

Document public

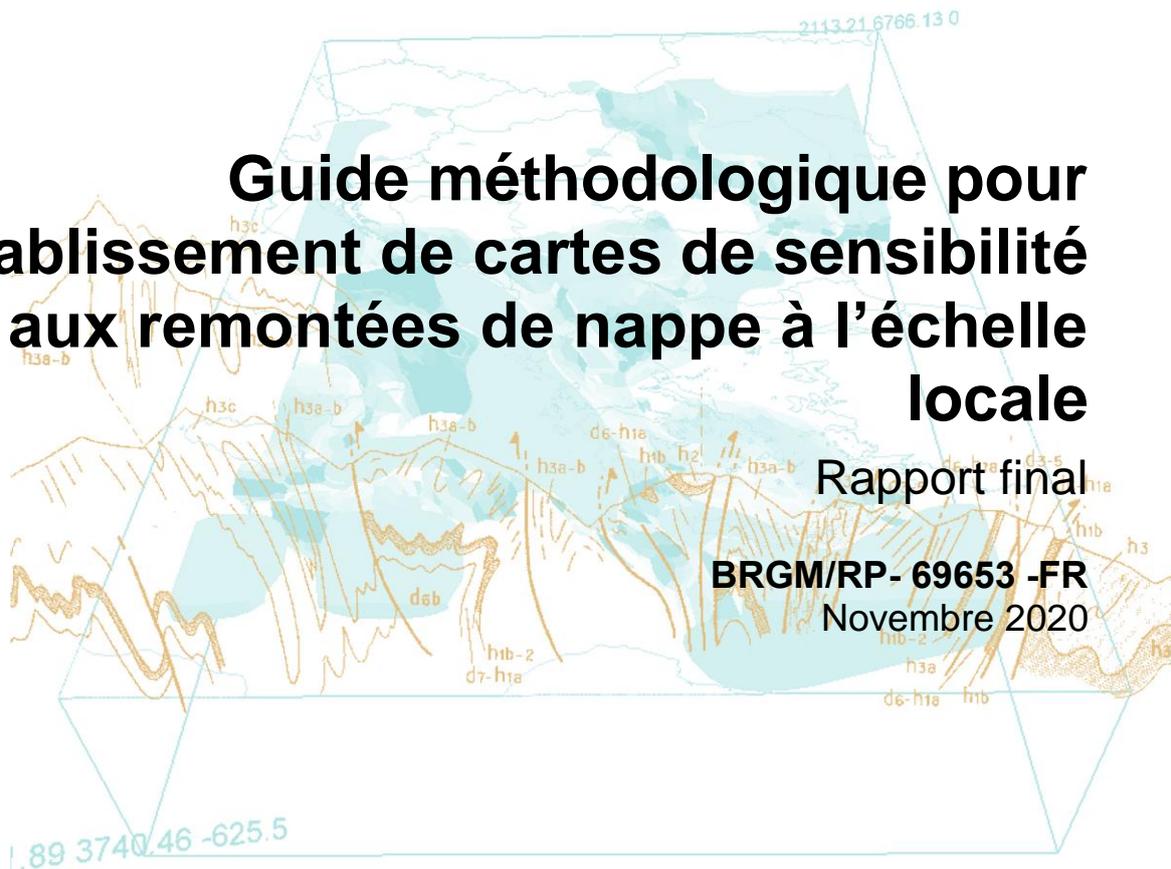


Guide méthodologique pour l'établissement de cartes de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale

Rapport final

BRGM/RP- 69653 -FR

Novembre 2020



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Guide méthodologique pour l'établissement de cartes de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale

Rapport final

BRGM/RP-69653-FR
Novembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2020

H. Bessière, A. Brugeron, B. Bourguine, E. Papageorgiou
Avec la collaboration de
M. Foumelis

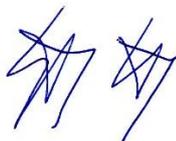
Vérificateur :

Nom : S. Urban

Fonction : Hydrogéologue

Date : 15 décembre 2020

Signature :



Approbateur :

Nom : L. Gourcy

Fonction : responsable d'unité

Date : 16 décembre 2020

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Inondation, Remontée de nappe, cartographie, niveaux piézométriques extrêmes, analyse géostatistique, images satellite

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

H. Bessière, A. Brugeron, B. Bourgine, E. Papageorgiou, M. Foumelis. (2020) – Guide méthodologique pour l'établissement de cartes de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale. Rapport final. BRGM/RP-69653-FR, 199 p., 58 ill., 5 tabl. 7 ann.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La méthodologie pour la réalisation des cartes de remontée de nappe à l'échelle locale s'est inspirée de différentes études réalisées dans le cadre des précédentes conventions avec la DGPR :

- celle concernant la réalisation de la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe (Brugeron et al., 2018),
- celle pour la réalisation d'une carte de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale : application à la nappe d'Alsace au Sud de Strasbourg (Bessière et al., 2019), et sur une zone près du bassin d'Arcachon en Aquitaine (rapport en cours),
- celle concernant la cartographie de la sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne (convention SCHAPI-BRGM) (Arnaud et al., 2020).

La réalisation de cartes de remontée de nappe est conditionnée par la disponibilité des données et informations disponibles sur les niveaux des nappes du secteur étudié en situation de hautes, voire très hautes, eaux. La carte d'incertitude réalisée à l'échelle nationale apporte quelques indications sur cette condition ; ainsi le positionnement du secteur d'étude sur cette carte est un prérequis à l'analyse.

Le fait de travailler à l'échelle locale, à partir de contextes hydrogéologiques mieux connus et identifiés, permet d'adapter la sélection du jeu de données en fonction des hypothèses prises en compte sur le secteur d'intérêt (par exemple connexion nappe rivière avérée).

Ce guide présente les différentes étapes préconisées pour l'établissement d'une cartographie des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe à l'échelle locale. Un organigramme décrivant l'articulation des étapes est proposé. La méthodologie a été soumise et validée par le groupe d'experts s'articule comme suit:

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

L'étape 1 consiste à décrire le contexte hydrogéologique et à préparer le jeu de données. Il s'agit de sélectionner les points d'eau souterraine, de les qualifier en tant que points fiables ou peu fiables et de les associer entre eux. Le processus d'association permet de les regrouper au sein de secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques et temporelles de la nappe étudiée.

A l'étape 2 l'estimation de la cote piézométrique extrême (ou associé à une période de retour donnée) est réalisée à partir des lois de valeurs extrêmes. Un script R a été développé afin de tester différents ajustements statistiques sur les points qualifiés comme « fiables ». En outre, une méthode d'évaluation de la cote piézométrique extrême pour les points d'eau qualifiés « peu fiables » est proposée.

L'étape 3 repose sur l'analyse géostatistique et l'interpolation de la surface piézométrique maximale. A l'échelle locale, il est rendu possible l'utilisation de modèles de variogrammes

complexes pour l'interpolation des cotes piézométriques extrêmes. L'analyse géostatistique permet également d'estimer les incertitudes des résultats liés à l'interpolation, donnant ainsi un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote extrême.

L'étape 4 est la production de la carte de sensibilité aux remontées de nappe. Une échelle de rendu et des classes de sensibilité adaptées à la qualité des résultats obtenus sur le secteur d'étude sont choisies en cette dernière étape de la méthodologie. Par exemple, pour la nappe d'Alsace, il a été proposée une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe en quatre classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux et son échelle maximale d'utilisation préconisée est le 1/25 000. En dernier lieu, il est nécessaire de procéder à la validation et à la confrontation de la carte avec les données qui n'ont pas servi à l'interpolation géostatistique, comme par exemple les données des enquêtes de terrain ou les images satellite.

Une étape supplémentaire et optionnelle ((Etape 1 bis : Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale) a été ajoutée à la suite de la collecte des données afin d'obtenir des informations complémentaires à partir des images satellite. Des développements spécifiques au phénomène d'inondation par remontée de nappe ont été réalisés aboutissant à des algorithmes de traitements statistiques de séries temporelles de rétrodiffusion des images radar à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR en anglais). L'utilisation des données SAR ou optique pour la cartographie des inondations apporte des résultats intéressants. S'ils ne s'avèrent pas suffisamment fiables pour les utiliser en tant que points de forçage à l'interpolation, ils peuvent néanmoins servir à la validation de la carte. La plupart des secteurs ciblés en « zones très sensibles » de la carte doivent se retrouver à l'intérieur des zones inondées détectées par traitement des images satellite. Cependant, il est probable que le traitement surestime les secteurs inondés par remontée de nappe car l'imagerie satellitale ne permet pas de discriminer l'origine des inondations (remontées de nappe ou débordements de cours d'eau ou autre). Ou encore, que certains secteurs d'inondation potentielle par remontée de nappe ne ressortent pas du traitement car les séries temporelles traitées ne démarrent qu'à partir de 2015 et ne permettent donc pas la détection d'événements antérieurs à cette date.

Les limites de l'application de la méthodologie sont présentées, notamment pour certaines contextes hydrogéologiques (karsts, zones imperméables) et secteurs spécifiques (grands secteurs urbains ou très industrialisés, secteurs après mine).

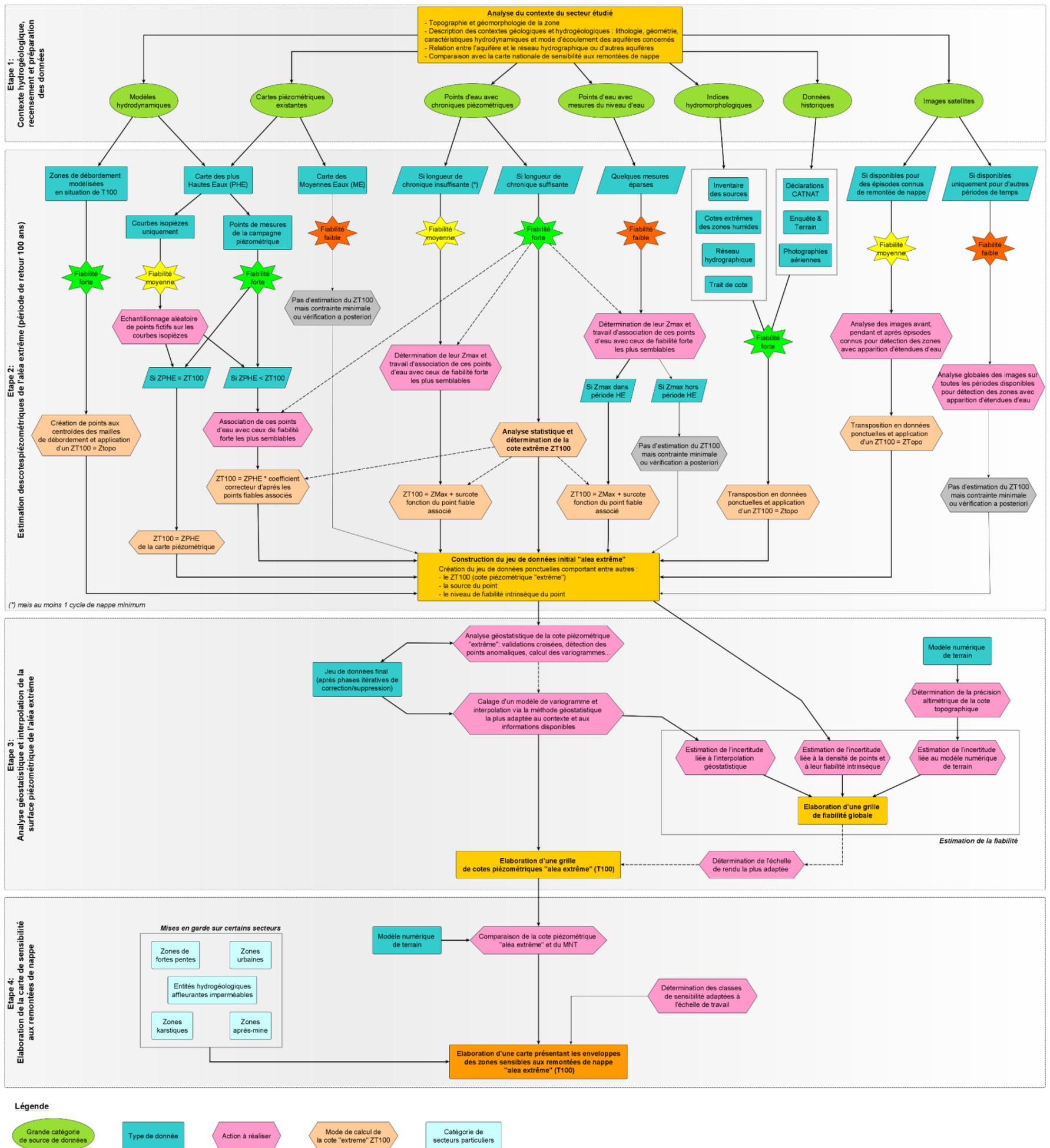


Illustration 1 - Etapes de la méthode de réalisation d'une cartographie des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe à l'échelle locale

Sommaire

1. Introduction	14
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA REALISATION D'UNE CARTE DE REMONTEE DE NAPPE A L'ECHELLE LOCALE	14
1.1.1. Mise en œuvre de la directive inondation – stratégie nationale	14
1.1.2. La carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe	14
1.1.3. Objectif de la réalisation d'une carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale	15
1.2. CONDITION DE REALISATION	15
1.3. LES DIFFERENTES ETAPES DE LA METHODOLOGIE	16
2. Etape 1 : Contexte hydrogéologique et préparation du jeu de données	17
2.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE ET ETUDE DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	17
2.1.1. Rappel des contextes hydrogéologiques favorables aux remontées de nappe 17	
a) Inondation d'une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeur (contexte A).....	17
b) Inondation d'une nappe libre superficielle sur substratum imperméable (contexte B) 19	
c) La remontée des nappes alluviales.....	21
2.1.2. Analyse du secteur étudié.....	21
2.2. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES	22
2.2.1. Le Modèle Numérique de Terrain et incertitudes associées	23
2.2.2. Données piézométriques des banques nationales	24
a) Extraction	24
b) Sélection / Tri des données	25
c) Correction des données.....	26
2.2.3. Enquête et campagne de terrain	26
2.2.4. Données historiques (Catnat)	27
2.2.5. Cartes piézométriques	28
2.2.6. Les informations « cours d'eau » (EAIP, PPRI, le réseau hydrographique)29	
a) Les EAIP	29

b) Le réseau hydrographique	29
2.2.7. Trait de côte Histolitt®	31
2.2.8. Indices hydromorphologiques	32
2.2.9. Données complémentaires en fonction de leur disponibilité.....	33
a) Les images satellite.....	33
b) Autres données eaux souterraines de la banque de la banque du sous-sol (BSS) 33	
c) Inventaires de sources	33
d) Données issues de modèles hydrodynamiques.....	34
2.3. EVALUATION DE LA FIABILITE DES DONNEES.....	34
2.3.1. Principe d'évaluation de la fiabilité des points d'eau	35
2.3.2. Synthèse d'évaluation de la fiabilité par source de données.....	35
2.4. TRAVAIL D'ASSOCIATION DES POINTS.....	36
3. Etape 1 bis : Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale (optionnel).....	43
3.1. PORTEE DE L'ETUDE	43
3.2. INFORMATIONS GENERALES	43
3.3. DONNEES ET TRAITEMENT.....	43
3.4. CARTOGRAPHIE SAR ET OPTIQUE DES INONDATIONS.....	46
3.4.1. Détection des inondations basée sur le SAR	47
3.4.2. Le prétraitement	48
3.4.3. La détection initiale de surfaces en eaux	49
3.4.4. Analyse des séries temporelles	52
3.4.5. Détection d'inondation optique.....	55
a) Les données optiques	55
b) Méthodologie de détection optique des inondations	55
3.5. EXEMPLES DE RESULTATS	56
3.5.1. Aquitaine	56
a) Cartographie des inondations basées sur la classification RVB	56
b) Cartographie des inondations basées sur l'analyse des séries temporelles.....	58
c) Cartographie des inondations basées sur la détection optique.....	60
3.5.2. Seine amont	61
a) Cartographie des inondations basées sur la classification RVB	61

b) Cartographie des inondations basées sur l'analyse des séries temporelles	64
c) Cartographie des inondations basées sur la détection optique	68
3.6. AVANTAGES ET LIMITES DE L'IMAGERIE SATELLITE	70
3.6.1. Avantages des observations par satellite :	70
3.6.2. Limites des données de télédétection par satellite :	70
3.7. DISCUSSION - PERSPECTIVES	70
4. Etape 2 : Estimation de la cote piézométrique extrême.....	73
4.1. ANALYSE FREQUENTIELLE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES	73
4.1.1. Sélection des chroniques piézométriques avant ajustement – points fiables	74
4.1.2. Constitution d'un échantillon	74
4.1.3. Contrôle des hypothèses statistiques	75
4.1.4. Ajustement d'une loi de probabilité	75
4.1.5. Calcul des niveaux piézométriques centennaux et intervalles de confiance	75
4.2. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE A FORTE.	76
4.2.1. La méthode nationale	76
4.2.2. Les ajustements statistiques de valeurs extrêmes	76
4.2.3. Script R développé.....	79
4.3. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE	83
4.4. TRAITEMENT DES CARTES PIEZOMETRIQUES POUR LE CALCUL DU ZT100	84
4.5. SYNTHÈSE DE L'ESTIMATION DU ZT100 PAR SOURCE DE DONNÉES	87
5. Etape 3 : Analyse géostatistique et interpolation de la surface piézométrique	89
5.1. APPROCHES POSSIBLES.....	89
5.1.1. Approche par interpolation de surfaces.....	89
5.1.2. Approche par « épaisseur » de la ZNS	91
5.2. PRINCIPE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	95
5.2.1. Les méthodes « déterministes »	95
5.2.2. Les méthodes géostatistiques.....	96
a) Le variogramme.....	97
b) Le krigeage et ses variantes	100
c) La validation croisée	107
d) Les simulations stochastiques	108

e) Les limites de la géostatistique (et des autres méthodes)	111
5.2.3. Comparaison des différentes méthodes	112
5.2.4. Etude bibliographique (géostatistique et hydrogéologie).....	114
5.3. CARTOGRAPHIE GEOSTATISTIQUE AU NIVEAU LOCAL	117
5.3.1. Les spécificités à l'échelle locale	117
5.3.2. Méthodologie d'interpolation (ou de simulations) à l'échelle locale	117
a) Analyse du contexte hydrogéologique	118
b) Collecte des données, analyse critique, mise en forme	118
c) Analyse géostatistique des données	120
d) Détection / correction des données erronées	121
e) Choix de la méthode de travail	121
f) Interpolations ou simulations	123
g) Comparaison à la topographie	124
6. Etape 4 : Production d'une carte de sensibilité aux remontées de nappe.....	125
6.1. DETERMINATION DE L'ECHELLE D'UTILISATION DE LA CARTE	125
6.2. DETERMINATION DES CLASSES DE SENSIBILITE	126
6.3. CORRECTIONS PONCTUELLES ET APPLICATION DE MASQUES	127
6.3.1. Critères géomorphologiques.....	127
6.3.2. Critères hydrogéologique.....	128
6.4. VALIDATION DE LA CARTE	128
6.5. LIMITES D'UTILISATION	129
6.5.1. Grandes zones urbaines	129
6.5.2. Zones karstiques	129
6.5.3. Zones après mine.....	130
7. Conclusion	133
8. Bibliographie.....	135

Liste des figures

Illustration 1 - Etapes de la méthode de réalisation d'une cartographie des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe à l'échelle locale	3
Illustration 2 - Carte de fiabilité globale pour la méthode employée à l'échelle nationale	16
Illustration 3 - Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS) .	18
Illustration 4 - 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	19
Illustration 5 - Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé et reposant sur une formation imperméable (d'après BGS)	20
Illustration 6 - Entités BDLisa du bassin versant de l'Authie	22
Illustration 7 - Chroniques avant (à gauche) et après la suppression des outliers (à droite).	26
Illustration 8 - Comparaison des EAIP et des PPRI en amont de la confluence de l'Aube et de la Seine (sources : DGPR, DDT de l'Aube d'après Arnaud et al., 2020)).	30
Illustration 9 - Points de contrainte liés aux rivières (source : BDCarthage).....	31
Illustration 10 - Carte du trait de côte Histolitt® (SHOM)	32
Illustration 11 – Logigramme des différentes phases d'association des points	39
Illustration 12 - Localisation des groupes de points fiables / peu fiables et comparaison avec la sectorisation réalisée par Urban et al. (2010).....	40
Illustration 13 - Diagramme de traitement de détection de changement d'image SAR et optique pour la cartographie des inondations. Exemple de la Seine amont : cartographie des inondations de (a) la classification RVB pour la période 2015-2018, (b) l'analyse des séries temporelles pour la période 2015-2018, (c) l'analyse des séries temporelles pour l'inondation de janvier-février 2018 et (d) l'imagerie optique.....	46
Illustration 14 - Chaîne de traitement de la cartographie des crues basée sur Sentinel-1.	48
Illustration 15 - Schéma adopté pour le traitement des données SAR Sentinel-1 GRD.....	49
Illustration 16 Concept de détection des inondations mis en œuvre sur les séries temporelles SAR Sentinel-1	49
Illustration 17 - Composite couleur RVB basé sur les données Sentinel-1 (VV) (2015-2018) pour l'Aquitaine.....	51
Illustration 18 - Composite couleur RVB basé sur les données Sentinel-1 (VV) (2015-2018) pour Ile de France.....	52
Illustration 19 - Série chronologique de la rétrodiffusion SAR pour divers sites inondés en Aquitaine.	54
Illustration 20 - Série chronologique de la rétrodiffusion SAR pour divers sites inondés en Ile de France.....	54
Illustration 21 - Carte NDWI (en haut) et carte binaire du masque d'eau (en bas) pour l'image pré-inondée (à gauche) et l'image inondée (à droite) en Aquitaine. Dans la partie nord-ouest de l'image inondée, l'apparence du nuage est évidente, étant compensée pendant le post-traitement.	56
Illustration 22 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.	57

Illustration 23 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.....	58
Illustration 24 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations de janvier à février 2018.....	59
Illustration 25 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations Février - Mars 2016.....	60
Illustration 26 - Détection de l'eau (en bleu) à partir de la différence des images Sentinel-2 pré-inondées et inondées (Figure 8) pour l'inondation en Aquitaine de janvier à février 2018.	61
Illustration 27 - Carte de délimitation de Nord-Ouest Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.	62
Illustration 28 - Carte de délimitation pour Sud-Est Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.	63
Illustration 29 - Carte de délimitation pour Nord-Est Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.	64
Illustration 30 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.	65
Illustration 31 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations de janvier à février 2018.	66
Illustration 32 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations Mai - Juin 2016.	67
Illustration 33 - Détection de l'eau (en bleu) avec un processus de seuillage simple (NDWI) dans les zones prioritaires, (en haut) de la Seine amont et (en bas) au sud de Paris, sur la base de l'image Sentinel-2 pour les inondations de la Seine amont de janvier - fév. 2018.	69
Illustration 34 – Procédures d'analyse des crues souterraines (d'après Kenza NAJIB, 2007) ...	74
Illustration 35 – Lois de probabilité présentant les meilleurs ajustements selon le test de Kolmogorov-Smirnov sur un échantillon de 200 points (écart maximal entre les différentes lois inférieur à 2 m) (d'après Arnaud et al., 2020).....	78
Illustration 36 – Report des niveaux humides de période de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés après ajustement d'une loi GEV (02974X0004/S1). Surestimation du niveau maximum probable suspectée (d'après Arnaud et al., 2020).	79
Illustration 37 - Les différentes étapes du script R développé pour l'ajustement des lois extrêmes sur les points fiables.....	82
Illustration 38 - Logigramme décrivant le traitement des cartes pizométriques existantes au sein de la zone d'étude pour l'estimation du ZT100.....	86
Illustration 39 - Répartition des données d'entrée par origine pour l'étude la Seine amont (ESO : Eau Souterraine, ESU : Eau de Surface (d'après Arnaud et al., 2020)).....	88
Illustration 40 - Détermination des zones de débordement par comparaison des surfaces	90
Illustration 41 - Interpolation directe de la différence ZTopo - ZT100	92
Illustration 42 - Comparaison de la surface ZT100 selon la méthode de calcul.....	93
Illustration 43 - Comparaison de ZT100 obtenu par interpolation directe et par interpolation de la différence entre ZTopo et ZT100	94

Illustration 44 - Comparaison de ZT100 obtenu par interpolation directe et par interpolation de la différence entre ZTopo lissée et ZT100	95
Illustration 45 - Schémas illustrant deux exemples de méthodes déterministes.....	96
Illustration 46 - Définition du variogramme.....	98
Illustration 47 - Variogramme non stationnaire. Exemple typique d'une cote piézométrique.	99
Illustration 48 - Variogramme stationnaire. Exemple de l'épaisseur de la ZNS pour une nappe libre	99
Illustration 49 - Exemple de prise en compte de donnée d'inégalité.....	102
Illustration 50 - Exemple de prise en compte de limites à flux nul	103
Illustration 51 - Cartes des surfaces piézométriques obtenues par krigeage avec deux jeux de données	105
Illustration 52 - Carte des écarts-type de krigeage obtenus avec les deux jeux de données ...	106
Illustration 53 - Principe de la validation croisée	107
Illustration 54 - Comparaison simulation et krigeage	110
Illustration 55 - Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM.....	118
Illustration 56 - Exemple de carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe sur la plaine d'Alsace	127
Illustration 57 - Entités ou secteurs karstiques affleurants identifiés dans le référentiel hydrogéologique BDLISA (version 2)	130
Illustration 58 - Schéma conceptuel de fonctionnement hydrogéologique d'un réservoir linier avant et après ennoyage (d'après Vaute et Soulas, 2007)	131

Liste des tableaux

Tableau 1 Modalité d'attribution des classes de fiabilité globale pour la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe	15
Tableau 2 Evaluation de la fiabilité par source de données	36
Tableau 3 Evaluation de la fiabilité par source de données	87
Tableau 4 Comparaison des différents types de krigeage et des simulations	113
Tableau 5 Liste des champs utiles pour l'estimation de la cote piézométrique ZT100 ou de l'épaisseur ZNS_T100.....	120

Liste des annexes

Annexe 1 Précision du RGE Alti 1m	141
Annexe 2 Boxplot (boîte à moustaches).....	147
Annexe 3 Enquête terrain	153
Annexe 4 Données auxiliaires & Masques à eau de référence	161
Annexe 5 Exemple de résultats pour les ajustements de lois de probabilité pour la chronique piézométrique de longue durée 01266X1013/S1	165
Annexe 6 Géostatistique et interpolation par la géostatistique	181
Annexe 7 Les modèles de variogrammes les plus utilisés.....	189

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA REALISATION D'UNE CARTE DE REMONTEE DE NAPPE A L'ECHELLE LOCALE

1.1.1. Mise en œuvre de la directive inondation – stratégie nationale

La politique de gestion des inondations a pris une dimension européenne en 2007 avec l'adoption de la directive européenne 2007/60/CE, dite « directive inondation ». L'objectif de cette directive est de fournir un cadre cyclique (6 ans) aux États membres pour réduire les conséquences négatives des inondations sur la santé humaine, l'activité économique, l'environnement et le patrimoine culturel. Sur ces bases, la France s'est dotée en 2014 d'une « stratégie nationale de gestion des risques d'inondation » qui impose une approche proactive en matière de prévention des inondations sur l'ensemble des territoires à risques.

Au niveau de chaque grand bassin hydrographique, la directive inondation se déroule en 3 étapes successives :

- Evaluation préliminaire des risques (EPRI), conduisant au recensement d'évènements historiques marquants et à la production d'indicateurs caractérisant les enjeux à l'échelle du bassin, notamment sur la population et les emplois exposés. L'EPRI conduit au choix des territoires à risques importants d'inondation (TRI)
- Cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation sur les TRI
- Plans de gestion des risques d'inondation (PGRI), en déclinaison de la stratégie nationale, sur la base de l'EPRI et des cartographies effectuées sur les TRI. Ces PGRI sont détaillés au niveau local sur chaque TRI par une stratégie locale de gestion des risques d'inondation, laquelle se traduit de manière opérationnelle dans des plans d'action tels que les PAPI (programmes d'actions de prévention des inondations), et des projets PSR (plan des submersions rapides), et au niveau réglementaire dans les PPR (plans de prévention des risques). Les PGRI sont aussi traduits de manière opérationnelle au niveau grand bassin par les plans grand fleuves (PGF). Les PGRI ont été arrêtés par les préfets coordonnateurs de bassin en décembre 2015, et les stratégies locales sont en cours d'élaboration pour fin 2016.

1.1.2. La carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe

C'est dans ce cadre qu'a été élaboré la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe. Disponible sur le site de géorisques, http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/inondations/cartographie_remontee_nappe, elle permet d'avoir une idée sur les secteurs sensibles au phénomène de remontées de nappes (Illustration 1). Développée par le BRGM, 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 et Solidaire. En plus du résultat brut de l'interpolation, elle intègre en effet en complément d'autres informations à prendre en considération pour la lecture de la carte : les EAIPce et EAIPsm.

1.1.3. Objectif de la réalisation d'une carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale

La carte nationale, du fait de sa trop grande résolution, ne peut fournir des indicateurs précis pour le risque d'inondation par remontée de nappe. Ainsi, sur la base d'un diagnostic territorial précis à l'échelle de la zone étudiée, les cartographies à l'échelle locale permettent :

- de par son analyse préalable, présenter les caractéristiques hydrogéologiques du périmètre d'étude,
- de déterminer les zones les plus sensibles aux risques d'inondations par remontée de nappe,
- d'aider à la détermination des TRI,
- 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 par remontée de nappe.

1.2. CONDITION DE REALISATION

S'inspirant de la méthodologie développée à l'échelle nationale, une amélioration du rendu à l'échelle locale ne peut être envisagée qu'aux conditions suivantes :

- le nombre de points de mesure piézométrique est suffisant à l'échelle de la zone pilote,
- la durée des chroniques piézométriques est supérieure à 15 ans,
- la qualité du MNT est satisfaisante.

L'indice de fiabilité calculé à l'échelle nationale donnera des indications sur ces réserves : la condition préalable est que l'indice global soit fort, ce qui implique que les indices eaux souterraines et MNT sont également forts. Pour plus d'information, le lecteur peut se reporter au rapport de Brugeron et al., 2018 – BRGM/RP-65452-FR. Pour rappel, le Tableau 1 explique les modalités d'attribution des classes de fiabilité globale.

		FIABILITE vis-à-vis DU MNT	
		FAIBLE	FORT
FIABILITE vis-à-vis DES DONNEES « EAU SOUTERRAINE »	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE
	MOYEN	FAIBLE	MOYEN
	FORT	MOYEN	FORT

Tableau 1 Modalité d'attribution des classes de fiabilité globale pour la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe

La représentation cartographique de cet indice de fiabilité global, mêlant fiabilité des données sources utilisées pour l'interpolation et fiabilité des cotes altimétriques du MNT du RGE ALTI®, est retranscrite sur l'illustration 2.

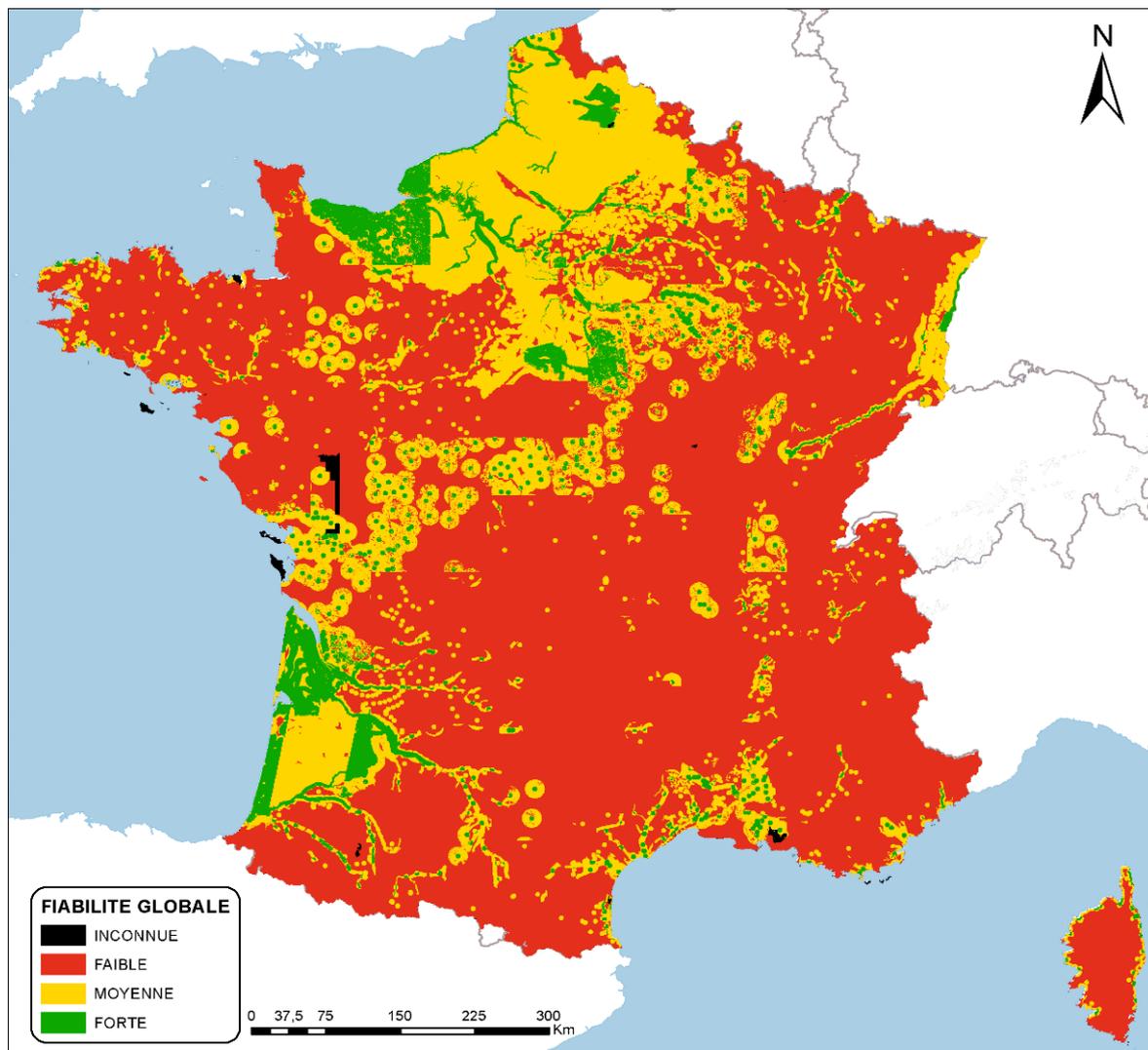


Illustration 2 - Carte de fiabilité globale pour la méthode employée à l'échelle nationale

1.3. LES DIFFERENTES ETAPES DE LA METHODOLOGIE

Ce guide décrit les principes méthodologiques pour la réalisation d'une cartographie des phénomènes de remontées de nappe à l'échelle locale. Il se base sur des cas test de réalisation de cartographie à l'échelle locale : la nappe alluviale d'Alsace, le secteur Est du bassin d'Arcachon. Deux autres secteurs sont également en cours d'étude : la Seine amont et le bassin de l'Authie. La méthodologie est construite selon les étapes suivantes :

- Etape 1 : Contexte hydrogéologique et préparation du jeu de données
- Etape 1 bis : Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale (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 nappe

Chaque étape fait l'objet d'un chapitre individuel à la suite du rapport. La succession et l'articulation de ces étapes sont résumées dans l'organigramme présenté dans la synthèse plus haut (Illustration 1).

2. Etape 1 : Contexte hydrogéologique et préparation du jeu de données

2.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE ET ETUDE DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.1.1. Rappel des contextes hydrogéologiques favorables aux remontées de nappe

Le terme « remontée de nappe » couvre des phénomènes divers ayant des causes variées dont les mécanismes peuvent être très différents et dont certains sont souvent oubliés. En lien avec l'inertie des hydro-systèmes, les inondations de sous-sol ou de surface qui en découlent peuvent se manifester durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois. D'un point de vue typologique, on peut principalement distinguer :

- **les remontées de nappes liées à une succession d'années humides.** Elles concernent en général les grandes masses d'eau souterraine soumises à des cycles pluri-annuels en termes de fluctuations piézométriques. C'est ce phénomène qui est par exemple à l'origine des débordements de nappe ayant conduits aux inondations de la Somme en 2000/2001. Sont principalement concernés les aquifères crayeux (Crétacé) et calcaires (Jurassique du Callovo-Oxfordien), largement représentés dans le bassin de la Seine (cf. contexte A § 2.1.1.a)
- **au sein d'aquifères plus perméables** (coefficient d'emmagasinement plus élevé) mais d'extension plus limitée où, en raison de la présence d'un substratum imperméable, le surplus d'eau ne peut que remonter vers la surface et provoquer une inondation. Cela concerne notamment certaines buttes tertiaires du Bassin parisien (cf. contexte B § b) ;
- **les crues de cours d'eau induisant des remontées de nappe à proximité du lit d'une rivière.** Un cours d'eau est en général une zone de débordement/vidange naturelle de la nappe. Lorsque le niveau du cours d'eau s'élève sous l'effet d'une crue (ou d'une onde de marée dans les zones d'estuaire), la nappe se trouvant momentanément privée d'exutoire, son flux naturel s'accumule dans l'aquifère, ce qui provoque une remontée des niveaux piézométriques. Cette remontée de nappe peut se trouver amplifiée par des infiltrations de la rivière vers la nappe. Ce phénomène concerne la plupart des nappes alluviales. (cf. contexte C § c))

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

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.

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

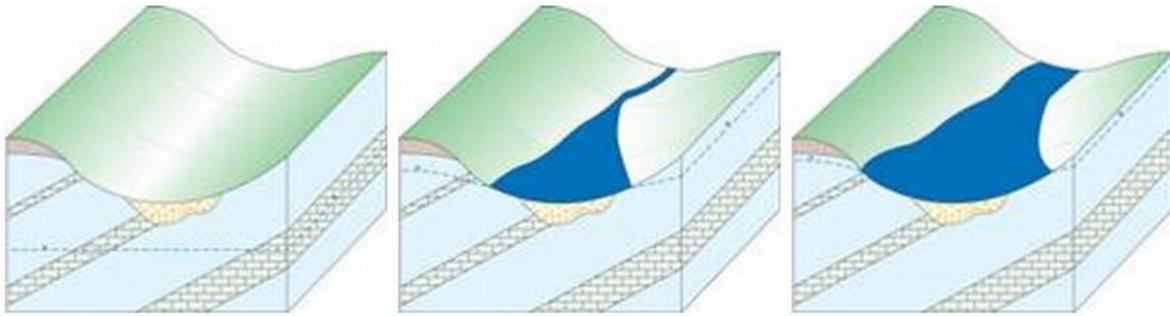


Illustration 3 - Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre contenue dans un aquifère sédimentaire majeure (d'après BGS)

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

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

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

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

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

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 4). C'est ce que l'on appelle « l'effet mémoire » de l'aquifère.

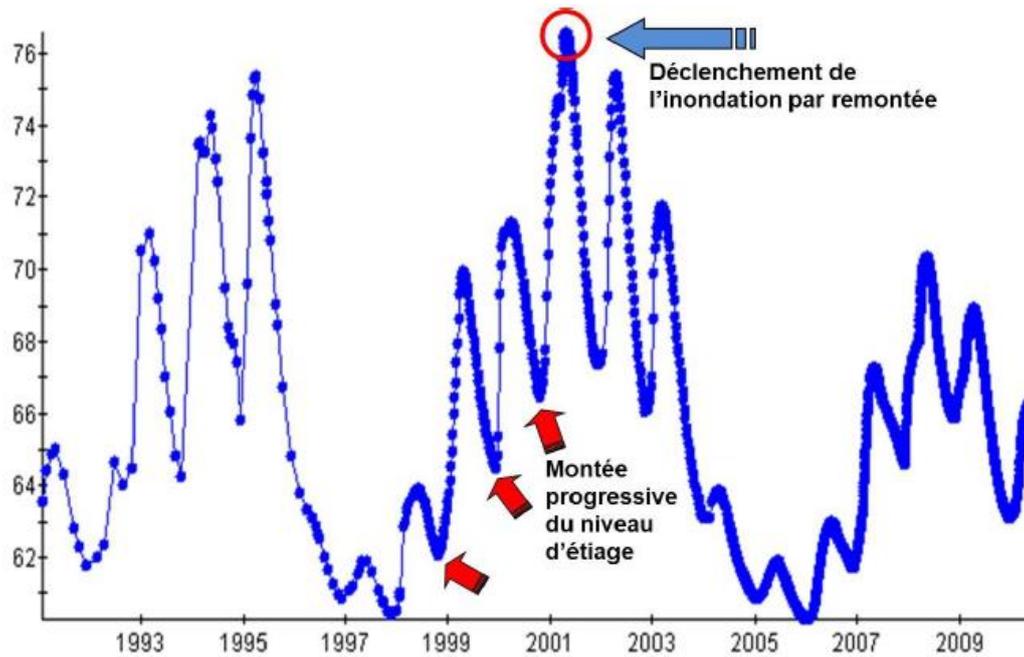


Illustration 4 - Exemple de chronique piézométrique montrant deux cycles de variation de la nappe (un annuel et un pluri-annuel) dont les effets, en s'additionnant, peuvent engendrer des débordements par remontée de nappe

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

Le contexte B correspond à l'inondation par remontée d'une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé, d'extension limitée et reposant sur une formation imperméable (cf. Illustration 5).

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

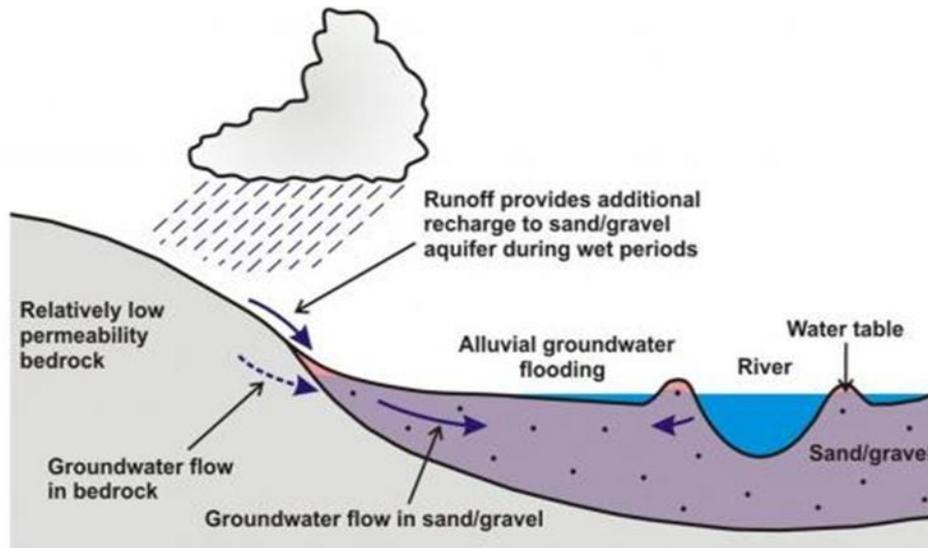
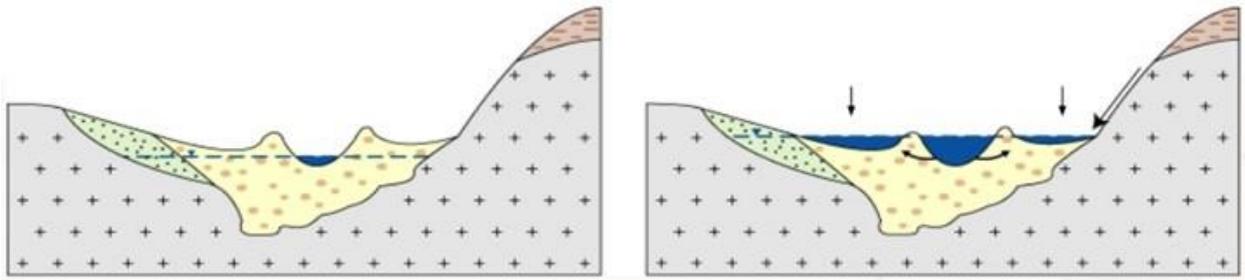


Illustration 5 - Schémas conceptuels décrivant les conditions favorisant les inondations par une nappe libre superficielle contenue dans un aquifère sédimentaire non-consolidé et reposant sur une formation imperméable (d'après BGS)

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

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

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

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

Les digues naturelles ou artificielles présentes le long du cours d'eau peuvent permettre la montée du niveau de la rivière, sans provoquer de débordement. Cette montée des eaux va favoriser la montée du niveau de la nappe d'accompagnement jusqu'à provoquer, dans les points bas situés derrière les digues, un débordement. Ce débordement « souterrain » précède

généralement l'inondation de surface (par débordement de la rivière) et rallonge la durée de l'inondation dans la zone impactée.

Cependant, les inondations constatées dans le contexte B peuvent être de durée relativement courte, en comparaison du contexte A décrit plus haut. En effet, la rivière, lorsqu'elle retrouve ses niveaux initiaux, draine rapidement l'aquifère perméable.

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

c) La remontée des nappes alluviales

La genèse des inondations associées aux nappes de type alluvial (plaine d'Alsace par exemple) peut être liée à deux mécanismes :

- Lorsque le fleuve entre en crue, l'onde de crue du fleuve se transmet à la nappe alluviale. Celle-ci peut alors atteindre une cote proche de la surface et provoquer l'inondation des points topographiques de la plaine les plus bas.
- Lorsque de fortes précipitations surviennent plusieurs mois de suite sur certains secteurs, la recharge directe de la nappe peut conduire cette dernière à affleurer le sol en provoquant l'inondation des points topographiques de la plaine les plus bas. La nappe contribue alors également aux débordement du cours d'eau principal drainant la plaine alluviale.

2.1.2. Analyse du secteur étudié

La première étape de la méthodologie consiste faire l'analyse du secteur d'étude en définissant les éléments suivants :

- Présentation générale du site d'étude

Localisation géographique, superficie de la zone d'étude, topographie, hydrographie

- Positionnement du secteur d'étude sur la carte nationale et sur la carte de fiabilité associée
- Présentation du contexte hydrogéologique

Entités BDLisa concernées, caractéristiques de systèmes aquifères de la zone d'étude (nature, hydrodynamisme,...) , relation nappe-rivière et zones humides

La carte ci-dessous (Illustration 6) illustre les entités affleurantes de la BDLisa¹ (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) du bassin versant de l'Authie.

¹ <https://bdlisa.eaufrance.fr/>

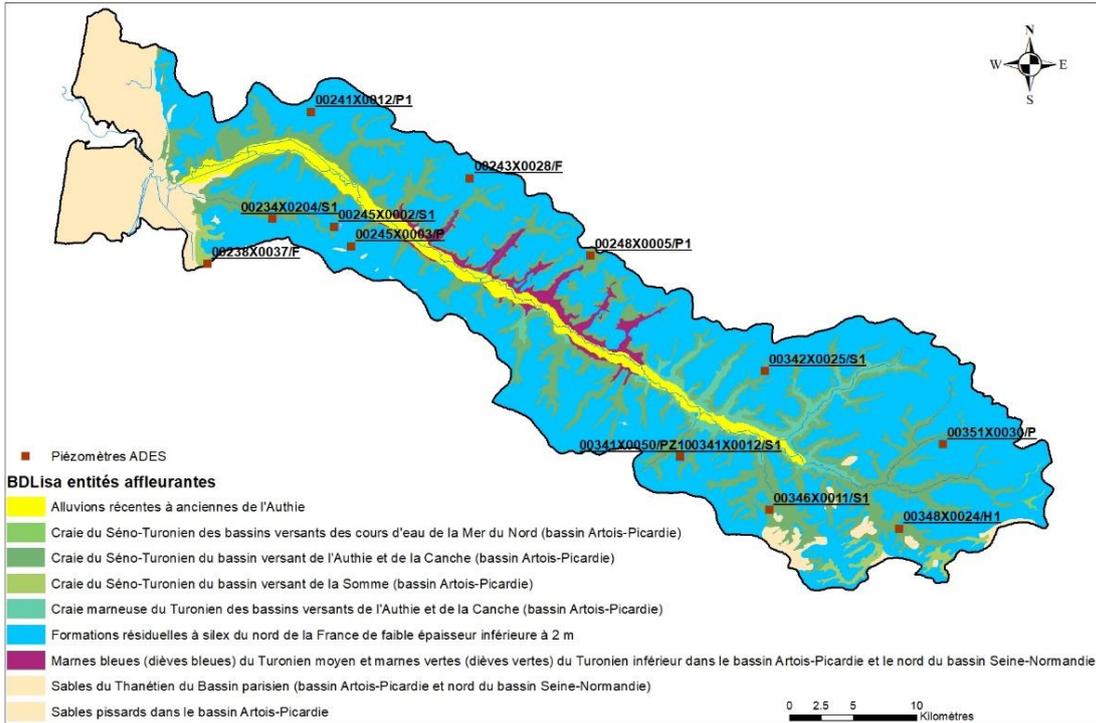


Illustration 6 - Entités BDLisa du bassin versant de l'Authie

Cette analyse doit permettre une conceptualisation de la zone d'étude et une appréhension des capacités d'amélioration de la carte nationale à l'échelle locale.

Il est nécessaire également, à cette étape de la méthodologie, de déterminer la situation de hautes eaux ou pas abus de langage « période de retour » (par exemple estimée à 100 ans pour la carte nationale). Des précisions seront apportées sur ce point dans le chapitre.

2.2. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Un travail de collecte de toutes les données utiles à l'étude doit être effectué sur le site. Il s'agit des données de mesures des points d'eau souterraine et des données topographiques. Les données à collecter à minima sont :

- les données topographiques (MNT au pas de 25 m ou mieux au pas de 5 m) voir les données Lidar avec les incertitudes associées,
- les points d'eau avec chroniques piézométriques situées dans le bassin versant ou à proximité immédiate (ADES, BSS Eau),
- les cartes piézométriques en période de hautes eaux (HE) et les points de mesure associés,
- les données du réseau hydrographique,
- le trait de côte en bord de mer,
- des informations concernant les inondations par remontées de nappes : les dossiers de catastrophes naturelles et les enquêtes terrain si existantes,
- les cartographies existantes d'inondation par cours d'eau,

- les informations concernant les communes situées dans le bassin versant (mesures de prévention spécifiques à l'aléa remontée de nappe,
- les photographies aériennes en période d'inondation (si existantes).

D'autres données peuvent être utiles à la réalisation de la carte, notamment lorsque peu de données sur les eaux souterraines sont disponibles :

- les points d'eau avec une mesure ponctuelle (BSS),
- les données mesurées au droit des différentes stations climatologiques et hydrologiques,
- les données issues de modèles hydrodynamiques existants,
- les zones humides (à condition qu'elles soient en connexion avec la nappe),
- d'éventuels informations complémentaires (photographies, vues aériennes ou satellitaires...),
- les données d'écoulement des sources,
- les cartes piézométriques moyennes eaux (ME),
- les images satellite.

La description de ces différentes données est faite dans les paragraphes suivants. Nous noterons :

- ZTopo : la cote topographique
- ZT100 : la cote piézométrique maximale ayant une période de retour de 100 ans
- ZNS_T100 l'épaisseur de la zone non saturée, ayant une période de retour de 100 ans ($ZNS_T100 = ZTopo - ZT100$)
- ZPIEZ(t) : la cote piézométrique mesurée à un temps t

2.2.1. Le Modèle Numérique de Terrain et incertitudes associées

Lorsqu'on évalue le risque d'inondation par remontée de nappe en comparant la surface « ZT100 » à la topographie, on peut prendre en compte l'incertitude sur la cote topographique dans l'analyse à effectuer. Par exemple si la cote du sol n'est connue qu'à 10 m près, il est difficile de dire si la cote piézométrique ZT100 tombera à coup sûr au-dessus ou en-dessous de la topographie. La cote topographique est donnée le plus souvent par un MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui fournit l'altitude du terrain dans chaque maille (typiquement maille de 25m de côté pour BDALTI, de 5 m et 1 m pour RGE ALTI, produits par l'IGN). Toutefois, cette altitude est assortie d'une incertitude qui n'est pas communiquée maille par maille, mais seulement globalement. De plus, cette incertitude peut prendre des valeurs assez contrastées selon la méthode utilisée par l'IGN pour construire le MNT. Elle est en général également plus forte en zone de relief et de rupture de pente. La précision altimétrique peut varier de 1 m à 8 m (cf. annexe 1)

Le choix de la résolution du MNT doit être adapté à l'échelle de travail, mais aussi fonction des capacités informatiques (volume de données, temps de traitement, possibilités de restitution graphique). Lorsqu'on travaille à échelle locale, il est possible d'utiliser des MNT à résolution 5x5m ou 25x25m, ce qui est difficile, voire impossible, à l'échelle de la métropole. Travailler avec un MNT à haute résolution permet en principe de mieux représenter les zones à enjeux (fonds de vallées, zones humides, etc.). Encore faut-il que la précision altimétrique de ces zones soit bonne.

Bien que l'IGN ne fournisse pas en standard une mesure de l'incertitude de l'altitude, il est possible d'en avoir une estimation par la méthode présentée ci-dessous (des compléments d'informations peuvent également être trouvés dans le rapport de Bessière et al. (2019) – BRGM/RP-68600-FR sur la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe en Alsace).

Afin de quantifier les incertitudes affectant le modèle numérique de terrain de l'IGN, il est possible de comparer l'altitude fournie dans chaque maille du MNT à l'altitude de points nivelés avec précision et tombant dans la même maille.

Pour cela on peut utiliser les points de nivellement mesurés par l'IGN. Ce sont des points nivelés avec une précision altimétrique au moins centimétrique. On peut consulter ces points sur le site web de l'IGN : (<https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visuageod>). Il s'agit le plus souvent de points mesurés sur des églises, monuments, bord de route, etc...

En tant qu'établissement public, le BRGM a possibilité d'obtenir de l'IGN un fichier contenant la liste de ces points dans un périmètre défini. Le fichier transmis par l'IGN fournit l'altitude du repère de nivellement, ainsi que la hauteur du point de nivellement par rapport au sol. Par différence on obtient l'altitude du sol. La majorité des points présents dans le fichier IGN ne peut pas être utilisé car ces points ne représentent pas l'altitude du sol (points sur des ponts, des statues, points dont on ne connaît pas la hauteur du repère par rapport au sol, etc...). Le fichier doit donc être nettoyé point par point (opération manuelle se basant sur le texte de description du repère de nivellement, opération chronophage difficile à automatiser). Toutefois, il reste en général un nombre suffisant de points pour mener à bien une étude statistique.

Un bémol doit être apporté à ces données : les coordonnées X,Y de ces points sont arrondies (par l'IGN) à 10m près dans ce fichier. La localisation planimétrique n'est donc pas parfaite. De ce fait la comparaison n'est pas complètement rigoureuse, puisqu'on ne sait pas exactement dans quelle maille tombe chaque point nivelé. Malgré tout, avec un nombre de points suffisants, on peut obtenir une estimation bien plus précise de l'incertitude du MNT que celle fournie par l'IGN.

Cette méthode a été mise en pratique dans deux cas à l'échelle locale :

- Pour l'étude locale « Alsace »
- Pour l'étude locale « Aquitaine »

Ce travail de comparaison peut aussi être effectué avec des points nivelés de manière précise par ses propres moyens (nivellement des piézomètres s'ils sont au niveau du sol, nivellement de points le long de routes, etc...).

2.2.2. Données piézométriques des banques nationales

a) Extraction

Les données piézométriques sont extraites de la banque d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES²) et de la Banque du Sous-sol répertoriant les ouvrages souterrains relatifs aux eaux souterraines (BSS Eau, BRGM).

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

² <https://ades.eaufrance.fr/Recherche>

- 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 HG BDLISA

A partir de cette extraction, des statistiques suivantes sont calculées :

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

Pz max NGF // pz min NGF // pz moy NGF // EcType pz NGF // médiane pz NGF // profondeur pz max // profondeur pz min // profondeur pz moyen // EcType profondeur // profondeur pz médian //Nbre total de mesure

Ces points vont être soumis à un tri et des vérifications 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,
- les points d'eau captant des nappes captives.

- **Exemple de critères de sélection semi-automatique utilisé pour la méthode nationale :**

- | | | |
|--|---------|----------|
| - cote moyenne de l'eau : | Critère | <0 m NGF |
| - différence (cote sol MNT- cote de l'ouvrage) : | Critère | >110l |
| - différence (cote de l'ouvrage/ cote du sol), | Critère | >110l |
| - profondeur de l'ouvrage, | Critère | >100 m |
| - battement maximal | Critère | >30 m |
| - écart-type des mesures de niveau d'eau | Critère | >10 |

- **Exemple de critères de sélection pour l'étude en Aquitaine :**

- Sélection des points se situent dans la première nappe rencontrée (requête SQL et traitement SIG)
 - o Mode de gisement : libre et semi-captif
 - o Si la côte piézométrique moyenne est inférieure à 0 (=Artésien) : élimination

- Sélection des entités BDLISA Niv3 Ordre 1 pour les ouvrages renseignés
- Pour les points restants, on utilise un critère sur la profondeur d'investigation:
 - Si profondeur max $\geq 100\text{m}$, on vérifie au cas par cas la nappe captée par l'ouvrage
- Ajouter les infos potentiellement utiles (traitement SIG) :
 - Battement de la nappe
 - Différents calculs de différence pour identifier d'éventuelles anomalies
 - ZTopo 25m NGF – référence altimétrique de l'ouvrage
 - ZTopo MNT25m – ZPIEZmax \approx PROFmin...

c) Correction des données

La plupart de ces corrections ont consisté à visualiser la chronique piézométrique afin :

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

- **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 ces valeurs parce que si elles sont prises en compte dans le calcul des paramètres statistiques, les valeurs seront faussées. La boîte à moustaches est une méthode classique et efficace pour détecter les valeurs atypiques éventuelles (cf. annexe.2. Principe de la boîte à moustaches). La procédure utilisée est de faire 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 maximales, minimales ou moyennes est effectuée. L'illustration 7 montre un exemple de chronique traitée.

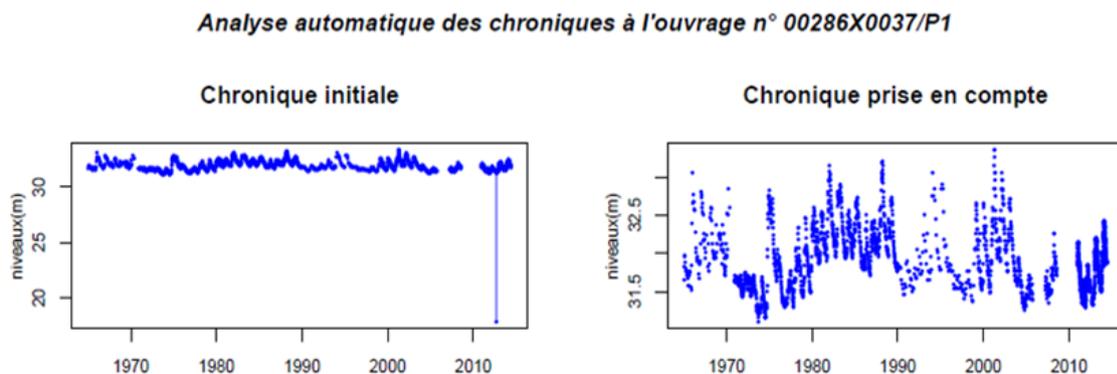


Illustration 7 - Chroniques avant (à gauche) et après la suppression des outliers (à droite).

2.2.3. Enquêtes et campagne de terrain

Deux types d'enquête, l'une directement auprès des riverains et l'autre à destination des services de l'État et des collectivités, ont été menées au cours de diverses études, afin de réaliser un inventaire des phénomènes d'inondation connus et d'obtenir des informations complémentaires

(mesures de niveaux à des dates précises, hauteurs d'eau estimées...). Ces enquêtes doivent être soutenues par les différentes collectivités, services déconcentrés, SAGE, syndicats des eaux afin de convaincre les habitants de l'intérêt du questionnaire et d'obtenir un maximum de réponses.

Après dépouillement de l'enquête, une campagne de nivellement des points répertoriés est réalisée par le biais d'un GPS différentiel :

- de l'ensemble des points de débordement de la nappe ressortis des enquêtes et/ou des observations complémentaires collectées lors de la visite,
- des stations de mesures hydrologiques et piézométriques existantes (si pas encore nivelées).

L'objectif est d'augmenter le nombre de points de validation afin de fiabiliser la qualité de rendu cartographique.

La rencontre des particuliers et des services de l'état (Mairies) peut s'avérer décisive pour connaître les secteurs les plus touchés historiquement. Mais également parfaire la compréhension de modifications anthropiques qui impactent le comportement des écoulements d'eau souterraine dans la zone d'étude.

Un exemple d'enquête réalisée sur le secteur Est du bassin d'Arcachon est présenté est annexe 3.

2.2.4. Données historiques (Catnat)

Les points CATNAT sont des points pour lesquels une inondation a été observée (maison, champ, ...) et ayant fait l'objet d'un arrêté « catastrophe naturelle ». Un inventaire et un géoréférencement des zones inondées, examinées lors des expertises faites par le BRGM suite à des demandes liées aux arrêtés Cat Nat, ont été réalisés depuis l'année 2013.

On peut les obtenir à partir des rapports de déclaration de catastrophe naturelle. Il est possible de les localiser plus ou moins précisément en X,Y à partir de ces rapports. Par ailleurs la cote Z du plan d'eau n'est pas toujours fournie par le rapport. Il faut la déduire du Modèle Numérique de Terrain. Ceci introduit une incertitude de localisation du point. De plus, s'il s'agit d'une remontée de nappe dans une cave, il faut avoir une indication de la profondeur du plan d'eau par rapport au sol, et s'il s'agit d'un débordement en surface, il faudrait avoir la hauteur d'eau au-dessus du sol.

Les enquêtes de terrain permettent d'obtenir des informations du type des informations CATNAT, mais en plus le point peut être repéré de façon plus précise en X,Y,Z.

Idéalement les points « CATNAT » ou issus des enquêtes de terrain ne devraient pas être introduits en entrée pour le calcul de la surface ZT100. Ils devraient servir de validation au calcul de ZT100 : la cote ZT100 calculée au droit des points CATNAT devrait avoir valeur de prédiction qu'un débordement par remontée de nappe aurait dû être observé en cet endroit. Si les autres données (piézomètres, etc...) ne sont pas capables de prédire un débordement aux points CATNAT, c'est que la méthode de calcul n'est pas suffisamment précise ou que le nombre de données n'est pas assez conséquent pour prédire ce qui s'est passé en ce point.

Les tests effectués jusqu'à présent (du moins à l'échelle nationale) ont montré que l'utilisation des seules données autres que CATNAT ne permettaient pas toujours de prédire des remontées de nappe pour tous les points CATNAT (certains sont retrouvés, d'autres pas).

Pour cette raison, bien souvent, les points « CATNAT » sont introduits comme donnée d'entrée servant au calcul. Toutefois, il est conseillé de procéder de la façon suivante :

- Faire un premier calcul sans les points « CATNAT »
- Vérifier si ce calcul entre en contradiction avec les points CATNAT : le calcul doit prévoir une cote ZT100 supérieure au plan d'eau pour les points de débordement de surface. Il doit prévoir une cote proche du plan d'eau observé si inondation de cave
- Les points CATNAT qui ne sont pas respectés (càd que la surface interpolée ne passe pas par ces points) peuvent être ajoutés aux données d'entrée afin d'effectuer un second calcul. Ce second calcul doit alors vérifier tous les points CATNAT. Si ce n'est pas le cas, effectuer une nouvelle itération en ajoutant les points non respectés.

2.2.5. Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques représentent la surface piézométrique d'une nappe par des lignes équipotentiellles (construites elles-mêmes par une interpolation de mesures ponctuelles).

Les cartographies nationales de risque d'inondation par remontée de nappes réalisées précédemment par le BRGM ont parfois utilisé en entrée les courbes isopièzes (hautes eaux) issues de cartographies réalisées au cours du temps. Ces courbes ont été utilisées dans des zones où les données piézométriques n'avaient pas été bancarisées ou présentaient des durées insuffisantes.

D'une façon générale, dans la mesure du possible, il est préférable d'éviter l'utilisation des isopièzes en entrée d'interpolation de surfaces piézométriques. En effet, outre la difficulté de passer de la valeur de l'isopièze à une cote ZT100 de période de retour 100 ans, les données de type isopièze posent plusieurs problèmes :

- S'il s'agit du résultat d'une interpolation, ce résultat est le plus souvent lissé (du fait des propriétés de lissage de la plupart des interpolateurs utilisés) ;
- Les isopièzes doivent être échantillonnées. En effet, si on retient tous les points, on obtient un nombre de points trop important, qui génère des artefacts. Notamment pour le calcul du variogramme (cf. paragraphe 5.2.2), tous les points d'une même isopièze génèrent une valeur de variogramme nulle. Les isopièzes doivent donc être échantillonnées de façon à obtenir une densité de points comparable à celle des autres données (type piézomètres) pour assurer la représentativité du variogramme) ;
- Dans le cas où l'on travaille avec les épaisseurs (ZNS_T100), c'est-à-dire à partir des profondeurs et non des cotes piézométriques, il faut projeter le MNT au droit des points le long des isopièzes. Cela propage donc l'erreur sur le MNT sur la valeur de ZNS_T100.

Il est donc conseillé d'utiliser directement les points des campagnes de mesure ayant servi à l'élaboration de ces cartes.

Doivent être supprimées du traitement :

- les cartes piézométriques réalisées sur des nappes captives (pas de risque de remontée de nappe),
- les données trop anciennes ou trop imprécises
- mais également les cartes réalisées en basses ou moyennes eaux dans la mesure du possible.

Rappelons tout de même que chaque carte doit faire l'objet d'une vérification, basée sur les données piézométriques disponibles et les connaissances locales. Une attention particulière sera

apportée aux modifications éventuelles d'origine anthropique qui auraient pu survenir depuis la réalisation de la carte.

2.2.6. Les informations « cours d'eau » (EAIP, PPRI, le réseau hydrographique)

Différentes informations relatives au réseau hydrographique peuvent également être prises en compte :

- Les « EAIP » [Enveloppes approchées d'Inondation Potentielle « cours d'eau » (EAIPce) et « submersion marine » (EAIPsm)]
- Le réseau hydrographique issu de la BDCarthage ou de la BDTopo (voir prochainement de la BDTopage)

a) Les EAIP

Les « EAIP », établies par la DGPR avec le concours d'autres organismes, délimitent les contours des zones sujettes à inondation du fait de la montée du niveau d'eau des cours d'eau ou de la mer. Il a été signalé dans le rapport BRGM/RP-59890-FR la difficulté de différencier, pour certains aquifères, les inondations (1) du fait des cours d'eau et (2) des inondations du fait d'une remontée de nappe. La raison étant que certains cours d'eau sont alimentés plus par la nappe que par le ruissellement (exemple zones karstiques).

Dans la méthodologie à l'échelle nationale, les « EAIP » ont été utilisés pour contraindre l'interpolation de la cote piézométrique ZT100, en prenant cette cote égale à la topographie sur les contours des EAIP.

Toutefois, il avait été noté que cette prise en compte pourrait « laisser penser qu'un phénomène de remontée de nappe accompagne systématiquement un débordement de cours d'eau ou une submersion marine », ce qui n'est pas nécessairement le cas si la connexion entre cours d'eau et nappe n'est pas totale.

Par ailleurs, le fait de choisir une cote MNT sur les contours des EAIP peut potentiellement biaiser le calcul de la surface ZT100 (qui potentiellement pourrait être au-dessus ou en-dessous du MNT). Ceci d'autant plus que les points de donnée d'EAIP, même échantillonnés tous les 100 m comme dans la méthode nationale, représentent un nombre de données considérablement plus élevé que les données de piézomètres.

Dans l'idéal donc, il nous semble souhaitable de ne pas prendre en compte les EAIP en tant que donnée d'entrée, au moins dans un premier temps. Puis dans un second temps, de comparer le calcul de la surface ZT100 (et de son intersection avec la topographie), avec les contours des EAIP, et de n'introduire des données d'EAIP que dans les zones posant problème. Cette comparaison pouvant s'avérer chronophage, car nécessitant un contrôle point par point prenant en compte les relations nappe-cours d'eau, elle ne peut probablement être entreprise qu'à l'échelle locale.

b) Le réseau hydrographique

Pour le traitement des nappes alluviales en connexion avec les cours d'eau, si le nombre de points d'eau souterraine est insuffisant, il est donc conseillé d'utiliser les données cours d'eau ou éventuellement des PPRI débordement de cours d'eau (plus précis et surtout moins maximisant que les EAIP)

Par exemple, à l'échelle des bassins de la Seine amont et moyenne, il a été décidé de ne contraindre l'interpolation qu'à partir du tracé des cours d'eau issu de la BDCarthage©. Il faut souligner qu'un important travail de nettoyage a été nécessaire pour éliminer les différentes imprécisions (canaux, erreurs de tracé, etc.). L'illustration 8 permet de constater, en amont de la confluence de la Seine et de l'Aube, que les EAIPce s'étendent bien au-delà des délimitations PPRI.

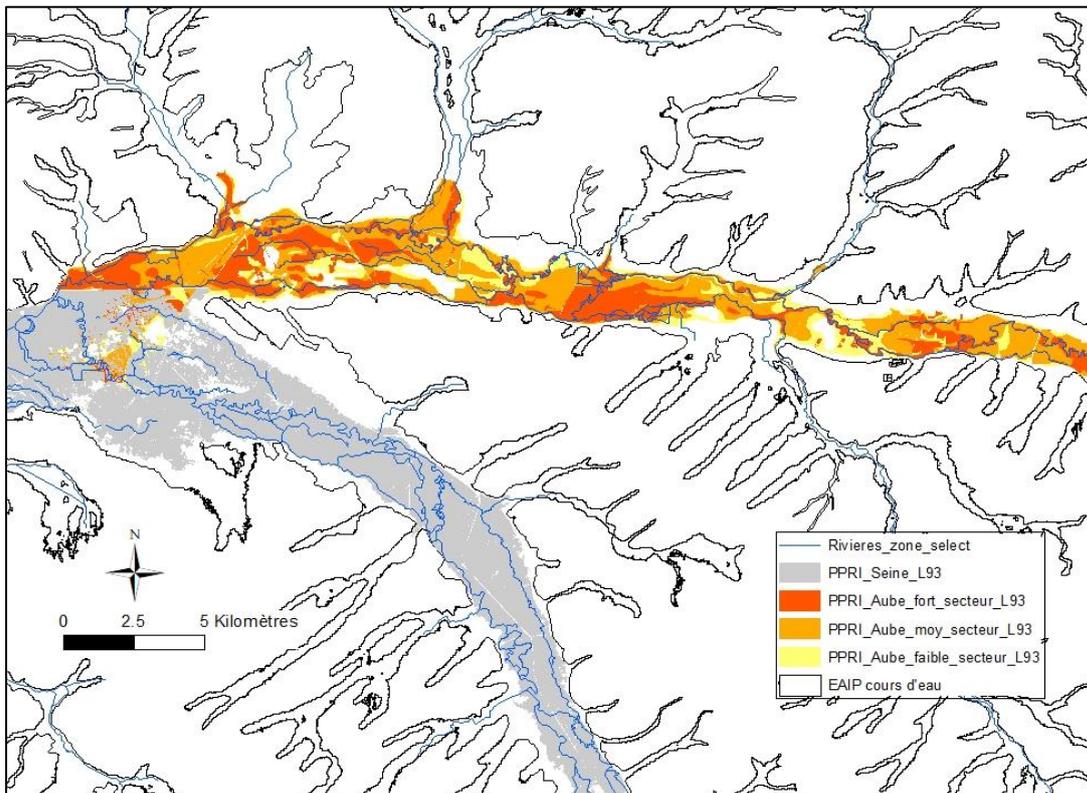


Illustration 8 - Comparaison des EAIP et des PPRI en amont de la confluence de l'Aube et de la Seine (sources : DGPR, DDT de l'Aube d'après Arnaud et al., 2020).

En première approche, les polygones ont été discrétisés en points distants de 500 m (Illustration 9). Considérant une connexion hydraulique généralisée entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, le niveau maximum probable a été fixé à la valeur du MNT25 pour tous ces points.

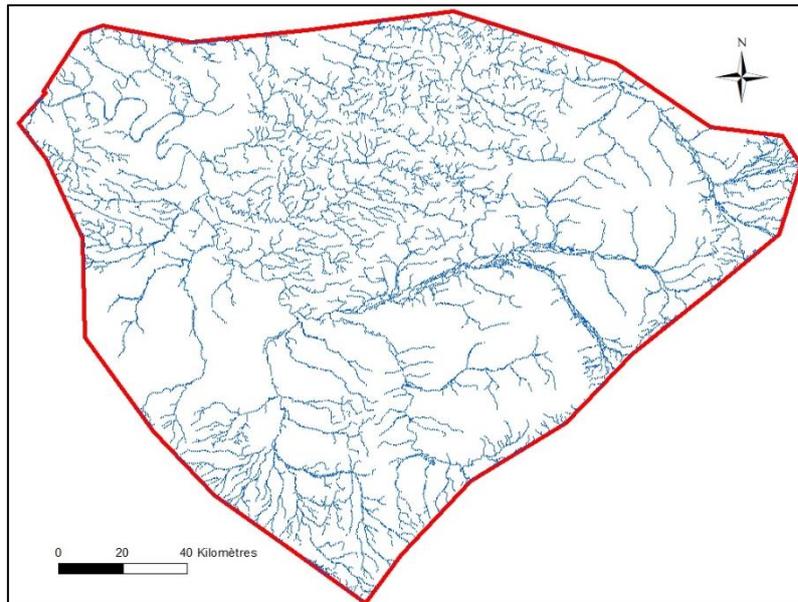


Illustration 9 - Points de contrainte liés aux rivières (source : BDCarthage).

2.2.7. Trait de côte Histolitt®

Le trait de côte Histolitt® est un produit du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)³, coédité avec l'Institut Géographique National (IGN) et disponible en licence ouverte sur le portail data.gouv.fr (Illustration 10).

³ Établissement public de l'État à caractère administratif (EPA) sous tutelle du ministère de la défense et opérateur public pour l'information géographique maritime et littorale de référence

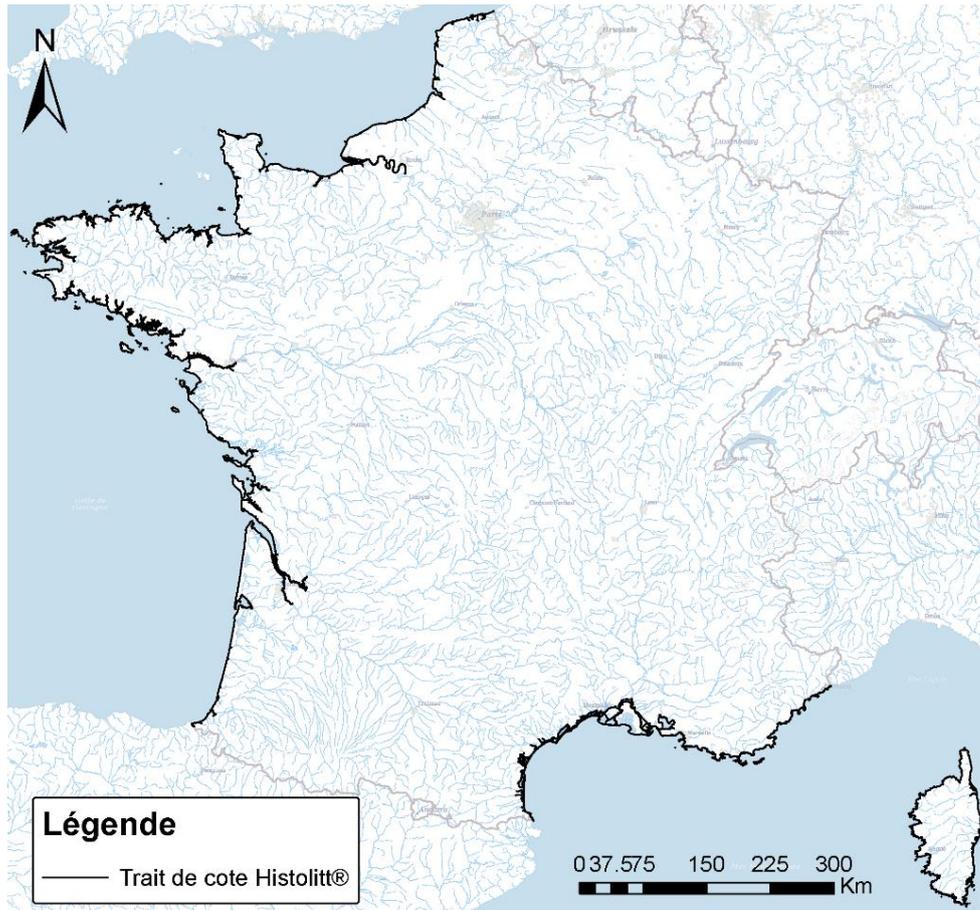


Illustration 10 - Carte du trait de côte Histolitt® (SHOM)

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

Il est utilisé pour contraindre l'interpolation en bordure littoral, en créant des points de « forçage » le long de ce trait de côte et en leur affectant l'altitude du MNT au pas utilisé pour l'étude.

2.2.8. Indices hydromorphologiques

Une analyse hydromorphologique peut être menée sur les données disponibles : orthophotoplans, photographies aériennes, documents cartographiques historiques disponibles, cartographie des zones humides et connaissances du comportement de ces milieux.

Elle consiste à analyser tous les indices visibles et quantifiables permettant de localiser précisément l'interface nappe / milieux aquatiques : position des zones humides, des mares, des sources ; niveaux des débordements temporaires de la nappe dans les vallons secs.

Pour toutes les informations recueillies, les niveaux d'eau atteints devront être reportées sous forme d'information ponctuelles et géolocalisées. Chacune des traces d'affleurement de la nappe est cartographiée.

2.2.9. Données complémentaires en fonction de leur disponibilité

Selon le nombre de données déjà disponibles au niveau de la zone d'étude, il est envisageable de considérer un certain nombre de données complémentaires afin d'augmenter le jeu de données pour l'analyse géostatistique.

a) Les images satellite

Le traitement des images satellite a fait l'objet de développement spécifique pour la détermination de zones inondables par remontée de nappe

Ces développements méthodologiques sont décrits dans l'étape 1Bis de la méthodologie (§ 3).

Cette étape de la méthodologie est optionnelle mais constitue une plus-value intéressante dans les secteurs peu renseignés ou ayant subi des inondations majeures et bien identifiées comme des remontées de nappe.

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 (cf. rapport BRGM RP-68600-FR). 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 (voir 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. Egalement les images doivent être nettoyées pour enlever les plans d'eau, rivières, ainsi que les artefacts de calcul.

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 il y a (aurait) un débordement.

Ces données peuvent donc surtout être utilisées en terme de validation (comme les points CATNAT).

On peut également les utiliser comme données d'entrée dans le cas où les données disponibles par ailleurs seraient en trop faible nombre et donneraient un résultat contradictoire avec les données satellites. La difficulté dans ce cas est d'attribuer un X,Y et un ZT100 précis aux polygones identifiés sur l'image satellite. Une possibilité est d'utiliser les coordonnées X,Y du centroïde du polygone et comme Z la moyenne du MNT dans ce polygone.

b) Autres données eaux souterraines de la banque de la banque du sous-sol (BSS)

Les relevés piézométriques ponctuels issus de la BSS-EAU pour des niveaux peu profonds (par exemple inférieurs à 5 m de profondeur pour la Seine amont) peuvent être utilisés comme contraintes d'interpolation ou encore en phase de validation et non comme données d'entrée.

c) Inventaires de sources

Les sources peuvent fournir des points de contrainte pour la surface piézométrique ZT100 :

- Pour les sources pérennes, la surface piézométrique ZT100 calculée au droit de la source doit être supérieure ou égale à l'altitude NGF de la source. Si on travaille sur l'épaisseur, l'épaisseur ZNS_T100 calculée doit être inférieure à 0 en ce point.
- Pour les sources intermittentes, les contraintes sont de même nature.

d) Données issues de modèles hydrodynamiques

Il convient dans un premier temps de s'assurer de la qualité du modèle avant de l'exploiter dans le cadre d'une étude de remontée de nappe. Les principales questions à répondre avant son utilisation sont :

- Quel était l'objectif de la modélisation ?
- Quelle piézométrie a été restituée (ME, HE, etc.) ?
- Quelle est l'étendue spatiale du modèle et quel est le maillage ? est-il compatible avec la résolution du MNT ?
- Est-ce une modélisation en régime permanent ou transitoire ?
- Des ouvrages ou infrastructures enterrées ont-ils été pris en compte ?
- Quel est la qualité du calage ?

Dans certains grands aquifères en France, des modèles hydrodynamiques ont été implémentés. Ces modèles permettent de calculer des isopièzes a priori très pertinentes, car respectant toutes les contraintes hydrodynamiques qu'il n'est pas toujours facile ou possible de respecter par interpolation (prise en compte des relations nappes-rivières, limites étanches, crêtes hydrologiques, débits des rivières, prélèvements, utilisation d'un modèle géologique et de champs de perméabilité des formations géologiques, ...).

Les isopièzes ou les grilles issues de ces modèles peuvent éventuellement être prises en compte, de deux façons différentes :

- un peu de la même façon que les isopièzes issues de cartographies classiques, avec les précautions citées précédemment (échantillonnage, ...). Mais ce n'est pas là une utilisation optimale : là encore il serait préférable de prendre en compte les données de piézométrie utilisées pour le calage du modèle hydrodynamique.
- Il existe toutefois un autre moyen indirect de prendre en compte les surfaces piézométriques issues de modèles hydrodynamiques : celles-ci peuvent être prises en compte comme « dérive externe » (voir plus loin la section sur les méthodes géostatistiques). En résumé cette méthode permet de contraindre les interpolations basées sur les données de piézomètres (la cote ZT100) à rester cohérente avec la surface piézométrique issue du modèle hydrodynamique. Comme ce modèle prend en compte la physique du problème et les propriétés hydrodynamiques des formations aquifères, il est a priori un bon analogue de la surface ZT100, et peut servir à guider son interpolation.

2.3. EVALUATION DE LA FIABILITE DES DONNEES

La qualification de la fiabilité des données permet de guider l'analyse géostatistique à postériori. 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.

2.3.1. Principe d'évaluation de la fiabilité des points d'eau

Dans l'objectif de calculer une cote maximale piézométrique, il est nécessaire d'avoir des chroniques piézométriques suffisantes pour effectuer le calcul et minimiser l'erreur de mesure.

Il est procédé à une évaluation de la représentativité des mesures de chaque point d'eau en considérant la durée d'observation du point (D, en années) et le nombre de mesures réalisées. On peut donc diviser le jeu de données en deux :

- Les points fiables

Les chroniques suffisamment longues et bien échantillonnées pourront fournir une valeur de ZT100 qui est calculée à partir de séries chronologiques mesurées sur un intervalle de temps minimum (10 années pour la nappe d'Alsace), avec un nombre de mesures par an représentatif (> 50 en moyenne par an pour l'Alsace).

Une attention particulière a été portée sur les points dit « fiables » (Fiabilité moyenne et forte). Pour chacun, 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. Dans la plupart des cas, les valeurs aberrantes ont été supprimées ou corrigées et les véritables mesures maximales et/ou minimales ont été prises en compte.

- Les points peu fiables

Les autres chroniques (de durée insuffisante) ne peuvent fournir une estimation fiable de la cote ZT100. Toutefois, ces chroniques peuvent fournir une borne inférieure de ZT100. La surface ZT100 calculée à partir des autres de données devra passer « au-dessus » de ces points. Cette contrainte peut soit être vérifiée à posteriori, soit intégrée dans l'algorithme de calcul (méthode de krigeage avec conditions d'inégalités, détaillée plus loin).

Exemple de classification qui peut être utilisée pour des nappes à cycle annuel (nappe alluviale):

- Fiabilité forte :
 - Longueur de chronique ≥ 10
 - Nombre de mesure ≥ 120
- Fiabilité moyenne :
 - Longueur de chronique ≥ 10
 - Nombre de mesure ≥ 40
- Fiabilité faible :
 - Longueur de chronique ≥ 1
 - Nombre de mesure ≥ 40
- Points restants (utilité à vérifier) :
 - Points avec 1 seule mesure, application de la surcote de la méthode nationale pour voir si cela améliore l'interpolation.

2.3.2. Synthèse d'évaluation de la fiabilité par source de données

Le Tableau 2 synthétise le formalisme d'évaluation de la fiabilité 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)	longueur de chronique et fréquence de mesures suffisantes	longueur de chronique et fréquence insuffisantes mais disponibles sur au moins un cycle de nappe	Mesures ponctuelles
Modèle hydrodynamique	zones de débordement	surfaces piézométriques HE extraites du modèles	
Données historiques et enquêtes et Catnat	Points inondation géoréférencés		Si information communale, à utiliser comme validation
Cartes piézométriques	Points de mesure HE	Isopièzes HE uniquement ^(*)	Isopièzes ME
Cours d'eau	Linéaire cours d'eau (connexion nappe/rivière) ^(*)	Cartographie inondation type PPRI ^(*)	EAIP
Indices hydromorphologiques	Si relation nappe / milieux aquatiques avérée		
Sources	Si précision altimétrique		
Les images satellite		Si disponible pendant un épisode de remontée de nappe connue ^(*)	Eléments de contrôle

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

Tableau 2 Evaluation de la fiabilité par source de données

2.4. TRAVAIL D'ASSOCIATION DES POINTS

L'objectif de ce travail consiste à associer des points considérés comme peu fiables pour la cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe, 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 (aquifère capté, cours d'eau à proximité, bassins versants) qui caractérisent chaque point.

Au préalable, chaque point, qu'il soit de fiabilité faible, moyenne ou forte, est associé :

- à l'entité hydrogéologique de niveau 3 et d'ordre 1 du référentiel BDLISA dans lequel il se trouve ;
- au bassin versant, provenant soit de BD Carthage soit du thème « hydrographie » de la BD Topo V3⁴, dans lequel il se trouve ;
- au cours d'eau le plus proche.

En contexte local, des ajustements ont été faits par rapport à la méthode utilisée pour la carte nationale. Le rattachement aux entités hydrogéologiques affleurantes constitue désormais un critère d'entrée pour l'analyse.

De plus, le cours d'eau associé n'est plus forcément situé dans le même bassin versant que le point d'eau. En effet, une rapide analyse des résultats de la méthode nationale a montré que certaines associations pouvaient être inadéquates. C'est le cas notamment pour des régions planes comme la plaine d'Alsace, au sein desquelles les crêtes topographiques sont très peu marquées

Le travail de rattachement comprend ensuite les différentes phases successives suivantes, de la plus précise à la moins précise :

Phase 1

Les points peu fiables sont rattachés aux points fiables qui « **sont proches du même cours d'eau, appartiennent à la même entité BDLISA et sont distants de moins de 5km** » :

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et rattachés à la même entité BDLISA et au même cours d'eau,
- Comparaison des niveaux piézométriques moyens des points fiables possibles avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Phase 2

Les points peu fiables non rattachés après la phase 1, sont rattachés aux points fiables qui sont « **proches du même cours d'eau et distants de moins de 5km** » :

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et associés au même cours d'eau,
- Comparaison des niveaux piézométriques moyens des points fiables possibles avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Phase 3

Les points peu fiables non rattachés après les phases précédentes, 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** » :

⁴ Le nouveau référentiel hydrographique BD Topage qui sortira courant 1^{er} trimestre 2020 constituera ensuite la donnée source à privilégier pour les bassins versants et les cours d'eau.

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et associés au même bassin versant et à la même entité BDLISA mais pas au même cours d'eau,
- Comparaison des niveaux piézométriques moyens des points fiables possibles avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Phase 4

Les points peu fiables non rattachés après les phases précédentes, 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** » :

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et associés au même bassin versant mais pas au même cours d'eau,
- Comparaison des niveaux piézométriques moyens des points fiables possibles avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Phase 5

Les points peu fiables non rattachés après les phases précédentes, 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** » :

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et associés à la même entité BDLISA mais pas au même cours d'eau,
- Comparaison des niveaux piézométriques moyens des points fiables possibles avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Phase 6

Les points peu fiables non rattachés après les phases précédentes, sont rattachés aux points fiables les plus proches qui seront donc forcément dans un autre bassin versant, associés à un autre cours d'eau et à une autre entité BDLISA.

Le choix de conserver un intérêt pour les associations issues de cette dernière phase (et donc de conserver ces points peu fiables dans le jeu de données servant à l'interpolation) dépend du pourcentage de points concernés par cette phase 6 par rapport au nombre total de points peu fiables mais également de la densité de points provenant des autres sources (sont-ils en nombre suffisant pour pouvoir se passer de ces points peu fiables ?).

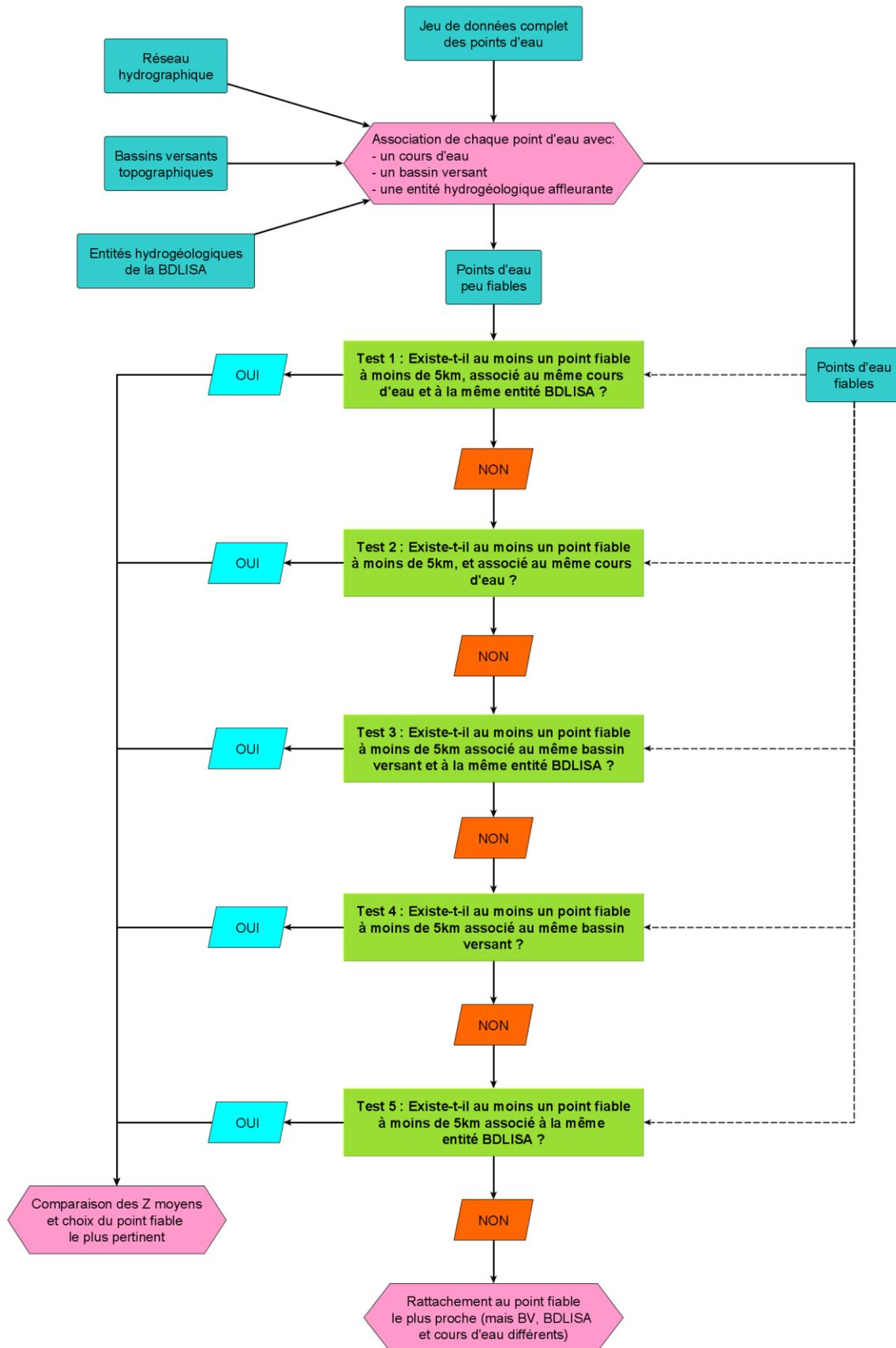


Illustration 11 – Logigramme des différentes phases d'association des points

La méthode d'association a été déployée pour la carte de sensibilité aux remontées de nappe en Alsace (Bessiere *et al.*, 2019) et a ensuite été confrontée aux **42 zones homogènes de complexité différente couvrant la nappe d'Alsace** et une partie des aquifères associés, dont la formation plio-quadernaire de Haguenau-Riedseltz, identifiées par une analyse statistique dans le cadre d'une étude sur l'optimisation du réseau de surveillance des eaux souterraines (Urban *et al.*, 2010).

Mis à part quelques effets de bordure pouvant s'expliquer par l'absence de points fiables à certains endroits, la méthode utilisée pour associer points fiables et peu fiables retranscrit fidèlement la sectorisation statistique de 2010 (cf. Illustration 12).

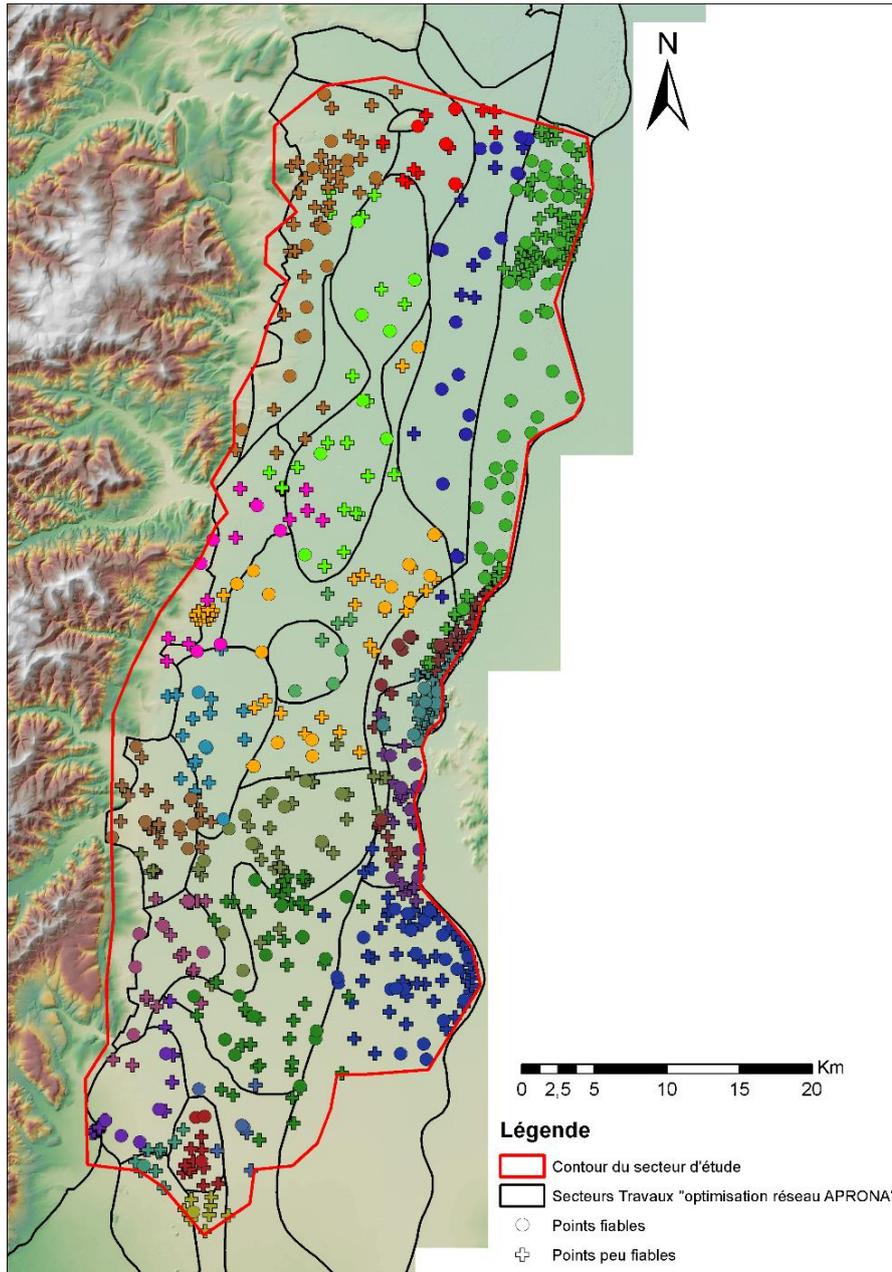


Illustration 12 - Localisation des groupes de points fiables / peu fiables et comparaison avec la sectorisation réalisée par Urban et al. (2010)

Cette méthode semble donc pertinente pour associer, selon des critères de similitude des contextes hydrogéologiques et/ou hydrographiques, des points peu fiables à des points fiables et ainsi augmenter le nombre de points en donnée d'entrée de l'interpolation. La méthode d'estimation de la cote piézométrique extrême du point peu fiable, s'appuyant sur celle du point fiable associé, est détaillée dans le chapitre suivant.

3. Etape 1 bis : Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale (optionnel)

3.1. PORTEE DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude 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. Ces techniques ont été appliquées sur un site d'étude en Aquitaine et en Ile de France (la Seine amont).

3.2. INFORMATIONS GENERALES

La méthode la plus efficace pour cartographier l'étendue des inondations en temps quasi réel et sur de grandes surfaces est d'exploiter les images satellites. Ces images représentent une source globalement cohérente et constante d'informations liées aux inondations, à la fois spatialement et temporellement. En outre, les cartes d'inondation dérivées de la télédétection peuvent servir de données d'étalonnage et/ou de validation précieuses pour les modèles hydrauliques et pour la réévaluation et la mise à jour des modèles d'inondation.

Les images radar à synthèse d'ouverture (SAR), telles que Sentinel-1 avec une résolution spatiale de 10 m, sont bien adaptées aux applications de cartographie des inondations, à grande échelle en particulier, compte tenu de la stratégie d'acquisition d'images systématiques. Plusieurs capteurs optiques, tels que les séries Sentinel-2 et Landsat, offrent une taille de collection supérieure à celle fournie antérieurement par la plupart des missions SAR. Dans le contexte de détection des inondations, l'inconvénient des capteurs optiques est leur incapacité à pénétrer les nuages, et par conséquent, le nombre d'images disponibles liées aux inondations est effectivement faible. Au contraire, le mérite des satellites SAR réside dans leurs capacités d'observation de jour comme de nuit, dans toutes les conditions météorologiques, en pénétrant des nuages qui sont généralement présents lors des crues. De plus, par rapport aux capteurs optiques, le SAR offre une occasion unique de détecter - dans une certaine mesure - l'eau stagnante sous la végétation.

3.3. DONNEES ET TRAITEMENT

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) met actuellement au point une nouvelle famille de missions appelée Sentinels, spécifiquement pour les besoins opérationnels du programme Copernicus. Chaque mission Sentinel repose sur une constellation de deux satellites répondant aux exigences de visite et de couverture, fournissant des données robustes pour les services Copernicus. Ces missions utilisent une gamme de technologies, telles que des instruments radar (e.g. Sentinel-1) et d'imagerie multispectrale (e.g. Sentinel-2) pour la surveillance de la terre, des océans et de l'atmosphère.

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 mission d'imagerie haute résolution multispectrale Sentinel-2 est bien appropriée pour la surveillance de la couverture d'eau en surface, cependant les données ne sont toujours exploitables en raison de leur disponibilité partielle. En général, lors des événements pluvieux, l'imagerie optique par satellite

n'est pas la meilleure solution en raison de la présence de nuages. Une alternative est souvent fournie par des données radar spatiales à ouverture synthétique (SAR) qui ne sont pas affectées par les conditions météorologiques (pénétration des nuages pour la fréquence des micro-ondes).

Les données ont été consultées via le Open Access Hub de Copernic (<https://scihub.copernicus.eu>) et la plate-forme française PEPS (<https://peps.cnes.fr>). Le traitement a été effectué à l'aide de la boîte à outils open source ESA SNAP (<http://step.esa.int>). Le SNAP consiste en une collection d'outils de traitement, ainsi que d'une application d'affichage et d'analyse pour prendre en charge les vastes archives de données provenant de diverses missions SAR. Les différents outils de traitement peuvent être exécutés indépendamment de la ligne de commande et également être intégrés dans l'interface graphique. Compte tenu du grand nombre de jeux de données utilisés pour couvrir la zone d'étude, une partie du processus de traitement a été réalisée sur des machines virtuelles fournies par l'infrastructure ESA Grid Processing On Demand (G-POD) (<http://gpod.eo.esa.int>). G-POD offre une haute performance de calcul et un grand potentiel de ressources et des environnements virtuels pour la construction d'applications dédiées aux observations de la Terre.

Des données Sentinel-1 avec un échantillonnage temporel de 12 jours ont été acquises pour les zones d'étude en Aquitaine et Ile-de-France couvrant la période d'avril 2015 à juillet 2018. Pour la crue de janvier-février 2018, des données Sentinel-1B ont également été obtenues ; permettant de réduire l'échantillonnage temporel à 6 jours. Cela n'était pas possible dans le cas des inondations enregistrées en 2016 en raison de la non mise en orbite du satellite Sentinel-1B à cette époque. Enfin, pour l'étude de cas en Aquitaine, un total de 103 images a finalement été obtenues, tandis que pour l'étude de cas de la Seine amont, les images Sentinel-1 obtenues représentent 107 scènes.

Concernant la disponibilité des données Sentinel-2, seules deux images sans nuage étaient disponibles pour l'Aquitaine, acquises le 26 octobre 2017 et le 24 janvier 2018, définissant donc des images pré-événement et co-événement. Pour la région de la Seine amont, une seule image sans nuage Sentinel était disponible le 25 février 2018, correspondant presque à une image post-événement. Dans ce dernier cas, la surface de l'eau liée aux inondations ne sera détectée que pour les zones inondées sur une longue durée (> 2 semaines).

Pour la détection des inondations, un traitement couramment appliqué consiste à comparer les images SAR avant et après l'événement, puis à cartographier les régions avec une réduction significative de l'intensité de rétrodiffusion SAR qui indique la présence d'eau de surface et à son tour les zones potentiellement inondées. Cette démarche n'est satisfaisante pour cartographier les inondations par remontée de nappe. Un développement méthodologique a été mis œuvre pour tenter de délimiter, en outre les secteurs inondés par débordement de cours d'eau, ceux dus aux remontées de nappes.

La méthode développée pour la détection des inondations comporte plusieurs étapes de travail (Illustration 13) :

- Au cours de la première étape, la période de surveillance complète 2015-2018 est examinée avec les données Sentinel-1 qui contiennent finalement deux événements d'inondation en 2016 et 2018. À cette fin, des images composites basées sur des statistiques multi-temporelles sur toute la période sont utilisées plutôt que deux images SAR uniques attribuées aux jours avant et après l'inondation. 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 et présenté dans cette étude basée 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. L'avantage de la méthodologie proposée est la capacité de détecter l'eau persistante ainsi que d'identifier la période et l'étendue exactes de l'inondation.

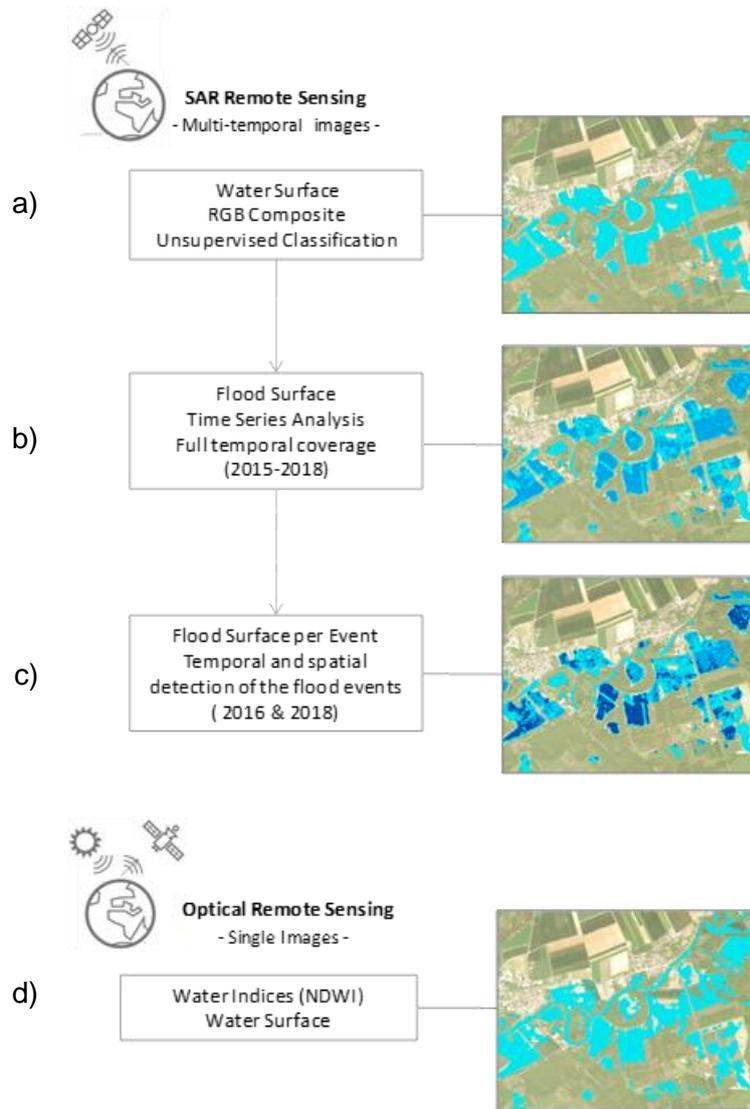


Illustration 13 - Diagramme de traitement de détection de changement d'image SAR et optique pour la cartographie des inondations. Exemple de la Seine amont : cartographie des inondations de (a) la classification RVB pour la période 2015-2018, (b) l'analyse des séries temporelles pour la période 2015-2018, (c) l'analyse des séries temporelles pour l'inondation de janvier-février 2018 et (d) l'imagerie optique.

3.4. CARTOGRAPHIE SAR ET OPTIQUE DES INONDATIONS

La précision de la cartographie des inondations basée sur le SAR peut varier considérablement en fonction de la couverture terrestre répandue dans la zone d'intérêt. Les surfaces planes telles que l'eau calme apparaissent comme des zones sombres sur une image radar, car la plupart des impulsions radar incidentes sont réfléchies de manière spéculaire loin de l'antenne. En conséquence, la cartographie des plans d'eau dans les images SAR peut être assez simple, cependant, il existe certaines exceptions telles que les environnements construits (réseaux routiers, autoroutes d'aéroport, etc.), les auvents végétalisés, les fonds de vallées profonds et diverses zones de type eau de surface. Par exemple, la détection des inondations dans les zones urbaines est généralement très difficile en raison des effets d'ombre des bâtiments dus à la géométrie de vision latérale des capteurs SAR. De plus, les inondations sous les couches de végétation sont difficiles à détecter en raison de la double diffusion de rebond, ce qui entraîne

une forte augmentation de la rétrodiffusion radar dans ces zones. Certains de ces défis exigent des solutions très spécifiques en ce qui concerne les méthodologies de classification. De même, si l'on ne tient pas compte de ces différents cas, la détection de surfaces inondables ouvertes dans les zones rurales peut être difficile, car un certain nombre de facteurs peuvent conduire à une surestimation (par exemple des effets d'ombre derrière des objets verticaux) ou à une sous-estimation (par exemple, des surfaces d'eau complètement recouvertes de végétation) de l'étendue réelle des inondations. Bien que les effets d'ombre des structures anthropiques (par exemple les bâtiments) soient moins dominants dans les zones rurales, les caractéristiques naturelles verticales, telles que les arbres ou les forêts, peuvent également projeter des ombres qui peuvent facilement être classées à tort comme des inondations. Alors que les informations contextuelles peuvent être utilisées pour séparer ces caractéristiques de la surface inondable, un algorithme semi-ou entièrement automatisé qui repose principalement sur le niveau de gris d'un pixel donné est généralement incapable de différencier deux caractéristiques ayant des signaux de rétrodiffusion similaires. Ainsi, l'utilisation de données auxiliaires (par exemple, la couverture terrestre ou les données numériques d'altitude) pour réduire les erreurs de classification est souvent nécessaire. Outre l'ombrage radar, certaines surfaces naturelles non ombragées telles que les dunes de sable, les marais salants ou les champs agricoles ainsi que d'autres surfaces planes (par exemple les réseaux routiers), peuvent présenter des niveaux de rétrodiffusion similaires aux surfaces d'eau libre et peuvent conduire à une surestimation de l'étendue des inondations.

Concernant la précision de la cartographie des crues basée sur l'optique, un certain nombre de facteurs peuvent conduire à une sous-estimation ou une surestimation des surfaces des crues. Les facteurs météorologiques tels que les nuages peuvent réduire la visibilité des inondations et l'obscurcissement des nuages peut conduire à des surfaces en eau supplémentaires erronées. De plus, la délimitation des surfaces en eau peut être complexe en raison de la confusion avec les sols saturés en eau.

3.4.1. Détection des inondations basée sur le SAR

Les techniques de cartographie des crues basées sur le SAR couramment utilisées comprennent une interprétation visuelle simple, une classification non supervisée ou supervisée, un seuillage d'histogrammes, une cohérence SAR interférométrique et diverses méthodes de détection de changement multi-temporel. Les méthodes SAR les plus couramment utilisées pour la cartographie des crues sont basées sur le seuillage par histogramme, approche utilisée lorsqu'une inondation est étudiée à une date donnée. Cependant, lorsque l'inondation se déroule sur une période plus longue (plusieurs jours), comme dans le cas d'une remontée de nappe, l'analyse doit être basée sur des techniques de traitement avec des séries temporelles SAR, exploitant le grand nombre d'images SAR disponibles. Pour la réalisation de ces travaux, les différentes étapes de traitement des données Sentinel-1 sont résumées ci-dessous:

- 1) Prétraitement des données, y compris l'étalonnage radiométrique et le géocodage du terrain (cf. paragraphe 4.4.2)
- 2) Calcul des propriétés statistiques et génération de composites RVB multi-temporels (cf. paragraphe 4.4.3)
- 3) Classification et segmentation Iso (cf. paragraphe 4.4.3)
- 4) Analyse des séries temporelles de rétrodiffusion SAR (cf. paragraphe 4.4.4)
- 5) Consolidation des données d'inondation et synthèse des cartes correspondantes (cf. paragraphe 4.5)

Un diagramme décrivant le schéma de traitement global adopté est également présenté sur l'illustration 14.

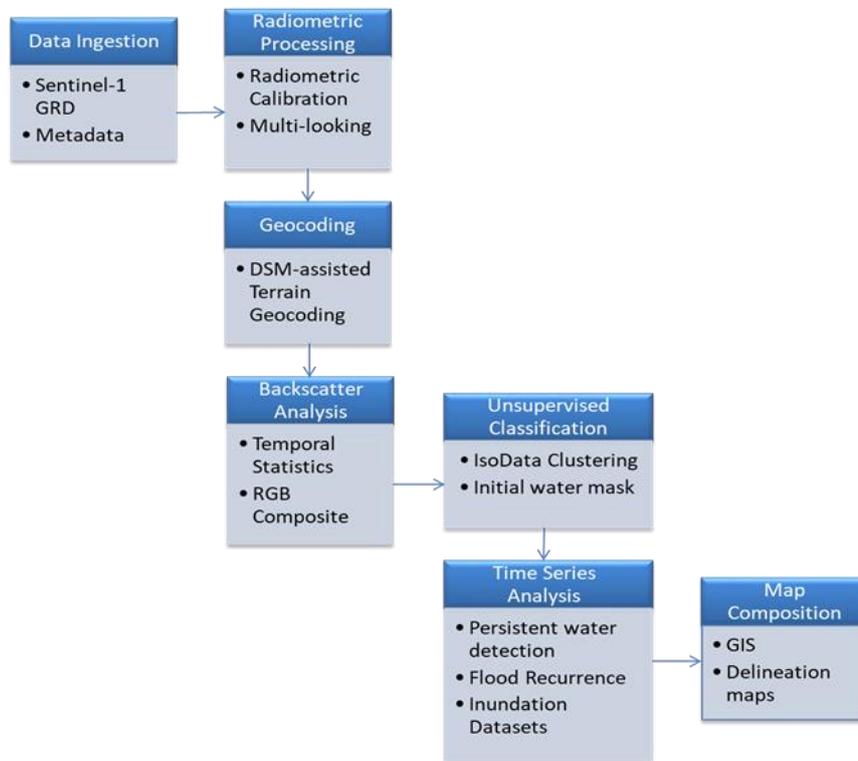


Illustration 14 - Chaîne de traitement de la cartographie des crues basée sur Sentinel-1.

Un prétraitement d'image est appliqué à chaque ensemble de données Sentinel-1 IW GRDH afin d'étalonner les mesures de télédétection, ainsi que pour réduire les erreurs orbitales, le bruit de speckle et les distorsions géométriques. Le traitement des données Sentinel-1 a été effectué à l'aide de la plate-forme open source ESA Sentinel Application (SNAP).

3.4.2. Le prétraitement

Pour le traitement des images SAR, plusieurs étapes, présentées dans l'illustration 15, ont été suivies et appliquées à l'ensemble des données sous la forme d'un script de traitement par lots. En détail, le traitement a impliqué la mise à jour des vecteurs d'état d'orbite pour améliorer la précision de géolocalisation des produits (<https://qc.sentinel1.eo.esa.int>), suivie d'un étalonnage radiométrique à zéro sigma (en dB). Les valeurs sigma0 calibrées représentent la section efficace radar normalisée et décrivent les propriétés de réflectance radar par pixel. L'étalonnage des données compense les influences radiométriques des différents angles d'incidence. D'autres étapes ont impliqué le multi-looking pour la réduction de bruit moucheté et enfin la correction du terrain (ortho-rectification) des résultats. Les tuiles 1 seconde d'arc Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), correspondant aux scènes Sentinel-1, ont été utilisées pour transformer des images SAR de la géométrie radar en une projection cartographique sélectionnée. Les résultats du prétraitement sont des données de rétrodiffusion SAR géocodées et converties en valeurs de sigma zéro (σ_0) (en dB) pour s'assurer que les images acquises à différentes dates sont comparables. La résolution spatiale finale (taille de pixel) des sorties est de 20 m.



Illustration 15 - Schéma adopté pour le traitement des données SAR Sentinel-1 GRD.

3.4.3. La détection initiale de surfaces en eaux

L'étape suivante, correspondant à la détection initiale des eaux de surface, est subdivisée en trois parties :

- le calcul des propriétés statistiques de la rétrodiffusion radar sur toute la période d'observation,
- la caractérisation et la détection multi-temporelles des eaux de surface basées sur la rétrodiffusion radar statistiques,
- la classification des images pour l'extraction des classes liées aux eaux de surface (y compris les eaux permanentes).

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, exprimé par les différences entre les valeurs de rétrodiffusion minimale et maximale (Illustration 16).

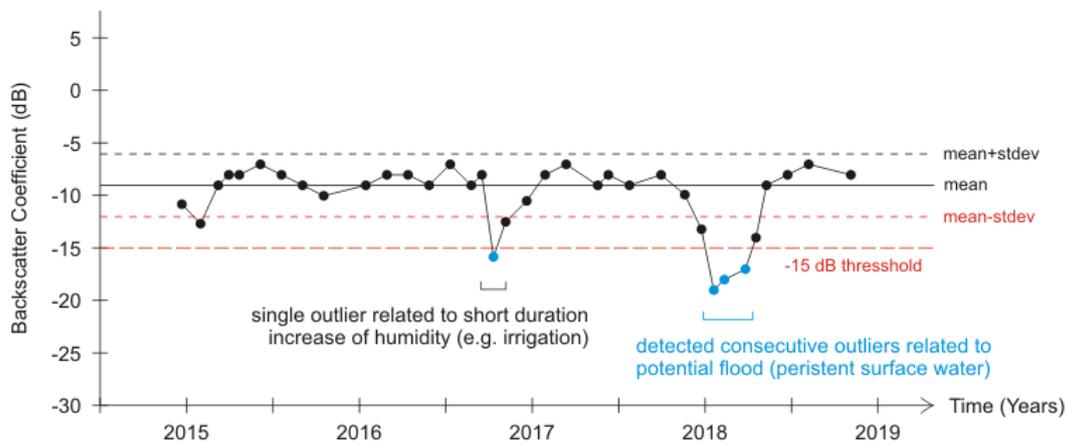


Illustration 16 Concept de détection des inondations mis en œuvre sur les séries temporelles SAR Sentinel-1

Partant du principe qu'une combinaison appropriée des propriétés statistiques multi-temporelles mettrait en évidence diverses classes de couverture terrestre adaptées à la détection des eaux de surface, un composite couleur RVB a été construit. Pour une combinaison sélectionnée, la rétrodiffusion moyenne a été placée dans le canal rouge (R), les différences de valeurs minimales et maximales dans le canal vert (V), tandis que les valeurs de rétrodiffusion minimales inversées (liées à la présence d'eau de surface) dans le bleu canal (B). Avant la combinaison, chaque couche de données était étirée linéairement entre le 5^{ème} et le 95^{ème} centile de l'histogramme, évitant tout ajustement manuel. En étirant l'histogramme, une amélioration du contraste des images est obtenue pour l'interprétation et l'analyse ultérieure. Outre la génération de tels composites pour toute la période d'observation, une procédure similaire a été suivie en

considérant uniquement les périodes touchées par les inondations afin d'affiner la détermination des surfaces inondées. Les RVB résultants pour l'Aquitaine et la Seine amont Schapi sont présentés sur les Illustration 17 et Illustration 18.

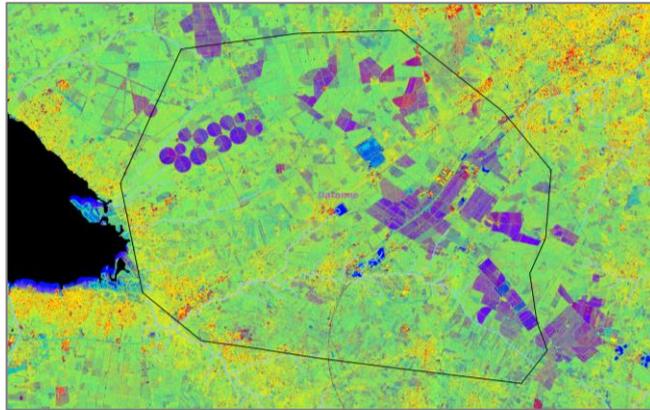
Le codage couleur des composites RVB générés permet une identification relativement plus facile des différentes classes d'eau :

- les plans d'eau permanents sont affichés en bleu foncé,
- les zones inondées (ou présentant des niveaux élevés d'humidité du sol) dans l'intervalle de temps examiné sont indiquées en nuances de bleu.
- Si ces dernières comportent des zones dont les propriétés de surface changent fréquemment (par exemple, les terres cultivées), elles apparaîtront comme cyan ou magenta.
- Les zones végétalisées et boisées sont représentées en vert,
- tandis que les centres urbains sont jaunes, ou rouges, pour ceux qui ont des valeurs moyennes de rétrodiffusion SAR relativement élevées (construction avec une orientation spécifique).

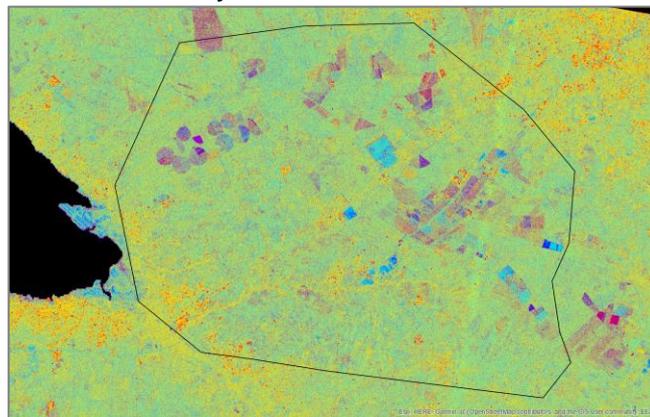
Bien que plusieurs classes de couverture terrestre ne soient pas facilement distinguables par le composite de couleurs sélectionné, la représentation de différentes classes avec un code de couleur similaire est également possible. Son avantage est de mettre en évidence les régions affectées par les eaux de surface (plans d'eau permanents et zones inondées) des autres zones principalement végétalisées et urbaines.

Dans la dernière étape de traitement, une classification d'image non supervisée est appliquée pour extraire les surfaces en eau pour d'autres classes de couverture/d'utilisation des sols. La classification a été appliquée directement au composite RVB (image 8 bits: 0 à 255) et non à la pile d'images d'origine. L'algorithme de clustering K-means a été utilisé, définissant vingt classes de sortie et trois étapes d'itération. En considérant un grand nombre de classes de sortie, nous réduisons leur chevauchement, tandis que les itérations améliorent considérablement l'affectation des pixels à chacune des classes définies. En conséquence, les pixels contenant de l'eau en surface ont été classés dans des classes distinctes, ce qui a permis de séparer les plans d'eau permanents des zones inondées. Les couches de représentation géographique (couches SIG) des cours d'eau et plans d'eau de référence disponibles (cf. annexe 4) ont également aidé dans cette direction. 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.

Avril 2015 - Juillet 2018



janvier - mars 2016



janvier - février 2018

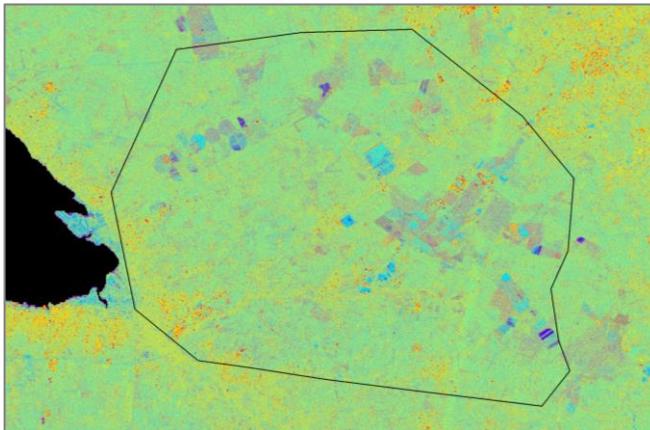


Illustration 17 - Composite couleur RVB basé sur les données Sentinel-1 (VV) (2015-2018) pour l'Aquitaine.

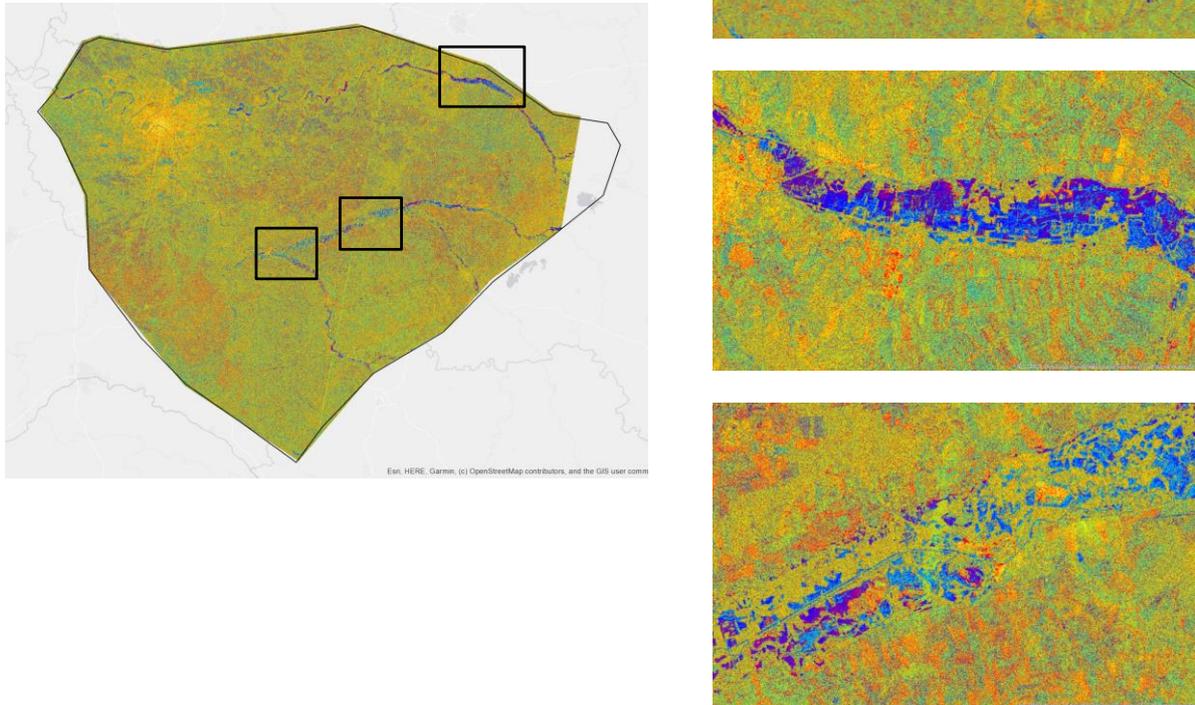


Illustration 18 - Composite couleur RVB basé sur les données Sentinel-1 (VV) (2015-2018) pour Ile de France.

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.

3.4.4. Analyse des séries temporelles

Suite à l'identification des zones de présence d'eau en surface pendant toute la période d'observation, en examinant leurs propriétés statistiques, un examen détaillé des séries chronologiques de rétrodiffusion SAR a été suivie pour déterminer les périodes exactes où des inondations se sont produites. Dans le contexte de la cartographie des inondations en Aquitaine et sur la Seine amont, l'accent a été mis principalement sur les inondations dues à l'augmentation du niveau de la nappe phréatique à la suite de fortes pluies et non à celles liés aux inondations induites par le ruissellement et le débordement de cours d'eau.

Le principe de base repose sur l'hypothèse adoptée selon laquelle les eaux inondées provenant du débordement de la rivière devraient être drainées plus rapidement que celles provenant des aquifères peu profonds. Cela peut être considéré comme une hypothèse valable compte tenu des niveaux de saturation du sol pour les cas d'inondation par remontée de nappe. Bien que la validité de cette hypothèse doit être examinée de plus près, elle peut être utilisée pour séparer les eaux de crue des eaux provenant de l'irrigation, qui présentent généralement une signature

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

Ces exigences ont conduit au développement d'un outil dédié à la cartographie des inondations basé sur SAR. L'algorithme de traitement du signal a été conçu et mis en œuvre en utilisant Matlab™ ayant comme entrées les piles de données SAR multi-temporelles. L'utilisation de masques de traitement introduits par l'analyse statistique précédente, pour restreindre le traitement dans l'étendue du masque, a été jugée nécessaire afin de réduire le temps de calcul.

L'objectif de cette analyse de rétrodiffusion est de fournir une approche améliorée de cartographie des crues basée sur l'archive complète des données SAR afin de détecter les événements d'inondation due à la remontée des eaux souterraines pendant la période d'observation. Le concept principal de l'algorithme est de détecter les valeurs aberrantes en contrôlant plusieurs paramètres parmi lesquels l'écart-type et la rétrodiffusion maximale de la pile multi-temporelle.

Plus précisément :

- tout point (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), tandis que la valeur de rétrodiffusion est maintenue en dessous de -15 dB (seuil de séparation de l'eau, Illustration 16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour la détection des valeurs aberrantes, dans notre cas les pixels affectés par l'eau dans la série chronologique, la notion de coefficient moyen plus/moins un coefficient (1,5 ou 2) fois l'écart-type est une approche statistique couramment appliquée.
- Un autre paramètre crucial introduit est le nombre minimum de valeurs aberrantes consécutives nécessaires (3 par défaut, soit 12 jours) pour caractériser la valeur aberrante comme un événement d'inondation de longue durée. Autrement dit, l'algorithme vise à détecter les pixels « noyés » pendant 12 jours consécutifs. La représentation schématique de l'illustration 19 montre les caractéristiques temporelles des valeurs inférieures de rétrodiffusion (carré rouge) correspondant aux périodes d'inondation de 2016 et 2018.

Les résultats de l'analyse des séries chronologiques sont :

- a) une image binaire d'inondation pour toute la période d'observation et,
- b) une image correspondante pour une période d'intérêt sélectionnée, accompagnée d'un fichier texte détaillé (au format CSV) répertoriant les valeurs aberrantes identifiées (pixels affectés par inondation), leurs coordonnées cartographiques, le nombre d'événements identifiés et la date de début et de fin de chaque événement.

L'analyse est basée sur la couverture temporelle complète, mais également sur des périodes d'inondation spécifiques. 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). La série chronologique couvre deux principales inondations sur 2016 et 2018, ce qui permet d'évaluer les variations de rétrodiffusion entre les périodes d'inondation et les conditions normales du niveau d'eau. Les ensembles de données ont également été examinés en fonction des effets saisonniers, en particulier pour les zones inondées couvertes de végétation.

Selon l'analyse des séries chronologiques, il semble que la réponse temporelle en termes d'inondation pour les divers sites était assez similaire décrivant très clairement les périodes d'inondations (Illustration 19 et Illustration 20).

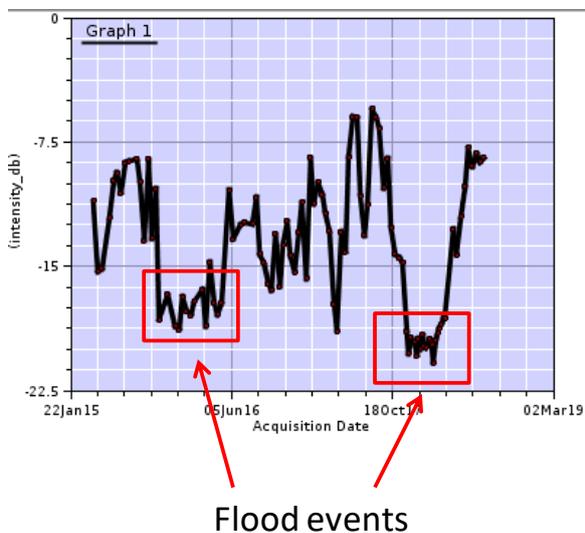
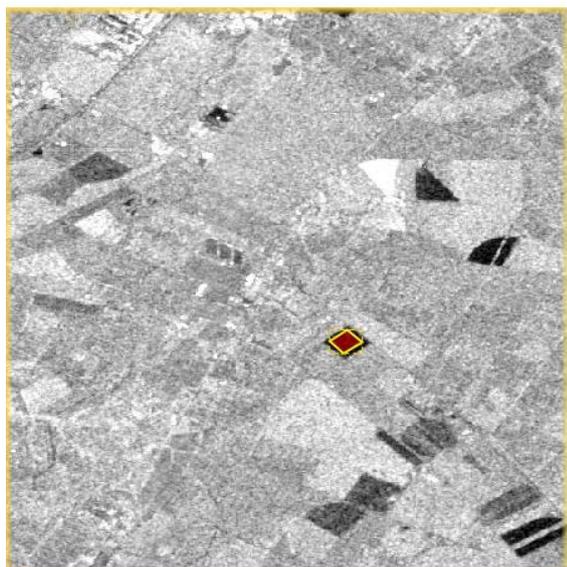
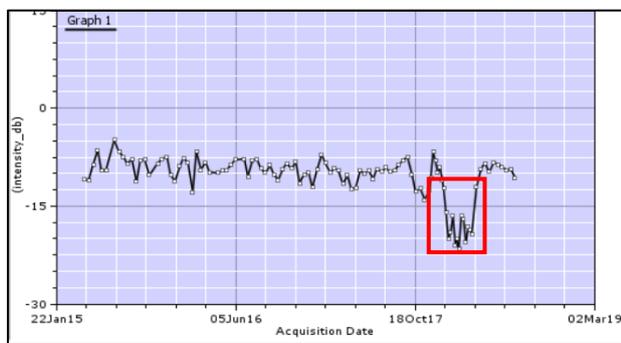
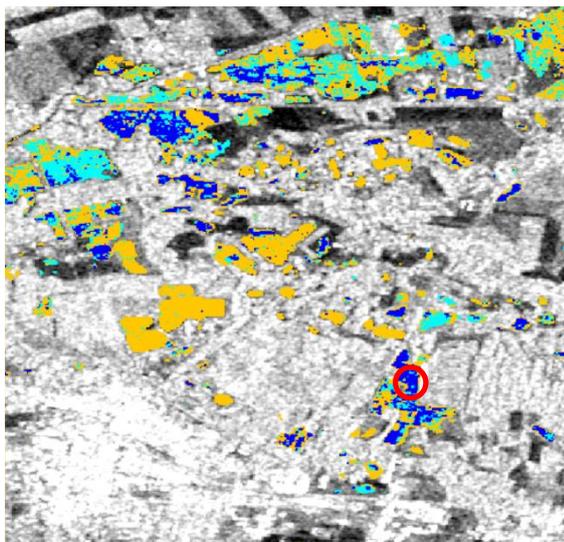


Illustration 19 - Série chronologique de la rétrodiffusion SAR pour divers sites inondés en Aquitaine.



Yellow: résultats du RGB classification pour toute la période 2015-2018

Blue: résultats des series temporelles pour toute la période 2015-2018

Cyan: résultats des series temporelles pour de Décembre à Mars 2018

Illustration 20 - Série chronologique de la rétrodiffusion SAR pour divers sites inondés en Ile de France

3.4.5. Détection d'inondation optique

a) *Les données optiques*

Les données optiques multi spectrales sont souvent affectées par les nuages et les ombres et il est important de les prendre en compte pour réduire les erreurs de classification. Pour cette raison, la sélection minutieuse de l'imagerie optique est fortement recommandée. Notre objectif est d'extraire les zones inondées, tout en éliminant les éléments non aquatiques qui ont des valeurs spectrales similaires.

Pour la détection de l'humidité et des traces d'inondation, la contribution des bandes optiques infrarouges à ondes courtes (SWIR) (plage de longueurs d'onde de 0,9 à 1,7 μm) est importante. Sans les informations provenant des bandes SWIR, les zones précédemment affectées par les inondations sembleraient avoir des signatures spectrales similaires à celles des zones non affectées et, par conséquent, il serait très compliqué de délimiter l'étendue d'une inondation. La mission Copernicus Sentinel-2 dispose d'une bande SWIR dédiée, ce qui la rend mieux adaptée à de telles applications.

b) *Méthodologie de détection optique des inondations*

Les méthodes couramment utilisées pour extraire les plans d'eau de l'imagerie optique multi spectrale sont basées sur des indices de bande, spécifiquement conçues pour mettre en évidence la teneur en eau (humidité du sol). Une méthode performante est l'Indice d'Eau par Différence Normalisée (NDWI, Normalized Difference Water Index) développé par Gao (1994), qui s'appuie sur la combinaison des bandes spectrales proche infrarouge (NIR, Near Infrared) et l'onde courte infrarouge (SWIR, Short Wave Infrared) (voir l'équation ci-dessous).

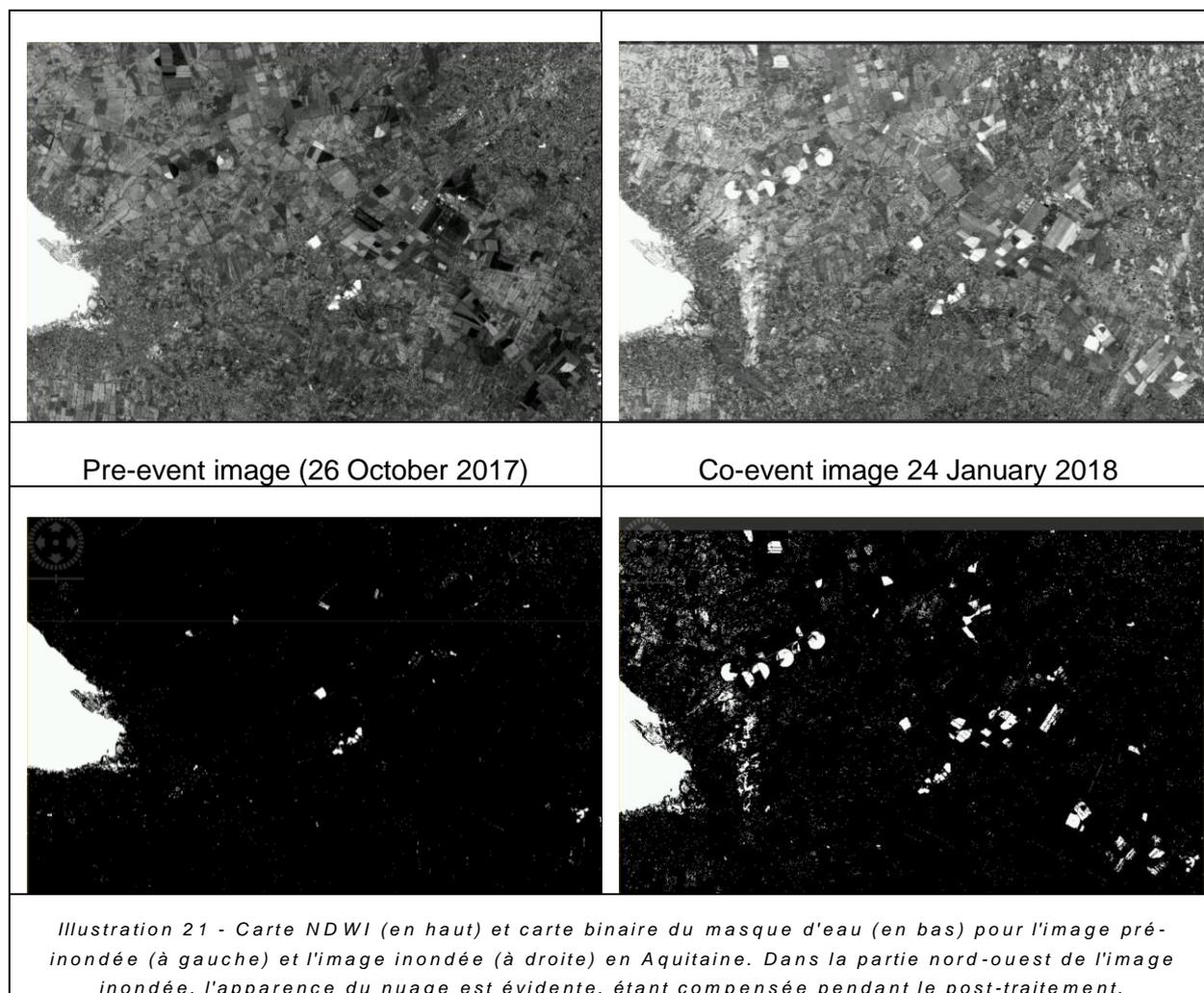
$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Cet indice a démontré son efficacité dans la discrimination de l'eau pour divers environnements. En fait, dans un schéma de détection des crues, une étape initiale implique le calcul des indices NDWI pour les images acquises avant et après l'événement d'inondation. Ensuite, une segmentation des images, acceptant des valeurs d'index positives (représentant des masses d'eau) est effectuée afin de générer des masques binaires d'eau pour chaque date d'acquisition. La détection effective des zones inondées, à savoir les zones avec présence d'eau uniquement dans la scène post-événement, se fait par la simple différenciation des masques d'eau avant et après l'événement. Dans notre cas, en tant qu'étape de post-traitement, des couches d'eau de référence (c'est-à-dire des géodatabase de réseaux de lacs / rivières) ont été utilisées pour améliorer la séparation des eaux de crue des plans d'eau permanents.

Sont présentées ci-après les principales étapes de travail appliquées dans cette étude pour la détection d'inondation basée sur l'imagerie optique :

- Calcul de l'indice d'eau NDWI
- Seuillage et segmentation de l'indice d'eau NDWI
- Utilisation d'une couche d'eau de référence pour mieux contraindre les plans d'eau permanents
- Exportation de la couche finale des zones inondées et synthèse des cartes correspondantes

La méthodologie mentionnée ci-dessus est pratiquement une approche de détection des changements basée sur les résultats des images NDWI entre deux dates soigneusement sélectionnées. Un exemple est représenté sur l'illustration 21.



3.5. EXEMPLES DE RESULTATS

3.5.1. Aquitaine

a) Cartographie des inondations basées sur la classification RVB

L'illustration 22 montre les résultats de classification produits par les scènes Sentinel-1 acquises au cours de la période de suivi 2015-2018. La carte de l'illustration 22 indique l'étendue spatiale de toutes les surfaces d'eau pour cette période dans les zones nord et est de la zone d'intérêt.

Nouvelle Aquitaine – France Flood Mapping

Data sources

Sentinel-1 images acquired from April 2015 to July 2018
Sentinel-2 images acquired on 27/10/2017 (pre-event)
and 24/01/2018 (co-event) for the flood situation of
Jan–Feb 2018.

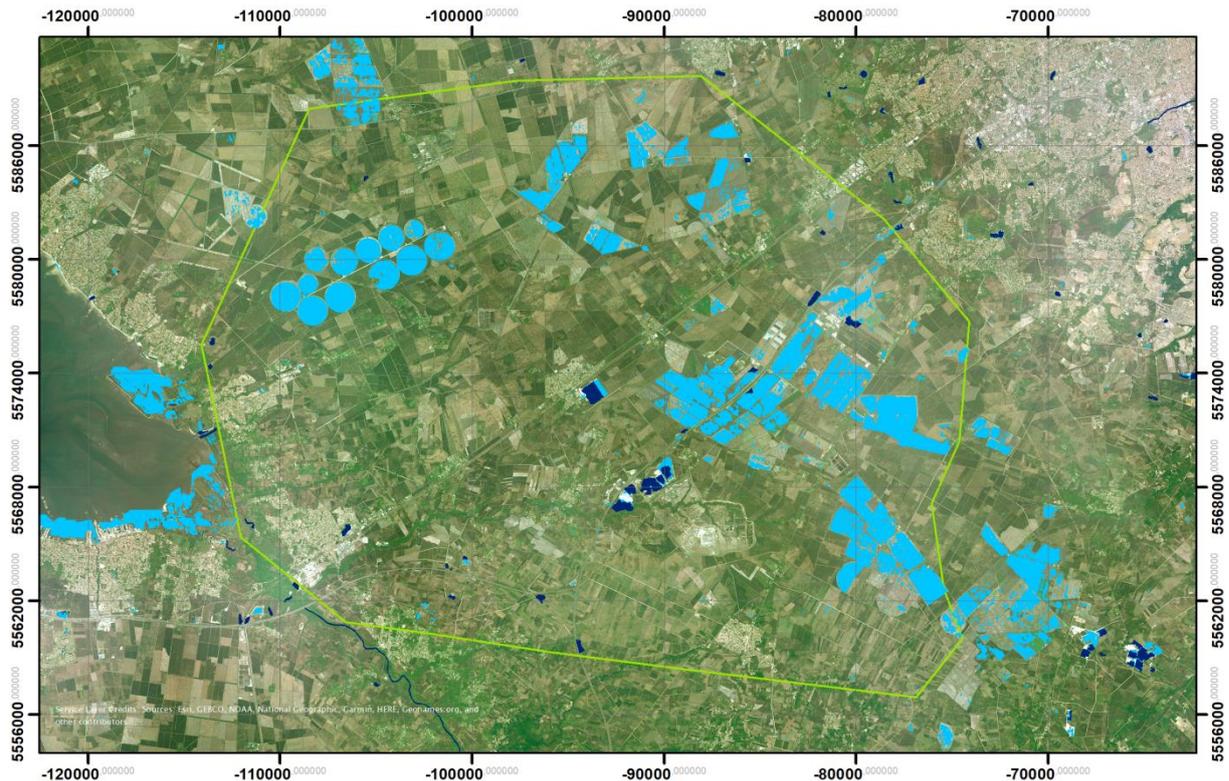
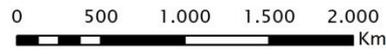
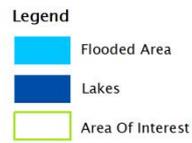


Illustration 22 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

b) Cartographie des inondations basées sur l'analyse des séries temporelles

L'illustration 23 présente les résultats des séries temporelles pour les scènes Sentinel-1 acquises au cours de la période de surveillance 2015-2018, tandis que les Illustration 24 et Illustration 25 montrent les événements d'inondation détectés de 2018 et 2016, respectivement. Les cartes des Illustration 24 et Illustration 25 montrent les surfaces d'eau persistantes qui sont restées plus de 12 jours dans le temps (durée minimale de 12 jours) pour la période 2015-2018.

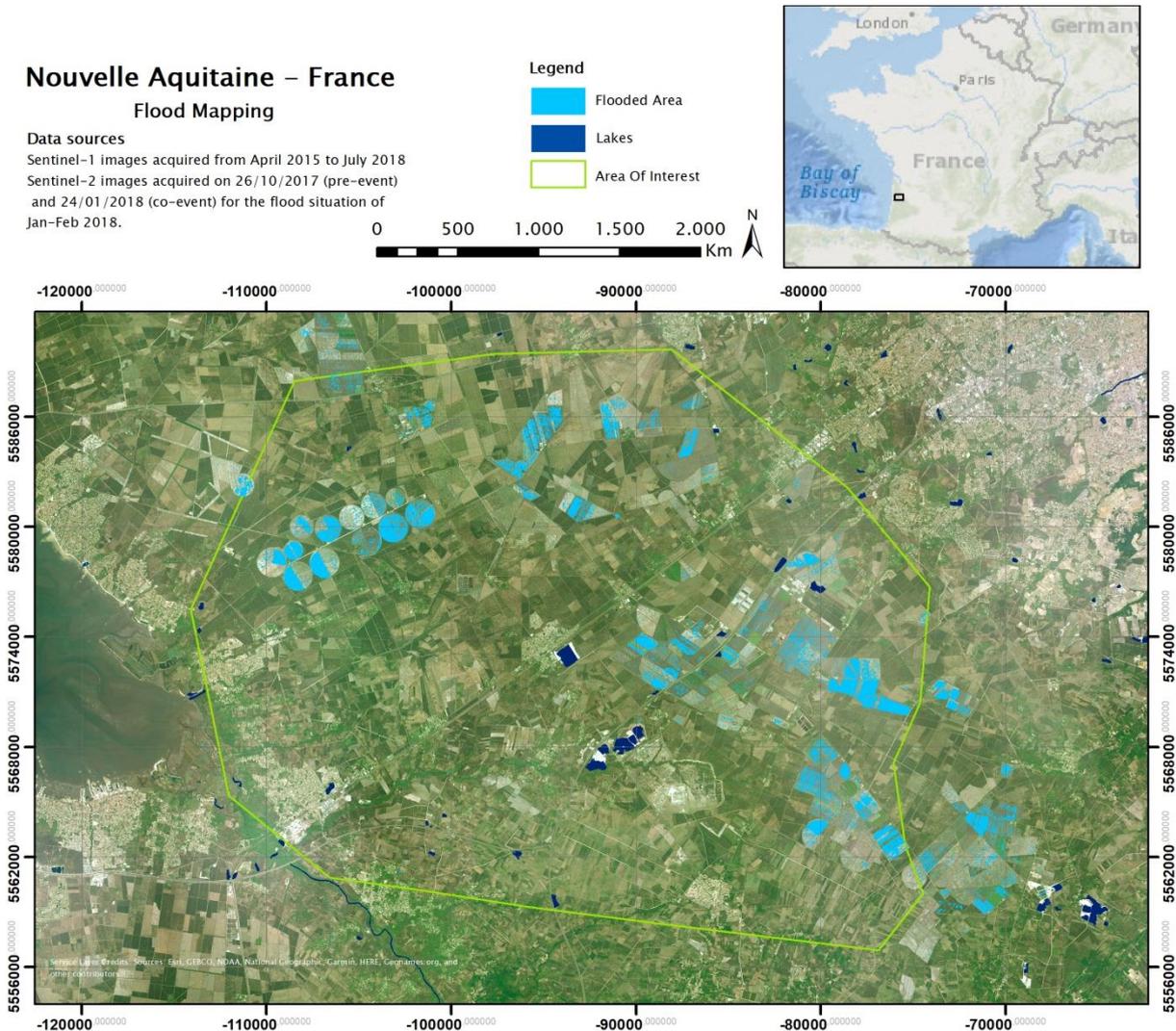


Illustration 23 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

Les Illustration 24 et Illustration 25 montrent les surfaces d'eau correspondantes pour chaque période d'inondation séparément. Une première analyse qualitative comprenant la comparaison entre la classification RVB Sentinel-1 et l'analyse des séries temporelles indique l'efficacité de l'algorithme de cartographie des crues développé car les surfaces de crue produites se trouvent à l'intérieur des surfaces d'eau initialement détectées (analyse de classification).

Nouvelle Aquitaine – France Flood Mapping

Data sources

Sentinel-1 images acquired from April 2015 to July 2018
Sentinel-2 images acquired on 26/10/2017 (pre-event)
and 24/01/2018 (co-event) for the flood situation of
Jan-Feb 2018.

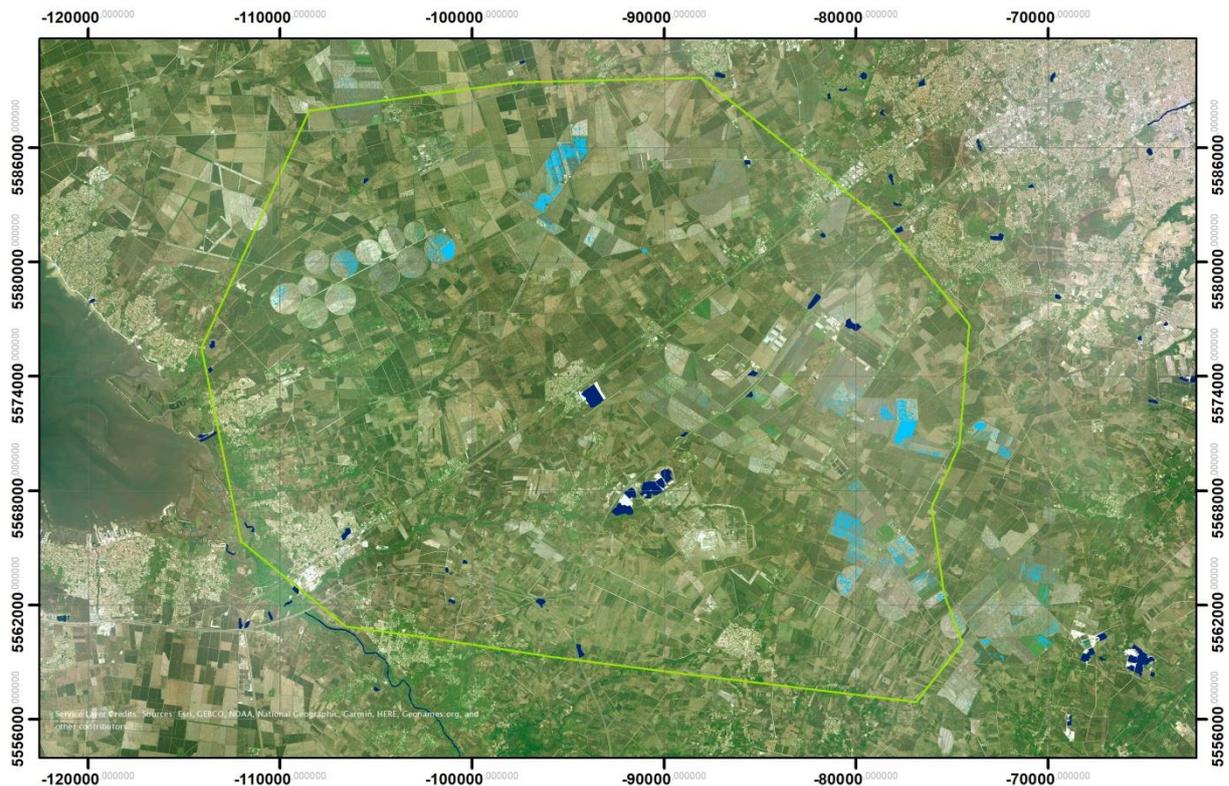
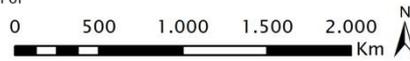
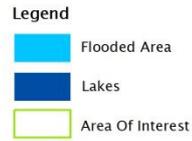


Illustration 24 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations de janvier à février 2018.

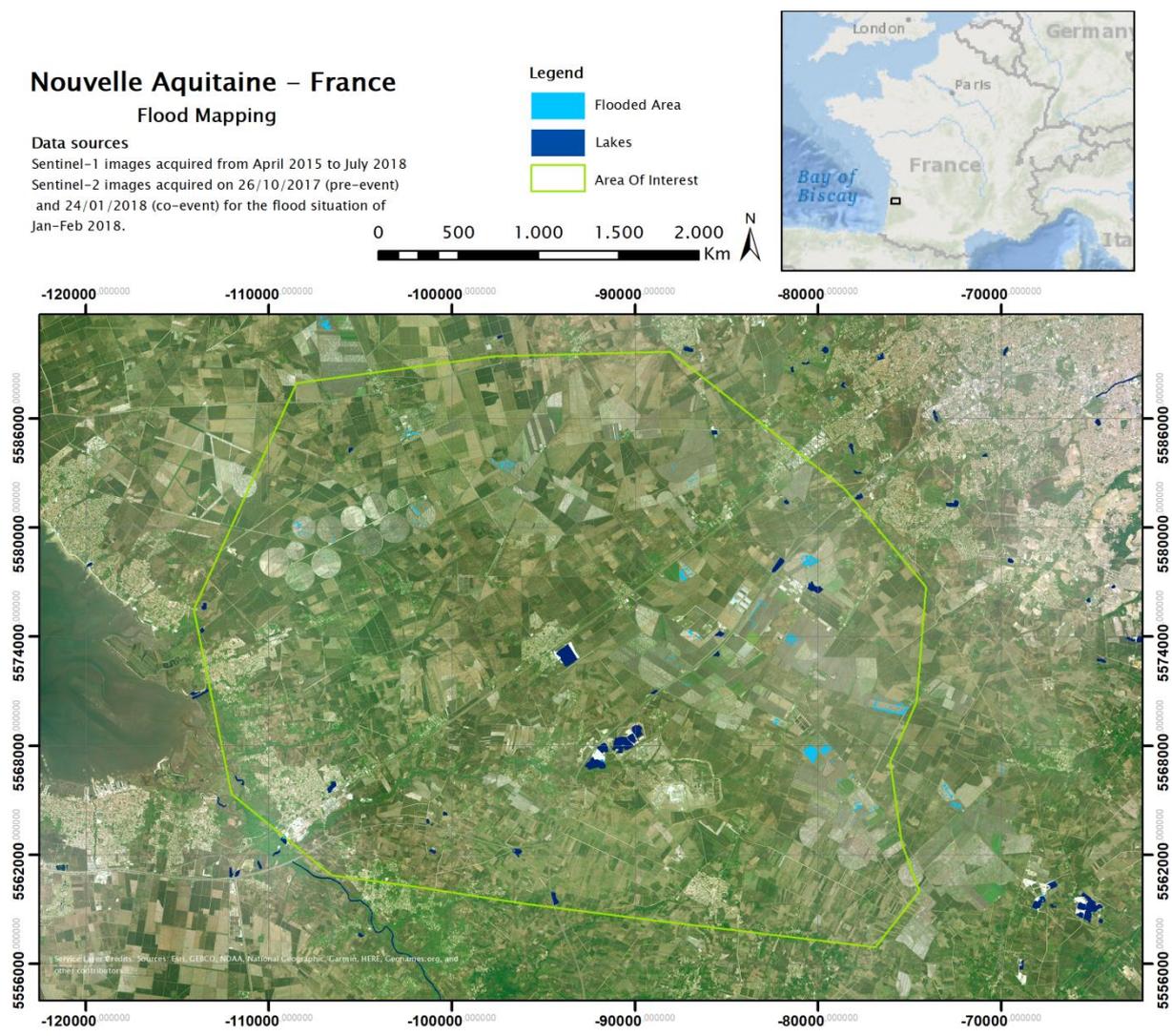


Illustration 25 - Carte de délimitation pour l'Aquitaine basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations Février - Mars 2016.

c) Cartographie des inondations basées sur la détection optique

Dans Illustration 26, les résultats des deux scènes Sentinel-2 (imagerie optique) sont présentés pour l'inondation de 2018. L'étendue de l'inondation est partiellement cohérente, avec la différence attribuée à la limitation de l'utilisation d'une paire de scènes (scènes de pré-événement et de Co-événement unique) ne couvrant pas entièrement la période d'inondation.

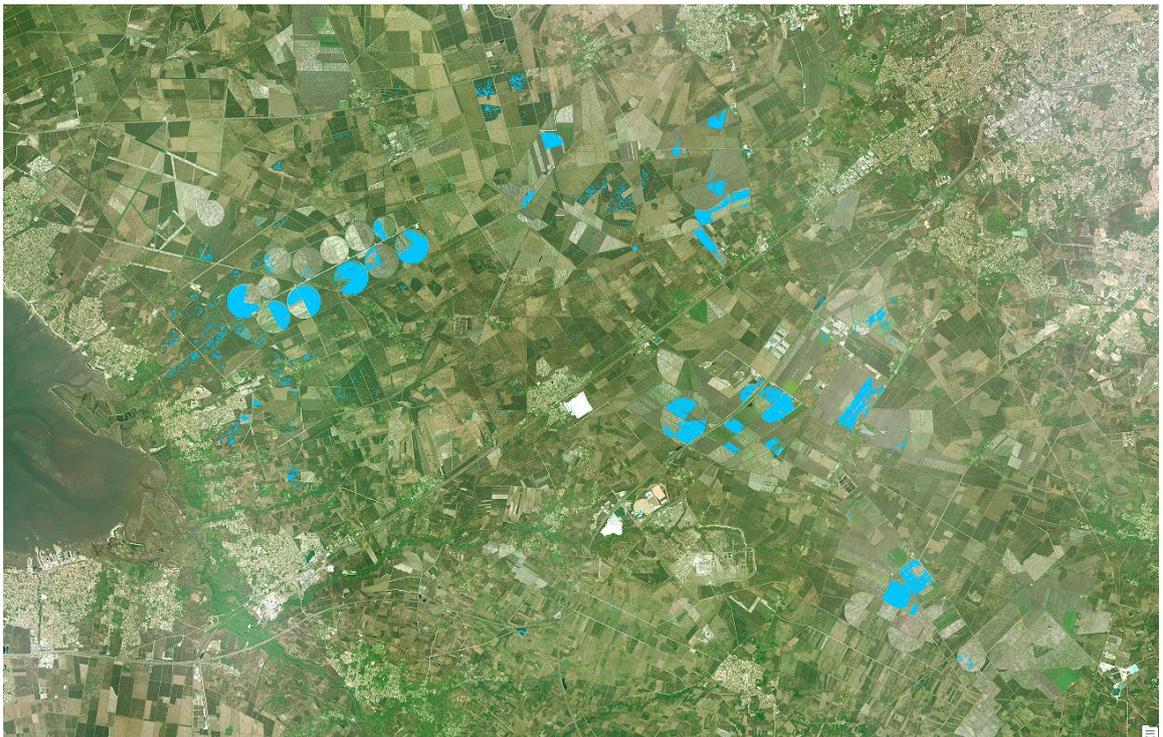


Illustration 26 - Détection de l'eau (en bleu) à partir de la différence des images Sentinel-2 pré-inondées et inondées (Figure 8) pour l'inondation en Aquitaine de janvier à février 2018.

3.5.2. Seine amont

a) Cartographie des inondations basées sur la classification RVB

Les résultats de la classification RVB de l'ensemble de données Sentinel-1 de la Seine amont sont illustrés à titre d'exemple sur les cartes des Illustration 27 et Illustration 28. La comparaison des cartes, basée sur l'intensité de rétrodiffusion, indique l'étendue spatiale de toutes les surfaces d'eau pour cette période, montrant des surfaces d'eau plus significatives le long de la rivière principale et sur ses côtés.

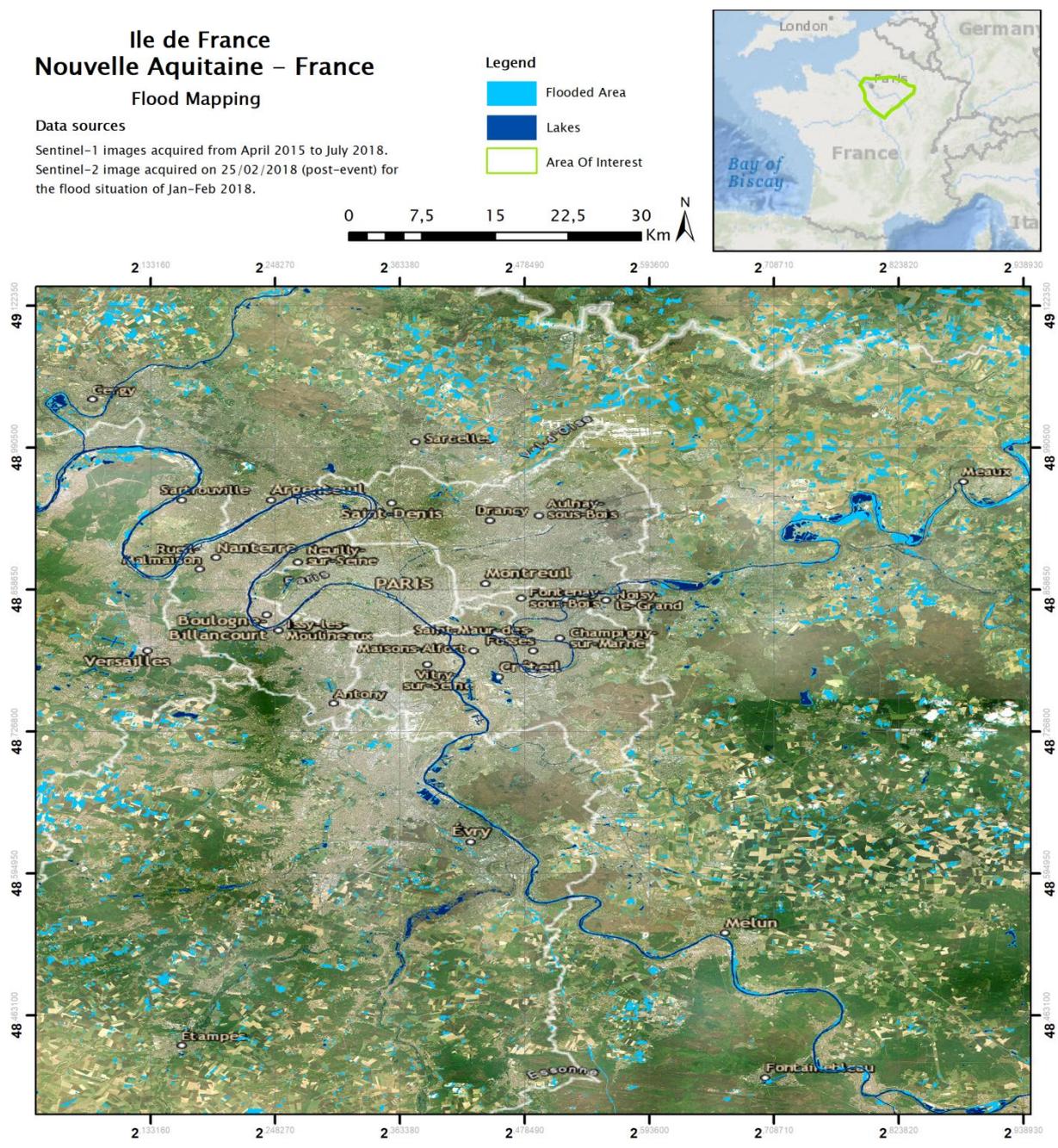


Illustration 27 - Carte de délimitation de Nord-Ouest Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

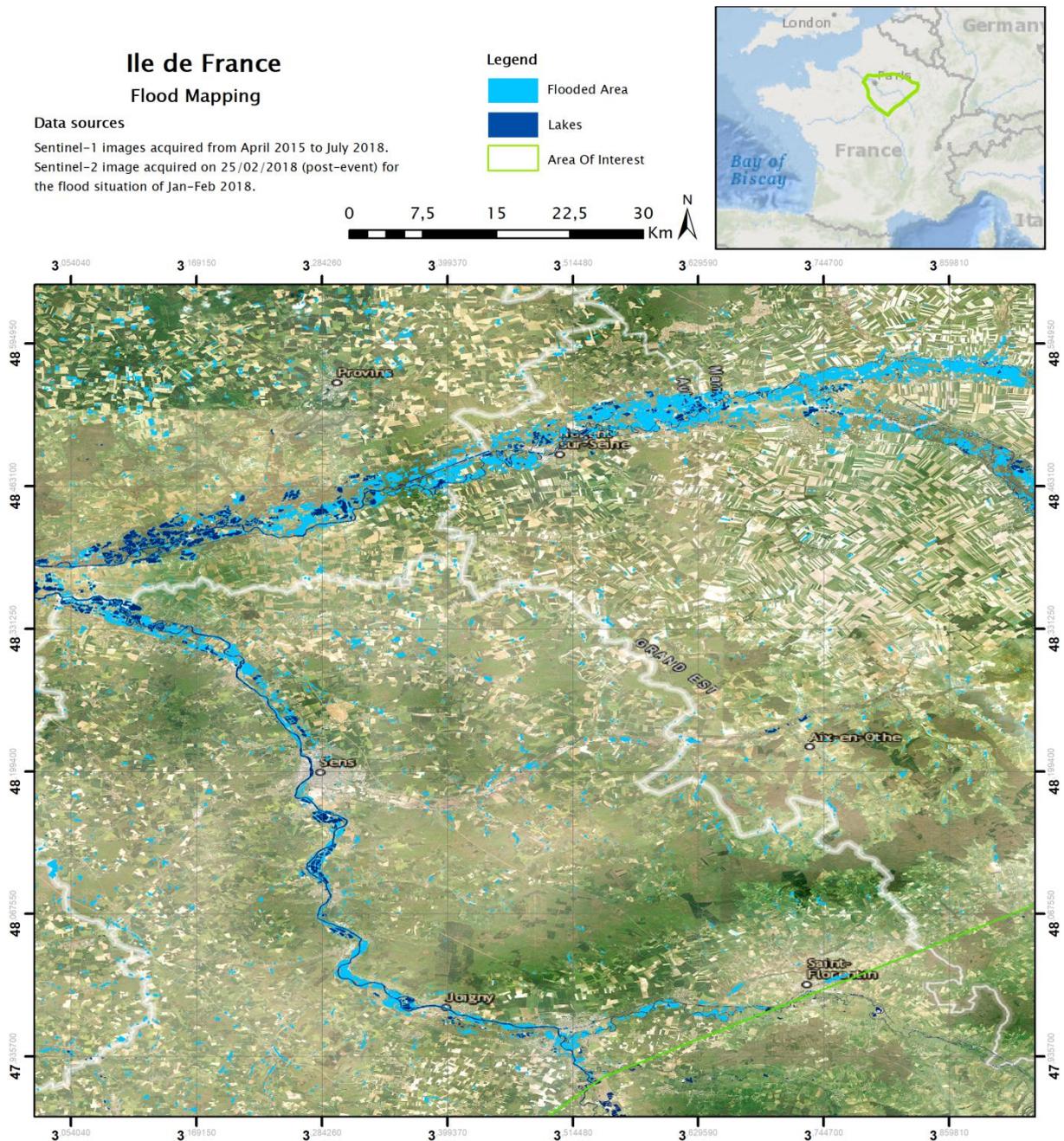


Illustration 28 - Carte de délimitation pour Sud-Est Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

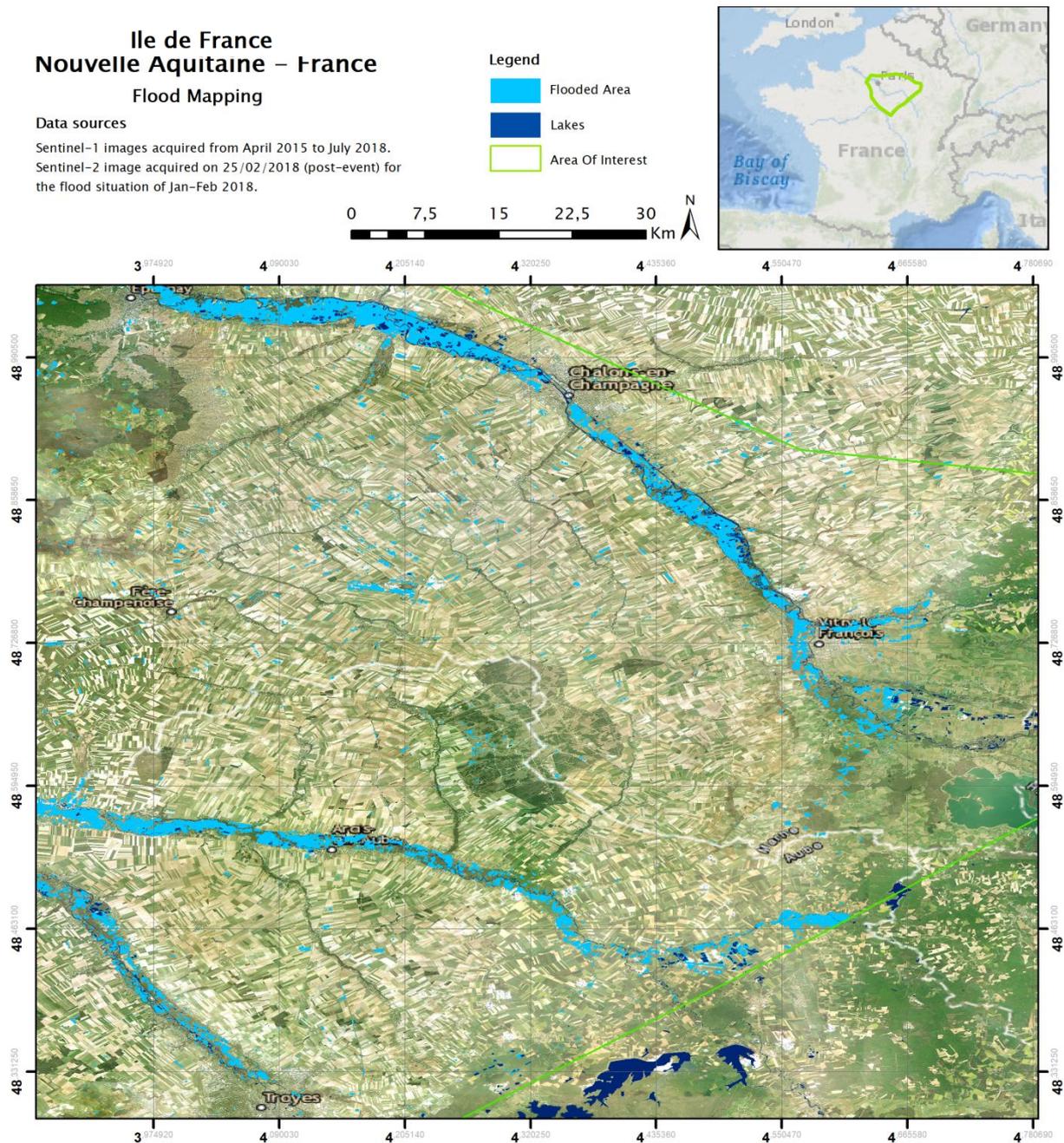


Illustration 29 - Carte de délimitation pour Nord-Est Ile de France basée sur la classification RVB pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

b) Cartographie des inondations basées sur l'analyse des séries temporelles

La variation spatiale de l'étendue des inondations sur une échelle temporelle, basée sur l'analyse des séries temporelles, est illustrée à titre d'exemple dans les Figures 17-19, spécifiant les surfaces d'eau persistantes qui sont restées plus de 12 jours dans le temps (durée minimale de 12 jours) pendant toute la période 2015-2018, et lors de chaque crue de 2016 et 2018, séparément. Les résultats indiquent en outre la plus grande couverture des inondations de l'événement de 2018 par rapport à l'événement de 2016. L'interrelation entre la classification RVB Sentinel-1 et l'analyse des séries temporelles améliore la précision de l'algorithme de

cartographie des crues développée, car les surfaces de crue produites se trouvent dans les surfaces d'eau initialement détectées à partir de l'analyse de classification.

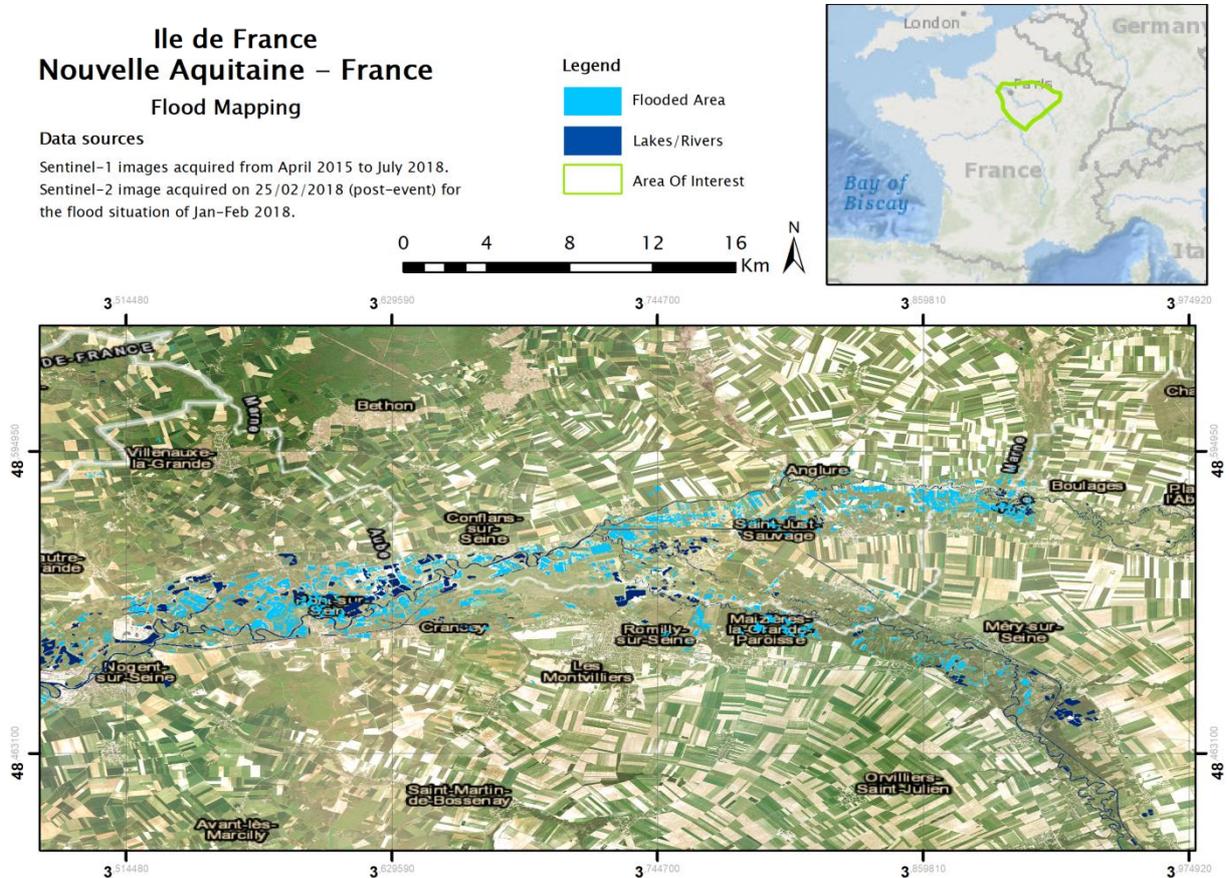


Illustration 30 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour la période d'observation d'Avril 2015 à Juillet 2018.

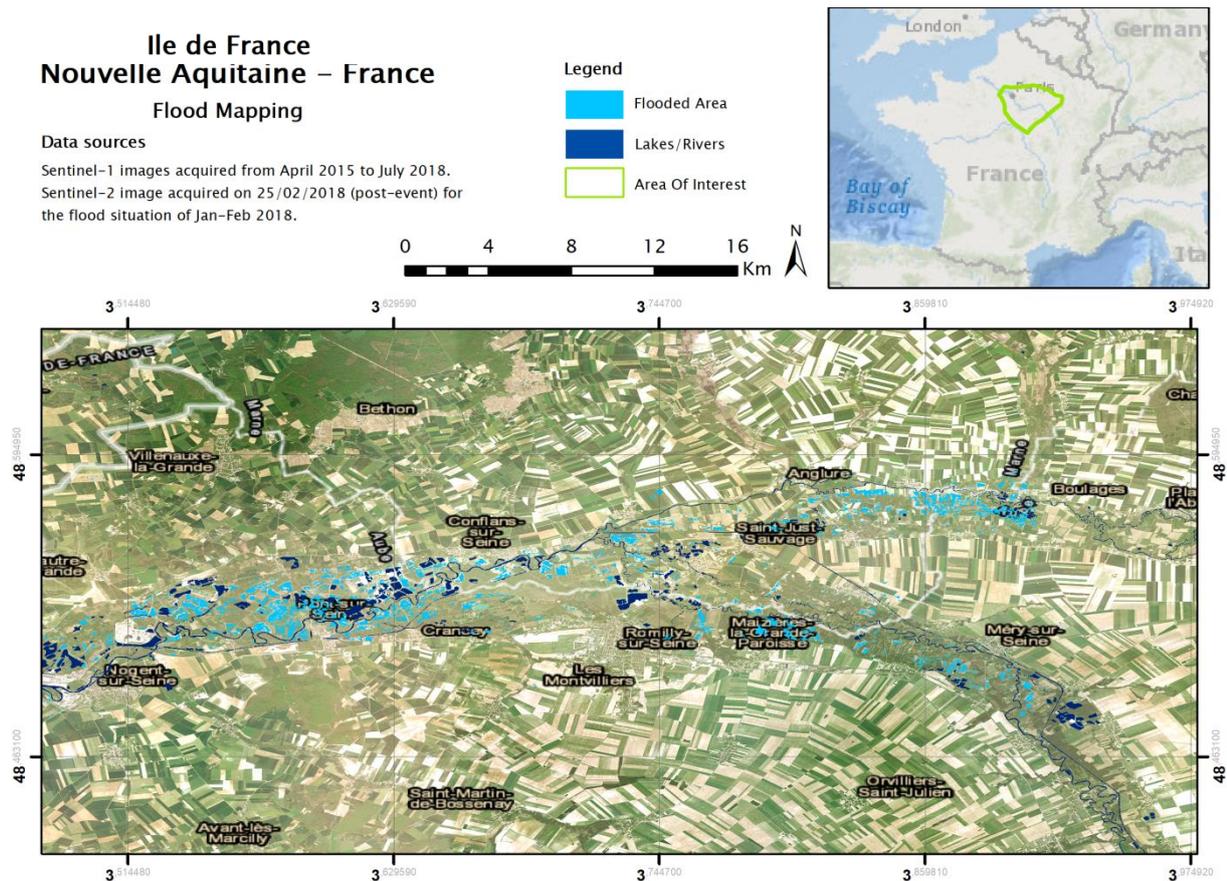


Illustration 31 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations de janvier à février 2018.

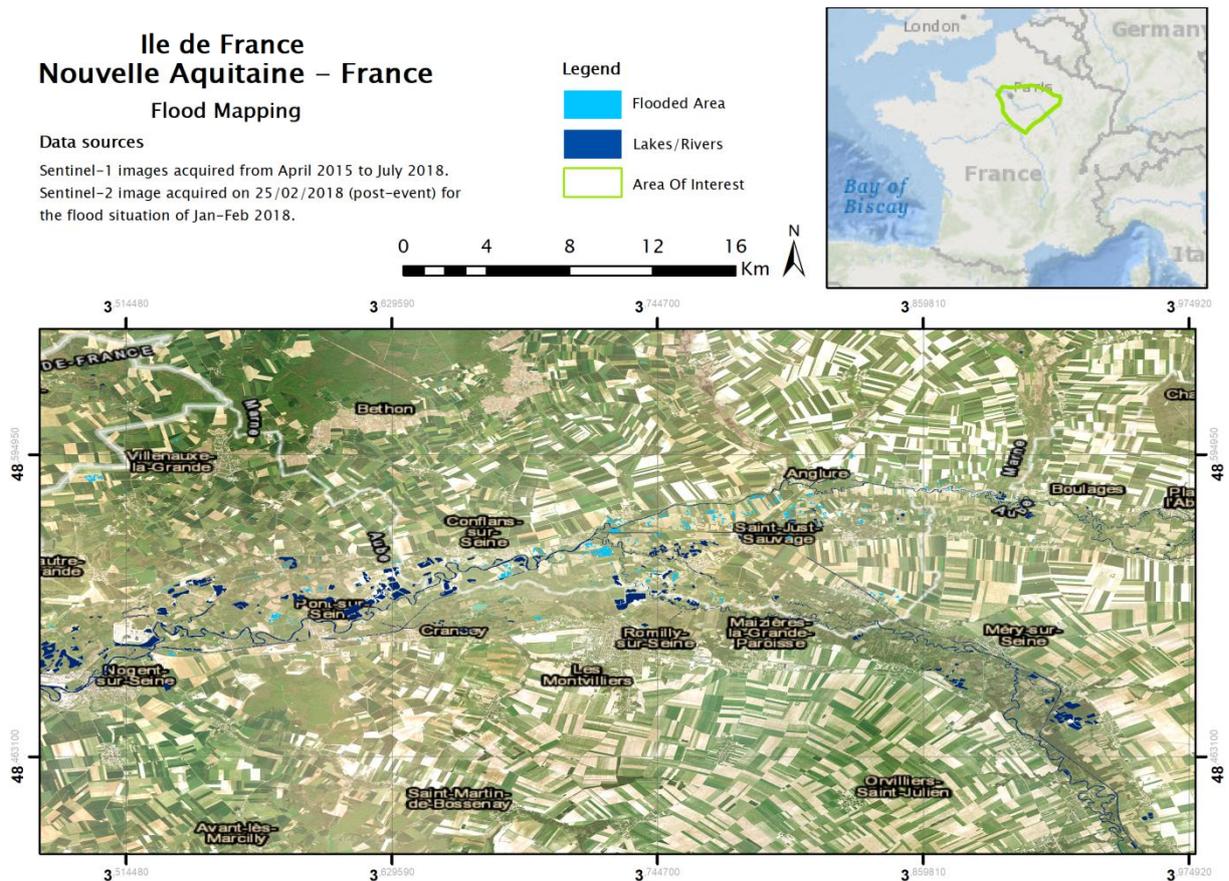


Illustration 32 - Carte de délimitation pour une zone sélectionnée en Ile de France basée sur l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion de la situation des inondations Mai - Juin 2016.

c) Cartographie des inondations basées sur la détection optique

Pour finir, les résultats de Sentinel-2 pour l'inondation de 2018 sont illustrés à titre d'exemple sur la Figure 20 sur la base de l'analyse optique de l'image unique post-inondation. Une cohérence partielle est toujours atteinte, principalement le long de la rivière, car les résultats se réfèrent à une seule date post-événement (25 Février 2018) qui caractérise la fin de l'inondation.

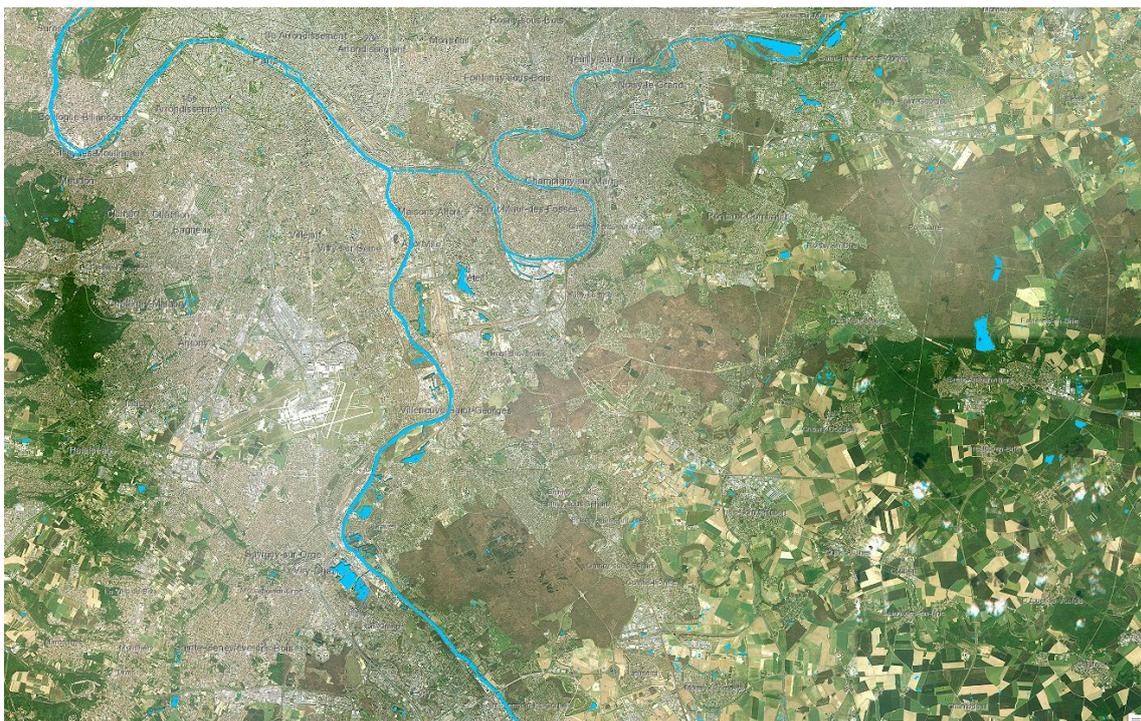
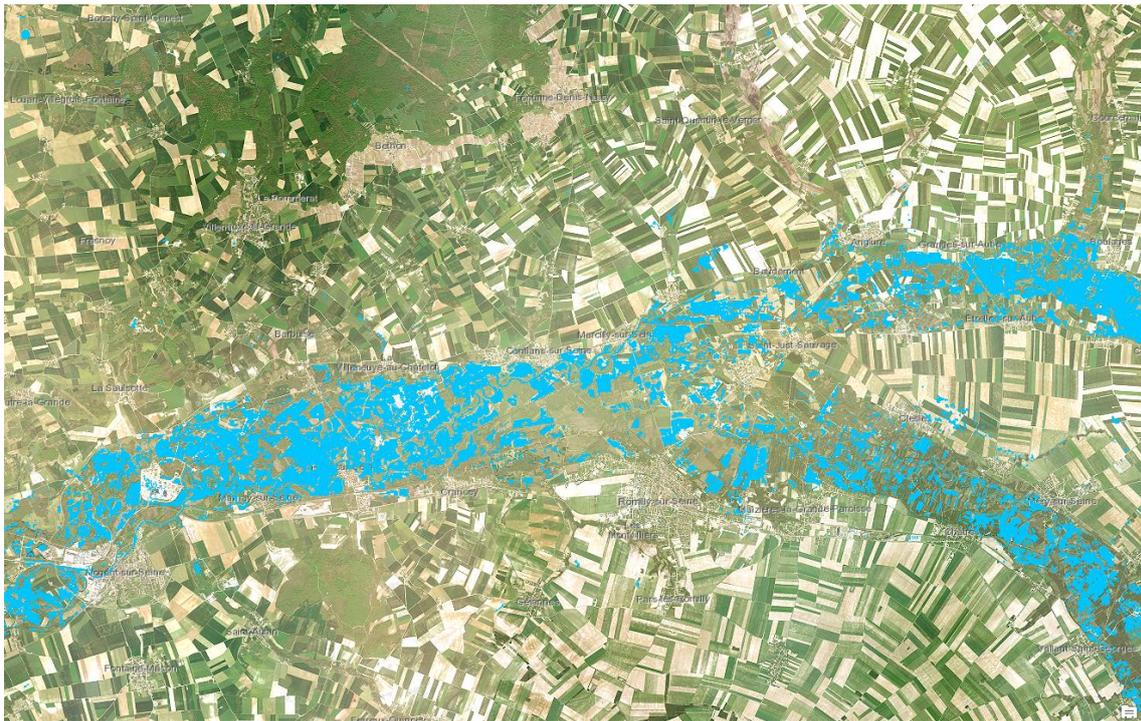


Illustration 33 - Détection de l'eau (en bleu) avec un processus de seuillage simple (NDWI) dans les zones prioritaires, (en haut) de la Seine amont et (en bas) au sud de Paris, sur la base de l'image Sentinel-2 pour les inondations de la Seine amont de janvier - fév. 2018.

3.6. AVANTAGES ET LIMITES DE L'IMAGERIE SATELLITE

Les avantages et les inconvénients des données de télédétection pour la cartographie des eaux de surface inondées sont détaillés ci-dessous.

3.6.1. Avantages des observations par satellite :

- Utilisation gratuite des données de mission Copernicus Sentinel.
- Disponibilité systématique des données pour l'imagerie optique et SAR, à partir d'octobre 2014 et d'octobre 2015, respectivement.
- Les acquisitions archivées permettent de revisiter les événements passés.
- Approche rentable avec la capacité de couvrir de vastes zones.
- De multiples capteurs et techniques peuvent fournir de précieuses informations auxiliaires concernant les inondations pour renforcer la détection améliorée (radiomètres à micro-ondes, NDVI, etc.).
- Les résultats peuvent être obtenus sans information préalable sur l'historique des inondations, les pratiques agricoles et d'irrigation, donc presque indépendamment des observations in situ. Ceci est intéressant principalement en l'absence de données supplémentaires susceptibles d'améliorer la détection des inondations.

3.6.2. Limites des données de télédétection par satellite :

- Fourniture d'informations concernant les eaux de surface, mais pas directement sur le mécanisme réel d'inondation. Difficulté à séparer les inondations provoquées par les rivières de celles causées par l'augmentation du niveau des eaux souterraines.
- Présence de nuages pour l'imagerie optique, en particulier lors des inondations.
- Dépendance à la longueur d'onde des systèmes SAR pour la pénétration de la canopée, conduisant à une précision réduite, voire à l'incapacité de détecter les eaux de surface sous les terres végétalisées relativement denses et les zones bâties.
- La détection peut être affectée par les activités d'irrigation, selon leurs modèles temporels et leurs durées.
- Besoins en ressources informatiques élevées pour traiter de grandes séries temporelles d'images satellites.

3.7. DISCUSSION - PERSPECTIVES

L'utilisation des données de SAR satellitaires pour la cartographie des zones inondées sur les régions d'Aquitaine et en Ile de France a été présentée avec succès, fournissant des informations à la fois sur les régions affectées et sur le comportement temporel des phénomènes.

Une méthodologie dédiée a été développée pour répondre au besoin de cartographier les eaux inondées et en particulier celles dues à l'augmentation des niveaux d'eau dans les systèmes aquifères peu profonds. En principe, les observations par télédétection par satellite aident à la détection des eaux de surface, sans avoir à fournir des informations spécifiques sur les phénomènes impliqués ou le mécanisme d'inondation. Néanmoins, une séparation indirecte a été tentée sur la base de l'hypothèse que les inondations induites par les eaux souterraines peuvent

avoir un comportement temporel différent de celui des inondations fluviales, montrant une signature temporelle prolongée.

Aux fins de l'étude, un outil dédié a été développé en utilisant Matlab TM, dont le noyau est un algorithme automatique d'analyse de signal basé sur SAR pour la détection de zones inondées prolongées sans aucune interaction de l'utilisateur. Pour optimiser le temps de traitement du Matlab, le code a été développé en mettant tous les calculs dans la mémoire temporaire. Dans ce cas, il y a une restriction sur le tableau maximum à traiter. Malheureusement, l'extension de la zone Seine amont est considérablement plus grande que la limite de matrice de Matlab et, par conséquent, pas possible d'effectuer la tâche de traitement. Comme alternative, deux sous-ensembles ont été définis et le code de détection des inondations a été exécuté avec succès. Dans la mise en œuvre future, la parallélisation du code serait envisagée pour permettre la gestion d'ensembles de données plus grandes.

Le schéma de traitement mis en œuvre identifie initialement les régions affectées par les eaux de surface, indépendamment de leur origine (inondations potentielles), grâce à des techniques d'analyse statistique et de classification d'images sur toute la période d'observation. Ensuite, une étape de raffinement basée sur l'analyse de séries chronologiques est considérée pour détecter par pixel le nombre d'événements d'inondation et leurs dates de début et de fin. Enfin, les cartes de délimitation sont obtenues en définissant un seuil sur la durée minimale d'un événement qualifié d'inondation.

L'approche mentionnée ci-dessus permet d'identifier les régions où la présence d'eaux de surface est prolongée (intervalle de temps défini), représentant plus probablement des motifs d'inondation qui les séparent des plans d'eau permanents. De plus, les activités d'irrigation entraînant une augmentation à court terme de l'humidité du sol sont bien exclues. Ceci n'est pas valable lorsque la submersion partielle intentionnelle des cultures se produit pour des portées relativement longues (par ex. culture circulaire en Aquitaine).

Des problèmes subsistent pour les types de couverture terrestre (par exemple, les terres agricoles) présentant une forte saisonnalité dans la série chronologique de rétrodiffusion SAR. Cette saisonnalité provient principalement du cycle de vie des cultures et entrave cette détection des valeurs aberrantes, en particulier lorsque la variabilité du signal est assez élevée (grand écart-type de la rétrodiffusion SAR). Ainsi, la source secondaire d'informations provenant d'autres capteurs satellites devrait être prise en compte pour relever correctement ces défis.

L'incapacité à pénétrer les terres à végétation dense (principalement les zones boisées) et les zones urbaines, avec les données SAR de Sentinel-1 en bande C, introduit également certaines limites. Ainsi, une sous-estimation partielle du nombre et/ou de l'extension des régions inondées devrait être attendue.

Outre les données SAR Sentinel-1, des images optiques du capteur Sentinel-2 ont également été utilisées dans ces études de cas. Bien qu'un nombre limité d'images était exploitable en raison de la couverture nuageuse, les résultats obtenus étaient en accord avec les zones inondées délimitées par la SAR. Il convient de noter, cependant, que les résultats SAR et optiques ne peuvent pas être directement comparés, car les données Sentinel-1 couvrent entièrement les périodes d'intérêt, tandis que les données Sentinel-2 se réfèrent à des images uniques acquises lors de l'inondation.

Voici quelques recommandations qui peuvent améliorer la détection des inondations à l'aide de données de télédétection :

- Meilleur réglage de la durée du seuil des eaux de surface pour la détection des crues sur la base des taux d'infiltration d'eau approximatifs
- Soutenir l'analyse des données EO (Earth Observation) avec des données auxiliaires concernant les sites d'inondation enregistrés, la distribution temporelle des précipitations, l'humidité du sol et les niveaux des eaux souterraines pendant les inondations, ainsi que les pratiques agricoles courantes dans la zone d'intérêt.
- Exploiter d'autres capteurs et techniques satellites pour surveiller les paramètres pertinents (par exemple, l'indice NDVI pour le stade de croissance de la végétation, les données satellite SMOS pour l'humidité du sol, etc.).
- Examiner d'autres techniques complémentaires telles que la polarimétrie SAR et / ou l'interférométrie (par exemple les niveaux de cohérence) pour faciliter l'approche de détection des crues mise en œuvre.
- S'appuyer sur les activités de détection des inondations passées et poursuivre le développement de l'outil de détection des inondations étant donné le potentiel élevé de cartographie des inondations et la disponibilité des données satellitaires.
- L'utilisation de systèmes SAR spatioportés en bande L capables de pénétrer dans la canopée est recommandée dans de tels cas, même si un coût d'acquisition de ces données commerciales doit être pris en compte.

La période de surveillance SAR et les séries chronologiques continues produites sont plutôt adéquates pour permettre l'analyse statistique, ainsi que la détection des inondations individuelles et de leur fréquence. Puisqu'une quantité suffisante de données Sentinel-1 est maintenant disponible, couvrant près de 5 ans d'observations avec des séries chronologiques continues, on peut supposer que la corrélation entre les cartes d'inondation dérivées des satellites et les données ininterrompues modélisées à long terme sur les inondations peut être facilitée. Cela permettra d'utiliser les observations de crues par télédétection comme couche supplémentaire d'informations dans les modèles hydrodynamiques. Dans tous les cas, les observations de télédétection sont toujours utiles comme ensemble de données de validation, en particulier dans les cas où il n'existe aucune autre information in situ.

4. Etape 2 : Estimation de la cote piézométrique extrême

4.1. ANALYSE FREQUENTIELLE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

La démarche et les méthodes sont très bien décrites dans la thèse de Kenza NAJIB intitulée « Phénomènes de remontées de nappe extrêmes en terrain carbonaté fracturé et karstifié : Evaluation de l'aléa et Prévention du risque dans le cadre de la protection de bâtiments » dont certains éléments sont repris dans les paragraphes ci-dessous.

La difficulté inhérente à l'évaluation des extrêmes, quel que soit le phénomène naturel modélisé, est liée au manque d'information directe sur ces événements. Un extrême est par définition un événement rare (exceptionnel), c'est-à-dire un événement qui a une faible probabilité d'occurrence. Il s'agit alors d'extrapoler au-delà des données observées.

L'analyse des événements extrêmes cherche à prédire le comportement en « queue de distribution ». La théorie des valeurs extrêmes a pour but de développer le cadre théorique nécessaire à cet enjeu et offre les appuis mathématiques permettant de développer au mieux, et dans un cadre rigoureux, des modèles adaptés. Naturellement, ceux-ci sont soumis à certaines conditions et doivent alors être appliqués avec précaution. L'extrapolation des quantiles extrêmes s'appuie sur l'échantillon des maxima observés et non sur l'ensemble des données disponibles. Plus précisément, la prédétermination des crues souterraines exceptionnelles repose sur une analyse fréquentielle des niveaux piézométriques maximaux. Le principe consiste à mettre en relation les maxima à leur probabilité d'occurrence via l'ajustement d'une loi de probabilité appropriée. Aussi, il est nécessaire de disposer d'une série de données suffisamment longue pour constituer un échantillon de maxima significatif. Un nombre important de données constitue en effet la base de toute analyse fréquentielle. A titre d'exemple, une pluie centennale est généralement estimée sur la base d'une chronique d'observations de plus de 30 années. La prédétermination des crues souterraines exceptionnelles se heurte alors à l'obstacle suivant : la rareté des chroniques piézométriques de longue durée, notamment au pas de temps journalier.

La démarche à suivre, schématisée sur l'illustration 34, consiste à enchaîner les différentes étapes énumérées dans les paragraphes ci-dessous.

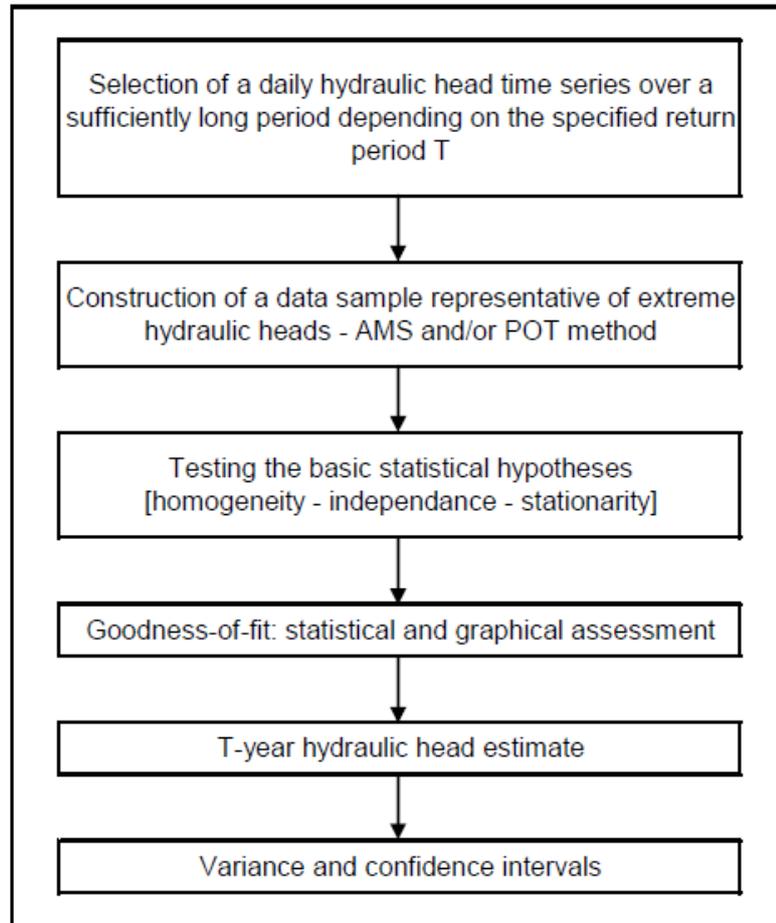


Illustration 34 – Procédures d'analyse des crues souterraines (d'après Kenza NAJIB, 2007)

4.1.1. Sélection des chroniques piézométriques avant ajustement – points fiables

Cela suppose d'avoir des chroniques suffisamment longues et de bonne qualité, c.-à-d. exemptes d'artefacts. Ce prétraitement peut être assez long, en particulier si la zone d'étude est vaste.

Le lecteur peut se référer au paragraphe pour la méthode de sélection des chroniques fiables.

NB : Si des modèles globaux fiables existent sur la zone d'étude, il est possible de l'exploiter pour faire de la reconstitution de chroniques piézométriques afin d'augmenter la longueur de celles-ci.

4.1.2. Constitution d'un échantillon

Il est nécessaire de constituer un échantillon d'étude significatif, c'est-à-dire représentatif des événements de crues souterraines maximales, à partir d'une série de données suffisamment longue (en l'occurrence, la chronique piézométrique journalière reconstituée). Les événements constituant cet échantillon d'étude sont supposés indépendants et identiquement distribués. Nous admettons également que le processus d'arrivée des crues souterraines est stationnaire, c'est-à-dire invariable dans le temps.

A partir des points fiables, il s'agit est d'extraire les valeurs dites « extrêmes » correspondant à des niveaux piézométriques hauts. Deux paramètres ont été utilisés :

- Le niveau maximum annuel
- Le HMNA le niveau moyen mensuel maximum annuel

4.1.3. Contrôle des hypothèses statistiques

Les estimations statistiques sont d'autant plus solides qu'aucun phénomène parasite et systématique n'intervient : dérive dans le temps des séries, événements d'importance ou d'origine trop différentes, interdépendance des événements successifs. Il est alors nécessaire de s'assurer que les hypothèses de base sous-jacentes aux méthodes statistiques appliquées, sont bien vérifiées : homogénéité, stationnarité et indépendance des événements successifs.

L'homogénéité de l'échantillon d'étude (données issues d'une même population) assure la bonne représentativité du phénomène à modéliser, en l'occurrence les événements extrêmes.

L'indépendance des événements successifs (absence d'autocorrélation) constituant l'échantillon d'étude suppose que l'occurrence d'un événement n'est pas affectée par les observations précédentes. Cela revient à choisir une fenêtre de temps suffisamment grande pour que deux maxima consécutifs soient suffisamment espacés dans le temps et que le second ne soit plus influencé par le premier.

La stationnarité des événements est fondamentale en terme d'extrapolation. En effet, l'objectif de l'analyse fréquentielle des crues est d'interpréter la série des événements passés afin d'estimer les probabilités d'apparition future.

4.1.4. Ajustement d'une loi de probabilité

Une fois l'échantillon des valeurs maximales constitué et les hypothèses relatives à cet échantillon testées, on cherche à ajuster une loi de probabilité appropriée représentant sa distribution. Cette loi statistique fait partie des lois dites « extrêmes ». Ces lois statistiques « extrêmes » dépendent de quelques paramètres. Le processus de calage consiste alors à estimer la valeur de ces paramètres pour que la loi « extrême » choisie s'ajuste au mieux à l'échantillon « extrême »

De nombreuses lois sont proposées dans la littérature pour décrire la distribution des valeurs extrêmes (loi GEV, loi de Gumbel, loi log Pearson, etc.).

4.1.5. Calcul des niveaux piézométriques centennaux et intervalles de confiance

Une fois les lois statistiques théoriques calées sur les échantillons « extrême », elles sont utilisées en extrapolation dans le but d'évaluer des valeurs de niveaux piézométriques peu probables, appelées quantiles. Dans le cas présent, nous sommes intéressés par les niveaux ayant une occurrence centennale, c'est-à-dire ayant une chance sur cent de se réaliser chaque année.

En plus des valeurs des quantiles, il est usuel d'y associer un intervalle de confiance statistique prenant en compte la taille de l'échantillon « extrême » utilisé et l'incertitude autour de l'évaluation des paramètres de loi. La méthode utilisée pour calculer ces intervalles de confiance est celle de la variance asymptotique, déjà utilisée et décrite dans le travail de thèse de K. Najib. La variance asymptotique des quantiles constitue une mesure standard, permettant de quantifier les incertitudes des estimations, liées notamment à la taille réduite des échantillons de travail. La « meilleure » méthode en terme de précision est celle qui fournit des estimateurs à variance minimale.

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

4.2.1. La méthode nationale

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

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

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

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

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

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

$$\text{Pour } T=100 \text{ ans :} \quad V_g \# 2,07 - 0,454 * \ln(D)$$

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

4.2.2. Les ajustements statistiques de valeurs extrêmes

Dans l'idée de développer une analyse probabiliste plus poussée, l'ajustement de différentes lois de probabilité a été testé après nettoyage des chroniques de longue durée : 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 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).

Le principe de ces tests n'est pas rappelé ici ; le lecteur est renvoyé aux pages 140 à 145 de la thèse de K. Najib (2007) qui les présente. 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, après examen des premiers résultats pour l'étude de la Seine amont, 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 critère d'appréciation visuelle n'est pas exclu.

Les ajustements sont généralement réalisés sur les maximas 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 soucis de rigueur, il est préférable d'estimer des niveaux maximums probables que des niveaux humides de période de retour 100 ans.

Par exemple pour l'étude de la Seine amont, 200 points de mesure concernés, c'est majoritairement la loi GEV qui apportait les meilleurs ajustements (Illustration 35).

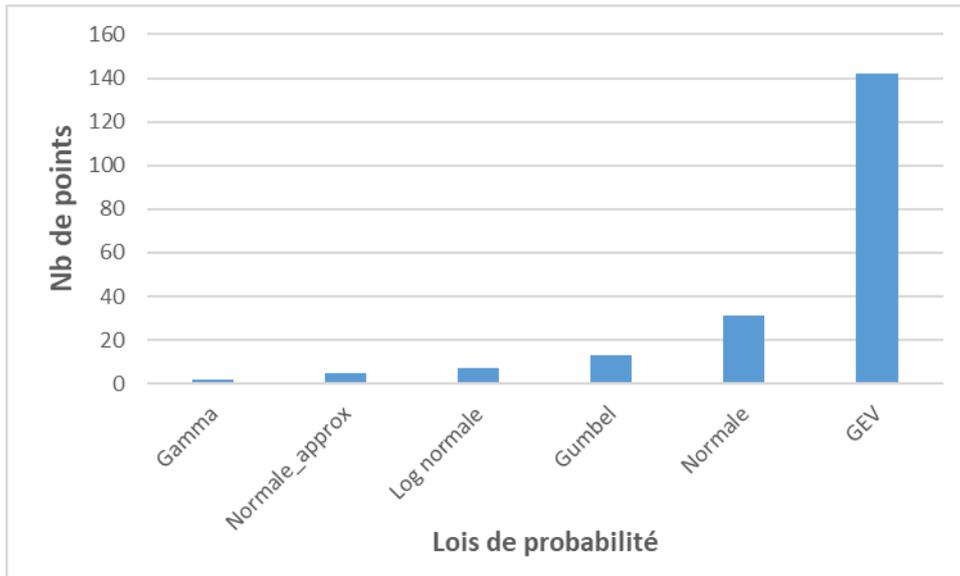


Illustration 35 – Lois de probabilité présentant les meilleurs ajustements selon le test de Kolmogorov-Smirnov sur un échantillon de 200 points (écart maximal entre les différentes lois inférieur à 2 m) (d'après Arnaud et al., 2020).

Toujours dans cette étude, un contrôle a systématiquement été opéré afin de valider la pertinence du niveau humide centennal ainsi calculé (cf. annexe 5). Dans quelques rares cas, ce n'est pas la loi présentant le meilleur ajustement selon le test de Kolmogorov-Smirnov qui a été retenue. Un exemple est présenté par le graphique de l'illustration 36 sur lequel sont reportés la chronique piézométrique du forage n° 02974X0004/S1 (50 années d'observation) et les niveaux humides de périodes de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés selon la loi GEV (meilleur ajustement selon le test Kolmogorov-Smirnov – pvalue = 0.645). La loi GEV semble ici surestimer le niveau maximal probable avec une valeur de 169.72 m NGF contre une valeur maximale observée de 163.3 m NGF (soit une surcote de 6.4 m). Dans ce cas précis, la loi Log-normale a été privilégiée avec un niveau humide centennal de 163.8 m NGF (test Kolmogorov-Smirnov – pvalue = 0.181).

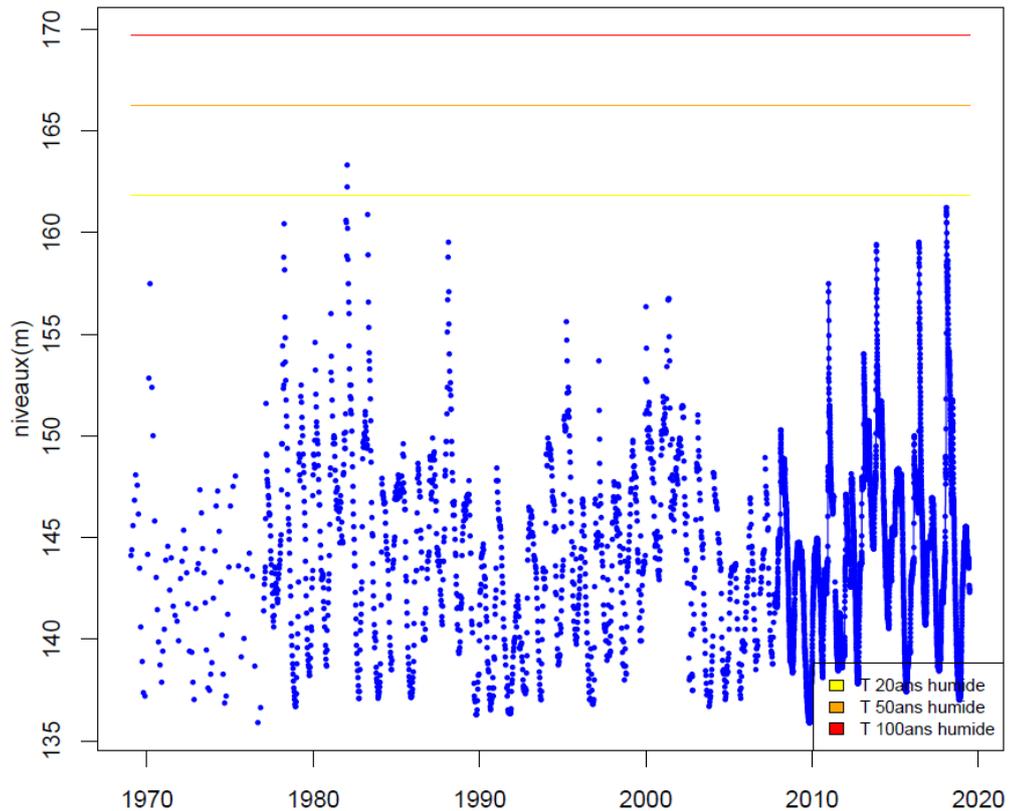


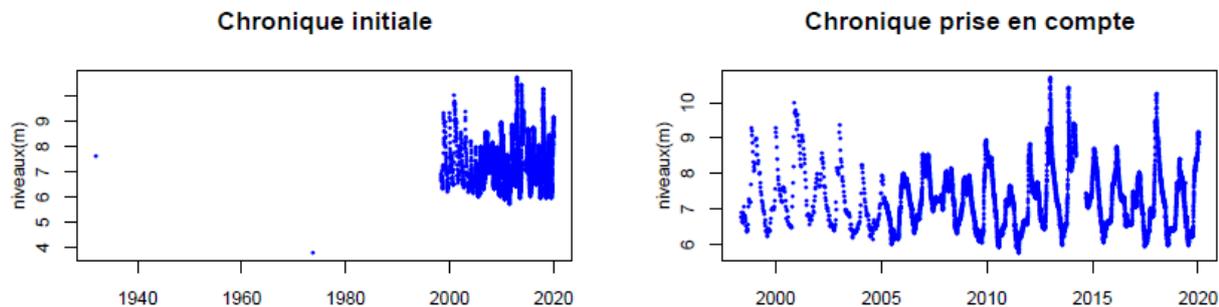
Illustration 36 – Report des niveaux humides de période de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés après ajustement d'une loi GEV (02974X0004/S1). Surestimation du niveau maximum probable suspectée (d'après Arnaud et al., 2020).

4.2.3. Script R développé

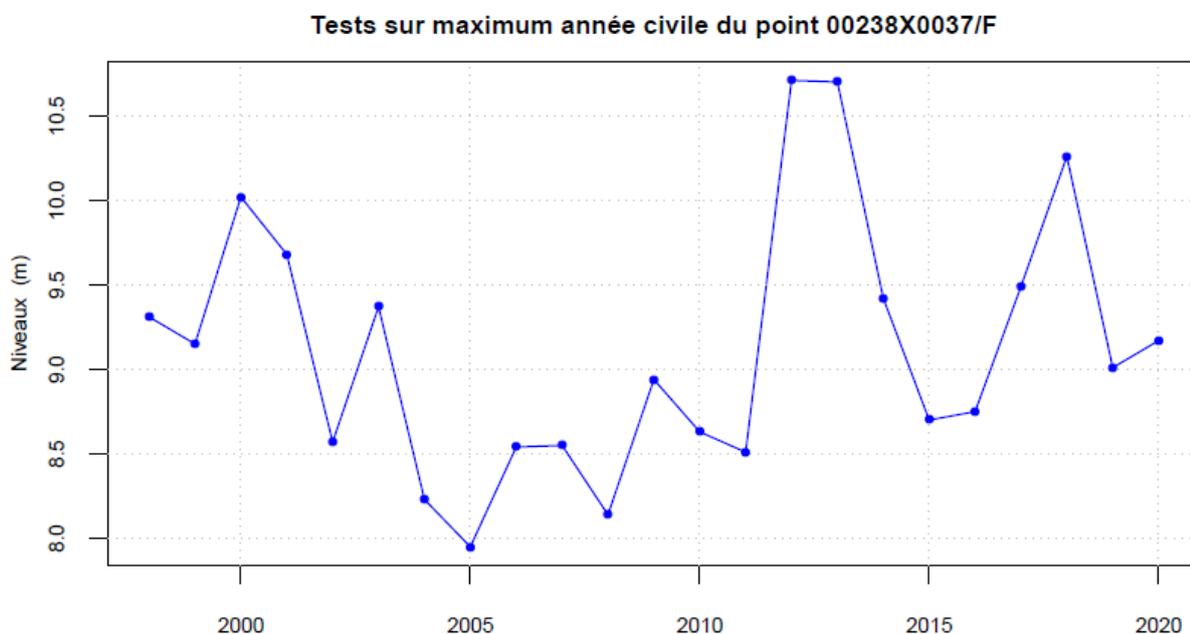
Afin d'automatiser l'ensemble de ces traitements, un script R a été spécifiquement développé par le BRGM. R est un environnement de calculs mathématiques et statistiques éprouvé et très utilisé par la communauté scientifique. Il présente les deux principaux avantages suivants : il est open source, et 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

Les différentes étapes du script, sont présentées sur l'illustration 37.

a) Analyse automatique des chroniques piézométriques



b) Contrôle des hypothèses statistiques



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 4.282e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 4.282e-01
 pvalue selon méthode Yue-Pilon : 5.728e-01 et selon méthode Zhang 5.728e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): 1.9

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.13

Test d'homogénéité de Wilcoxon

pvalue : 1.179e-01

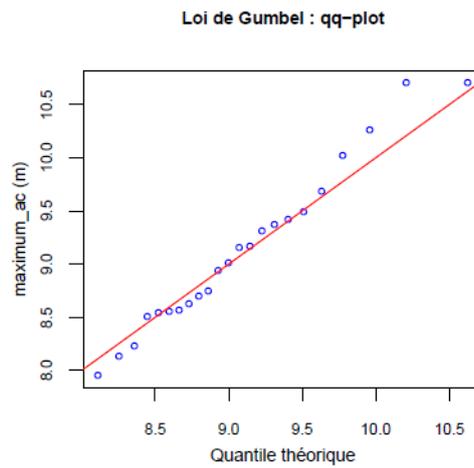
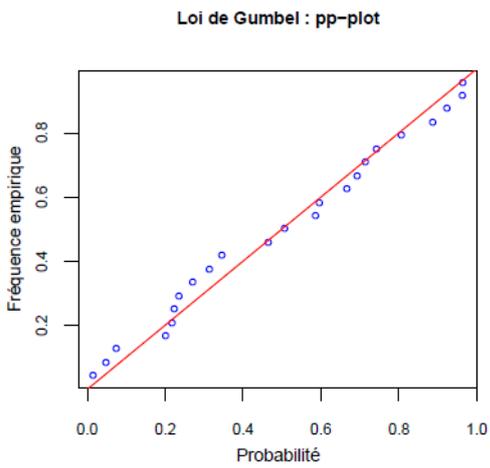
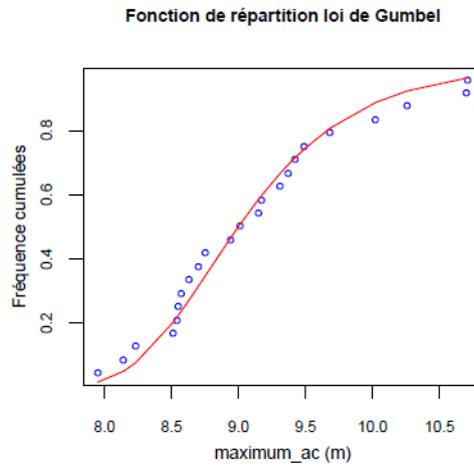
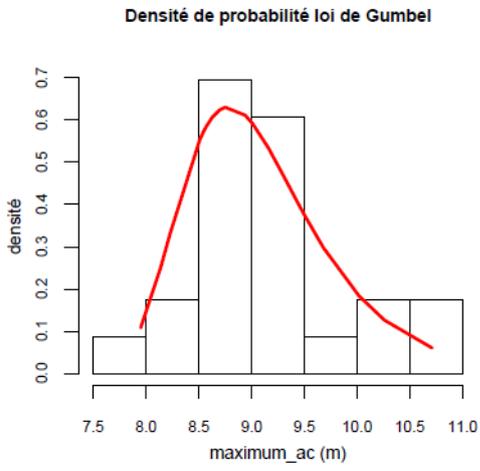
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 1.446e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.408

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettitt sont rejetés au seuil de 5%

c) Ajustement de différentes lois de probabilité de valeurs extrêmes

00238X0037/F



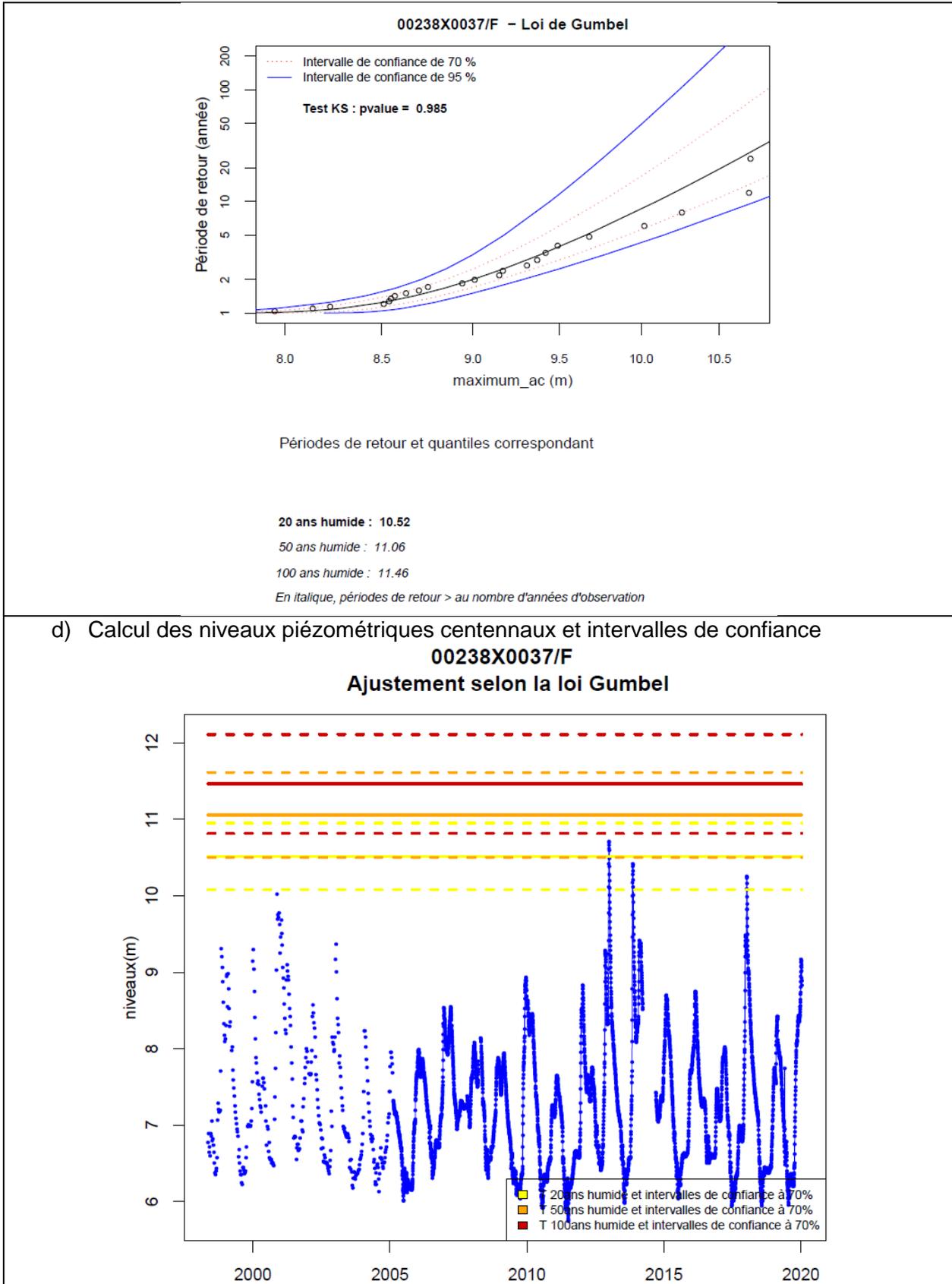


Illustration 37 - Les différentes étapes du script R développé pour l'ajustement des lois extrêmes sur les points fiables

4.3. CALCUL DU ZT100 POUR LES POINTS A FIABILITE MOYENNE

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

Sur la base de la méthodologie développée par le BRGM pour la nappe d'Alsace (Bessière, 2019), une surcote a été appliquée aux chroniques de courte durée (dit points peu fiables) après association à une chronique piézométrique de longue durée (dit point fiable). L'objectif était de consolider une approche qui avait pu apparaître trop pessimiste dans la méthode nationale.

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 :

$$\begin{aligned}
 Z_{\max}(T100)_{\text{peu fiable}} &= Z_{\max}(Tm)_{\text{peu fiable}} + (Z_{\max}(T100) - Z(Tm))_{\text{fiable}} \\
 &\times \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})_{\text{peu fiable}}}{2 \times (Z_{\max} - Z_{\text{moy}})_{\text{fiable}}}
 \end{aligned}$$

avec :

- $Z_{\max}(T100)_{\text{peu fiable}}$ = Cote piézométrique extrême du point peu fiable
- $Z_{\max}(Tm)_{\text{peu fiable}}$ = Cote piézométrique maximale du point peu fiable
- $Z_{\max}(T100)_{\text{fiable}}$ = Cote piézométrique extrême du point fiable associé
- $Z(Tm)_{\text{fiable}}$ = cote piézométrique du point fiable à la date Tm .
- Z_{\max} = Cote piézométrique maximale mesurée du point fiable associé
- Z_{moy} = Cote piézométrique moyenne du point fiable associé

La Figure 1 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. A partir du point

NB : pour les points fiables, ce n'est pas exactement le battement qui a été pris en compte mais $2 \times (Z_{\max} - Z_{\min})$ afin de s'affranchir de l'influence éventuel des pompages à proximité du piézomètre.

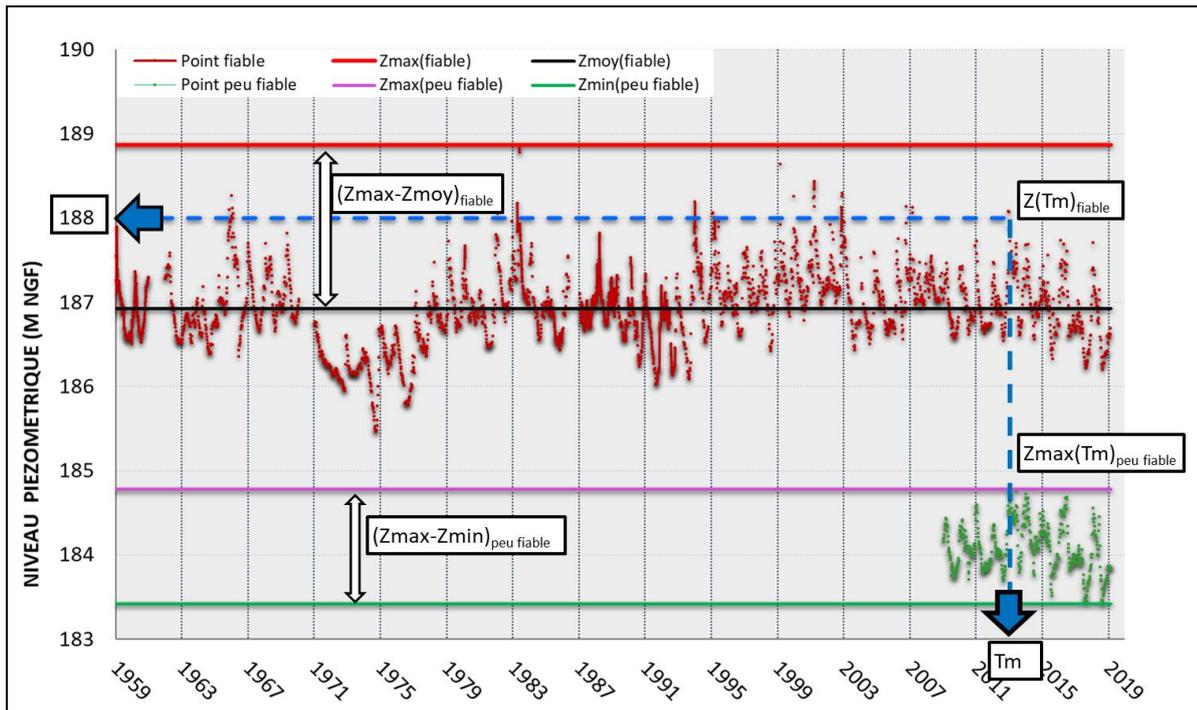


Figure 1 Exemple des piézomètres 03427X0545/PUITS, point fiable, en haut, et 03427X0371/PZ, point peu fiable associé, en bas.

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 peu fiable : $Z(T_0)$. Pour cela, il faut utiliser le travail de rattachement et pointer la mesure $Z(T_0)$ du point fiable au plus proche de la date T_0 tout en sachant que les chroniques ne sont pas forcément concordantes au niveau de la période de mesure. Seules les mesures dans un intervalle de **7 jours** seront sélectionnées.

4.4. TRAITEMENT DES CARTES PIEZOMETRIQUES POUR LE CALCUL DU ZT100

Un logigramme (Illustration 38) décrivant le traitement des cartes piézométriques pour la réalisation d'une cartographie de remontée de nappe a été créé pour aider à la compréhension. Il est structuré selon deux branches principales : cartes piézométriques HE ou ME/BE. La branche HE est elle-même déclinée en deux sous-branches selon la disponibilité des données brutes (mesures des campagne) ou non.

Pour les cartes piézométriques réalisées en hautes-eaux, deux types de traitement sont possibles :

- A partir des courbes isopièzes – niveau de fiabilité moyenne :

Les données linéaires peuvent être transformées en données ponctuelles puis converties en niveau maximal probable selon le principe suivant :

- lorsqu'elle n'est pas connue, l'estimation de la période de retour des isopièzes peut être évaluée en s'appuyant sur les calculs de $Z_{max}(T)$ réalisés avec la loi de Gauss (par exemple) à partir des piézomètres présents dans ADES et BSS EAU de fiabilité forte,
- attribution d'un coefficient correcteur par carte

- A partir des points de la campagne piézométrique – niveau de fiabilité forte :

Si les points de la campagne piézométrique hautes-eaux sont disponibles en base, ils sont utilisés directement après ajustement par un coefficient correcteur selon le même principe.

Dans les deux cas, l'attribution du coefficient correcteur est réalisé selon un ajustement fréquentiel graphique à partir des points ADES fiables et représentatifs à proximité selon le principe suivant :

- Calcul du ZT100 pour les points ADES à proximité (cote maximale pour la période de retour souhaitée)
- Calcul du ratio ZT100/Ziso pour chaque point ADES à proximité
- Calcul du coefficient moyen
- $Z_{ref\ iso} = coef\ moyen \times Z_{iso}$

Concernant les cartes piézométriques réalisées en moyennes-eaux, leur niveau de fiabilité étant faible, elles ne sont utilisées uniquement si des cartes HE ne sont pas disponibles et en tant que contrainte minimale pour l'interpolation du ZT100.

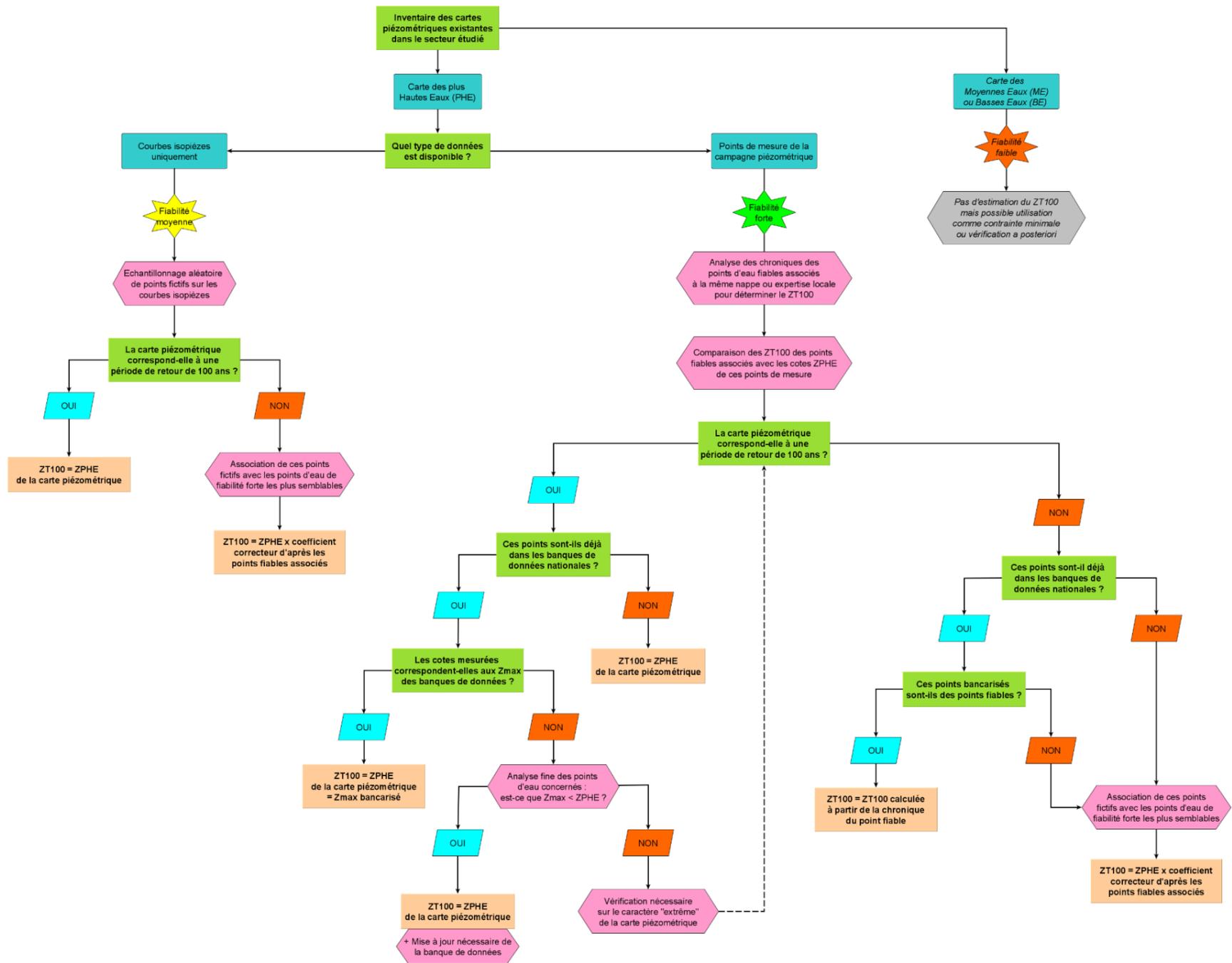


Illustration 38 - Logigramme décrivant le traitement des cartes piézométriques existantes au sein de la zone d'étude pour l'estimation du ZT100

4.5. SYNTHÈSE DE L'ESTIMATION DU ZT100 PAR SOURCE DE DONNÉES

Pour les différentes sources de données, les valeurs du ZT100 prises en compte pour l'interpolation sont résumées dans le Tableau 3.

Source de données	Fiabilité forte	Fiabilité moyenne
Base de données nationale (ADES/BBS Eau)	ZT00 estimée par ajustement statistique	ZT100 estimée par association avec points fiables
Modèle hydrodynamique	Pour les zones de débordement ZT100 = ZTopo	Isopièzes HE issus du modèle ZT100 = ZISOPIEZ_HE extraites du modèles x coef correctif
Données historiques et enquêtes et Catnat	Points inondation géoréférencés ZT100= ZTopo	
Cartes piézométriques	Points de mesures HE ZT100 = ZPIEZO_HE x coef correctif	Isopièzes HE uniquement ZT100 = ZISOPIEZ_HE x coef correctif
Cours d'eau	Linéaire cours d'eau (connexion nappe/rivière) ZT100 = ZTopo	Cartographie inondation type PPRI ZT100 = ZTopo
Indices hydromorphologiques	Si relation nappe / milieux aquatiques avérée ZT100 = ZTopo	
Sources	Si précision altimétrique ZT100 = ZAlti_Source	
Les images satellite		Si disponible pendant un épisode de remontée de nappe connue ZT100= ZTopo

Tableau 3 Evaluation de la fiabilité par source de données

L'illustration 39 présente, à titre d'exemple, la répartition des données d'entrée par origine pour l'étude de la Seine amont.

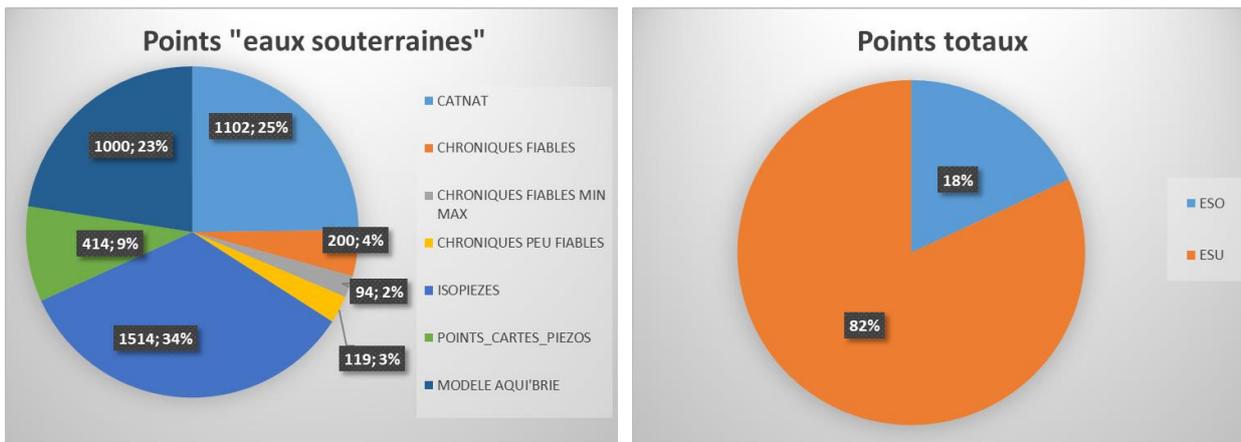


Illustration 39 - Répartition des données d'entrée par origine pour l'étude la Seine amont (ESO : Eau Souterraine, ESU : Eau de Surface (d'après Arnaud et al., 2020))

5. Etape 3 : Analyse géostatistique et interpolation de la surface piézométrique

5.1. APPROCHES POSSIBLES

L'objectif est de cartographier les zones susceptibles de subir une inondation par remontées de nappe (dans le cas d'un événement ayant une période de retour de 100 ans), c'est-à-dire les zones où le niveau de la nappe phréatique ZT100 sera soit supérieur à la cote topographique ZTopo, soit susceptible d'inonder des caves ou parkings souterrains.

Pour ceci deux approches apparaissent a priori envisageables :

- Méthode par les surfaces (Topographie ZTopo et surface piézométrique ZT100). Ces deux surfaces sont interpolées (sur une grille commune). On en déduit les zones de débordement par comparaison des deux surfaces interpolées.
- Méthode par les différences (ou par les « épaisseurs »: on travaille directement sur la variable ZNS_T100 = différence entre topographie ZTopo (ou une version lissée de ZTopo) et la surface piézométrique ZT100 (analogie avec l'épaisseur de la Zone Non Saturée) et on interpole cette différence. La zone de débordement sera donnée par une valeur interpolée négative. On ne calcule donc pas explicitement la surface piézométrique en elle-même.

5.1.1. Approche par interpolation de surfaces

L'approche par « surfaces » implique :

- De pouvoir calculer (interpoler) en tout point du domaine d'étude, à partir des points de données :
 - La cote topographique ZTopo ;
 - La cote de la surface piézométrique ZT100 (maximale avec une période de retour de 100 ans).
- De comparer ces deux côtes.

Ainsi, on aura débordement que si « $ZT100 > ZTopo$ » (ou si « $ZT100 > \text{niveau de débordement}$ »).

Cette méthode est expliquée graphiquement par l'illustration 40 (représentation en coupe). La cote piézométrique ZT100 (à période de retour 100 ans) est interpolée à partir des cotes déterminées sur les trois piézomètres P1, P2, P3. On suppose que la topographie est connue avec précision. Les zones de débordement/inondation par remontées de nappe sont déduites par comparaison des deux surfaces (« ZTopo » et « ZT100 interpolé »). On délimite ainsi la zone allant du point C au point D (piézo au-dessus de la topographie) et la cave, pour laquelle la surface piézométrique ZT100 est sous la topographie, mais intersecte la cave, ou plus généralement tout endroit où la surface piézométrique ZT100 est à moins d'une certaine profondeur par rapport à la topographie

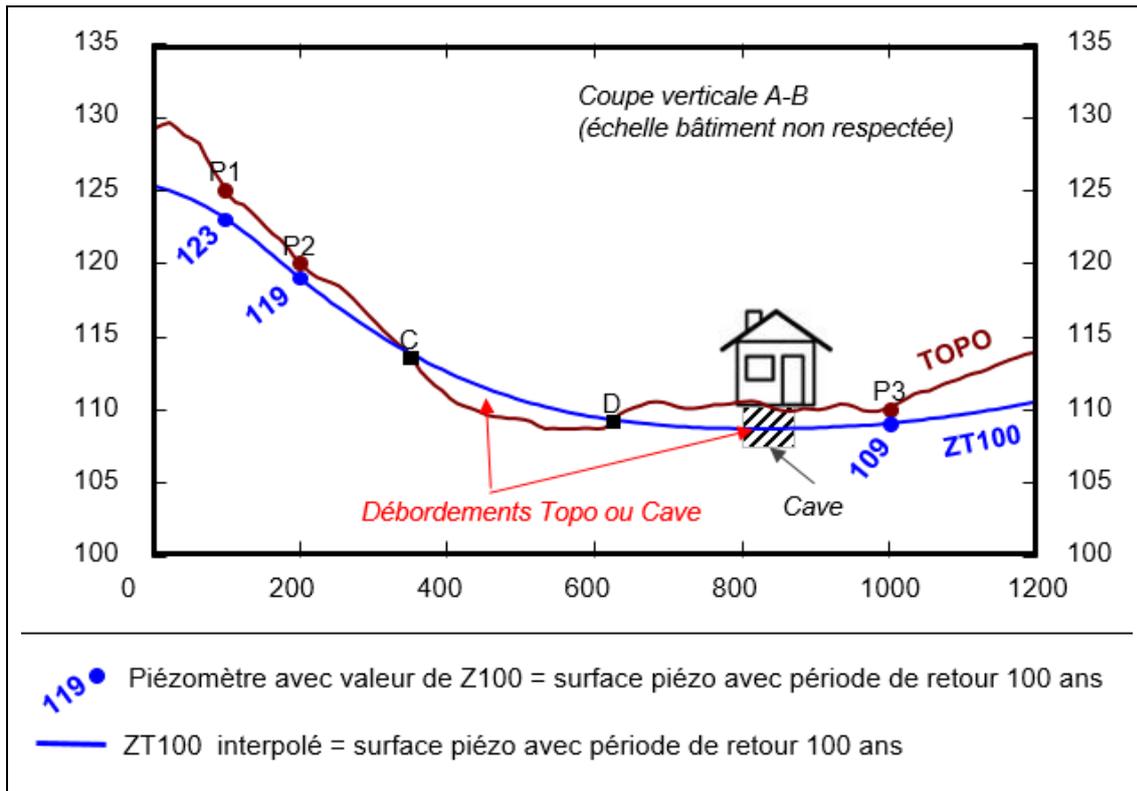


Illustration 40 - Détermination des zones de débordement par comparaison des surfaces

Cette manière de faire paraît la plus naturelle. En effet d'une part elle se base sur l'interpolation d'une surface piézométrique, technique connue de tous même si sa mise en œuvre s'avère bien plus délicate qu'on ne le pense, et d'autre part la surface topographique est fournie par une grille IGN (Modèle Numérique de Terrain : MNT) et n'a pas besoin d'être calculée. On a donc au bout du compte seulement une interpolation à réaliser.

Toutefois cette méthode présente des limitations qui sont les suivantes :

- La surface topographique fournie par l'IGN n'est pas « exacte » : elle est entachée d'une incertitude qui malheureusement n'est pas à l'heure actuelle (à notre connaissance) quantifiée de manière suffisamment précise par l'IGN. L'IGN fournit des classes d'incertitudes selon le type de méthode utilisée pour construire le MNT, classes qui peuvent varier selon la localisation et ne sont pas fournies sous forme d'une valeur en chaque maille du MNT. On peut avoir fréquemment plusieurs mètres d'incertitude sur la cote topographique. Donc si la surface piézométrique ZT100 interpolée tombe à un mètre au-dessus ou en dessous de la topographie, mais qu'on a plus de 5m d'incertitude sur la cote topographique, il est impossible d'en déduire avec certitude s'il y a risque de débordement par remontée de nappe ou pas ;
- Par ailleurs, la surface piézométrique « ZT100 » interpolée est elle-même entachée d'une erreur d'interpolation. En général on dispose d'un nombre limité de données (piézomètres, points CATNAT, etc...) permettant de connaître la valeur de ZT100 en des points de mesure ou d'observation. Même si une surface piézométrique est beaucoup plus lisse qu'une surface topographique, la valeur de la surface piézométrique ZT100 interpolée loin d'une donnée peut être entachée d'une erreur d'estimation de quelques mètres, incertitude qui se cumule avec celle sur la topographie.

Il est donc important de mener une étude des incertitudes à la fois sur la topographie et sur la cote ZT100 interpolée, afin de juger de la probabilité qu'une zone donnée présente un risque de débordement (ou pas) par remontée de nappe.

5.1.2. Approche par « épaisseur » de la ZNS

L'approche « épaisseur » implique :

- De pouvoir calculer en tout point de donnée la valeur de ZNS_T100 = différence entre la cote topographique et la cote de la surface piézométrique ZT100 (maximale avec une période de retour de 100 ans) ;
- D'interpoler ensuite cette différence en tout point du domaine d'étude .

Ainsi, on aura débordement (inondation) si la différence est négative (débordement au-dessus de la topo) ou inférieure à une certaine valeur (par exemple moins d'1m sous la topographie pour une inondation de cave).

Ce processus est représenté Illustration 41. Sur trois piézomètres P1, P2, P3, on a calculé des différences « ZTopo – ZT100 » égales à respectivement 2m, 1m et 1m. Ces valeurs peuvent être vues comme une épaisseur de ZNS, encore qu'elles peuvent parfois être négatives. En tout cas elles sont interpolées sur la même grille que la topographie. On peut alors cartographier directement les zones susceptibles de présenter un risque d'inondation par remontée de nappe.

Par exemple, le contour à l'intérieur de l'isovaleur « 0 » représente les zones où la nappe est au-dessus de la topographie (soit entre les points C et D). Si l'on souhaite considérer comme zone à risque toute zone pour laquelle la nappe serait à moins d'un mètre sous la topographie, on choisit tout ce qui est à l'intérieur de l'isovaleur 1m (soit entre P2 et P3), etc.

L'utilisation d'une approche n'exclut pas la mise en œuvre de l'autre, mais permet au contraire de croiser les informations résultantes. Cependant il existe des limites et des conséquences dans l'utilisation pour chacune de ces méthodes.

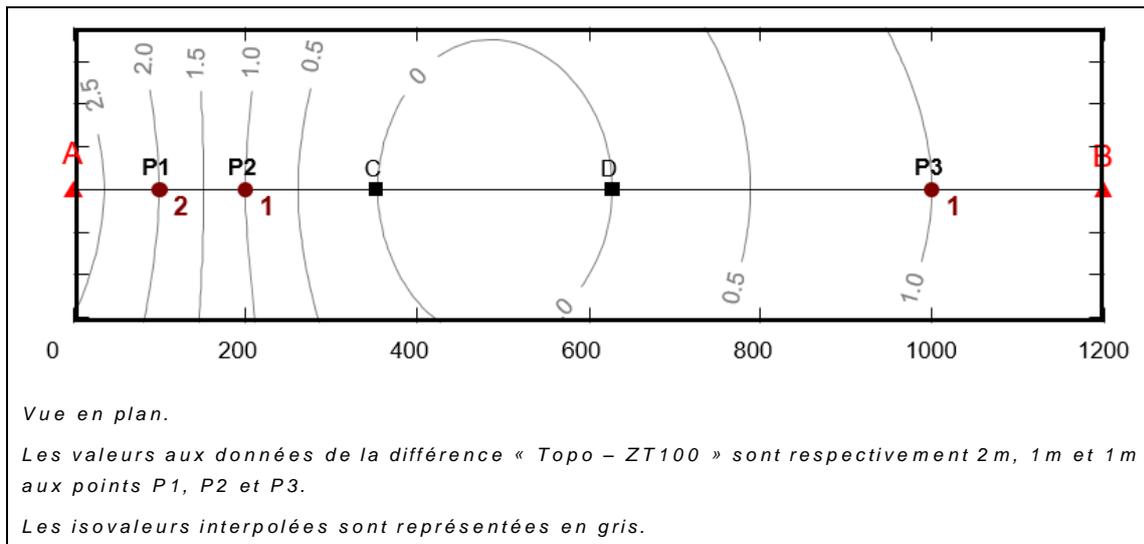


Illustration 41 - Interpolation directe de la différence ZTopo - ZT100

Cette méthode peut paraître séduisante, du fait qu'elle s'affranchit de la grille topographique de l'IGN. En effet, pour les piézomètres P1, P2, P3 pris en compte dans l'exemple, la cote topographique utilisée est celle du sol au niveau de chaque piézomètre (qui donc doit être nivelé précisément). L'erreur de détermination du risque d'inondation par remontée de nappe va donc essentiellement dépendre de l'erreur d'interpolation de la différence entre ZTopo et ZT100.

Toutefois cette méthode ne conduit pas nécessairement à de meilleurs résultats que la précédente, car :

- Les données disponibles ne sont pas toujours uniquement des piézomètres (par exemple on doit parfois se baser sur des cartes isopièzes hautes eaux sans disposer des points de mesure correspondants). Dans le cas d'isopièzes on doit calculer ZNS_T100 en utilisant la variable ZTopo. On introduit donc l'erreur sur la topographie dans le calcul
- Si on soustrait la différence interpolée à la topographie, on obtient une surface piézométrique ZT100 qui peut paraître irréaliste car beaucoup trop parallèle à la topographie. Ceci est imagé dans Illustration 42. La surface ZT100 obtenue en soustrayant de la surface topographique la différence « ZTopo-ZT100 interpolée à partir des points », est par nature très contrainte par la topographie. En particulier elle peut se retrouver beaucoup trop proche de la surface sous les plateaux ou collines, si aucune donnée n'est disponible dans ces zones.

Cette approche est toutefois utilisée par certains auteurs, par exemple Maillot et al (2019). L'intérêt principal d'une approche « épaisseur » est que la variable d'intérêt devient en général stationnaire (elle n'est plus influencée par les « fortes » variations liées à la topographie), ce qui conduit à des erreurs d'estimation plus faible. En général cette épaisseur de zone non saturée n'est pas calculée à partir de la topographie, mais d'une version lissée de la topographie.

Dans Maillot et al (2019), le calcul de la ZNS n'est en fait pas réalisé pour calculer un risque de débordement de nappe, mais pour obtenir au final la surface du toit de la nappe. Dans un premier temps la ZNS est calculée en comparant la cote piézométrique à une topographie lissée. Puis cette épaisseur est interpolée et le résultat de l'interpolation est soustrait à la topographie lissée

pour revenir à la surface piézométrique. L'intérêt de passer par une topographie lissée est expliqué ci-après.

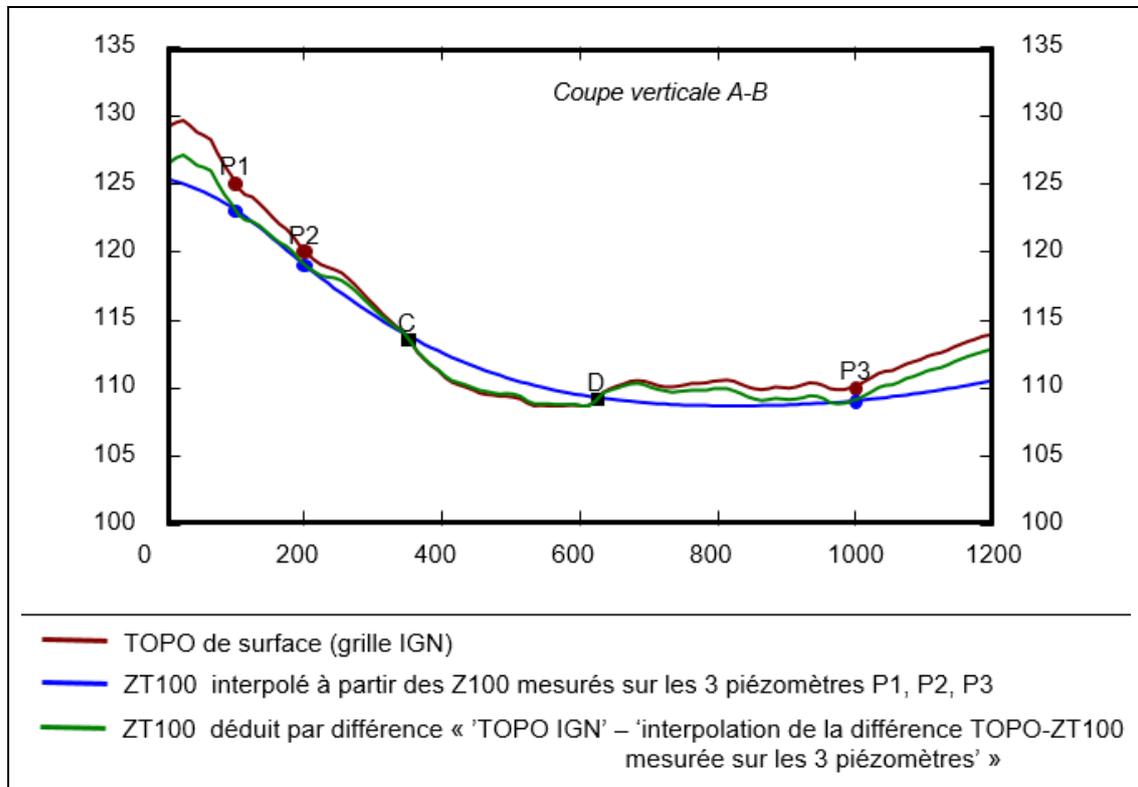


Illustration 42 - Comparaison de la surface ZT100 selon la méthode de calcul

Pour pallier la difficulté précédente (surface reconstituée trop proche de la topographie), il est possible de remplacer la variable ZTopo par une version lissée.

Un exemple est présenté Illustration 43 et Illustration 44. La première de ces deux illustrations montre :

- En bleu la surface piézométrique ZT100 obtenue par interpolation directe de la valeur de ZT100 aux piézomètres
- En vert la surface piézométrique ZT100 obtenue en soustrayant de la topographie l'épaisseur de la ZNS_T100 mesurée aux 4 piézomètres
- On constate un net parallélisme avec la topographie, paraissant irréaliste

Sur l'illustration 44 une version lissée de la topographie (moyennée dans un rayon de 400m) est représentée en marron. Si l'on calcule la ZNS_T100 comme étant la différence entre cette topographie lissée et la valeur ZT100 aux points de donnée, qu'on interpole cette « ZNS_T100 lissée » puis qu'on la soustrait à la topographie lissée, on obtient la surface représentée en fuchsia. Celle-ci paraît beaucoup moins parallèle à la topographie, et semble relativement réaliste.

Reste à définir le choix du rayon de lissage, et tester s'il est préférable de travailler sur la cote piézométrique ZT100 ou l'épaisseur ZNS_T100. Nous reviendrons sur ces aspects lors de l'étude bibliographique.

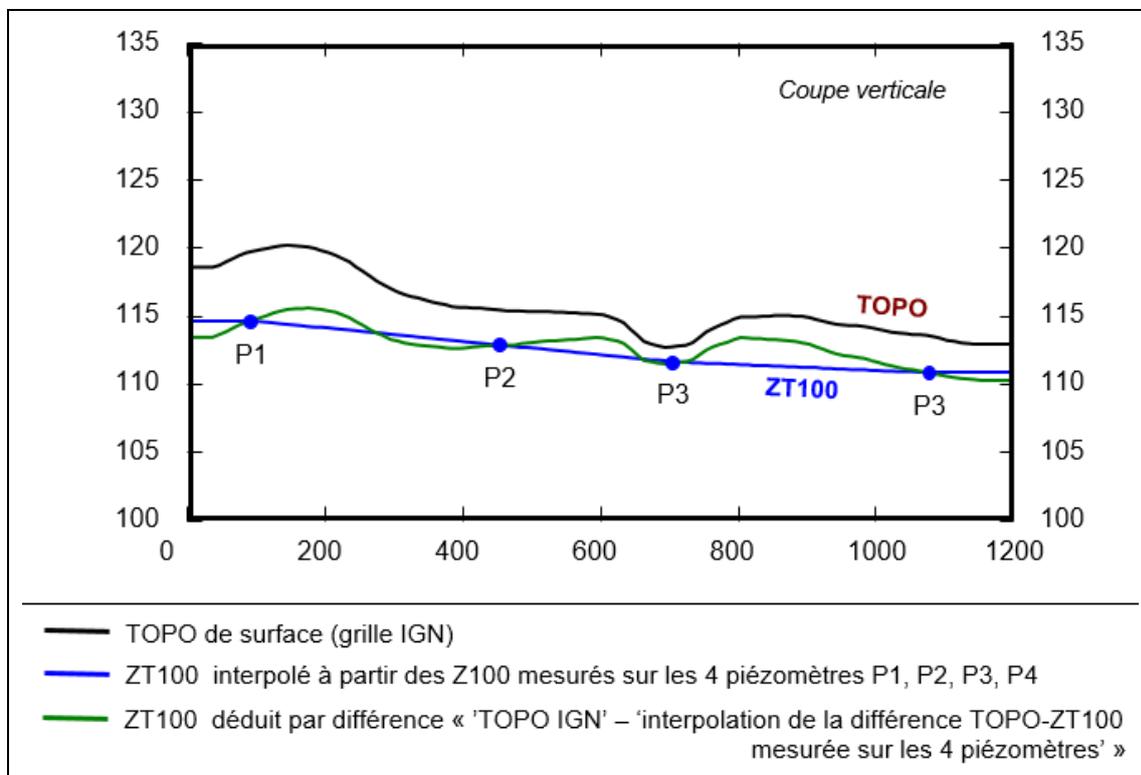


Illustration 43 - Comparaison de ZT100 obtenu par interpolation directe et par interpolation de la différence entre ZTopo et ZT100

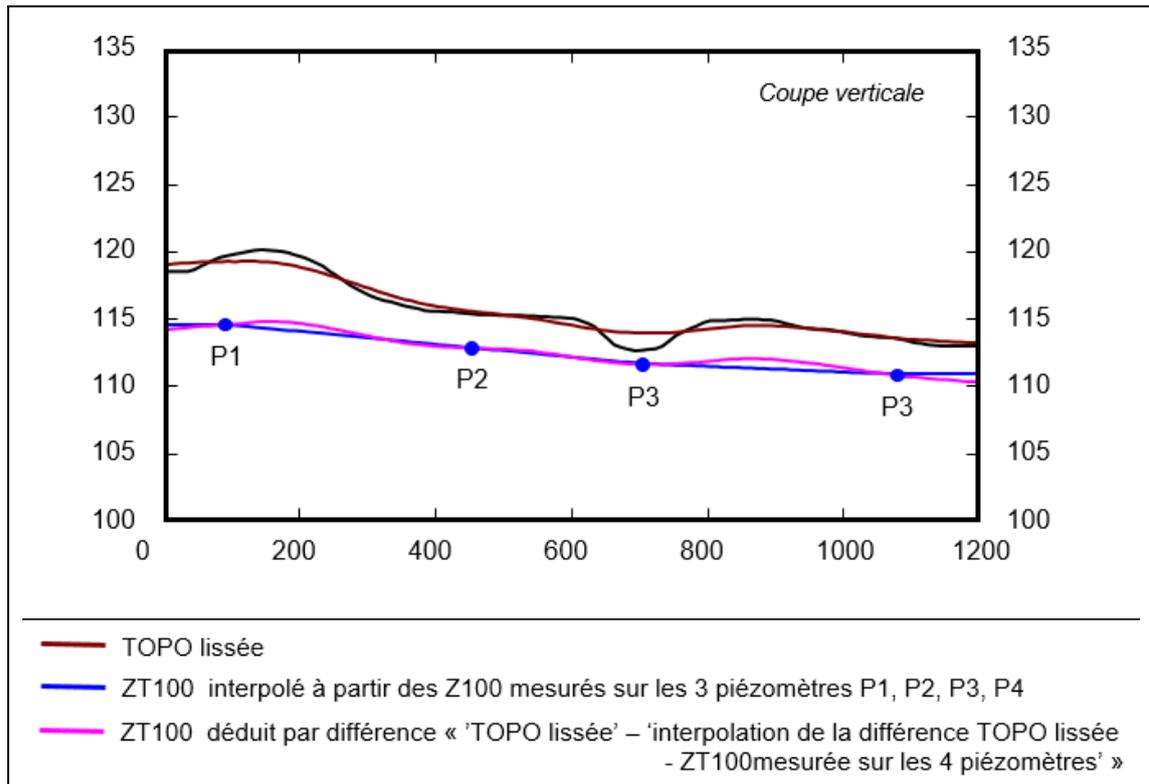


Illustration 44 - Comparaison de ZT100 obtenu par interpolation directe et par interpolation de la différence entre ZTopo lissée et ZT100

5.2. PRINCIPE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour disposer d'une information continue en tout point de la zone d'étude, les données ponctuelles doivent être interpolées au droit d'une grille régulière.

Pour réaliser cette interpolation, plusieurs techniques peuvent être utilisées (Arnaud Michel et Emery Xavier, 2000) :

- Les méthodes dites « déterministes »
- Les méthodes dites « géostatistiques »

Une étude bibliographique a été réalisée sur les méthodes existantes de cartographie et de caractérisation d'une surface piézométrique. Cette étude reprend pour partie, en les complétant, des éléments présentés dans les rapports BRGM RP-60153-FR (2011) et RP-69287-FR (2019).

5.2.1. Les méthodes « déterministes »

Les méthodes d'interpolation dites « déterministes » reposent sur l'application d'un algorithme purement mathématique, ne prenant pas en compte le phénomène physique, ne se basant pas non plus sur des paramètres calculables déductibles des données. Les méthodes les plus utilisées en hydrogéologie sont les méthodes d'inverse de la distance, du plus proche voisin, les splines ou fonctions de base radiale, les moindres carrés et les méthodes de triangulation.

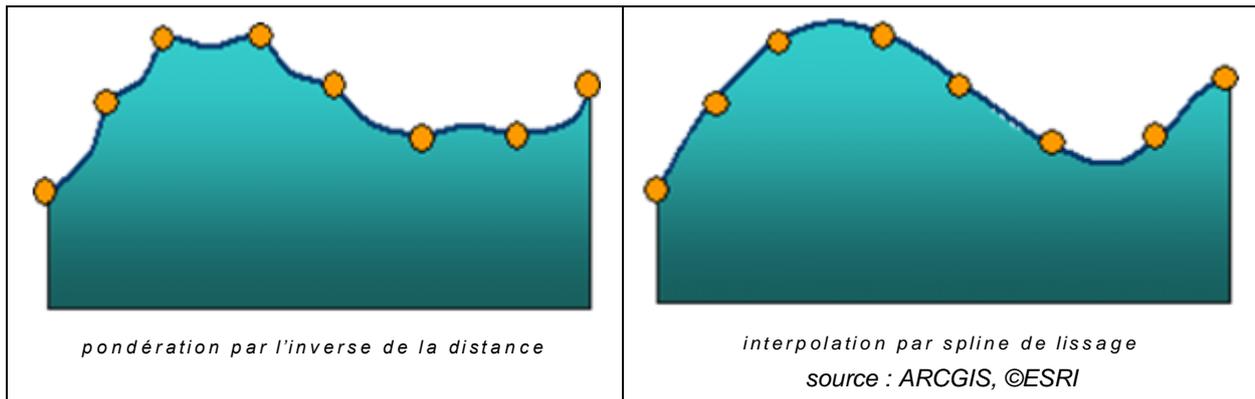


Illustration 45 - Schémas illustrant deux exemples de méthodes déterministes

La plupart des méthodes dites « déterministes » produisent une interpolation qui « respecte les données » (la valeur interpolée en un point connu retrouve bien la valeur observée en ce point), mais, entre les points, la forme de la surface obtenue dépend des propriétés mathématiques de la méthode obtenue. L'illustration 45 montre deux exemples : l'un obtenu par la méthode « inverse de la distance », l'autre par la méthode « spline ». Cette dernière génère des surfaces beaucoup plus lisses (en fait dérivables) que la première.

A titre d'exemple, s'il s'agit d'interpoler une surface piézométrique d'une nappe libre, les propriétés mathématiques des fonctions splines se prêtent mieux pour reproduire le comportement du niveau d'eau. Cela est dû en grande partie au effet de lissage caractérisant cette méthode d'interpolation.

Si ces méthodes sont assez simples à mettre en œuvre (il suffit de choisir laquelle on souhaite dans une liste déroulante), elles ne permettent pas de réellement caler les paramètres des algorithmes utilisés sur les données factuelles dont on dispose.

De plus :

- Certaines d'entre elles gèrent très mal les données mal distribuées dans l'espace (les cas où on a beaucoup de données concentrées sur un secteur, et peu ailleurs) ;
- Aucune ne fournit un indicateur de la précision du résultat obtenu ;
- Les éventuelles anisotropies du phénomène à cartographier ne sont pas prises en compte ;
- Ces interpolations sont monovariées : elles ne peuvent pas prendre en compte une variable secondaire corrélée à celle qu'on veut calculer ;
- On ne peut pas prendre en compte les erreurs de mesures sur la variable à cartographier ;
- Elles ne prennent pas en compte les corrélations spatiales du phénomène étudié.

5.2.2. Les méthodes géostatistiques

Les méthodes géostatistiques ou stochastiques se basent quant à elles sur une analyse statistique des données et de leurs corrélations spatiales. Autrement dit, on cherche à comprendre comment les données sont structurées dans l'espace (x,y,z, voire dans le temps t). Pour cela, un variogramme (cf. annexe 6 et section suivante pour sa description) est calculé, il permet d'analyser et de quantifier la continuité spatiale d'un phénomène, de prendre en compte des anisotropies (ou directions préférentielles).

De plus, il est possible par géostatistique de prendre en compte des corrélations entre plusieurs variables afin d'améliorer l'interpolation. Par exemple :

- Corrélation entre cotes piézométriques hautes eaux et basses eaux ;
- Corrélation entre surface piézométrique et topographie dans le cas de nappes libres.

D'autres contraintes peuvent être prises en compte par les méthodes géostatistiques :

- Prise en compte de la dérivée de la variable. Pour les surfaces piézométriques, cela peut permettre de prendre en compte des limites étanches ou un potentiel imposé (lac) ;
- Possibilité d'avoir un résultat compris entre deux bornes.

Enfin, les méthodes géostatistiques permettent de fournir une estimation de l'erreur d'interpolation, contrairement aux méthodes déterministes.

Pour ces différentes raisons, les méthodes géostatistiques tendent à être utilisées de plus en plus pour la cartographie de surfaces piézométriques.

Les recherches bibliographiques ont mis en évidence l'efficacité connue des méthodes d'interpolation géostatistiques par rapport aux méthodes déterministes. Cependant, chaque cas est différent et nécessite de tester différentes méthodes pour finalement déterminer la plus pertinente et précise (Adhikary and Dash, 2014).

Nous allons présenter ci-après l'éventail des techniques géostatistiques pouvant être appliquées à l'estimation de surfaces piézométriques. Les paragraphes reprennent en partie, en les synthétisant ou complétant, des éléments figurant dans les rapports BRGM RP-60153-FR, RP-62346-FR et RP-69287-FR.

a) **Le variogramme**

Dans un phénomène naturel comme la topographie ou la cote piézométrique, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et $x + h$ est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $0.5 * [Z(x) - Z(x+h)]^2$.

Le variogramme est calculé de la façon suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{N(h)}$$

avec :

x_i et $x_i + h$	=	coordonnées de 2 points de donnée séparés par une distance h
h	=	distance entre x_i et $x_i + h$
$N(h)$	=	nombre de couples de points distants de h
$\gamma(h)$	=	variogramme à la distance h
$Z(x_i)$	=	valeur mesurée au point x_i (cote piézométrique, épaisseur, teneur, ...)

$$Z(x_i + h) = \text{valeur mesurée au point } x_i + h$$

Le variogramme à la distance h correspond donc à la demi-moyenne des carrés des différences entre valeurs mesurées à une interdistance h .

Illustration 46 - Définition du variogramme

Le variogramme permet d'évaluer la corrélation entre deux observations en fonction de la distance qui sépare les points d'observation. Pour une direction donnée, il indique comment varie en moyenne l'écart (au carré) des valeurs prises en deux points x et $x+h$ en fonction de la distance h . Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.

La forme du variogramme à l'origine renseigne sur la continuité de la variable, les erreurs de mesures.

La forme du variogramme aux grandes distances permet d'établir le caractère stationnaire de la variable (la variable fluctue autour d'une valeur moyenne, sans tendance particulière) ou au contraire sa tendance à présenter une dérive spatiale (la variable a tendance à augmenter – ou diminuer – dans certaines directions ou localement).

Dans le cas de surfaces piézométriques, on observe bien souvent un variogramme continu à l'origine (la cote piézométrique varie peu à faible distance) et présentant une dérive à grande distance (la cote piézométrique s'approfondit). L'illustration 47 en montre un exemple. La valeur du variogramme augmente continument avec la distance.

Lorsqu'on travaille sur l'épaisseur de la ZNS (différence entre cote topographique – ou une version lissée de cette cote topographique – et la cote piézométrique), on observe un variogramme stationnaire, dans le cas de nappes libres influencées par la topographie (Illustration 48). Dans cette situation, le variogramme tend à se stabiliser au-delà d'une certaine distance, appelée « portée » du phénomène. La portée correspond à la distance à partir de laquelle il n'y a plus de corrélation entre les points, ce qui se traduit par l'apparition d'un palier sur le variogramme. Dans l'exemple de l'illustration 48, la portée serait de l'ordre de 7 000 m. Accessoirement cette portée permet de configurer un réseau de mesure. Pour bien caractériser les variations locales d'épaisseurs de ZNS dans le cas ci-dessus, les points de mesure doivent être espacés d'une distance bien inférieure à la portée (dans le cas contraire les points seraient indépendants), par exemple 3 500 m.

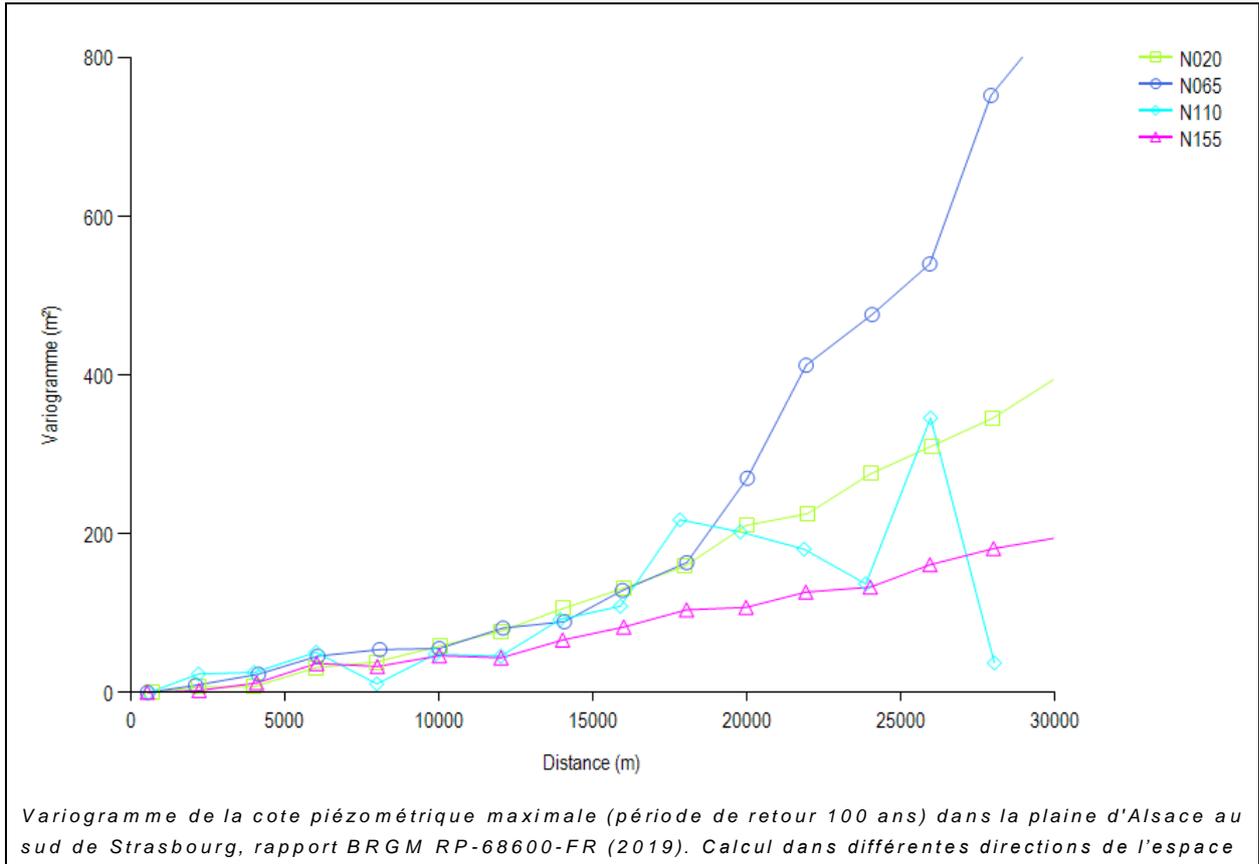


Illustration 47 - Variogramme non stationnaire. Exemple typique d'une cote piézométrique.

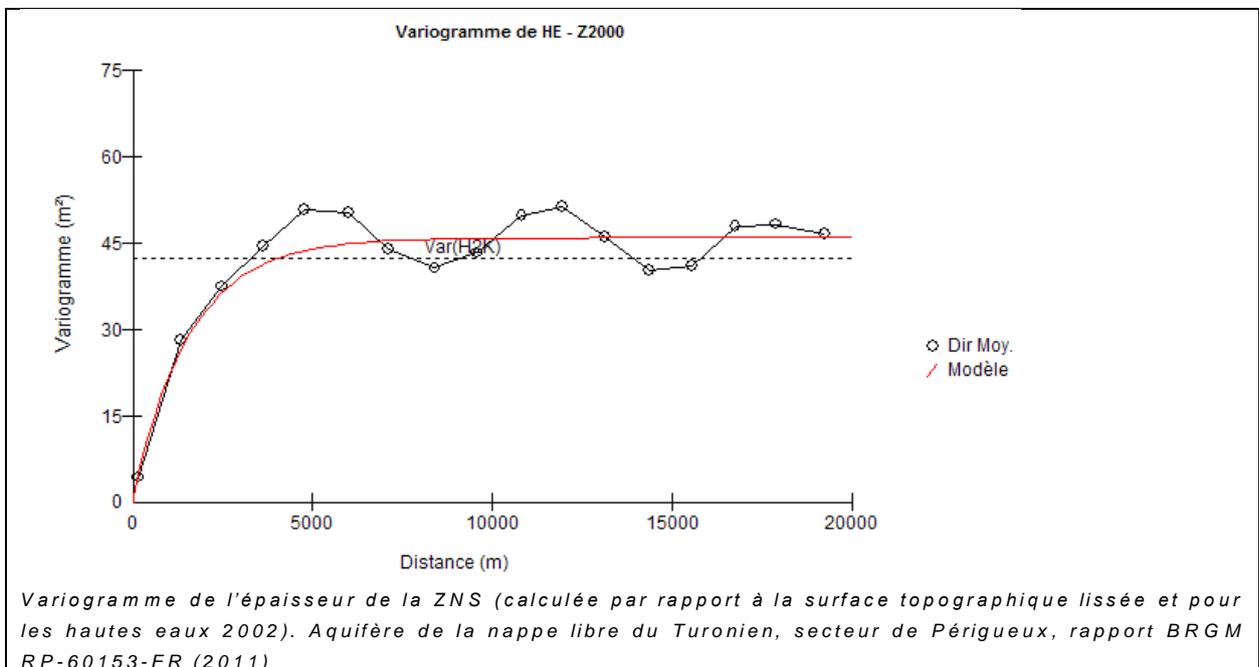


Illustration 48 - Variogramme stationnaire. Exemple de l'épaisseur de la ZNS pour une nappe libre

Une fois calculé le variogramme expérimental, celui-ci doit être ajusté par un modèle théorique (courbe en rouge sur l'illustration 48). Le calage du modèle de variogramme se fait à l'aide de modèles catalogués qui doivent respecter certaines propriétés mathématiques/statistiques pour être admissibles.

Les modèles de variogrammes les plus utilisés sont décrits en annexe 7.

Les composantes du modèle de variogramme sont :

- La portée : distance à partir de laquelle la variable n'est plus corrélée. Le variogramme atteint un palier au-delà de cette distance;
- Le palier : lorsqu'il est présent, on dit que la variable d'étude est stationnaire, il n'y a plus de corrélation entre les données au-delà de la portée ;
- L'anisotropie : si les valeurs du variogramme varient significativement en fonction de la direction de calcul (c'est le cas en effet du variogramme directionnel de la cote piézométrique, présenté sur l'illustration 47. Au-delà de 18km, la direction Nord 65 présente une dérive fortement amplifiée comparativement aux autres directions),

Il est possible d'observer un « effet pépite », traduisant une variation rapide des mesures à faible distance (ordonnée du variogramme non nulle à l'origine). Dans le cas de mesures piézométriques, l'effet de pépite a en général deux causes possibles : erreur de mesure, ou mesure influencée par un pompage.

Lorsque le variogramme est isotrope (même comportement dans toutes les directions), le calage du modèle se fait sur la direction moyenne du variogramme expérimental.

Bien que dans la nature il existe une très grande variété d'anisotropies, en géostatistique, on ne peut modéliser aisément que les anisotropies dites « géométriques » (cas où la direction de variabilité maximale est perpendiculaire à la direction de variabilité minimale, et où les 2 directions bissectrices ont le même variogramme) ou « zonales » (variabilité minimale dans une seule direction de l'espace).

b) Le krigeage et ses variantes

Dans la majorité des cas, le krigeage est la méthode qui donne les meilleures interpolations des niveaux d'eau souterraine. Ajoutons à cela qu'il a l'avantage de pouvoir produire des indicateurs statistiques (erreur réduite, écart-type de krigeage...) (M. Kholghi, S. M. Hosseini, 2008) permettant de réaliser des traitements géostatistiques post-interpolation comme la validation croisée (voir ci-après) ou une carte d'erreur (ou d'indice de confiance spatialisé de l'interpolation).

Le krigeage est une méthode géostatistique d'estimation (interpolation) basée sur le variogramme (fonction mathématique). Ses trois avantages principaux sont :

- La prise en compte de la structure du phénomène par l'intermédiaire du variogramme
- Le calcul de l'incertitude sur le résultat et la minimisation de cette incertitude ;
- La possibilité de prendre en compte des informations externes (autre variable corrélée, dérive dépendant des coordonnées, ...).

Il existe un très grand nombre de variantes de krigeage, permettant de prendre en compte diverses caractéristiques du comportement de la variable d'étude, ou aptes à prendre en compte des données particulières (comme des données de dérivées).

Les principales variantes de krigeage pouvant être utilisées dans le cas d'interpolation de surfaces piézométriques ou d'épaisseur de ZNS sont, à notre connaissance, les suivantes (voir études bibliographiques rapports BRGM RP-60153-FR et RP-69287-FR) :

- Le krigeage ordinaire : appelé ainsi lorsqu'il n'y a pas de dérive importante, c'est-à-dire lorsque le variogramme peut être ajusté soit par un modèle stationnaire (sphérique, cubique, exponentiel, gaussien...) soit par un modèle linéaire ou puissance ou par une combinaison de ces modèles.
- Le krigeage avec dérive, présentant lui-même deux variantes pouvant être combinées :
 - Le krigeage universel : appelé ainsi lorsqu'il existe une dérive dépendant des coordonnées (cas d'une surface piézométrique ayant une forme pouvant se rapprocher d'un plan incliné, ou d'une surface courbe de degré 2, 3, ...).
 - Le krigeage avec dérive externe : lorsque la dérive est donnée par une autre variable connue partout. Dans le cas de surfaces piézométrique, on peut ainsi utiliser la cote topographique de surface lorsqu'on peut faire l'hypothèse que la cote piézométrique est corrélée à la topographie ou à une version lissée de la topographie (dans le cas de nappes libres)
- Le krigeage sous contraintes d'inégalités : avec ce type de krigeage, on peut prendre en compte simultanément des points où la surface piézométrique est connue (données dites « hard data »), et des points où la surface piézométrique n'est pas connue, mais où on connaît une borne inférieure ou supérieure de la valeur (données dites « soft data », par exemple, pour un puits sec, la surface piézométrique est située quelque part sous la base du puits). L'illustration 49 en fournit un exemple. Dans cet exemple la cote ZT100 « exacte » est connue en 3 points (en marron). Pour deux autres points (points en bleu) seule est disponible une valeur de la cote piézométrique à un instant donné ZPIEZ(t). On a donc une contrainte indiquant que pour chacun de ces points on doit avoir $ZT100 > ZPIEZ(t)$. L'interpolation prenant en compte uniquement les données « exactes » est représentée en fuchsia. Elle ne respecte pas les deux points d'inégalité. En prenant en compte ces deux contraintes, une nouvelle surface ZT100 peut être calculée (en vert). Celle-ci respecte bien les contraintes $ZT100 > ZPIEZ(t)$ pour chacun des deux points. La technique de « krigeage avec conditions d'inégalités » n'est applicable que dans certaines conditions et nécessite plusieurs étapes de travail et l'utilisation de logiciels spécialisés :
 - La variable doit être stationnaire est gaussienne. Si ce n'est pas le cas, des pré-traitements permettent de se ramener au cas gaussien. Soit $Y(x_i)$ les valeurs gaussiennes « exactes » obtenues aux points x_i , et $Y_{\min}(x'_i)$ ou $Y_{\max}(x'_i)$ les contraintes min ou max aux points de données d'inégalité
 - On calcule, dans le domaine gaussien, le variogramme des données « exactes » $Y(x_i)$
 - Une seconde phase de traitement permet, grâce à un algorithme dit « échantillonneur de Gibbs », d'obtenir des valeurs $Y(x'_i)$ compatibles avec les données exactes $Y(x_i)$ et la structure spatiale, aux points d'inégalités $Y_{\min}(x'_i)$ et $Y_{\max}(x'_i)$: ces $Y(x'_i)$ représentent la valeur la plus probable respectant les inégalités aux points x'_i et sont utilisés par la suite comme des données « exactes » complémentaires. L'échantillonneur de Gibbs est un calcul itératif qui est censé fonctionner à condition que toutes les valeurs (égalités et inégalités) soient pris en compte simultanément, ce qui peut restreindre son utilisation à un nombre limité de données (quelques centaines).

- Le nouveau jeu de données constitué par les $Y(x_i)$ complété par les $Y(x'_i)$ et alors utilisé pour effectuer un krigeage (ou, variante, des simulations conditionnelles – voir plus loin) dans le domaine gaussien
- Une transformation inverse ramène les valeurs dans le domaine initial des valeurs brutes (cote piézométrique, épaisseur de ZNS)
- Le krigeage avec prise en compte de dérivées partielles : dans ce cas il est possible de prendre en compte simultanément des valeurs de cote piézométrique et des valeurs de ligne de courant, ou de lignes de flux nul. Par exemple le fait que, lorsqu'on a une limite imperméable, à flux nul, les isopièzes doivent être perpendiculaires à cette limite. Un exemple est donné dans le rapport BRGM RP-62346-FR et résumé Illustration 50.
- Le co-krigeage : Dans ce type de krigeage, on interpole une variable A en utilisant les points de mesure de la variable A, ainsi que les points de mesure d'une autre variable B qui est corrélée spatialement à la variable A. Typiquement une cote piézométrique hautes eaux d'une année peut être corrélée à la cote basses eaux de la même année ou à la cote hautes eaux de l'année précédente. Les points de mesure où on connaît A peuvent être en nombre et localisation différentes de ceux où on connaît B, mais pour mettre en œuvre la technique, il faut des points où l'on connaît aux mêmes points la valeur de la variable A et de la variable B. Un exemple est donné dans le rapport BRGM RP-60153-FR.

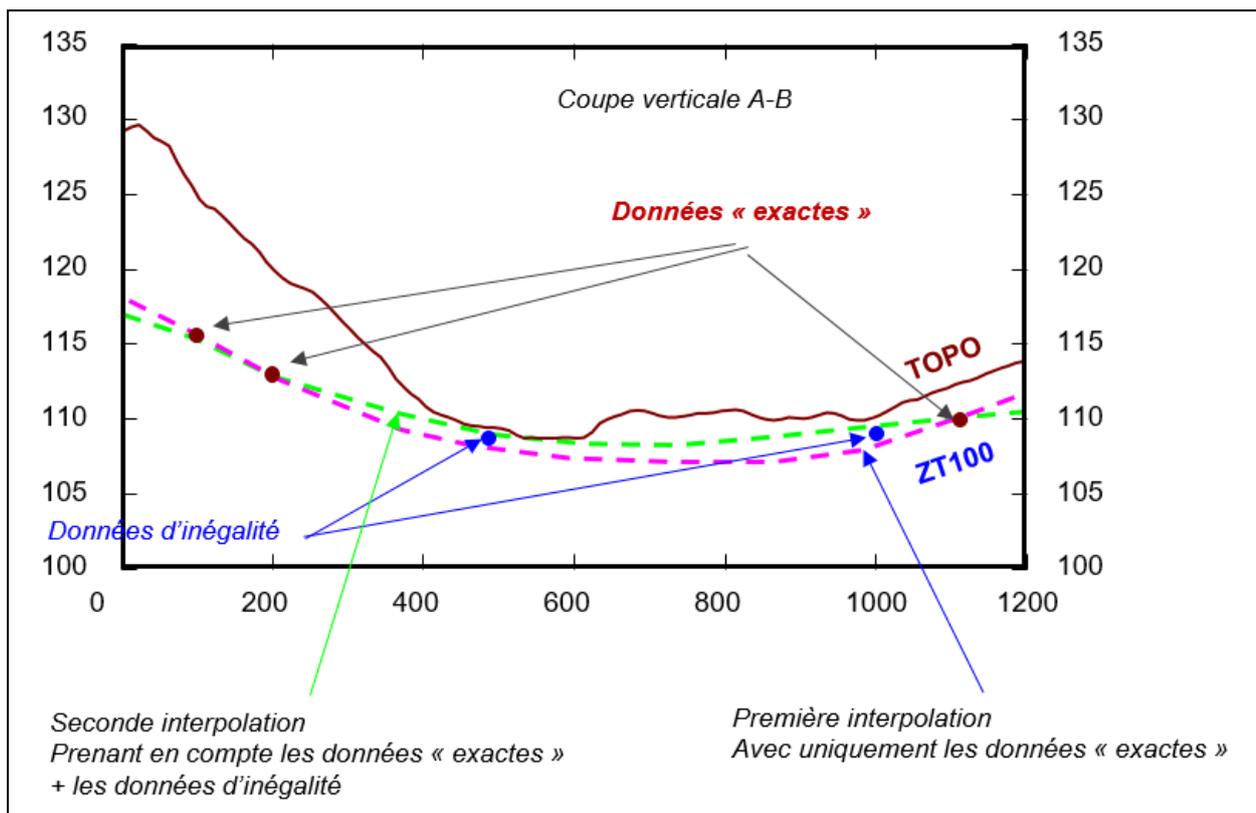
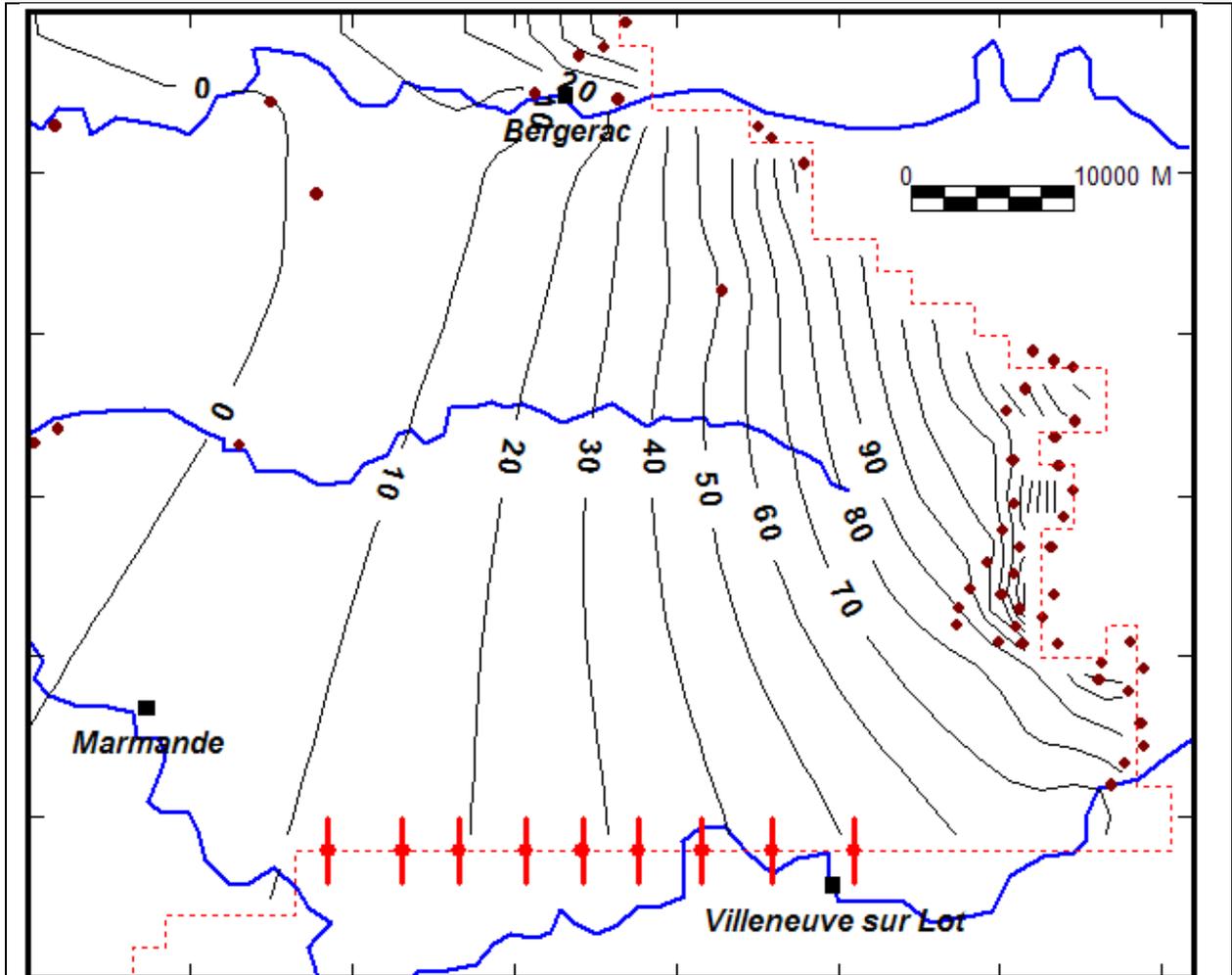


Illustration 49 - Exemple de prise en compte de donnée d'inégalité



La limite ouest-est en pointillés au nord de Villeneuve sur Lot représente une limite étanche. Les traits rouges perpendiculaires à cette limite représentent les directions de flux nul introduites dans le krigeage. Les isopièzes obtenues en prenant en compte ces données (en plus des piézomètres situés plus au nord) sont relativement bien perpendiculaire à la limite étanche, bien mieux en tout cas que si les contraintes de flux nul ne sont pas prises en compte

Illustration 50 - Exemple de prise en compte de limites à flux nul

Tous les types de krigeage fournissent deux valeurs :

- La valeur estimée (par exemple de la cote piézométrique) en tout point, à partir des données d'entrée ;
- La variance de krigeage : cette variance représente la variance de l'erreur d'estimation. En effet le krigeage garantit une erreur d'estimation nulle en moyenne (globalement on ne se trompe pas), mais non nulle en tout point. Ainsi en un point x particulier (non mesuré), la vraie valeur (inconnue) étant $Z(x)$, la valeur estimée à partir des données environnantes, notée $Z^*(x)$, ne sera jamais exactement égale à la vraie valeur. Il y a une erreur d'estimation $Err(x) = Z^*(x) - Z(x)$. Le krigeage a comme propriété que la moyenne de cette erreur (sur l'ensemble du domaine d'étude) est nulle, et que sa variance, égale à la moyenne des $(Z^*(x) - Z(x))^2$ peut être calculée par le krigeage (même si on ne connaît jamais les vrais $Z(x)$). On peut donc obtenir une carte de l'écart-type de krigeage (la racine carrée de la variance de krigeage), qui donne une idée de l'incertitude associée à chaque valeur estimée. Ces cartes d'incertitudes peuvent être formulées en terme d'indice de confiance.

Ainsi l'illustration 51 montre les cartes piézométriques maximales (avec période de retour de 100 ans) obtenues à partir de deux jeux de données, par krigeage ordinaire, dans le cas de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg (rapport BRGM RP-68600-FR).

L'illustration 52 montre les cartes des écarts-types d'interpolation obtenus pour chacun des jeux de données. Ces cartes permettent d'apprécier la marge d'erreur sur le résultat, et donc la confiance en tout point de la carte piézométrique. Par exemple, une estimation avec un écart-type de l'erreur de moins de 1 mètre peut être considérée comme très fiable. Lorsque l'écart-type dépasse 5m, la fiabilité de la valeur interpolée devient nettement plus faible et peut être jugée mauvaise, s'il s'agit d'estimer un risque d'inondation par remontée de nappe.

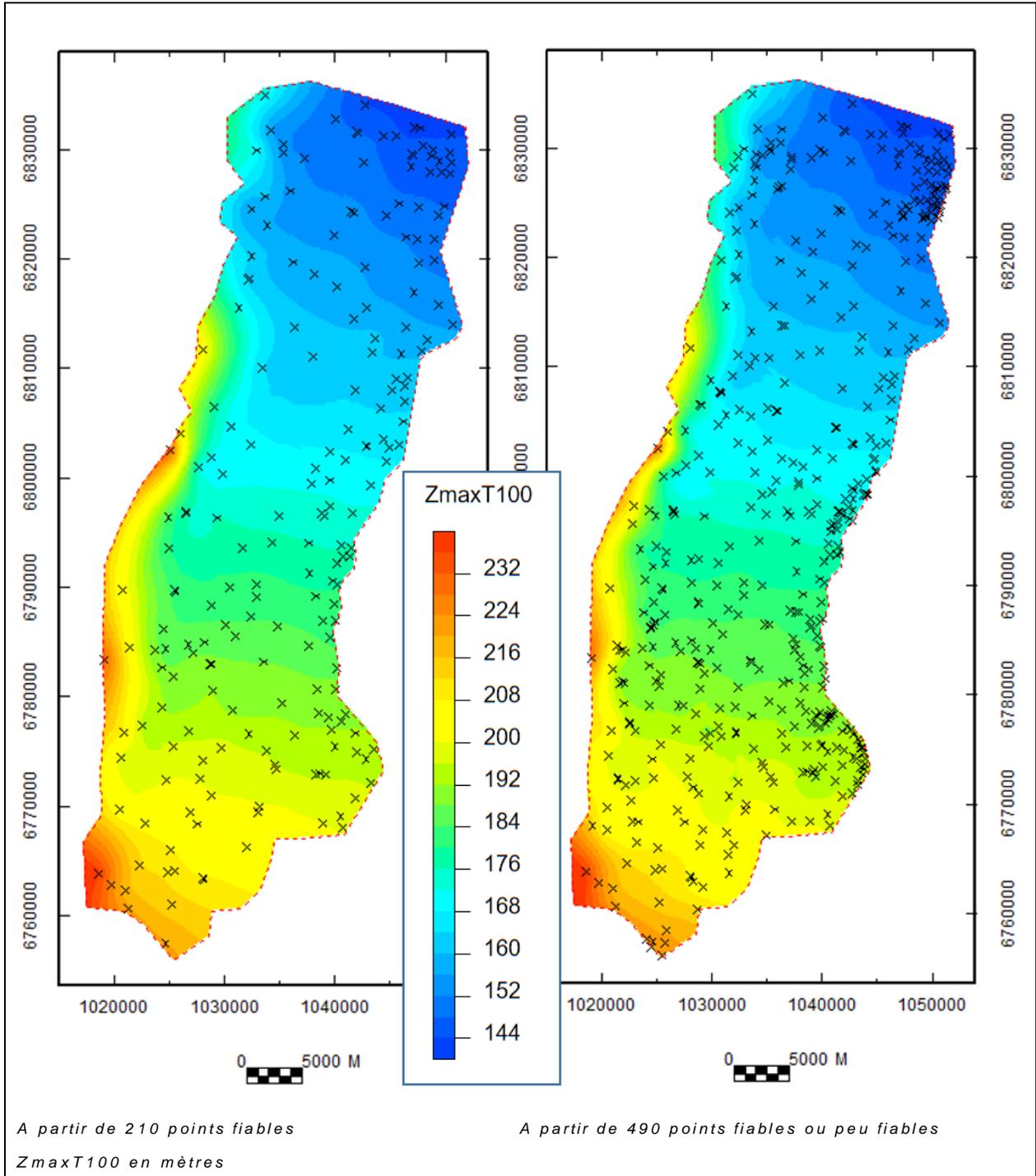


Illustration 51 - Cartes des surfaces piézométriques obtenues par krigeage avec deux jeux de données

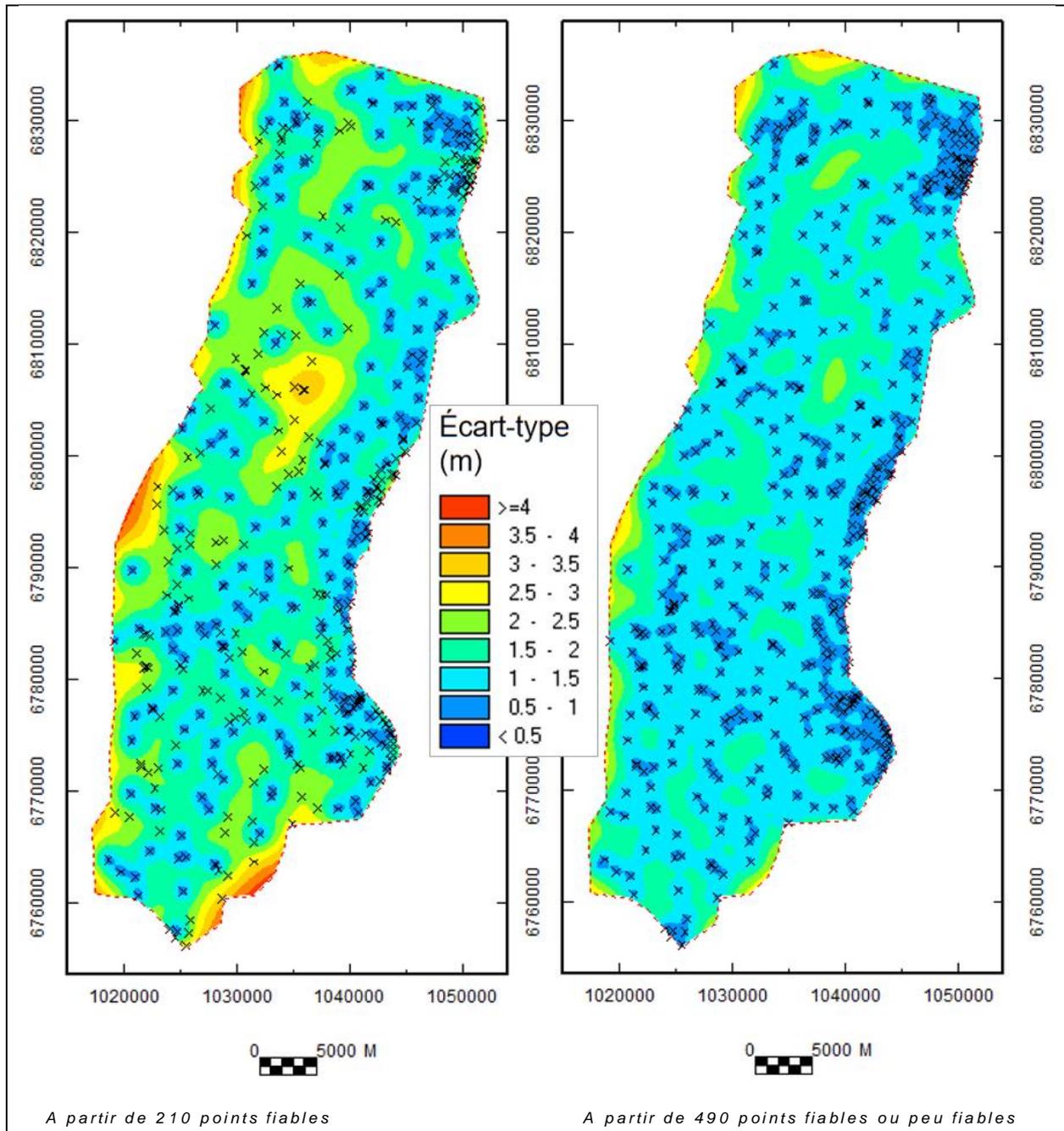


Illustration 52 - Carte des écarts-type de krigeage obtenus avec les deux jeux de données

Certains des types de krigeage évoqués ci-dessus sont assez délicats à mettre en œuvre et nécessitent de bonnes compétences géostatistiques et des logiciels adaptés. Ceci conduit à un temps de travail (donc un coût) plus important (mais compensé par le fait de pouvoir modéliser plus fidèlement certains phénomènes).

Ainsi :

- Le krigeage avec dérive externe n'est pas disponible dans tous les logiciels ;
- Le krigeage avec dérivées partielles ou le co-krigeage sont disponibles seulement dans des logiciels spécialisés ;

- Le krigeage avec conditions d'inégalités est encore plus spécifique. Il est assez lourd à mettre en œuvre et ne peut pas être appliqué dans tous les cas (notamment s'il y a beaucoup de données)

Le krigeage ordinaire et le krigeage avec dérive universelle sont en revanche des techniques beaucoup répandues et plus facilement utilisables en routine. Leur inconvénient est que ces types de krigeage ne sont parfois pas les mieux adaptés à certaines situations.

En fonction du type et nombre de données, il faut donc trouver un compromis entre qualité du résultat, budget et logiciels disponibles pour l'étude.

c) La validation croisée

La méthode d'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme permet de procéder à une validation des estimations par la méthode nommée « validation croisée ». La validation croisée consiste à ré-interpoler la valeur en un point de donnée « P » à partir des valeurs mesurées aux autres données, en faisant « comme si » le point « P » n'avait pas été mesuré.

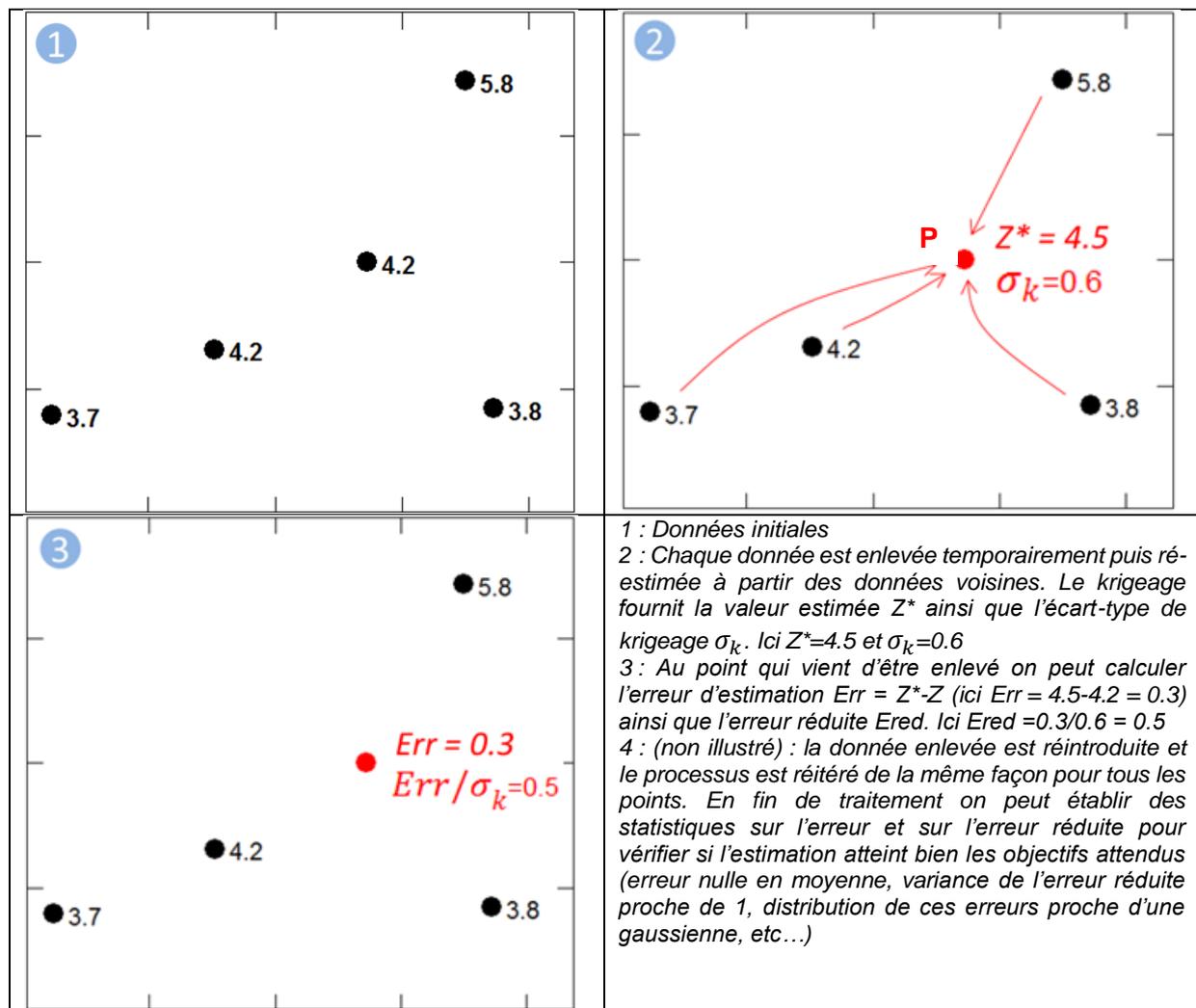


Illustration 53 - Principe de la validation croisée

L'illustration 53 montre ainsi : à l'étape (1) le jeu de données initial, à l'étape (2) le point en rouge est écarté et sa valeur est ré estimée à partir des autres données. On obtient par exemple une valeur interpolée $Z^* = 4.5$ et lorsque l'estimation a été réalisée par méthode géostatistique un écart-type de krigeage $\sigma_k = 0.6$. On peut alors calculer l'erreur d'estimation $Err = Z^* - Z = 0.3$ ainsi que l'erreur réduite $Ered = \frac{Err}{\sigma_k} = 0.5$.

Ce processus est répété pour tous les points de donnée. Pour chaque point de donnée « P » on dispose ainsi de la « vraie » valeur mesurée, de son estimation à partir de données voisines, ainsi que d'une mesure de l'erreur d'interpolation lorsque l'estimation a été effectuée par méthode géostatistique.

Après avoir balayé ainsi tous les points, la méthode établit une série de statistiques sur les résultats et produit divers graphiques et tableaux de synthèse. Ces indicateurs sont comparés à des valeurs de référence et permettent de juger de la qualité des résultats :

- Le coefficient de corrélation $Rho(Z^*, Z)$, entre la valeur interpolée Z^* et la valeur exacte Z doit être proche de 1.
- L'écart-type de l'« erreur réduite » $Ered = \frac{Err}{\sigma_k}$ doit se rapprocher au plus près de 1.
- Les points pour lesquels la valeur de $Ered$ dépasse un certain seuil sont visualisés en carte.
- Le nombre de ces points est également comparé à des standards.

Cette méthode de validation croisée est une méthode extrêmement puissante pour détecter rapidement les points potentiellement erronés. Une fois les points aberrants identifiés puis corrigés ou éliminés, un nouveau variogramme est calculé pour détecter les erreurs résiduelles. Le processus peut être réitéré plusieurs fois pour éliminer les erreurs.

La validation croisée permet de « nettoyer » le jeu de données, mais également de vérifier que le modèle géostatistique (le modèle de variogramme) est bien étalonné. C'est une étape indispensable avant de réaliser l'interpolation finale par krigeage, ou de générer des simulations stochastiques.

d) Les simulations stochastiques

Les simulations stochastiques construites par géostatistique sont une alternative au krigeage, que l'on peut utiliser pour estimer des probabilités de dépasser un certain seuil. Par exemple pour calculer qu'en un point la surface piézométrique dépasse une certaine cote. En ce sens elles semblent potentiellement utilisables pour estimer les risques d'inondation par remontée de nappe.

Pour bien comprendre la différence entre krigeage et simulations stochastiques, il convient d'abord de préciser quelques propriétés du krigeage, de définir les simulations, puis de comparer simulations et krigeage.

Le krigeage est conçu pour fournir la valeur la plus probable en un point. Cette valeur est assortie d'une variance de krigeage (ou de sa racine carrée : l'écart-type), correspondant à la variance de l'erreur d'estimation en ce point.

Imaginons qu'en un point P:

- la valeur de la cote piézométrique maximale ZT100 interpolée est égale à $Z^*=100\text{m}$,

- et l'écart-type de krigeage vaut $\sigma_k = 3 \text{ m}$

Si la cote topographique en ce point est de 103 m , comment estimer le risque que la cote piézométrique $ZT100$ réelle soit supérieure à 103 m ?

Pour avoir une estimation de ce risque, il faut connaître la distribution de l'erreur de krigeage.

Si par exemple la distribution de l'erreur de krigeage est gaussienne, on peut déduire des propriétés de la loi gaussienne qu'il y a 66% de chance pour que l'erreur soit entre +/- une fois l'écart-type σ_k , soit entre -3 et +3 m.

Autrement dit, il y a 66% de chance pour que la cote $ZT100$ réelle soit comprise entre 97 et 103m. Il reste donc 34 % de chance pour que l'erreur soit plus grande que 3m (en valeur absolue). La loi gaussienne étant symétrique, cela correspond à 17% de chance pour qu'elle soit supérieure à +3m et 17% de chance pour qu'elle soit inférieure à -3m. En conclusion, si la distribution de l'erreur est gaussienne, on aura 17% de chances pour que la cote $ZT100$ réelle soit supérieure à 103m, et qu'on ait donc inondation en surface.

Le raisonnement ci-dessus ne peut malheureusement pas être utilisé, car de façon générale, les études menées jusqu'à présent montrent que la distribution des erreurs de krigeage n'est pas exactement gaussienne, même si parfois elle semble se rapprocher d'une telle distribution.

Par ailleurs le krigeage, comme tout interpolateur, a tendance à lisser les valeurs. Entre deux points de mesure, le krigeage ne prendra pas le risque de prédire des valeurs très fluctuantes, mais raccordera ces valeurs de façon assez progressive.

Si on souhaite obtenir une estimation du risque de dépasser un seuil donné, la technique consiste à réaliser une série de simulations conditionnelles géostatistiques (ou simulations stochastiques). Chaque simulation conditionnelle représente une variante possible de la carte piézométrique :

- Qui respecte les valeurs mesurées (d'où le terme conditionnel) ;
- Dont la distribution statistique (histogramme) est la même que celles des données d'entrée ;
- Dont le variogramme est identique au variogramme des données d'entrée.

Chacune de ces simulations est équiprobable et est censée donner une image de la variabilité réelle du phénomène.

Pour obtenir la probabilité que la valeur réelle de la cote piézométrique dépasse 103m au point P précédent, on réalisera par exemple 100 simulations conditionnelles. On comptera le nombre de simulations pour lesquelles la valeur au point P dépasse 103m, et le pourcentage de ces simulations donnera la probabilité de dépasser 103m en ce point.

A titre d'illustration nous prenons le cas de la cartographie en 2D des teneurs en plomb Pb à partir de ces deux méthodes. L'illustration 54 permet ainsi de mieux appréhender visuellement la différence entre krigeage et simulation. La carte en haut à gauche (labélisée « KRI ») représente la carte de la concentration en plomb, obtenue par krigeage à partir des 199 points de mesure représentés sur la carte (il s'agit d'une campagne de prospection géochimique sur la carte géologique de Montcoutant, la taille de la zone visualisée est de 30km x 20 km). Le contour noir représente l'isovaleur 45 ppm. Les deux cartes « S1 » et « S3 » correspondent à deux simulations conditionnelles (parmi un jeu de 100 simulations). La comparaison de la carte krigée et des deux simulations montre que :

- Chacune des cartes respecte les données : les plages de valeurs fortes et faibles autour des points de données se retrouvent aux mêmes emplacements ;
- Les deux simulations, lorsqu'on s'éloigne des points de données, présentent plus de variabilité que la carte krigée : elles sont moins lisses. Elles peuvent faire apparaître des valeurs fortes (exemple > 75 ppm) en dehors de l'isovaleur 45ppm. D'une simulation à l'autre il peut y avoir des différences plus ou moins importantes loin des données.
- Les différentes simulations (conditionnelles) apparaissent comme autant de scénarios reflétant les variations possibles entre deux points de données, alors que le krigeage représente plutôt le chemin le plus probable et continu pour rejoindre les valeurs entre deux données
- La carte de probabilité que la concentration en Pb soit supérieure à 45 ppm est obtenue en comptant, pour chaque « pixel » de la carte, le pourcentage de simulations pour lesquelles la valeur au pixel est supérieure à 45 ppm. Cette carte permet de vérifier que les zones où cette probabilité est très forte (>95%) coïncide bien avec le contour 45 ppm du krigeage, mais qu'un certain nombre d'autres secteurs présentent une probabilité importante d'avoir une concentration supérieure à 45 ppm. Le krigeage ne pourrait apporter une information aussi précise du fait de sa tendance à lisser les valeurs.

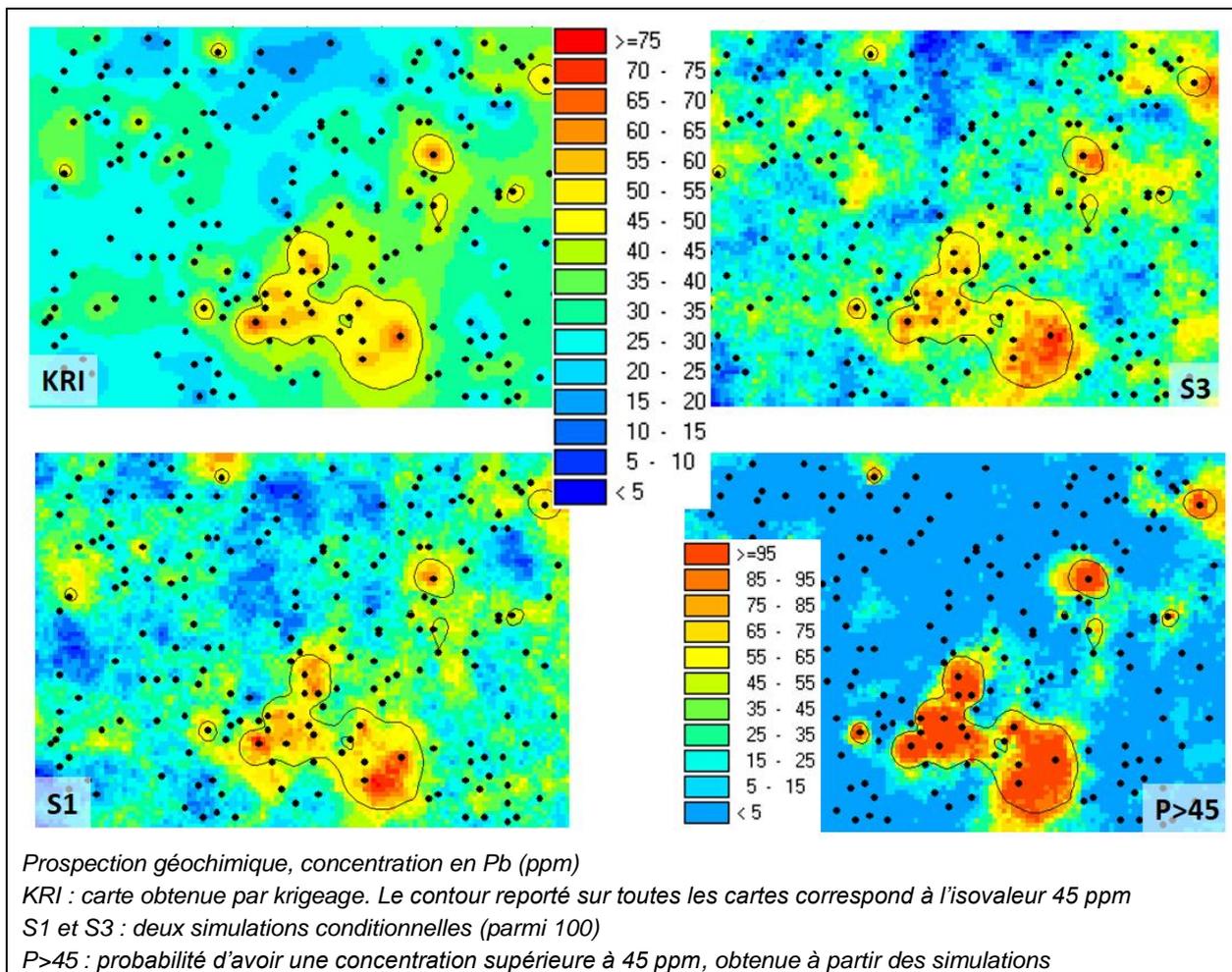


Illustration 54 - Comparaison simulation et krigeage

Notons qu'il n'y a pas « d'incompatibilité » entre simulation et krigeage. En effet la moyenne des 100 simulations précédentes coïncide avec le krigeage, du fait des propriétés mathématiques

des simulations. Le krigeage reste donc la méthode la plus directe pour estimer la valeur probable en un point, mais n'est pas assez puissant pour prédire la distribution des valeurs possibles autour de cette valeur probable. Elle ne fournit que l'écart-type des erreurs. Les simulations en revanche permettent d'accéder à la distribution complète des valeurs possibles, et donc à l'analyse de risque de dépassement de seuil.

Evidemment il y a un prix à payer. Les simulations sont beaucoup plus lourdes à mettre en œuvre que le krigeage, à la fois en temps de calcul, en complexité, en espace disque pour stocker les n simulations, en hypothèses à vérifier pour l'applicabilité de ces techniques.

Les simulations géostatistiques s'appliqueront donc dans les cas à fort enjeux, pour lesquels un nombre suffisant de données de qualité est disponible (de même que le budget nécessaire au travail).

e) Les limites de la géostatistique (et des autres méthodes)

La géostatistique (tout comme les autres méthodes) ne permet pas de prendre en compte parfaitement toutes les configurations ou toute la complexité rencontrées dans la nature, tant celles-ci sont diverses.

Lorsqu'on travaille sur une très grande zone, les caractéristiques de l'aquifère varient d'un endroit à l'autre et ne peuvent raisonnablement être représentées par un modèle de variogramme unique. Idéalement, il faudrait adapter presque continuellement les paramètres du variogramme pour les caler au mieux aux caractéristiques locales. Certains logiciels permettent ce genre d'adaptation, mais le contrôle des paramètres reste beaucoup trop « boîte noire » et les temps de traitement très importants, pour souvent un résultat très décevant. La solution de prendre la main sur les logiciels, en contrôlant « manuellement » les paramètres de calcul d'un endroit à l'autre est possible, mais est chronophage. Ce n'est pas non plus toujours possible lorsque le nombre de données disponibles dans certains secteurs est trop faible.

Un autre facteur limitant est l'accessibilité à un logiciel suffisamment performant.

La relative lourdeur d'applications de certaines techniques est également un frein en cas de budget limité. Cela concerne essentiellement le krigeage avec conditions d'inégalités et les simulations. Cependant, l'amélioration des performances des ordinateurs permet une mise en œuvre de plus en plus rapide et ces limitations tendent à s'estomper, même si elles sont encore réelles.

Parmi les logiciels que nous avons eu l'occasion de tester :

- GDM (développé et distribué par le BRGM) permet de réaliser le krigeage ordinaire, universel, et avec dérive externe. Il dispose d'un module (utilisable par le BRGM seulement) permettant de réaliser le krigeage avec dérivées partielles. Les simulations et le krigeage avec conditions d'inégalité ne sont pas disponibles.
- Isatis (développé et distribué par Géovariances) : c'est probablement le logiciel commercial le plus complet. Il comprend toutes les fonctions (krigeage et simulations) citées précédemment.
- R Geostat est une librairie R développée par Mines ParisTech. Elle comprend également toutes les fonctions géostatistiques. Son utilisation est toutefois limitée à des applications 100% recherche.

- ArcGIS propose un module « Geostatistical analyst » qui offre diverses possibilités de krigeage, mais pas le krigeage avec conditions d'inégalités, ni avec dérivées, ni les simulations.
- Surfer (distribué par Golden software) permet de faire du krigeage ordinaire, du cokrigeage, du krigeage avec dérive externe. Il n'a pas de fonction pour le krigeage avec dérivées ni avec conditions d'inégalités. Il ne permet pas non plus les simulations.
- Diverses librairies existent en R (Gstat notamment). Nous ne les avons pas testées.

5.2.3. Comparaison des différentes méthodes

Le Tableau 4 ci-après résume les principaux avantages/inconvénients des différents types de krigeage, et compare leur plus ou moins grande facilité de mise en œuvre.

Technique	Intérêt, application	Limitations	Facilité de mise en oeuvre
Krigeage ordinaire du niveau piézométrique ou de l'épaisseur de ZNS	Relativement simple à mettre en œuvre	Limitations dans les cas non stationnaires Ne prend pas en compte tous les types d'informations (données d'inégalité, dérivées partielles, ..)	+++++
(co)-Krigeage avec dérive externe = variable dérivée de la topographie	Pour les nappes libres, permet de prendre en compte corrélation entre niveau piézométrique et la topographie ou une version lissée de la topographie	Technique relativement simple mais sujette à instabilités numériques. Risque de trop fort conditionnement à la topographie si pas assez de mesures piézométriques Pas disponible dans tous les logiciels.	+++
(co)-Krigeage avec dérive externe basée sur les cartes issues d'un modèle hydrodynamique existant	Permet de prendre en compte un modèle bien calé Intègre les contraintes physiques	Technique relativement simple mais sujette à instabilités numériques. Pas disponible dans tous les logiciels. Nécessite de disposer de cartes piézométriques issues d'un modèle hydrodynamique bien calé	+++
Co-krigeage du niveau piézométrique à partir de 2 dates	Permet de prendre en compte les données d'une autre année. Intérêt si disponibilité d'une campagne à haute densité d'informations et calcul à une autre date.	Technique sans intérêt si les données sont toutes mesurées aux deux dates. Les deux dates doivent être synchrones	+++
Co-krigeage du niveau piézométrique + dérivées partielles	Permet de prendre en compte des contraintes physiques (limite étanche, crête hydrogéologique)	Technique délicate à mettre en œuvre. Pas/peu de logiciel existant	+
Krigeage avec prise en compte de contraintes d'inégalités	Utile quand on dispose de données d'intervalle (min-max)	Conditions de mise en œuvre délicates et pouvant être limitantes. Disponible dans très peu de logiciels	+
Simulations géostatistiques (cote piézométrique, épaisseur de ZNS)	Permet d'accéder au calcul du risque de dépassement d'un seuil.	Technique relativement lourde à mettre en œuvre. Conditions d'application pouvant être limitantes Disponible dans très peu de logiciels	++

Tableau 4 Comparaison des différents types de krigeage et des simulations

5.2.4. Etude bibliographique (géostatistique et hydrogéologie)

Georges Matheron (1930-2000) est le fondateur de la géostatistique. Il débute sa carrière de 1954 à 1963 au BRGM et y publie son premier ouvrage. Quelques années plus tard (1968) il prend la direction du Centre de Géostatistiques de l'Ecole des Mines de Paris (basé à Fontainebleau), où il terminera sa carrière.

Les premières applications géostatistiques se tournent vers le domaine minier, puis pétrolier, avant de se diversifier massivement à partir des années 80 dans tous les domaines des géosciences. De ce fait les premières applications en hydrogéologie sont plus récentes que dans pour d'autres domaines « traditionnels » de la géostatistique comme le minier.

Parmi ces applications, citons :

Aboufirassi et Marino (1983) utilisent le krigeage pour interpoler les cotes piézométriques. Ils appliquent la technique du krigeage universel (qui permet d'enlever la dérive dépendant des coordonnées).

Plus tard, de nouvelles techniques de krigeage apparaissent. Celles-ci permettent de prendre en compte les corrélations entre topographie et surface piézométrique dans le cas des nappes libres. Ce sont les techniques du krigeage avec dérive externe et du co-krigeage collocalisé (Maréchal 1984, Hoeksema 1989, Chilès 1992, Deutsch 1992, Goovaerts 1997, Chilès 1999, Renard et Jeannée 2008, Bourguine et Pédrón 2011, Maillot et al 2019). Ces méthodes permettent d'exploiter une corrélation linéaire entre la variable d'intérêt (la cote piézométrique) et une variable « externe » supposée connue partout. Dans le cas d'utilisation de la dérive externe liée à la topographie, plusieurs auteurs utilisent une version lissée de la topographie. La taille de la fenêtre de lissage doit être adaptée au contexte. Elle est ainsi fixée à 325 m dans le cas de Maillot et al (distance moyenne entre rivières), 1000 m dans le cas de Renard et Jeannée, 2000m dans le cas de Bourguine et Pédrón (taille optimisant la corrélation topographie lissée – cote piézo).

Desbarats et al. (2002) étudie le krigeage avec dérive externe et compare l'utilisation, comme dérive externe, soit de la cote topographique, soit de l'indicateur « TOPMODEL » lié à un calcul de réseau de drainage, sans d'ailleurs conclure que cette variante donne un meilleur résultat que la topographie elle-même. Peterson et Barnet (2004) en proposent une variante intéressante : ils intègrent une variable supplémentaire, construite par régression intégrant la variable temps et permettant d'utiliser les données des piézomètres qui ont été fermés et ne sont plus suivis. Ceci permet d'obtenir des données complémentaires réduisant les incertitudes.

De nombreux auteurs comparent les résultats obtenus en utilisant différentes méthodes d'interpolation de la profondeur du niveau de la nappe sur leurs zones d'études (Adhikary 2014, Varouchakis 2013, Sun 2009).

Même si les méthodes déterministes comme l'inverse de la distance ou les splines peuvent donner des résultats convenables, l'utilisation de la géostatistique est de plus en plus répandue en hydrogéologie. De plus, les nouvelles techniques comme le krigeage avec dérive externe ou co-krigeage donnent des estimations plus précises (Ahmadi 2008, Bourguine 2011).

Toutefois, les méthodes de krigeage ci-dessus trouvent leurs limites dans le fait qu'elles n'intègrent pas toute la physique du problème, ni certaines contraintes hydrogéologiques. Ainsi les contraintes de flux nul ne sont pas satisfaites (les méthodes d'interpolation « traditionnelles » ne les respectent pas non plus). Pourtant des solutions théoriques existent. Ainsi Chilès et Delfiner (1999, p. 319) expliquent comment introduire des contraintes de flux nul, se référant à une présentation non publiée de J.P. Delhomme en 1979. Plus récemment cette possibilité est

développée dans un travail de P. Le Cointe (2006) sous la direction de J.P. Delhomme. Dans ce travail un algorithme en fortran permet de prendre en compte les conditions de Dirichlet (potentiel imposé) et de Neuman (gradient connu dans une direction). Ces contraintes sont introduites de façon discrétisée pour les variogrammes non dérivables. Kuhlman et Pardo-Iguzquiza (2010) détaillent les équations à mettre en œuvre dans le cas de covariances (variogrammes) dérivables. Grâce à ces travaux récents, il devient donc maintenant possible de prendre en compte des contraintes de flux nul (barrière étanche, crête piézométrique) ainsi que des contraintes de potentiel imposé (soit un potentiel connu : lac connecté à la nappe, soit un potentiel inconnu, mais constant). Ces travaux complètent ceux de Pardo-Iguzquiza et Chica Olmo (2007) visant à interpoler directement des gradients à partir de mesures piézométriques. Toutefois ces méthodes restent encore expérimentales. Les exemples présentés dans ces travaux sont pour l'essentiel des cas assez simples. La mise en œuvre sur des aquifères plus complexes ainsi que la façon de paramétrer ces méthodes et de les mettre en œuvre de façon pratique « industrielle » sont encore des domaines qui n'ont pas encore été complètement investigués. Bourguin et Pédron 2013 montrent deux exemples d'application concernant la nappe captive de l'Eocène en région Aquitaine.

Enfin, l'application du krigeage avec condition d'inégalité est illustrée tout récemment par Maillot et al 2019. Les auteurs y présentent la cartographie de la surface piézométrique de la nappe de la plaine alluviale de la Seine en région parisienne. Pour effectuer cette cartographie, les auteurs travaillent sur l'épaisseur de la ZNS (zone non saturée), en calculant cette épaisseur non pas par rapport à la topographie, mais par rapport à la topographie lissée (sur une fenêtre de 325 m). Les points répertoriés « puits sec » sont entrés comme contrainte d'inégalité, de façon que l'interpolation de la ZNS en ces points soit supérieure à la profondeur du puits. L'épaisseur de la ZNS ainsi interpolée est ensuite retranchée du MNT lissé pour obtenir le toit de la nappe. L'utilisation de cette technique (passage par la ZNS) est possible car la nappe est libre et relativement parallèle à la topographie.

Il est à noter par ailleurs que des techniques alternatives commencent à voir le jour :

- Des interpolations basées sur la logique floue et les réseaux de neurones (Kurtulus et Flipo, 2012; 15 Sun et al., 2009). Ces méthodes présentent toutefois l'inconvénient principal de ne pas pouvoir fournir un résultat ayant une structure d'erreur cohérente (Flipo and Kurtulus, 2011).
- Les « SPDE » (stochastic partial derivatives equation) - équations aux dérivées partielles stochastiques - sont une nouvelle branche de la géostatistique en cours d'investigation. Cette méthode devrait permettre de réaliser krigeage et simulation avec un plus grand nombre de données, plus rapidement, et surtout de pouvoir être adaptée facilement à des cas non stationnaires.

En conclusion l'étude bibliographique souligne l'intérêt des techniques géostatistiques en hydrogéologie, depuis plus de 30 ans, avec plusieurs variantes possibles. Les recherches en cours font apparaître de nouvelles méthodes restant à expérimenter (les SPDE notamment).

5.3. CARTOGRAPHIE GEOSTATISTIQUE AU NIVEAU LOCAL

5.3.1. Les spécificités à l'échelle locale

Les algorithmes et techniques à mettre en œuvre sont *a priori* les mêmes à l'échelle globale et à l'échelle locale : on pourra utiliser un krigeage (ou du moins une de ses variantes), ou les simulations conditionnelles.

L'avantage à l'échelle locale est que la structure spatiale du phénomène a de grandes chances d'être plus homogène qu'à l'échelle globale.

En effet, à l'échelle nationale, tous les types d'environnements géologique et de contexte hydrogéologiques sont présents. Il est donc difficile, sinon impossible, de trouver une méthode qui soit un bon compromis partout.

Au niveau local, en revanche, il est *a priori* plus facile de choisir une ou plusieurs méthodes et de les paramétrer selon le contexte local.

Les techniques géostatistiques requièrent le calcul du variogramme afin de caler le krigeage ou les simulations, ce qui nécessite de disposer d'un nombre suffisant de données. C'est parfois plus difficile à l'échelle locale.

5.3.2. Méthodologie d'interpolation (ou de simulations) à l'échelle locale

Réaliser une interpolation (ou une simulation) d'une surface piézométrique, ou de l'épaisseur de la zone non saturée nécessite de suivre une méthodologie bien précise.

Les étapes à suivre sont les suivantes (Illustration 55 dans le cas d'une étude avec le logiciel GDM):

- Analyse du contexte hydrogéologique
- Collecte des données, Analyse critique des données, mise en forme
- Analyse géostatistique des données
- Détection / correction des données erronées
- Choix de la méthode de travail
- Interpolations ou simulations
- Comparaison à la topographie

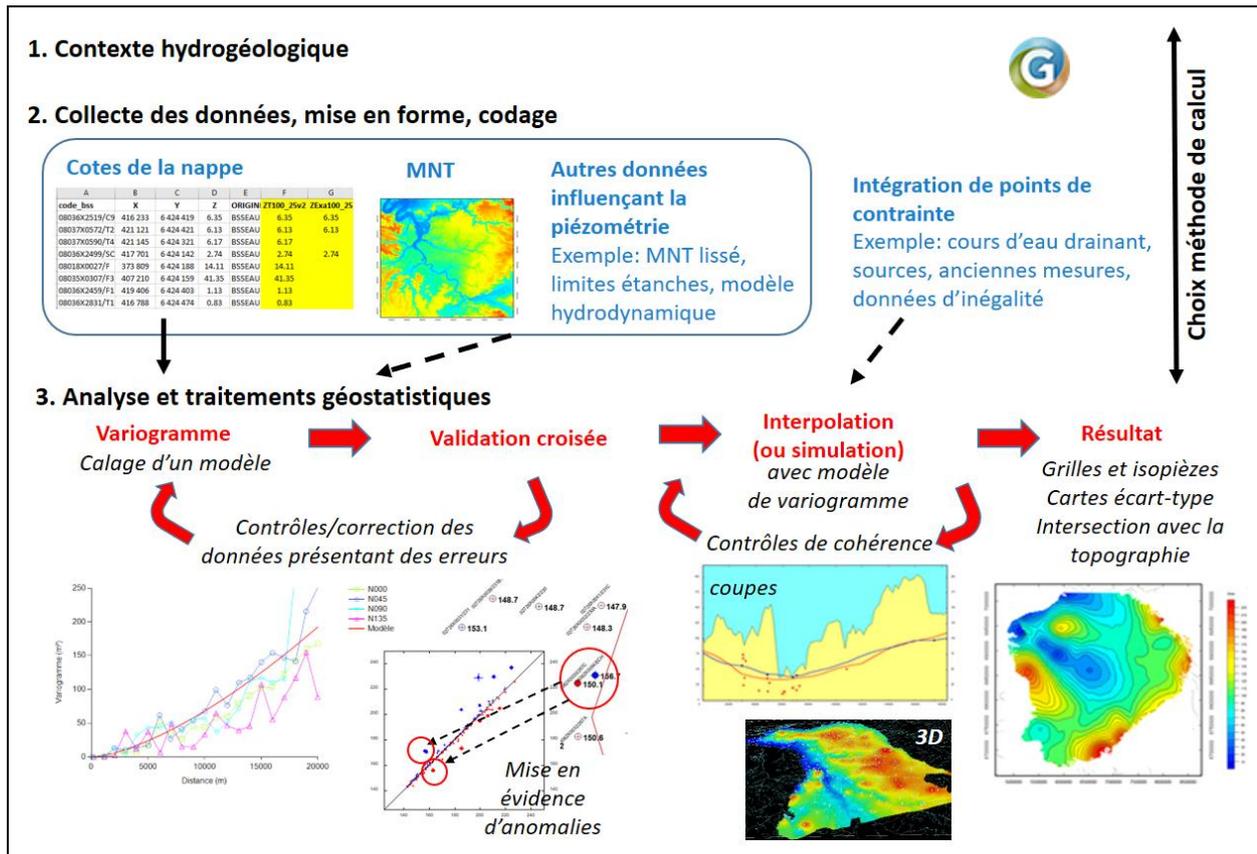


Illustration 55 - Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM.

a) Analyse du contexte hydrogéologique

Le but de cette analyse est de réunir les éléments du contexte hydrogéologique qui vont contribuer à sélectionner les données pertinentes, ainsi que la méthode de calcul la plus appropriée. Cette analyse se réfère à la première étape de la méthodologie globale.

On va donc s'attacher à décrire le fonctionnement de la nappe (libre, captive, milieu alluvial, milieu karstique, ...), les relations avec les rivières (afin de savoir si celles-ci peuvent servir de contrainte pour l'interpolation de la surface piézométrique). Egalement l'existence de limites étanches ou de crêtes hydrogéologiques peut servir à contraindre les interpolations avec prise en compte de dérivées.

L'analyse du contexte hydrogéologique peut conduire à présélectionner les différentes méthodes de travail possible. Une aquifère type nappe libre a priori bien corrélé avec la topographie sera a priori susceptible de pouvoir être traité par les méthodes de krigeage avec dérive externe, tandis qu'un aquifère confiné ne pourra probablement pas l'être. Cependant ce sont l'analyse statistique et géostatistique qui pourront confirmer ces *a priori*.

b) Collecte des données, analyse critique, mise en forme

- Collecte des données

La liste des données pouvant être prises en compte a été présentée précédemment. Il s'agira donc d'extraire des bases de données, rapports ou anciennes cartes tous les types de données pertinents.

- **Analyse critique**

L'analyse critique va consister, pour chaque donnée ou type de données, à identifier les sources de biais potentielles, qualifier la fiabilité des données, et si possible quantifier l'incertitude sur la valeur mesurée. En effet, certains logiciels géostatistiques permettent de prendre en compte une variance d'incertitude sur les valeurs mesurées. Par ailleurs, la modélisation de l'effet de pépite du variogramme prend en compte les erreurs de mesure.

L'analyse critique fera ensuite appel aux techniques de validation croisée, afin d'identifier les points potentiellement entachés d'erreur.

- **Recherche des données d'inégalité**

Pour la construction de la surface piézométrique maximale de période de retour 100 ans « ZT100 », il a été indiqué que seules les chroniques piézométriques suffisamment longues et bien échantillonnées permettaient d'estimer la valeur de ZT100. Pour les autres données (par exemple une cote piézométrique ponctuelle), la valeur mesurée fournit une borne inférieure de ZT100. Cette valeur doit être notée et exploitée. Même s'il n'est pas possible de mettre en œuvre un krigeage avec condition d'inégalité, la surface piézométrique maximale construite avec les autres données devra respecter ces contraintes d'inégalité.

Lorsqu'on travaille sur l'épaisseur de la ZNS, les données d'inégalités doivent également être notées. Une surface piézométrique ponctuelle donne ainsi une épaisseur de ZNS_T100 maximale que l'interpolation devra respecter. Un puits sec à un instant t peut également fournir une borne maximale de l'épaisseur de ZNS_T100, si l'on sait que ce puits capte la nappe à certaines périodes de l'année.

- **Echantillonnage des données de type courbes ou contour**

Lorsqu'on utilise en entrée des courbes isopièzes (ce que nous ne conseillons pas, sauf s'il n'y a rien d'autre), celles-ci doivent être échantillonnées, en sélectionnant une valeur à distance régulière le long de chaque isopièze. La distance d'échantillonnage est à choisir en fonction de la résolution demandée. Par exemple si la restitution est à la maille 250m, un point tous les 250m, voir tous les 500m, peut suffire, en raison de la grande continuité des cartes piézométriques. Un échantillonnage des contours de EAIP est aussi à réaliser de la même façon.

- **Données de dérivées partielles**

En cas d'existence de limites étanches, des contraintes de dérivées partielles nulles perpendiculairement au contour peuvent être prises en compte. Il faut donc identifier ces zones et générer des points le long des limites (voir Illustration 50).

- **Structuration du jeu de données**

Un tableau de données rassemblant les points de diverses origines est constitué. Il doit comprendre les champs suivants (Tableau 5):

Champ	Commentaire
Identifiant du point	Indice national pour les piézomètres, nom ou numéro de point pour les autres types de données. Permet de retrouver le point lors de l'analyse des données
X,Y,Z	Cordonnées du point
ZMNT, ZMNT lissé	Cote topographie fourni par le MNT IGN à la résolution de la grille résultat ; Cote lissée sur la fenêtre de lissage définie lors de l'étude
Type de donnée	Champ texte indiquant le type de donnée (piézomètre, source, isopièze, point CATNAT, etc...)
Fiabilité	Indice ou texte décrivant le niveau de fiabilité du point
Erreur de mesure	Variance de l'erreur de mesure. Si utilisé, doit être valorisé pour tous les points
ZT100	Cote piézométrique maximale de période de retour 100 ans
ZT100_min, ZT100_max	Valeurs min et max de ZT100. Ces valeurs peuvent servir à vérifier la cohérence des interpolations (même si le krigeage avec conditions d'inégalités n'a pas été utilisé)
ZNS_T100	Epaisseur de la ZNS obtenue par comparaison de la topographie (ou de la topographie lissée) à ZT100
ZNS_T100_min, ZNS_T100_max	Valeurs min et max de ZNS_T100. Ces valeurs peuvent servir à vérifier la cohérence des interpolations (même si le krigeage avec conditions d'inégalités n'a pas été utilisé)

Tableau 5 Liste des champs utiles pour l'estimation de la cote piézométrique ZT100 ou de l'épaisseur ZNS_T100

Si on utilise un krigeage avec prise en compte de dérivées partielles, il faut préparer de plus un tableau indiquant :

- Les coordonnées X,Y des points d'application des dérivées
- La direction dans laquelle la dérivée est nulle
- Eventuellement la distance su laquelle on applique cette dérivée si on utilise la formulation par gradients macroscopiques

c) Analyse géostatistique des données

L'analyse géostatistique va ensuite permettre de calculer le variogramme de la cote piézométrique maximale et/ou de l'épaisseur de la Zone Non Saturée associée.

Pour vérifier s'il y a intérêt ou non de prendre en compte la topographie, ou la topographie lissée, il convient de tracer les nuages de corrélation entre cote piézométrique maximale ZT100 et la cote ZTopo ou ZTopo_Lissée. Cette corrélation doit être relativement linéaire. On pourra ensuite calculer l'épaisseur $ZNS_T100 = ZTopo - ZT100$ (ou $ZTopo\ lissée - ZT100$)

Lors du calcul du variogramme, il faudra privilégier l'utilisation des seules données (fiables) issues des chroniques piézométriques, en évitant de prendre en compte les données des courbes isopièzes (si celles-ci sont utilisées). En effet les courbes isopièzes issues d'un krigeage précédent sont une version lissée de la carte piézométrique, échantillonnée de plus le long d'isovaleurs. Cela a tendance à sous évaluer le variogramme (les couples de points sur une

même isovaleur génèrent une valeur de variogramme nulle). Il faut donc soit les éliminer, soit en sélectionner au pire un nombre en densité comparable à celle des piézomètres, pour éviter de donner trop de poids aux isopièzes.

Lorsque le variogramme de la ZNS est stationnaire (présence d'un palier et d'une portée), alors que le variogramme de la cote piézométrique est non stationnaire, il sera conseillé :

- soit de travailler sur la cote piézométrique en introduisant une dérive externe sur la topographie (ou une version lissée de cette topographie),
- soit de travailler sur l'épaisseur de la ZNS. Celle-ci sera interpolée et le résultat sera soustrait de la topographie pour obtenir la cote piézométrique.

d) Détection / correction des données erronées

Comme indiqué précédemment dans ce document, la validation croisée est un outil extrêmement puissant et rapide pour détecter des anomalies dans les données.

Les résultats de la validation vont en effet mettre en lumière les points qui présentent un fort contraste avec les données environnantes, soit du fait d'une cote piézométrique (ou épaisseur ZNS) singulière, soit par un niveau de variabilité semblant différent de la variabilité locale. Ces points doivent alors être vérifiés, et selon le cas corrigés ou éliminés.

Bien souvent les erreurs constatées proviennent en général des causes suivantes :

- Erreur de coordonnées X,Y du point
- Erreur de nivellement du point
- Données aberrantes dans la chroniques (mesure piézométrique influencée par un pompage)
- Niveau piézométrique mesuré concernant en réalité un autre aquifère

Les recherches/corrections d'erreurs se font de façon itérative :

- Dans un premier temps seules les données les plus fiables sont considérées pour le calcul du variogramme et de la validation croisée
- Les erreurs les plus fortes sont d'abord vérifiées/corrigées. Par exemple on vérifiera d'abord les points faisant état d'erreurs supérieures à un certain seuil (en mètres) ou d'erreurs réduites supérieures à un certain seuil (par exemple 2.5)
- Une fois les points correspondants corrigés ou éliminés, le calcul du variogramme est actualisé et une nouvelle validation croisée est effectuée. Les éventuelles anomalies résiduelles sont à nouveau corrigées
- Les points de fiabilité moindre peuvent alors éventuellement être ajoutés et de nouvelles validation croisées effectuées de la même manière. Sauf exception, le modèle de variogramme utilisé reste celui des données les plus fiables

e) Choix de la méthode de travail

Une fois les données corrigées et validées, il faut choisir la méthode de calcul.

Ce choix n'est pas forcément évident. Il va dépendre comme indiqué plus haut des éventuelles corrélations topographie / piézométrie, du caractère stationnaire ou non du variogramme de la ZNS, ou des différents types de données disponibles (existence de données de dérivées partielles, de données d'inégalité), sachant qu'il n'est pas possible, dans la plupart des logiciels, de prendre en compte simultanément toutes les options. Par exemple on ne peut pas effectuer

un krigeage avec dérive externe prenant en compte en même temps des données d'inégalités et des dérivées partielles. Il faudra donc choisir la ou les méthodes donnant les meilleurs résultats, et éventuellement utiliser des méthodes différentes d'un endroit à l'autre de la zone d'étude.

Le krigeage ordinaire pourra être utilisé lorsqu'il n'y a pas de corrélation entre topographie et cote piézométrique. Ce krigeage ordinaire peut être combiné avec la prise en compte de dérivées partielles (à condition de disposer d'un logiciel le permettant).

Lorsqu'on dispose de données d'inégalités, le résultat du krigeage précédent peut être comparé aux données d'inégalités afin de vérifier si ce krigeage satisfait les contraintes portées par ces données.

Si ce n'est pas le cas, deux options sont possibles :

- Introduire manuellement des données fictives cohérentes avec les données d'inégalités non respectées, puis mettre à jour le krigeage avec ces nouvelles données ;
- Faire générer une valeur « plausible » de la cote piézométrique (ou de la ZNS) au droit des points d'inégalités par un algorithme conçu pour cela (échantillonneur de Gibbs), puis réitérer le krigeage avec ces nouveaux points. Ceci suppose de disposer d'un logiciel comportant cette option.

Les simulations pourront être utilisées pour obtenir un résultat plus « riche » que le krigeage, dans la mesure où on pourra calculer la probabilité de dépasser la cote topographique. Cependant les simulations ne peuvent pas prendre en compte les données de dérivées ni la dérive externe. Pour le cas dérive externe, on peut contourner la difficulté en travaillant sur l'épaisseur de la ZNS. Les données d'inégalités peuvent être prises en compte en amont des simulations grâce à l'échantillonneur de Gibbs. Si on ne dispose pas de cette option, on peut juste a posteriori vérifier si les simulations satisfont les inégalités.

Rappelons que les simulations fonctionnent sur des données de distribution gaussienne et stationnaires. Si les données d'entrée ne vérifient pas ces conditions, il faut les transformer en une nouvelle variable d'étude vérifiant ces conditions. Cette étape de transformation n'est pas toujours facile à paramétrer.

Enfin, nous avons vu que le choix de la méthode de calcul inclut le choix :

- De travailler (interpoler, simuler) la cote piézométrique maximale ZT100 ;
- Ou de travailler sur l'épaisseur de la ZNS. Ce second choix sera pertinent si la cote piézométrique est relativement corrélée à la topographie et si le variogramme de l'épaisseur de la ZNS est stationnaire. Pour calculer l'épaisseur de la ZNS, deux options sont possibles :
 - Calculer cette épaisseur comme $Z_{\text{Topo}} - Z_{\text{T100}}$
 - Calculer cette épaisseur comme $Z_{\text{Topo lissée}} - Z_{\text{T100}}$. Ce choix suppose de déterminer au préalable une taille de fenêtre de lissage. Il n'existe pas à notre connaissance de méthode universelle pour cela. Maillot et al (2019) utilisent une taille définie comme la distance moyenne entre deux cours d'eau, Bourguine et Pédron (2011) choisissent la taille de fenêtre qui maximise la corrélation entre cote piézométrique et topographie lissée. Dans les deux cas, la taille de cette fenêtre est constante sur tout le domaine d'étude, mais il resterait à tester si une taille variable adaptée localement donnerait des résultats meilleurs.

f) *Interpolations ou simulations*

Une fois la méthode de calcul choisie et le modèle de variogramme établi, il ne reste plus qu'à lancer les calculs d'interpolation et de simulation.

Quelques paramètres complémentaires doivent cependant être définis. En particulier :

- La résolution de la grille en sortie
- Le choix du voisinage d'interpolation
- **Résolution de la grille en sortie**

La résolution de la grille en sortie est un paramètre délicat à fixer. Idéalement la grille devrait être aussi fine que possible de façon à bien représenter les détails de la topographie (soit par exemple 5x5 m, voire 1x1 m). Toutefois des résolutions aussi fines sont le plus souvent illusoires compte tenu de la densité de données de piézomètres disponibles pour interpoler la surface piézométrique ou l'épaisseur de la ZNS. De plus, la taille des fichiers générés et les temps de calcul sont encore des obstacles pour des résolutions aussi fines, surtout si on doit tester et comparer plusieurs méthodes de calcul ou effectuer des simulations géostatistiques.

On recherchera donc le meilleur compromis entre temps de calcul, densité de données disponibles en entrée, taille de la zone à interpoler.

A l'échelle locale (quelques dizaines de kilomètres de côté), une résolution de 25x25m semble réalisable. Le facteur limitant sera le plus souvent le faible nombre de données de piézomètres pour avoir une bonne précision sur l'interpolation de la cote piézométrique ou de l'épaisseur de la ZNS.

- **Voisinage**

Un autre paramètre des interpolations est la taille du voisinage d'interpolation. Lorsqu'on cherche à estimer la cote piézométrique dans une maille donnée, l'algorithme va rechercher les données à utiliser dans un voisinage plus ou moins grand autour de cette maille. La taille et le type de voisinage sont des paramètres qu'il faut régler soigneusement si l'on veut à la fois optimiser les temps calcul et obtenir un résultat robuste.

En effet il faut que l'estimation de chaque nœud de grille repose sur un nombre de données optimal, en tout cas suffisant, pour que le calcul ait un sens.

- **Contrôle des interpolations**

Une fois obtenu le résultat (krigeage ou simulations), il convient de vérifier que ce résultat paraît réaliste. Pour cela des cartes isovaleurs sont tracées, ainsi que des coupes ou vues 3D. Le modèle obtenu est comparé aux éventuels points de validation disponibles (données enquêtes et CATNAT si elles n'ont pas été intégrées aux données d'entrée, points d'inégalités non pris en compte dans le calcul). Le modèle peut au besoin être ajusté par introduction manuelle de points de contrainte.

- **Contrôle des points CATNAT**

Le contrôle de cohérence du résultat peut se faire sur des points de validation non introduits comme donnée d'entrée.

Ainsi le résultat du krigeage (ou des simulations) pourra être confronté aux points CATNAT. Si le krigeage donne une surface piézométrique cohérente avec les déclarations de catastrophe naturelles, c'est que le calcul a été correctement prédictif sur ces points.

Par contre s'il y a désaccord, la cause de ce désaccord doit être recherchée. S'agit-il d'une erreur de calcul ? d'un mauvais choix de paramètre ? d'un mauvais choix de méthode de calcul ? Ou tout simplement les données environnantes ne sont pas assez nombreuses ou bien placées pour espérer obtenir un résultat pertinent.

g) Comparaison à la topographie

La surface piézométrique obtenue par interpolation (ou par simulation) est ensuite comparée à la topographie pour établir le risque de remontée de nappe.

Si la surface piézométrique a été obtenue par krigeage, on pourra utiliser l'écart-type de krigeage pour indiquer la confiance que l'on a dans l'interpolation. L'incertitude sur le MNT pourra également être intégrée à l'analyse.

Si par exemple la cote piézométrique interpolée ZT100 vaut 100 m et que la topographie vaut 103 m, il n'y a en principe pas de risque d'inondation (en tout cas en surface) par remontée de nappe. Si on ajoute à cela le fait que l'écart-type de krigeage vaut 3 m et que l'incertitude sur la valeur du MNT est de 2 m, il subsiste une probabilité non négligeable qu'il y ait inondation. Ce serait le cas par exemple si la cote topographique réelle est de 101 m, et la cote piézométrique réelle ZT100 est de 102 m au lieu de 100m. Malheureusement ce risque ne peut pas être quantifié de manière rigoureuse car on ne connaît pas la distribution des erreurs de krigeage ni des erreurs du MNT. Tout au plus peut-on se fixer quelques seuils arbitraires pour hiérarchiser les zones à risque d'inondation (typiquement faire varier la cote piézométrique de +/- un écart-type autour de la cote krigée, et la cote piézométrique de +/- l'incertitude moyenne donnée pour le MNT.

Dans le cas où la cote piézométrique a été calculée par simulation (exemple 100 simulations), on dispose pour chaque maille de 100 valeurs équiprobables de cote piézométrique, ce qui permet de calculer la probabilité pour que la cote piézométrique soit à telle ou telle hauteur par rapport à la topographie. Ceci donnera une idée plus précise (que le krigeage) de la probabilité d'inondation. Toutefois cette probabilité ne pourra intégrer l'erreur sur la cote topographique, dans la mesure où celle-ci n'est pas connue maille par maille, mais uniquement comme un indicateur global.

6. Etape 4 : Production d'une carte de sensibilité aux remontées de nappe

6.1. DETERMINATION DE L'ECHELLE D'UTILISATION DE LA CARTE

La détermination de l'échelle de résolution de la carte finale est logiquement dépendante des échelles de résolution du MNT et de la grille interpolée (elle-même définie d'après la carte de fiabilité globale des données en entrée).

En théorie, une relation directe existe entre la taille d'une maille d'une grille et l'échelle de résolution de cette grille. Cette relation dépend néanmoins d'un autre critère qui est la valeur du point par pouce (ppp ou dpi en anglais) qui correspond à la finesse de numérisation ou d'impression d'un périphérique (scanner, imprimante), très proche de la notion de résolution ppi (pixel par pouce) pour les écrans⁵.

Cette relation est la suivante :

$$\text{Echelle de résolution} = \frac{\text{Taille de cellule (en m)} \times \text{valeur ppp ou ppi}}{0,0254}$$

La valeur 0,0254 étant la valeur en mètre d'un pouce.

Cette formule reste néanmoins surtout intéressante pour déterminer les échelles de rendus visuels qui ne soient plus pixellisés. Quand on s'éloigne d'une image, cette formule permet de définir l'échelle à partir de laquelle l'œil ne distingue plus deux pixels côte à côte mais voit un dégradé continu, d'où la perception d'une image nette.

A titre d'exemple, pour une grille de mailles de 25 m et pour un écran classiquement à la résolution 96ppi, l'échelle optimal de rendu est proche du 1/100 000.

Néanmoins, ce type de calcul, bien qu'intéressant pour avoir une estimation de l'échelle idéale pour une visualisation non pixellisée de la grille, ne permet pas véritablement d'estimer la gamme des échelles d'utilisation possibles de cette grille. L'appréciation des échelles est souvent un exercice à la fois subjectif et complexe. Le producteur a ainsi tendance à décrire ses données en fonction des usages potentiels qu'il pourra en être fait.

L'utilisation d'une grille à une échelle plus grande que l'échelle optimale, avec une distinction nette des mailles les unes par rapport aux autres, pourra s'avérer tout à fait pertinente selon les objectifs d'utilisation de cette donnée.

⁵ Sur papier, les ppi (pixels par pouce) de nos données numériques sont redessinés (ou transformés) par l'imprimante ou son logiciel à l'aide de points continus (de couleur unique). Le nombre de points continus que l'imprimante est capable de reproduire sur 1 pouce s'appelle « définition » et s'exprime donc en ppp.

6.2. DETERMINATION DES CLASSES DE SENSIBILITE

Selon la technique d'interpolation choisi, deux grilles de résultats sont possibles :

- Premier cas

On obtient directement l'épaisseur de la zone non saturée.

- Deuxième cas

Les zones potentielles de débordement sont déduites des résultats obtenus par soustraction du MNT à la grille interpolée de la surface piézométrique extrême (de période de retour 100 ans) :

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

Le choix des classes dépend donc des précisions altimétriques du MNT et du résultat de l'interpolation.

Pour la nappe en Alsace, il a été décidé, en comité d'experts, de produire une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe avec des classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe de la façon suivante (cf. Illustration 56) :

- Zones très sensibles : niveau de nappe au-dessus du sol
- Zones sensibles : niveau de nappe entre 0 et 2,5 m de profondeur
- Zones peu sensibles : niveau de nappe entre 2,5 et 5 m de profondeur
- Pas de débordement

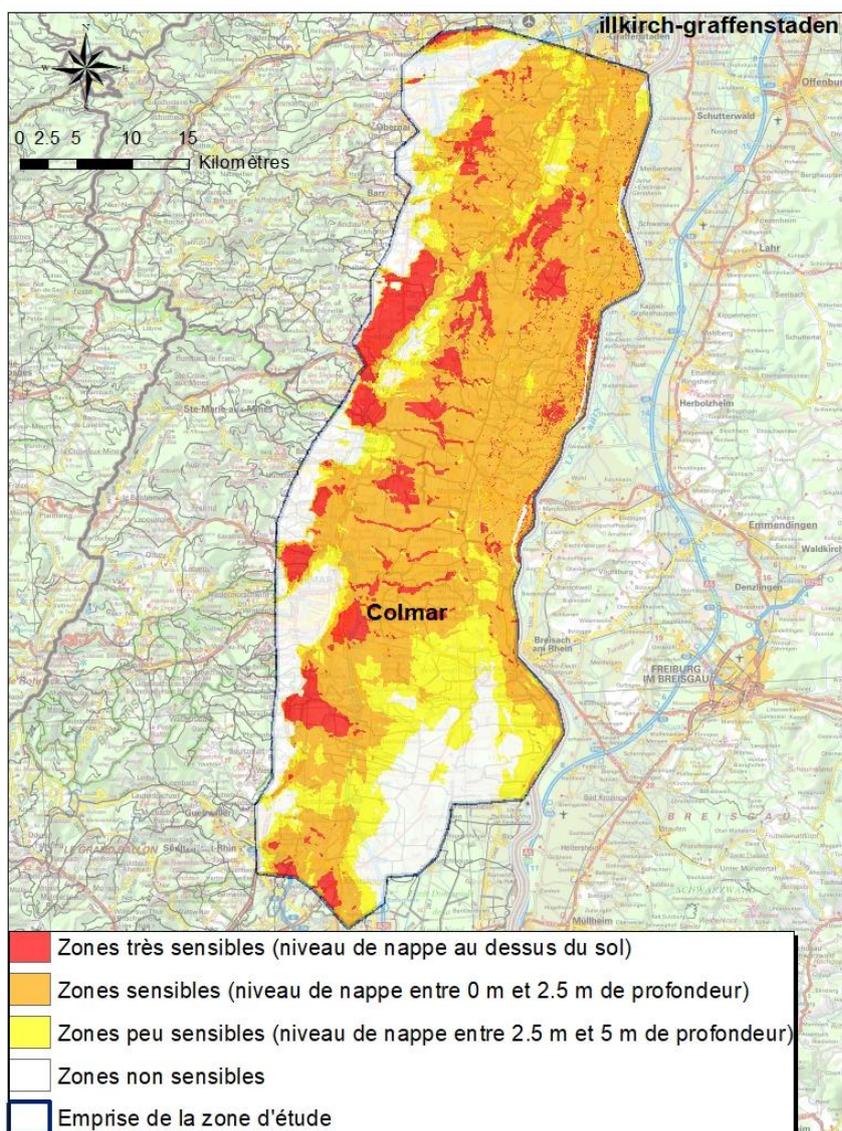


Illustration 56 - Exemple de carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe sur la plaine d'Alsace.

6.3. CORRECTIONS PONCTUELLES ET APPLICATION DE MASQUES

6.3.1. Critères géomorphologiques

Les secteurs les plus touchés par les phénomènes de remontées de nappe seront les terrains à faible pente, peu drainés. On peut ainsi supposer que les zones de pente supérieure à 10% ne sont, en principe, pas concernées par des inondations par remontée de nappe.

Ces zones à forte pente (> 10%) peuvent donc être considérées comme n'ayant pas la possibilité d'être inondées par remontée de nappe.

6.3.2. Critères hydrogéologiques

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

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

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

Néanmoins, il n'est pas complètement exclu que des problématiques liées aux remontées de nappe aient lieu dans ces secteurs. Les entités BDLISA utilisées pour dépeindre ces zones particulières peuvent ne pas être complètement imperméables ou peuvent présenter à certains endroits une conductivité hydraulique plus élevée que la valeur limite utilisée pour caractériser ces entités ($K_{moy} = 10^{-9}$ m/s).

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

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

6.4. VALIDATION DE LA CARTE

Diverses données, n'ayant pas été utilisées dans l'étape précédente d'interpolation, peuvent servir à valider la carte de remontée de nappe obtenue. Cette validation peut être faite par :

- Comparaison avec les observations terrain

Afin de vérifier si l'interpolation de $Z_{maxT100}$ est bien « prédictive », la cote $Z_{maxT100}$ interpolée peut être comparée aux points d'observation de l'enquête de terrain menée auprès des propriétaires ayant signalé des remontées de nappes.

- Comparaison avec les cartes piézométriques HE non utilisées

Il s'agit de vérifier que la surface interpolée du niveau de nappe extrême ($ZT100$) se situe au-dessus des différentes isopièzes.

- Comparaison avec le traitement des images satellite

Les secteurs identifiés comme « zones très sensibles » doivent se retrouver à l'intérieur des polygones délimités par traitement de l'imagerie satellitaire. Toutefois, si certains secteurs, tirés des images satellite, couvrent une superficie plus importante que les « zones très sensibles » sur la carte, c'est parce que l'imagerie satellitaire ne permet pas de discriminer l'origine du phénomène d'inondation (remontées de nappe ou débordement de cours d'eau).

En contrepartie, il se peut que le traitement des images satellite ne fasse pas ressortir toute l'enveloppe maximisante des inondations car le traitement ne peut être réalisé qu'à partir de 2015 pour les images SAR gratuites.

- Confrontation à l'expertise locale

La carte de remontée de nappe réalisée doit pouvoir être confrontée à l'expertise locale et mise à disposition de consultation pour avoir des retours critiques sur les zonages réalisés.

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 surévaluée.

Des modifications ponctuelles de la carte peuvent être apportées à la suite de cette étape de validation.

6.5. LIMITES D'UTILISATION

6.5.1. Grandes zones urbaines

L'urbanisation et l'industrialisation de grands secteurs ont un impact sur le fonctionnement des nappes. Les sens d'écoulements souterrains sont perturbés par les différents aménagements souterrains. Dans certains cas, une inversion du sens d'écoulement est même observée. La construction de sous-sol ou d'infrastructures enterrées peut nécessiter des systèmes de drainage ou des pompages d'exhaures ayant pour conséquence un abaissement de la nappe, ou même provoquer des « effets barrage ». En outre, la mise en place de matériaux plus perméables dans les tranchées ou dans les zones de remblais, peuvent créer des zones de circulation d'eau préférentielles.

Ces perturbations piézométriques ne sont pas prises en compte dans l'approche globale mise en œuvre.

Il serait nécessaire de constituer des bases de données recensant les ouvrages susceptibles d'impacter la nappe. Des études vont être menées dans ce sens dans le cadre de la prochaine convention DGPR / BRGM.

6.5.2. Zones karstiques

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

L'illustration 57 ci-dessous montre la localisation des entités hydrogéologiques et secteurs karstiques à l'affleurement en France métropolitaine.

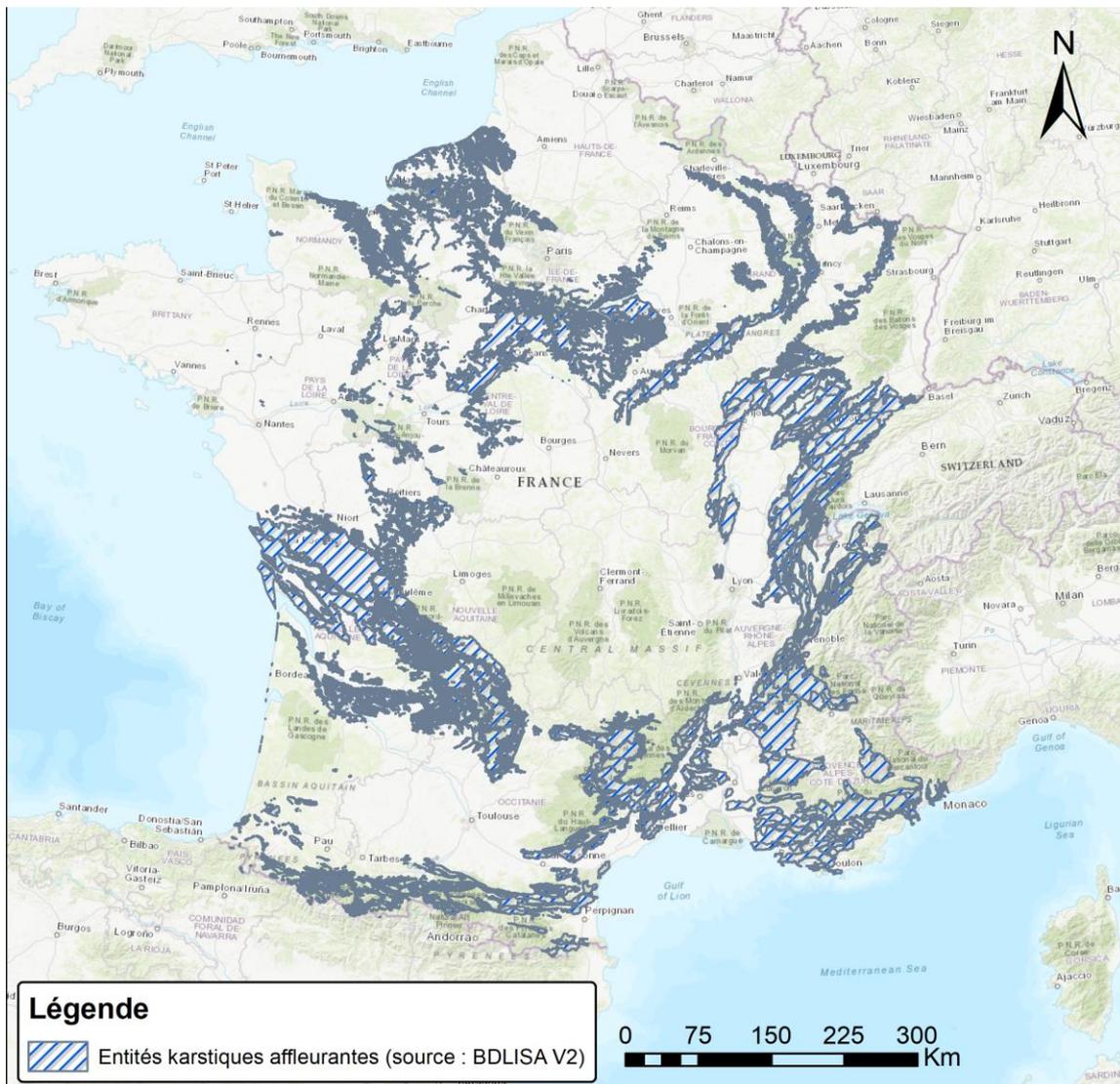


Illustration 57 - Entités ou secteurs karstiques affleurants identifiés dans le référentiel hydrogéologique BDLISA (version 2)

Dans le cas des aquifères karstiques, la porosité de la roche est souvent trop faible pour contenir de l'eau qui soit facilement mobilisable, laquelle se concentre dans les fractures et les conduits. Le niveau de la nappe est alors difficile à déterminer, car il varie énormément en fonction du niveau de fracturation de la roche et de la présence ou non de conduits karstiques.

L'approche méthodologique entreprise pour cette cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe s'appuie sur un niveau de nappe et sa fluctuation. Elle n'a pas grand sens pour les secteurs karstiques, contexte caractérisé plutôt par les débits dans les conduits et au niveau des exhaures. Les fluctuations de ces débits sont généralement soudaines et les pics élevés se produisent généralement peu de temps après des événements pluvieux importants.

6.5.3. Zones après mine

Les anciens bassins miniers ont été largement touchés avec l'arrêt des pompages d'exhaure dans les mines, ce qui a pour conséquence l'envoyage des réservoirs miniers et une remontée

du niveau des nappes. Ce niveau est rarement identique à celui de l'état initial en raison de la forte perturbation des conditions de circulation des eaux souterraines induites par les travaux miniers (Illustration 58).

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

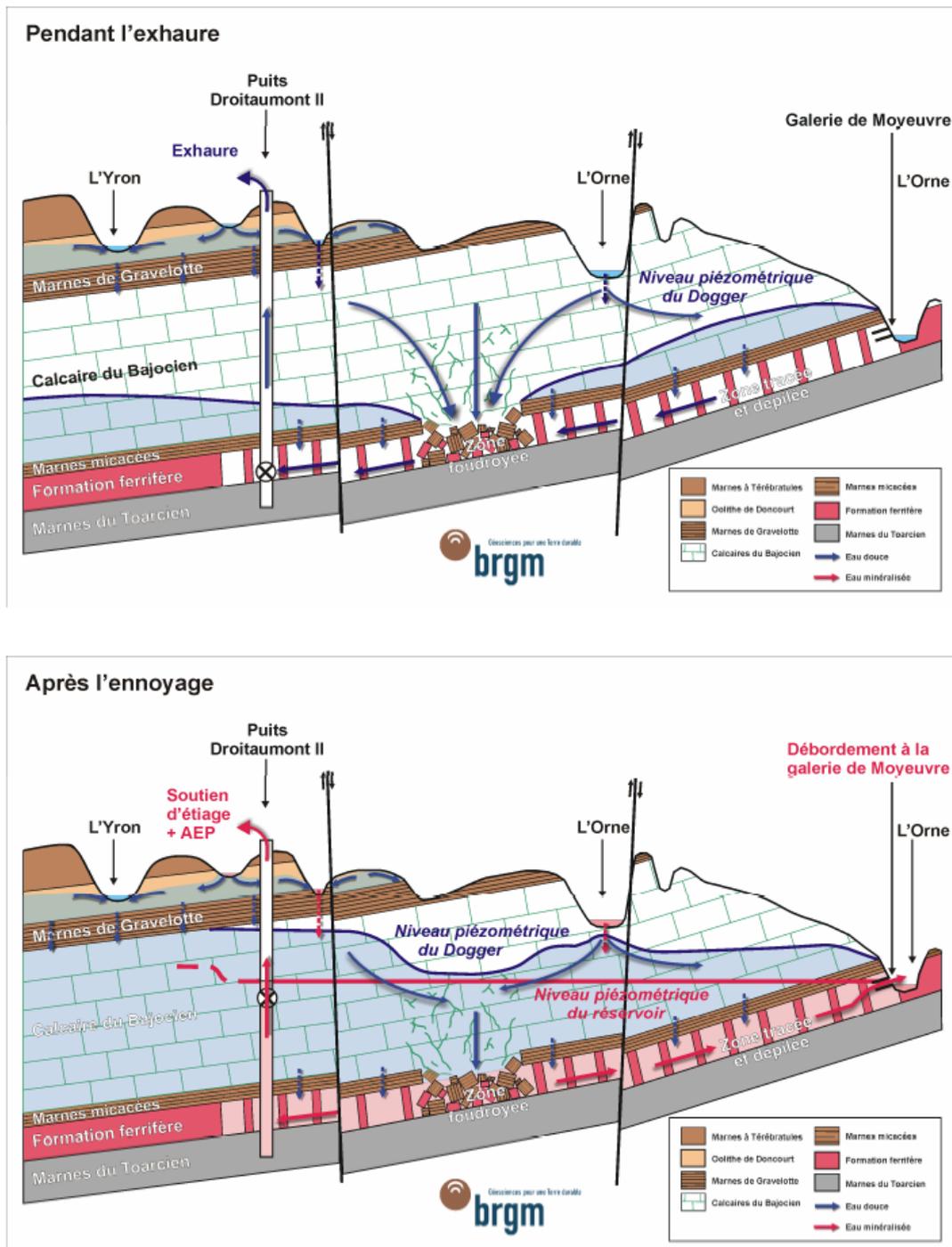


Illustration 58 - Schéma conceptuel de fonctionnement hydrogéologique d'un réservoir linier avant et après ennoyage (d'après Vaute et Soulas, 2007)

7. Conclusion

La méthode proposée pour l'élaboration d'une carte de remontée de nappe à l'échelle locale se décline selon quatre étapes dont une optionnelle. Des améliorations ont été apportées à l'échelle locale par rapport à la méthode nationale à chaque étape de la méthodologie :

- A l'étape 1 : Contexte hydrogéologique et préparation du jeu de données

Le travail de sélection et de qualification des points fiables et peu fiables est plus approfondi. En outre, les associations réalisées entre ces deux types de points sont plus précises, permettant de les regrouper au sein de secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques et temporelles de la nappe étudiée.

- A l'étape 2 : Estimation de la cote piézométrique maximale

Un script R a été développé permettant divers ajustements statistiques, basés sur la loi des valeurs extrêmes, pour estimer le niveau piézométrique extrême (ou associé à une période de retour donnée).

En outre, une méthode d'évaluation moins pessimiste de la cote piézométrique extrême pour les points d'eau qualifiés « peu fiables » est proposée.

- A l'étape 3 : Analyse géostatistique et interpolation de la surface piézométrique

A l'échelle locale, il est rendu possible l'utilisation des modèles de variogramme plus complexes pour l'interpolation des cotes piézométriques extrêmes. L'analyse géostatistique permet également d'estimer les incertitudes des résultats liées à l'interpolation, donnant ainsi un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote extrême.

- Et enfin à l'étape 4 : Production d'une carte de sensibilité aux remontées de nappe

Une échelle de rendu et des classes de sensibilité adaptées à la qualité des résultats obtenus sur le secteur d'étude sont choisies en cette dernière étape de la méthodologie.

Par exemple, pour la nappe d'Alsace, il a été proposée une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe en quatre classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux et son échelle maximale d'utilisation préconisée est le 1/25 000 :

- Zones très sensibles : niveau de nappe au-dessus du sol
- Zones sensibles : niveau de nappe entre 0 et 2 m de profondeur
- Zones peu sensibles : niveau de nappe entre 2 et 5 m de profondeur
- Pas de débordement

En dernier lieu, il est nécessaire de procéder à la validation et à la confrontation de la carte avec les données qui n'ont pas servies à l'interpolation géostatistique, comme par exemple les données des enquêtes de terrain ou les images satellite.

Une étape supplémentaire et optionnelle a été ajoutée à la suite de la collecte des données afin d'obtenir des informations complémentaires à partir des images satellite. Des développements spécifiques au phénomène d'inondation par remontée de nappe ont été réalisés aboutissant à des algorithmes de traitements statistiques de séries temporelles de rétrodiffusion des images radar à synthèse d'ouverture (SAR). L'utilisation des données SAR ou optique pour la

cartographie des inondations apporte des résultats intéressants. S'ils ne s'avèrent pas suffisamment fiables pour les utiliser en tant que points de forçage à l'interpolation, ils peuvent néanmoins servir à la validation de la carte. La plupart des secteurs ciblés en « zones très sensibles » de la carte doivent se retrouver à l'intérieur des zones inondées détectées par traitement des images satellite. Cependant, il est probable que le traitement surestime les secteurs inondés par remontée de nappe car l'imagerie satellitaire ne permet pas de discriminer l'origine des inondations (remontées de nappe ou débordements de cours d'eau ou autre). Ou encore, que certains secteurs d'inondation potentielle par remontée de nappe ne ressortent pas du traitement car les séries temporelles traitées ne démarrent qu'à partir de 2015 et donc une détection impossible pour les événements antérieurs.

Cette méthode a vocation à être appliquée pour toutes les études locales de remontée de nappes à l'exception des secteurs urbains et karstiques pour lesquels des développements méthodologiques doivent encore être réalisés.

Les limites de l'application de la méthodologie sont présentées, notamment pour certaines contextes hydrogéologiques (karsts, zones imperméables) et secteurs spécifiques (grands secteurs urbains ou très industrialisés, secteurs après mine).

Les études de développement méthodologique pour la réalisation de cartographie de sensibilité aux inondations par remontée de nappe à l'échelle locale vont se poursuivre dans la convention DGPR-BRGM 2020, pour son adaptation aux contextes urbains.

Pour les nappes inertielles, au vue de la non applicabilité de la théorie des extrêmes, il serait intéressant de réfléchir à la détermination de valeurs de niveaux hauts de nappe de référence adaptés aux problématiques réglementaires (type PPR) ne reposant pas sur la définition de période de retour.

L'étude bibliographique souligne l'intérêt des techniques géostatistiques en hydrogéologie, depuis plus de 30 ans, avec plusieurs variantes possibles. Les recherches en cours font apparaître de nouvelles méthodes restant à expérimenter (les SPDE notamment - Stochastic Partial Derivatives Equation) - équations aux dérivées partielles stochastiques).

Au cours des différentes applications sur les sites pilotes, il a été constaté qu'un effort de centralisation des données sur les eaux souterraines est à mener ainsi que la définition d'un réseau spécifique d'observation de remontée de nappe. L'objectif serait de structurer, centraliser et sensibiliser les organismes à collecter et diffuser au travers, par exemple, de la base de données existante ADES (ades.eaufrance.fr) des informations sur les niveaux piézométriques. Le manque d'information facilement accessible nécessaire en cas de remontée de nappe est particulièrement criant en zones urbaines.

8. Bibliographie

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

Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel P., Petit V., Pinault J.L., Pointet T. (2002) – *Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme.* BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig., 11 tabl., 5 ann.

Amraoui N., Wuilleumier A., Thiery D., Caous J.Y., Noyer M.L., Gaudefroy M.J., (2004) – *Mise à jour du modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport final des travaux de la phase 2.* BRGM/RP-53211-FR, 151 p., 19 fig., 4 tabl., 7 ann.

Arnaud L., Assy Y., Papageorgiou E., Foumelis M., Brugeron A., Manceau J.C. (2020) – *Cartographie de la sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne.* Rapport BRGM/RP-69607-FR

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

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

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

Bessière H., Tiller T., Bourguine 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.* Rapport final. BRGM/RP-68600-FR, 86 p., 41 fig., 9 tabl.

Brugeron A., Bessiere H., Bourguine B., Stollsteiner P. (2017) – *Étude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale.* Rapport BRGM/RP-65452-FR.

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

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

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

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

- Hamed, K.H., Rao, A.R.** (1998) – A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrol.*, 204, 219–246.
- Jenkinson A.F.** (1969) – *Statistics of extremes. In: Estimation of maximum floods*, WMO Technical Note, n° 98, pp.183-228.
- Kendall, M.G.** (1975) – Rank correlation methods. London:Griffin.
- Machard de Gramont H., Mardhel V.** (2006) - *Atlas des remontées de nappes en France métropolitaine*. BRGM/RP-54414-FR.
- Mann, H.B.** (1945) – Nonparametric texts against trend. *Econometrica*; 13:245-259.
- Mardhel V., Negrel P., Pointet T.** (2001) – *Première analyse des composantes des écoulements souterrains du bassin versant de la Somme en période de crue*. BRGM/RP-51030-FR
- Mougin B., Thomas E., Wyns R., Blanchin R., Mathieu F.** (2004) - *Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse. Bassins versants : Le Yar (Côtes d'Armor), l'Horn (Finistère)*. **BRGM/RP-52731-FR**
- Najib K.** (2007) - thèse de l'université de Montpellier II « Phénomènes de remontées de nappe extrêmes en terrain carbonaté fracturé et karstifié : Evaluation de l'aléa et Prévention du risque dans le cadre de la protection de bâtiments ».
- Pettitt, A.N.** (1979) – A non-parametric approach to the change-point detection. *Applied Statistics* 28: 126–135.
- Schomburgk S., Pinault J.-L., Longuevergne L.** (2005) – Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport BRGM/RP-53579-FR.
- Seguin J.J.** (2008) – *Connaissances hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise – Phase 4 – Modélisation hydrodynamique en régime transitoire au pas de temps journalier et simulation de l'impact sur la nappe de 3 scénarios de crue du Rhône et de la Saône*. BRGM/RP-56676-FR, 113 p., 45 fig., 14 tab., 4 ann.
- SEGUIN J.J., WUILLEUMIER A.** (2006) - *Exploitabilité des ressources en eaux souterraines en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre*. BRGM/RP-55188-FR
- Seguin J.J., Allier D., Croiset N., Klinka T., Manceau J.C.** (2018) - ESTHER. Etudes de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final. BRGM/RP-67518-FR. 299 p., 126 fig., 10 ann.
- THIERY D.** (1990) - *Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour un calcul Hydrodynamique des Ecoulements - version 4.3*. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.
- Urban S., Boucher J., Mardhel V., XUu D.** (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA ; Bassin Rhin-Meuse ; Année 4. Rapport BRGM/RP-58091-FR, 70 p., 5 ann.
- Urban S., Geneviev M., Guignat S.** (2010) – Optimisation du réseau piézométrique de la Nappe d'Alsace. Rapport final BRGM/RP-58670-FR. Octobre 2010.

Vaute L., Soulas C. (2007) – “Schéma d'aménagement et de gestion des eaux – Bassin ferrifère lorrain – Séquence n°1 : l'état des lieux ». Rapport BRGM/RP-55434-FR, 235 p.

Wald, A, Wolfowitz, J. (1943) – An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation. Ann. Math. Statist. 14, no. 4, 378--388.

Wilcoxon, F. (1945) – Individual comparisons by ranking methods. Biometrics Bulletin. 1 (6): 80–83.

Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M. et al. (2013) - *Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique.* BRGM/RP-62002-FR

Bibliographie sur la géostatistique et les méthodes d'interpolation

Aboufirassi, M., and MA Marino. (1983). Kriging of Water Levels in the Souss Aquifer. Morocco. Mathematical Geology. Vol. 15, No. 4. p 537-551

Adhikary, P. P. and Dash, C. J. (2014). Comparison of deterministic and stochastic methods to predict spatial variation of groundwater depth. Applied Water Science, pages 1–10.

Ahmadi, S. H. and Sedghamiz, A. (2008). Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. Environmental Monitoring and Assessment, 138(1):357–368.

Arnaud Michel, Emery Xavier. (2000). Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Paris : Hermès, 221 p. ISBN 2-7462-0138-0

Bourgine B., Pédrón N. (2011) Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Année 2. BRGM/RP-60153-FR, 85 p., 39 fig., 6 tab., 1 ann.

Bourgine B., Pédrón N. (2013) Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Module 2 - Année 3. Rapport final. BRGM/RP-62346-FR, 47 p., 28 fig., 1 ann

Chilès, J.P. (1992). The use of external-drift kriging for designing a piezometric observation network. In: Bárdossy, A., Editor, , 1992 Geostatistical Methods: Recent Developments and Applications in Surface and Subsurface Hydrology. Proceedings of an International Workshop at Karlsruhe, Germany, July 17–19, 1990, UNESCO, Paris, pp. 11–20 161 p.

Chilès, J.P. (1992). The use of external-drift kriging for designing a piezometric observation network. In: Bárdossy, A., Editor, , 1992 Geostatistical Methods: Recent Developments and Applications in Surface and Subsurface Hydrology Proceedings of an International Workshop at Karlsruhe, Germany, July 17–19, 1990, UNESCO, Paris, pp. 11–20 161 p.

Chilès, J.P., Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p

Desbarats, A., Logan, C., Hinton, M., and Sharpe, D. (2002). On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. Journal of Hydrology, 255, 25 – 38, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00504-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00504-2), 2002.

Flipo, N. and Kurtulus, B.: GEO-ANFIS: Application to piezometric head interpolation in unconfined aquifer unit, in: Proceedings of FUZZYSS'11, p. 6p., 2011

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, New York

- Hoeksema, R. J., Clapp, R. B., Thomas, A. L., Hunley, A. E., Farrow, N. D., and Dearstone, K. C. (1989).** Cokriging model for estimation of water table elevation. *Water Resources Research*, 25(3):429–438.
- Kuhlman K.L. Pardo Igúzquiza E. (2010).** Universal cokriging of hydraulic heads accounting for boundary conditions. *Journal of Hydrology* 384, 14-25
- Kurtulus, B. and Flipo, N. (2012) :** Hydraulic head interpolation using anfis - model selection and sensitivity analysis, *Computers & Geosciences*, 38, 43 – 51, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.019>
- Le Cointe, P. (2006).** Kriging with Partial Differential Equations in Hydrogeology. Rapport de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Parcours Hydrologie-Hydrogéologie. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. www.sisyphe.upmc.fr/~m2hh/arch/memoires2006/Lecointe2006.pdf
- Maillot, M., Flipo, N., Rivière, A., Desassis, N., Renard, D., Goblet, M. and Vincent, M. (2019).** Technical note: Water table mapping accounting for river-aquifer connectivity and human pressure. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4835–4849, 2019; <https://doi.org/10.5194/hess-23-4835-2019>
- Maréchal, A., 1984.** Kriging seismic data in the presence of faults. In: Verly, G., David, M., Journel, A.G. and Maréchal, A., Editors (1984). *Geostatistics for Natural Resources Characterization NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, Part 1 vol. 122*, D. Reidel Publ, Dordrecht, Netherlands
- Noori, S. M. S., Ebrahimi, K., Liaghat, A., and Hoorfar, A. (2013).** Comparison of different geostatistical methods to estimate groundwater level at different climatic periods. *Water and Environment Journal*, 27(1):10–19.
- Pardo Igúzquiza, E., Chica Olmo, M., (2007).** KRIGRADI: a cokriging program for estimating the gradient of spatial variables from sparse data. *Computers and Geosciences* 33, 497–512
- Peterson, T.J. and Barnett, B. (2004).** Kriging the Water Table with Predicted. Water Levels and Its Uncertainty. 1st National Salinity Engineering, 9-12 nov 2004, Perth. Téléchargeable sur <http://www.skmconsulting.com/Knowledge-and-Insights/Technical-Papers/tech-paper-Kriging-the-Water-Table-with-Predicted-Water-Levels.aspx>
- Pinson, S., Tillier, S., Allier, D., Bourguine, B., Sedan – Miegemolle, O. (2019) –** Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final. BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 125 ill., tabl., 7 ann
- Renard, F., & Jeannée, N. (2008) -** Estimating transmissivity fields and their influence on flow and transport: The case of Champagne mounts. *Water Resour. Res.*, Vol. 44, W11414, doi:10.1029/2008WR007033
- Sun, Y., Kang, S., Li, F., and Zhang, L. (2009).** Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the minqin oasis of northwest china. *Environmental Modelling & Software*, 24(10):1163 – 1170.
- Varouchakis, E. A. and Hristopulos, D. T. (2013).** Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(1):1–19.

Autres références

Bourgine B. (1996) - Potentiel d'application de la géostatistique en géoingénierie (France). Rap. BRGM R 39049, 70 p, 26 fig, 1 ann

Rouxel E., Baudoin V., Loislard M. (2006) – Cartographie de la piézométrie, Bassin sédimentaire de Grand-Lieu (44) – Rapport final – Rapport BRGM/RP-54732-FR, 59p, 14 illustrations et 5 annexes.

Annexe 1

Précision du RGE Alti 1m

Source IGN

« Le MNT RGE Alti 1m étant issu de différentes sources et étant calculé à partir de mesures plus ou moins denses a effectivement une précision variable.

Pour identifier localement le niveau de précision du MNT, il faut en première approximation utiliser le masque source qui renseigne essentiellement sur le mode d'acquisition (lidar, corrélation à partir de prise de vues aériennes, radar, BD Alti) mais aussi sur la résolution des images, la densité des levés lidar, la nature de la BD Alti ...

Les codes de ce masque source sont nombreux et nous ne disposons pas d'éléments quantitatifs relatifs à la précision pour chacun d'entre eux ; les spécifications du produit indiquent des précisions max (EMQ) pour chaque mode d'acquisition sans entrer dans les détails.

Dans ces conditions, on peut regrouper comme suit les codes avec les précisions EMQ associées :



0	pas de données
1	Raccord sacrifiant la BD ALTI® (le raccord se réalise aux dépends de la source de moindre qualité)
2	Raccord sacrifiant le LIDAR
3	Raccord sacrifiant la Corrélation
4	Raccord sacrifiant le Radar
10	Numérisation manuelle ou vectorisation 1 : 25000 equid 5 m
11	Numérisation manuelle ou vectorisation 1 : 25000 equid 10 m
12	Numérisation manuelle ou vectorisation 1 : 50000 equid 10 m
13	Numérisation manuelle ou vectorisation 1 : 50000 equid 20 m
14	Numérisation manuelle ou vectorisation 1 : 50000 equid 40 m
20	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 30 000 equid 5m
21	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 30 000 equid 10 m
22	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 30 000 equid 20 m
23	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 60 000 equid 10 m

24	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 60 000 equid 20 m
25	Restitution photogrammétrique PVA 1 : 60 000 equid 40 m
30	Lidar Bathy SHOM
39	Lidar Bathy SHOM interpolation > 10m
40	SMF SHOM
49	SMF SHOM interpolation > 10 m
50	LIDAR Topo IGN densité d'acquisition théorique non renseignée ou inférieure à 1 pt / m ²
5n	LIDAR Topo IGN densité d'acquisition théorique n points au m ² (de 51 à 57)
58	LIDAR Topo IGN densité d'acquisition théorique 8 points ou plus au m ²
59	LIDAR Topo IGN interpolation > 10m
60	Translation en Z à partir du MNE LIDAR Topo IGN densité acquisition théorique non renseignée ou inférieure à 1 pt / m ²
6n	Translation en Z à partir du MNE LIDAR Topo IGN densité d'acquisition théorique n points au m ² (de 61 à 66)
67	Translation en Z à partir du MNE LIDAR Topo IGN densité d'acquisition théorique 7 points ou plus au m ²
68	LIDAR Topo IGN sans corrections interactives
69	LIDAR Topo IGN Point Fictif
70	Origines multiples produit Litto3D
80	LIDAR Topo externe densité acquisition théorique non renseignée ou inférieure à 1 pt / m ²
8n	LIDAR Topo externe densité d'acquisition théorique n points au m ² (de 81 à 87)
88	LIDAR Topo densité d'acquisition théorique 8 points ou plus au m ²
89	LIDAR Topo externe interpolation > 10m
98	LIDAR Topo externe sans corrections interactives
99	LIDAR Topo externe Point Fictif
100	Corrélation automatique PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm Zone Rurale
101	Corrélation automatique PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm Zone Urbaine
102	Corrélation automatique PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm BD Alti® recalée
103	Corrélation automatique PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm BD Alti® non recalée
104	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR 30 >= pixel =>20 cm Zone Rurale
105	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR 30 >= pixel =>20 cm Zone Urbaine
110	Corrélation automatique PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Rurale

111	Corrélation automatique PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Urbaine
112	Corrélation automatique PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm BD Alti® non recalée
113	Corrélation automatique PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm BD Alti® recalée
114	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Rurale
115	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Urbaine
120	Corrélation automatique PVA HR pixel < 10 cm Zone Rurale
121	Corrélation automatique PVA HR pixel < 10 cm Zone Urbaine
123	Corrélation automatique PVA HR pixel < 10 cm BD Alti® recalée
124	Corrélation automatique PVA HR pixel < 10 cm BD Alti® non recalée
125	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR pixel < 10 cm Zone Rurale
126	Reprise interactive sur Corrélation automatique de PVA HR pixel < 10 cm Zone Urbaine
135	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm Zone Rurale
136	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR 30 cm >= pixel => 20 cm Zone Urbaine
140	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Rurale
141	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR 20 cm > pixel => 10 cm Zone Urbaine
145	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR pixel < 10 cm Zone Rurale
146	Corrélation automatique acquisition externe PVA HR pixel < 10 cm Zone Urbaine
150	Corrélation automatique PVA non HR pixel > 30 cm
151	Corrélation automatique acquisition externe PVA non HR pixel > 30 cm
160	Données interpolées à partir de données existantes (radar ou ancillaires) EMQ < 7 m
161	Données Radar EMQ < 7 m
162	Données ancillaire (BD Alti®) EMQ < 7 m
163	Données interpolées sur des surfaces d'eau EMQ < 7 m
164	Données interpolées sur des zones sans données disponibles EMQ < 7 m
165	données partenaire pas de 1m à 5m issues d'acquisitions LiDAR
166	données partenaire pas de 6m à 10m issues d'acquisitions LiDAR
167	données partenaire pas de 1m à 5m issues de corrélation automatique

168	données partenaire pas de 6m à 10m issues de corrélation automatique
170	LIDAR Topo IGN en forêt densité d'acquisition théorique non renseignée ou inférieure à 1 pt / m ²
17n	LIDAR Topo IGN en forêt densité d'acquisition théorique n points au m ² (de 171 à 177)
178	LIDAR Topo IGN en forêt densité d'acquisition théorique 8 points ou plus au m ²
179	LIDAR Topo IGN en forêt interpolation > 10 m
188	LIDAR Topo IGN en forêt sans corrections interactives
189	LIDAR Topo IGN en forêt Point Fictif

Les versions sous-échantillonnées (25, 75, 250) étant obtenues par décimation (1 sur n), on peut effectivement utiliser les mêmes valeurs pour qualifier la précision des altitudes de chaque nœud. Toutefois, plus le pas de la grille augmente, plus le facteur d'interpolation devient prépondérant dans l'appréciation de la précision. Je ne dispose pas d'une formule permettant de calculer une précision dégradée en fonction de la distance d'interpolation. La dégradation dépend en effet de la nature du terrain.

Annexe 2

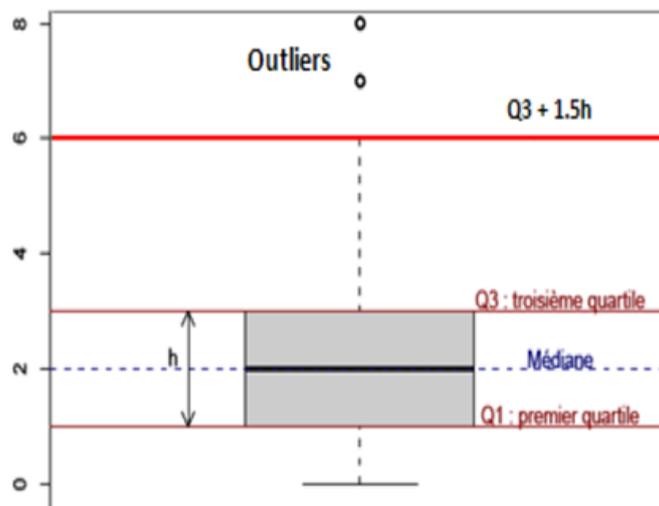
Boxplot (boîte à moustaches)

Principe

Il s'agit d'un mode de représentation graphique de la distribution d'une variable ainsi que les statistiques de base (Médiane, quartiles...) (J.W.Tukey, 1997).

Le premier (Q1) et le troisième quartile (Q3) délimitent le rectangle en gris dont la médiane y est représentée par une ligne sombre. L'indicateur de dispersion (représenté par l'interquartile Q3-Q1) est utilisé pour déterminer les limites de la fourchette pour la frontière haute $Q3 + 1,5*(Q3 - Q1)$ et la frontière basse $Q1 - 1,5*(Q3-Q1)$

Les points qui se trouvent en-dehors de cette fourchette sont généralement considérés comme des valeurs extrêmes, potentiellement aberrantes (mais pas toujours) (Petits cercle dans le schéma ci-dessous).



Principe de la "boîte à moustaches"

Annexe 3

Enquête terrain

Enquête remontée de nappe d'eau sur le secteur Est du bassin d'Arcachon

Informations générales

Les scientifiques du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), service géologique national, étudient les phénomènes de remontée de nappe sur votre commune.

Le secteur étudié est couvert par les formations géologiques récentes du Plio-Quaternaire qui sont globalement perméables et contiennent une nappe phréatique bien identifiée à échelle régionale : elle est notamment exploitée pour l'irrigation et les usages domestiques.

En périodes de hautes eaux, son niveau est proche de la surface, et si le réseau hydrographique superficiel est saturé et ne peut plus assumer ses fonctions de drainage, des phénomènes d'inondations peuvent être observés ; c'est le cas localement sur de nombreuses parcelles forestières.

Afin d'obtenir des informations précieuses sur ces phénomènes liés aux remontées des nappes d'eau souterraine, nous souhaiterions vous solliciter. 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.

À propos de vos données personnelles

Les informations recueillies vous concernant font l'objet d'un traitement destiné à alimenter une étude pour l'établissement d'un projet de cartographie des phénomènes d'inondation par remontée des nappes d'eau souterraine sur le territoire Est du Bassin d'Arcachon.

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. Localisation de votre logement

Adresse

Complément d'adresse

Code postal

Commune

2. Depuis combien d'années habitez-vous à cette adresse ?

exemple : écrire 7 pour 7 ans

3. Votre habitation a-t'elle déjà été inondée ?

oui non

Enquête remontée de nappe d'eau sur le secteur Est du bassin d'Arcachon

Inondation n°1

Si vous avez subi de multiples inondations, nous vous proposerons de remplir une page différente pour déclarer chaque épisode.

4. À quelle date a eu lieu votre première inondation ?

Date

JJ/MM/AAAA

5. Combien de jours a-t-elle duré ?

exemple : 1.5 pour 1,5 jour

6. Votre sous-sol a-t-il été inondé? Si oui, donnez une hauteur d'eau approximative

exemple : 50 pour 50 centimètres d'eau

7. Votre rez-de-chaussée a-t-il été inondé? Si oui, donnez une hauteur d'eau approximative.

exemple : 50 pour 50 centimètres d'eau

8. Votre jardin a-t-il été inondé? Si oui, donnez une hauteur d'eau approximative.

exemple : 20 pour 20 centimètres d'eau

9. Selon vous, quelle était l'origine de cette inondation ?

du ruissellement suite à de fortes précipitations une remontée de nappe d'eau souterraine le débordement
d'une rivière ou d'un cours d'eau (si oui, veuillez préciser son nom)

10. Commentaire libre

11. Avez-vous subi d'autres inondations à votre domicile ?

oui non

Enquête remontée de nappe d'eau sur le secteur Est du bassin d'Arcachon

Votre puits

35. Avez-vous un puits à votre domicile ?

oui non

36. Est-il déjà arrivé que votre puits déborde ?

oui non

37. Si oui, en quelle(s) année(s) ?

année 1

année 2

année 3

année 4

38. Disposez-vous d'observations sur les niveaux d'eau de votre puits ?

oui non

39. Si oui, quel est son niveau d'eau moyen (en profondeur) ?

exemple : 4.5 pour une profondeur de 4,5 mètres

40. Quels sont les niveaux d'eau maximaux atteints (en profondeur) et leurs dates associées ?

exemple : 2,25 m le 15/05/2007

Enquête remontée de nappe d'eau sur le secteur Est du bassin d'Arcachon

Votre source

41. Avez-vous une source à votre domicile ?

oui non

42. L'écoulement de votre source est-il permanent ?

oui non

43. Si non, quelle est la période d'écoulement de votre source ?

Exemple : Décembre à mai

Enquête remontée de nappe d'eau sur le secteur Est du bassin d'Arcachon

Vos coordonnées

44. Si besoin, pourrions-nous vous rendre visite à des fins de nivellement?

Attention : Toutes les personnes acceptant cette visite ne seront pas sollicitées pour autant. Nous effectuerons un choix en fonction de l'intérêt que représenteront vos réponses pour nos scientifiques (emplacement de votre habitation, nombre et volume des inondations, etc.).

oui non

45. Si oui, merci de préciser vos coordonnées

Nom Prénom

Adresse email Numéro de téléphone

46. Commentaires et remarques éventuelles

Annexe 4

Données auxiliaires & Masques à eau de référence

En tant qu'étape de post-traitement, des données auxiliaires ont été utilisées pour confirmer la séparation des plans d'eau permanents des zones inondées, ainsi que pour enquêter sur les types de couverture/d'utilisation des sols présents dans les zones d'intérêt.

HydroSHEDS

HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales, <https://www.hydrosheds.org/>) fournit des informations hydrographiques pour des applications à l'échelle régionale et mondiale. Les ensembles de données géoréférencées spatialement cohérentes sont dérivées de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) à 3 secondes d'arc. De résolution, tandis que les données d'élévation SRTM sont actuellement disponibles entre 56 ° S et 84 ° N. Les DEM remplis et conditionnés, les produits de direction d'écoulement et d'accumulation sont produits dans le monde entier par continent et peuvent être téléchargés gratuitement pour des utilisations non commerciales. Les produits HydroSHEDS comprennent les réseaux de cours d'eau, les limites des bassins versants, les directions de drainage et les couches de données auxiliaires telles que les accumulations de débit, les distances et les informations de topologie fluviale. Les produits disponibles du réseau hydrographique HydroSHEDS (RIV) et de la direction de drainage (DIR) ont été utilisés comme intrants supplémentaires du réseau de drainage afin de fournir la densité et la délimitation du réseau de canaux et de comparer davantage avec la géodatabase des rivières et des lacs.

Riparian Zones

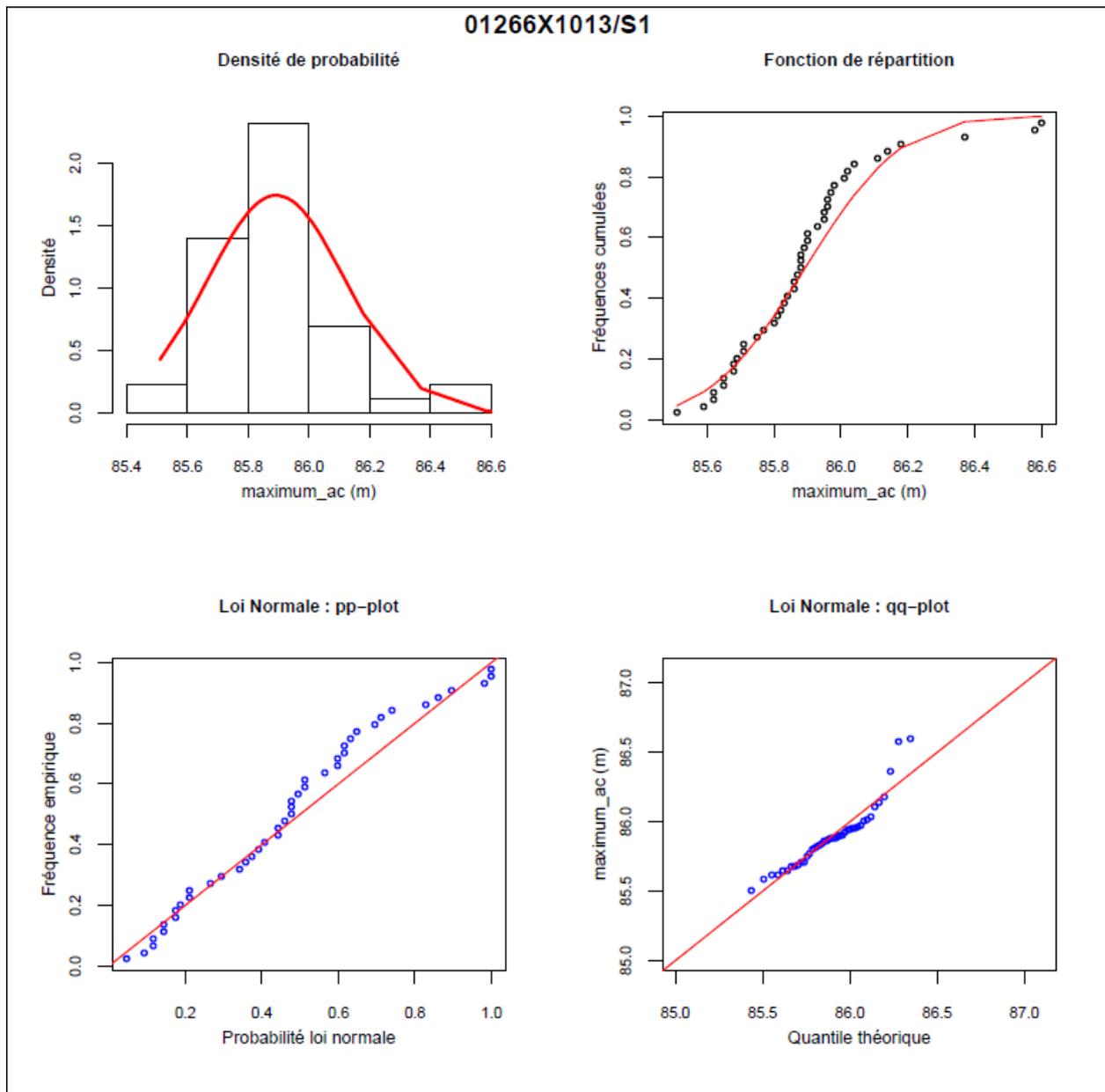
Le produit Riparian (<https://land.copernicus.eu>) de couverture terrestre et d'utilisation des terres (LC/LU) de l'Agence européenne pour l'environnement Copernicus fournit une délimitation et une caractérisation cohérentes et à très haute résolution des zones riveraines des rivières principales et moyennes pour la majeure partie de l'Europe sur la base de 2.5 m résolution spatiale de l'imagerie optique satellitaire de l'ESA Data Warehouse. Les rivières et les lacs, qui sont les eaux de surface intérieures d'eau douce permanentes du produit Riparian, ont été utilisés pour valider les plans d'eau appartenant aux systèmes fluviaux/lacustres, puis pour les séparer des zones inondées.

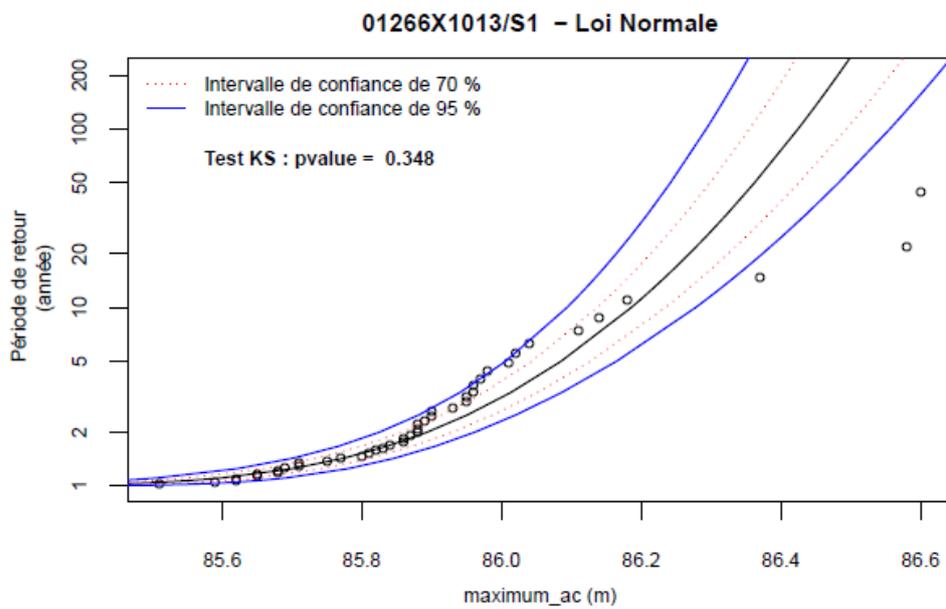
Urban Atlas 2012

L'Atlas Urbain (<https://land.copernicus.eu>) fournit des données paneuropéennes comparables sur l'utilisation des terres et la couverture terrestre pour les zones urbaines fonctionnelles (FUA). L'atlas urbain est une initiative conjointe de la direction générale de la politique régionale et urbaine de la Commission européenne et de la direction générale des entreprises et de l'industrie dans le cadre du programme Copernicus de l'UE avec le soutien de l'Agence spatiale européenne et de l'Agence européenne pour l'environnement. Des cartes d'occupation du sol et d'utilisation des sols sur les villes d'Aquitaine et en Ile de France sont disponibles ont été utilisées pour extraire les plans d'eau.

Annexe 5

Exemple de résultats pour les ajustements de lois de probabilité pour la chronique piézométrique de longue durée 01266X1013/S1





Périodes de retour et quantiles correspondant

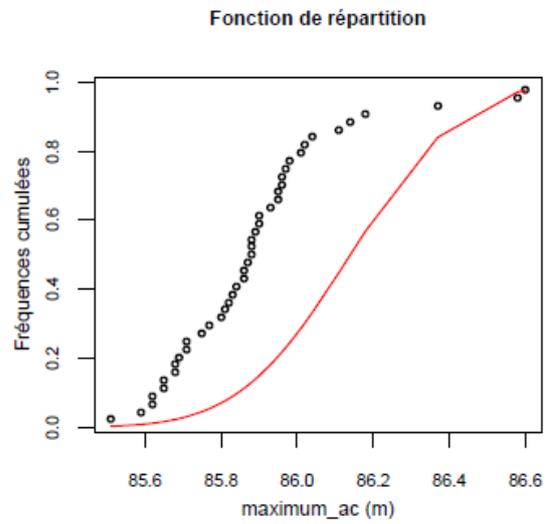
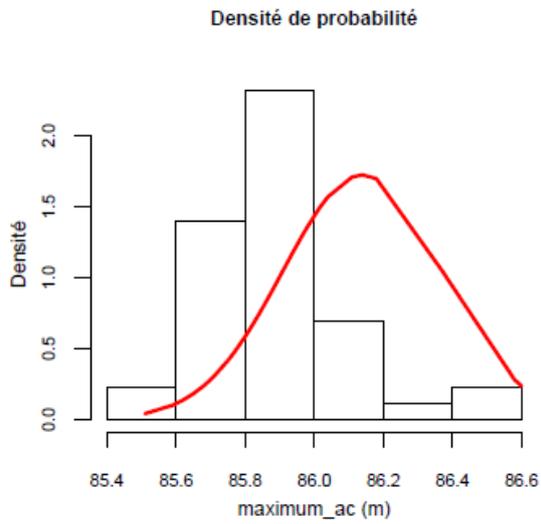
20 ans humide : 86.27

50 ans humide : 86.36

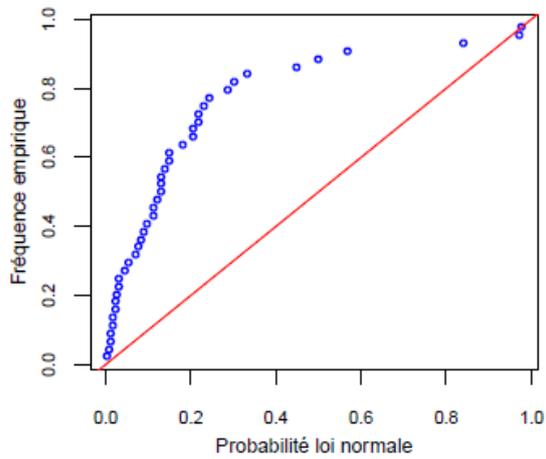
100 ans humide : 86.42

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

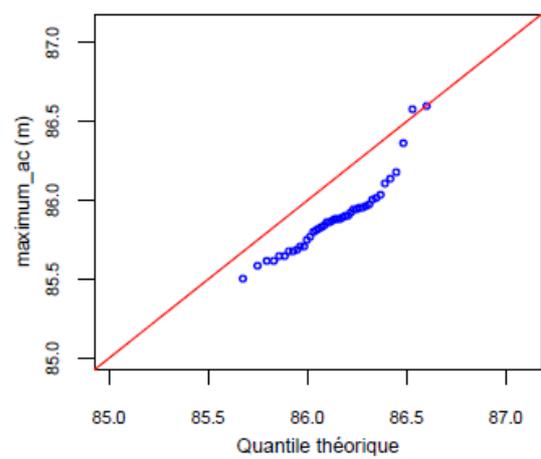
01266X1013/S1

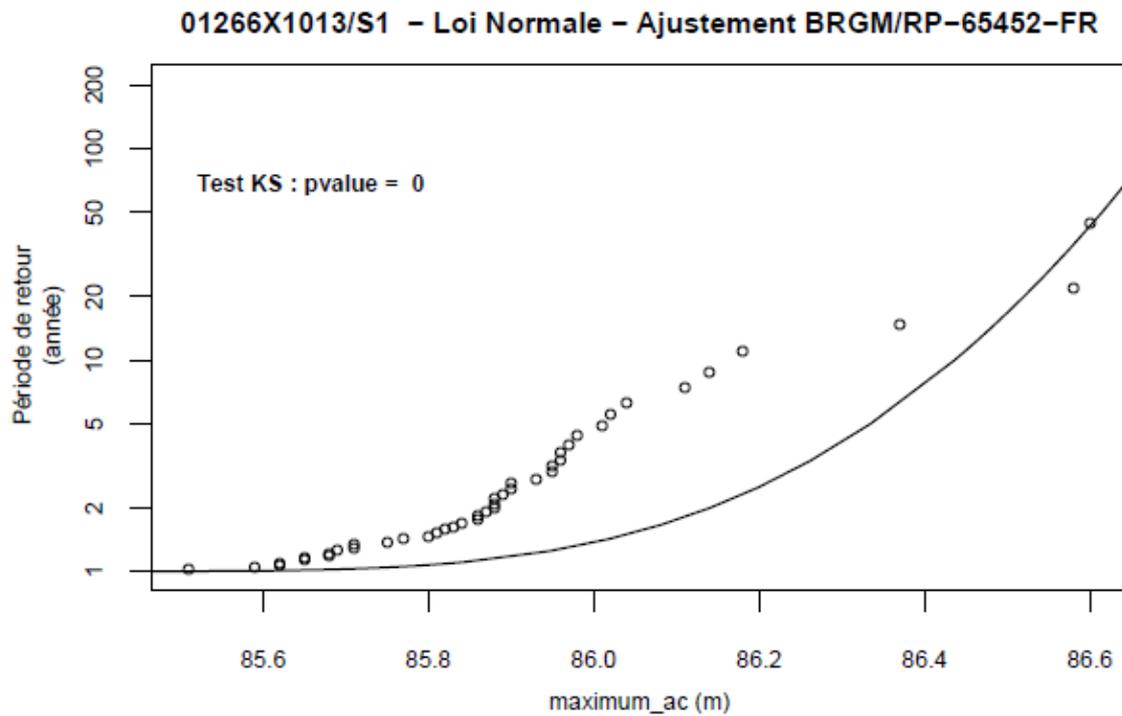


Loi Normale - Ajustement BRGM/RP-65452-FR : pp-plot



Loi Normale - Ajustement BRGM/RP-65452-FR : qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.52

50 ans humide : 86.61

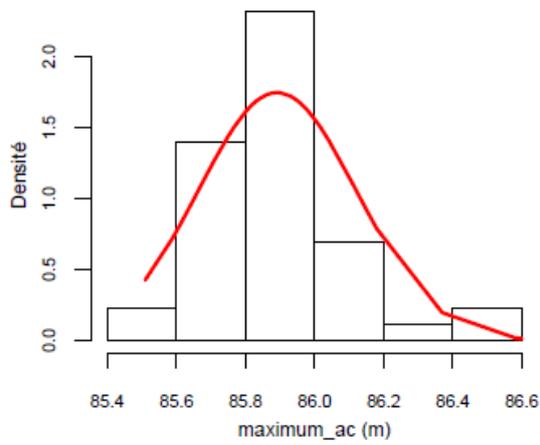
100 ans humide : 86.68

100 ans humide (formule analytique) : 86.68

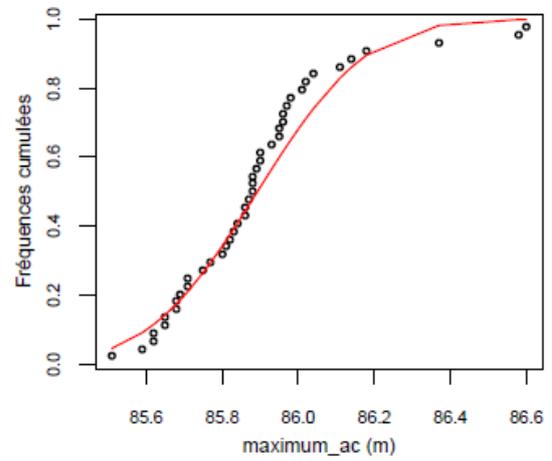
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

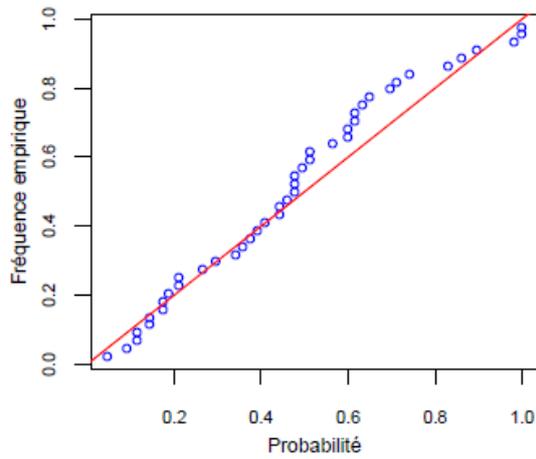
Densité de probabilité loi Log-normale



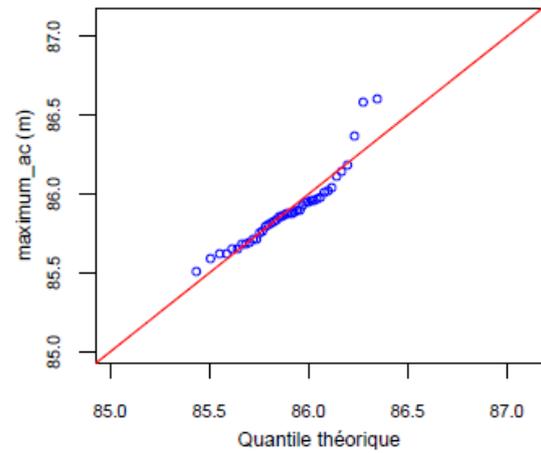
Fonction de répartition loi Log-normale

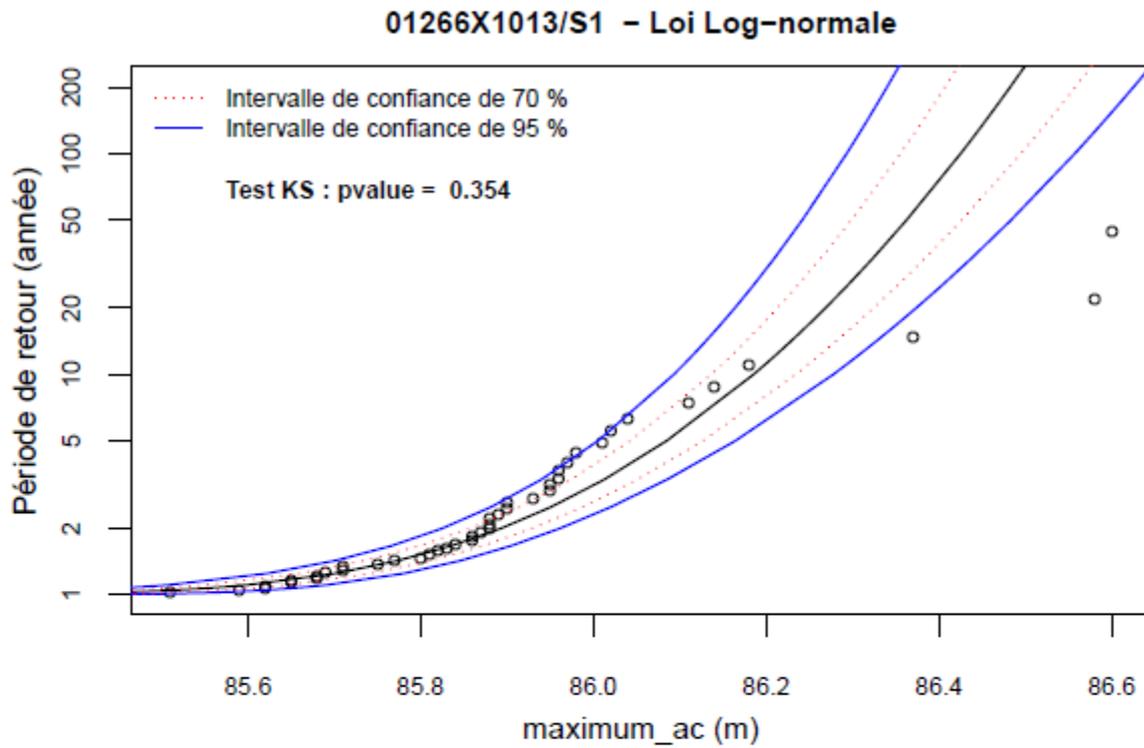


Loi Log-normale : pp-plot



Loi Log-normale : qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.27

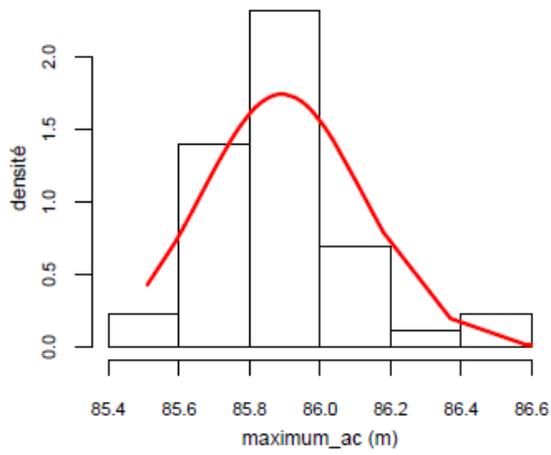
50 ans humide : 86.36

100 ans humide : 86.42

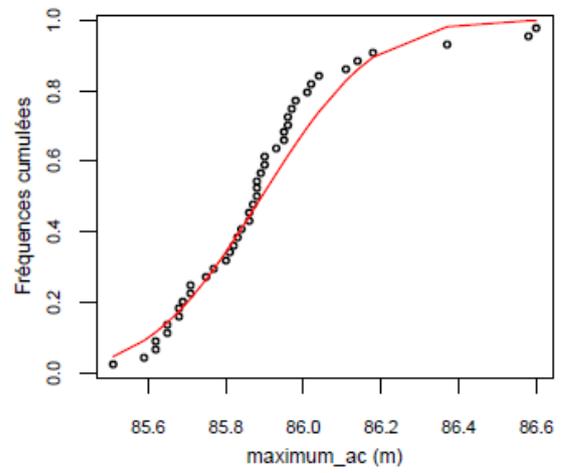
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

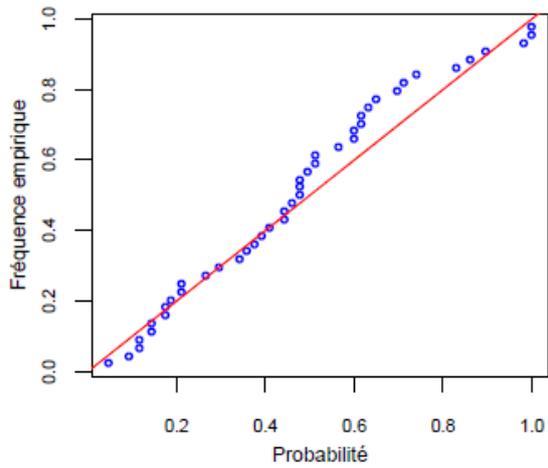
Densité de probabilité loi Gamma



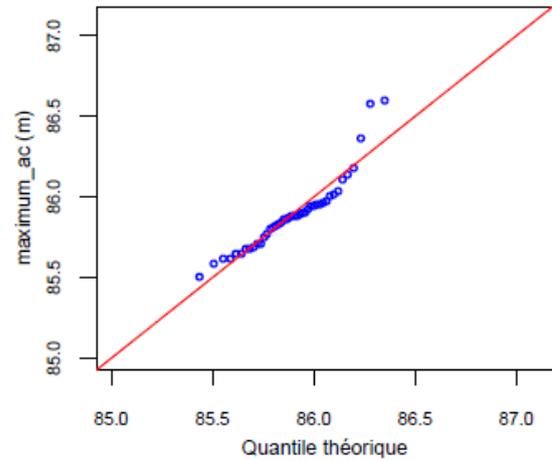
Fonction de répartition loi Gamma

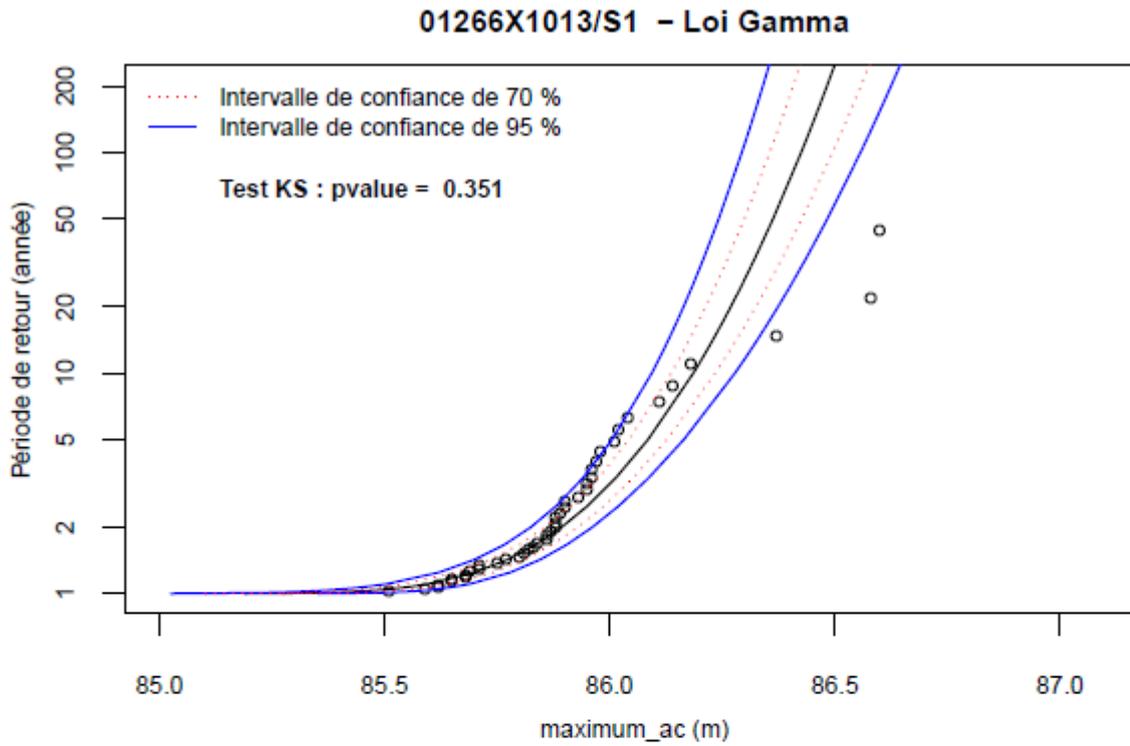


Loi Gamma: pp-plot



Loi Gamma: qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.27

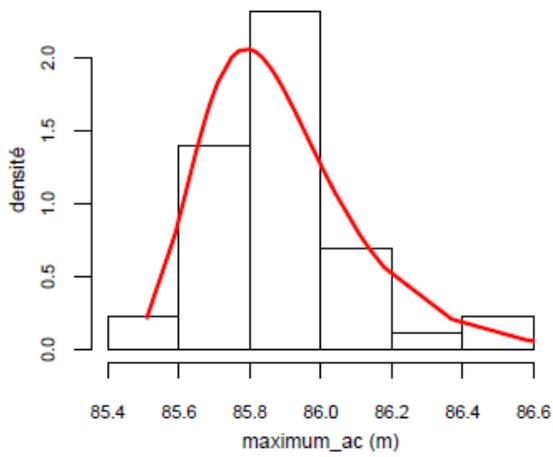
50 ans humide : 86.36

100 ans humide : 86.43

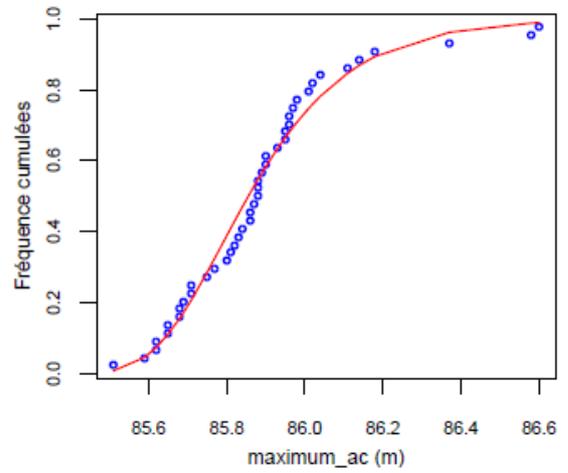
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

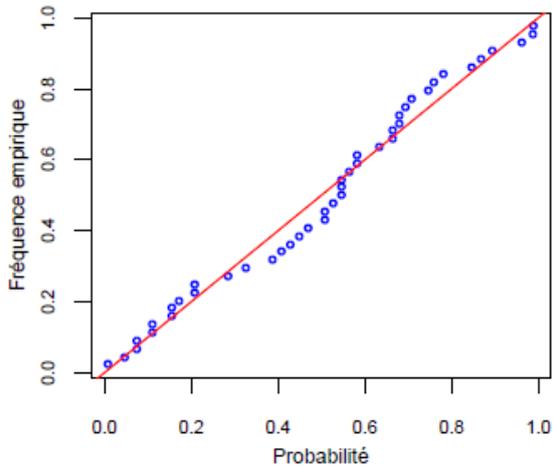
Densité de probabilité loi de Gumbel



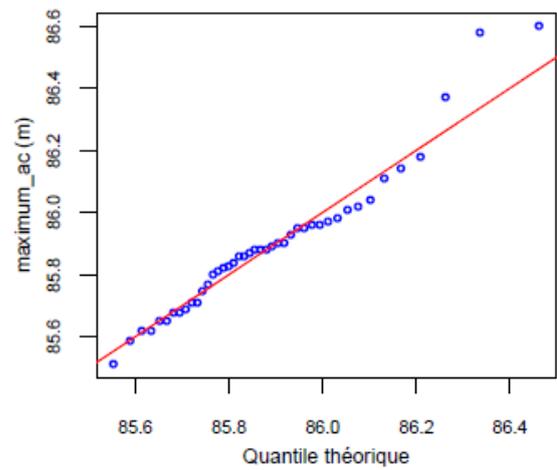
Fonction de répartition loi de Gumbel

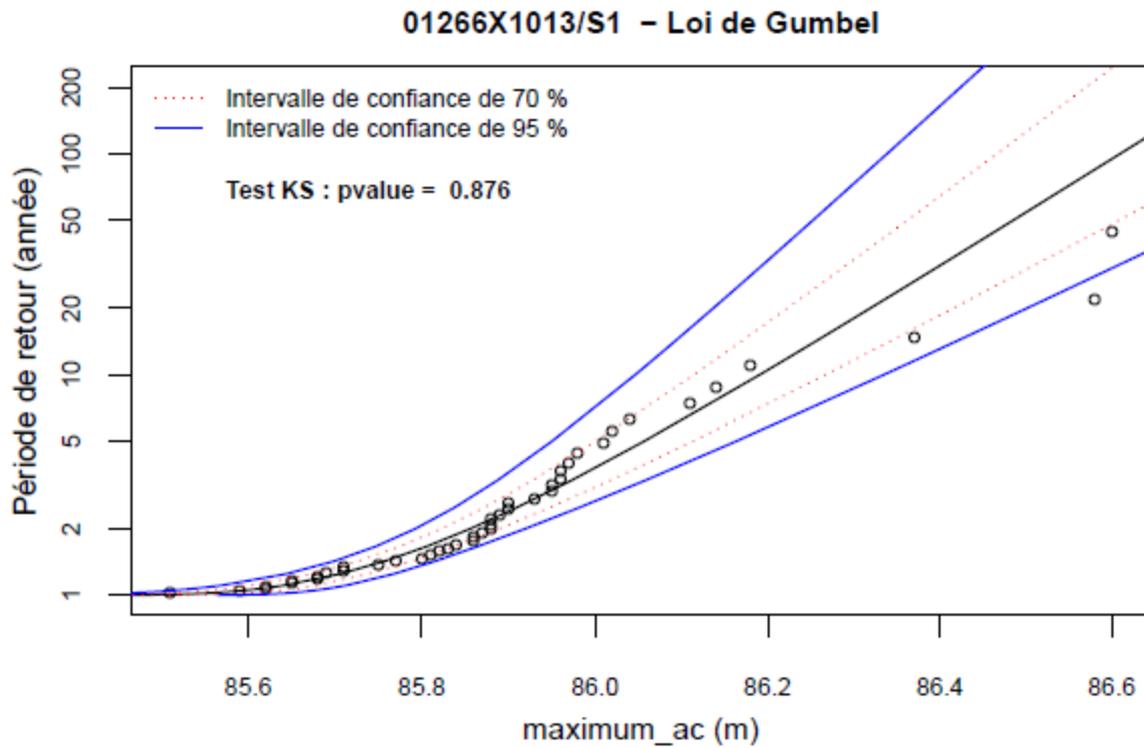


Loi de Gumbel : pp-plot



Loi de Gumbel : qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.32

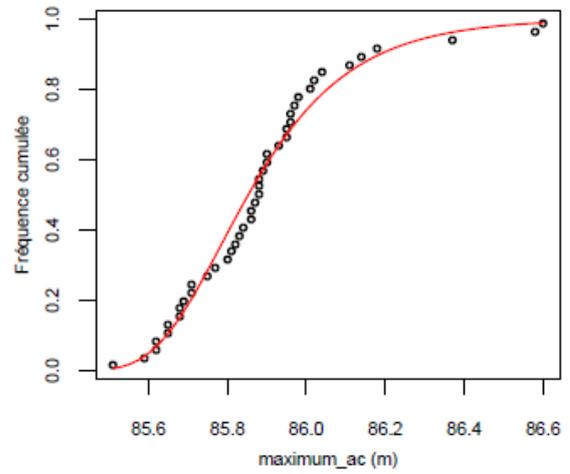
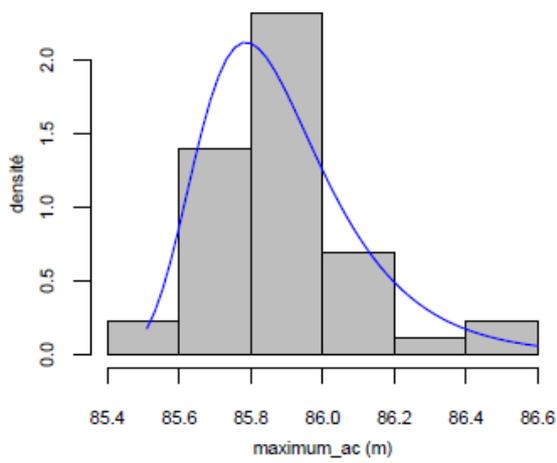
50 ans humide : 86.49

100 ans humide : 86.61

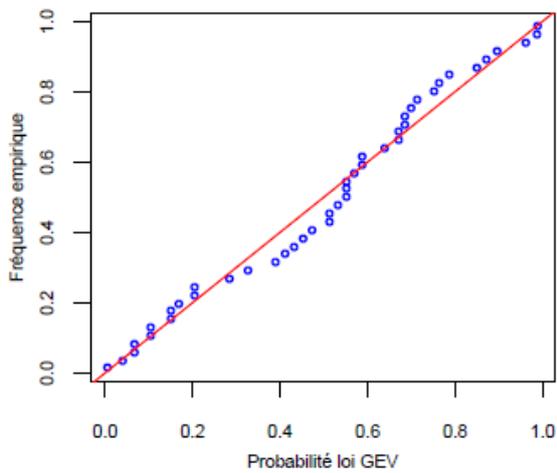
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

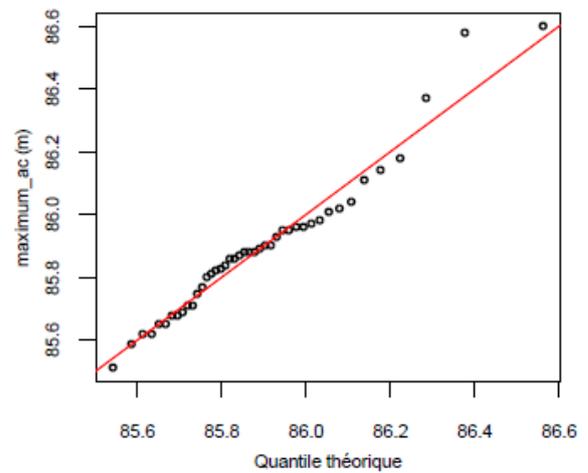
DCF empirique et GEV



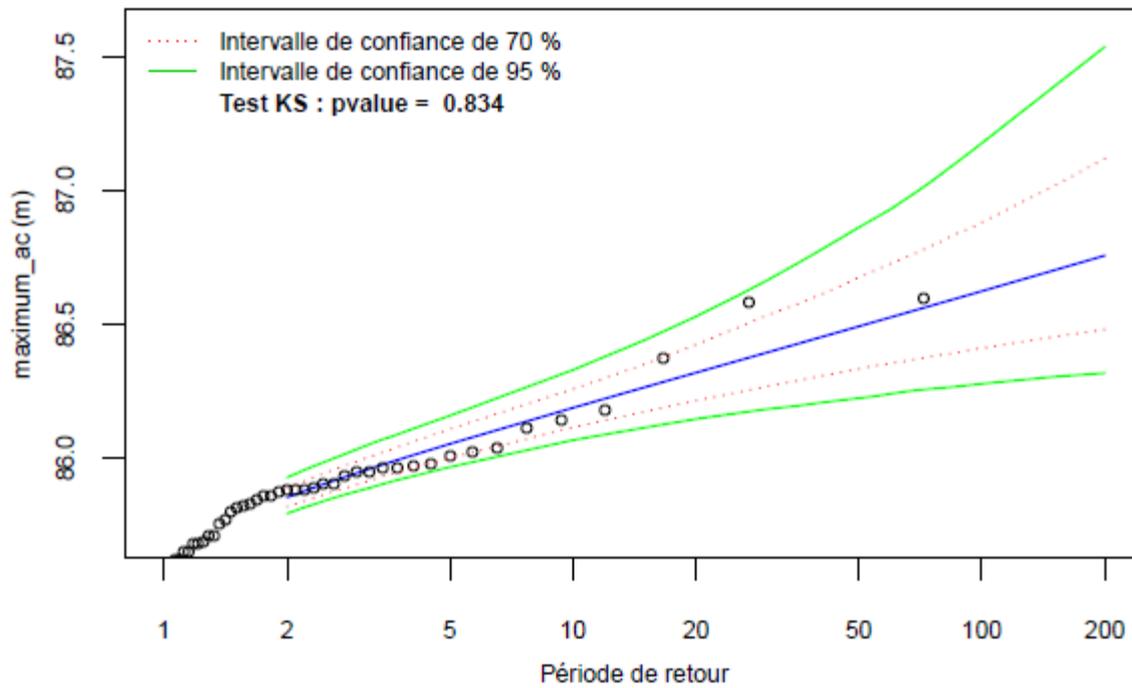
Loi GEV : pp-plot



Loi GEV : qq plot

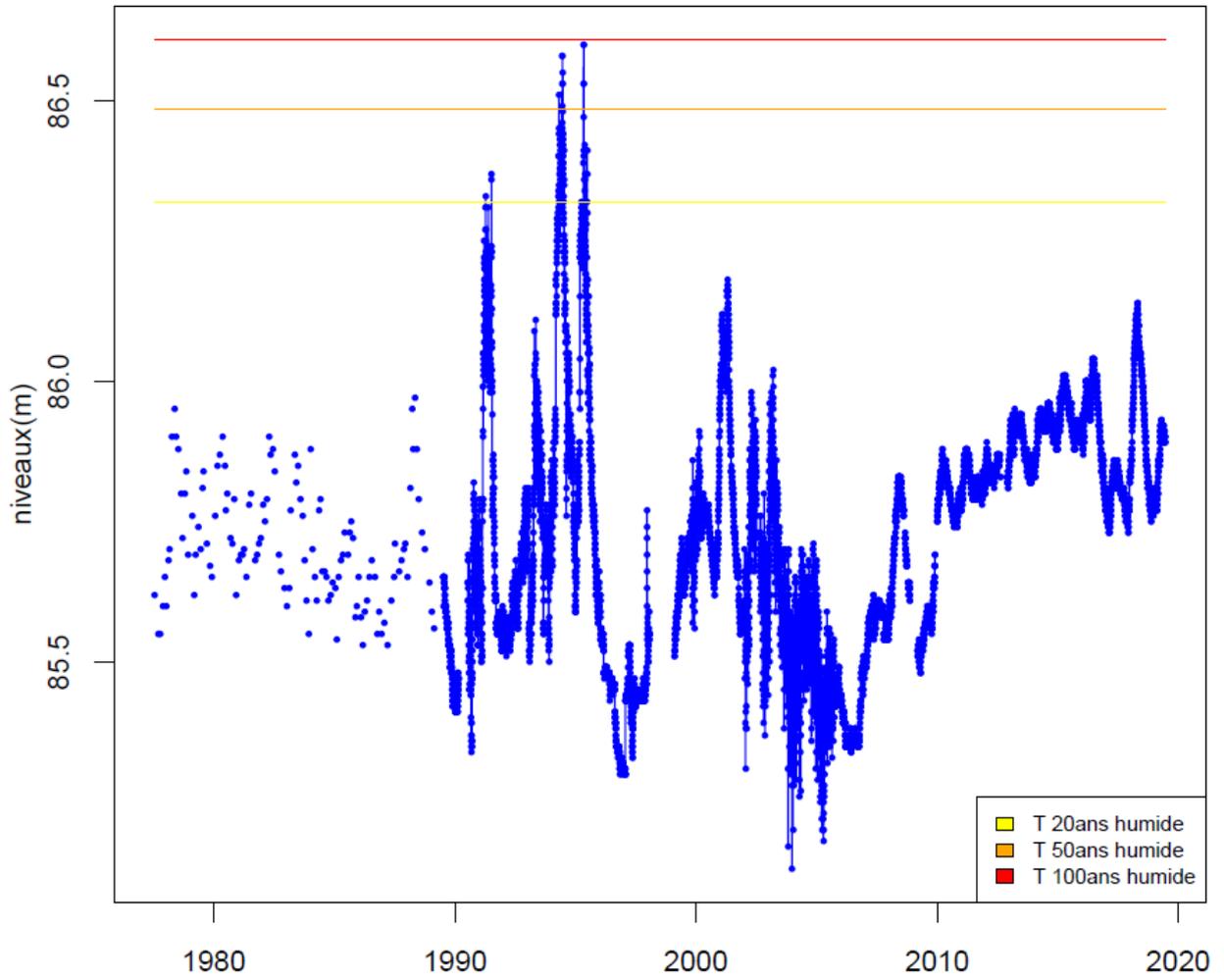


01266X1013/S1 - Loi GEV



Périodes de retour (année) :	20	50	100
maximum_ac (m)	: 86.32	86.49	86.62

01266X1013/S1



Annexe 6

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

Définition

La géostatistique est une discipline dont l'objectif est l'étude des phénomènes « régionalisés », c'est-à-dire présentant une certaine « structure » dans l'espace (x,y,z) ou dans le temps. Par « structure » on entend la corrélation spatiale d'une variable entre deux points de mesure à l'intérieur d'une zone d'étude ou au même point en deux instants différents. Ainsi la cote piézométrique en un point A d'un aquifère est en général peu différente de la cote piézométrique en un point B très proche (au même instant) : les deux côtes piézométriques sont très « corrélées ». On comprend aisément que cette corrélation diminue lorsque la distance entre les points A et B augmente. A la limite, on conçoit qu'il y ait des cas où ces cotes piézométriques soient indépendantes l'une de l'autre lorsque les points sont suffisamment éloignés.

La cote piézométrique ou encore les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elles présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est le **variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur $Z(x_0)$ inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

Le variogramme

Dans un phénomène naturel comme la topographie ou la cote piézométrique, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et x + h est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La Figure 2 illustre ce calcul.

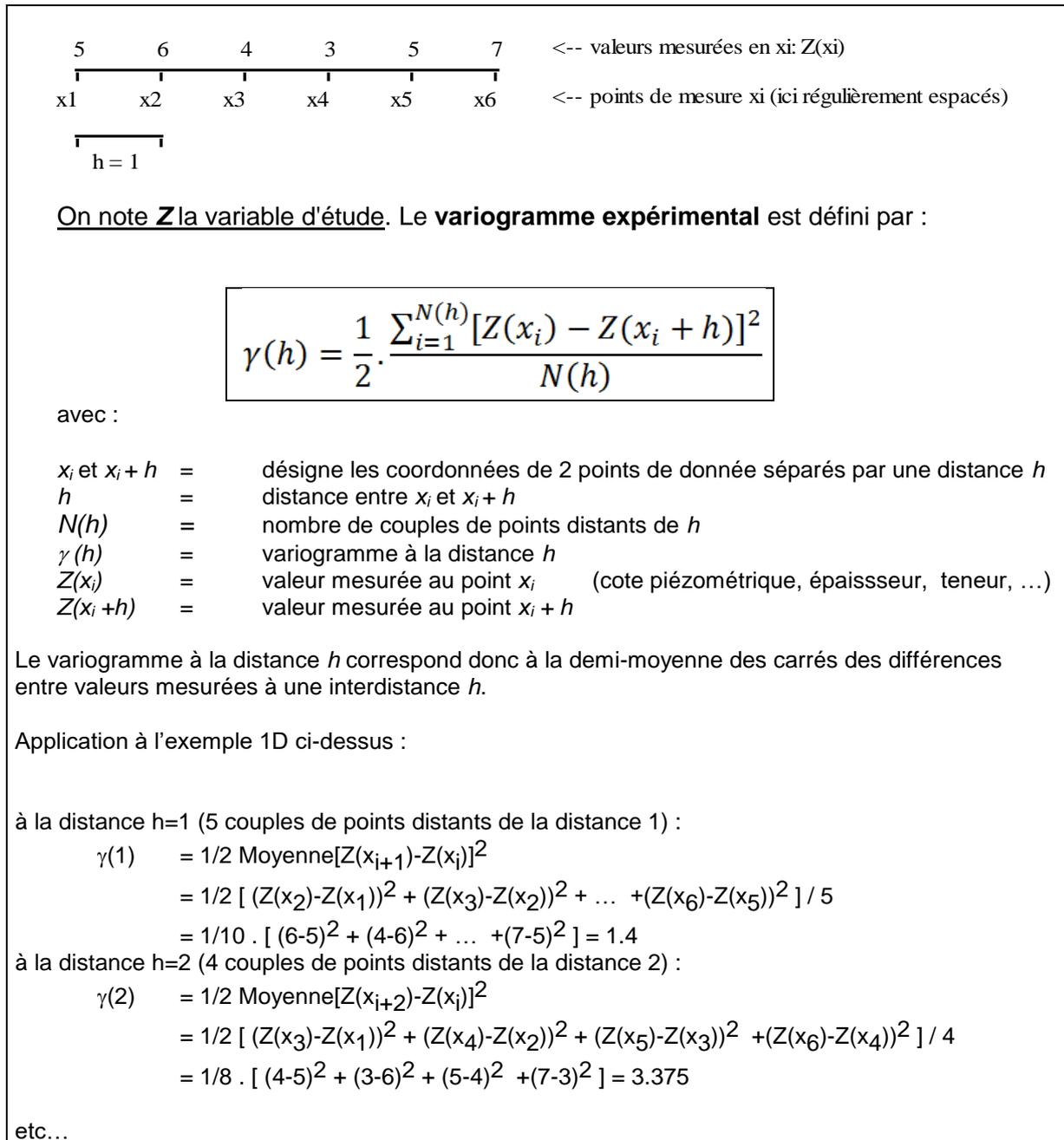


Figure 2 : Définition et exemple de calcul du variogramme expérimental

Interprétation du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépite.
- **Continuité spatiale au-delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - Figure 3 (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine : $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible, et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie**,
 - **imbrication d'échelles de variabilité**,
 - **absence de portée finie** - Figure 3 (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

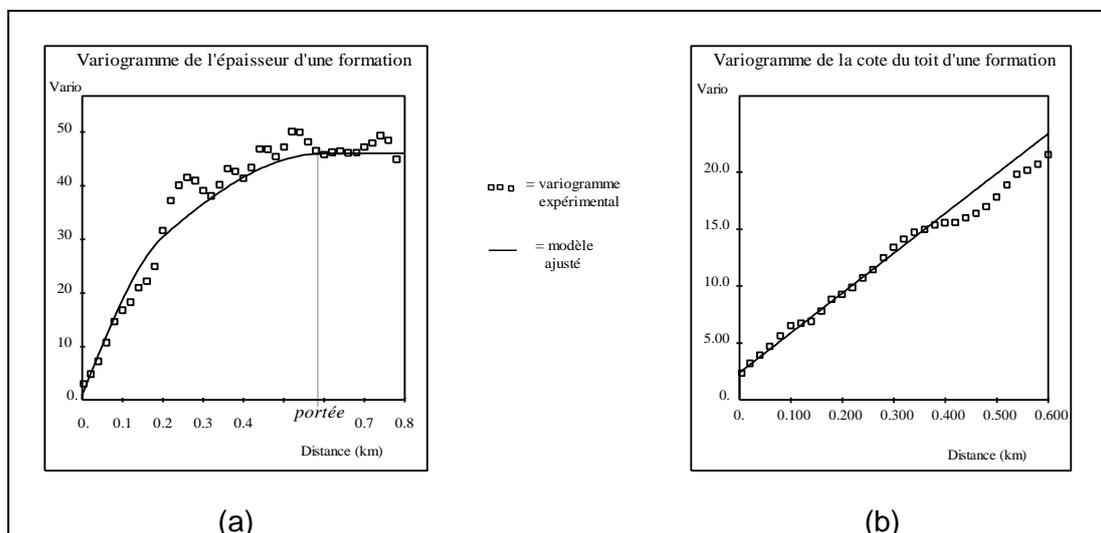


Figure 3: Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

Le krigeage est la méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable.

Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage est une méthode d'interpolation linéaire qui permet d'obtenir une estimation non biaisée et dont l'erreur d'estimation est minimale.

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ».

La variable d'étude est notée Z . La valeur interpolée au point x_0 , notée $Z^*(x_0)$, est alors :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

(avec la condition $\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$)

$Z^*(x_0)$ est donc une combinaison linéaire des données de base $Z(x_j)$ mesurées aux points x_j .

Les λ_j sont les poids respectifs (ou pondérateurs) attribués à chaque donnée $Z(x_j)$.

Ces poids sont calculés sous contrainte que leur somme soit égale à 1 (pour des conditions de non biais) et sous contrainte d'être en accord avec la structure spatiale mise en évidence par le variogramme, de façon à ce que l'erreur d'interpolation soit minimale. Lorsqu'on interpole la valeur en un point x , le poids attribué aux données environnantes sera d'autant plus fort que cette donnée est proche, tout en tenant compte de la densité de données, de leur disposition vis-à-vis des anisotropies, etc....

Le système d'équation permettant d'obtenir les poids de krigeage est donné *Figure 4*.

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

- n = nombre d'informations disponibles
 i, j = indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n
 x_i, x_j = points de mesure
 x_0 = point à estimer
 λ_i (ou λ_j) = pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i
 μ = paramètre de Lagrange
 $\gamma(x_i, x_j)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_j
 $\gamma(x_i, x_0)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_0 ,

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu$$

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au point à estimer x_0 , par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_0)$;
- la répartition des informations entre elles, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .

Figure 4: Equations du krigeage ordinaire

Le krigeage offre trois avantages principaux par rapport aux autres méthodes d'interpolation :

- il prend en compte la structure du phénomène, à travers le variogramme : il se base donc sur une fonction d'interpolation « objective », c'est-à-dire mesurée sur les données, et non « subjective » = choisie arbitrairement,
- il permet le calcul de l'erreur d'interpolation (ou plus précisément la variance de cette erreur) : c'est actuellement la seule méthode d'interpolation qui permet cela,
- il permet d'intégrer des variables secondaires, corrélées à la variable d'étude, connues soit aux points de données, soit exhaustivement sur une grille. On peut ainsi prendre en compte le fait que la cote piézométrique est dans certains cas (nappes libres) corrélée à la cote topographique. Dans le cas où on utilise plusieurs variables corrélées, disponibles aux points de mesure, on parle de « co-krigeage ». Dans le cas où on utilise une variable connue de façon exhaustive, on utilise une technique appelée « krigeage avec dérive externe ».

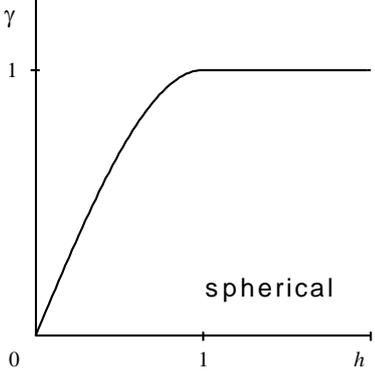
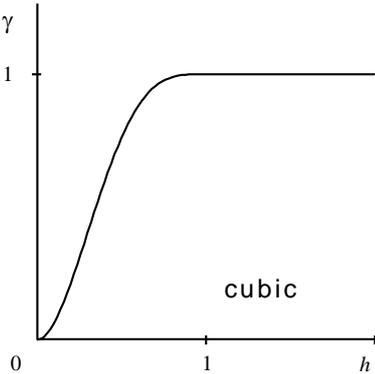
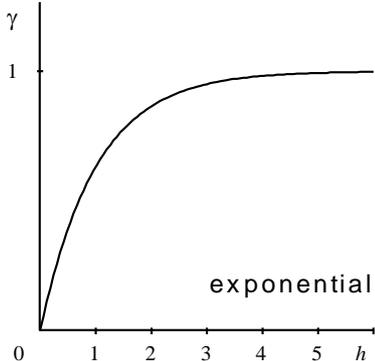
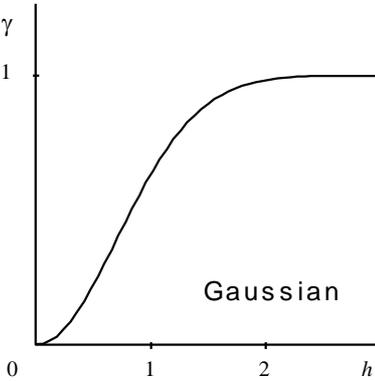
Co-krigeage, krigeage « universel » et krigeage avec « dérive externe »

Les formules du krigeage ordinaire peuvent se généraliser au cas multivariable (prise en compte d'une ou plusieurs autres variables mesurées en quelques points), ainsi qu'au cas où on introduit une dérive liée à un polynôme dépendant des coordonnées (krigeage dit « universel ») ou d'une fonction corrélée connue en tout point de mesure ainsi que sur la grille à calculer (krigeage avec dérive externe).

Le but de ce document n'étant pas d'exposer en détails toute la théorie géostatistique, le lecteur est invité à se reporter à l'excellent ouvrage de Chilès (1999, ré-édité en 2012), dans lequel ces méthodes sont exposées et illustrées.

Annexe 7

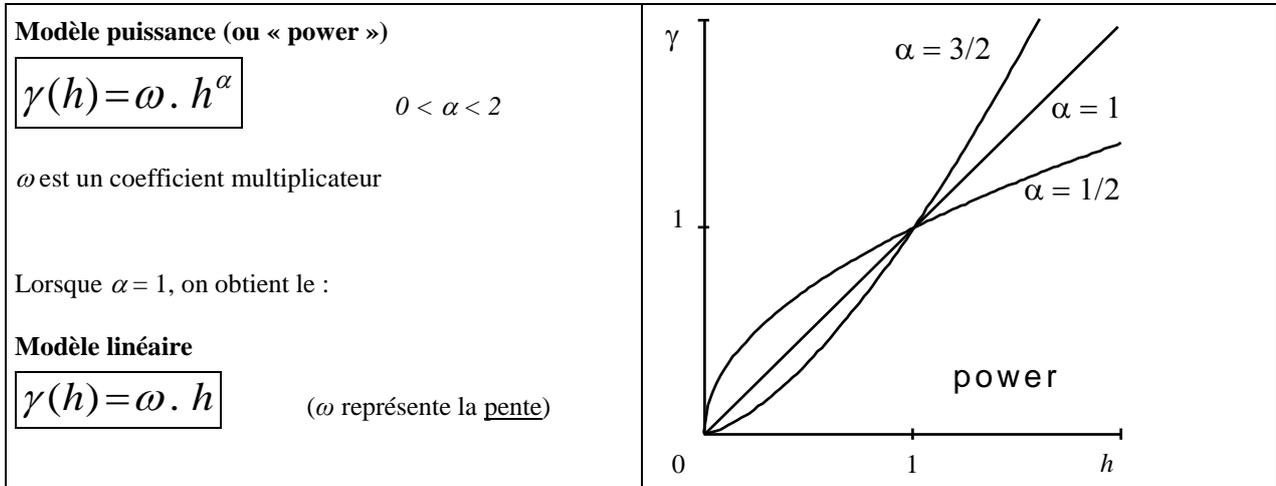
Les modèles de variogrammes les plus utilisés

<p>Modèle sphérique</p> $\gamma(h) = C \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right) \quad \text{si } h \leq a$ $\gamma(h) = C \quad \text{si } h \geq a$ <p>C est le palier, a la portée</p> <p>Ce variogramme est linéaire à l'origine, de pente $3C/2a$. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95% du palier est égale à $0.81a$</p>	
<p>Modèle cubique</p> $\gamma(h) = C \cdot \left(7 \cdot \frac{h^2}{a^2} - \frac{35}{4} \cdot \frac{h^3}{a^3} + \frac{7}{2} \cdot \frac{h^5}{a^5} - \frac{3}{4} \cdot \frac{h^5}{a^5} \right) \quad \text{si } h \leq a$ $\gamma(h) = C \quad \text{si } h \geq a$ <p>Ce variogramme présente un comportement parabolique à l'origine, et une portée à la distance a. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95% du palier est égale à $0.69a$</p>	
<p>Modèle exponentiel</p> $\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right)$ <p>(C palier, a paramètre d'échelle)</p> <p>Ce modèle a un comportement linéaire à l'origine. Il présente un palier asymptotique. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95% du palier est égale à $3a$.</p>	
<p>Modèle gaussien</p> $\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{2a^2}\right) \right)$ <p>(C palier, a paramètre d'échelle)</p> <p>Ce modèle a un comportement parabolique à l'origine. Il présente un palier asymptotique. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95% du palier est égale à $2.45a$.</p> <p>(on trouve aussi ce modèle avec h^2/a^2 au lieu de $h^2/2a^2$, dans ce cas la portée pratique est $1.73a$).</p>	

Principaux modèles de variogrammes pour les phénomènes stationnaires.

Les modèles sont tracés pour un palier et un paramètre d'échelle unitaires

D'après Chilès, 1999



Modèle de variogramme Puissance et Linéaire- cas non stationnaire

Les modèles sont tracés pour un paramètre $\omega=1$

D'après Chilès, 1999



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