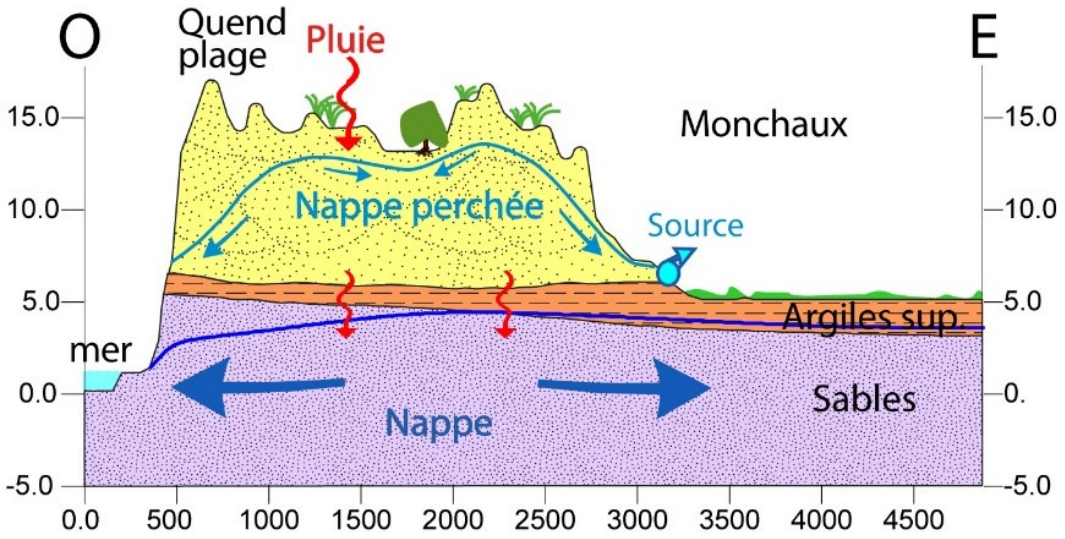


Illustration 11 : Coupe hydrogéologique présumée du massif dunaire entre Quend Plage et Monchaux (source : Bault et al. 2017)

2.2.3. Hydrographie et relation nappe-rivière

Les eaux souterraines viennent, depuis l'est, de la nappe de la craie du Ponthieu. En arrivant à la falaise morte, les terrains géologiques changent et les eaux souterraines rencontrent des argiles et tourbes imperméables en surface. Elles débordent alors, formant tout au long de la falaise morte, une bande marécageuse jalonnée de sources (Illustration 12). Les émergences sont rarement bien localisées, et les eaux souterraines s'écoulent de façon diffuse à travers la tourbe.

Les marais nord du Marquenterre reposent sur un niveau argileux et tourbeux épais de plus de 1,5 mètres. Ces terrains imperméables limitent les échanges entre la surface et les eaux souterraines. Les marais sont essentiellement alimentés par les pluies mais également par la nappe. En effet, les sources naissant le long de la falaise morte participent à l'alimentation des marais. De plus, la nappe est sous pression et un flux vertical ascendant peut se mettre en place : les eaux souterraines se fraient un chemin à travers les argiles et tourbes vers les marais. A l'inverse, lorsque les niveaux de la nappe sont plus bas que ceux des marais, le flux peut s'inverser : le marais se vidange vers la nappe.

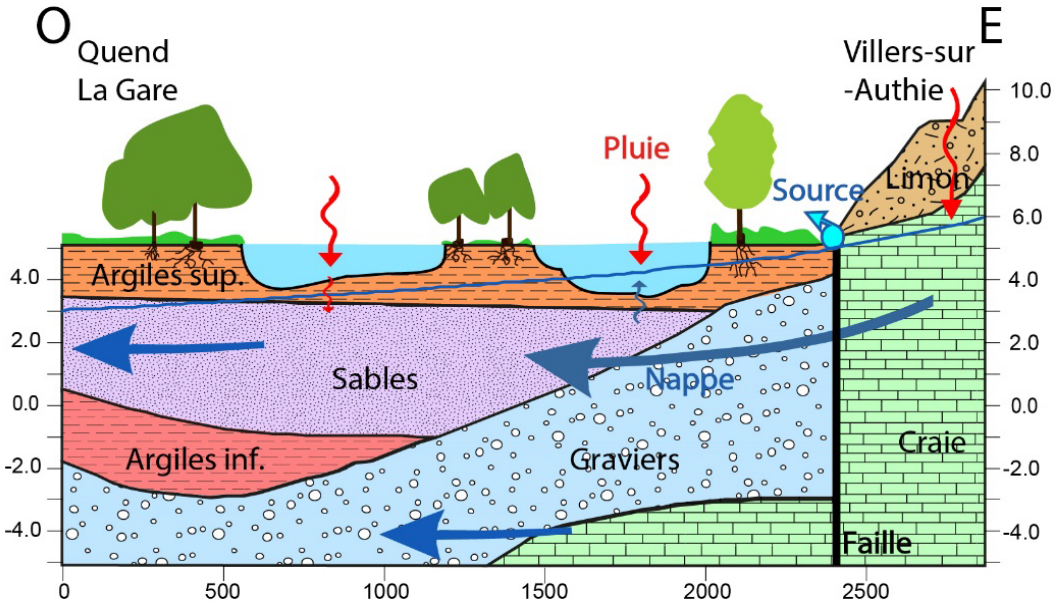


Illustration 12 : Coupe hydrogéologique des marais arrière-littoraux nord entre Quend (La Gare) et Villers-sur-Authie (source : Bault et al., 2017)

2.2.4. Relation avec la mer

Au droit de la plaine maritime, les effets de la mer sur les eaux souterraines peuvent se faire ressentir sur les niveaux piézométriques, du fait de l'oscillation des marées, et sur la composition physico-chimique des eaux lors de la présence d'un biseau salé. Aucun de ces effets n'a été mis en évidence sur la nappe de la craie du plateau du Ponthieu et des alluvions des vallées humides, en amont de la falaise morte (Bault et al., 2017). Aucune trace d'une intrusion marine actuelle n'a été démontrée dans les eaux souterraines. Les mesures de conductivité lors de diagraphies et de prélèvements ne mettent pas en évidence la présence d'eau salée. En effet, aucune anomalie sur la conductivité électrique n'a été mise en évidence jusqu'à une altitude de -20 m NGF à Arry, -11 m NGF en amont immédiat des marais arrière-littoraux à Ponthoile et -38 m NGF en vallée de l'Authie à Nampont-Saint-Martin.

2.3. CARTE HYDROGEOLOGIQUE GLOBALE

La carte des entités hydrogéologiques affleurantes a été réalisée à partir de la BDLisa (Illustration 13).

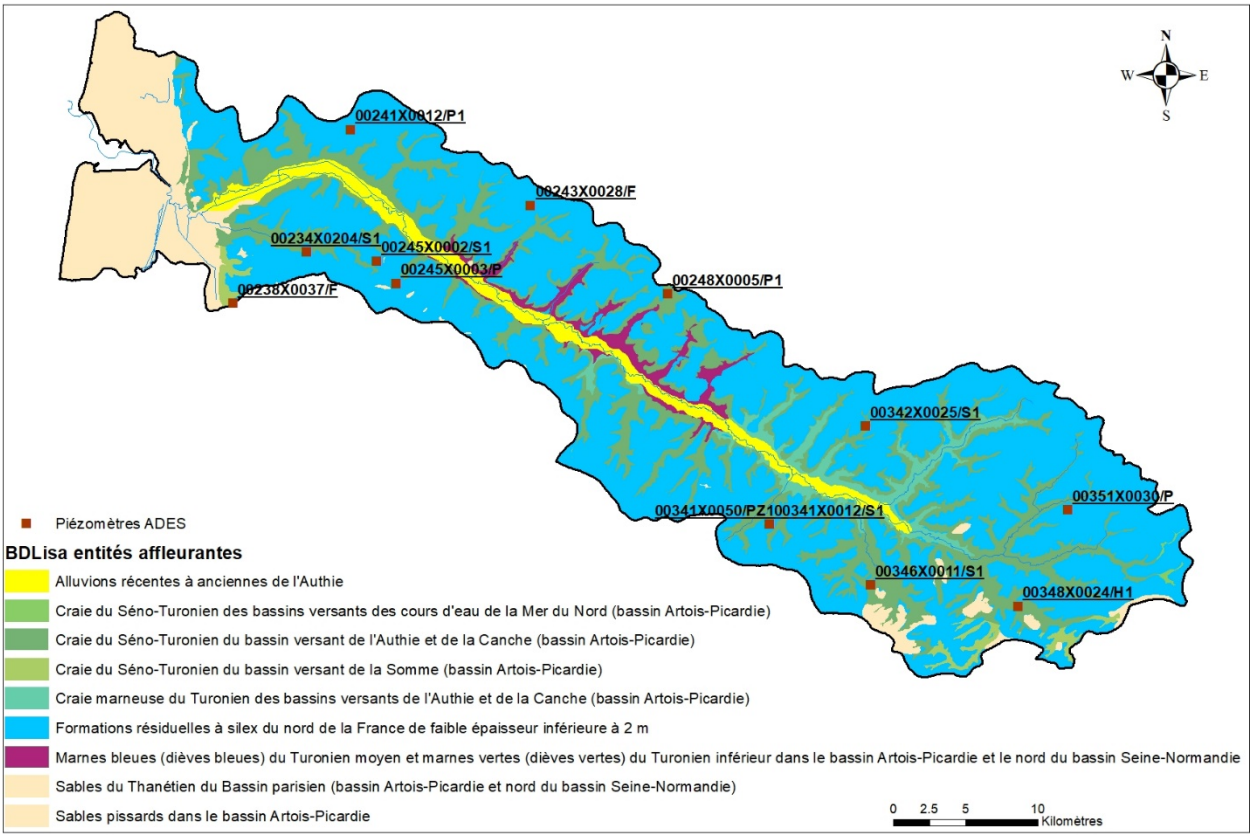


Illustration 13 : Carte des entités affleurantes sur le bassin de l'Authie issues de la BDLisa

2.4. UN CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE FAVORABLE AUX REMONTEES DE NAPPE

Ce contexte 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 (Illustration 14).

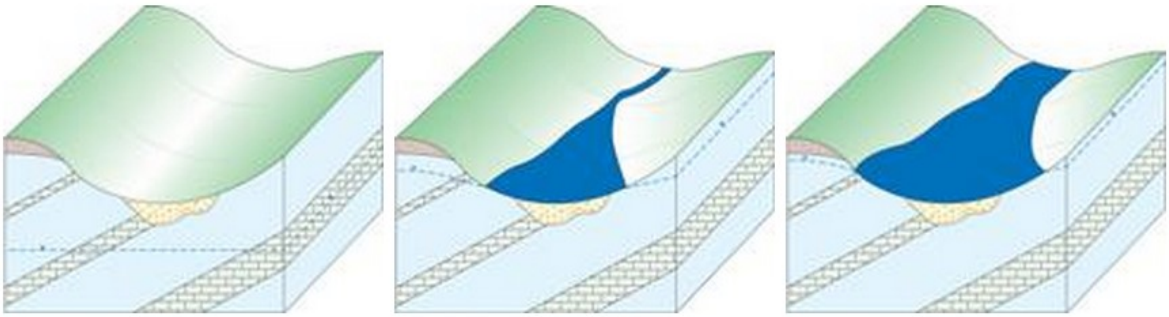


Illustration 14 : Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS)

Dans le bassin de l'Authie, les remontées de nappes sont essentiellement liées à une succession d'années humides au sein des grandes masses d'eau souterraine crayeuses du bassin soumises à des cycles pluri-annuels en termes de fluctuations piézométriques.

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

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

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).

Ces aquifères peuvent présenter une plus ou moins grande inertie des nappes. Dans ce cas, 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 (cf. Illustration 15). C'est ce que l'on appelle « l'effet mémoire » de l'aquifère.

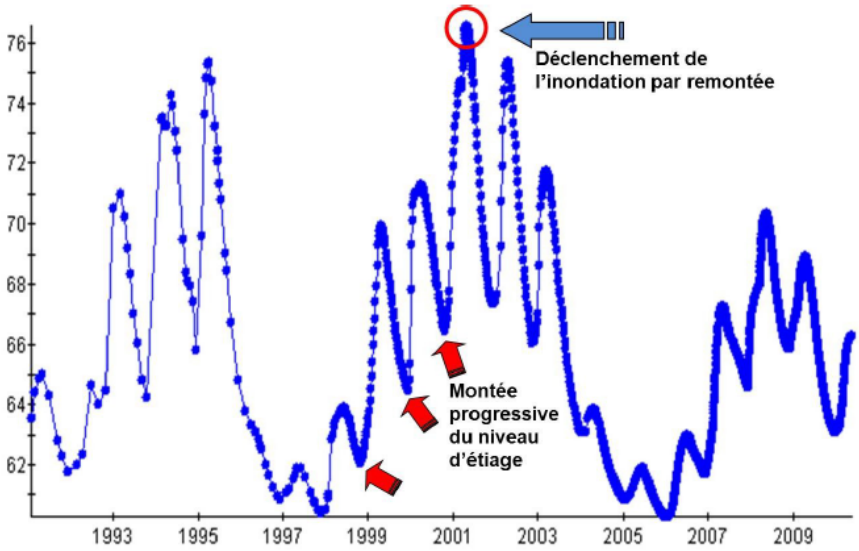


Illustration 15 : Exemple de chronique piézométrique montrant deux cycles de variation de la nappe (un annuel et un pluri-annuel) dont les effets, en s'additionnant, peuvent engendrer des débordements par remontée de nappe

3. Collecte et traitement des données

3.1. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Un travail de collecte et de traitement de toutes les données utiles à l'étude a été effectué sur le bassin de l'Authie. Il s'agit des données de mesures des points d'eau souterraine et des données topographiques.

3.1.1. Les données topographiques : le RGE Alti au pas de 5 m

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé dans la suite de l'étude est celui du RGE alti au pas de 5 m, version de janvier 2018. L'ensemble des dalles inclues à l'intérieur du bassin versant de l'Authie ont été récupérées et assemblées (Illustration 16).

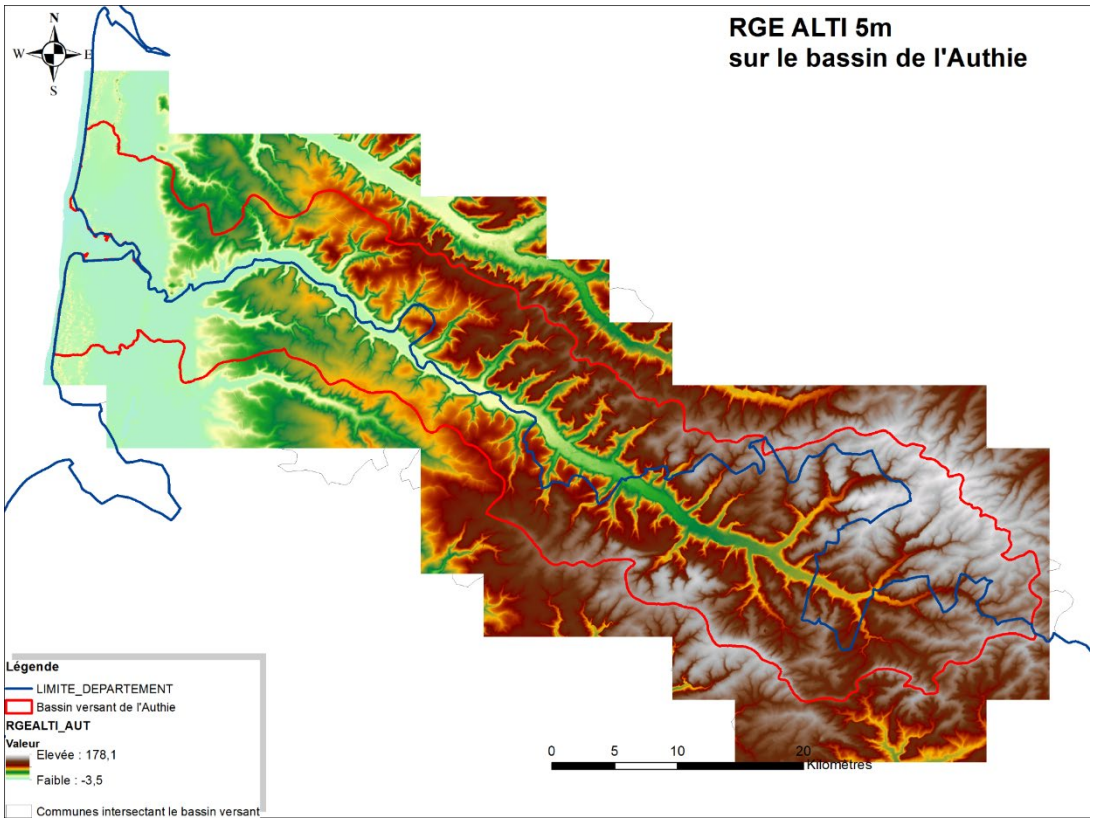


Illustration 16 : Données topographiques issues du RGE Alti 5m sur le bassin de l'Authie

L'intérêt de ces données réside dans le fait que les incertitudes sur la précision altimétrique, pour chaque maille du MNT, sont également mises à disposition (Illustration 17).

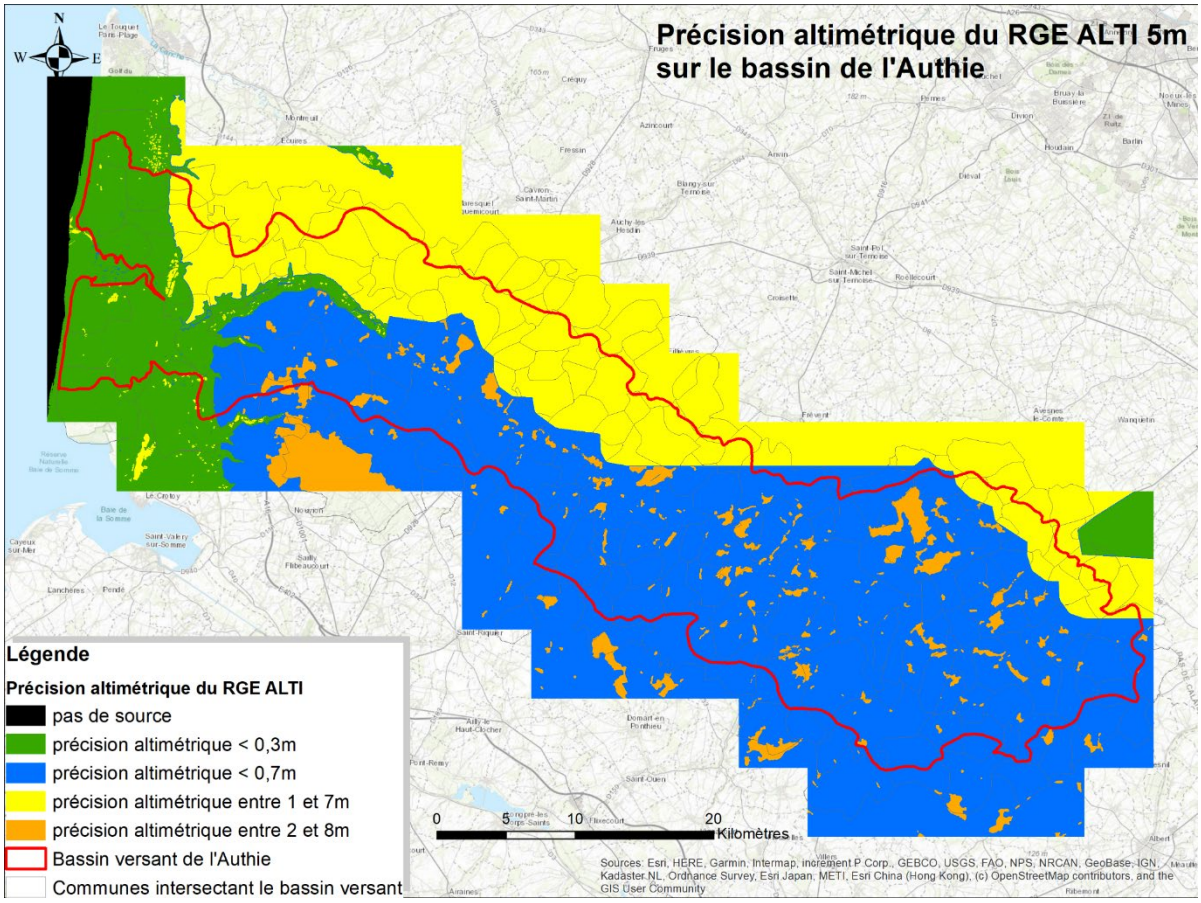


Illustration 17 : Carte relative à la précision altimétrique du RGE Alti 5m sur le bassin de l'Authie.

Trois secteurs ressortent pour le bassin de l'Authie. En bordure littorale, la zone du Marquenterre (en vert sur l'Illustration 17) présente des valeurs de cotes altimétriques d'une très bonne précision, avec une erreur *a priori* inférieure à 0,3m. En rive gauche de l'Authie et sur une large part de la moitié amont du bassin (en bleu sur l'Illustration 17), la précision altimétrique est moindre mais reste très acceptable. Enfin, la zone en jaune, en rive droite de l'Authie, présente des erreurs potentielles en z allant de 1 à 7 m. Ceci peut abaisser sensiblement la représentativité des résultats de traitements s'appuyant sur le MNT à cet endroit.

3.1.2. Les points d'eau souterraine des banques de données nationales

a) *Extraction*

Les données piézométriques, situées dans le bassin versant ou à proximité immédiate, sont extraites de la banque d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES[2]) et de la Banque du Sous-sol répertoriant les ouvrages souterrains relatifs aux eaux souterraines (BSS Eau, BRGM).

Au total, sur le bassin de l'Authie, 17 chroniques piézométriques sont répertoriées dans ADES et 63 dans BSS Eau (Illustration 18).

[2] https://ades.eaufrance.fr/Recherche

Les informations extraites comprennent, pour chaque point d'eau :

- le « code BSS », un identifiant unique pour chaque ouvrage,
- les coordonnées géographiques des points de mesures en Lambert 93,
- les dates auxquelles ces mesures ont été réalisées (date début acquisition, date fin acquisition, nombre année d'acquisition),
- la longueur des chroniques piézométriques en années et le nombre moyen de mesure par an,
- les informations relatives au nivellement de chaque ouvrage (cote NGF au droit du point et précision de la mesure).
- Les informations sur le repère de mesure
- mode de gisement // nature du point d'eau // type de connexion // profondeur d'investigation // type de point d'eau // entité hydrogéologique BDLISA

A partir de l'extraction des données piézométriques issues des banques de données nationales (ADES et BSS Eau), les statistiques suivantes sont calculées (Illustration 18) :

- les mesures des cotes piézométriques et profondeurs minimales, maximales et moyennes,
- l'écart type et la médiane de ces profondeurs et cotes piézométriques,
- le nombre total de mesures.

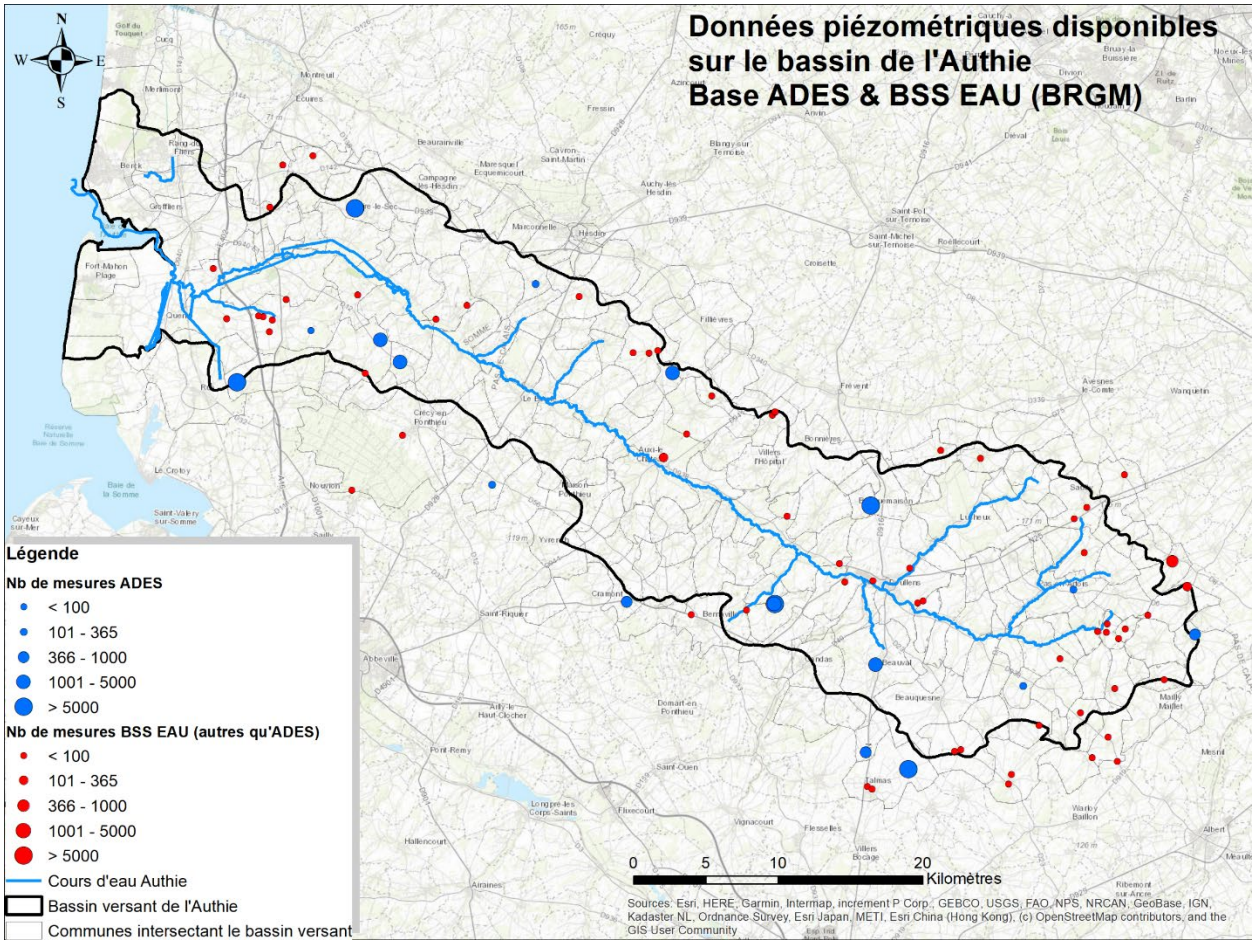


Illustration 18 : Données piézométriques issues des bases de données nationales sur le bassin de l'Authie

Ces points ont été soumis à un tri et des vérifications systématiques afin d'identifier, corriger ou écarter d'éventuelles anomalies.

b) *Sélection / Tri des données*

Ces opérations ont pour objectif d'éliminer :

- les doublons entre les différentes sources (BSS EAU et ADES),
- les points n'ayant pas de date de mesure ou ayant des données jugées aberrantes,
- les points d'eau captant des nappes captives de façon certaine (indiqué en base) ou probable (profondeur importante de l'ouvrage), ces points n'étant pas considérés dans la suite pour la problématique remontée de nappes.

Les critères de sélection semi-automatique utilisés pour la méthode nationale présentés ci-dessous ont été appliqués :

- « cote moyenne de l'eau du forage < 0 m NGF » : signe de nappe captive avec artésianisme avec débordement uniquement dû à la charge hydraulique sous pression libérée par la foration ;
- « différence (cote sol MNT- cote de l'ouvrage) >I10I » : incertitude élevée sur le positionnement de l'ouvrage ou la cote de l'ouvrage entrée en base ;
- « profondeur de l'ouvrage > 100 m » : suspicion de nappe captée trop profonde ;

- « battement maximal >30 m » : suspicion de valeurs extrêmes aberrantes ou de chroniques trop influencées par des pompages alentours ;
- « écart-type des mesures de niveau d'eau >10 m » : suspicion de valeurs extrêmes aberrantes ou de chroniques trop influencées par des pompages alentours.

c) *Correction des données*

La plupart des corrections menées a 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 pour cause d'artésianisme.

Les chroniques piézométriques ont été analysées une par une dans le but de corriger les valeurs aberrantes de cote piézométrique minimale et maximale ou les écarter le cas échéant. Quand cela a été possible, les valeurs aberrantes ont été supprimées ou corrigées et un nouveau calcul sur la base de mesures maximale et/ou minimale vérifiées a été mené.

Exemple de suppression des valeurs aberrantes :

Dans une série de mesures, des valeurs aberrantes peuvent apparaître accidentellement du fait d'une erreur de manipulation ou d'un dysfonctionnement momentané de l'appareil de mesure. Il est nécessaire d'éliminer ou de corriger ces valeurs au risque de fausser les calculs statistiques.

La procédure utilisée consiste à réaliser un prétraitement automatique des données pour éliminer les valeurs aberrantes (développement de scripts R) puis de visualiser au cas par cas les chroniques piézométriques pour les anomalies restantes. Enfin, si cela semble pertinent, une correction manuelle des cotes maximale, minimale ou moyenne est effectuée. L'Illustration 19 montre un exemple de chronique problématique ainsi que le résultat de la correction.

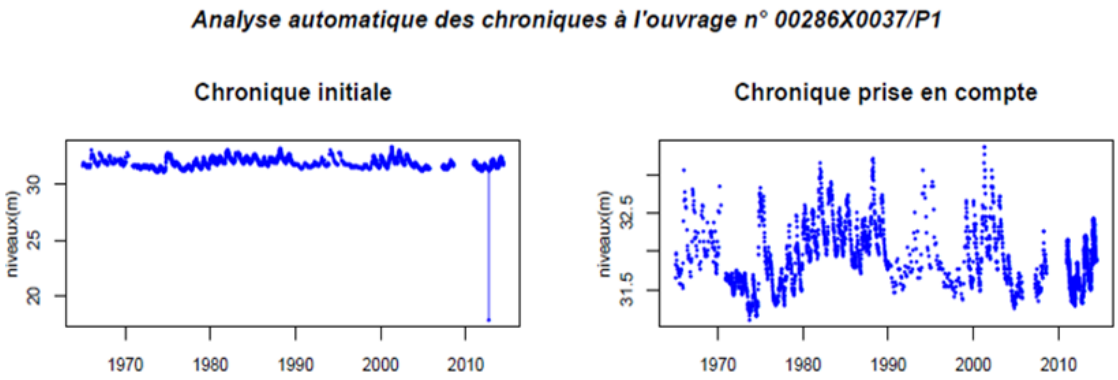


Illustration 19 : Chroniques avant (à gauche) et après la suppression des outliers (à droite).

Au final, 95 points d'eau tirés d'ADES ou de la BSS Eau ont été sélectionnés pour la suite de l'étude.

3.1.3. Les cartes et campagnes piézométriques en période de hautes eaux

Les campagnes et cartes piézométriques réalisées en période de hautes eaux recoupant le bassin de l'Authie ont été inventoriées et sont listées ci-dessous :

- Carte réalisée en 1995 du niveau des plus hautes eaux de la nappe de la Craie en région Nord-pas-Calais ;
- Carte des très hautes eaux 2001-2002 , réalisée par Caous *et al.* (2001) suite aux importantes crues de nappes de l'automne-hiver 2000-2001 et du printemps 2001 qui ont provoqué des inondations sur l'ensemble du bassin Artois-Picardie (Illustration 20). Une mise à jour a ensuite été apportée par le BRGM sur certains secteurs ayant présenté des valeurs piézométriques encore supérieures en 2002 ;
- Carte des hautes eaux réalisée par Cardin *et al.* (2009) en mai 2009 (Illustration 21) ;
- Carte des hautes eau 2016 dans le Marquenterre, réalisée par Bault *et al.* (2017).

Après comparaison de l'ensemble de ces cartes, le choix a été fait de n'utiliser que les cartes piézométriques de la Craie de 2001-2002, du fait de son caractère exceptionnel, et du Marquenterre 2016, secteur sans autre donnée de ce type.

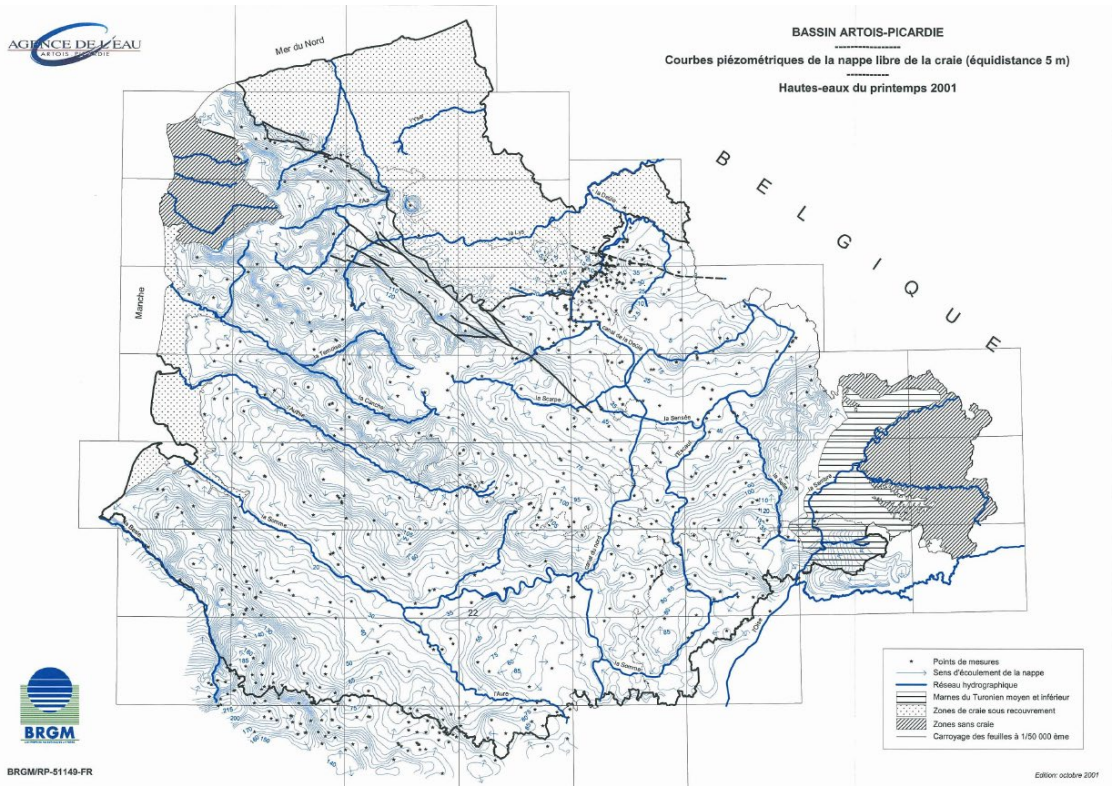


Illustration 20 : Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie (équidistance 5m) – Hautes eaux du printemps 2001 (Caous et al., 2001)

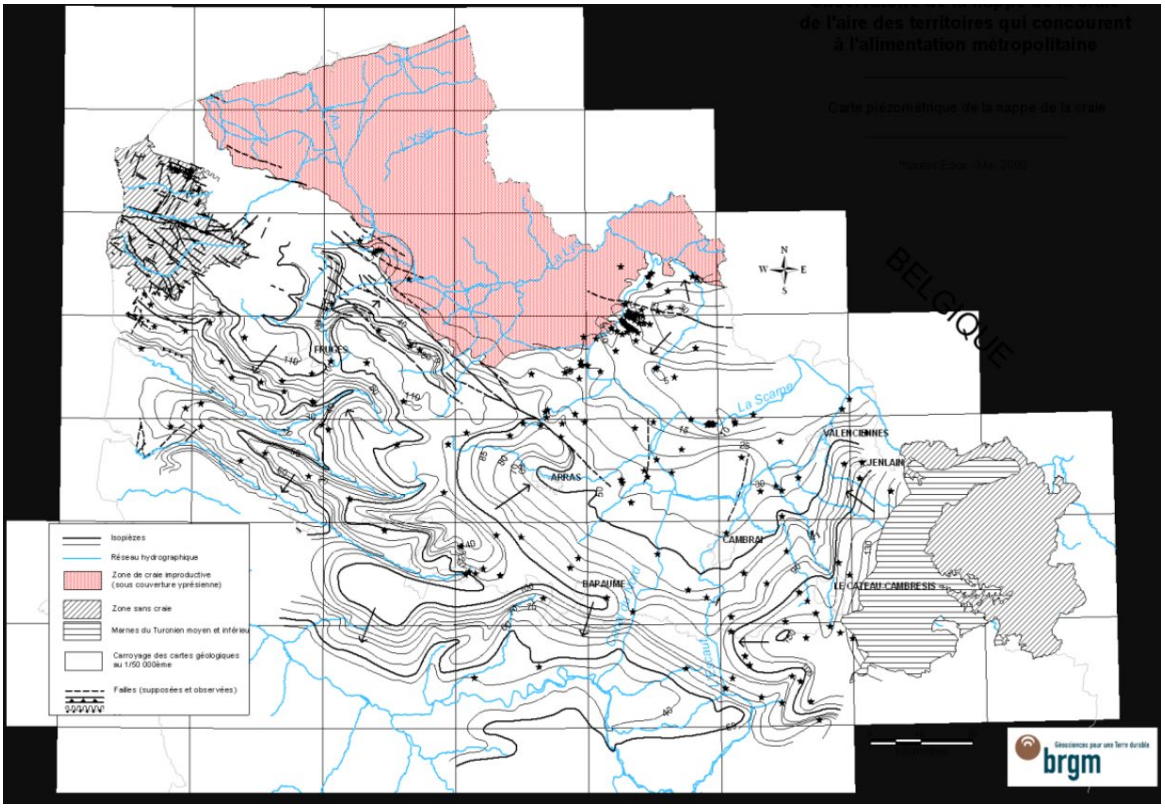


Illustration 21 : Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie – Hautes eaux du printemps 2009 (Cardin et al., 2009)

Le résultat de l'extraction des isopièzes selon le contour du bassin de l'Authie est présenté dans l'Illustration 22 ci-dessous. Les isopièzes recouvrent la quasi-totalité du bassin, à l'exception de sa bordure littorale nord.

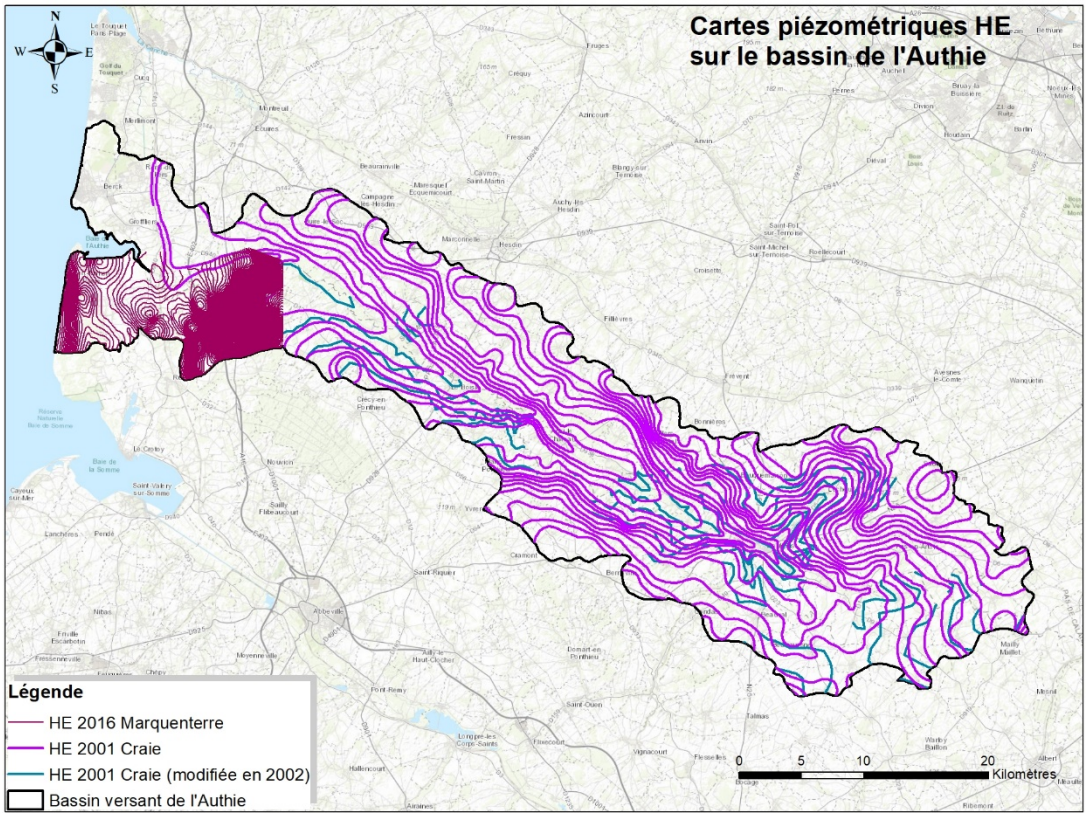


Illustration 22 : Cartes piézométriques HE 2001 de la craie et 2016 du Marquenterre

Lorsque ces données étaient disponibles, les points de mesure de ces campagnes piézométriques ont également été collectées.

Les données de la campagne HE de mai 2009 (17 points dans l'emprise du territoire), n'apportent aucune plus-value par rapport aux autres mesures répertoriées dans les bases nationales pour ces mêmes points, car leurs niveaux piézométriques 2009 sont tous inférieurs par rapport à ce qui avait été mesuré dans le passé, notamment en 2001-2002.

Seuls les points des autres campagnes piézométriques et qui ne figuraient pas déjà dans les bases ADES et BSS Eau ont été ajoutés au jeu de données, **soit 9 points 2001-2002 et 45 points Marquenterre 2016** (Illustration 23).

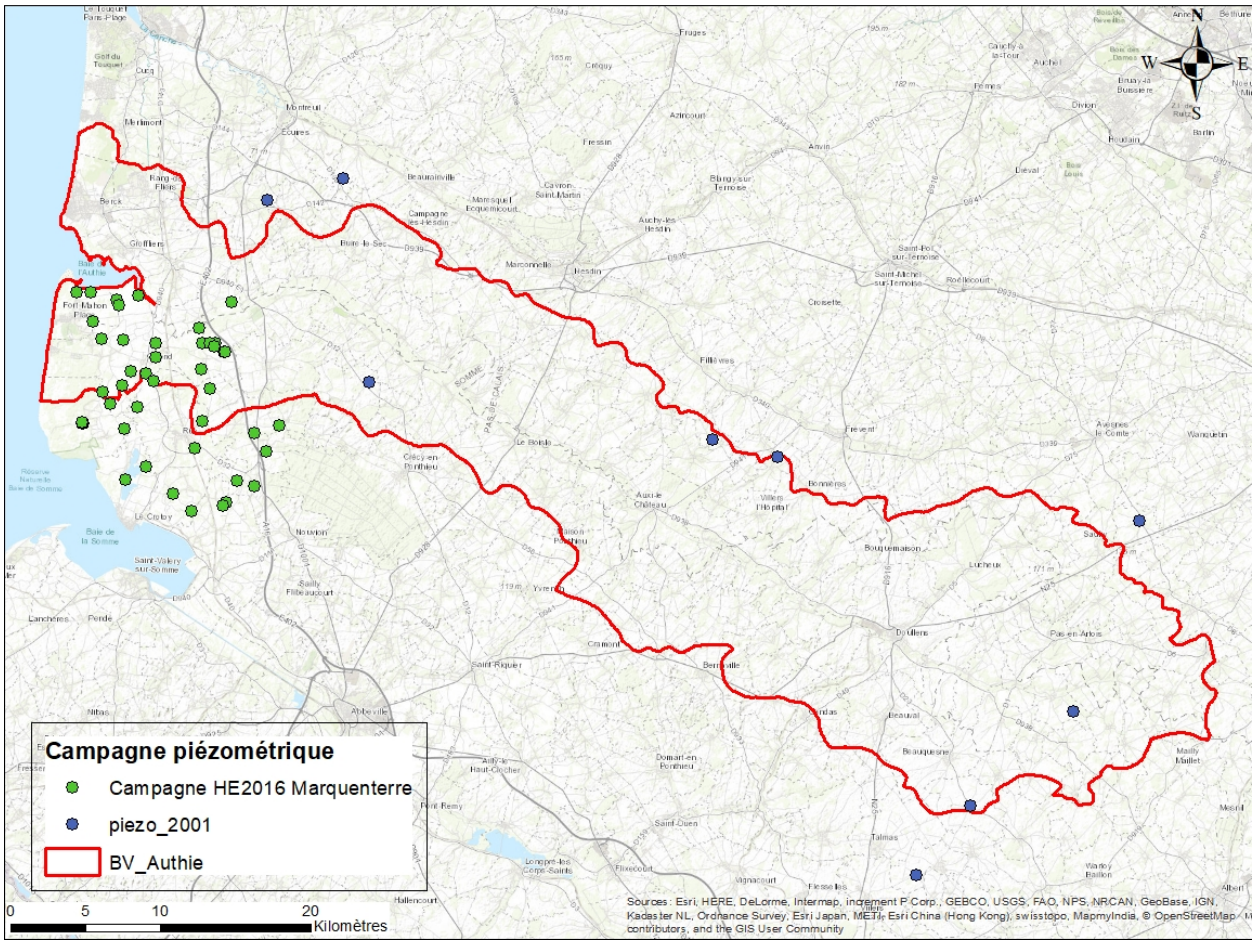


Illustration 23 : Points complémentaires issus des campagnes piézométriques HE de la craie 2001 et du Marquenterre

3.1.4. Les points BSS (hors ADES et BSS EAU)

Les points d'eau avec une mesure ponctuelle dans la BSS (Banque du Sous-Sol) ont été extraits, en excluant les sources (Illustration 24).

Les critères de sélection initiale de ces points sont identiques à ceux utilisés pour les points ADES et BSS EAU (nappe libre, profondeur du forage < 100m, etc…).

Par défaut, étant donné leurs caractéristiques (méconnaissance quasi-systématique de la nappe captée, une seule mesure piézométrique réalisée généralement influencée par la foration), ces points sont considérés comme des points peu fiables par défaut.

Au final, 536 points de la BSS, non présents dans les bases ADES et BSS Eau, ont été inclus dans le jeu de données (Illustration 24).

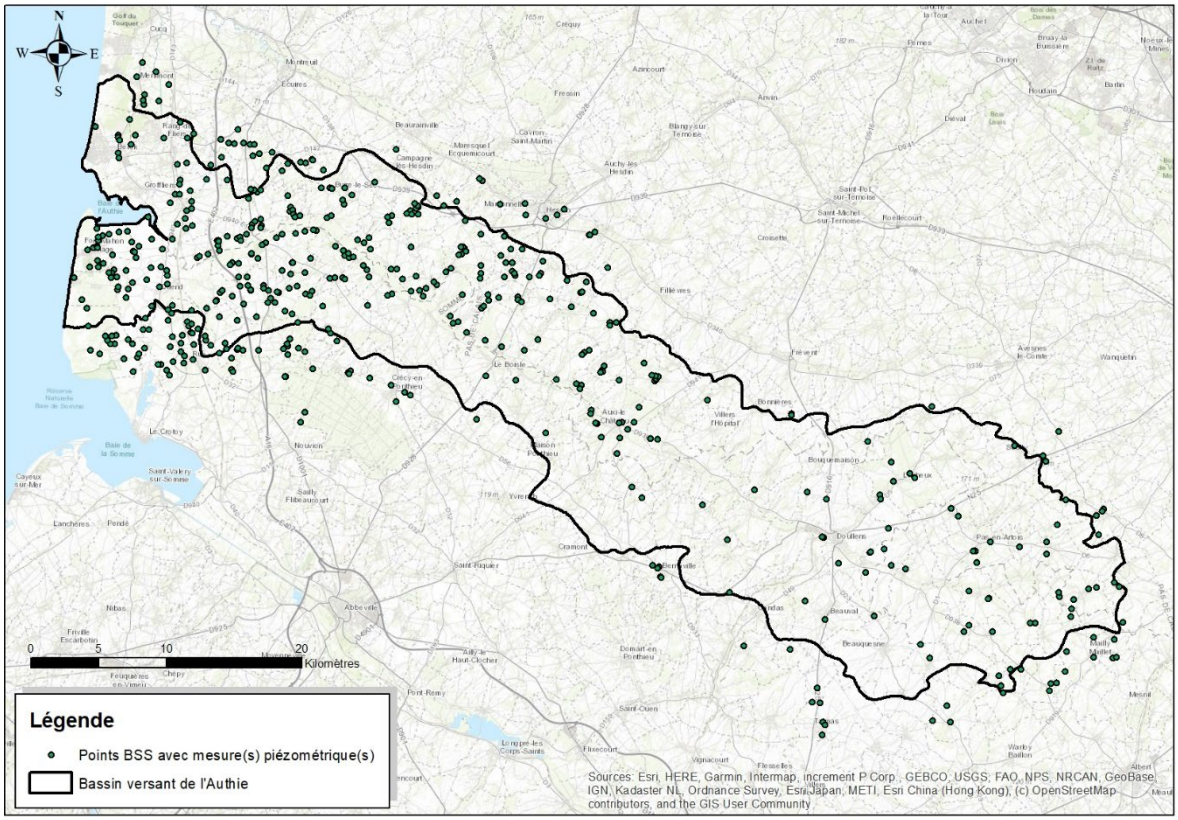


Illustration 24 : Points tirés de la BSS (hors ceux déjà dans ADES ou dans BSS EAU) localisés dans ou à proximité du bassin versant de l'Authie

3.1.5. Enquête, réunions de travail et données historiques

a) *Enquête adressée aux collectivités*

Une enquête a été adressée à toutes les collectivités du bassin de l'Authie afin de récolter des informations sur les remontées de nappe. Une notice explicative a été jointe à cette enquête.

Ces deux documents ont été mis en annexe 1 du présent rapport.

Au cours de ces différentes réunions, un certain nombre de communes a rapporté toutes les informations relatives aux inondations, ruissellements, débordements de cours d'eau et remontées de nappes ayant eu lieu sur leur territoire. Ces informations, s'appuyant sur les plans cadastraux des communes concernées, sont synthétisées en annexe 2 et dans le Tableau 1)

b) *Réunions de travail par comité géographique*

Des réunions de travail et de consultations avec les communes ont été organisées par communauté de communes, du 23 au 26 septembre 2019 puis une dernière le 10 octobre 2019 (organisation des comités géographiques dans le Tableau 2). Après une présentation générale de l'étude, des échanges avec les représentants communaux présent ont été engagés.

Réunions	Invités	Dates et lieux	nbre de communes concernées	nbre de communes ayant fait l'objet de déclaration CATNAT IRNP
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes du Ponthieu Marquenterre et ses communes concernées par l'étude	**25 septembre 2019 à 9h30** dans une salle de la communauté de communes située au 33 route du Crotoy, 80120 Rue	**25**	**10**
Réunion de travail et de concertation	Communauté d'Agglomération des deux Baies en Montreuillois et ses communes concernées par l'étude	**23 septembre 2019 à 14h00**, à la salle Raymond LAVOGEZ, rue du Bras d'Or 62170 ÉCUIRES	**14**	**2**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes du Territoire Nord Picardie et ses communes concernées par l'étude	**24 septembre 2019 à 9h00**, à la salle communale, rue de l'église à HEM-HARDINVAL	**37**	**3**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes du Pays du Coquelicot et ses communes concernées par l'étude	**26 septembre 2019 à 9h00,** à la salle Birmingham à la mairie d'Albert 2 Place Emile Leturcq - 80300 ALBERT	**18**	**2**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes des Campagnes de l'Artois et ses communes concernées par l'étude	**26 septembre 2019 à 14h00**, à la salle rouge de l'Hôtel Communautaire sis 1050, Avenue François Mitterrand - 62810 AVESNES LE COMTE	**26**	**1**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes du Sud-Artois et ses communes concernées par l'étude		**19**	**0**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes des 7 Vallées et ses communes concernées par l'étude	**10 octobre 2019 à 9h00**, à la salle de réunion située à la Maison des Associations, 218 rue de Saint André à CAMPAGNE-LES-HESDIN	**21**	**2**
Réunion de travail et de concertation	Communauté de communes du Ternois et ses communes concernées par l'étude	**10 octobre 2019 à 14h00**, à la salle des fêtes d'Auxi le Château sise cour de la mairie, Place de l'Hôtel de Ville - 62390 AUXI LE CHATEAU	**19**	**3**

Tableau 2 : Organisation des réunions de travail par communauté de communes

c) *Restitution des informations*

Vingt-neuf communes du bassin de l'Authie (Illustration 25) ont retranscrit toutes les informations relatives aux inondations par ruissellement, débordements de cours d'eau et remontées de nappe ayant eu lieu sur leur territoire.

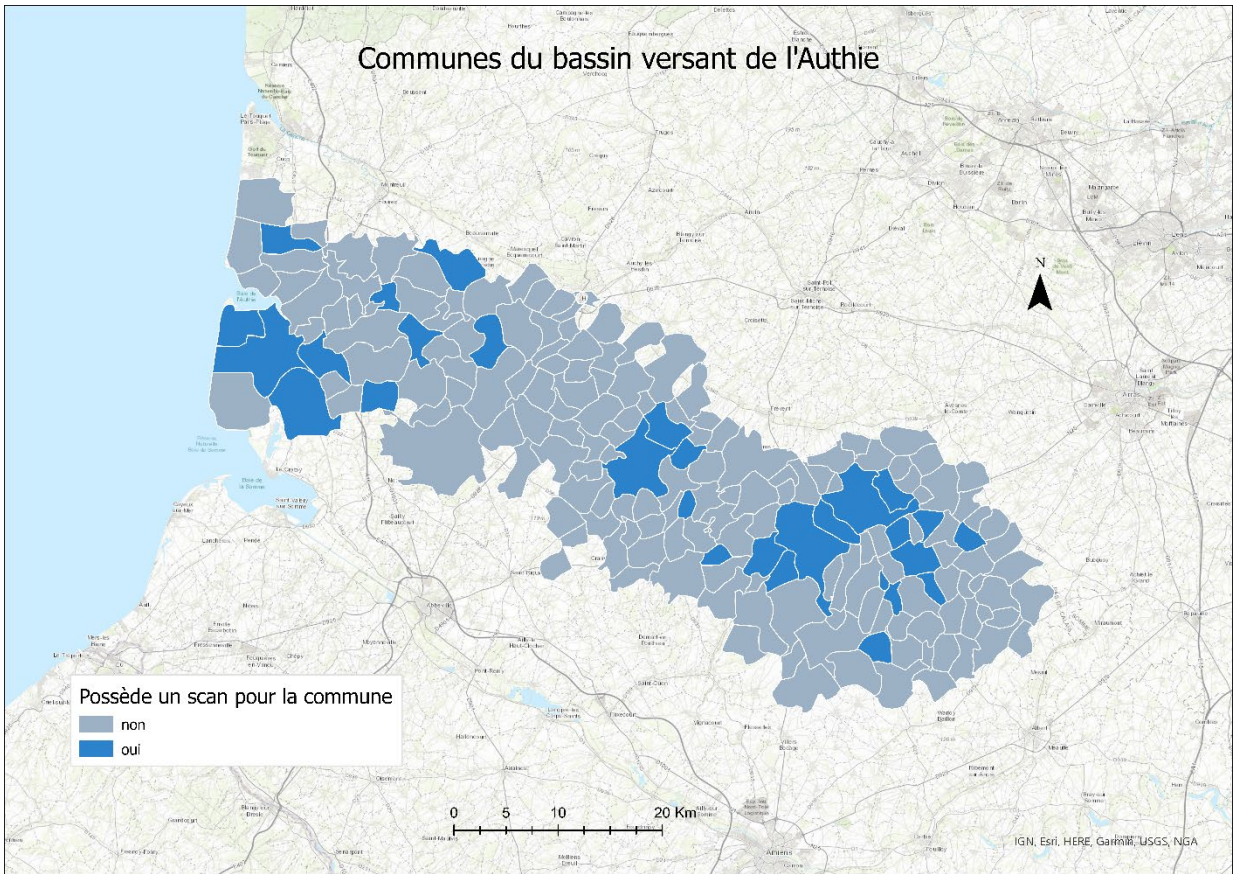


Illustration 25 : Communes pour lesquelles le BRGM possède des informations relatives aux inondations par remontées de nappes

Les informations recueillies se trouvent sur des versions papiers des plans cadastraux de chacune de ces communes (un exemple en Illustration 26).

Afin d'enrichir le jeu de données déjà existant d'une information fiable collectée auprès des acteurs locaux, une digitalisation des informations relatives aux remontées de nappes a été effectuée. Par la suite, ces informations digitalisées seront généralement considérées fiables par défaut, car provenant d'une source locale et d'une observation directe.

Néanmoins, toutes les annotations ne sont pas explicitées et la nature de l'évènement représenté laisse parfois place à un certain niveau d'interprétation. A l'inverse, il peut être explicitement annoté que la localisation d'un événement est peu précise. Pour prendre en compte cette disparité des informations, une distinction de fiabilité a été ajoutée au jeu de donnée produit, variant entre « Forte » et « Faible ». Ces adjectifs, appliqués à dire d'expert, ont pour but de maintenir la cohérence avec des données déjà disponibles situées à proximité.

Illustration 26 : Exemple de scan d'un plan cadastral, commune de Doullens

Les plans ont donc été scannés puis importés dans un logiciel de SIG afin d'être géoréférencés. Dans un premier temps les informations sélectionnées ont été vectorisées en format de shapefile sous forme de point, ligne ou polygone.

Puis, une transformation des polygones et lignes en un ensemble de points a été réalisée pour permettre l'attribution de la valeur de la cote altimétrique ainsi que l'incorporation de ces données au jeu de données global déjà existant qui est ponctuel. Les polygones ont donc été transformé en une grille de points avec une distance de 50 mètres par 50 mètres et les lignes transformées en une série de points espacés tous les 50 mètres (Illustration 27).

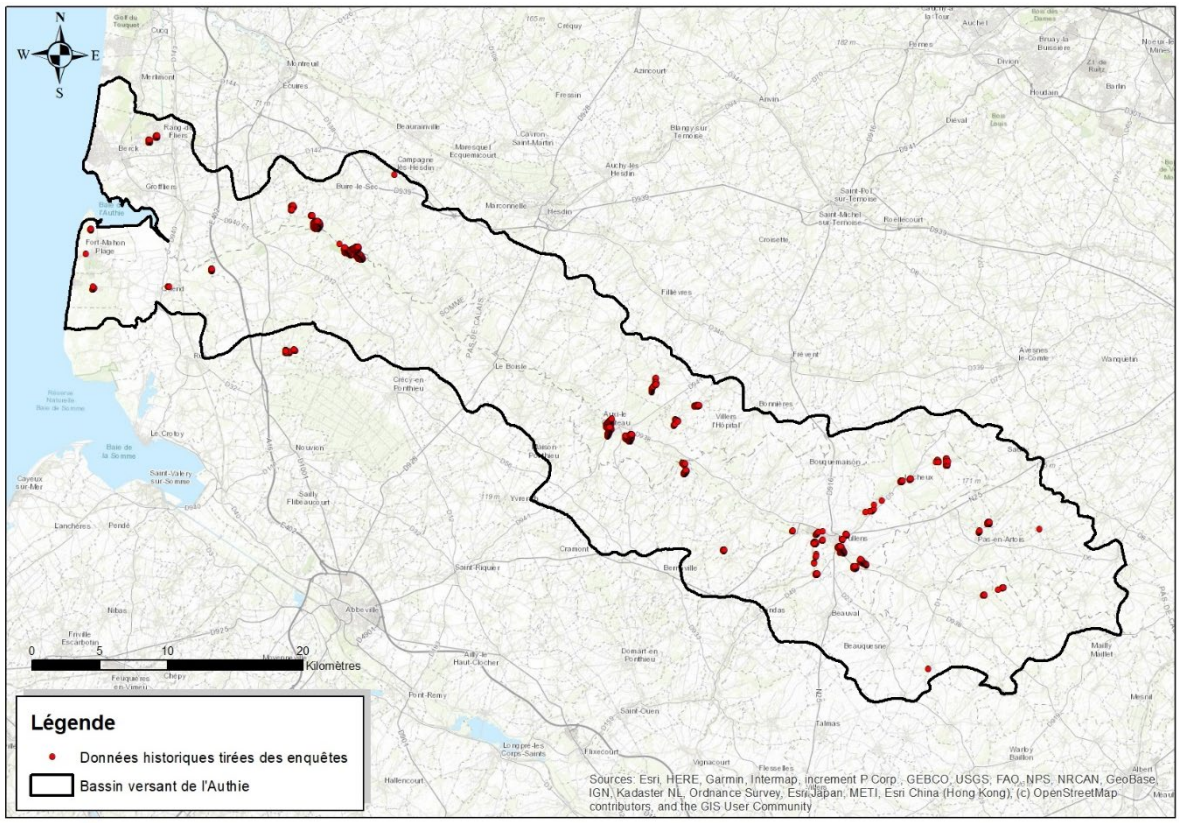


Illustration 27 : Points tirés des enquêtes menées auprès des communes du bassin

Une fois les données historiques intégralement digitalisées en un shapefile de points, le calcul de la cote altimétrique en m NGF est effectué à partir du RGE ALTI®. La valeur du RGE ALTI® a donc été attribué à chaque points, à l'exception des éléments « caves inondées » auxquelles a été soustrait une différence de 2 mètres.

Au final, 979 points ont été créés permettant d'identifier des zones ayant fait l'objet d'une inondation potentiellement liée à une remontée de nappe.

Les données des fiches de laisse de crue de 2001 ont été intégrées fin de compléter les données historiques.

Les points provenant de ces deux types d'information sont cartographiés sur Illustration 28.

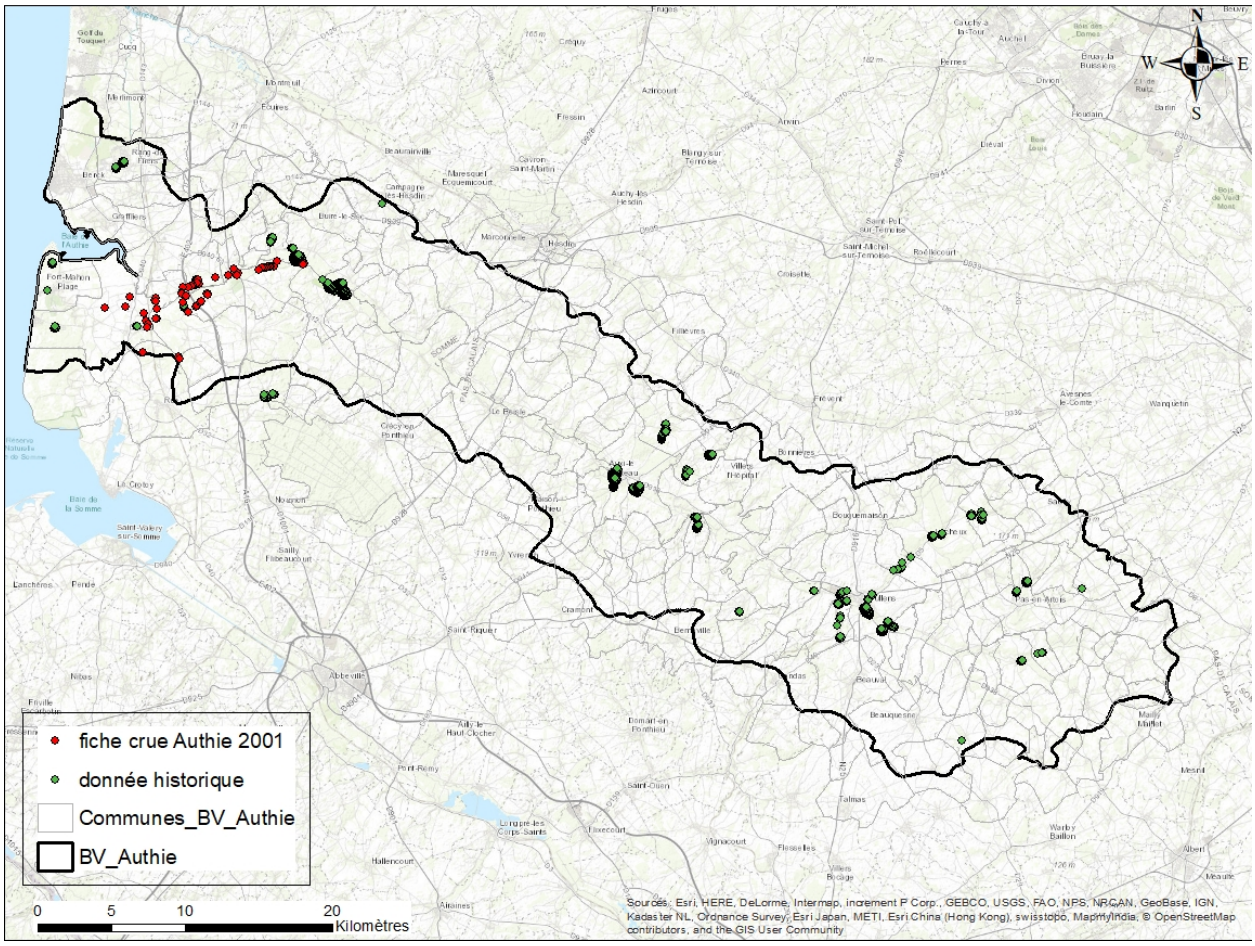


Illustration 28 : Données d'inondation historique recensées sur la bassin de l'Authie

3.1.6. Sources

Les informations concernant la localisation des sources sur le bassin proviennent de deux sources d'information (Illustration 29) :

- Un inventaire des sources identifiées dans la BSS : 47 sources inventoriées ;
- Les sources identifiées dans la BD TOPO® de l'IGN : 60 sources (après élimination de 14 doublons avec les données précédentes).

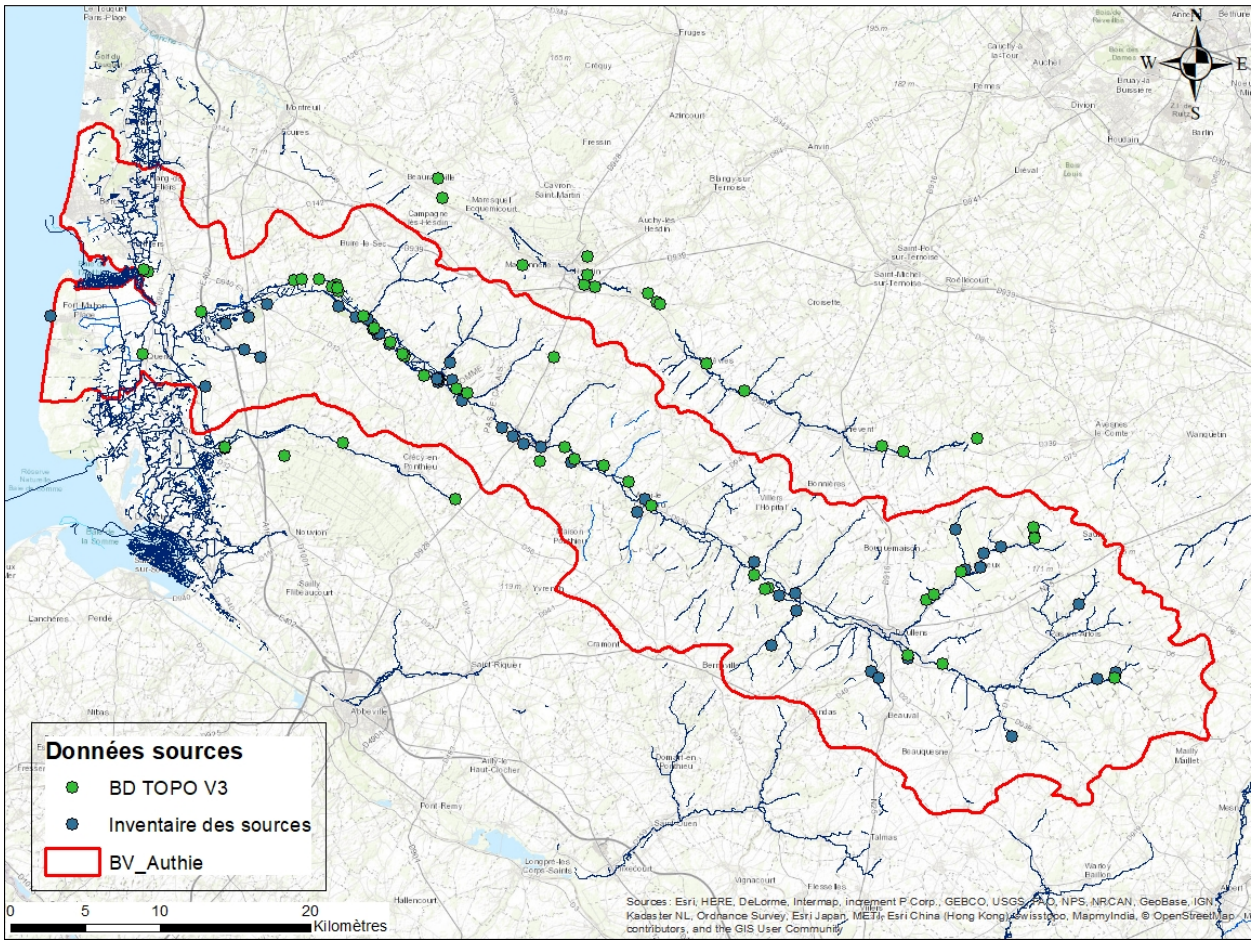


Illustration 29 : Inventaire des sources sur le bassin de l'Authie

Ces 107 sources, auxquelles les cotes altimétriques tirées du RGE ALTI® ont été systématiquement attribuées, ont ensuite été intégrées au jeu de données global qui servira à l'interpolation géostatistique.

3.1.7. Données de la BD TOPAGE®

La BD TOPAGE®, nouveau référentiel hydrographique français en remplacement du référentiel BD CARTHAGE®, a été exploité en avant-première (accès aux données avant sa sortie officielle le 24 juillet 2020).

Ce nouveau jeu de données présente les avantages d'une précision métrique (cohérente avec le RGE ALTI®) et d'une meilleure exhaustivité (combinaison des tronçons BD CARTHAGE® et BD TOPO®).

Une étude récente visant à identifier les lieux d'échanges potentiels « Eau souterraine / eau de surface » dans le bassin Artois-Picardie (Brugeron *et al.*, 2020) a permis de conclure sur le soutien important de la nappe de la Craie vis-à-vis des cours d'eau de l'ouest du bassin, dont l'Authie et ses affluents. Considérant également que peu de terrains véritablement imperméables n'affleurent dans le bassin de l'Authie, il a été décidé d'intégrer ces données de surface dans le jeu de données qui servira à interpoler la cote piézométrique extrême.

d) *Tronçons de cours d'eau*

Un traitement simple a consisté à éliminer les 992 tronçons artificialisés (canaux, conduite buse, etc.) répertoriés dans le bassin de l'Authie. Les tronçons restant ont été « tronçonnés » tous les 1km pour la génération des points qui serviront à l'interpolation.

e) *Surfaces hydrographiques*

Les surfaces hydrographiques de la BD TOPAGE® ont été sélectionnées selon les critères énumérés dans le Tableau 3.

SURFACE HYDROGRAPHIQUE BD TOPO®				
NATURE	**ORIGINE**	**nombre d'entités**	**sélection**	**commentaires**
Canal	*Naturelle non aménagée*	*5*	*non retenu*	*complètement artificiel en réalité*
Ecoulement naturel	Naturelle non aménagée	154	retenu	
Estuaire	Naturelle non aménagée	115	retenu	
Marais	Naturelle non aménagée	40	retenu	
Mare	Artificielle	4	retenu	difficile de prouver le 100% artificiel
Mare	Inconnue	51	retenu	
Mare	Naturelle non aménagée	667	retenu	
Plan d'eau de gravière	Artificielle	17	retenu	intérêt même si artificiel
Plan d'eau de gravière	Naturelle non aménagée	3	retenu	
Réservoir-bassin	Artificielle	406	retenu	intérêt même si artificiel
Réservoir-bassin	Inconnue	44	retenu	
Réservoir-bassin	Naturelle non aménagée	1	retenu	
Réservoir-bassin d'orage	*Artificielle*	*104*	*non retenu*	*complètement artificiel*
Réservoir-bassin piscicole	*Artificielle*	*38*	*non retenu*	*complètement artificiel*
Retenue	Artificielle	16	retenu	intérêt même si artificiel
Retenue	Inconnue	92	retenu	
Retenue	Naturelle non aménagée	2346	retenu	

Tableau 3 : Critères retenus pour la sélection des surfaces hydrographiques de la BD TOPAGE®

Des points ont ensuite été générés de manière à conserver le plus possible la forme globale des surfaces hydrographiques sélectionnées. Pour ce faire, trois méthodes ont été appliquées pour créer ces points :

- Aléatoire : pour une densité minimale de 1 point tous les 2500m² et une distance minimale de 100m entre les points ;
- Au droit des contours : tous les 1000m si possible ;
- Au centroïde de chaque polygone (pour remplir les tous petits polygones).

Une analyse particulière a ensuite été menée sur les surfaces de type retenue/réservoir. En effet, ceux plutôt situés dans les points hauts, proches des lignes de crêtes, sont probablement peu naturels et donc à éliminer. Le calcul d'un indice géomorphologique, la classification paysagère de Jenness ou indice de position topographique TPI (Jenness, 2004), a donc été mené sur la base du RGE ALTI® 5m. Cet indice permet de classer les types de géomorphologies selon que l'on se situe plutôt en bas des vallées ou au niveau des lignes de crêtes.

Ensuite, un croisement avec les valeurs d'altitudes du RGE ALTI® a été réalisé, sachant que les secteurs hauts du bassin sont globalement tous à des altitudes entre 100m et 170m.

Au final, 290 points type retenue/réservoir ont été écartés car se situant dans la classe paysagère « crête topographique » ou sur d'autres types de points hauts isolés à des altitudes dépassant 100m (Illustration 30).

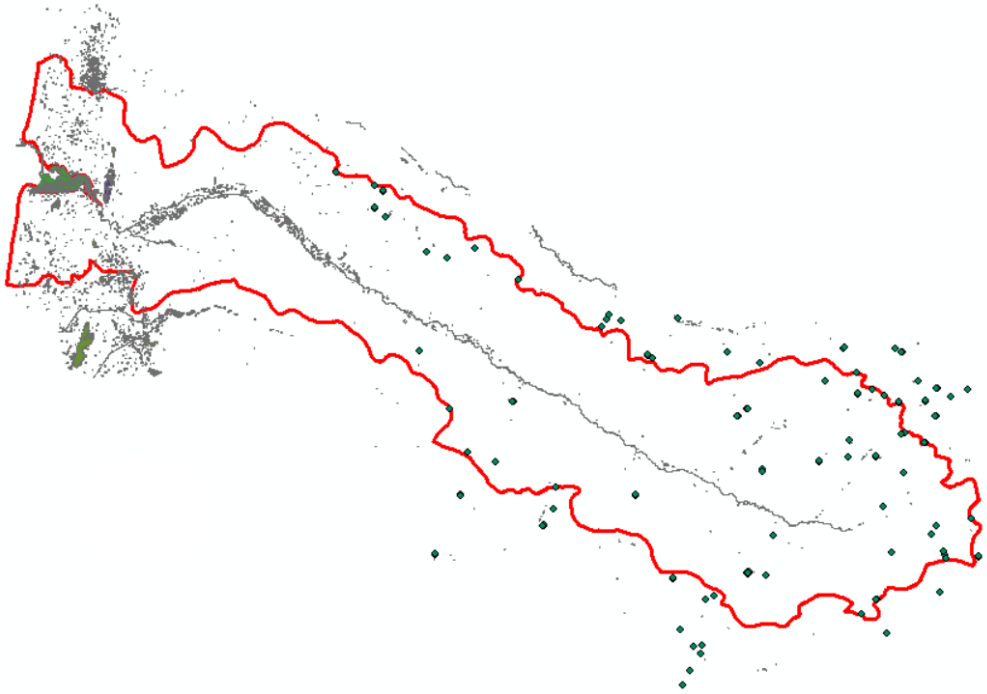


Illustration 30 : Localisation des points retirés de la sélection des surfaces hydrographiques selon le critère de position topographique

En parallèle, un croisement avec les données du Référentiel national des Obstacles à l'Ecoulement (ROE) présents dans le bassin a permis d'éliminer les retenues, probablement artificielles, situées au droit des obstacles type « barrage ». 39 « barrages » sont recensés dans l'emprise de l'étude (Illustration 31).

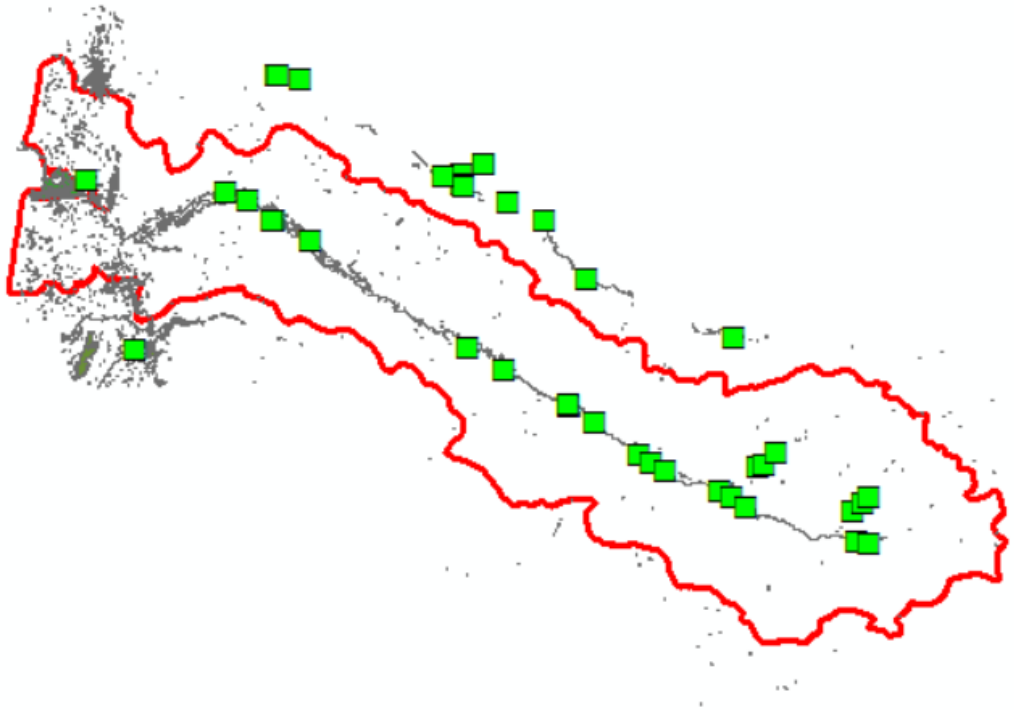


Illustration 31 : Localisation des réservoirs type « barrage » recencés dans le Référentiel des Obstaclement à l'Ecoulement, au sein ou proche du bassin versant de l'Authie

Seuls 31 points associés à des retenues/réservoirs ont été supprimés, la grande majorité des obstacles à l'écoulement recensés se situant le long du cours d'eau et non au contact de surfaces hydro.

Enfin, 81 autres points de surface hydro type « réservoir/retenue » ont été supprimés car situés sur des entités hydrogéologiques BDLISA affleurantes et imperméables. Les interactions avec le sous-sol y sont supposées nulles ou négligeables.

f) *Synthèse*

Au total, 9628 points associés aux tronçons de cours d'eau « naturels » et 16 659 points associés aux surfaces hydrographiques « naturels » de la BD TOPO® sur le BV de l'Authie ont été intégrés au jeu de données (Illustration 32).

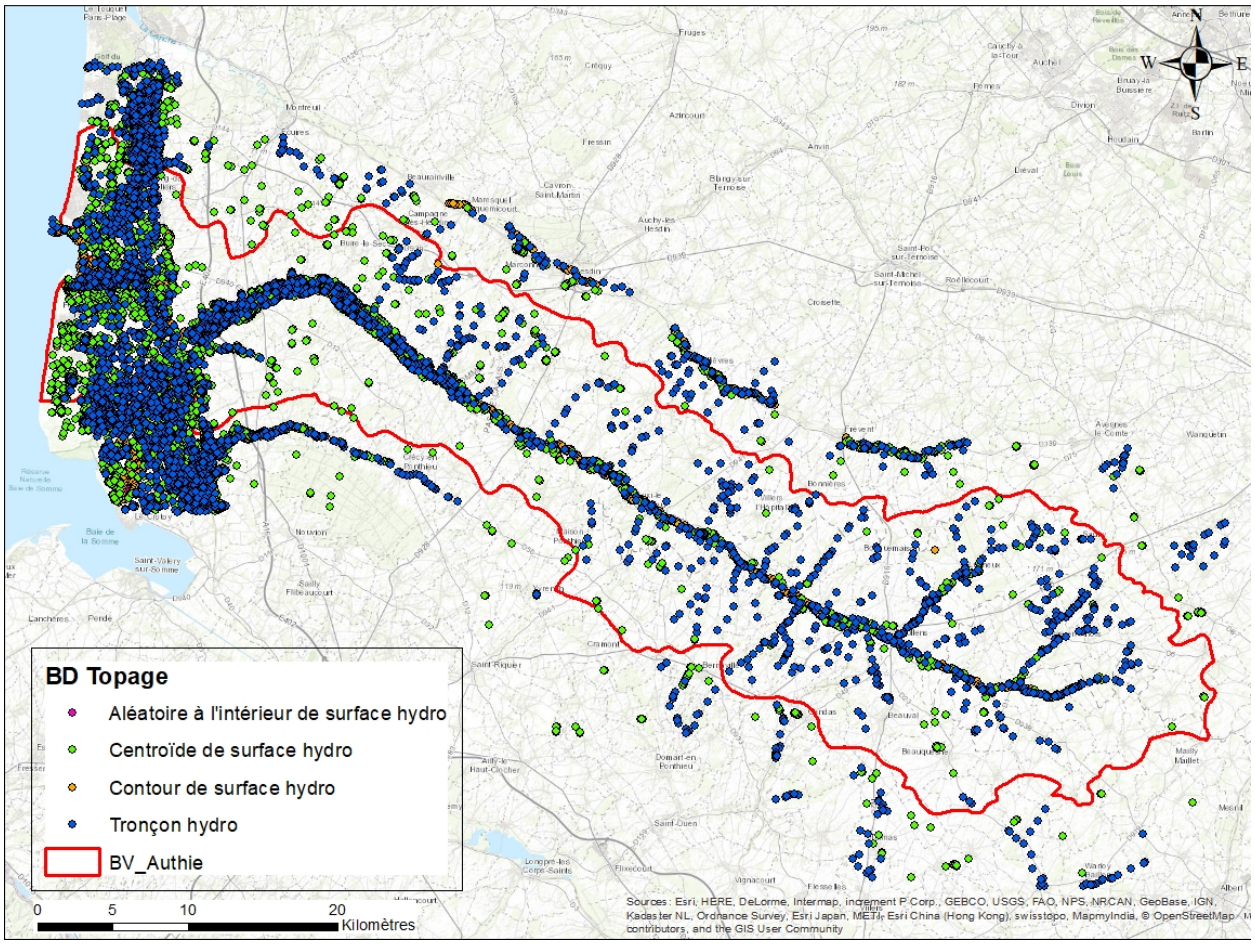


Illustration 32 : Points sélectionnés issus de la BD TOPAGE®

3.1.8. Images satellite

Les images SAR (en français RSO: radar à synthèse d'ouverture) librement disponibles de la mission Copernicus Sentinel-1 (bande C) ou Sentinel 2 optique peuvent être utilisées pour identifier les zones inondées (Bessière et al, 2019). Il s'agit par défaut d'images couvrant 250 km de fauchée avec une résolution d'environ une quinzaine de mètres, disponibles tous les 6 jours. Le principe consiste à identifier les modifications de la rétrodiffusion RSO, qui sont attribuées à la présence d'eau de surface. Toutefois cette eau peut provenir de l'irrigation (voire de la pluie). Il faut donc choisir la période d'utilisation de ces données, et que l'eau présente en surface le soit sur une période suffisamment longue.

Le traitement réalisé est décrit au chapitre suivant.

A noter que l'information fournie par ce type d'images et de traitement n'est pas localisée très précisément, en tant que point (X,Y) avec une cote de débordement (comme le serait un piézomètre). Le résultat fourni est plutôt sous forme de plusieurs pixels formant un polygone à l'intérieur duquel on a (on aurait) débordement.

3.1.9. Autres données collectées

a) *Le trait de côte*

En l'absence d'un référentiel national du trait de côte, la limite vectorisée utilisée est celle issue du trait de côte HISTOLITT®. Il s'agit d'une coproduction du Shom[3] et de l'IGN. Il est essentiellement composé d'éléments issus de la numérisation des cartes marines aux échelles supérieures au 1/25 000. Dans certaines zones portuaires, des cartes aux échelles du 1/5 000 ont été utilisées.

b) *L'Atlas des Zones Inondables de la vallée de l'Authie*

L'Atlas des Zones Inondables (AZI) de la vallée de l'Authie sera utilisée comme données de validation. Il a été élaboré en mai 2005 par le Conseil Général du Nord-Pas de Calais sur 13 communes du Pas de Calais et 9 communes de la Somme.

Parmi les aléas répertoriés dans cet atlas, se trouvent ceux concernant les inondations par débordement de cours d'eau et par remontées de nappes naturelles.

c) *L'Inventaire des zones à dominante humide du bassin Artois-Picardie*

Les données issues de l'inventaire des zones à dominante humide sur le bassin Artois-Picardie (Agence de l'Eau Artois Picardie, 2008) ont été extraites sur le bassin de l'Authie et seront également confrontées à la carte finale.

Il est difficile d'établir une véritable relation avec la nappe à partir des informations de cette base (Illustration 33). Pour la présente étude, plus que leur présence, c'est l'absence de zones potentiellement humides qui constitue un marqueur intéressant. En effet, la présence d'une zone humide n'induit pas systématiquement un lien fort avec le milieu souterrain (et donc des propriétés favorisant d'éventuelles remontées de nappe) mais leur absence peut-être le signe de terrain ne favorisant les interactions avec le sous-sol que de façon assez limitée.

[3] Service hydrographique et océanographique de la marine

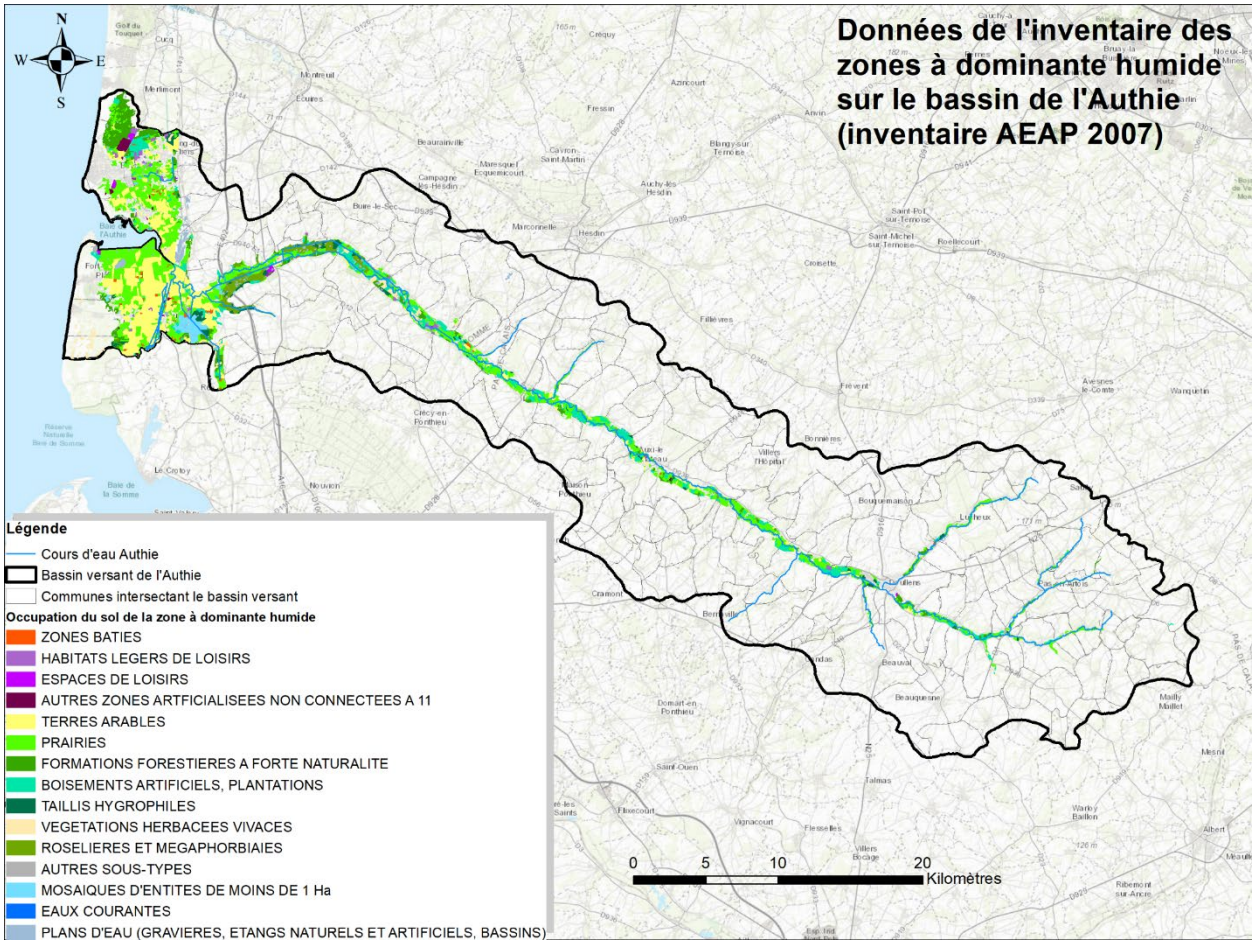


Illustration 33 : Inventaire des zone à dominante humide sur le bassin de l'Authie

3.2. EVALUATION DE LA FIABILITE

La qualification de la fiabilité des données permet de guider l'analyse géostatistique *a posteriori*. Cette évaluation est faite d'un point de vue hydrogéologique et se base soit sur les chroniques piézométriques disponibles, soit sur la pertinence et la précision des autres types de données.

3.2.1. Synthèse de la fiabilité en fonction des données

Le Tableau 4 ci-dessous synthétise les classes de fiabilité appliquées par source de données.

Source de données	Fiabilité forte	Fiabilité moyenne	Fiabilité faible (plutôt utilisé comme contrainte ou vérification)
Base de données nationale (ADES/BBS Eau)	chronique de longueur et fréquence de mesures suffisantes	- Chronique de longueur et fréquence insuffisantes mais disponibles sur au moins un cycle de nappe - Données ou chroniques courtes mais possédant des valeurs sur les périodes de THE (1995, 2001)	Mesures ponctuelles
Points d'eau BSS			Mesures ponctuelles
Données historiques et enquêtes	Points laisse de crue	Informations cartographiées « inondation », « source »	Informations cartographiées « inondation », « source » « mare », « remontée de nappe »
Cartes piézométriques	- Points de mesures HE 2001 et 2002 - Marquenterre HE 2016		
Cours d'eau, tronçons hydrographiques de BD TOPAGE®	tronçons hydrographiques « écoulement naturelle »	« fossé ou course »	
Surfaces hydro de BD TOPAGE®	Marais, écoulement naturelle	Retenue, plan d'eau gravière	Réservoir, estuaire
Sources	Si précision altimétrique (BDTopo V3)		
HISTOLITT® du Shom	Trait de côte		
Les images satellite			zones en eau pendant au moins 2 mois

(*)Nombre de points à moduler dans l'analyse géostatistique

Tableau 4 : Evaluation de la fiabilité par source de données

L'Illustration 34 présente la répartition des données d'entrée par origine pour le bassin de l'Authie.

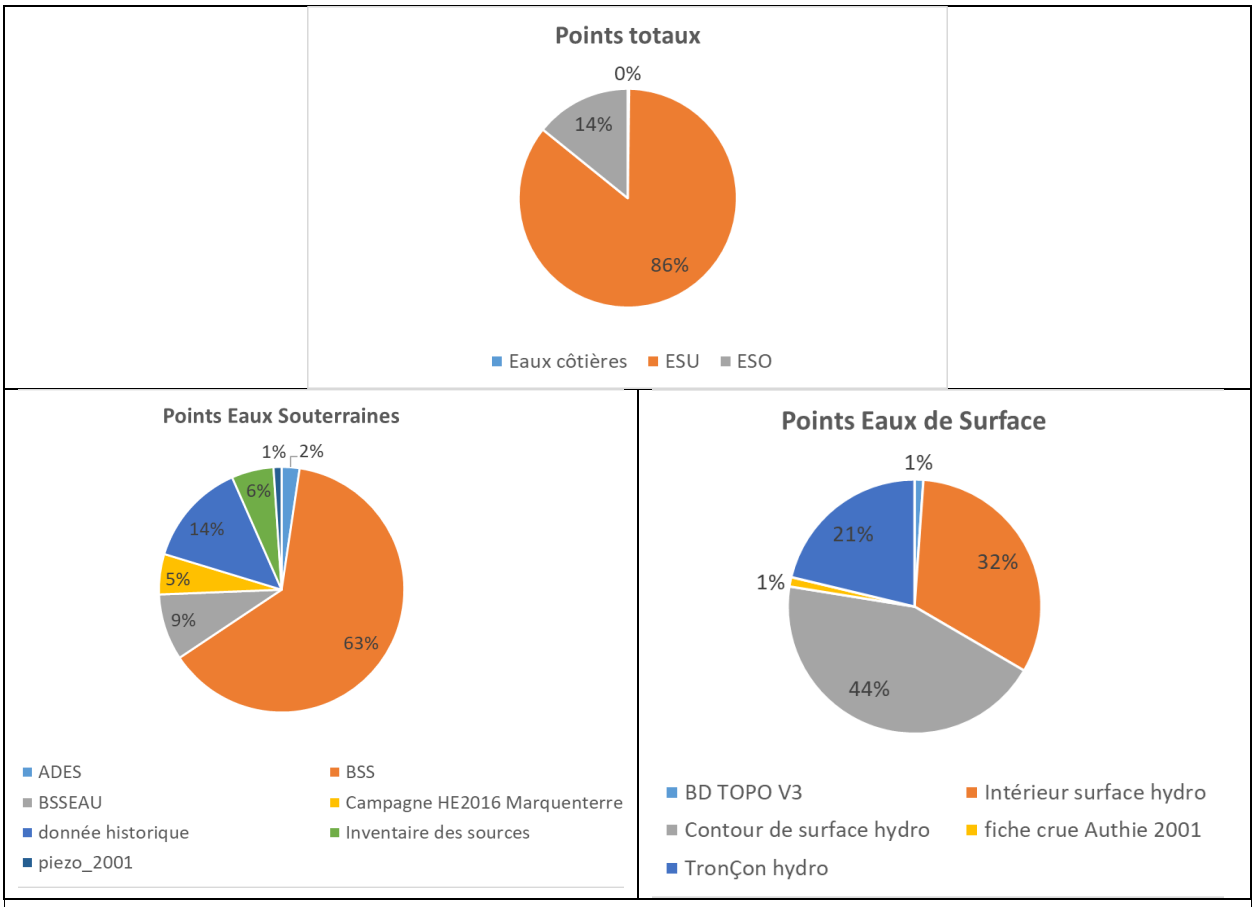


Illustration 34 : Répartition des données d'entrée par origine pour le bassin de l'Authie

3.2.2. Détails sur l'évaluation de la fiabilité des points d'eau des bases nationales

Dans l'objectif de calculer une cote maximale piézométrique sur la base de lois statistiques, il est nécessaire de s'appuyer sur des chroniques piézométriques suffisamment longues pour minimiser l'erreur de l'estimation.

Trois niveaux de fiabilité ont donc été définis au sein du jeu de données :

- Les points à fiabilité forte :

Il s'agit des points ayant des chroniques suffisamment longues et bien échantillonnées permettant de fournir une valeur de ZT100[4] calculée à partir de lois statistiques des valeurs extrêmes (cf. paragraphe 5.1).

- Les points à fiabilité moyenne :

Sont inclus dans cette catégorie :

[4] ZT00 : notation pour la côte piézométrique maximale assimilable à une période de retour de 100 ans

- Les chroniques qui ne sont pas suffisamment longues et bien échantillonnées pour satisfaire aux lois statistiques, mais qui possèdent tout de même une longueur de chronique intéressante pour tenter une estimation du ZT100,
- Les mesures ponctuelles issues des campagnes piézométriques HE 2001 et 2002 (situation de très hautes eaux connues),
- Les chroniques courtes ayant une valeur soit pendant les HE de 2001-2002 ou celle de 1995.

- Les points à fiabilité faible :

Les points restants sont qualifiés par défaut en fiabilité faible. Les valeurs maximales mesurées sur ces points (soit valeur unique, soit au sein d'une chronique courte) peuvent servir de borne inférieure au-dessus de laquelle la surface ZT100 calculée à partir des autres de données devra passer.

Cette contrainte peut soit être utilisée *a posteriori*, soit intégrée dans l'algorithme de calcul (méthode de krigeage avec conditions d'inégalités)

3.2.3. Détails sur l'évaluation de la fiabilité des données de la BD TOPAGE®

d) *Tronçons de cours d'eau*

Les classes de fiabilité appliquées selon les types de tronçons hydrographiques retenus sont présentées dans le Tableau 5 ci-dessous.

TRONCONS de COURS D'EAU BD TOPAGE®				
NATURE	**ORIGINE**	**nombre d'entités**	**Fiabilité**	**Commentaires**
Ecoulement naturel	Ecoulement naturel non aménagé	6842	Forte	
Inconnue	Inconnue	18	Faible	
Ecoulement naturel	Artificielle	13	Moyenne	Essentiellement des fossés de drainage
Ecoulement non naturel contenant le terme « fossé » ou « course »	Artificielle	125	Moyenne	Les courses sont des cours d'eau très courts qui vont directement à la mer, correspondant à des chenaux de marées, et qui sont moins anthropisés que les fossés de drainage

Tableau 5 : Fiabilité appliquée aux tronçons de cours d'eau retenus, provenant de la BD TOPAGE®

e) *Surfaces hydrographiques*

Les classes de fiabilité appliquées selon les types de surfaces hydrographiques répertoriés sont présentées dans le Tableau 6.

SURFACE HYDROGRAPHIQUE BD TOPAGE®			
NATURE	**ORIGINE**	**nombre d'entités**	**Fiabilité**
Ecoulement naturel	Naturelle non aménagée	154	Forte
Estuaire	Naturelle non aménagée	115	Forte
Marais	Naturelle non aménagée	40	Forte
Mare	Artificielle	4	Moyenne
Mare	Inconnue	51	Moyenne
Mare	Naturelle non aménagée	667	Forte
Plan d'eau de gravière	Artificielle	17	Moyenne
Plan d'eau de gravière	Naturelle non aménagée	3	Forte
Réservoir-bassin	Artificielle	406	Faible
Réservoir-bassin	Inconnue	44	Faible
Réservoir-bassin	Naturelle non aménagée	1	Moyenne
Retenue	Artificielle	16	Faible
Retenue	Inconnue	92	Faible
Retenue	Naturelle non aménagée	2346	Moyenne

Tableau 6 : Fiabilité appliquée aux surfaces hydrographiques retenues provenant de la BD TOPAGE®

3.3. TRAVAIL D'ASSOCIATION DES POINTS

L'objectif de ce travail spécifique consiste à associer des points considérés comme peu fiables pour la cartographie des zones sensibles aux remontée de nappes, à des points fiables, de manière à augmenter le nombre de points utiles pour l'interpolation de la cote piézométrique extrême. Cette association s'appuie sur des informations en lien avec les contextes hydrogéologiques et topographiques caractérisant chaque point : aquifère capté via BDLISA, cours d'eau à proximité, bassins versants et distance.

L'association est un processus se déclinant en 6 phases successives, permettant un rattachement du plus précis, en phase 1, au moins précis, en phase 6 (Illustration 35). Il est donc important de préciser dans le jeu de données produit la phase d'association utilisée, afin de garder une échelle de fiabilité entre les différents points.

- Phase 1 : Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui sont proches du même cours d'eau ; ils appartiennent à la même entité BDLISA et sont distants de moins de 5km. Le bassin versant n'est pas pris en compte dans cette première étape, car il a été observé dans une étude précédente en Alsace (Bessière *et al.*, 2019) que cela pouvait fausser l'association, particulièrement en milieu plat. La priorité est donc donnée au cours d'eau le plus proche. Cette étape permet d'identifier 23 points correspondant aux critères sélectionnés.
- Phase 2 : Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui sont proches du même cours d'eau et distants de moins de 5km. Cette étape ne fait ressortir aucun nouveau point par rapport à la phase 1 dans le cadre de notre étude.
- Phase 3 : Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui sont proches de cours d'eau différents mais distants de moins de 5km et appartenant au même bassin versant et à la même entité BDLISA. Cette étape permet d'identifier 102 points correspondant aux critères sélectionnés.
- Phase 4 : Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui sont proches de cours d'eau différents mais distants de moins de 5km et appartenant au même bassin versant. Cette étape permet d'identifier 63 points correspondant aux critères sélectionnés.

- Phase 5 : Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui sont proches de cours d'eau différents mais distants de moins de 5km et appartenant à la même entité BDLISA.
- Phase 6 : Association aux points fiables les plus proches pour tous ceux restants (488 points dans la présente étude). Le point fiable correspondant sera donc forcément dans un autre bassin versant, associé à un autre cours d'eau et à une autre entité BDLISA ou à plus de 5km l'un de l'autre. Cette étape permet d'identifier 488 points correspondant aux critères sélectionnés.

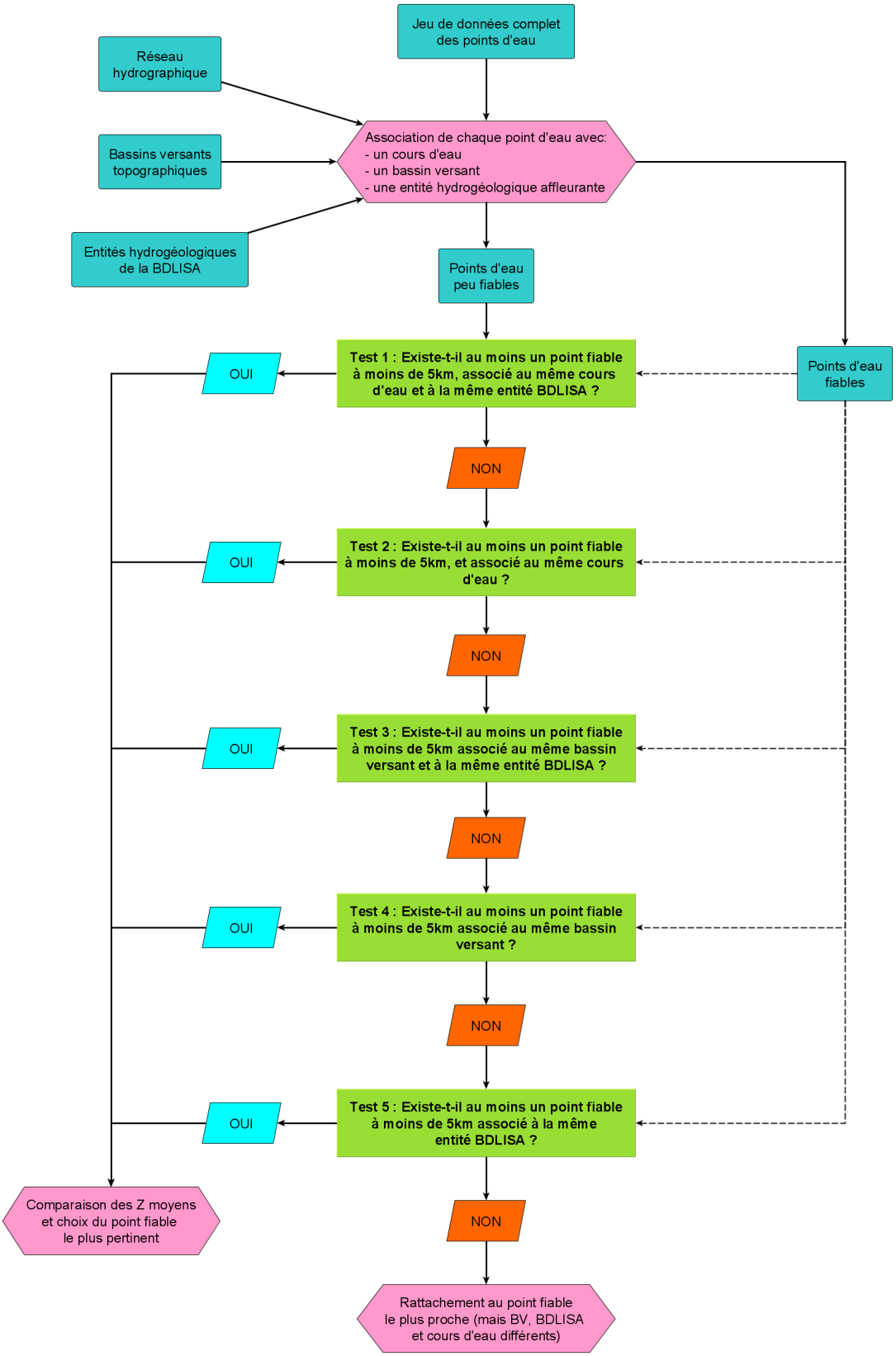


Illustration 35 : Logigramme des différentes phases d'association des points (source : « Guide méthodologique pour l'établissement de carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale », Bessière et al., 2020)

Deux cartes ont été produites afin de représenter l'information liée à cette association. Une première, identifiant les points peu fiables selon leur point fiable associé, permet une visualisation de l'étendue des secteurs relatifs à chaque point fiable (Illustration 36). Une seconde, représentant les points peu fiables selon la méthode d'association utilisé, permet d'observer la distribution spatiale des points selon leur fiabilité (Illustration 37).

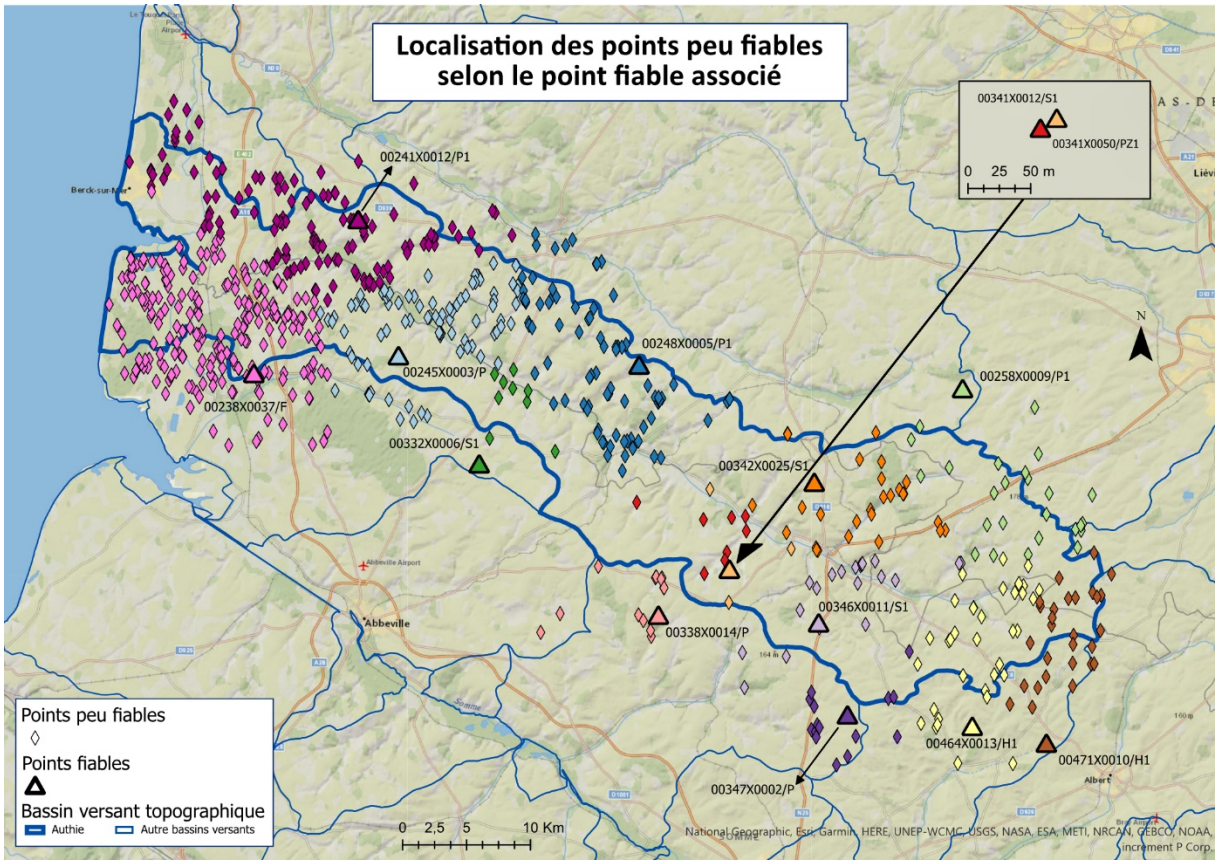


Illustration 36 : Localisation des points peu fiables selon le point fiable associé

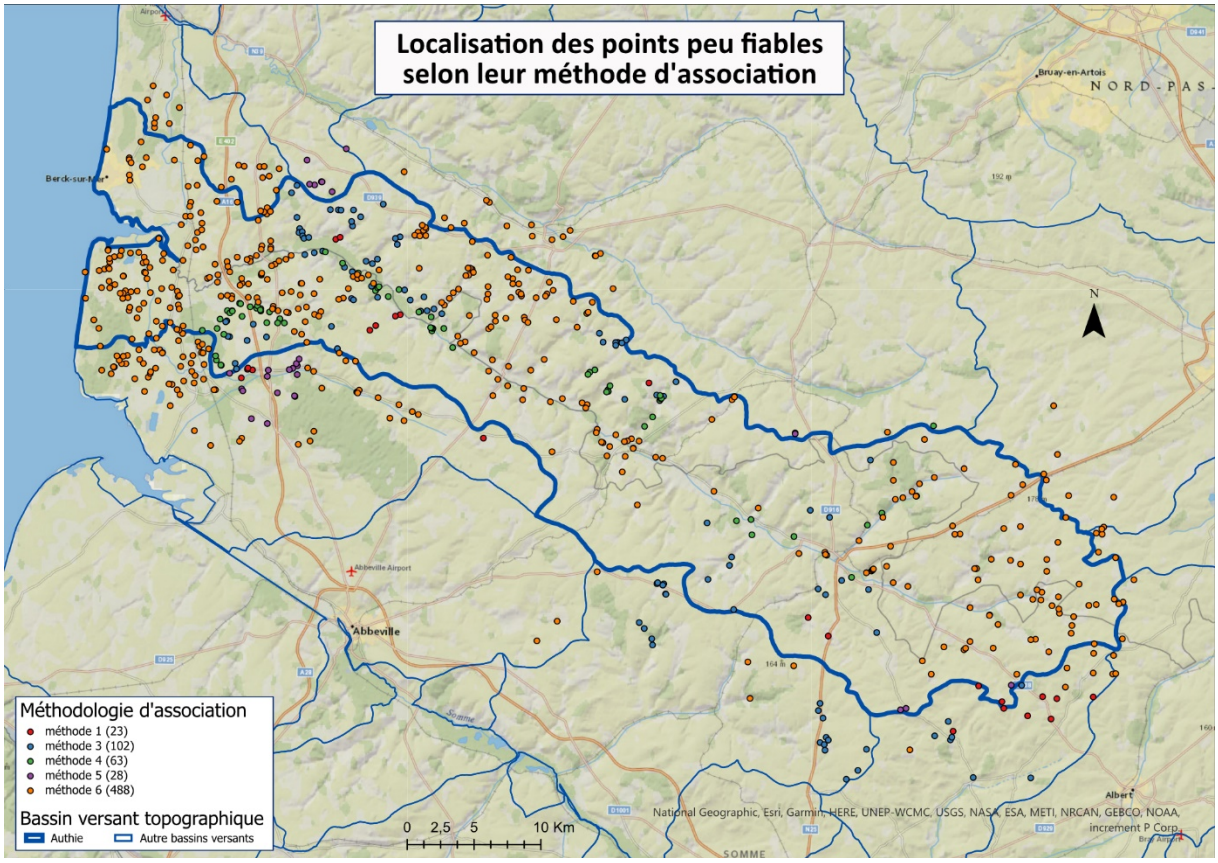


Illustration 37 : Localisation des points peu fiables selon leur méthode d'association

4. Traitement des images satellites

L'objectif est d'utiliser des techniques de télédétection à partir de données de la mission Copernicus Sentinel pour cartographier les inondations engendrées par les remontées de nappes phréatiques.

L'acquisition systématique des données Sentinel-1 (Sentinel-1A, Sentinel-1B), tous les 6 jours sur une zone donnée, permet de détecter des changements temporels sur des images satellitaires pouvant être associés à l'apparition d'étendues d'eau en surface. Ces dernières peuvent ainsi être cartographiées par le traitement de ces images.

La méthode développée pour la détection des inondations comporte plusieurs étapes de travail :

- Au cours de la première étape, la période de surveillance complète 2015-2018 est examinée avec les données Sentinel-1. À cette fin, des images composites basées sur des statistiques multi-temporelles sur toute la période sont utilisées. Une telle approche utilise un grand ensemble de données d'images satellites disponibles auprès de Copernicus.
- Les surfaces inondées obtenues (se référant à toute la période) ont ensuite été utilisées dans un schéma d'analyse de séries chronologiques pour détecter plus précisément les étendues d'inondation événement par événement. Par conséquent, pour détecter et cartographier individuellement les différents événements d'inondation, un algorithme dédié a été développé, basé sur l'analyse des séries chronologiques. Enfin, la caractérisation de la forme des séries temporelles liées aux crues induites par les eaux souterraines et leur séparation par rapport des crues fluviales est également tentée.

Un traitement des images SAR, en plusieurs étapes, a été appliqué à l'ensemble des données sous la forme d'un script de traitement par lots. Il n'est pas détaillé dans ce rapport mais le lecteur peut se référer à Bessière et al. (2020) pour plus d'informations.

4.1. LA DETECTION DES SURFACES EN EAU

Le traitement était basé sur toute la période d'observation d'avril 2015 à juillet 2018 afin de calculer les statistiques temporelles de la rétrodiffusion SAR (minimum, maximum, moyenne et écart-type) par pixel. Des calculs arithmétiques supplémentaires ont été effectués, spécifiquement pour identifier l'intervalle des valeurs de rétrodiffusion pour chaque pixel, exprimée par les différences entre les valeurs de rétrodiffusion minimale et maximale (Illustration 38).

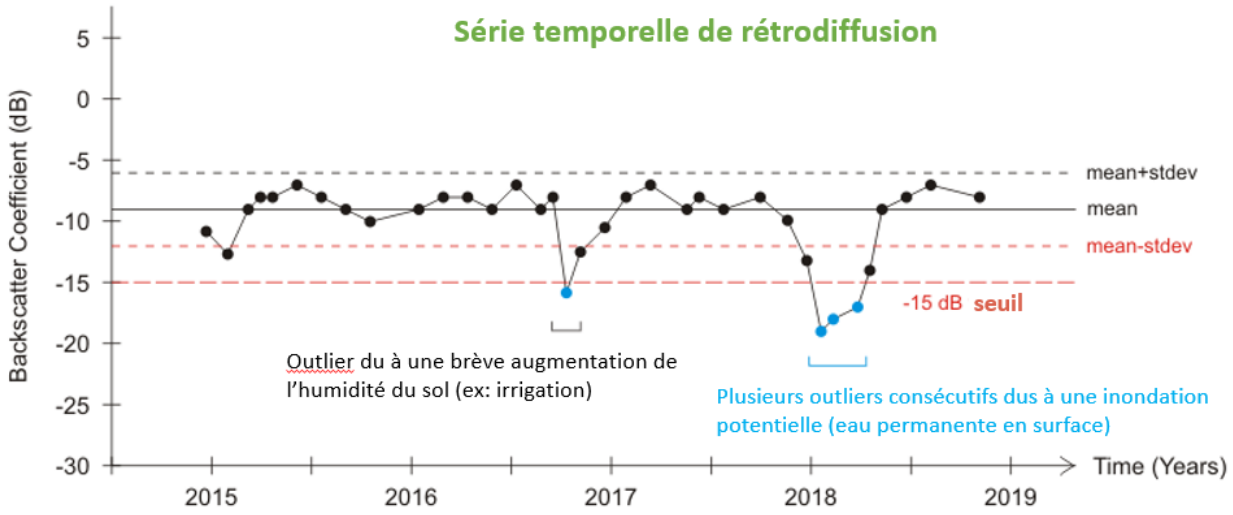


Illustration 38 : Série temporelle de rétrodiffusion SAR avec les statistiques associées (moyenne, moyenne augmentée et diminuée de l'écart type) et le seuil de détection de surfaces en eau (-15 dB habituellement)

Son avantage est de mettre en évidence les régions affectées par les eaux de surface (plans d'eau permanents et zones inondées) des autres zones principalement végétalisées et urbaines.

Enfin, grâce à une procédure de binarisation, en appliquant des arguments Booléens simples sur le fichier raster, une image binaire inondation/ non inondation (masque) a été obtenue.

Le masque « authie_RGB_msk10_comm » est le plus restrictif, tous les pixels du raster possédant une valeur supérieure à 0 représentent les surfaces en eau permanente entre 2015 et 2018. Les masques « 15 » et « 20 » détectent eux un plus grand nombre de surfaces ayant été inondées, mais possèdent également une marge d'erreurs plus importante, incluant parfois des parcelles agricoles ou de la végétation. L'Illustration 39 montre les résultats de classification produits par les scènes Sentinel-1 acquises au cours de la période de suivi 2015-2018. La carte indique l'étendue spatiale de toutes les surfaces en eau pour cette période.

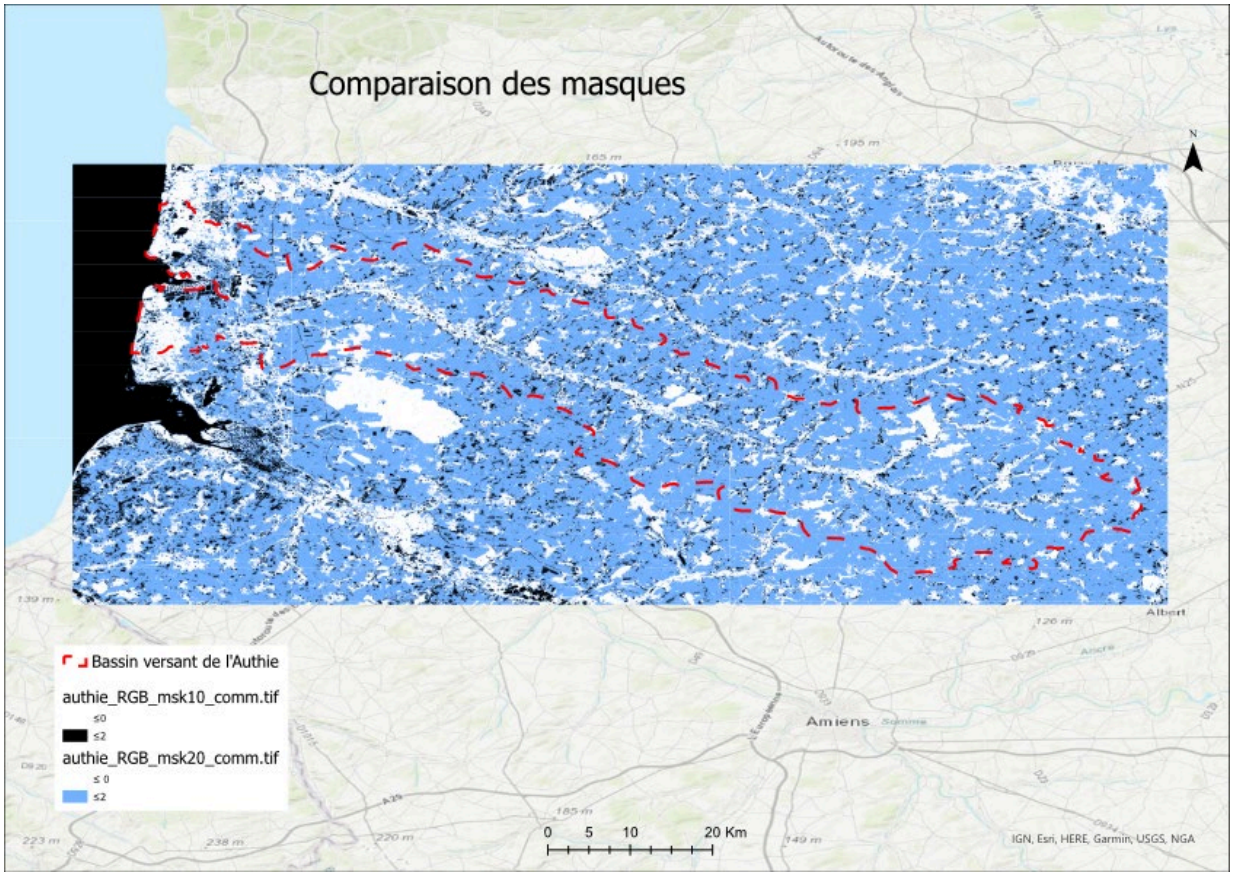


Illustration 39 : Différents masques réalisés basés sur les données Sentinel-1 (période de 2015 à 2018) – en blanc les surfaces en eau permanentes extraites pour l'Authie.

Enfin, l'examen des séries chronologiques de rétrodiffusion SAR pour certaines régions inondées a fourni des informations concernant l'initialisation et la fin de l'événement des inondations.

4.2. ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES

Le masque donne une information sur la présence ou non d'eau en surface mais pas sur la durée, tandis que la série temporelle donne une information sur la durée et la récurrence de présence d'inondations de surface. Or, quand une inondation n'est pas alimentée par les nappes elle ne reste pas longtemps. Si on observe une présence d'eau pendant une période prolongée il est fort probable que cela soit dû à la présence ou l'influence d'une nappe.

Ainsi, l'objectif est de détecter des inondations prolongées, dont la durée implique indirectement les eaux souterraines comme origine.

L'outil dédié à la cartographie des inondations basé sur SAR développé dans le cadre d'autres projets de cartographie (cf. guide méthodologique) a été utilisé pour le bassin versant de l'Authie. Le concept principal de l'algorithme est de détecter les valeurs aberrantes en contrôlant plusieurs paramètres. Plus précisément :

- tout point (correspond à une date d'acquisition) de la série chronologique est caractérisé comme aberrant lorsque la valeur de rétrodiffusion est inférieure à un seuil d'écart type défini (moyenne par défaut moins 2 fois stdev – standard déviation), tout en vérifiant que

la valeur de rétrodiffusion est maintenue en dessous de d'un certain seuil (seuil de séparation de l'eau). Deux valeurs de seuils ont été testées dans cette étude : -15 dB et -18 dB

- Un autre paramètre crucial est le nombre minimum de valeurs aberrantes consécutives nécessaires pour caractériser la valeur aberrante comme un événement d'inondation de longue durée. Autrement dit, l'algorithme vise à détecter les pixels « noyés » pendant un nombre de jours consécutifs. Différents traitements ont été réalisés avec 6, 10 et 15 soit respectivement 36, 60 et 90 jours.

Le résultat de l'analyse des séries chronologiques est une image binaire d'inondation pour toute la période d'observation. Il n'y a pas d'image singulière mettant en évidence un épisode en particulier car il n'y a pas eu d'inondation pendant la période de disponibilité des données.

En considérant les séries chronologiques, la méthodologie proposée peut également extraire l'étendue des inondations ainsi que leur fréquence pour chaque pixel (période de récurrence ; par rapport à la période d'observation disponible).

Afin de conserver un seul traitement parmi les différents tests réalisés, les résultats ont été comparés au jeu de données préparé et, en particulier, aux données historiques d'inondation (fiches de crue, enquête et sources), aux point d'eau de surface (surfaces et tronçons hydrographiques).

La série temporelle « authie_a059_std2.0_db18_con10 » possède un seuil plus bas (- 18 dB) afin d'être au plus proche d'une humidité certaine et une récurrence élevée, c'est-à-dire, dix intervalles de temps consécutifs d'au moins six jours. Cette série temporelle permet donc d'indiquer la présence d'inondations de surface apparaissant sur une période de deux mois. Une série temporelle pour une présence d'eau sur une période de trois mois n'a pas été calculé pour ce seuil, contrairement au seuil -15 dB, puisque l'analyse en devenait si restrictive qu'elle ne conservait pratiquement aucune donnée.

Illustration 40 : Analyse des différents traitements réalisés à partir des masques, de la délimitation des surfaces en eau sur l'Authie basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'avril 2015 à juillet 2018

Suite à cette analyse, et afin de garder l'information la plus complète et avec la plus faible marge d'erreur quant à la réelle présence d'eau, nous avons décidé de croiser le masque « authie_RGB_msk10_comm » avec la série temporelle « authie_a059_std2.0_db18_con10 ». Seuls les pixels supérieurs à 0 pour les deux rasters sont extraits et utilisés par la suite car considérés comme des zones en eau sur un laps de temps long, donc probablement d'origine souterraine.

Malheureusement, la détection peut être affectée par les activités d'irrigation, selon leurs modèles temporels et leurs durées.

De manière générale, l'analyse des images satellitaires effectuée permet l'ajout d'une donnée de source différente, et de faire ressortir des zones qu'il n'aurait pas été possible de montrer autrement.

Cependant l'exploitation de ces rasters dans le cadre du bassin de l'Authie ne fut pas simple, demandant beaucoup de temps pour peu de résultat (rendu « bruité » du fait de la période considérée, 2015-2018, période sans inondation aussi importante que celles de 2001 ou 1997).

L'Illustration 41 présente les points issus du traitement de l'analyse des images satellite.

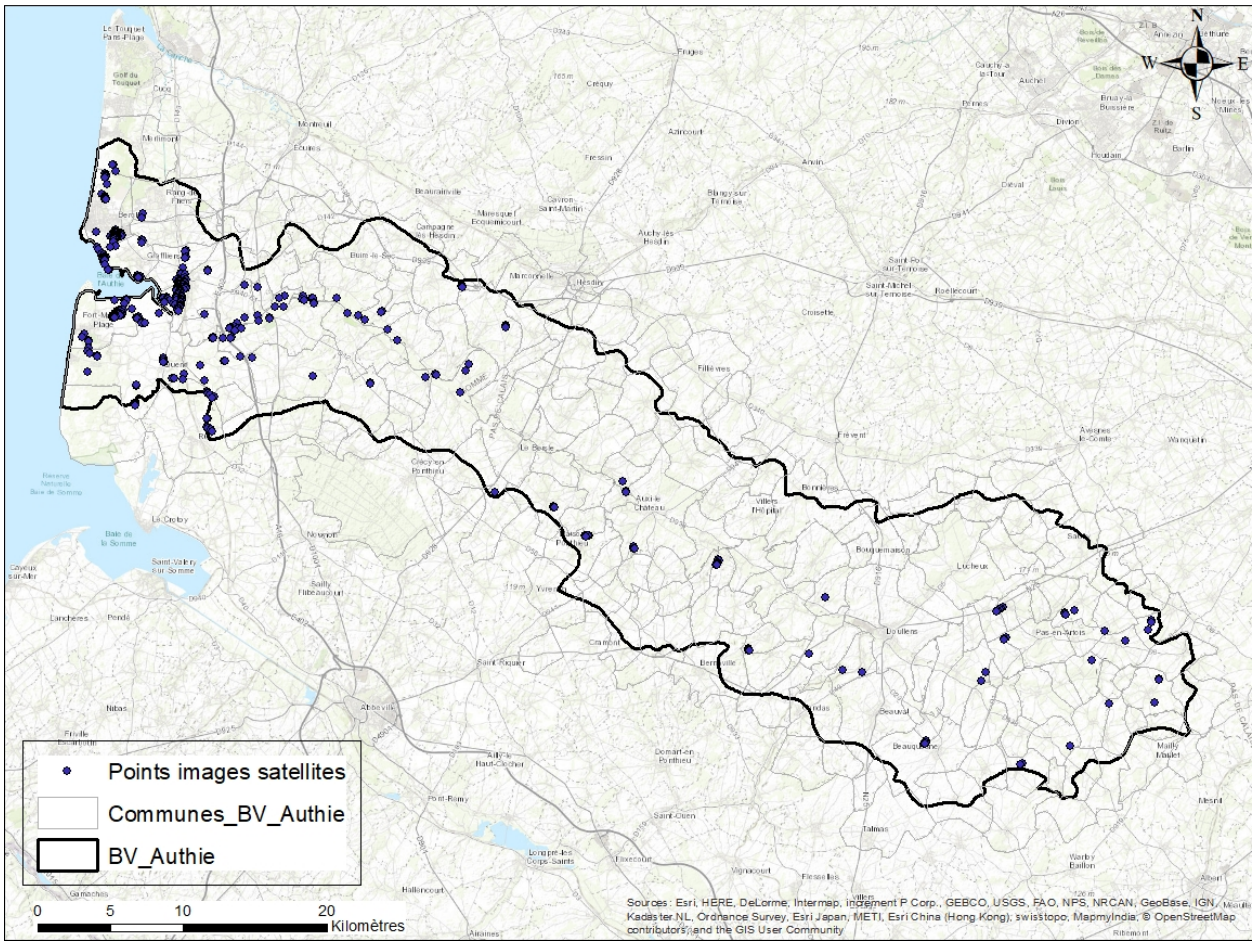


Illustration 41 : Points résultants du traitement des images satellite

5. Estimation de la côte piézométrique extrême

5.1. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FORTE

Pour les points à fiabilité forte, différentes lois de probabilité ont été ajustées : Normale, Log normale, Gamma, Gumbel et GEV (Generalized Extreme Value, Jenkinson (1969)). En complément, le calcul selon l'approximation de la loi Normale utilisée pour l'étude nationale (Brugeron et al., 2018) a également été réalisé.

Préalablement à une analyse probabiliste, il faut s'assurer que la série de données étudiée vérifie les hypothèses d'indépendance (absence d'autocorrélation entre observations successives), de stationnarité (absence de tendance) et d'homogénéité (même population, absence de rupture). Pour répondre à ces vérifications, les tests statistiques suivants ont été utilisés :

- Hypothèse d'indépendance : test de Wald-Wolfowitz (1943) pour vérifier l'indépendance des données (pas ou peu d'autocorrélation).
- Hypothèse de stationnarité : test de Mann-Kendall (1945) pour la recherche d'une tendance significative, modifié par Hamed et Rao (1998) pour prendre en compte la possible autocorrélation des données.
- Hypothèse d'homogénéité : test de Pettit (1979) pour la détection de rupture significative et complété par le test de Wilcoxon (1945).

D'un point de vue pratique, ces tests ont été réalisés à l'aide du logiciel R. Dans le cas des eaux souterraines, l'hypothèse d'indépendance est rarement vérifiée puisque les niveaux piézométriques présentent presque toujours une autocorrélation, plus ou moins forte selon l'inertie de la nappe.

Aussi, si l'ajustement de lois de probabilité est classique en hydrologie ou climatologie, elle est plus délicate en hydrogéologie où les conditions d'application ne seront souvent pas respectées. Il est donc préconisé de tester au cas par cas les différentes lois d'ajustement pour chaque point fiable.

Par exemple, il a été décidé de ne pas écarter les séries pour lesquelles les tests d'indépendance et d'homogénéité étaient rejetés de manière à valoriser le maximum de chroniques piézométriques de longue durée (≥ 10 années).

Pour juger de l'adéquation des lois ajustées, le test statistique de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé : calcul de la plus grande distance entre la distribution théorique et la distribution expérimentale. C'est la loi présentant le meilleur ajustement selon le test de Kolmogorov-Smirnov qui est retenue mais le critère d'appréciation visuelle n'est pas exclu.

Les ajustements sont généralement réalisés sur les maxima annuels des années civiles ; les périodes de retour traitées sont 20 ans, 50 ans et 100 ans. A l'instar de l'étude nationale, une période de retour centennale est retenue pour traduire les niveaux maximums probables.

Bien souvent, les durées des chroniques sont généralement trop courtes pour prétendre au calcul de niveaux de période de retour centennale. Par souci de rigueur, il est préférable d'estimer des niveaux maxima probables que des niveaux humides de période de retour 100 ans.

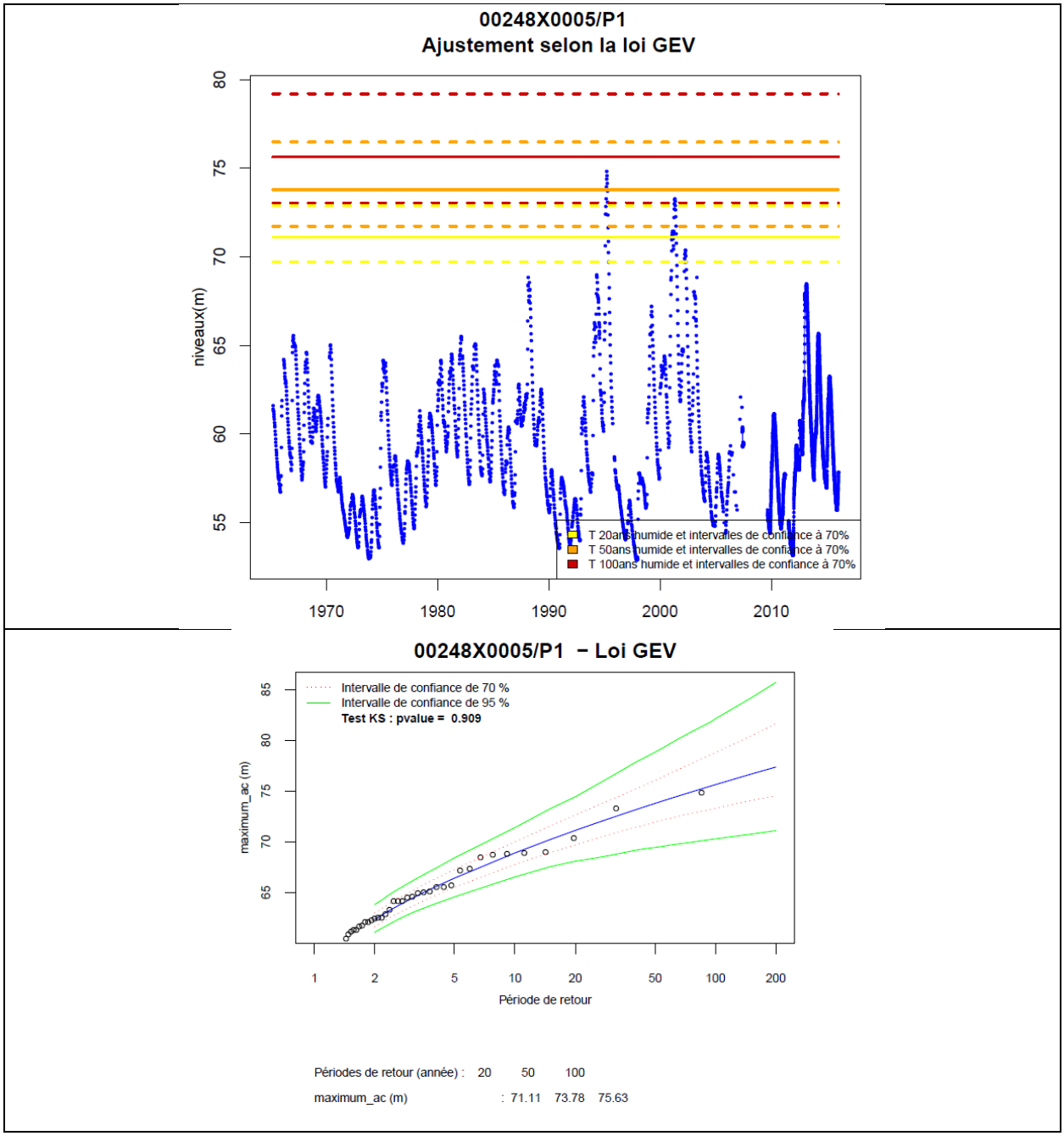


Illustration 42 : Report des niveaux humides de période de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés après ajustement d'une loi GEV (00248X0005/P1).

Code_BSS	Meilleur ajuste-ment	T20 inf	T20	T20 sup	T50 inf	T50	T50 sup	T100 inf	T100	T100 sup
00238X0037/F	Gumbel	10,1	10,5	11,0	10,5	11,1	11,6	10,8	11,5	12,1
00241X0012/P1	GEV	34,5	35,8	37,2	36,1	38,1	40,3	37,1	39,7	42,7
00248X0005/P1	GEV	69,7	71,1	72,6	71,9	73,8	76,0	73,3	75,6	78,8
00341X0012/S1	GEV	83,7	85,3	86,7	85,3	87,3	89,2	86,2	88,5	90,9
00341X0050/PZ1	GEV	83,6	84,8	85,9	85,0	86,4	87,9	85,8	87,4	89,3
00342X0025/S1	GEV	102,1	102,7	103,2	102,9	103,8	104,7	103,4	104,5	105,7
00346X0011/S1	GEV	83,6	84,6	85,5	84,8	86,2	87,6	85,5	87,3	89,2

Tableau 7 : Niveaux maxima probables de période de retour 100 ans

Afin d'automatiser l'ensemble de ces traitements, un script R a été spécifiquement développé par le BRGM. R est un environnement de calculs mathématiques et statistiques éprouvé et très utilisé par la communauté scientifique. Il présente les deux principaux avantages suivants : il est open source, et donc gratuit et il propose plusieurs milliers de modules statistiques. L'automatisation des processus d'ajustement permet de choisir la méthode la mieux adaptée au contexte hydrogéologique ou à la série temporelle.

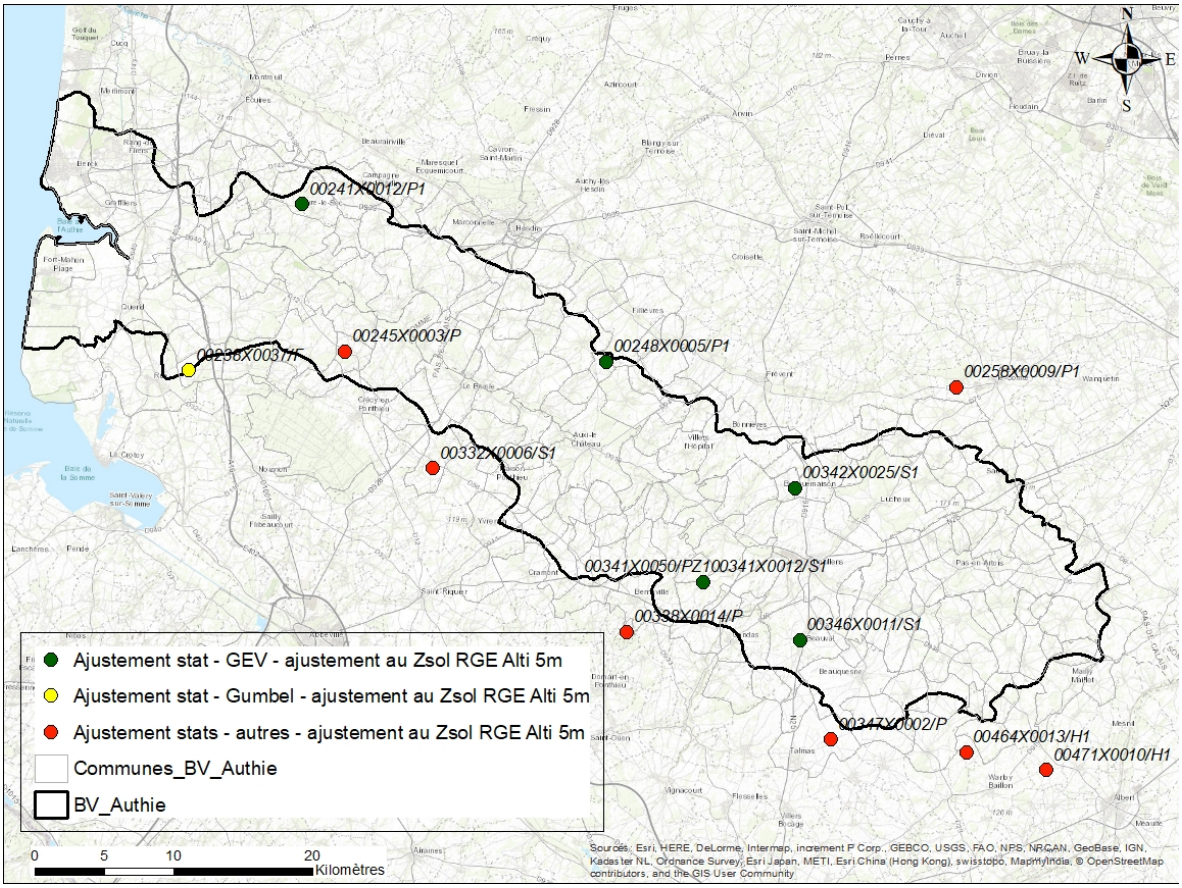


Illustration 43 : Estimation de la cote piézométrique maximale pour les points eaux souterraines à fiabilité forte

5.2. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FAIBLE AVEC CHRONIQUE DE DONNEES COURTES

Partant du postulat que l'essentiel des points peu fiables est rattaché à des points fiables au sein d'une même zone homogène ; il est supposé un comportement hydrogéologique homogène et synchrone de ces points respectifs.

5.2.1. Application de la méthodologie développée par Bessière *et al.* (2019)

Cette méthode prévoit l'application d'une surcote aux chroniques de courte durée (dit point peu fiable) après association à une chronique piézométrique de longue durée (dit point fiable). Elle a été élaborée de manière à corriger une approche plus simpliste, qui avait pu apparaître trop pessimiste dans la méthode nationale (Brugeron *et al.*, 2018)

La surcote attribuée au point peu fiable est une modulation de la différence entre la cote piézométrique extrême du point fiable associé (période de retour 100 ans) et sa cote piézométrique observée à la même date que la cote maximale du point peu fiable par le ratio des battements des chroniques peu fiables et fiables associés.

La formule proposée pour l'estimation du Zmax de période de retour 100 ans pour les points peu fiables est la suivante :

$$Zmax(T100)_{-fiable} = Zmax(T0)_{-fiable} + (Zmax(T100) - Z(T0))_{+fiable} \times \frac{(Zmax - Zmin)_{-fiable}}{2 \times (Zmax - Zmoy)_{+fiable})}$$

avec :

1) **Zmax(T100)** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique extrême du point peu fiable
2) **Zmax(T0)** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique maximale du point peu fiable
3) **Zmax(T100)** $_{+fiable}$ = Cote piézométrique extrême du point fiable associé
4) **Z(T0)** $_{+fiable}$ = cote piézométrique du point fiable à la date T0.
5) **Zmax** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique maximale mesurée du point peu fiable
6) **Zmin** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique minimale du point peu fiable
7) **Zmax** $_{+fiable}$ = Cote piézométrique maximale mesurée du point fiable associé
8) **Zmoy** $_{+fiable}$ = Cote piézométrique moyenne du point fiable associé

L'Illustration 44 illustre à partir des chroniques piézométriques, d'un point peu fiable et de son point fiable associé, le calcul de la cote piézométrique extrême des points peu fiables.

NB : pour les points fiables, ce n'est pas exactement le battement qui a été pris en compte mais 2 x (Zmax-Zmoy) afin de s'affranchir de l'influence éventuelle des pompages à proximité du piézomètre.

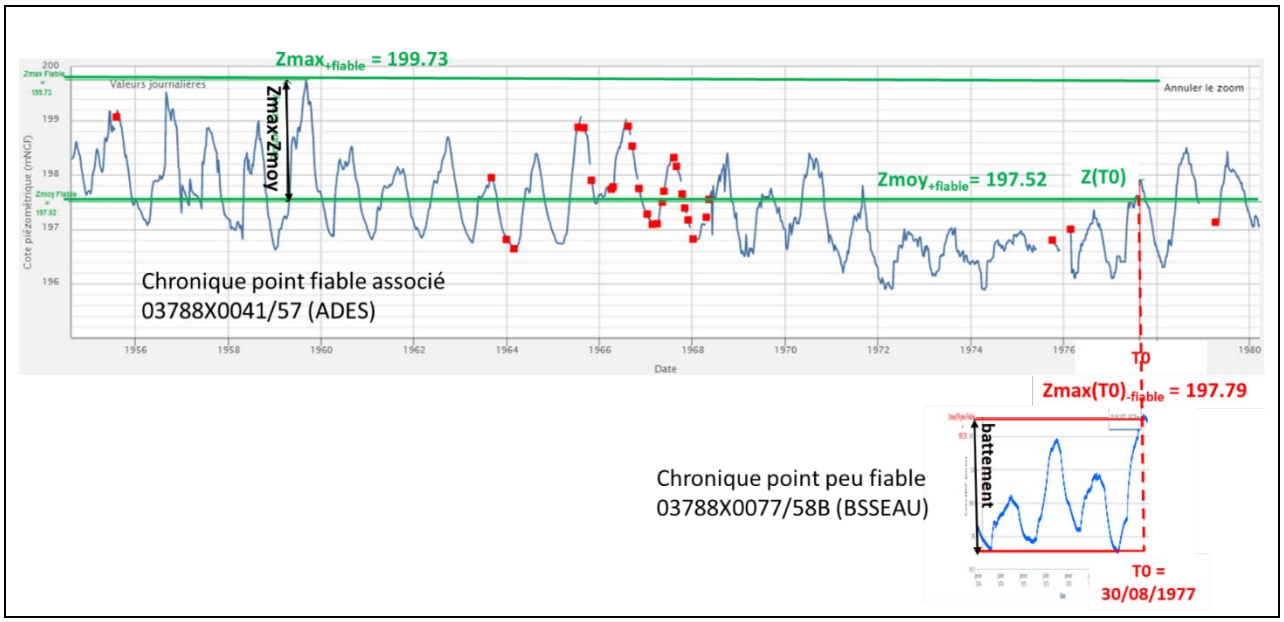


Illustration 44 : Exemple de corrélation des chroniques point fiable, en haut, et point peu fiable associé, en bas, selon l'approche de Bessière et al. (2019)

Il faut également obtenir la mesure du niveau piézométrique du point +fiable associé à la date de la mesure du niveau piézométrique maximal du point -fiable : **Z(T0)**. Pour cela, il faut utiliser le travail de rattachement et pointer la mesure Z(T0) du point +fiable au plus proche de la date T0 tout en sachant que les chroniques ne sont pas forcément concordantes au niveau de la période de mesure. Seules les mesures à l'intérieur d'un intervalle de **7 jours** seront sélectionnées. Le calcul est appliqué aux 280 points dit « -fiables ».

5.2.2. Amélioration de la méthode

Lorsque les chroniques peu fiables et fiables partageaient suffisamment de données en commun dans la période considérée par la chronique peu fiable, la formule présentée dans le chapitre précédent a été revue, de manière à minimiser l'influence du battement max du point fiable.

Pour ce faire, le ratio des battements des chroniques peu fiables et fiables associés ne s'appuie plus sur le battement maximal du point fiable mais sur le battement du point fiable dans la période commune avec le point peu fiable associé.

Dès lors, quand les chroniques le permettaient, la formule pour calculer les ZT100 pour les points à chronique courte est la suivante :

$$Zmax(T100)_{-fiable} = Zmax(T0)_{-fiable} + (Zmax(T100) - Z(T0))_{+fiable} \times \frac{(Zmax - Zmin)_{-fiable}}{(Zmax' - Zmin')_{+fiable}}$$

avec :

1) **Zmax(T100)** -fiable = Cote piézométrique extrême du point peu fiable
2) **Zmax(T0)** -fiable = Cote piézométrique maximale du point peu fiable
3) **Zmax(T100)** +fiable = Cote piézométrique extrême du point fiable associé
4) **Z(T0)** +fiable = cote piézométrique du point fiable à la date T0.
5) **Zmax** -fiable = Cote piézométrique maximale mesurée du point peu fiable

6) **Zmoy** -fiable = Cote piézométrique minimale du point peu fiable
7) **Zmax'** +fiable = Cote piézométrique maximale mesurée du point fiable associé, dans la période Tmin-Tmax
8) **Zmin'** +fiable = Cote piézométrique moyenne du point fiable associé, dans la période Tmin-Tmax

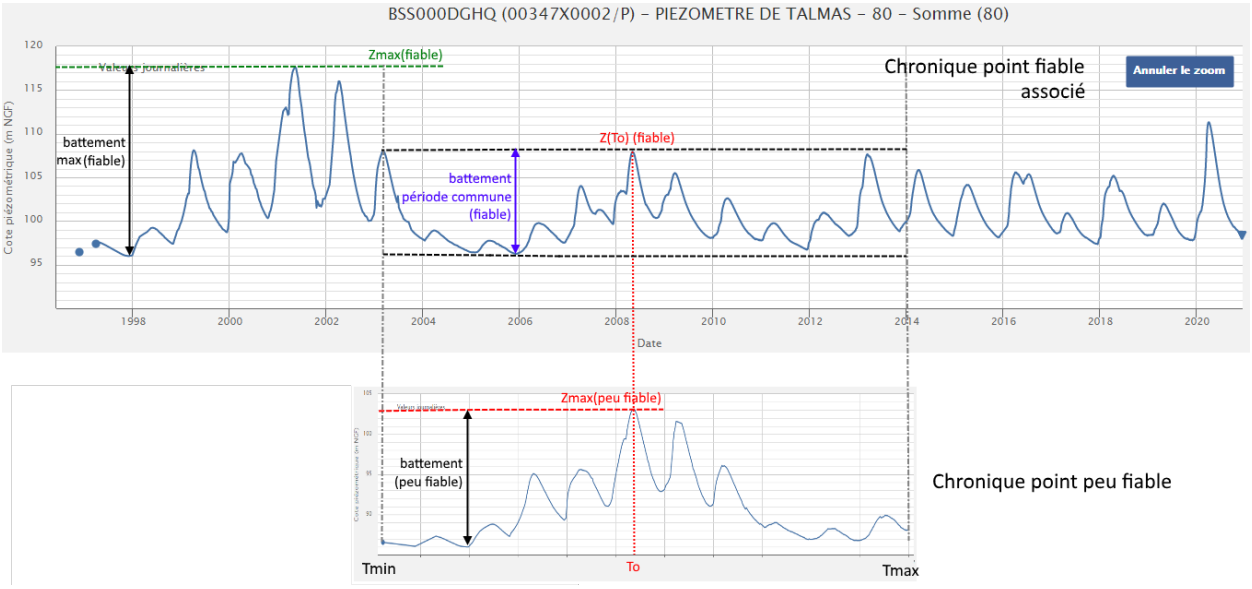


Illustration 45 : Exemple de corrélation des chroniques point fiable, en haut, et point peu fiable associé, en bas, selon la nouvelle approche

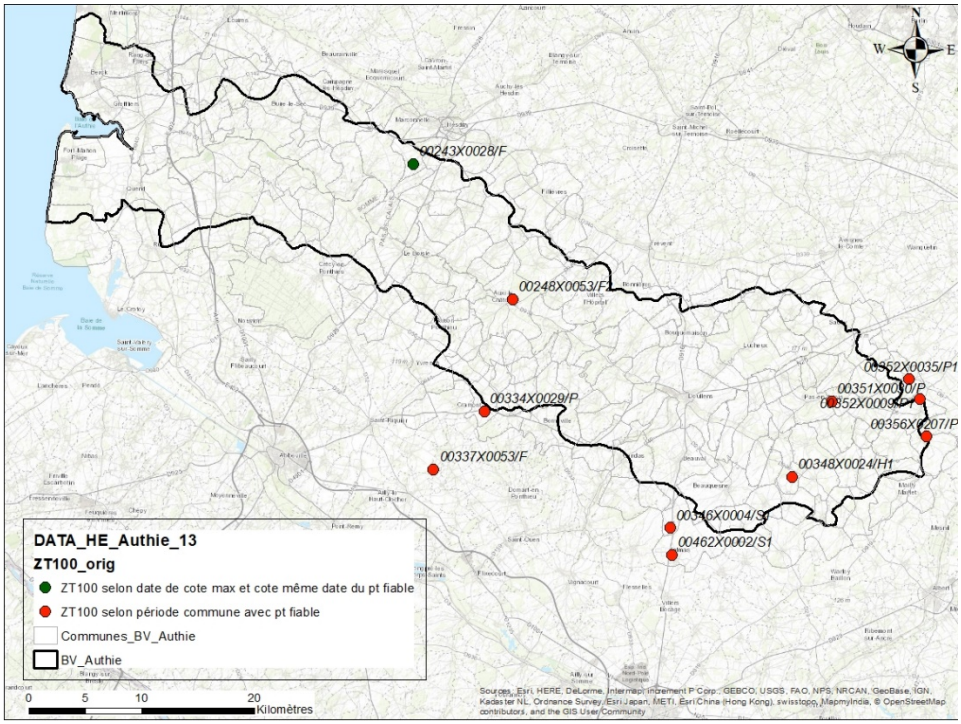


Illustration 46 : Estimation de la cote piézométrique maximale pour les points eaux souterraines à fiabilité faible

5.3. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FAIBLE AVEC VALEUR UNIQUE ET LES DONNEES EXTRAITES DES CARTES PIEZOMETRIQUES

Pour les points à valeur unique, un coefficient correctif a été appliqué sur leur unique valeur mesurée.

Ce coefficient correctif s'appuie encore une fois sur les points d'eau fiables associés, de la manière suivante :

$$Zmax(T100)_{-fiable} = Zmax(T0)_{-fiable} \times \frac{Zmax(T100)_{+fiable}}{Zmax_{+fiable}}$$

avec :

1) **Zmax(T100)** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique extrême du point peu fiable
2) **Zmax(T0)** $_{-fiable}$ = Cote piézométrique maximale mesurée du point peu fiable
3) **Zmax(T100)** $_{+fiable}$ = Cote piézométrique extrême du point fiable associé
4) **Zmax** $_{+fiable}$ = Cote piézométrique maximale mesurée du point fiable associé

Lorsque ces points sont jugés de fiabilité moyenne à forte (valeur mesurée en hautes eaux avérée : exemple mars-avril des années 1995, 2001, 2002), ces valeurs de ZT100 seront exploitées dans l'interpolation. Pour ceux caractérisés comme de fiabilité faible, ils serviront de valeur de contrainte.

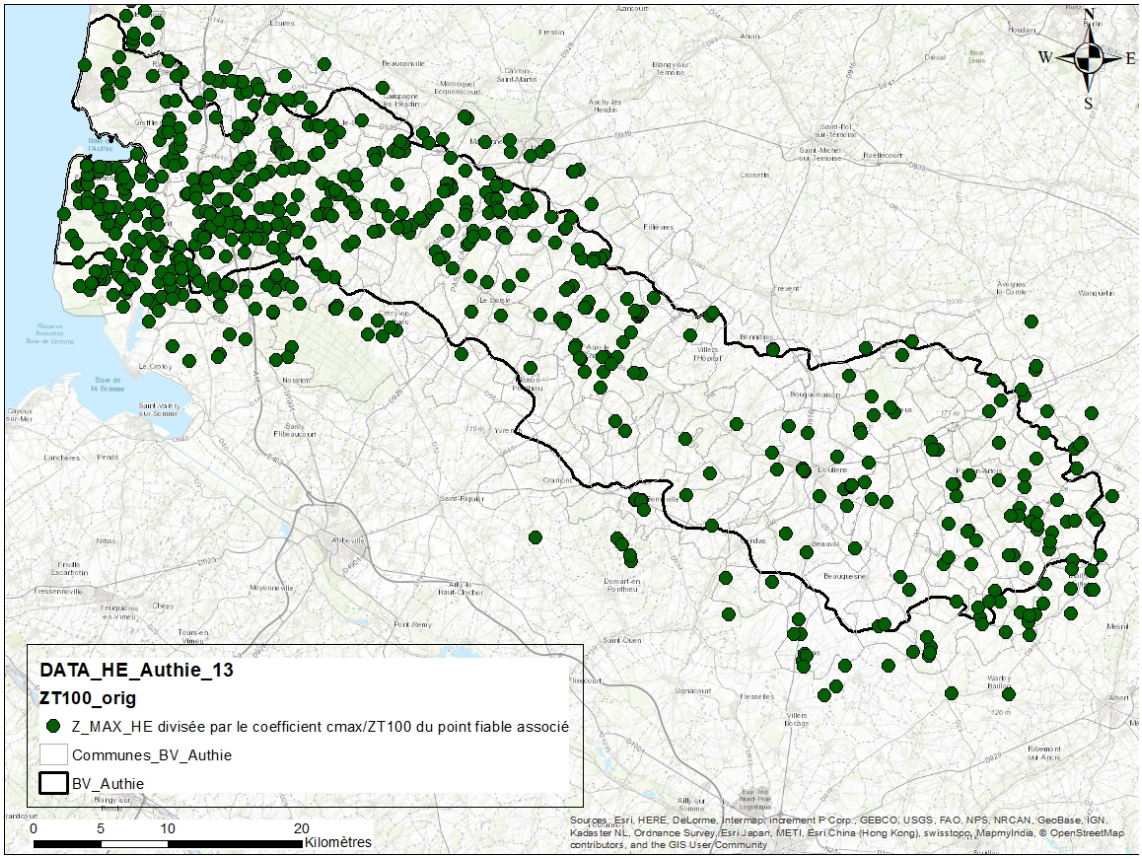


Illustration 47 : Localisation des points avec valeur unique corrigée par un coefficient correcteur

5.4. SYNTHESE DE L'ESTIMATION DU ZT100 PAR SOURCE DE DONNEES

Pour les différentes sources de données, les valeurs du ZT100 prises en compte pour l'interpolation sont résumées dans le Tableau 8.

Source de données	Fiabilité forte	Fiabilité moyenne	Fiabilité faible
Base de données nationale (ADES/BBS Eau)	ZT00 estimée par ajustement statistique	ZT100 estimée par association avec points fiables	Points d'eau avec valeur unique corrigée
Données historiques **Laisse de crue**	Points inondation géoréférencés ZT100= ZTopo (RGE Alti 5m)	Informations cartographiées tirées de témoignage peu précis	
Cartes piézométriques	Points de mesures HE ZT100 = ZPIEZO_HE x coef correctif Coef correctif calculé selon chroniques fiables		
Cours d'eau	Linéaire cours d'eau (connexion nappe/rivière) ZT100 = ZTopo		
Indices hydromorphologiques **D'après la BDTopage**	Si relation nappe / milieux aquatiques avérée ZT100 = ZTopo		
Sources	Si précision altimétrique ZT100 = ZAlti_Source		
Plan d'eau		Tronçons hydro, mare, gravières, fossés… ZT100 = ZTopo	
Les images satellite		Si disponible pendant un épisode de remontée de nappe connue ZT100= ZTopo	

Tableau 8 : Evaluation de la fiabilité par source de données

6. Interpolation de la cote piézométrique extrême

6.1. DESCRIPTION DE LA METHODE

L'objectif est de restituer, à partir des données collectées, numérisées et traitées précédemment, et sans modèle hydrogéologique spécifique, une cartographie de sensibilité aux remontées de nappe dans le bassin versant topographique de l'Authie. A cette fin, selon la méthodologie retenue par des études antérieures (Bourgine et Pedron, 2013), un krigeage de la surface piézométrique (selon une grille régulière) sera effectué. Après le krigeage, cette surface piézométrique ainsi calculée sera retranchée au MNT pour obtenir la profondeur de la nappe (ou la hauteur potentielle de submersion) et ce résultat sera classé pour estimer un niveau de sensibilité aux remontées de nappe.

Le krigeage est l'interpolateur de la géostatistique qui a l'avantage d'être exact (en cas d'absence d'effet de pépite). Il intègre également la structure spatiale du phénomène au travers du variogramme et tient compte des distances entre les données d'entrée et les points à estimer. Globalement, notre analyse géostatistique sera donc décomposée en 3 étapes : préparation des données, calcul et modélisation du variogramme, puis krigeage.

Si la surface piézométrique est interpolée sur l'ensemble de la zone d'étude, la précision de l'interpolation est variable. Les données étant plus nombreuses dans les zones où la nappe est peu profonde (à proximité des cours d'eau notamment), la précision y sera meilleure.

Relativement à l'objectif principal qui demeure d'identifier les zones présentant des risques de remontée de nappe, il est à noter que la logique de collecte des données a été orientée essentiellement dans ce sens. On pourra noter à cet effet que certaines communes du bassin versant présentent de grandes zones sans donnée, notamment : Dompierre-sur-Authie, Estrées-lès-Crécy, Maison-Ponthieu, Conteville, Hiermont, Bernâtre, Agenville, Domléger-Longvillers, Candas, Thièvres, Foncquevillers, Bouquemaison.

Cela a un effet à la fois statistique sur les données et également plus loin sur la structure spatiale de la variable « cote altimétrique du niveau d'eau ».

Compte tenu donc de ce qui précède, le résultat issu de ce travail ne devra pas être exploité pour évaluer le niveau piézométrique moyen au droit du site.

6.2. PREPARATION DES DONNEES

Les données ont fait l'objet de contrôle, vérification et traitement afin d'éliminer les mesures erronées. Il en a résulté un partitionnement du jeu de données initial en deux blocs :

Les données utilisables pour l'interpolation : Les points de mesures portant un degré de fiabilité grand (relatif) qui ont servi à calculer la carte des niveaux d'eau et les cartes en dérivant.

NB : Pour information, les données de type Timeseries, celles issues des images satellite, ont été systématiquement retiré des données servant à l'interpolation. Cela s'explique par le fait que ces points Timeseries présentaient majoritairement une différence assez nette de la cote altimétrique du niveau d'eau mesurée comparativement aux points provenant de sources différentes (Illustration 48).

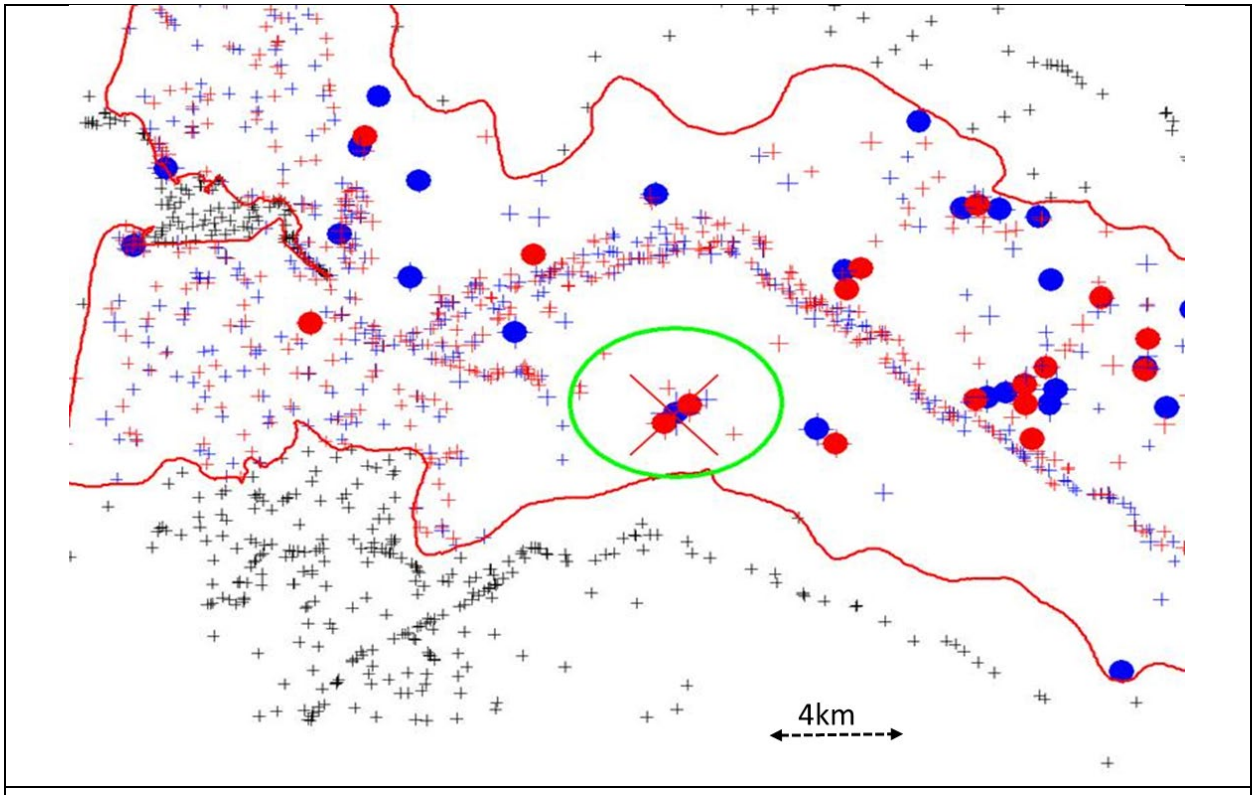


Illustration 48 Exemple de point de source Timeseries (timeseries_db18_con10_485) présentant une grande différence (24 mètres) avec les deux piézomètres l'avoisinant (00234X0204/S1 et 00234X0262/F2)

Les données dites de contrainte : Il s'agit de points portant un niveau de fiabilité faible notamment sur la cote piézométrique mesurée mais qui fournissent néanmoins des contraintes d'inégalités (minimales en l'occurrence) pour le niveau d'eau.

Ainsi au total la base de données comptait **5404 points en tant que données d'interpolation et 557 points en tant que données de contrainte**.

Un second contrôle a été effectué. Il a mis en évidence **61 points indiquant des mares se situant au sommet de crêtes topographiques**. Ces mares visiblement artificielles et relevant d'une activité humaine induisaient une mauvaise interprétation de la carte de sensibilité. En fait, elles imposaient des risques infondés de dépassement du niveau d'eau au sommet de crête topographique. Ces points ont donc été retirés de la base de données.

6.3. VARIOGRAMME

Comme mentionné en introduction, la répartition hétérogène des données (ici due principalement à la densité importante de points le long des cours d'eau) ne facilite pas l'étude variographique.

Par ailleurs, il est à noter que les données recueillies semblent être associées à des « comportements hydrogéologiques » variés (cf. 2). Cela se reflète au niveau de l'histogramme de distribution du jeu de données des niveaux d'eau piézométrique maximaux ZT100 (Illustration 49). A cela s'ajoute les effectifs de données très différents entre les différentes entités hydrogéologiques en présence :

1) comportement de nappe en milieu sédimentaire ;
2) comportement de nappe en milieu alluvionnaire (en lien avec un cours d'eau) ;
3) comportement de niveau piézométrique en surface (cours d'eau en lien avec la nappe ou débordement), fortement lié à la surface topographique, et donc :
    - variant très faiblement le long des cours d'eau, voire sans variation sur des plans d'eau,
    - variant très fortement au niveau des coteaux (principalement des données historiques de zones inondées).

Le variogramme (Illustration 50) est un outil expérimental utilisé en géostatistique pour caractériser la structure spatiale des phénomènes à modéliser, dans notre cas le niveau piézométrique. Il permet de mesurer la corrélation d'une variable relativement à la distance (norme et direction) entre les points de mesure de ladite variable.

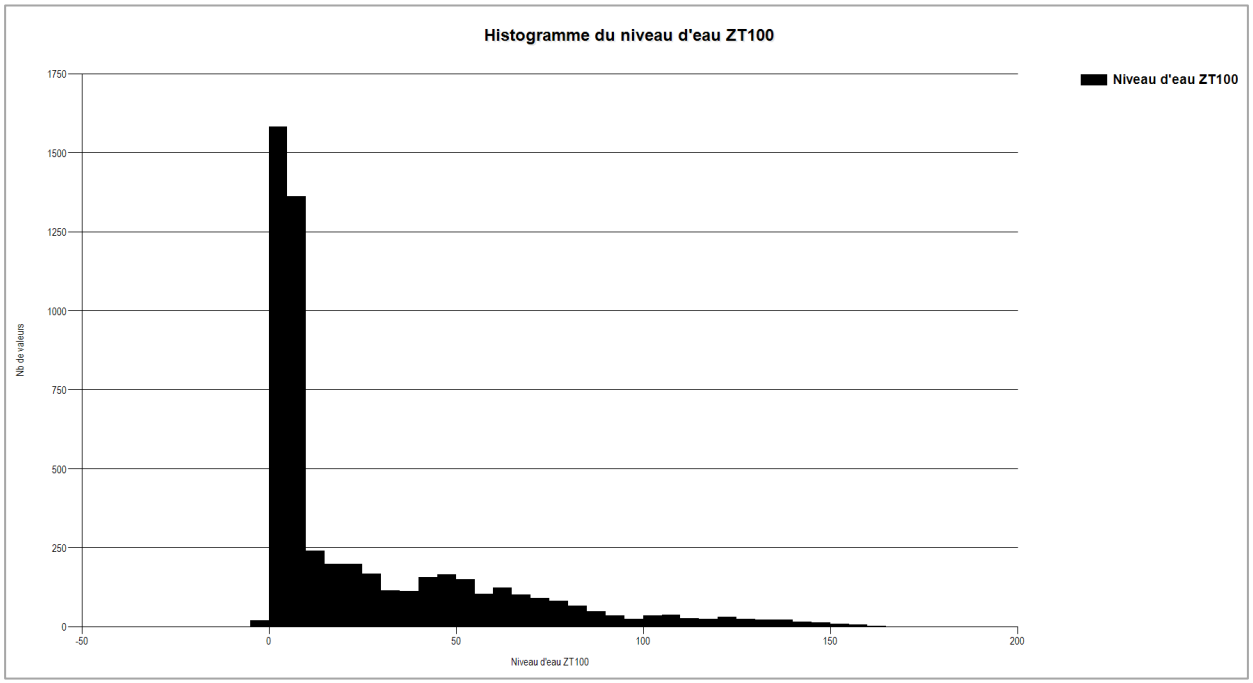


Illustration 49 : Histogramme ZT100

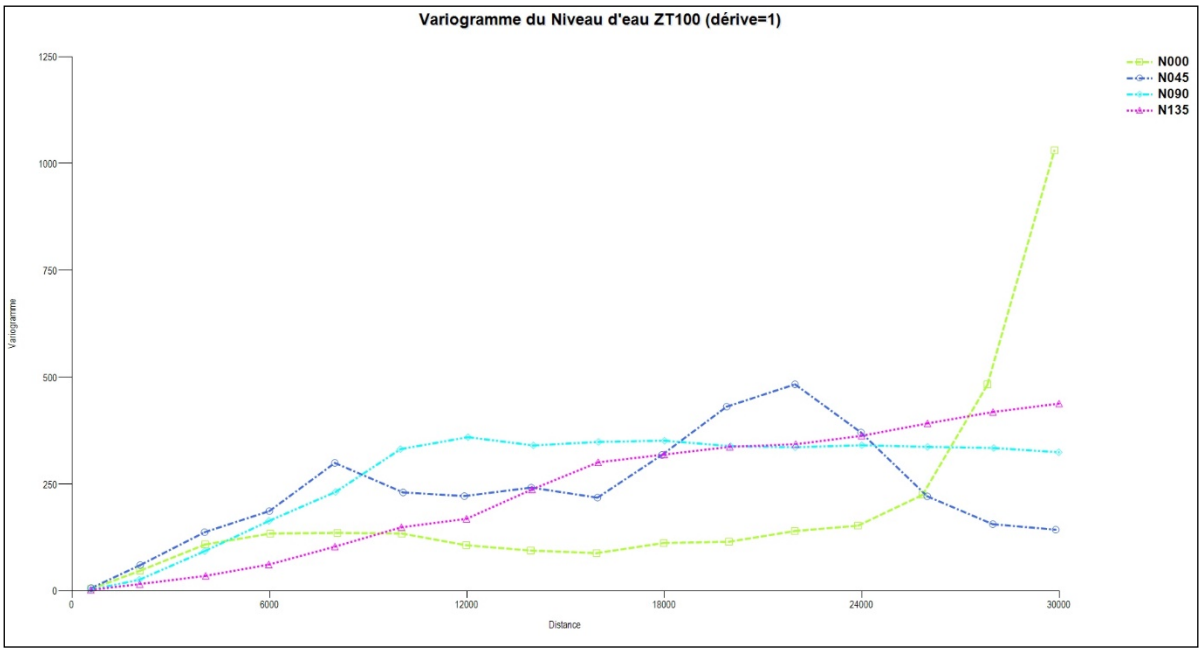


Illustration 50 : Variogramme directionnel ZT100

L'histogramme indique une distribution dissymétrique avec 59,46% des valeurs qui sont comprises entre -5 mètres et 15 mètres. Cette distribution indique une dérive dépendant des coordonnées. La piézométrie est influencée par la présence du bassin versant ainsi que son sens d'écoulement.

Cette dérive a été « filtrée » lors du calcul du variogramme expérimental par un plan moyen qui est approximé par un polynôme de degré 1, avec deux coordonnées *(U,V)* et un degré 1 (Illustration 51).

Ainsi,

$Z(x) = Y(x) + [a + bU + cV + dUV]$, avec

$m(x) = a + bU + cV + dUV$, étant la dérive

U, V étant les coordonnées

$Z(x)$ la variable d'intérêt

$Y(x)$ le résidu

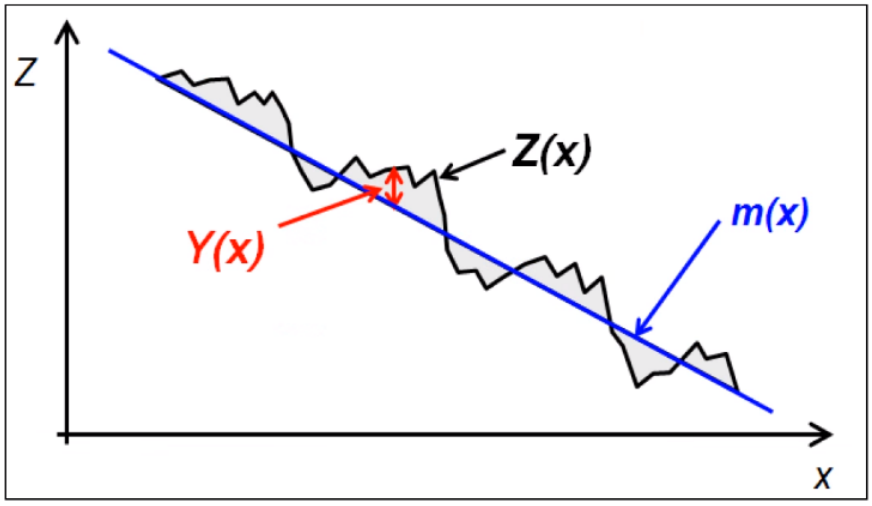


Illustration 51 : Exemple de variable présentant une dérive liée aux coordonnées

Le variogramme directionnel (Illustration 52) calculé sur ces données révèle donc deux informations importantes : une tendance de la variabilité influencée par les coordonnées (Dérive d'ordre 1) et un comportement différent de la variabilité en fonction de la direction (anisotropie).

Nous avons retiré cette dérive qui est induite par la pente/morphologie globale du bassin versant et fait l'hypothèse d'isotropie pour faciliter la modélisation.

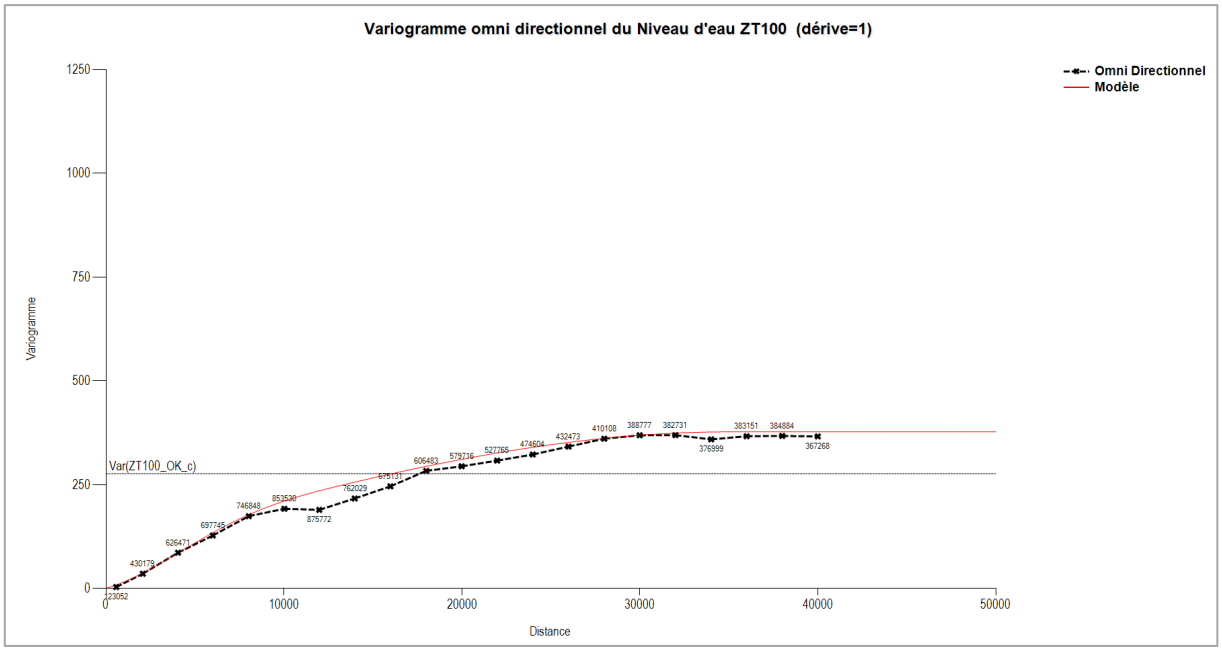


Illustration 52 : Variogramme moyen (hypothèse d'isotropie) de ZT100 calculé

Avant d'effectuer la modélisation, il a été effectué une validation croisée.

Pour information, cette opération consiste à estimer par krigeage (à l'aide du modèle de variogramme et des points avoisinant) chaque point de données en masquant sa valeur « mesurée ».

Cela permet dans un premier temps de s'assurer que le modèle de variogramme choisi permet de « reproduire » au mieux le phénomène étudié et d'autre part d'identifier des points présentant des valeurs (très) différentes par rapport aux autres points dans leur voisinage proche.

A la suite de cette opération, il a été défini 16 sous-zones avec un écart important (Illustration 53).

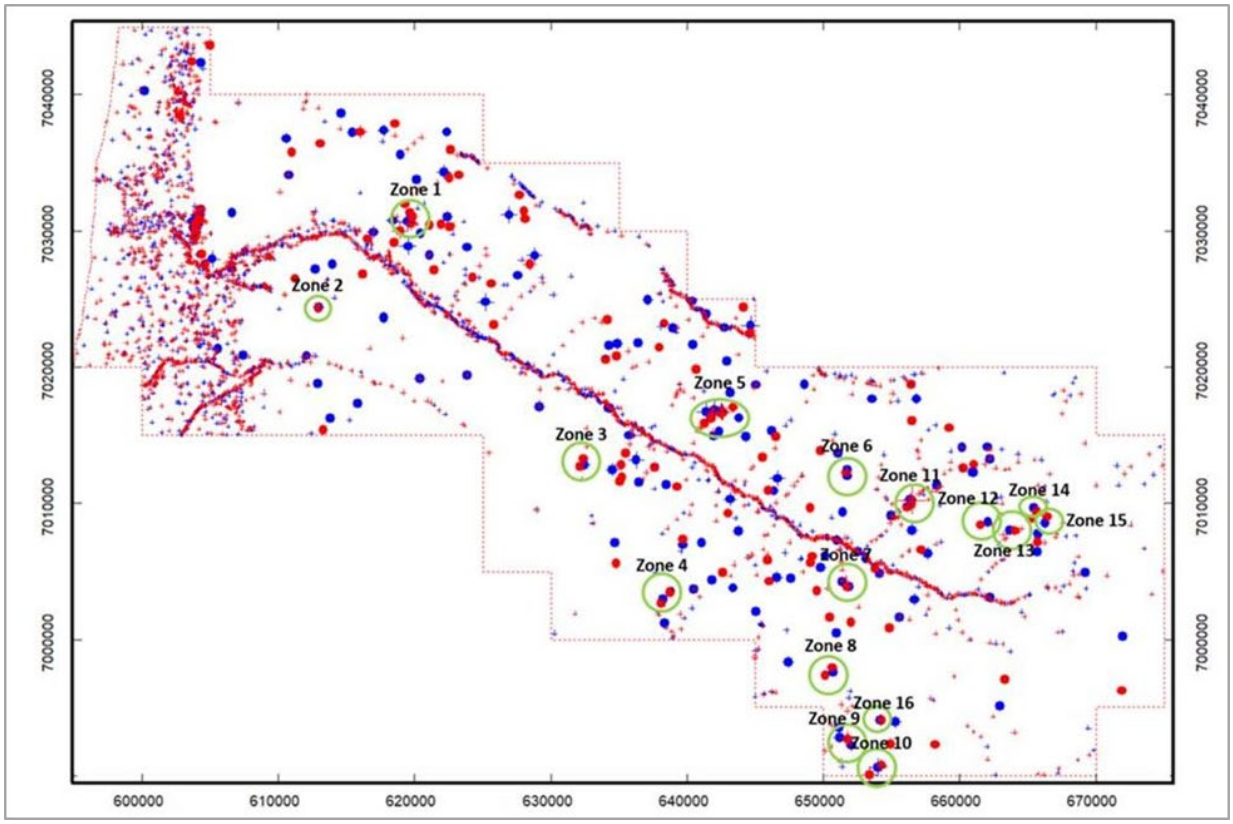


Illustration 53 : Carte des erreurs réduites résultant de la validation croisée

Le traitement des données à la suite de la validation croisée s'est fait en tenant compte du degré de fiabilité des données. En effet les points de donnée ayant chacun une évaluation du degré de fiabilité (Faible - Moyen – Fort), il a été privilégié les informations portées par les points de fiabilité plus grande.

Lorsqu'il y avait dans une sous-zone un point (voire des points) de fiabilité mauvaise en dissonance avec des points de fiabilité plus grande, ce point a été éliminé. De la même façon si les points d'une sous-zone portent tous le même degré de fiabilité ils sont tous gardés à la suite d'une série de vérifications supplémentaires (documentation BSS, position sur vue aérienne, etc…) de ces données.

Ainsi à la suite de cette analyse, 11 points ont été retirés. **Au final le jeu de donnée utilisé pour l'interpolation comptait 5323 sur 5404 points**.

6.4. APPORT DES POINTS DE CONTRAINTE

La prochaine étape a été l'interpolation niveau d'eau ZT100 par krigeage ordinaire.

Le krigeage est, pour rappel, l'estimateur de référence de la géostatistique. Il estime la valeur d'une variable au droit d'un point où celle-ci n'est pas mesurée et ce à partir des points l'avoisinant (Illustration 54).

$Z^*(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \cdots + \lambda_n Z(x_n)$, avec

λ_i poids du krigeage

$Z^*(x_0)$, la valeur inconnue au point X_0

$Z(x_i)$, la valeur de la variable d'intérêt (Niveau d'eau ZT100) au point X_i (x_i,y_i,z_i)

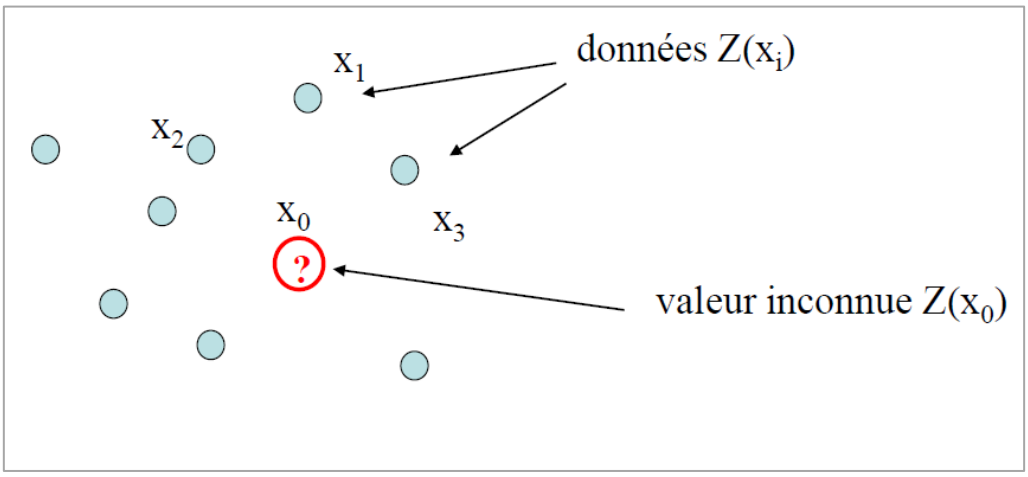


Illustration 54 : Interpolation au droit d'un point

Il est construit avec une condition de non biais qui impose que la somme des poids soit égale à 1 et que les moments d'ordre soient invariants par translation (cas du krigeage ordinaire) :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \\ E[Z(x)] = E[Z(x+h)] \end{cases}$$

Le krigeage permet d'obtenir, outre l'estimation de la variable d'intérêt (Illustration 55), une quantification de la précision de cette estimation au droit de chaque point où il est effectué. Le krigeage fournit une erreur d'estimation. Cette erreur d'estimation, également appelée variance de krigeage est minimale par construction (Illustration 56).

Les principales propriétés du krigeage sont :

- ***Interpolateur exact*** (en absence d'effet de pépite)
- ***Effet de lissage*** (afin d'assurer la minimalisation de la variance d'estimation)
- ***Intégration de la continuité spatiale du phénomène à travers la prise en compte du variogramme*** dans son équation

La carte du niveau piézométrique maximal interpolé est présentée sur l'Illustration 55.

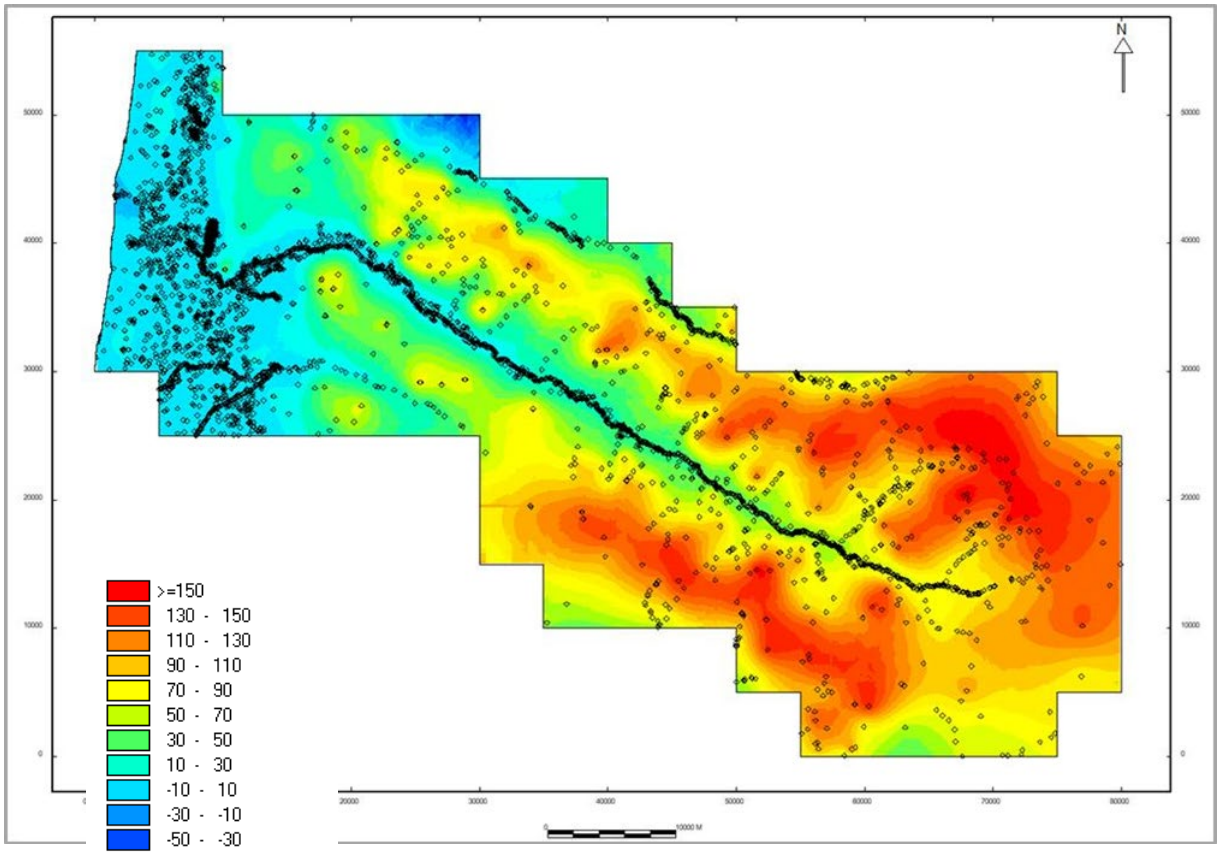


Illustration 55 : Carte du niveau d'eau ZT100 (1ère interpolation)

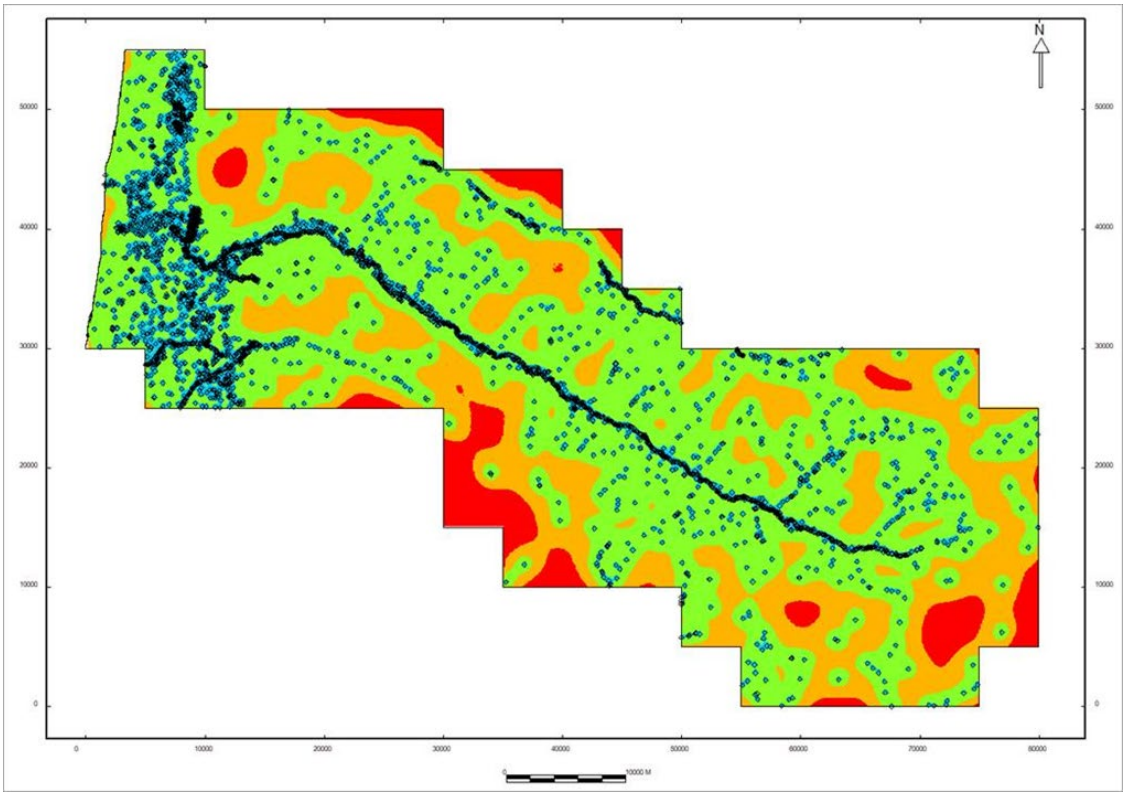


Illustration 56 : Carte de l'écart-type de krigeage du niveau d'eau ZT100

La suite de la démarche adoptée a été de confronter cette carte (la grille) avec les points dits de « contrainte ». Pour ce faire, nous avons « projeté » la grille de ZT100_Krigé au droit des données de contrainte. Ensuite, la différence ***ZT100_Krigé - ZT100_Contrainte*** a été calculée au droit de tous les points de contrainte (Illustration 57).

Pour information, ces points sont au nombre de 557 et portent tous un degré de fiabilité faible. Etant tous de fiabilité faible, nous n'avons pas jugé judicieux de les intégrer intégralement pour caler l'interpolation. En fait, il a été estimé qu'étant de faible précision ils peuvent fluctuer entre +/- 10 mètres autour de leur valeur vraie (inconnue). Par contre, lorsque l'écart est supérieur à +/-10 mètres entre la grille et le point de contrainte, cette différence a été jugée comme n'étant pas tolérable et nous utilisons donc la donnée de contrainte pour l'interpolation.

Au total, ***145 points sont donc rajoutés*** par la suite à la table de données à utiliser pour l'interpolation.

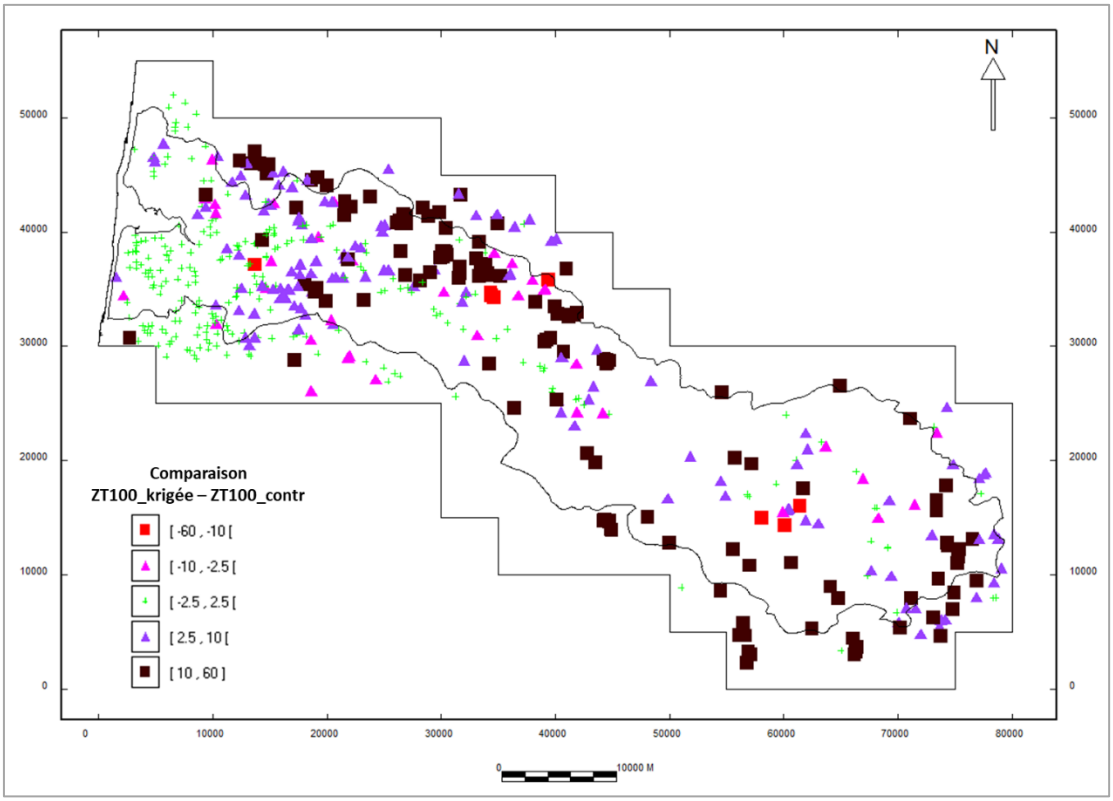


Illustration 57 : Carte des différences ZT100_KO - ZT100_Contrainte

6.5. ESTIMATION DU NIVEAU D'EAU ET DERIVES

Une fois, les points de contrainte ajoutés une seconde interpolation a pu être relancé par krigeage ordinaire afin d'obtenir une carte du niveau d'eau.

Les calculs ont permis in fine de :

- ***Calculer les zones de sensibilité en soustrayant du MNT la cote altimétrique du niveau d'eau interpolée (7.1) ;***
- ***Calculer une carte des degrés de fiabilité à partir des points utilisés pour l'interpolation (calculée à partir de l'ensemble de données, tout degré de fiabilité confondu) (7.2.1);***
- ***Calculer une carte d'écart-type du niveau d'eau (carte permettant d'identifier les zones avec une précision mauvaise à l'issu de l'estimation) (7.2.2);***
- ***Calculer une carte de l'analyse croisée (degré de fiabilité – écart-type de krigeage) (7.2.3).***

Le premier résultat est la carte du niveau piézométrique ZT100 (Illustration 58).

Cette carte résulte d'une interpolation par krigeage ordinaire sur une grille de 25m*25m couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi au droit de chaque maille pourra être évaluée l'épaisseur de la zone non saturée (relativement au MNT 25m issu de la base de données RGE ALTI - Illustration 59).

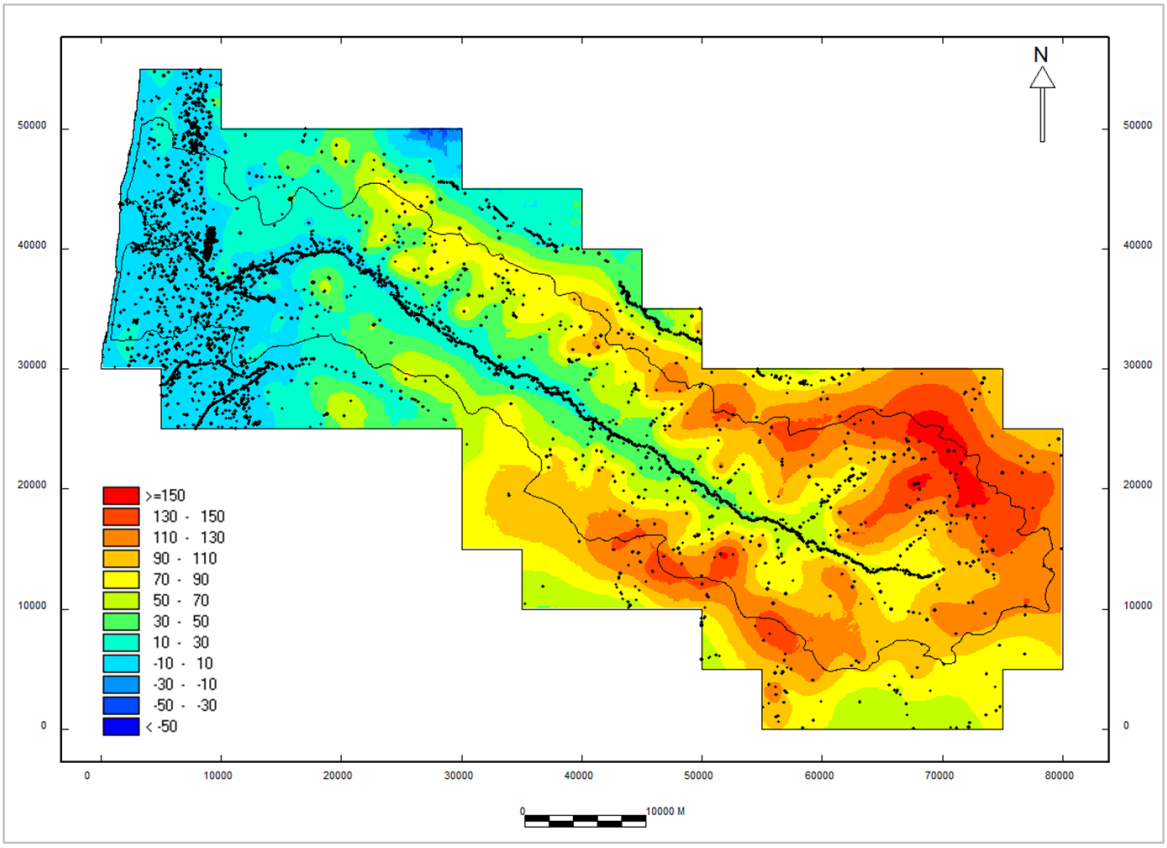


Illustration 58 : Carte du niveau piézométrique estimé par krigeage (ZT100_Krigé)

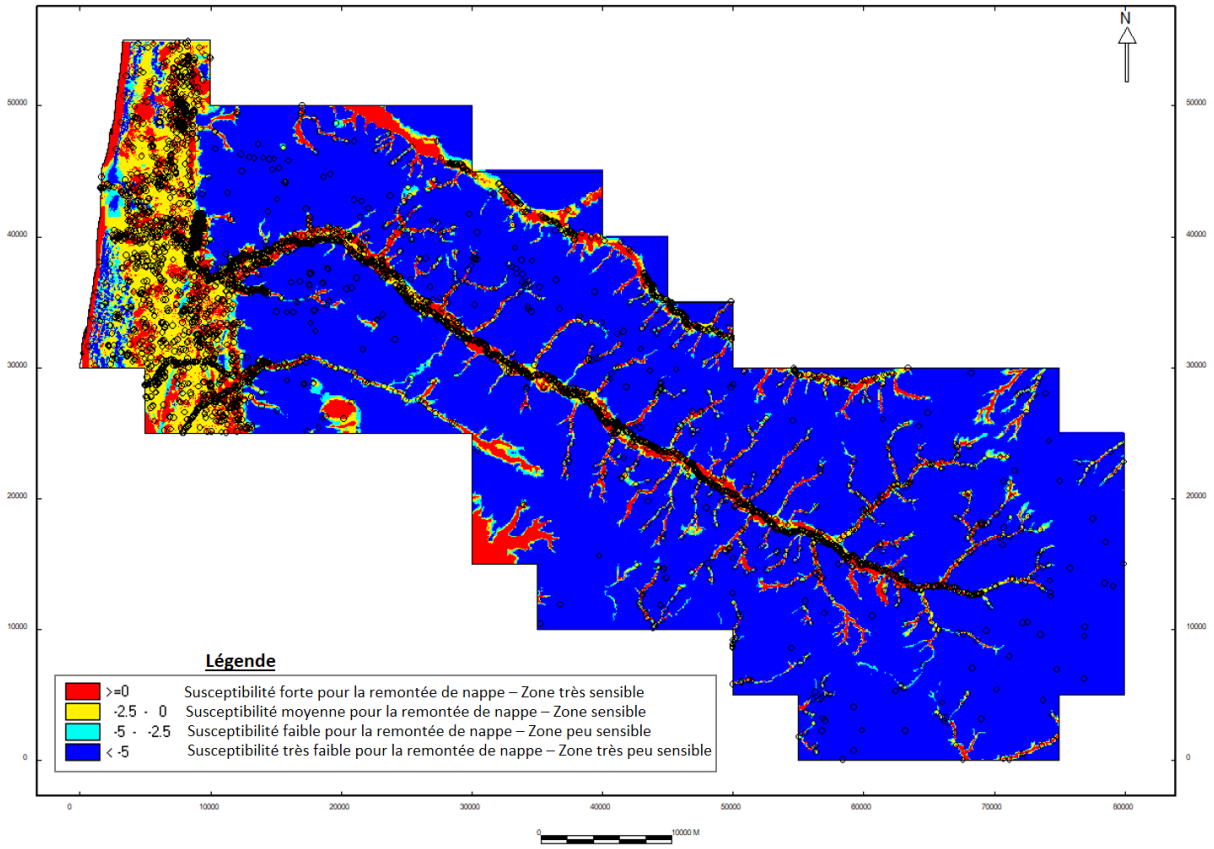


Illustration 59 : Carte des zones de sensibilité de remontée de nappe (ZT100_Krigé - MNT)

A la lecture de la carte ci-dessus, il est à relever :

- **≥ 0 - Susceptibilité forte pour la remontée de nappe – Zone très sensible** : Les zones en rouge sont estimées comme étant susceptibles vis-à-vis de l'alés de remontée de nappe car le niveau piézométrique est égal ou supérieur à la topographie. Il s'agit principalement des zones humides, de la vallée de l'Authie et des cours d'eau annexes, des endroits ayant fait historiquement l'objet de remontée de nappes.

- **[-2,5 ; 0] - Susceptibilité moyenne pour la remontée de nappe – Zone sensible** : Les zones en jaune [-2,5 ; 0] constituent des régions avec un aléa moyen à fort de remontée de nappe du fait de la faible épaisseur de la zone non saturée,

- **[-5 ; -2,5] – Susceptibilité faible pour la remontée de nappe – Zone peu sensible** : les zones en bleu claire indiquent les zones avec un aléa plutôt faible de remontée de nappes.

- **En-deçà de -5 mètres - Susceptibilité très faible pour la remontée de nappe – Zone très peu sensible** : il est supposé que les zones cartographiées possèdent un risque très faible de remontée de nappe.

7. Réalisation de la carte de sensiblité aux remontées de nappe

7.1. ELABORATION DE LA CARTE

Le résultat brut de l'interpolation du niveau piézométrique extrême présenté en Illustration 58 a été confronté au MNT pour en déduire les zones sensibles aux remontées de nappe (Illustration 60)

La détermination de l'échelle de résolution de la carte finale est dépendante des échelles de résolution du MNT et de la grille de la surface piézométrique maximale interpolée. Des classes de sensibilité doivent être adaptées à la qualité des résultats obtenus sur le secteur d'étude.

Par exemple, pour le bassin versant de l'Authie, l'échelle d'utilisation préconisée est le 1/50 000 voire 1/25 000 sur les secteurs présentant le moins d'incertitudes. Il a donc été proposé une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe avec quatre classes de sensibilité dépendantes de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux :

- aléa fort = Zones très sensibles : niveau de nappe au-dessus du sol,
- aléa moyen = Zones sensibles : niveau de nappe entre 0 et 2,5 m de profondeur,
- aléa faible = Zones peu sensibles : niveau de nappe entre 2,5 et 5 m de profondeur,
- Pas de débordement : niveau de nappe à plus de 5 m de profondeur.

Le résultat est très bon sur la majorité de la zone d'étude, et globalement satisfaisant ailleurs. Des problèmes subsistent toutefois liés aux différences de comportement entre les types de données en entrée, et à l'absence de données hors cours d'eau dans certaines zones (notamment sur les plateaux dans la partie amont – sud-est – du bassin versant).

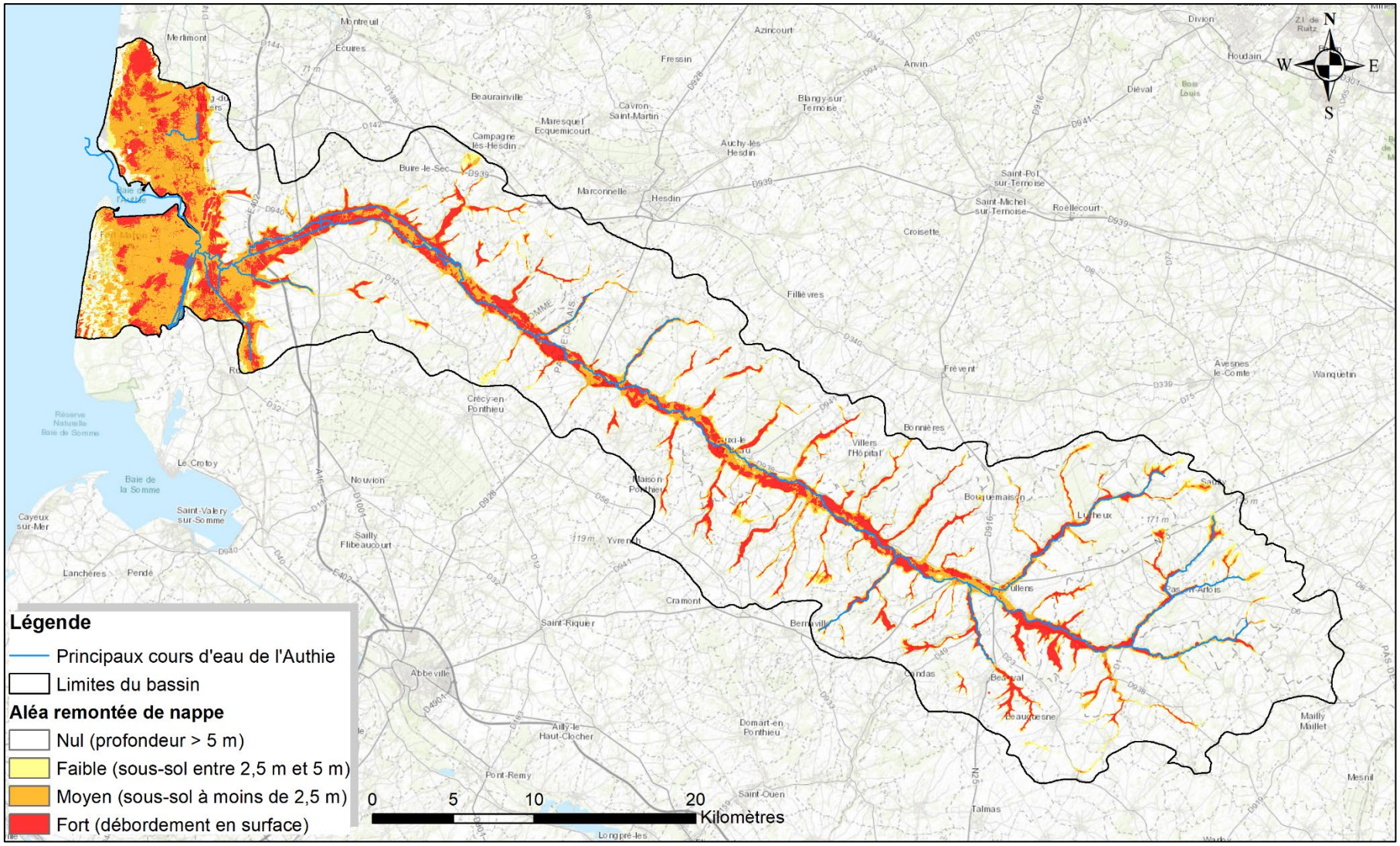


Illustration 60 : Carte de l'aléa remontée de nappe sur le bassin de l'Authie obtenue par comparaison entre le MNT et le niveau piézométrique extrême interpolé par méthode géostatistique

7.2. EVALUATION DU NIVEAU DE CONFIANCE DES RESULTATS

Les jeux de données utilisées ainsi que les méthodes d'interpolation ont généré plusieurs niveaux d'incertitudes. Pour les caractériser, un indice de confiance a été définie en combinant un critère qualifiant l'incertitude des données interpolées (« Ecart-type d'interpolation ») et un critère basé sur les classes de fiabilité (cf. chapitre 3.2) auxquelles appartiennent les points utilisés (« Fiabilité moyenne des points »).

L'objectif de cet indice de confiance est donc de fournir une information complémentaire permettant d'apprécier au mieux la robustesse de la carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe sur le bassin.

7.2.1. Grille de fiabilité des points

La grille de fiabilité des points est le résultat d'une interpolation géostatistique de valeurs attribuée selon les classes de fiabilité des points (1 = fiabilité forte, 2 = fiabilité moyenne, 3 = fiabilité faible).

Lors de la constitution de la base de données, il a été attribué un degré de confiance à chacun des points. Ce niveau de confiance ou degré de fiabilité s'échelonne sur 3 niveaux : faible, moyen et fort. Ces indices ont été codés numériquement comme suit :

- Fort => 1
- Moyen => 2
- Faible => 3

Il a donc été possible d'interpoler ces indices par krigeage ordinaire afin de spatialiser cette information (Illustration 61 et). Pour rappel, l'ensemble des données (Contraintes/Interpolation – Fiabilité faible/Moyenne/Forte) ont été utilisées de sorte à représenter au mieux la qualité générale des données utilisées pour la réalisation de la cartographie des risques de remontée de nappe pour cette étude.

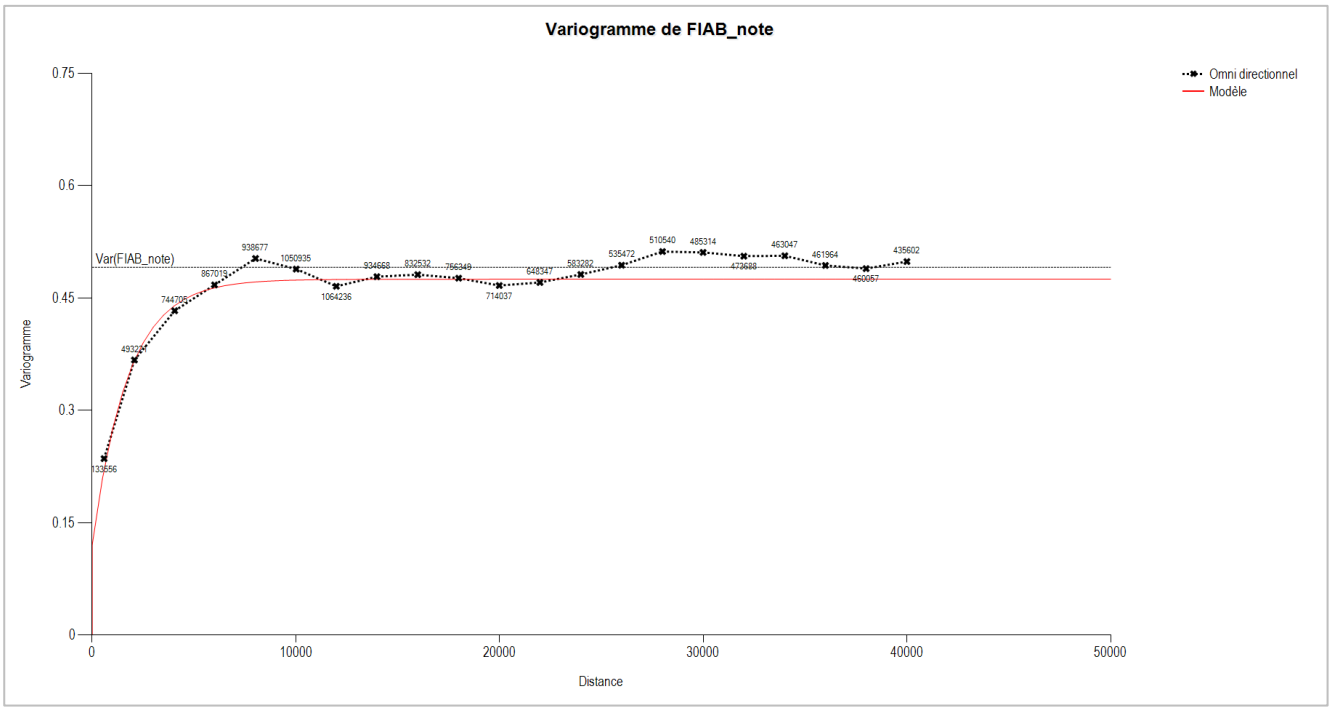


Illustration 61 : Variogramme omni directionnel de l'indice de fiabilité des données

Une classification des résultats de cette grille de fiabilité des points est proposée ci-dessous :

- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 1 (valeur appliquée en amont du calcul à un point de fiabilité forte) et 1,25 alors sa classe de fiabilité est « forte » ;
- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 1,25 et 2,25 (valeur appliquée en amont du calcul à un point de fiabilité moyenne) alors sa classe de fiabilité est « moyenne » ;
- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 2,25 et 3 alors sa classe de fiabilité est « faible ».

Le résultat de cette classification appliquée sur cette grille est présenté dans l'illustration ci-dessous.

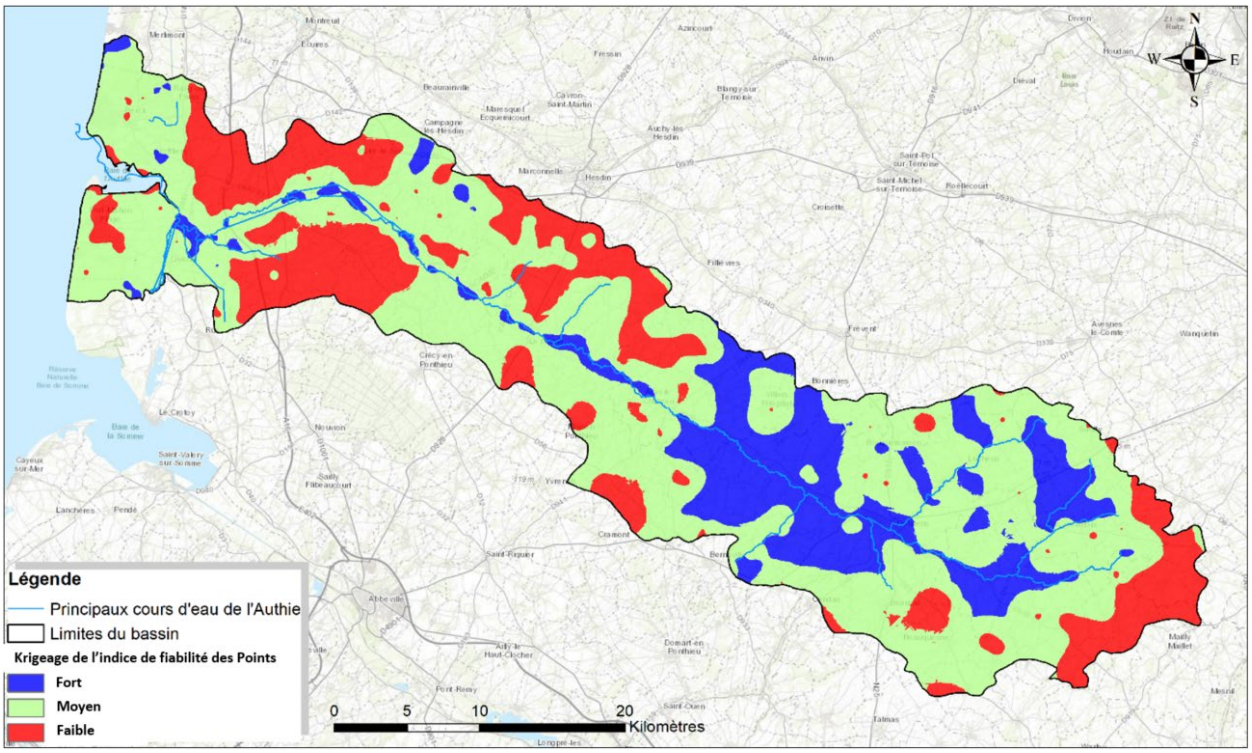


Illustration 62 : Carte représentant la grille de fiabilité moyenne des points utilisés pour l'interpolation du niveau piézométrique extrême sur le bassin de l'Authie

7.2.2. Carte d'écart type de krigeage

L'un des « sous-produits » du krigeage est la carte de l'écart-type de krigeage (racine carré de la variance de krigeage).

Elle permet d'identifier les zones bien estimées et les zones moins bien estimées par le variogramme modèle ainsi que les paramètres interpolation utilisés. Elle permet également d'identifier les régions présentant des lacunes de données.

Il est à noter que cette carte est calculée uniquement avec les données d'interpolation retenues pour le calcul du variogramme modèle.

La carte d'écart type de krigeage est présentée sur l'Illustration 63.

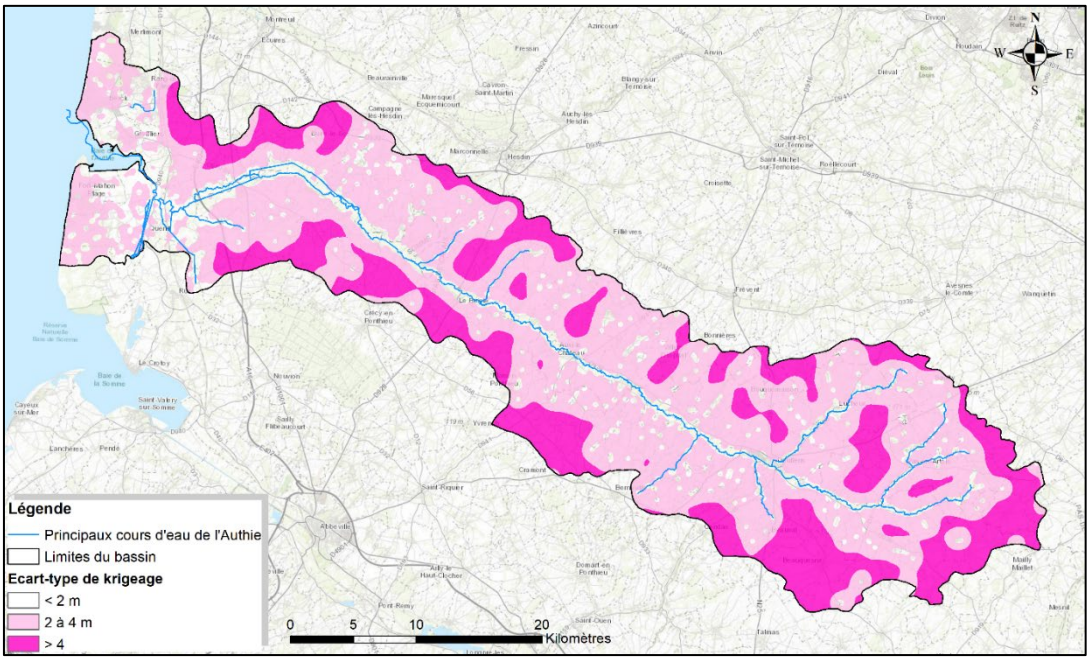


Illustration 63 : Carte des écarts-type de krigeage induits par l'interpolation géostatistique du niveau piézométrique extrême

7.2.3. Calcul d'un indice de confiance

Le critère de fiabilité peut être mise en regard de l'écart-type de krigeage pour définir les zones nécessitant une amélioration en terme de qualité/présence de mesures d'eau. En effet, trois grandes classes ont été recalculées selon des règles présentées dans le Tableau 9 ci-dessous.

		Critère "Ecart-type d'interpolation"		
		< 2m	[2m ; 4m]	> 4m
Critère "Fiabilité du point utilisé"	[1 ; 1.25]	1	1	2
	[1.25 ; 2.25]	1	2	3
	[2.25 ; 3]	2	3	3

Tableau 9 : Tableau combinant le critère d'écart-type d'interpolation avec celui sur la fiabilité

A partir des différentes combinaisons des deux indices, trois classes ont été déterminées pour qualifier cet indice de confiance :

Classe 1 : Région estimée avec une précision bonne à partir de données de fiabilité bonne (Forte confiance dans les données interpolées)

Classe 2 : Région avec une précision globale d'estimation moyenne relativement à l'erreur d'estimation et à la fiabilité relativement (Confiance moyenne dans les données interpolées)

Classe 3 : Région estimée avec une mauvaise précision à partir de données de fiabilité moyenne faible (Faible confiance dans les données interpolées).

Le résultat de cet indice de confiance sur les travaux de cartographie de l'aléa remontée de nappe sur le bassin de l'Authie est proposé en Illustration 64 et Illustration 65.

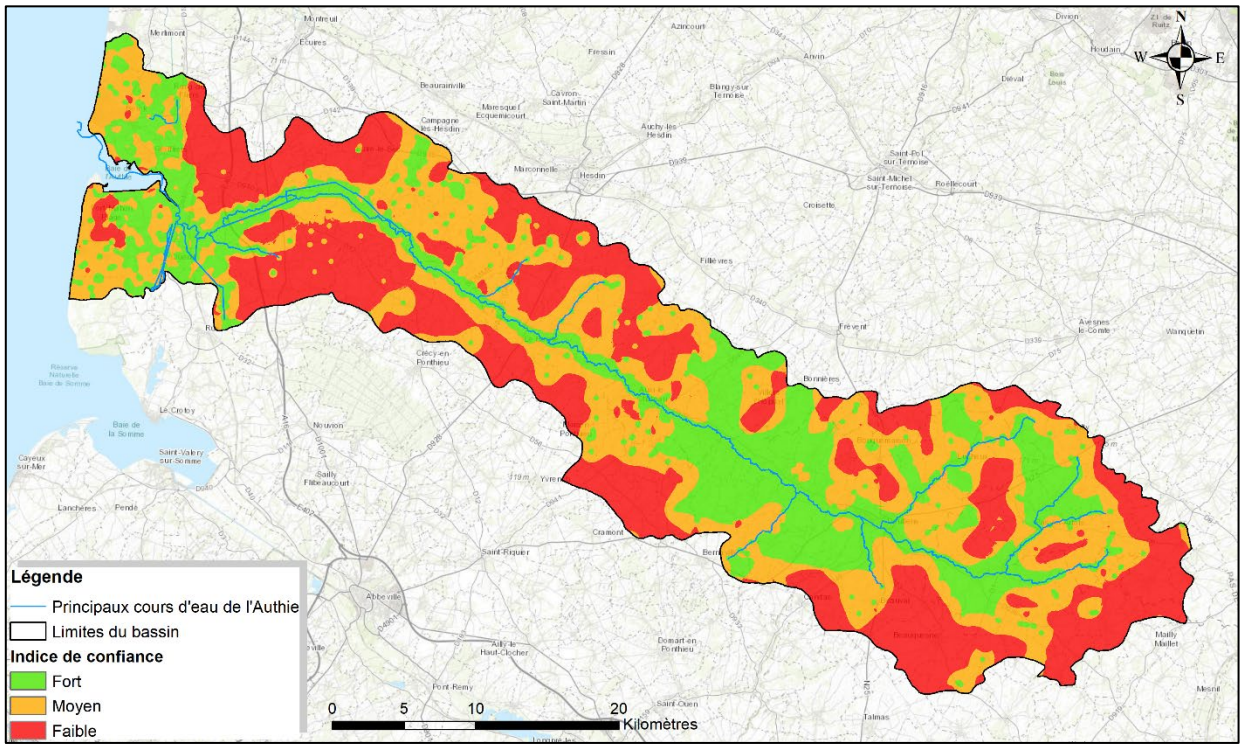


Illustration 64 : Représentation de l'indice de confiance global sur la cartographie des zones sensibles au remontées de nappe

Les zones pour lesquelles le niveau de confiance semble le plus élevé sont le Marquenterre et la basse vallée de l'Authie. Le grand secteur en partie médiane du bassin affiché avec un fort indice de confiance est à nuancer du fait qu'il s'appuie uniquement sur des points de surface, considérés comme à fiabilité forte et répartis de façon homogène ce qui explique cette note élevée.

Globalement, les secteurs des plateaux crayeux ont un niveau de confiance faible, essentiellement du fait d'une très faible densité de la donnée disponible.

Cette dernière carte pourrait, entre autre, apporter de l'aide à la décision quant à l'identification des zones nécessitant une cartographie plus fine et plus locale. Cependant, elle ne saurait être utilisée de façon isolée sans y juxtaposer une carte des zones d'intérêt pour la collectivité et un plan d'urbanisme associé.

Sur la base de cette carte nous pouvons donc définir provisoirement des zones pouvant faire l'objet d'étude locale complémentaires. Il s'agira de :

Cas A : En cas de possibilité d'effectuer une campagne d'acquisition de données complémentaires : de cibler les zones mal estimées et qui ne contiennent pas de donnée et éventuellement envisager d'implémenter des piézomètres de suivi.

Cas B : En cas d'impossibilité d'effectuer une campagne d'acquisition de données complémentaires : de cibler les zones dans lesquelles il y a de la donnée de fiabilité basse (faible à moyenne). Ces données pourraient être vérifier, améliorer, puis passer à une fiabilité supérieure. Cela aura, à priori, pour effet de réduire les zones rouges au profit de zone orange à verte.

Cas C : possibilité d'amélioration de l'échelle de rendu de la cartographie de sensibilité sans besoin d'acquisition de données complémentaires : secteurs couvrant majoritairement les zones vertes avec un peu d'orange.

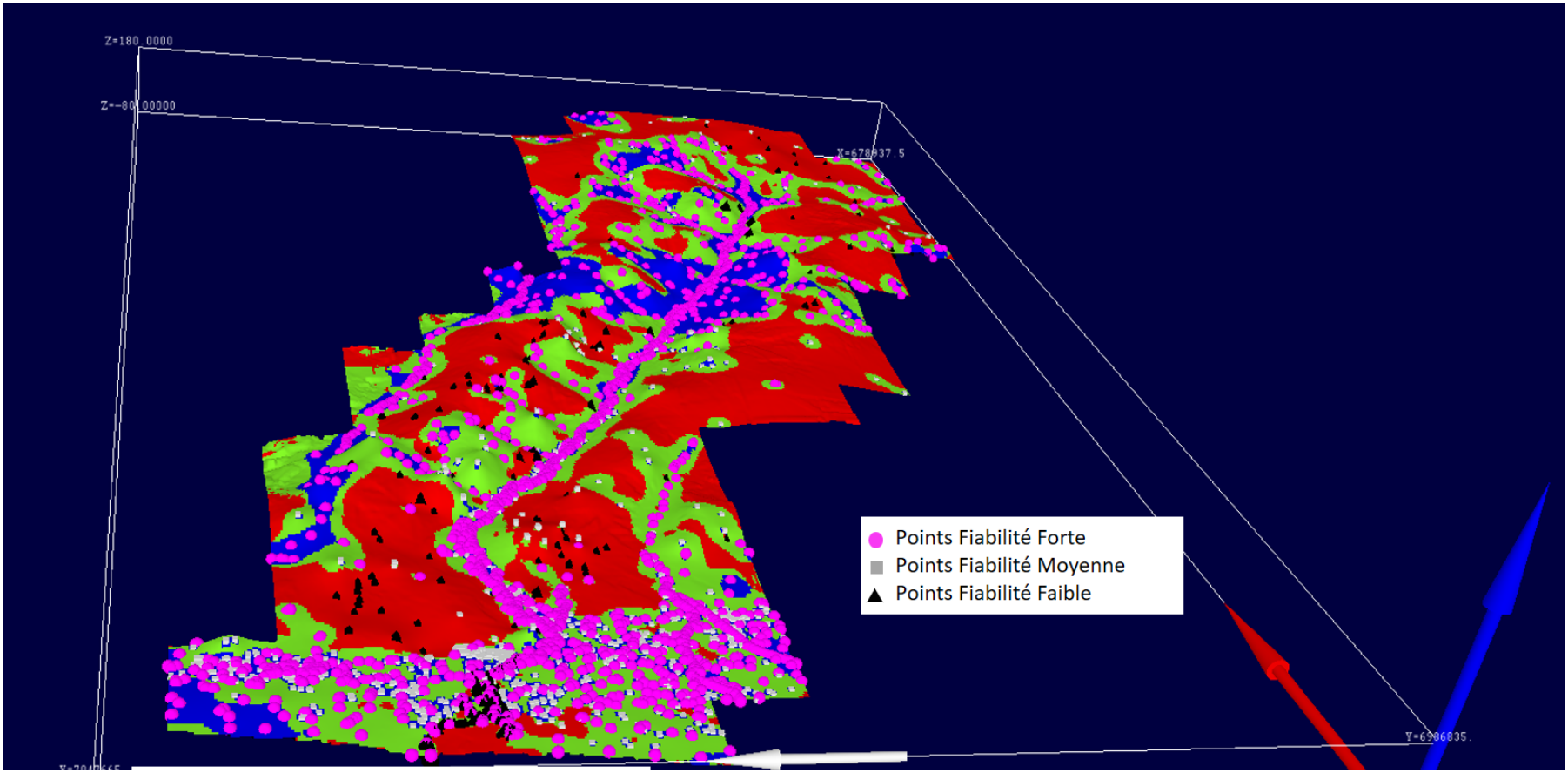


Illustration 65 : Exemple de vue 3D de l'indice de confiance global sur la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe

7.3. VALIDATION ET LIMITES D'UTILISATION

La carte de remontée de nappe réalisée doit être confrontée à l'expertise locale et mise à disposition de consultations pour avoir des retours critiques sur les zonages réalisés et la vérification de l'appartenance aux classes définies. La vérification des lois statistiques utilisées est faite à cette étape également, à savoir si l'estimation de ZT100 n'a pas été sous ou sur évaluée. Des modifications ponctuelles de la carte peuvent être apportées à la suite de cette étape de validation.

Des vérifications ponctuelles, à l'aide de photos disponibles publiquement (sites internet, images Google…) ont été réalisées mais pas de vérification systématique, vue l'étendu de la zone et le budget imparti. Un exemple de vérification est présenté sur l'Illustration 66.

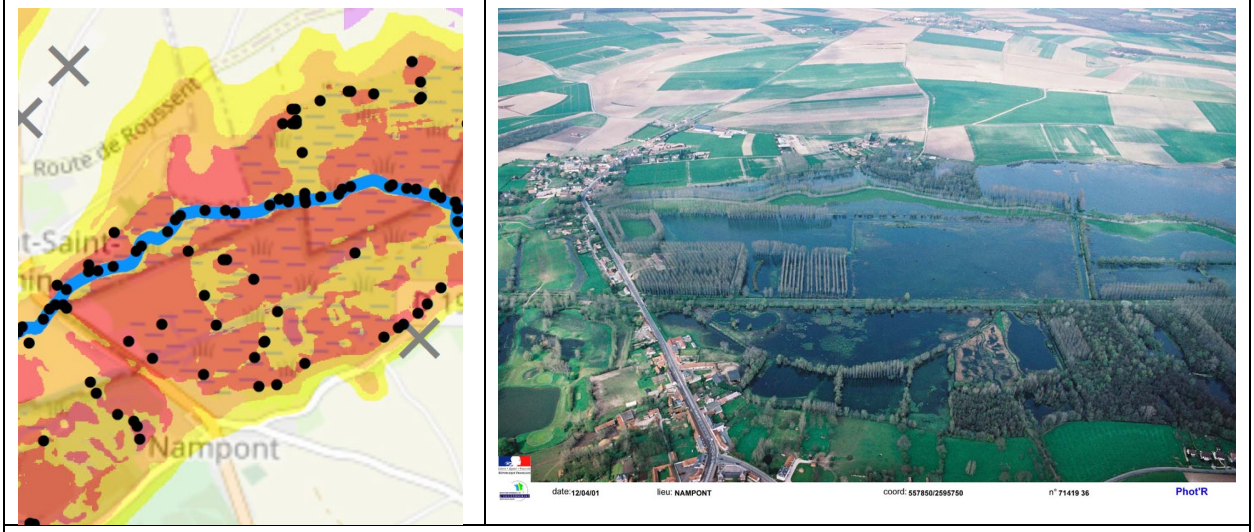


Illustration 66 : Exemple de validation à partir de photo - Photographie par Phot'R (sur nampont-nempont.com)

Limites d'utilisation

Une utilisation de la carte de sensibilité réalisée est possible à l'échelle de 1 : 50 000. Dans le cas C, voire le cas B, identifiés à la suite des travaux sur l'indice de confiance, cette échelle pourrait être affinée. Toutefois, une utilisation dans un document réglementaire demanderait des investigations pour confirmer les résultats, la vérification de la qualité du MNT, d'éventuelles réestimations locales et, en cas de données anormales résiduelles, l'intégration de nouvelles données. Des connaissances géologiques et hydrogéologiques locales plus fines pourraient également être utilisées.

L'urbanisation et l'industrialisation de grands secteurs ont un impact sur le fonctionnement des nappes. Ces perturbations piézométriques ne sont pas prises en compte explicitement dans l'approche globale mise en œuvre. Un travail sur les enjeux et la vulnérabilité seraient à mener pour compléter l'étude du risque remontée de nappe dans sa globalité.

8. Conclusions et discussions

La réalisation de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappe sur le bassin versant de l'Authie s'est appuyée sur le guide méthodologique récemment développé par le BRGM à l'échelle locale. Le bassin de l'Authie a ainsi permis de valider la méthode et d'y apporter quelques spécifications relatives au contexte hydrogéologique concerné. L'application de la méthode est conditionnée par la disponibilité d'informations sur les niveaux des nappes du secteur étudié en situation de hautes, voire très hautes, eaux. Cette cartographie nécessite également de disposer de quelques chroniques piézométriques de longue durée afin de réaliser des analyses probabilistes sur les niveaux de nappe mais également d'un MNT de qualité satisfaisante.

A l'échelle du bassin de l'Authie, peu de chroniques piézométriques de longue durée sont disponibles. Cependant, les données intéressantes à exploiter étaient les points de mesures de la campagne piézométrique hautes eaux de la nappe de la craie en 2001 et 2002, pour lesquels une période de retour de 100 ans a été attribuée et celle des sables du Marquenterre de 2016. En outre, des données historiques de remontée de nappe, issues d'enquêtes menées auprès des collectivités ont été intégrées. Parallèlement, un travail de traitement des données eaux de surface, possibles à intégrer car en communication avec les nappes superficielles du bassin, a été mené à la fois à partir des bases de données de la BD Carthage, BD Topage et BD Topo mais également des images satellites. Le traitement de ces dernières données s'est avérée complexe à cause du manque de disponibilités de certaines images, du fait de la couverture nuageuse importante sur le secteur et de l'humidité importante des sols qui fait ressortir ces zones comme potentiellement inondables. Pour chaque source de données utilisée, une caractérisation de sa fiabilité a été faite à partir d'informations diverses associées à celle-ci. Les trois niveaux de fiabilité attribués (faible, moyen, fort) ont servi de base à l'analyse géostatistique à la fois pour la modélisation de la surface piézométrique maximale mais aussi pour le calcul d'une grille de fiabilité.

Le calcul de la zone non saturée résulte d'une interpolation préalable par krigeage ordinaire de la cote piézométrique ZT100. Cette interpolation a été réalisée sur des données éprouvées par des tests de cohérence, dont la validation croisée, de sorte à identifier puis supprimer les données aberrantes. Les données de contraintes (voire d'inégalité) ont permis de contraindre partiellement l'interpolation initiale de sorte à améliorer la carte dans les régions moins bien informées tout en spécifiant des règles sur la prise en compte de ces données complémentaires.

L'échelle d'utilisation préconisée de la carte élaborée est le 1/50 000 voire 1/25 000 sur les secteurs présentant le moins d'incertitudes. Il a été proposé une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe avec quatre classes de sensibilité dépendantes de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux :

- aléa fort = Zones très sensibles : niveau de nappe au-dessus du sol,
- aléa moyen = Zones sensibles : niveau de nappe entre 0 et 2,5 m de profondeur,
- aléa faible = Zones peu sensibles : niveau de nappe entre 2,5 et 5 m de profondeur,
- Pas de débordement : niveau de nappe à plus de 5 m de profondeur.

Le résultat est très bon sur la majorité de la zone d'étude, et globalement satisfaisant ailleurs. Des problèmes subsistent toutefois liés aux différences de comportement entre les types de données en entrée, et à l'absence de données hors cours d'eau dans certaines zones (notamment sur les plateaux dans la partie amont – sud-est – du bassin versant).

La grille de fiabilité calculée a été croisée avec la carte de l'écart-type de krigeage pour définir les zones à cibler pour un éventuel complément de collecte de données et de précision de celles-ci et les zones bien estimées où un affinement de la carte de sensibilité est possible. Ces informations sont pertinentes également pour la définition d'un réseau de suivi et de surveillance pour les remontées de nappes.

Les zones pour lesquelles le niveau de confiance semble le plus élevé sont le Marquenterre et la basse vallée de l'Authie. Globalement, les secteurs des plateaux crayeux ont un niveau de confiance faible, essentiellement du fait d'une très faible densité de la donnée disponible. Cette dernière carte pourrait, entre autres, apporter de l'aide à la décision quant à l'identification des zones nécessitant une cartographie plus fine et plus locale. Cependant, elle ne saurait être utilisée de façon isolée sans y juxtaposer une carte des zones d'intérêt pour la collectivité et un plan d'urbanisme associé.

Ce type d'approche géomatique est quasi-systématiquement soumis à une somme d'incertitudes d'origines diverses, induisant des biais parfois importants dans certaines zones du secteur investigué. Il faut donc considérer ces limitations lorsqu'une exploitation de ce type de résultats est entreprise. Surtout, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, cette approche cartographique doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure à celle préconisée et se substituer à des études plus locales.

Enfin, il serait intéressant de mettre en œuvre d'autres méthodes de calculs géostatiques de la cote altimétrique de l'eau afin de comparer les résultats et d'en tirer le meilleur. Il s'agirait notamment d'explorer le krigeage avec dérive externe, le krigeage avec contraintes d'inégalité ou même les simulations conditionnelles.

En conclusion, afin de rendre la carte de sensibilité utilisable directement pour un Plan de Prévision de Risque, il est nécessaire de réaliser des expertises complémentaires par un hydrogéologue afin d'y apporter des corrections et des données complémentaires localement. Elle demeure pour autant un bon indicateur pour définir les secteurs favorables à l'établissement d'un PPR.

9. Bibliographie

Agence de l'Eau Artois Picardie (2008) – Cartographie des zones à dominantes humides du bassin Artois-Picardie par photointerpétration. https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/zones-a-dominante-humide/.

Allier D., Amraoui N., Bault V., Bessière H., Stollsteiner P. (2012) – Prévision des niveaux piézométriques et des débits d'étiage de 2012 sur 11 bassins versants en Picardie. Rapport BRGM/RP-61164-FR, 234 p., 210 ill., 22 tabl., 2 ann.

Arnaud L., Rousseau M. (2019) - Appui au SCHAPI 2018 - Module 2 : Extension du modèle maillé des hautes eaux de la Somme au bassin versant de l'Authie. Rapport final. BRGM/RP-67360-FR, 49 pages, 23 illustrations, 2 annexes.

Bault V., Bourgine B., Cary L., Gourcy L., Korotchansky A., Winckel A., **Decouchon E. Linglin C.** (2017) - Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre, en lien avec les marais arrière-littoraux. Rapport final. BRGM/RP-67430-FR, 298 p., 128 ill., 12 tabl., 10 ann., 1 DVD.

Bessière H., Brugeron A., Bourgine B., Papageorgiou E., Foumelis M. (2020) – Guide méthodologique pour l'établissement de carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale. Rapport final. BRGM/RP-69653-FR.

Bessière H., Tillier L., Bourgine B., Brugeron A., Foumelis M. (2019) - Mise en place d'une méthodologie de cartographie de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale – Application à la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg. BRGM/RP-68600-FR, 86 p.

Brugeron A., Bessiere H., Bourgine B., Stollsteiner P. (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

Brugeron A., Malcuit E., Gourcy L., Pinson S., Bourgine B. (2020) – Identification des lieux d'échanges potentiels « Eau de surface / Eau souterraine » à l'échelle du bassin Artois-Picardie. Rapport final. BRGM/RP-69440-FR, 186 p., 111 ill., 24 tabl., 2 ann.

Caous J.Y., Caudron M., Mardhel V., Nail C., Nicolas J., Batkowski D., Besançon S., Gaudefroy M.J., Kieffer Cl., Pinson S., Saint-Omer P., Brinon Ph. (2001) – Bassin Artois-Picardie. Nappe de la craie. Carte piézométrique « hautes eaux » 2001. BRGM/RP-51149-FR, 31 p., 2 ann.

Cardin C., Dufrenoy R., avec la collaboration de Joublin F., Caron G., Despierres A., Macquet J., Pascoli T., Polez K., Gryczka M. (2009) – Nord-Pas de Calais - nappe de la craie - campagne et carte piézométrique « hautes et basses eaux » 2009. Rapport BRGM/RP-58542-fr, 50 p., 5 fig., 3 ann.

Jenness J. (2004) – Calculating landscape surface area from digital elevation models. Wildlife Society Bulletin 2004, 32(3):829-839.

Saltel M., Bourgine B. (2015) - Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance - Module 2 - Année 4 - Convention 2008-2013. Rapport final. BRGM/RP-63575-FR, 44 p., 35 fig., 4 ann.

Saltel M., Bourgine B. (2015) - Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance - Module 2 - Année 5 - Convention 2008-2013. Rapport final. BRGM/RP-63575-FR, 52 p., 41 fig., 2 ann.

Vinchon C. avec la collaboration de Gourry J.-C., Farjanel G., Hervieux D., Van Vliet Lanoë B., Baeteman C. (2000) - Evolution géologique du système côtier picard entre Berck et Merlimont (62) au Quaternaire. Scénarios géoprospectifs de l'évolution dunaire. Rapport final. BRGM/RP-50039-FR, 89 p., 23 fig., 3 tabl., 3 ann.

Wuilleumier A. avec la collaboration de Caudron M., Gaudefroy M-J. (2002) – Le bassin de l'Authie. Synthèse hydrogéologique BRGM/RP-51799-FR, 47 p., 2 fig.,6 ann., 1 CD-ROM

Annexe 1

Enquête sur les remontées de nappe du bassin versant de l'Authie

Notice relative à l'enquête sur les remontées de nappe du bassin versant de l'Authie

L'enquête qui vous est adressée comporte les cinq rubriques suivantes :

1)	**Informations générales**
2)	**Les inondations par remontée de nappe sur votre commune**
3)	**Connaissance de l'exposition de la commune à l'aléa remontée de nappe**
4)	**Données relatives aux remontées de nappe**
5)	**Données relatives aux puits sur votre commune**

Afin de compléter les tableaux des rubriques 2-4-5, des propositions de réponses vous sont faites :

- soit directement dans le titre de certaines colonnes des tableaux,
- ou, si vous complétez le questionnaire directement sous Excel, un menu déroulant vous est proposé.

Lorsque la cellule est divisée en 2, il vous est possible d'apporter des précisions dans la case du dessous.

Par exemple :

<table>
<tr>
<td>Biens endommagés par l'inondation
(Habitation, Garage, Jardins, Caves, Local d'entreprise, Piscine, Ecoles, Hôpital, Cultures et terres agricoles, Autres à préciser ci-dessous)</td>
<td>Biens endommagés par l'inondation
(Habitation, Garage, Jardins, Caves, Local d'entreprise, Piscine, Ecoles, Hôpital, Cultures et terres agricoles, Autres à préciser ci-dessous)
Du
(Plu
Plu
Aut
Habitation (sous-sol)
Habitation (RDC)
Garage
Local d'entreprise
Jardins
Caves
Piscine
Ecoles</td>
<td>Titre avec les propositions de réponses entre parenthèse

Menu déroulant

Si le bien endommagé n'apparaît pas dans la liste déroulante, il doit être indiquer dans cette case</td>
</tr>
</table>

En dernière colonne des tableaux, il vous est proposé d'ajouter des commentaires libres. Ceux-ci peuvent nous être très utiles à la compréhension et à l'interprétation des phénomènes donc n'hésitez pas à les remplir.

Quelques définitions utiles

Une source

Eau qui sort naturellement de terre, ou par métonymie le point où cette eau jaillit. La source est souvent l'origine d'un cours d'eau, mais des sources peuvent alimenter des mares ou des lacs ou s'écouler directement en mer, ou produire une eau qui disparaît à nouveau dans le sol. *Glossaire sur l'eau - 27-07-2016*

Un puits

Un puits désigne une fosse, un trou ou un conduit aménagé dans le sol pour exploiter une ressource en eau souterraine.

Remontée de nappe dans la vallée de l'Authie

Lorsque l'infiltration de la pluie est particulièrement abondante et nettement prépondérante par rapport au débit des exutoires, la surface de la nappe peut monter relativement haut, au point d'atteindre le sol et déborder dans les zones basses du relief (vallées humides, mais aussi vallées et vallons secs) et y provoquer des inondations prolongées aux conséquences parfois catastrophiques

Rapp. BRGM – RP 51529-FR

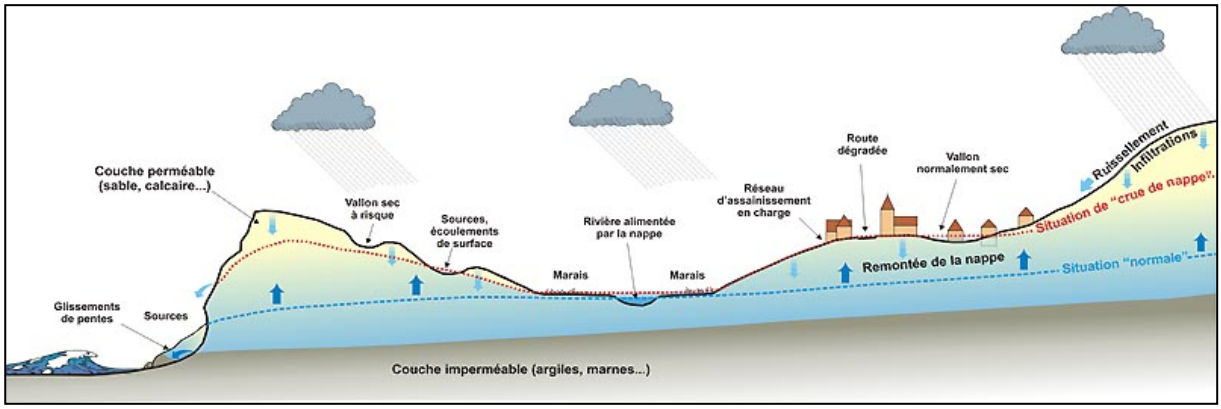


Schéma DREAL Basse Normandie

Enquête sur les remontées de nappe du bassin versant de l'Authie

Description

La DDTM de la Somme réalise une étude d'opportunité concernant le risque lié aux inondations sur le bassin versant de l'Authie pour l'élaboration éventuel d'un PPRI sur les territoires les plus sensibles.
Cette étude concerne 164 communes dont 81 communes dans le département de la Somme et 83 communes dans le département du Pas-de-Calais.
Les inondations de plaine et les débordements des cours d'eau qu'a connu la région, lors de l'hiver 1994 – 1995 et plus encore, de l'hiver et du printemps 2001 étaient dus à la remontée des nappes phréatiques. L'accumulation des pluies pendant une longue période a entraîné une hausse exceptionnelle du niveau des nappes et leur « vidange » naturelle très lente dans le fond de la vallée.
Les scientifiques du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), service géologique national étudient particulièrement ces phénomènes de remontée de nappe. Aussi, nous vous remercions par avance de bien vouloir prendre quelques instants pour répondre à cette enquête à but non-commercial afin de nous aider dans l'étude de ces phénomènes, de recolter des informations sur votre connaissance locale et les historiques des inondations sur votre commune.

À propos des données personnelles
Le destinataire de ces données est le BRGM qui s'engage à ne pas diffuser et utiliser les données de ce questionnaire en dehors du cadre de l'étude.
La durée de conservation des données est de 1 an. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, de rectification, de portabilité, d'effacement de celles-ci ou une limitation du traitement.
Vous pouvez vous opposer au traitement des données vous concernant et disposez du droit de retirer votre consentement à tout moment en vous adressant à : h.bessiere@brgm.fr
Vous avez la possibilité d'introduire une réclamation auprès d'une autorité de contrôle.

1) Informations générales

Commune	
N° INSEE	
Nom - Prénom	
Fonction	
Téléphone	
E-mail	

2) Les inondations par remontée de nappe sur votre commune

Numéro(s) parcelle(s) cadastrale(s)	Adresse	Date de l'inondation (JJ/MM/AAAA)	Biens endommagés par l'inondation (Habitation, Garage, Jardins, Caves, Local d'entreprise, Piscine, Ecoles, Hôpital, Cultures et terres agricoles, Autres à préciser ci-	Durée de l'inondation (Plusieurs heures, Plusieurs jours, Plusieurs semaines ou plusieurs mois, Autres à préciser ci-dessous)	Estimation des hauteurs d'eau (en cm) maximales atteintes par l'inondation (ex : 50 pour 50 cm d'eau)	Origine de l'inondation (remontée de nappe, débordement de cours d'eau, ruissellement ou inconnue, Autres à préciser ci-dessous)	Commentaires libres

3) Connaissance de l'exposition de la commune à l'aléa remontée de nappe

Y a-t-il des sources sur votre commune ?
Si oui, l'écoulement est-il permanent ? Si non, quelle est la période d'écoulement de votre source ? (exemple : Décembre à mai)

Insérer votre texte

La commune a-t-elle déjà demandé à être reconnue en état de catastrophe naturelle au titre d'une remontée de nappe phréatique dans le passé ?
Si oui à quelle date ?

Insérer votre texte

Des mesures de prévention spécifiques à l'aléa remontée de nappe existent-elles dans votre commune ?
Si oui, les décrire (arrêtés de péril…)

Insérer votre texte

Avez-vous connaissance de la carte nationale de sensiblité aux remontées de nappe disponible sur le site Géorisques du Ministère de la transition écologique et solidaire ?
http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inondations/cartographie_remontee_nappe
Si oui, avez-vous remarqué des incohérences ou des zones en contradictions avec le rendu cartographique de la carte nationale ?

Insérer votre texte

4) Données relatives aux remontées de nappe

Avez-vous connaissance de données relatives aux remontées de nappe (cartes inondation, photos aériennes, cartes piézométriques etc.) ?

Insérer votre texte

Si oui, merci de compléter le tableau suivant :

		Existence et accessibilité aux données (Disponibles, Non disponibles, Inexistantes, Pas de connaissance)	Référence des données	Date des données	Contact (nom personne ou organisme, téléphone, email)	Commentaires libres
Données remontée de nappe	Cartes d'inondation					
	Photographies aériennes					
	Données piézométriques					
	Cartes piézométriques					
	Données topographiques					

5) Données relatives aux puits sur votre commune

Localisation du puits (adresse ou coordonnées géographiques)	Est-il déjà arrivé que le puits déborde ? Si oui en quelles années ?	Y a-t-il des observations sur les niveaux du puits ?	Quel est le niveau d'eau moyen dans le puits ? (la profondeur moyenne en m)	Quels sont les niveaux d'eau maximaux atteints (profondeur en mètres) et leur dates associées ? Ex :2.25 m de profondeur le 15/05/2007	Commentaires libres

Illustration 67 Enquête sur les remontées de nappe envoyée aux communes

Annexe 2

Informations inondation remontée de nappe à partir des plans cadastraux

Info digitalisé	Nom de la commune	BD Topo	BD Parcellaire (bâti)	infos brgm
mare alimentée par les nappes	Argoules			remontées de nappe
inondée	Argoules	bâti indifférentié		remontées de nappe
inondée	Argoules	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
inondée	Argoules	bâti indifférentié et bâtiment industriel	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
inondée	Argoules	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
pont détruit	Argoules	départementale et cours d'eau naturel		remontées de nappe
pont détruit	Argoules			remontées de nappe
moulins démantelés	Argoules	cours d'eau naturel		remontées de nappe
moulins démantelés	Argoules	cours d'eau naturel		remontées de nappe
inondation	Authie			
remontée par les fossées (nappe 7 Authie)	Auxi-le-Château	bâti indifférentié et bâtiment industriel	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
inondation	Auxi-le-Château	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
inondation	Auxi-le-Château	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe
prairie les sources (source tous les 20/30 ans)	Béalcourt			source
marais communal	Béalcourt			source
marais communal	Béalcourt			source
tuyaux souterains	Béalcourt	cours d'eau naturel et liaison locale		source
sources	Boisbergues			source
inondation	Buire-au-Bois			remontée de nappe ; puit
remontée de nappe	Buire-au-Bois	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontée de nappe ; puit
inondation	Buire-au-Bois			remontée de nappe ; puit
eau stagne	Buire-au-Bois	départementale		remontée de nappe ; puit
remontée de nappes et/ou ruisselement	Buire-au-Bois	départementale		remontée de nappe ; puit
sous-sol inondé (après forte précipitation)	Campagne-les-Hesdin	bâti indifférentié	bâtiment en dur	cave inondée ; puit perdu
champs inondé	Doullens			cave inondée ; source
maisons inondées	Doullens	bâti indifférentié		cave inondée ; source
maisons inondées	Doullens	bâti indifférentié		cave inondée ; source
maisons inondées	Doullens	bâti indifférentié		cave inondée ; source
inondation	Doullens	bâti indifférentié		cave inondée ; source

maisons inondées	Doullens	bâti indifférentié		cave inondée ; source
rejoint l'authie en souterrain	Doullens	Bâtiment industriel		cave inondée ; source
sources	Doullens	départementale		cave inondée ; source
Source probable	Fort-Mahon-Plage			cave inondée
inondation cave	Fort-Mahon-Plage	bâti indifférentié		cave inondée
zone humide	Gezaincourt	bâti indifférentié et bâtiment industriel		source ; sous-sol inondé
inondation	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
bassin ancien ; source	Gezaincourt			source ; sous-sol inondé
habitation inondée	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
sous-sol inondé	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
habitation inondée	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
sous-sol inondé	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
sous-sol inondé	Gezaincourt	bâti indifférentié		source ; sous-sol inondé
entrée vers authie	Gezaincourt	bretelle		source ; sous-sol inondé
inondation	Grincourt-lès-Pas	bâti indifférentié		
inondation	Grouches-Luchuel	cours d'eau naturel		source
barrage	Grouches-Luchuel	cours d'eau naturel		source
barrage	Grouches-Luchuel	cours d'eau naturel		source
source intermitente	Grouches-Luchuel	liaison locale		source
remontées réseau EP 2016	Grouches-Luchuel	liaison locale		source
remontées réseau EP 2016	Grouches-Luchuel	liaison locale		source
cave inondée	Hem-Hardinval	bâti indifférentié		cave inondée
cave inondée	Hem-Hardinval	bâti indifférentié		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié et bâtiment agricole		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié et bâtiment agricole		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié et bâtiment agricole		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâtiment agricole		cave inondée
cave inondée	Humbercourt	bâti indifférentié		cave inondée
sous-sol inondé	Lucheux	bâti indifférentié		sous-sol inondé
zone d'accumulation	Lucheux	bâti indifférentié		sous-sol inondé
maison inondée	Lucheux	bâti indifférentié		sous-sol inondé

Remonté de nappe	Maintenay			
résurgence nappe	Noeux-les-Auxi			cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
cave inondée	Noeux-les-Auxi	bâti indifférentié	bâtiments en dur	cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
cave inondée	Noeux-les-Auxi	bâti indifférentié	bâtiments en dur	cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
cave inondée	Noeux-les-Auxi	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
cave inondée	Noeux-les-Auxi	bâti indifférentié	bâtiment en dur	cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
cave inondée	Noeux-les-Auxi	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	cave inondée ; valée sèche ; résurgence nappe
inondation régulière	Pas-en-Artois			
remontée de nappe	Quend	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	sous-sol inondés
remontée de nappe et/ou écoulements fossés	Quend	bâti indifférentié et départementale	bâtiments en dur	sous-sol inondés
cave inondée	Raincheval	bâti indifférentié	bâtiment en dur	forage ; cave inondée
zone inondée	Rang-du-Fliers	bâti indifférentié et bâtiment commercial	bâtiments en dur et constructions légères	zone inondées
zone inondée	Rang-du-Fliers	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	zone inondées
sources (localisation imprécise)	Regnière-Ecluse			source
source	Regnière-Ecluse			source
sources (localisation imprécise)	Regnière-Ecluse			source
inondation	Regnière-Ecluse	liaison locale		source
source	Regnière-Ecluse			source
inondation	Roussent			puit ; piézométre
zone inondable	Roussent			puit ; piézométre
inondation	Roussent	bâti indifférentié	bâtiments en dur	puit ; piézométre
piézomètre (géné)	Roussent	cours d'eau naturel		puits ; piézomètre
source	Saint-Amand			forage ; source
inondation	Saint-Léger-lès-Authie	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontées de nappe ; source ; cave inondée
inondation	Saint-Léger-lès-Authie	cours d'eau naturel et liaison locale		remontées de nappe ; source ; cave inondée
source	Saint-Léger-lès-Authie	cours d'eau naturel		remontées de nappe ; source ; cave inondée
source	Saint-Léger-lès-Authie			remontées de nappe ; source ; cave inondée

inondation par remontée de nappe	Villers-sur-Authie	bâti indifférentié	bâtiments en dur et constructions légères	remontée de nappe ; forage
nappe profonde	Villers-sur-Authie			remontée de nappe ; forage
nappe	Villers-sur-Authie			remontée de nappe ; forage
nappe	Villers-sur-Authie	départementale		remontée de nappe ; forage

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

Direction régionale Hauts-de-France
Arteparc Bâtiment A
2 rue des Peupliers
59810 – Lesquin – France
Tél. : 03 20 19 15 40