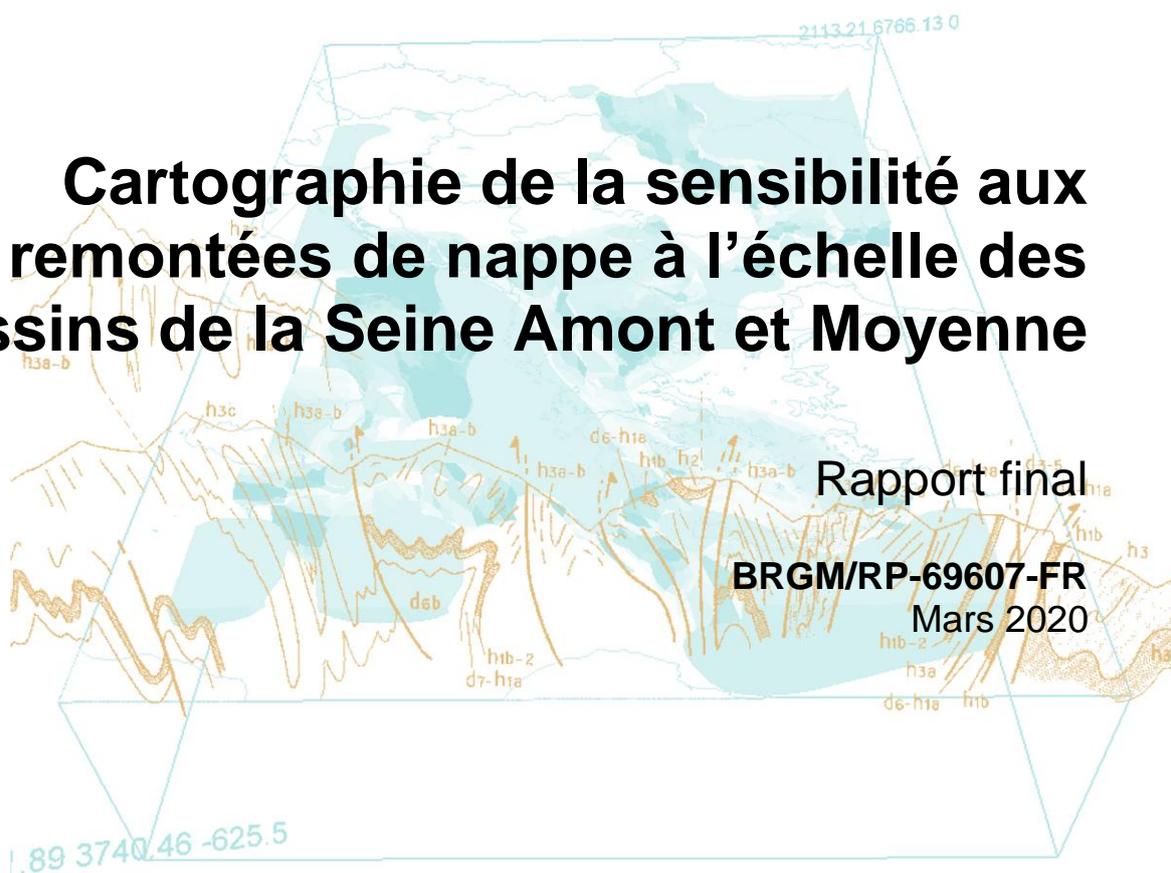




Cartographie de la sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne



Rapport final

BRGM/RP-69607-FR

Mars 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Cartographie de la sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne

Rapport final

BRGM/RP-69607-FR
Mars 2020

L. Arnaud, E. Papageorgiou, Y. Assy, M. Foumelis
Avec la collaboration de
A. Brugeron, J.-C. Manceau et T. Dupaigne

Vérificateur :

Nom : H. Bessière

Fonction : Hydrologue,
Hydrogéologue

Date : 27/03/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : P. Audigane

Fonction : Responsable Unité
Gestion de la Ressource en Eau

Date : 09/04/2020

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Eaux souterraines, Domaine sédimentaire, Géostatistique, Hautes Eaux, Inondation, Remontée de nappe, Télédétection, Bassin de la Seine, Bourgogne Franche Comté, Centre Val de Loire, Grand Est, Ile de France.

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

Arnaud L., E. Papageorgiou, Y. Assy, M. Foumelis (2020) – Cartographie de la sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne. Rapport final. BRGM/RP-69607-FR, 89 p., 49 ill., 2 ann.

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

Synthèse

Suite à une consultation nationale des Services de Prévention des Crues (SPC) organisée en 2018 par le SCHAPI sur les besoins d'appui technique vis-à-vis des phénomènes d'inondations par remontée de nappe, les SPC SMYL (Seine Moyenne-Yonne-Loing) et SAMA (Seine Amont - Marne Amont) ont souhaité que la cartographie nationale de la sensibilité des territoires au « risque d'inondation par remontée de nappe » soit précisée sur le bassin versant de la Seine, de sa confluence avec l'Oise à l'amont de Troyes (superficie de 2 700 km²).

Ce besoin d'une meilleure connaissance des zones sensibles aux remontées de nappe fait notamment suite aux crues récentes de mai/juin 2016 et janvier 2018. La présente étude s'inscrit dans le cadre de la convention annuelle DGPR/BRGM.

D'un point de vue méthodologique, la démarche suivie sur les bassins de la Seine Amont et Moyenne s'appuie sur celle développée dans le cadre de la cartographie nationale. Cependant, dans le but d'améliorer la fiabilité des résultats, les principaux apports suivants sont à souligner : 1) intégration des inondations par remontée de nappe récentes, couvrant notamment les événements de 2016 et 2018, 2) intégration de données piézométriques complémentaires, non présentes dans les bases de données nationales ADES ou BSS EAU, 3) consolidation du calcul des niveaux piézométriques humides de période de retour 100 ans par l'utilisation d'autres lois de probabilité et 4) interpolation à une maille de 100 m (contre 250 m à l'échelle nationale).

En parallèle, une approche complémentaire par le traitement d'images satellites a été conduite à partir des données de la mission Copernicus Sentinel.

A ce stade, les résultats issus du traitement des images satellites ne peuvent être directement utilisés comme donnée d'entrée du modèle géostatistique pour interpolation de la surface piézométrique de très hautes eaux mais peuvent apporter des éléments de validation très intéressants. Ce travail de validation / confrontation n'a pas pu être mené dans le cadre du projet, mais il pourrait être envisagé sur des secteurs de plus grande échelle.

Concernant la cartographie de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne, des améliorations significatives ont été obtenues sur les principaux secteurs où l'approche nationale avait pu être mise en défaut : nappe des calcaires de Brie à l'affleurement, versants crayeux en Champagne, zones humides en Beauce et meilleure continuité d'une sensibilité élevée aux remontées de nappe en fond de vallées. Pour le reste, les résultats apparaissent très cohérents.

A l'échelle du site d'étude, il apparaît difficile de réduire les incertitudes ; l'exercice consistant à réaliser des traitements automatisés et géostatistiques atteint donc ici ses limites. Seules des validations terrain (reconnaitances, enquêtes, etc.) et une confrontation à des études ciblées, aux connaissances des acteurs de terrain pourraient permettre de consolider la cartographie à une échelle plus locale. Il ne semble alors pas possible d'exploiter la carte à une échelle supérieure au 1 / 100 000.

Sommaire

1. Eléments de contexte	11
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
1.2. PHENOMENES DE REMONTEE DE NAPPE.....	12
1.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	12
1.4. RETOUR SUR L'APPROCHE NATIONALE.....	15
1.5. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	17
2. Données compilées	19
2.1. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES.....	19
2.1.1. Données issues d'ADES et de la BSS-EAU.....	19
2.1.2. Autres sources de données.....	20
2.1.3. Synthèse.....	21
2.2. NIVEAUX PIEZOMETRIQUES PONCTUELS.....	21
2.3. CARTES PIEZOMETRIQUES.....	22
2.3.1. Calcaires de Champigny, 1967.....	23
2.3.2. Oligocène, 1981.....	24
2.3.3. Sables de Fontainebleau, 1999.....	24
2.3.4. Calcaires de Beauce, hautes eaux 2002.....	25
2.3.5. Craie champenoise, hautes eaux 2002.....	25
2.3.6. Craie à l'est du Loing, hautes eaux 2003.....	26
2.3.7. Calcaires du Lutétien, hautes eaux 2014.....	26
2.4. DONNEES HISTORIQUES.....	27
2.5. MODELES HYDRODYNAMIQUES.....	28
2.6. EAUX SUPERFICIELLES.....	29
3. Elaboration de la carte de sensibilité aux remontées de nappe	33
3.1. ETAPE 1 : ESTIMATION DU NIVEAU MAXIMAL PROBABLE DES NAPPES.....	33
3.1.1. Chroniques piézométriques de longue durée.....	33
3.1.2. Chroniques piézométriques de courte durée.....	37
3.1.3. Synthèse des données d'entrée.....	39
3.2. ETAPE 2 : INTERPOLATION DU NIVEAU MAXIMUM PROBABLE.....	40
3.2.1. Principe des méthodes géostatistiques.....	40
3.2.2. Analyse variographique.....	41

3.2.3. Validation croisée	43
3.2.4. Interpolation	45
3.3. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE ET ERREURS ASSOCIEES	48
3.4. ETAPE 4 : VALIDATION ET LIMITES D'UTILISATION	51
3.4.1. Comparaison avec la carte nationale.....	51
3.4.2. Limites d'utilisation	55
4. Traitement de l'imagerie satellitale.....	57
4.1. DONNEES UTILISEES.....	57
4.2. METHODOLOGIE GENERALE	58
4.3. CARTOGRAPHIE SAR ET OPTIQUE DES INONDATIONS.....	59
4.3.1. Principales difficultés d'interprétation.....	59
4.3.2. Détection des inondations basée sur le SAR	60
4.3.3. Détection des inondations basée sur l'optique.....	64
4.4. EXEMPLES DE RESULTATS	66
4.4.1. Cartographie des inondations basées sur la classification RVB.....	66
4.4.2. Cartographie des inondations basées sur l'analyse des séries temporelles.....	68
4.4.3. Cartographie des inondations basées sur la détection optique	70
4.5. LIMITES ET PERSPECTIVES.....	71
4.5.1. Principales limites identifiées.....	71
4.5.2. Perspectives.....	71
5. Conclusions	73
6. Bibliographie.....	75

Liste des illustrations

Illustration 1 – Délimitation de la zone d'étude (cours d'eau en bleu, départements et numéros INSEE associés en noir)	11
Illustration 2 – Coupe hydrogéologique centrée sur l'aquifère du Champigny (source : C. MEGNIEN, 1979)	13
Illustration 3 – Entités hydrogéologiques BDLISA présentes à l'affleurement sur la zone d'étude (carte = regroupement par entités BDLISA de niveau 3).....	14
Illustration 4 – Carte nationale des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant l'élimination des zones à forte pente et les masques des secteurs considérés imperméables (en marron) et des EAIPce et EAIPsm (en bleu) (rapport BRGM/RP-65452-FR).....	16

Illustration 5 – Chroniques piézométriques avant (à gauche) et après suppression des valeurs aberrantes (à droite)	20
Illustration 6 – Tableau récapitulatif des chroniques piézométriques exploitables	21
Illustration 7 – Tableau récapitulatif des niveaux piézométriques ponctuels peu profonds.	21
Illustration 8 – Localisation des niveaux piézométriques ponctuels compilés	22
Illustration 9 – Points issus des cartes piézométriques sélectionnés après échantillonnage aléatoire	23
Illustration 10 – Extrait de la carte piézométrique des calcaires de Champigny (hautes eaux 1967)	24
Illustration 11 – Surestimation de la sensibilité aux remontées de nappe liée aux points de mesure utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique de la craie champenoise d'avril 2002 (extrait de la carte nationale)	26
Illustration 12 – Localisation des inondations par remontée de nappe répertoriées sur la zone d'étude	28
Illustration 13 – Exploitation des niveaux de très hautes eaux de la nappe des calcaires de Brie simulés par le modèle hydrodynamique AQUI'Brie (carte de gauche extraite du rapport de Coquelet et Bellier, 2019)	29
Illustration 14 – Points de contrainte liés aux rivières (source : BDCarthage)	30
Illustration 15 – Comparaison des EAIP et des PPRI en amont de la confluence de l'Aube et de la Seine (sources : DGPR, DDT de l'Aube)	31
Illustration 16 – Boîte à moustaches des écarts maximums constatés entre les différentes lois de probabilité (échantillon de 305 points de mesure)	35
Illustration 17 – 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)	35
Illustration 18 – 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	36
Illustration 19 – Points dits peu fiables et méthodes d'association mises en oeuvre	37
Illustration 20 – Exemple des piézomètres 03788X0077 (BSSEAU), point peu fiable, en bas, et 03788X0041 (ADES), point fiable associé, en haut (extrait du rapport BRGM/RP-68600-FR, Bessière, 2019)	38
Illustration 21 – Données d'entrée « eaux souterraines » initiales pour le modèle géostatistique	39
Illustration 22 – Répartition des données d'entrée par origine	40
Illustration 23 – Principe standard de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM	41
Illustration 24 – Variogramme expérimental de la variable Zmax_prob pour les points « eaux souterraines » et caractéristiques du modèle ajusté	42
Illustration 25 – Variogramme expérimental de la variable Zmax_prob pour les points « rivières » et caractéristiques du modèle ajusté	43
Illustration 26 – Principe de la validation croisée (extrait du rapport BRGM/RP-67538-FR)	44
Illustration 27 – Corrélation entre le MNT100 lissé et Zmax_prob	46
Illustration 28 – Moyenne de l'écart-type de krigeage pour les 4 cas d'interpolation	47
Illustration 29 – Respect des inégalités pour les 4 cas d'interpolation	47

Illustration 30 – Exemple d’artefact généré par la méthode de krigeage avec dérive externe (MNT). (KO : krigeage ordinaire, KDE : krigeage avec dérivé externe). On voit dans le cas 3 (trait rouge) la reproduction du MNT lissé	48
Illustration 31 – Carte des zones potentielles d’inondations par remontée de nappe sur les bassins de la Seine Amont et Moyenne.....	49
Illustration 32 – Carte de l’écart-type de krigeage.....	50
Illustration 33 – Carte des zones potentiellement sujettes aux débordements ou à l’inondation de caves après ajout de l’erreur à la cote Zmax_prob interpolée (en gris : secteurs passant en sensibilité moyenne à élevée après ajout de l’erreur).....	50
Illustration 34 – Comparaison des résultats cartographiques avec l’étude nationale – Secteur Nord-Ouest (carte 2019 à gauche)	52
Illustration 35 – Comparaison des résultats cartographiques avec l’étude nationale – Secteur Nord-Est (carte 2019 en haut à gauche).....	53
Illustration 36 – Comparaison des résultats cartographiques avec l’étude nationale – Secteur Sud-Ouest (carte 2019 à gauche)	54
Illustration 37 – Comparaison des résultats cartographiques avec l’étude nationale – Secteur Sud-Est (carte 2019 à gauche).....	54
Illustration 38 – Comparaison des résultats cartographiques avec l’étude nationale – Zoom sur les boucles de la Seine (carte 2019 à gauche)	55
Illustration 39 – Logigramme de la méthodologie mise en œuvre pour la cartographie des zones inondées à partir de l’imagerie satellitale.....	59
Illustration 40 – Schéma adopté pour le traitement des données SAR Sentinel-1 GRD.	61
Illustration 41 – Evolution de la rétrodiffusion radar au cours du temps issue de l’analyse des séries temporelles SAR Sentinel-1 (la réduction du signal correspond à l’apparition d’eau en surface)	61
Illustration 42 – Composition couleurs RVB basée sur l’analyse des données Sentinel-1 (période 2015-2018).....	62
Illustration 43 – Exemple de résultats cartographiques et d’une série chronologique de la rétrodiffusion SAR	64
Illustration 44 – Carte NDWI (à gauche) et carte binaire des zones inondées (à droite) à l’échelle de la zone d’étude (a et b) et zoom centré sur la confluence entre la Seine et l’Aube (c et d). Image Sentinel-2 datée du 25/02/2018 (post-inondation)	65
Illustration 45 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d’observation : avril 2015 - juillet 2018) pour le nord-ouest de la zone d’étude	66
Illustration 46 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d’observation : avril 2015 - juillet 2018) pour le sud-est de la zone d’étude	67
Illustration 47 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d’observation : avril 2015 - juillet 2018) pour l’est de la zone d’étude.	68
Illustration 48 – Exemple de délimitation des zones potentiellement inondées issue de l’analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour les périodes 2015-2018 (en haut), mai-juin 2016 (au milieu) et janvier-février 2018 (en bas)	69
Illustration 49 – Détection de l’eau (en bleu) avec un processus de seuillage simple (NDWI) issue de l’analyse de l’image Sentinel-2 (datée du 25/02/2018). Au sud de Paris (en haut) et au niveau de la confluence de la Seine et (en bas).....	70

Liste des annexes

Annexe 1 Exemple des sorties générées (scripti R) pour un premier contrôle des chroniques piézométriques.....	77
Annexe 2 Exemple des sorties générées (script R) pour les ajustements de lois de probabilité (chronique piézométrique de longue durée 01266X1013)	81

1. Éléments de contexte

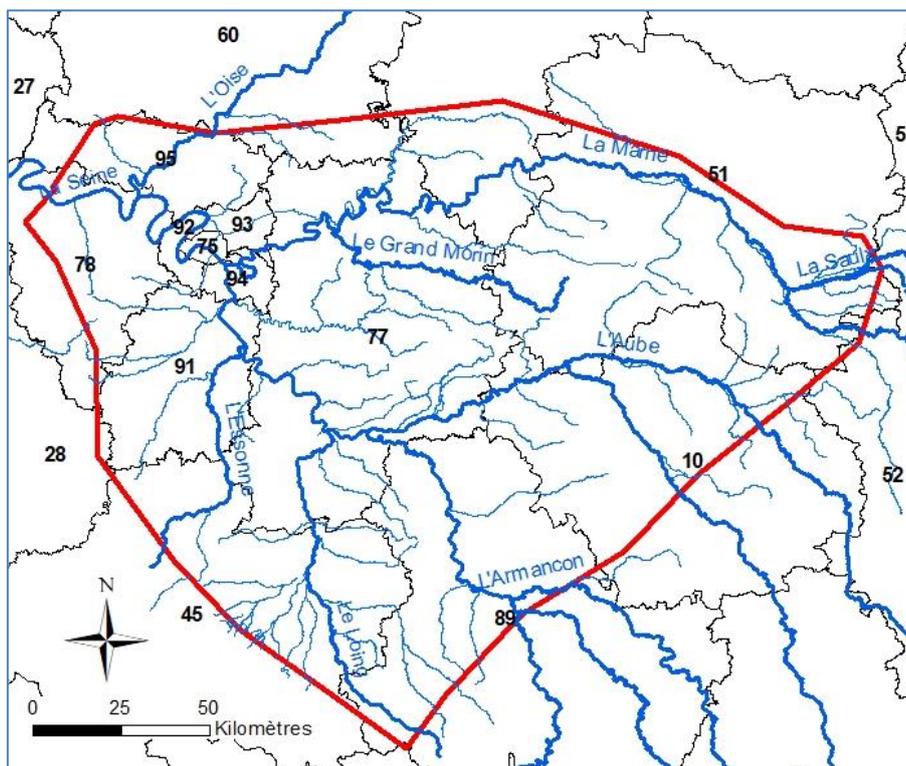
1.1. CADRE DE L'ETUDE

A la demande du MTES (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), le BRGM a finalisé fin 2017 une nouvelle cartographie de la sensibilité des territoires au « risque d'inondation par remontée de nappe » à l'échelle nationale (rapport BRGM/RP-65452-FR, 2018). La méthodologie mise en œuvre est rappelée au § 1.4.

Suite à une consultation nationale des Services de Prévention des Crues (SPC) organisée en 2018 par le SCHAPI sur les besoins d'appui technique vis-à-vis des phénomènes d'inondations par remontée de nappe, les SPC SMYL (Seine Moyenne-Yonne-Loing) et SAMA (Seine Amont – Marne Amont) ont souhaité que ce travail de cartographie soit précisé sur le bassin versant de la Seine, de sa confluence avec l'Oise à l'amont de Troyes (cf. délimitation de la zone d'étude proposée par le SCHAPI¹, Illustration 1).

Ce besoin d'une meilleure connaissance des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe fait notamment suite aux crues récentes de mai/juin 2016 et janvier 2018.

L'étude s'inscrit dans le cadre de la convention annuelle DGPR²/BRGM (action C14 pour le compte du SCHAPI).



*Illustration 1 – Délimitation de la zone d'étude
(cours d'eau en bleu, départements et numéros INSEE associés en noir)*

¹ Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

² Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

1.2. PHENOMENES DE REMONTEE DE NAPPE

Dans certaines conditions, une élévation exceptionnelle du niveau de la nappe entraîne un type particulier d'inondation : une inondation par « remontée 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 et calcaires, largement représentés dans le bassin de la Seine (Cf. § 1.3) ;
- **au sein d'aquifères plus perméables** (coefficient d'emménagement 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 ;
- **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.

1.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

La totalité de la zone d'étude se situe dans l'ensemble sédimentaire du Bassin parisien, caractérisé par un empilement de séries géologiques à faible pente. Les couches sédimentaires du Trias jusqu'au Crétacé affleurent en auréoles autour d'une vaste zone centrale tertiaire transgressive.

Les principaux aquifères sont situés dans les roches carbonatées (calcaire, craie) ou détritiques (sables, grès). Seules les nappes superficielles intéressent la problématique des inondations par remontée de nappe.

Les principaux systèmes aquifères présents à l'affleurement sont :

- les alluvions de la Seine, de la Marne, du grand Morin, de l'Essonne, du Loing, de l'Yonne et de l'Aube ;
- les calcaires de Beauce : aquifère constitué principalement, mais non exclusivement, de calcaires empilés dans une cuvette. Les principaux niveaux producteurs sont composés des calcaires de Pithiviers et des calcaires d'Etampes, deux formations géologiques perméables qui sont séparées par le niveau semi-perméable de la molasse du Gâtinais.
- les Sables et grès de Fontainebleau (Oligo-Miocène), particulièrement présents en région Ile-de-France ;

- les calcaires de Brie (Rupélien – Oligocène inférieur) : ce réservoir reste peu exploité là où il affleure mais il présente une sensibilité certaine aux remontées de nappe ;
- les calcaires de Champigny : composé de trois aquifères séparées de niveaux marneux semi-perméables : le Calcaire de Champigny, le Calcaire de Saint-Ouen et le Calcaire du Lutétien. Cet ensemble est recouvert par les marnes supra-gypseuses et les marnes vertes imperméables (Cf. coupe schématique, Illustration 2) ;
- la craie du Séno-Turonien surmontée par la formation des Argiles à silex (produit de décalcification de la craie), en particulier en Bourgogne-France-Comté pour ce qui intéresse la zone d'étude (Illustration 3).

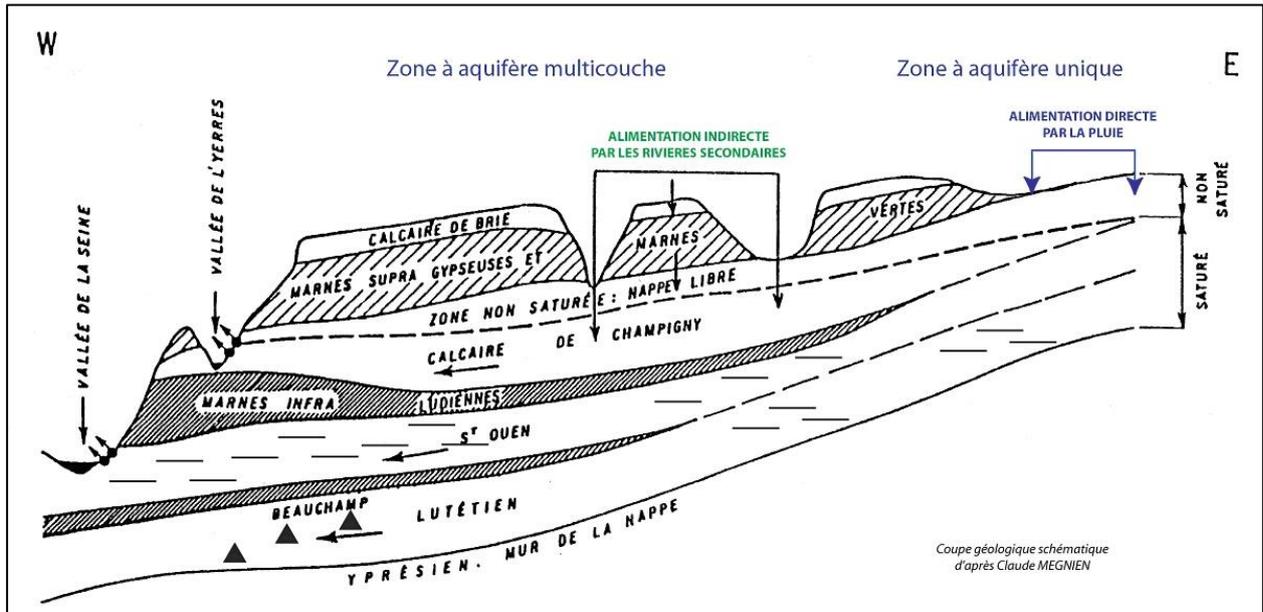


Illustration 2 – Coupe hydrogéologique centrée sur l'aquifère du Champigny
(source : C. MEGNIEN, 1979)

L'illustration 3 présente un récapitulatif de toutes les entités hydrogéologiques BDLISA³ présentes à l'affleurement sur la zone d'étude.

³ Base de données des Limites des Systèmes Aquifères : le référentiel hydrogéologique français - <https://bdlisa.eaufrance.fr/>

Nom de l'entité hydrogéologique (Niveau 1)	Code des entités (niveau 3)	Nom des entités hydrogéologiques / nappes sur la zone d'étude
Alluvions actuelles à anciennes de la vallée de la Seine moyenne	926AA01 / 926AC01, 03, 05, 07, 09 / 926AE01	Nappes alluviales
Alluvions actuelles à anciennes de la vallée de la Seine amont	928AA01 / 928AC01, 03 / 928AE01, 03, 05, 07, 09 / 928AQ01	
Grand domaine hydrogéologique du Mio-Pliocène du Bassin parisien	104AA04, 05 / 104AE03, 05	
Grand système multicouche de l'Oligo-Miocène du Bassin parisien	107AF01, 02 / 107AE01 / 107AF01, 04	Nappe des Calcaires de Beauce s.l.
	107AC03, 04 / 107AC05, 07	Sables et grès de Fontainebleau de l'Oligo-Miocène du Bassin parisien
	107AD1 / 107AJ01	Marnes à Huîtres du Stampien (Rupélien, Oligocène inf.) du Bassin parisien
	107AK01	Nappe des Calcaires de Brie du Rupélien (Oligocène inf.)
Grand domaine hydrogéologique de l'Oligocène inf. à l'Eocène sup. (Sannoisien au Ludien) du Bassin parisien	110AA01	Marnes vertes et supra-gypseuses du Rupélien (Oligocène inf.) du Bassin parisien
Grand système multicouche de l'Eocène du Bassin parisien	113AA01, 03 / 113AB01 / 113AC01, 03, 05 / 113AG03 / 113AH01, 02 / 113AD1 / 113AK01, 03, 05 / 113AQ01 / 113AQ21, 25, 27, 29 / 113AT03 / 113AV01, 03, 04, 06	Nappe des calcaires de Champigny s.l.
	117AC03, 05	Argiles et sables de l'Yprésien inférieur du Bassin parisien
	119AE11	Formations détritiques continentales, Sables et Argiles à silex post-Campanien du Bassin parisien
	121AB00 / 121AN01, 30 / 121AQ01, 30 / 121AP01, 03 / 121AR01, 30 / 121AY05 / 121AZ01	Nappe de la Craie du Sénonien au Turonien inférieur
	123BD1 / 123BD01 / 123BC01 / 123BC01 / 123BR01	Nappe du Cénomani (craie marno-sableuse)
	125AA01	Argiles du Gault, Marnes et Gaizes du Cénomani inférieur à moyen et de l'Albien supérieur du Bassin parisien
Grand domaine hydrogéologique des argiles, marnes et gaizes du Cénomani inf. et de l'Albien sup. du Bassin parisien	127AA01, 03, 99	Nappe des Sables verts de l'Aptien-Albien

Classification BDLISA :

- unités imperméables
- unités semi-perméables et imperméables
- unités semi-perméables
- unités aquifères

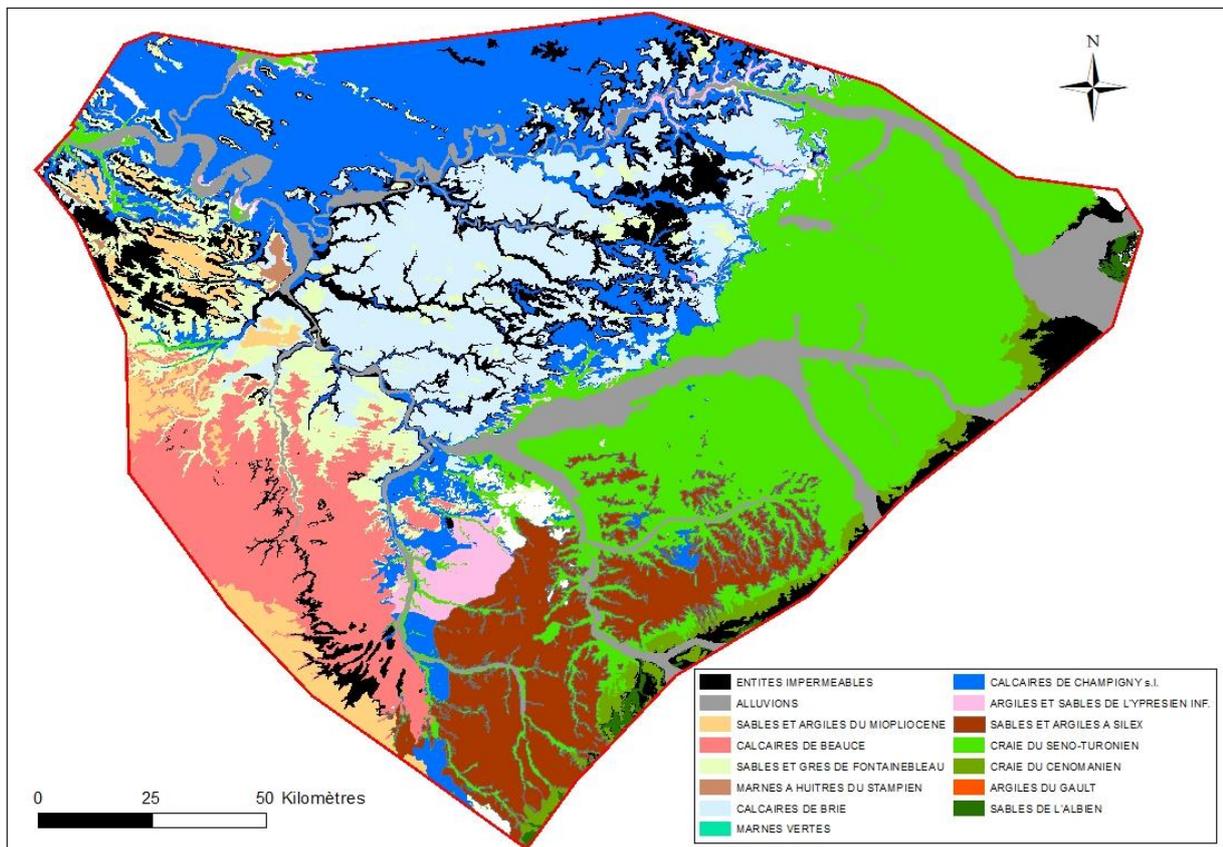


Illustration 3 – Entités hydrogéologiques BDLISA présentes à l'affleurement sur la zone d'étude (carte = regroupement par entités BDLISA de niveau 3)

1.4. RETOUR SUR L'APPROCHE NATIONALE

La méthodologie élaborée au niveau national est décrite de façon détaillée dans le rapport BRGM/RP-65452-FR paru en 2018. Elle repose sur les quatre étapes suivantes :

- **Etape 1 : Estimation du niveau maximal probable des nappes.** Elle s'est faite principalement à partir de l'exploitation de données piézométriques et de leur conditions aux limites d'origines diverses (BSS, ADES, déclarations CATNAT, résultats de modèles hydrodynamiques, cartes piézométriques de hautes eaux, EAIPce⁴, EAIPsm⁵). L'objectif étant la détermination de zones potentiellement inondables, il convenait de définir des niveaux correspondant à des périodes de retour très élevées. En cohérence avec la fréquence retenue pour les EAIPce, une période de retour de 100 ans a été retenue.
- **Etape 2 : Interpolation du niveau maximal probable,** à la maille de 250 m. Après différents tests, la méthode d'interpolation retenue a été celle du krigeage linéaire sans dérive.
- **Etape 3 : Corrections liées aux facteurs pente et terrains affleurants imperméables.** Il a été supposé que les zones de pente supérieure à 10% (calcul à partir du MNT au pas de 25 m du référentiel BDALTI®) et les terrains affleurants imperméables (identifiés à partir du référentiel BDLISA) ne sont pas concernés par des inondations par remontée de nappe.
- **Etape 4 : Cartographie des zones sensibles aux remontées de nappe,** obtenue par différence entre les cotes du MNT(25m) moyen agrégé par maille de 250 m et les cotes interpolées du niveau maximal probable. Au regard des incertitudes, il a été décidé de proposer une représentation en trois classes :
 - « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT et la cote du niveau maximal interpolée est négative ;
 - « zones potentiellement sujettes aux inondations de cave » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT et la cote du niveau maximal interpolée est comprise entre 0 et 5 m ;
 - « pas de débordement de nappe ni d'inondation de cave » : lorsque la différence est supérieure à 5 m.

Certains points sont repris plus en détails dans la suite du rapport.

⁴ Enveloppes approchées d'Inondation Potentielle « cours d'eau » fournies par la DGPR dans le cadre d'une convention en date du 15/07/2015

⁵ Enveloppes approchées d'Inondation Potentielle « submersion marine » fournies par la DGPR dans le cadre d'une convention en date du 15/07/2015

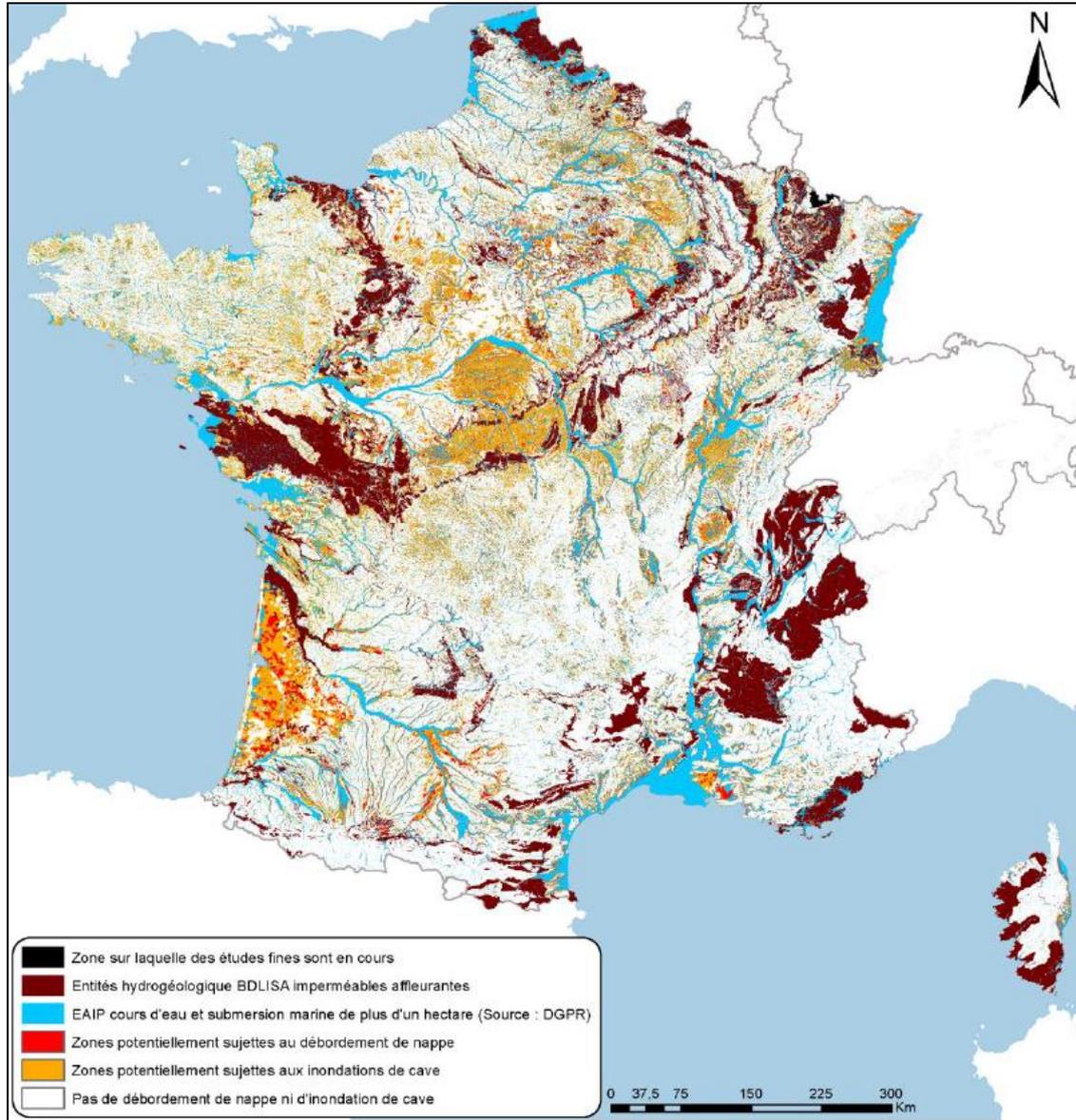


Illustration 4 – Carte nationale des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe intégrant l'élimination des zones à forte pente et les masques des secteurs considérés imperméables (en marron) et des EAIPce et EAIPsm (en bleu) (rapport BRGM/RP-65452-FR)

1.5. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le principal objectif poursuivi par l'étude est d'améliorer la fiabilité de la carte de sensibilité à l'échelle des bassins versants de la Seine amont et moyenne tout en suivant la même démarche générale. Les pistes envisagées initialement étaient les suivantes :

- Intégration de **données récentes**, couvrant notamment les événements de 2016 et 2018. La base de données « CatNat Remontées de nappe » n'était, par exemple, actualisée que jusqu'en 2015.
- Intégration de **données piézométriques complémentaires**, non présentes dans ADES⁶ ou la BSS EAU⁷.
- Intégration des **zones humides** à étudier.
- Etude de la faisabilité d'utiliser un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** plus précis.
- Consolidation du calcul des niveaux humides de période de retour 100 ans par l'utilisation d'autres lois de probabilités.
- Amélioration / adaptation du **modèle géostatistique** en testant différentes méthodes d'interpolation et une autre maille de calcul.
- Traitement des **images satellites** pour validation des résultats cartographiques. L'objectif est d'extraire à partir de données de télédétection satellitaires des informations sur l'extension des zones inondées. Autrement dit, de détecter des changements temporels sur des images satellitaires pouvant être associés à l'apparition d'étendues d'eau en surface pouvant ainsi être cartographiées.

Après ce premier travail à l'échelle des bassins de la Seine amont et moyenne, il pourra être intéressant d'identifier des zones à enjeux et de faire, le cas échéant, des préconisations en termes de compléments d'investigations.

⁶ Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines - <https://ades.eaufrance.fr/>

⁷ Base de données relative aux informations sur les eaux souterraines organisée et gérée par le BRGM (référentiel des points d'eau en France). Les informations sont issues des déclarations au titre du Code Minier, ou du code de l'Environnement, sur plus de 500 000 points d'eau que contient la Banque du Sous-Sol (BSS) actuellement.

2. Données compilées

2.1. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

2.1.1. Données issues d'ADES et de la BSS-EAU

Des extractions depuis ADES et la BSS-EAU ont été réalisées en juin 2019. L'échantillon de départ est constitué de 216 piézomètres référencés sous ADES (dont 173 avec plus de 10 années de données) et de 6894 points d'eau répertoriés dans la BSS-EAU (dont 4886 avec une seule mesure).

Un important travail d'analyse a été entrepris, notamment certaines actions qui n'avaient pas été possibles à l'échelle nationale.

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

- le « code BSS », un identifiant unique pour chaque ouvrage ;
- les coordonnées géographiques des points de mesures en Lambert 93 ;
- les dates auxquelles ces mesures ont été réalisées (date début acquisition, date fin acquisition, nombre année d'acquisition) ;
- la longueur des chroniques piézométriques en années et le nombre moyen de mesures 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 ;
- le mode de gisement, la nature du point d'eau, la profondeur d'investigation, l'entité hydrogéologique BDLISA (rarement disponible en BSS-EAU).

A partir de cette extraction, les 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.

Croisement des deux bases de données

Après comparaison des données ADES et BSS-EAU, il a fallu procéder à un tri sur les ouvrages communs aux deux bases de données en raison de différences observées sur les niveaux piézométriques bancarisés (durée chronique, valeurs, ...). Sur les 195 points d'eau communs, 36 présentaient des différences. Après analyse, les chroniques piézométriques issues d'ADES ont été privilégiées à l'exception de 5 pour lesquels les chroniques BSS-EAU apparaissent plus fiables (03281X0019/P, 03282X0029/P, 03283X0018/P, 03642X0072/F, 03655X0017/PF). Le plus souvent, les chroniques en doublon couvrent des périodes communes.

Elimination des aquifères profonds / captifs

Un critère sur la profondeur des ouvrages, fixé à 100 m, avait été utilisé au niveau national dans le but d'écarter les suivis de nappes profondes.

Après une première analyse, il s'est avéré que ce critère n'était pas suffisamment sécuritaire sur le bassin de la Seine. On peut notamment citer le cas de l'aquifère des calcaires de Champigny sous couverture des calcaires de Brie et des marnes vertes et captés par des forages de moins de 60 m de profondeur. Nous reviendrons plus tard sur ce point, mais le risque d'inondation par remontée de nappe était, de ce fait, largement sous-estimé dans ce secteur.

En définitive, les coupes géologiques et techniques ont systématiquement été consultées dès lors que les profondeurs d'ouvrages étaient supérieures à 40 m (sous réserve de leur disponibilité). Un grand nombre de chroniques piézométriques a ainsi été écarté de l'analyse.

Contrôle de la référence altimétrique

Un contrôle du repère altimétrique indiqué en base de données a été opéré, notamment par comparaison avec la valeur issue de la grille du MNT au pas de 25 m de l'IGN (BDALTI®). Quelques erreurs de localisation ont ainsi pu être mises en évidence.

Contrôles de cohérence

Un premier traitement automatique des chroniques piézométriques a été mis en œuvre à l'aide d'un script R, développé par le BRGM (Allier et al., 2019). Ce dernier permet une visualisation de la chronique, le calcul du périodogramme ainsi que le tracé de la courbe de décharge. A titre d'exemple, les graphiques obtenus en sortie sont reportés en Annexe 1.

Les valeurs aberrantes voire des chroniques entières ont ainsi pu être écartées du jeu de données (Cf. exemple, Illustration 5).

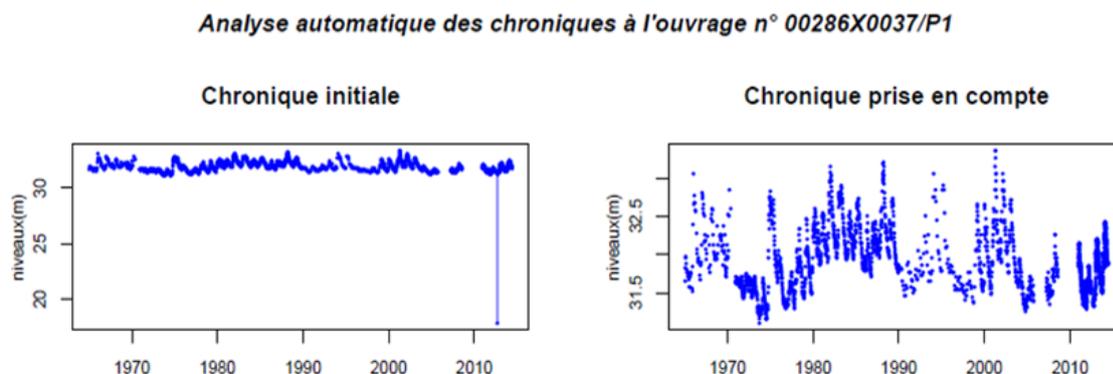


Illustration 5 – Chroniques piézométriques avant (à gauche) et après suppression des valeurs aberrantes (à droite)

2.1.2. Autres sources de données

En complément des banques de données ADES et BSS-EAU, des chroniques piézométriques de longue durée ont été recherchées auprès de différents organismes. Quelques chroniques issues des réseaux de surveillance d'Eau de Paris, du Conseil Départemental du Val de Marne et de l'association AQUI'Brie⁸ ont ainsi pu être intégrées (Cf. Illustration 6).

⁸ <https://www.aquibrie.fr/>

Un acte d'engagement a été signé avec le Conseil Départemental précisant les conditions d'utilisation des données. Les points de mesure étant concentrés sur un petit périmètre, seuls deux ont été sélectionnés.

Il a été procédé aux mêmes contrôles que ceux évoqués dans le paragraphe précédent.

2.1.3. Synthèse

Le tableau suivant présente un récapitulatif du nombre de chroniques *a priori* exploitables pour le calcul des niveaux maximums probables. Sont distinguées les durées de suivi comprises entre 1 et 10 ans et celles supérieures à 10 années (Illustration 6).

Une méthodologie propre à chacun de ces deux types de chroniques a été appliquée afin de calculer les niveaux maximum probables. Les méthodologies mises en œuvre sont détaillées dans le chapitre 3.

Source de données	ADES	BSS-EAU	CD 94	Eau de Paris	AQUI'Brie
période ≥ 10 ans	124	164	2	16	0
1 an ≤ période < 10 ans	24	180	0	0	1

Illustration 6 – Tableau récapitulatif des chroniques piézométriques exploitables

2.2. NIVEAUX PIEZOMETRIQUES PONCTUELS

Parmi les niveaux d'eau ponctuels (une à quelques mesures), il a été décidé de ne retenir que ceux indiquant une profondeur de nappe inférieure à 5 m, quel que soit la date de mesure.

En complément, des données bancarisées dans la BSS-EAU, les données relevées sur le terrain par le BRGM, dans le cadre d'études récentes ou en cours, ont été ajoutées. Ces dernières concernent les territoires du SIARE (Syndicat Intégré Assainissement et Rivière de la région d'Enghien-les-Bains, 95), du SYAGE (Syndicat mixte pour l'Assainissement et la Gestion des Eaux du bassin versant de l'Yerres) et de la ville de Clamart.

Au total, cela représente 1 838 mesures (Illustration 7). Les ouvrages concernés sont principalement concentrés sur la région parisienne et en vallée de Seine au centre de la zone d'étude (Illustration 8).

Dans ce cas de figure, nous n'avons pas cherché à estimer un niveau maximal probable. Ces points seront utilisés en phase de validation des résultats de l'interpolation (Cf. § 3).

Source de données	BSS-EAU	SIARE	SYAGE	Clamart
Nombre de points	1750	62	12	14

Illustration 7 – Tableau récapitulatif des niveaux piézométriques ponctuels peu profonds.

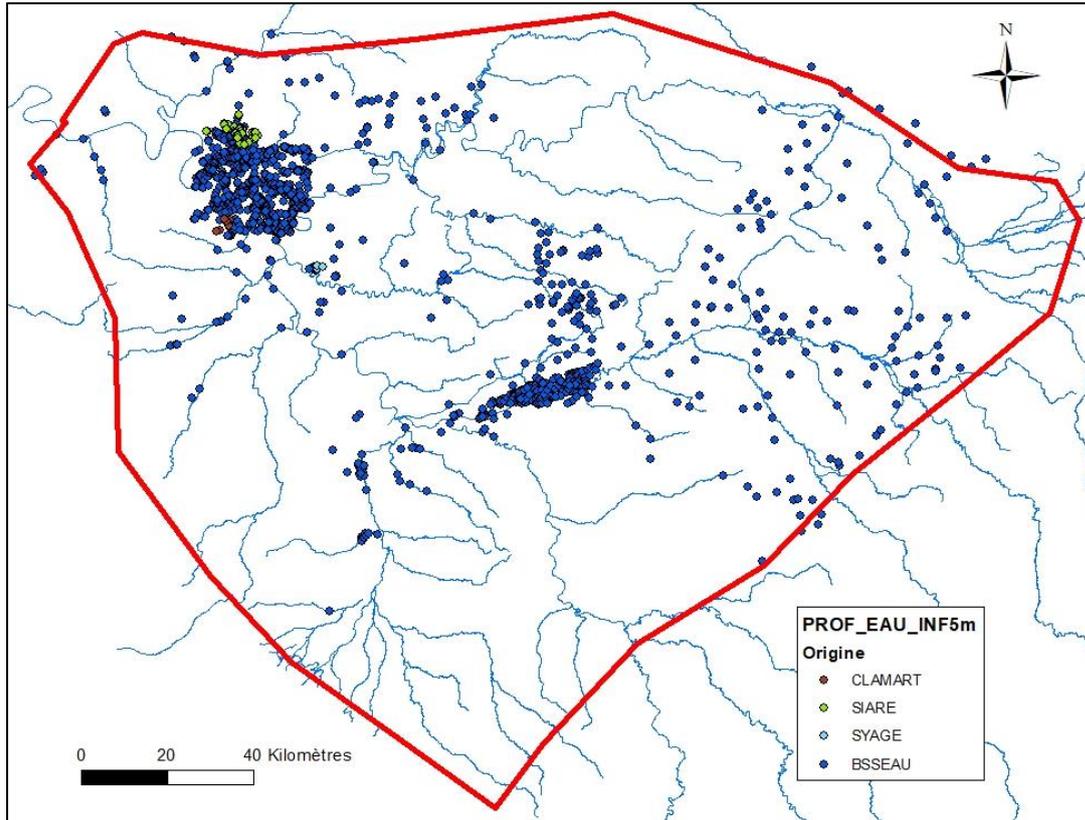


Illustration 8 – Localisation des niveaux piézométriques ponctuels compilés

2.3. CARTES PIEZOMETRIQUES

Sur la zone d'étude, les cartes piézométriques suivantes ont été valorisées lors de l'étude nationale :

- ✓ nappe des calcaires de Champigny, hautes eaux 1967 (Megnier et al., 1967) ;
- ✓ nappe des calcaires de Beauce, hautes eaux 2002 (Verley et al., 2003) ;
- ✓ nappe de la craie à l'est du Loing, hautes eaux 2003 (Lepiller, 2003) ;
- ✓ nappe des Sables de Fontainebleau (Vernoux et al., 1999) ;
- ✓ nappe de l'Oligocène dans les Yvelines (Mercier, 1981) ;
- ✓ nappe des calcaires du Lutétien, hautes eaux 2014 (Bault et al., 2015).

En complément, la carte piézométrique des hautes eaux 2002 de la nappe de la craie en Champagne-Ardenne a été intégré au jeu de données (§ 2.3.5, Rouxel et al., 2003).

D'une manière générale, lorsque les points de mesure sont disponibles, ils ont été privilégiés aux courbes isopièzes. Cela n'a pu être le cas que pour les cartes piézométriques de la craie champenoise (§ 2.3.5) et des calcaires lutétiens (§ 2.3.7).

Pour les autres cartes, les données linéaires (isopièzes) ont dans un premier temps été discrétisées en données ponctuelles. Afin de ne pas biaiser l'interpolation en raison d'une trop forte densité de données, un échantillon de points a été extrait de façon aléatoire sous ArcGis en fixant deux critères, le nombre de points final et la distance minimale entre deux points (1000 m).

Dans le but de transformer les valeurs piézométriques initiales en niveaux maximum probables, un coefficient correcteur moyen a été affecté par carte sur la base d'une analyse comparative avec les chroniques piézométriques les plus proches (Cf. § 2.3.1 à § 2.3.7).

Enfin, les niveaux de très hautes eaux ainsi obtenus ont été plafonnés aux valeurs du MNT25.

Les traitements réalisés pour chaque carte piézométrique sont détaillés dans les paragraphes suivants (par ordre chronologique). L'illustration 9 présente la distribution spatiale des valeurs ponctuelles finalement sélectionnées à l'issue de l'analyse des cartes piézométriques de hautes eaux.

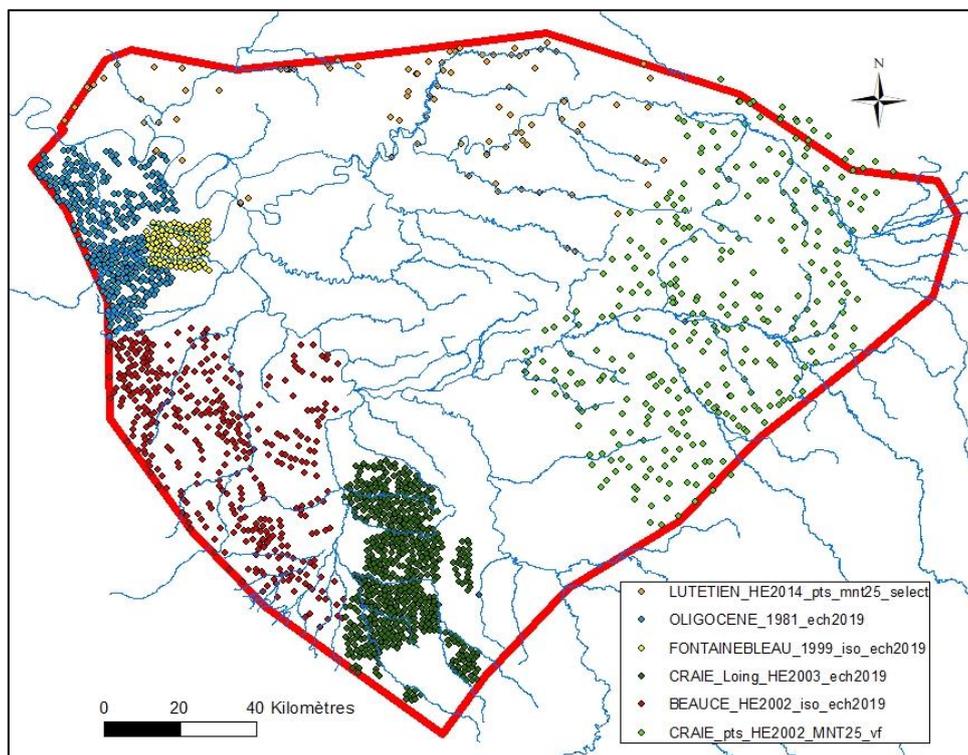


Illustration 9 – Points issus des cartes piézométriques sélectionnés après échantillonnage aléatoire

2.3.1. Calcaires de Champigny, 1967

Après analyse, il a été décidé d'écarter les données relatives à la carte piézométrique des calcaires de Champigny datant de 1967. Certaines valeurs apparaissent douteuses et une erreur de géoréférencement est très probable, comme en témoignent les isopièzes couvrant des secteurs de craie affleurante (absence des calcaires de Champigny). Dans plusieurs secteurs, cela se traduit par des isopièzes très largement supérieures au MNT 25m (Cf. points jaunes, Illustration 10).

Compte de tenu de l'ancienneté des relevés piézométriques, il est apparu impossible d'apporter des modifications au tracé de ces isopièzes.

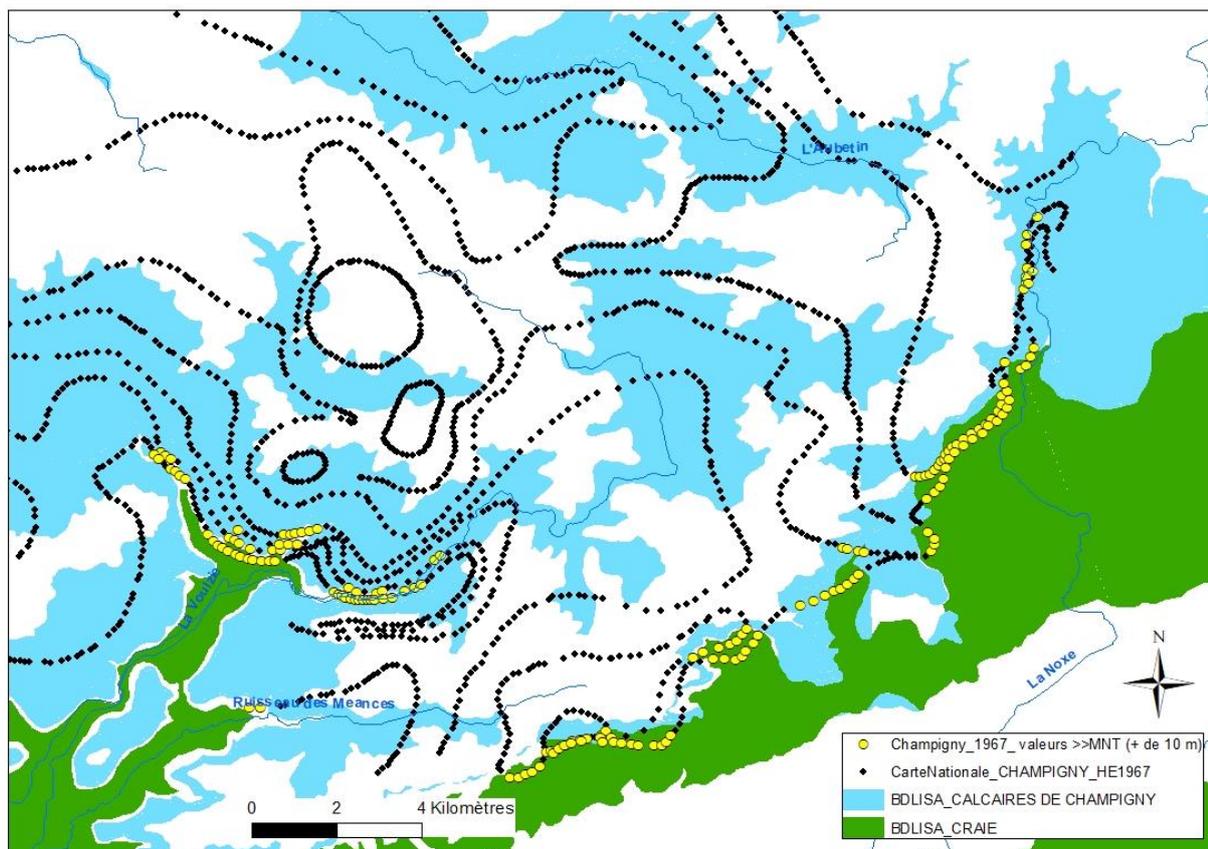


Illustration 10 – Extrait de la carte piézométrique des calcaires de Champigny (hautes eaux 1967)

2.3.2. Oligocène, 1981

Un premier traitement a consisté à écarter le secteur commun à la carte piézométrique des calcaires de Beauce de 2002 (§ 2.3.4). La priorité a été donnée à la carte la plus récente.

Après élimination des isopièzes douteuses (non cohérentes avec le MNT et/ou la piézométrie des calcaires de Beauce), 2 477 points sont générés après discrétisation des courbes. Suite à la comparaison avec les piézomètres de référence disponibles, un facteur correctif moyen de 1.05 a été appliqué aux cotes piézométriques de la carte.

Au final, après création d'un échantillon aléatoire respectant une distance minimale entre points de 1000 m, 358 mesures ponctuelles ont été retenues (Cf. Illustration 9).

2.3.3. Sables de Fontainebleau, 1999

Une fois les courbes isopièzes discrétisées, les données ponctuelles sont au nombre de 5 275. Un facteur correctif de 1.05 a également été appliqué. Suite à la création d'un échantillon aléatoire respectant une distance minimale entre points de 1000 m, 119 mesures ponctuelles ont finalement été retenues (Cf. Illustration 9).

2.3.4. Calcaires de Beauce, hautes eaux 2002

Pour cette carte piézométrique, le facteur correctif appliqué est de 1.03. L'échantillonnage aléatoire a amené à la sélection de 400 points (Cf. Illustration 9).

2.3.5. Craie champenoise, hautes eaux 2002

Contrairement à l'étude nationale, la carte piézométrique de la craie champenoise élaborée en avril 2002 a été intégrée au jeu de données comme telle. Les points de mesure (répertoriés en BSS-EAU) ont été retenus et non les isopièzes discrétisées. Sur les 317 points de mesure disponibles, un point a été éliminé en raison d'une erreur de localisation (mise en évidence après contrôle sur la cote topographique de l'ouvrage).

Le facteur correctif moyen retenu est de 1.02.

Ces mesures étant répertoriées dans la BSS-EAU, elles avaient en fait été utilisées lors de l'étude nationale mais sans considération de la situation de très hautes eaux associées (avril 2002). Une surcote avait alors été affectée après association à une chronique de piézométrie de référence (point dit fiable) selon un calcul volontairement maximisant (Brugeron et al., 2017) :

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

Ponctuellement, cette approche a entraîné une surestimation de la sensibilité aux remontées de nappe sur certains versants crayeux, en rive gauche de la Seine. Les secteurs concernés sont ciblés sur l'illustration 11.

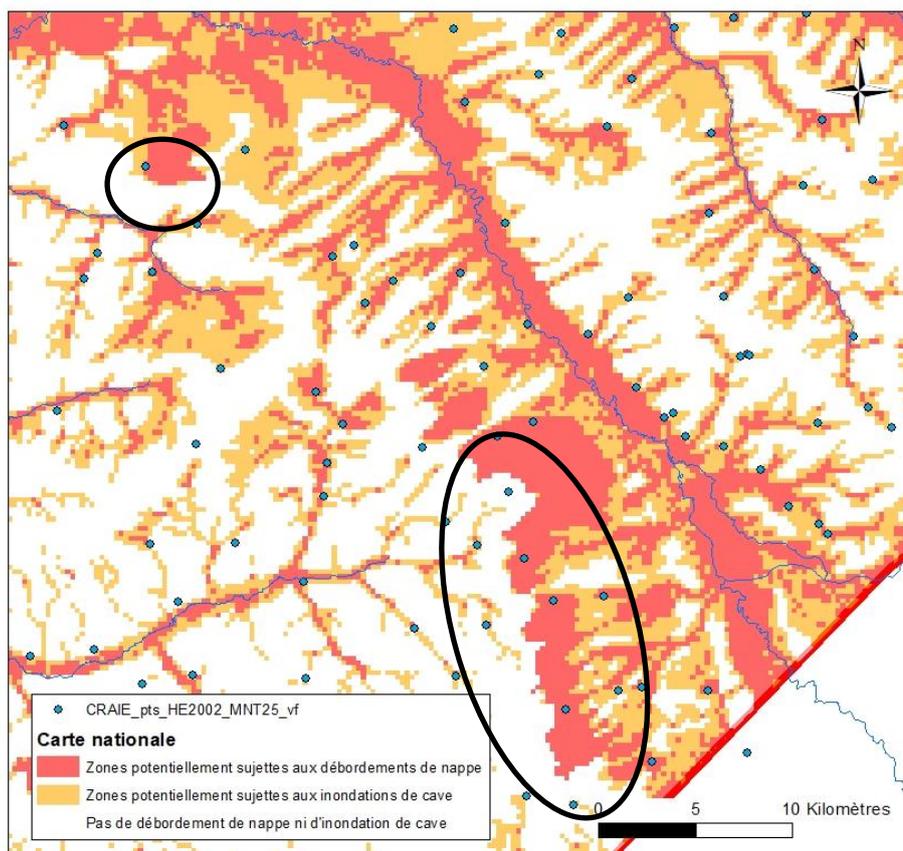


Illustration 11 – Surestimation de la sensibilité aux remontées de nappe liée aux points de mesure utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique de la craie champenoise d'avril 2002 (extrait de la carte nationale)

2.3.6. Craie à l'est du Loing, hautes eaux 2003

Après discrétisation des courbes isopièzes et échantillonnage aléatoire (distance minimale inter-points fixée à 1000 m), 637 points ont été sélectionnés (Illustration 9). Un facteur correctif moyen de 1.05 a été appliqué aux valeurs piézométriques initiales.

Il faut noter ici que les portions de courbes isopièzes présentant des niveaux piézométriques largement supérieurs au MNT25 de l'IGN ont été éliminés.

2.3.7. Calcaires du Lutétien, hautes eaux 2014

Pour la carte du Lutétien en condition de hautes eaux 2014, les points de mesure sont disponibles. Il faut noter qu'à quelques exceptions près, ceux-ci ne sont pas répertoriés en BSS-EAU.

Sur la zone d'étude, 197 points de mesure sont présents.

Les calcaires lutétiens étant majoritairement sous couverture d'autres formations aquifères, seuls les points de mesure implantés au droit ou à proximité immédiate des affleurements ont été sélectionnés pour intégrer le jeu de données. Au total, seuls 98 points ont été considérés (Illustration 9).

Après comparaison avec les chroniques piézométriques les plus proches, un facteur correctif moyen de 1.03 a été appliqué.

2.4. DONNEES HISTORIQUES

Tout d'abord, un travail de mise à jour de la **base de données CATNAT a été effectué par le BRGM.**

Sur la zone d'étude, la base de données répertorie désormais 212 inondations par remontée de nappe (contre 56 pour l'élaboration de la cartographie nationale). Les 156 évènements supplémentaires correspondent à des inondations de mai/juin 2016. Les dossiers relatifs aux inondations de début 2018 n'ont pas encore été traités.

Sur les 156 nouveaux points, il est intéressant de noter que 65 concernent des zones identifiées comme non sensibles par la cartographie nationale (secteurs où le degré de fiabilité de la carte était faible à moyen).

En complément, d'autres évènements de remontées de nappe nous ont été portés à la connaissance du BRGM par les organismes suivants :

- La **DDT de l'Aube a procédé à un retour d'expérience sur l'épisode de janvier-février 2018** ; il repose sur des enquêtes auprès des mairies et sur la capitalisation de diverses sources de données. Une couche SIG des zones impactées par des remontées de nappe nous a été transmise, dont les conditions et limites d'utilisation sont précisées dans un acte d'engagement signé par le BRGM. L'inventaire ne se veut pas exhaustif ni homogène à l'échelle du département.
- La **DDT de la Marne** nous a communiqué la liste de communes ayant souhaité être reconnues en catastrophe naturelle pour remontées de nappe suite à l'épisode de début 2018 (pas de localisation des zones impactées).
- Le **SYAGE** a compilé des remontées de nappe datant de février 2014.
- La base nationale de Gestion ASsitée des Procédures Administratives relatives aux Risques (**GASPAR**) répertoriant les communes reconnues en état de catastrophe naturelle « remontées de nappe » (pas de localisation des zones impactées).

L'ensemble des données compilées est représenté sur la carte de l'illustration 12. Au droit des zones impactées (géoréférencées), le niveau maximum probable a été fixé à la valeur du MNT25 de l'IGN.

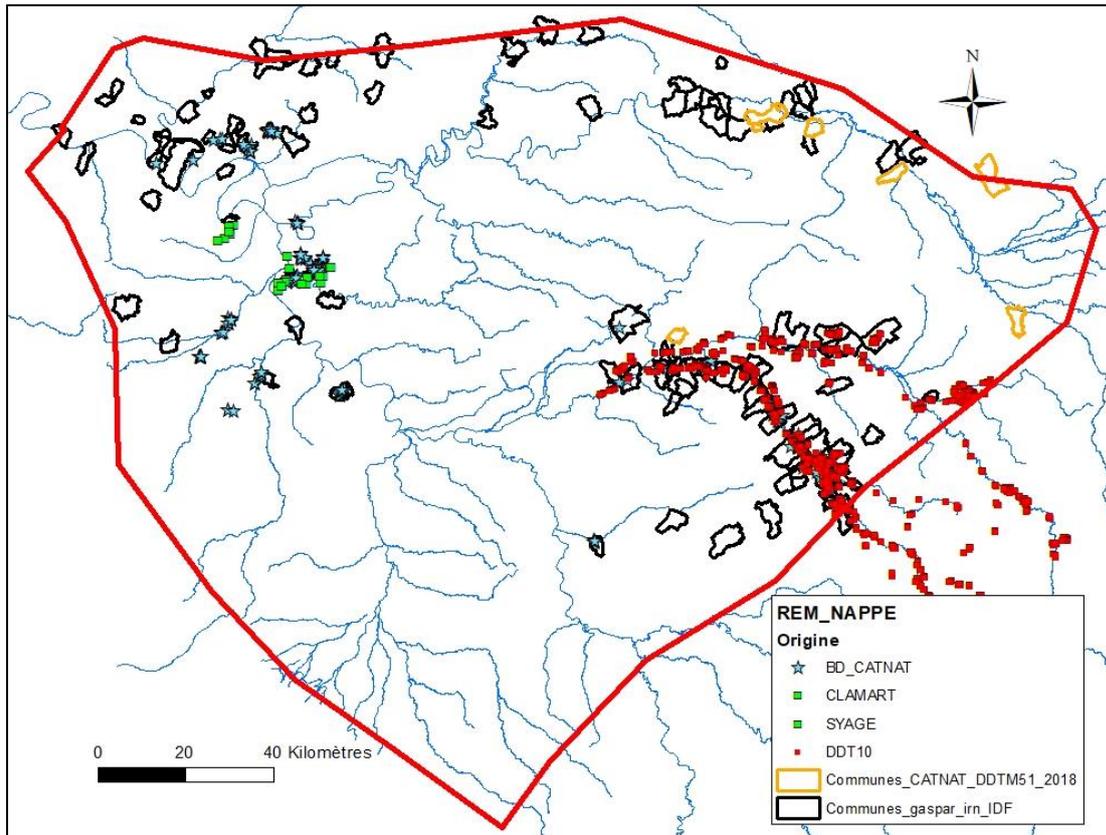


Illustration 12 – Localisation des inondations par remontée de nappe répertoriées sur la zone d'étude

2.5. MODELES HYDRODYNAMIQUES

Un modèle hydrodynamique de la nappe des calcaires de Champigny a été réalisé par Mines ParisTech (Bellier, 2013, 2015). Au-delà de la nappe de Champigny, le modèle permet de simuler les niveaux piézométriques au sein de l'aquifère des calcaires de Brie (modèle constitué de 5 couches). Le modèle est aujourd'hui maintenu par l'association AQUI'Brie.

La nappe de Brie étant peu suivie, il a été décidé d'intégrer des résultats de modélisation pour contraindre davantage l'interpolation des niveaux maximum probables là où les calcaires de Brie sont à l'affleurement. La sensibilité aux remontées de nappe y est, en effet, particulièrement non négligeable du fait de la possible saturation de cet aquifère peu épais à l'affleurement (Coquelet et Bellier, 2019).

Les résultats de la carte nationale montrent une sous-estimation de cette sensibilité, car l'interpolation s'est appuyée essentiellement sur des suivis de la nappe de Champigny (sous couverture au cœur de la Brie, cf. Illustration 2).

Après différents échanges techniques, l'association AQUI'Brie a fourni au BRGM un fichier shape des secteurs où les niveaux simulés des nappes du secteur (Brie, Champigny, Saint-Ouen) sont à moins de 1 m du sol. Ces cartes de profondeurs ont été obtenues en soustrayant au MNT les niveaux de nappes moyens simulés entre le 01/01/2001 et 31/12/2002 (période de plus hautes eaux). Les polygones concernés ont finalement été discrétisés en points (Illustration 13) pour intégrer le jeu des données d'entrée pour l'interpolation des niveaux maximums probables (Cf. § 3).

Ce travail d'extraction et de mise en forme a été réalisé par AQUI'Brie dans le cadre d'une prestation.

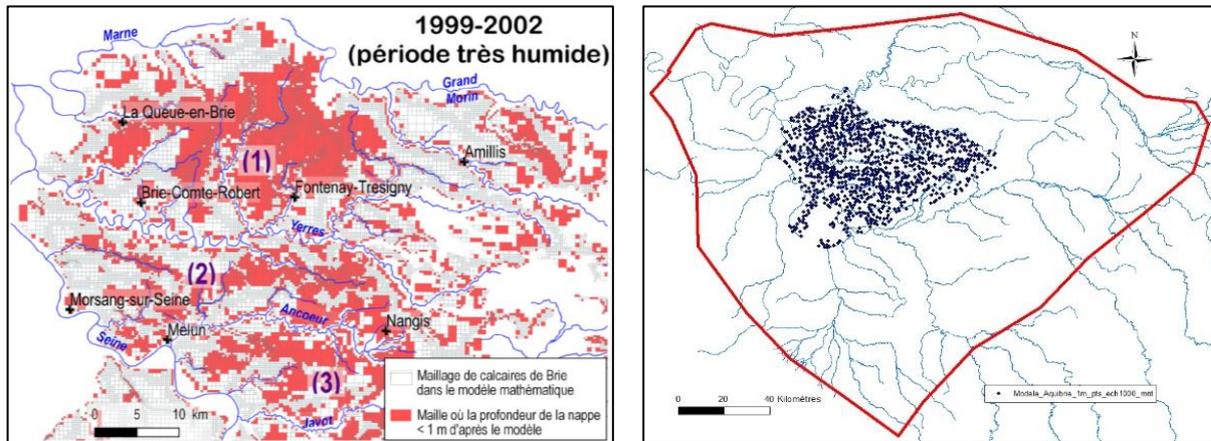


Illustration 13 – Exploitation des niveaux de très hautes eaux de la nappe des calcaires de Brie simulés par le modèle hydrodynamique AQUI'Brie (carte de gauche extraite du rapport de Coquelet et Bellier, 2019)

2.6. EAUX SUPERFICIELLES

Pour la cartographie nationale, le BRGM a utilisé les zones potentiellement inondables par débordement de cours d'eau (EAIPce) et par submersion marine (EAIPsm). Le choix avait été fait de créer des points tous les 100m le long des contours EAIP et tous les 250 m à l'intérieur. Les points contours ont reçu comme altitude la cote de la maille correspondante du MNT au pas de 25 m tandis que la cote des points intérieurs a été obtenue par interpolation entre les berges.

Les limites liées à l'utilisation des EAIP ont été discutées dans le rapport de Brugeron et al., 2019 :

« (...) Ce systématisme induit par l'utilisation de ces enveloppes dans la méthode tend donc finalement à maximiser les zones cartographiées potentiellement sujettes aux remontées de nappe. Pour les besoins de l'étude nationale (...) ce risque de surestimation a été jugé acceptable. Néanmoins, il est par la suite préconisé d'appliquer, sur la cartographie finale, un masque correspondant aux EAIP pour n'afficher réellement que les zones en sus.

A noter qu'un choix a été fait de ne pas corriger en amont les diverses imprécisions détectées dans ces EAIP (tracés de canaux, etc.). »

A 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.).

Ce choix a été conforté par les échanges avec les SPC SAMA et SMYL qui mettent en avant le caractère maximisant de ces enveloppes, en particulier vis-à-vis des PPRI⁹. Dans le but de nous aider à confirmer ce point, la DDT de l'Aube a mis à disposition du BRGM les données numériques associées au PPRI du département. Une nouvelle fois, une convention définissant les conditions d'utilisation de ces données a été signée entre la DDT et le BRGM.

⁹ Plan de Prévention des Risques Inondation

A titre d'exemple, l'illustration 15 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.

En première approche, les polygones ont été discrétisés en points distants de 500 m (Illustration 14). 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.

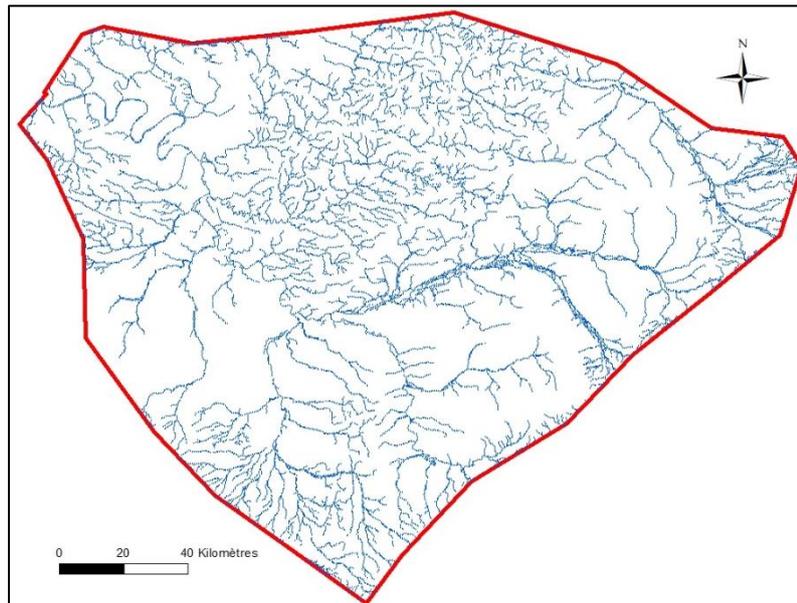


Illustration 14 – Points de contrainte liés aux rivières (source : BDCarthage).

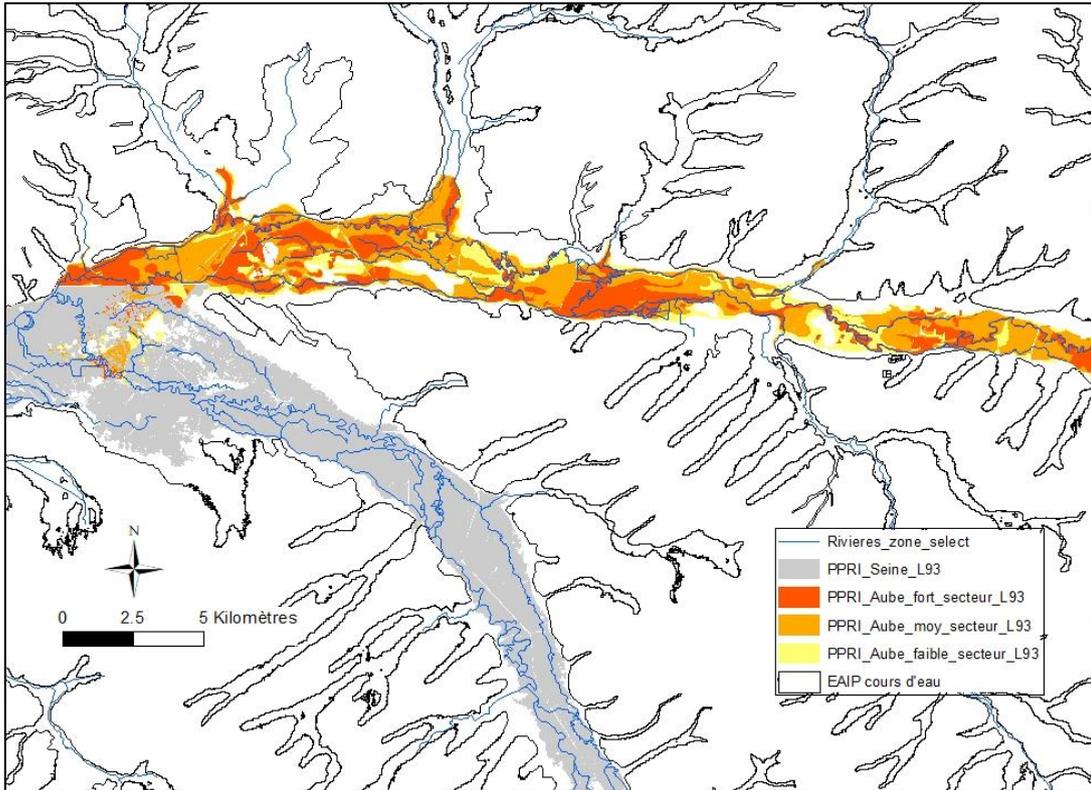


Illustration 15 – Comparaison des EAIP et des PPRI en amont de la confluence de l'Aube et de la Seine (sources : DGPR, DDT de l'Aube)

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

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

Tout d'abord, par rapport à l'étude nationale, une différence d'approche importante a été apportée aux données compilées : les niveaux maximum probables ont été corrigés par rapport à la valeur du MNT25 de la maille correspondante. Seules les courbes isopièzes, dont les valeurs sont fournies en cote NGF, n'ont pu être concernées.

A titre d'exemple, dans le cas d'un point pour lequel la cote du sol est indiquée à 100 m NGF en BSS et la valeur du MNT25 de la maille correspondante est de 102 m NGF, le niveau maximal probable estimé est augmenté de 2 m. L'objectif est ici de conserver l'information sur la profondeur de la nappe puisque la carte de sensibilité est obtenue à partir de la différence entre le MNT25 et le niveau piézométrique maximal probable.

3.1.1. Chroniques piézométriques de longue durée

En fonction de la durée des chroniques piézométriques compilées, deux traitements distincts ont été mis en œuvre : 1) une analyse probabiliste pour les chroniques d'au moins dix années de suivi et 2) une analyse spécifiquement développée par Bessière et al. (2019) pour les chroniques d'une durée comprise entre une et dix années (Cf. méthodologie détaillée, § 3.1.2).

Dans le cadre de l'étude nationale, il est considéré que les niveaux piézométriques maxima suivent une loi Normale. Des niveaux maximaux de période de retour 100 ans ont alors été estimés selon l'approximation suivante :

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

Avec : pour $T=100$ ans, $V_g \# 2.07 - 0.454 * \ln(D)$

Dans l'objectif d'une analyse probabiliste plus approfondie, l'ajustement de différentes lois de probabilité a été testé après nettoyage des chroniques piézométriques de longue durée : lois 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.

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.

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

Les chroniques valorisées présentent, cependant, des durées généralement trop courtes pour prétendre au calcul de niveaux de période de retour centennale. Par soucis de rigueur, il ne sera plus question dans la suite du rapport de niveaux humides de période de retour 100 ans mais de niveaux maximums probables (Z_{\max_prob}). Par ailleurs, aux incertitudes liées à la durée des

chroniques, s'ajoutent les conditions d'application des ajustements probabilistes pas toujours respectées, comme détaillé ci-après.

En effet, 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).

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

Suite au contrôle des données (Cf. § 2.1), 306 chroniques piézométriques ont fait l'objet d'une analyse probabiliste. L'écart maximal entre les niveaux humides de période de retour 100 ans obtenus à l'aide des différentes lois testées est variable d'une chronique à l'autre. La boîte à moustaches de l'illustration 16 donne un aperçu des indicateurs de position de ces écarts (minimum, maximum, moyenne, médiane, quartiles, déciles). L'écart moyen est de 1.6 m pour une valeur médiane de 1.0 m.

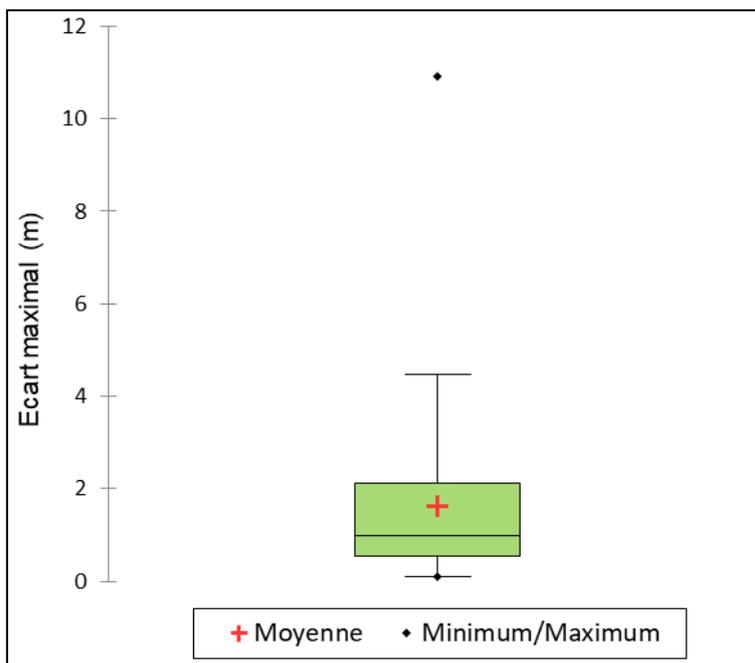


Illustration 16 – Boîte à moustaches des écarts maximums constatés entre les différentes lois de probabilité (échantillon de 305 points de mesure)

Après analyse de ces résultats, deux cas de figure ont été distingués : 1) l'écart maximal entre les cotes Z_{max_prob} calculés selon les différentes lois de probabilité est inférieur à 2 m, 2) l'écart est supérieur ou égal à 2 m.

Dans le premier cas, c'est la loi présentant le meilleur ajustement selon le test de Kolmogorov-Smirnov qui a été retenue. Cela concerne 212 points de mesure. Il faut souligner que les meilleurs ajustements sont alors très majoritairement obtenus avec la loi GEV (Illustration 17).

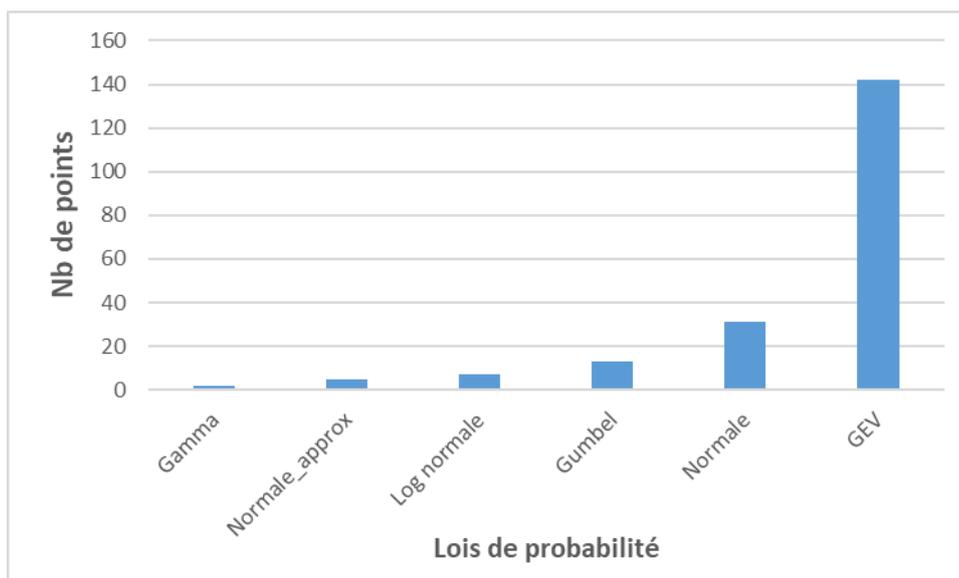


Illustration 17 – Lois de probabilité présentant les meilleurs ajustements selon le test de Kolmogorov-Smirnov sur un échantillon de 200 points (écart maximal entre les différentes lois inférieur à 2 m)

Le second cas de figure concerne 94 points de mesure. Deux informations ont été enregistrées pour ces points, qui dans la suite du rapport sont désignés « Chroniques_Min_Max » :

- conservation des valeurs minimales et maximales dans le but d'utiliser les points concernés en phase de validation de l'interpolation (cf. § 3.2.2) ;
- identification d'une cote Z_{max_prob} unique afin de pouvoir intégrer ces points en entrée du modèle géostatistique le cas échéant. Celle-ci correspond à la moyenne des différentes valeurs obtenues par les ajustements de lois de probabilité à l'exception des cas où des résultats incohérents ont été mis en évidence après un contrôle systématique des résultats. Dans quelques rares cas, souvent ceux concernés par une divergence importante des différentes lois (écart supérieur à 5m), ce n'est donc pas la valeur moyenne ni 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 18 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 maximum 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).

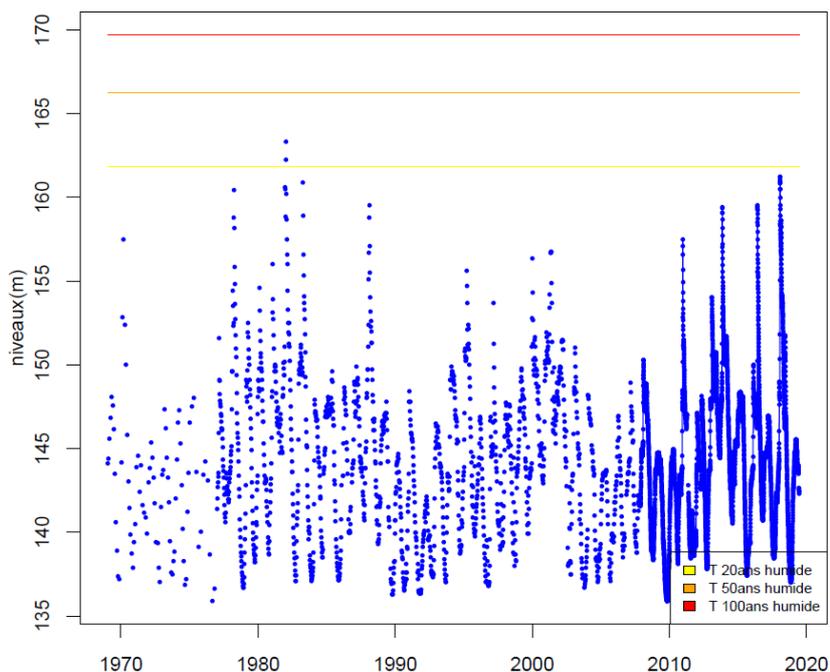


Illustration 18 – Report des niveaux humides de période de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés après ajustement d'une loi GEV (02974X0004/S1). Surestimation du niveau maximum probable suspectée

Afin d'automatiser l'ensemble de ces traitements, un script R a été spécifiquement développé par le BRGM. Un exemple des sorties obtenues est reporté en Annexe 2.

3.1.2. Chroniques piézométriques de courte durée

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 point peu fiable) 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.

Association d'un point peu fiable à un point fiable

L'association a été mis en œuvre à partir de traitements S.I.G. réalisés sous ArcGis, sur la base de critères hydrologiques, hydrogéologiques et géographiques. Afin que l'association soit possible pour tous les points peu fiables, 6 niveaux de rattachement ont été considérés, selon les critères suivants, du plus robuste au moins robuste :

- 1) proximité au même cours d'eau + appartenance à la même entité hydrogéologique BDLISA + distance inférieure à 5 km (22 points concernés) ;
- 2) proximité au même cours d'eau + distance inférieure à 5 km (22 points) ;
- 3) points proches de cours d'eau différents mais appartenant au même bassin versant et à la même entité BDLISA (0 point) ;
- 4) points proches de cours d'eau différents mais appartenant au même bassin versant (27 points) ;
- 5) points proches de cours d'eau différents mais appartenant à la même entité BDLISA (8 points) ;
- 6) point fiable le plus proche (65 points).

Au total, 144 points dit peu fiables ont ainsi pu être associés à un point fiable (Illustration 19).

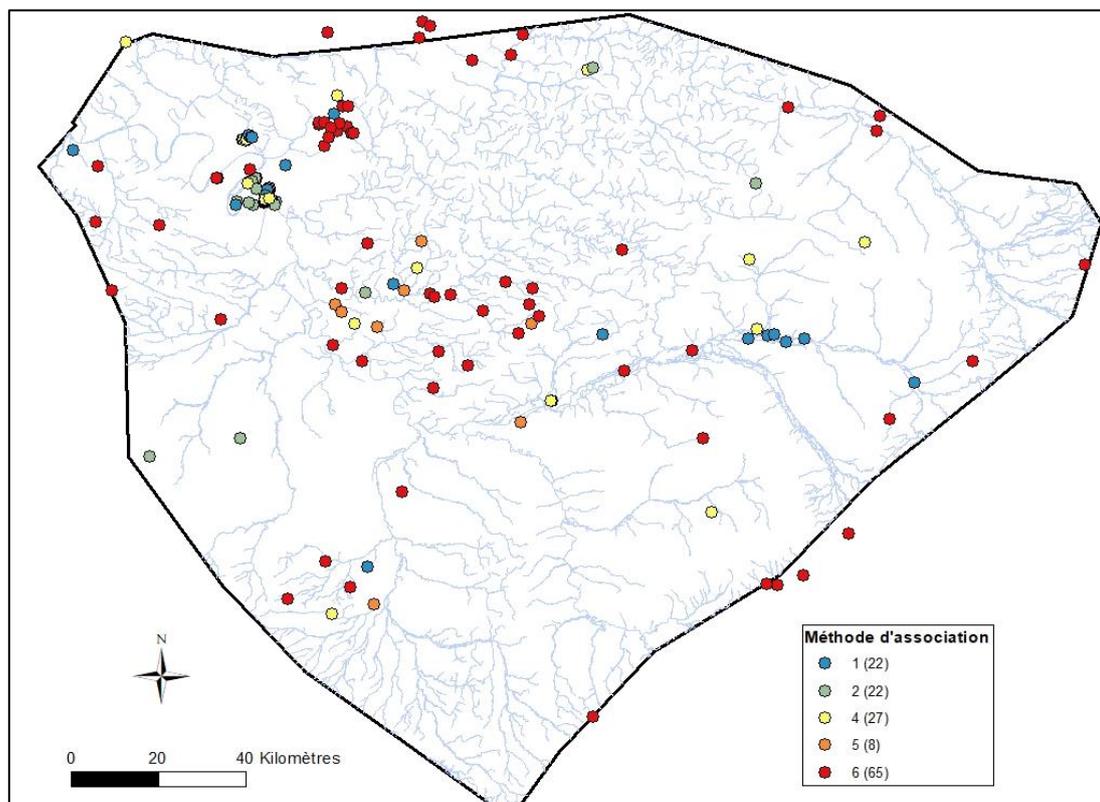


Illustration 19 – Points dits peu fiables et méthodes d'association mises en œuvre

Calcul de la surcote

La correction attribuée au point peu fiable est une modulation de la différence entre la cote piézométrique extrême du point fiable associé (Z_{max_prob}) 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 formulation proposée par Bessière (2019) s'écrit comme suit :

$$Z_{max_prob\text{-fiable}} = Z_{max}(T0)\text{-fiable} + (Z_{max_prob} - Z(T0))\text{+fiable} \times \frac{(Z_{max} - Z_{min})\text{-fiable}}{2 * (Z_{max} - Z_{moy})\text{+fiable}}$$

avec :

$Z_{max}(T0)\text{-fiable}$ = niveau piézométrique maximal du point peu fiable (observé à la date $T0$)

$Z_{max_prob}\text{+fiable}$ = niveau piézométrique maximal probable du point fiable associé

$Z(T0)\text{+fiable}$ = niveau piézométrique du point fiable à la date $T0$

Z_{max} = niveau piézométrique maximal observé sur le point fiable associé

Z_{moy} = niveau piézométrique moyen du point fiable associé

Pour que ce calcul soit réalisé, il est nécessaire de pouvoir calculer un battement de nappe pour le point peu fiable. Cela nécessite donc au minimum une année de chronique.

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

L'illustration 20 propose une traduction graphique du calcul.

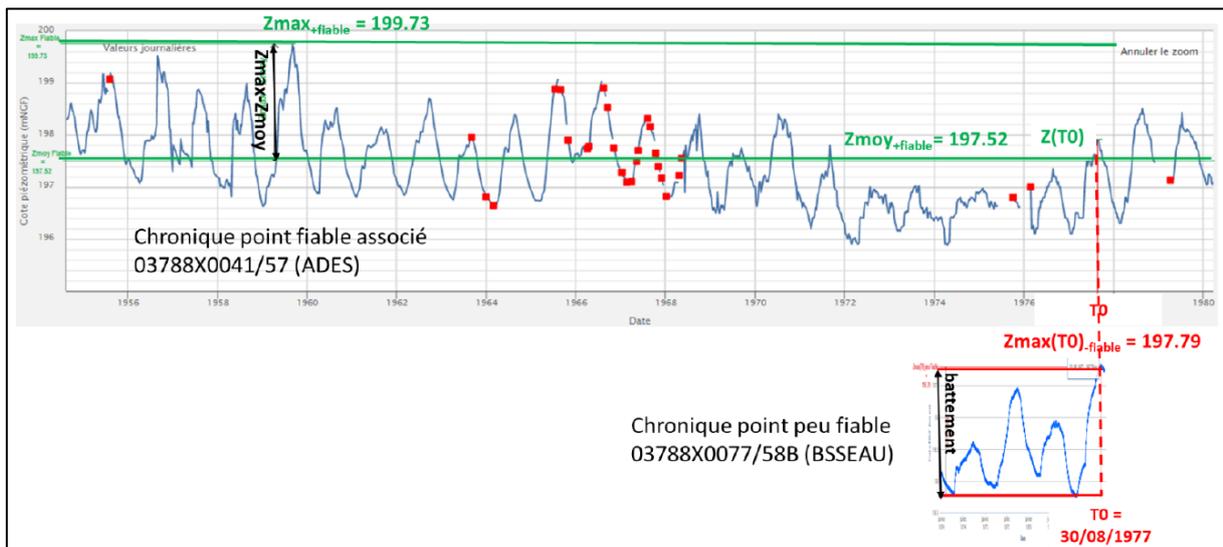


Illustration 20 – Exemple des piézomètres 03788X0077 (BSSEAU), point peu fiable, en bas, et 03788X0041 (ADES), point fiable associé, en haut (extrait du rapport BRGM/RP-68600-FR, Bessière, 2019)

Sur les 144 points dit peu fiables initialement associés à un point fiable, seuls 119 ont pu faire l'objet d'un calcul de la cote Z_{max_prob} . Pour les autres, l'absence d'une période commune de suivi avec le point fiable n'a pas autorisé le calcul.

3.1.3. Synthèse des données d'entrée

En cohérence avec les données détaillées au chapitre 2, les autres données d'entrée relatives aux eaux souterraines utilisées pour l'interpolation du niveau maximal probable sont les suivantes :

- débordements de nappe reconnus en catastrophe naturelle :
 $Z_{\max_prob} = \text{MNT25}$;
- courbes isopièzes de hautes eaux :
 $Z_{\max_prob} = Z_{\text{isopièze}} * \text{facteur correctif (plafonné au MNT25)}$;
- points de mesure pour l'élaboration de cartes piézométriques :
 $Z_{\max_prob} = Z_{\text{mesure}} * \text{facteur correctif (rapporté à la valeur du MNT25, cf. § 3.1)}$;
- modèle AQUI'Brie :
 $Z_{\max_prob} = \text{MNT25} - 1 \text{ m.}$

Il est rappelé que les relevés piézométriques ponctuels issus de la BSS-EAU pour des niveaux inférieurs à 5 m de profondeur sont utilisés en phase de validation (Cf. § 3.2.2) et non comme données d'entrée.

Toutes les données « eaux souterraines » compilées sont localisées sur la carte de l'illustration 21.

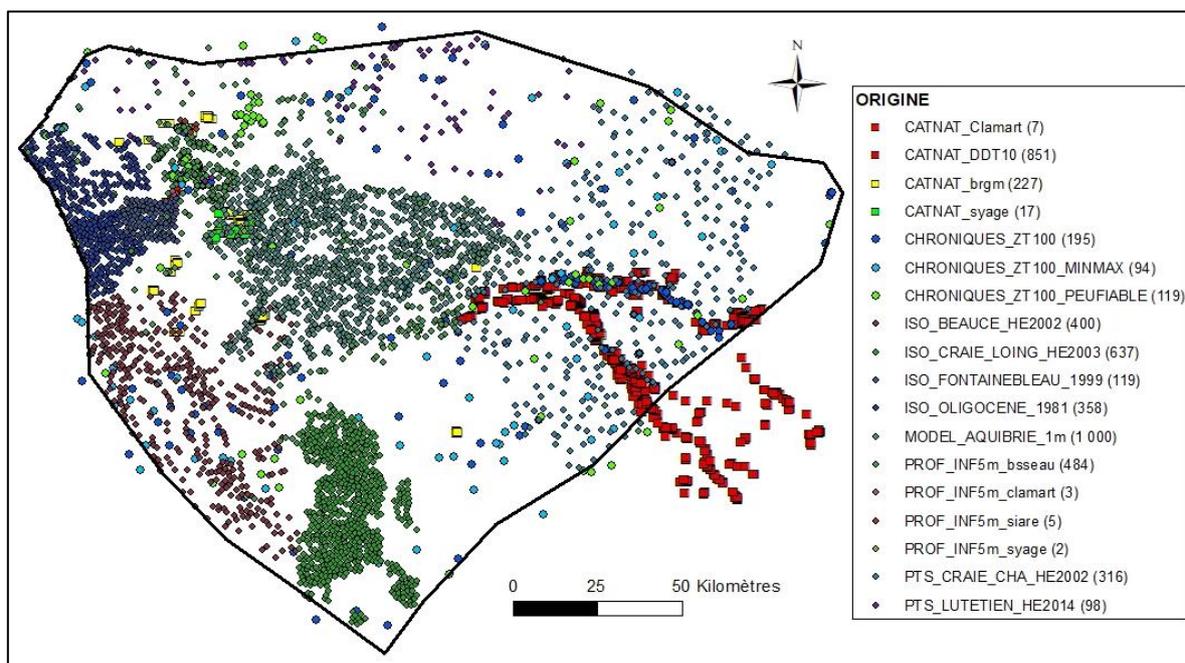


Illustration 21 – Données d'entrée « eaux souterraines » initiales pour le modèle géostatistique

Les données « eaux superficielles » correspondant à la discrétisation des cours d'eau en points distants de 500 m sont présentées au § 2.6 (Illustration 14) : $Z_{\max_prob} = \text{MNT25}$.

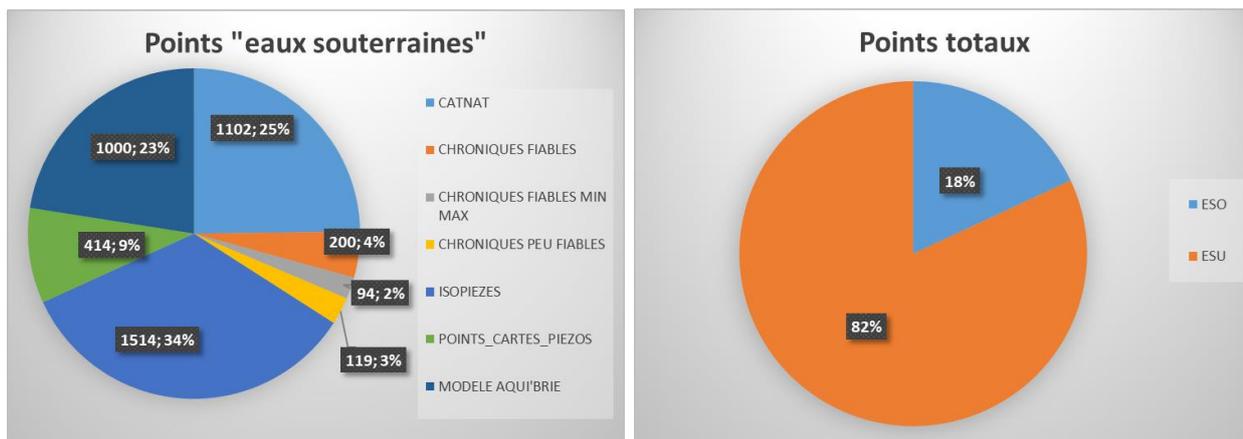


Illustration 22 – Répartition des données d'entrée par origine

3.2. ETAPE 2 : INTERPOLATION DU NIVEAU MAXIMUM PROBABLE

Compte tenu de la densité des données d'entrée, il a été décidé de mener l'interpolation à la maille de 100 m (contre 250 m pour l'étude nationale).

Les travaux d'interpolation ont été réalisés avec le logiciel GDM (<http://qdm.brgm.fr>) développé et édité par le BRGM. Les données d'entrées préparées sous ArcGis sont exploitées par GDM afin d'interpoler le niveau piézométrique maximal probable (Zmax_prob) en chaque maille de 100 m.

3.2.1. Principe des méthodes géostatistiques

La géostatistique est l'étude des variables régionalisées (la piézométrie dans notre cas), variables définies géographiquement et dont la valeur est fonction des coordonnées spatiales. La méthode d'interpolation la plus utilisée et facile à mettre en œuvre en géostatistique est le krigeage ordinaire qui repose sur le variogramme. Le krigeage propose une approche qui se veut plus objective dans la mesure où il se base sur une modélisation préalable guidée par les données (modèle de variogramme). Le variogramme permet d'évaluer la corrélation et la structure spatiale d'un phénomène. Il permet de comprendre ce phénomène et d'en quantifier les caractéristiques structurales intrinsèques. Une fois le variogramme déterminé expérimentalement, il est déduit un modèle qui est utilisé pour réaliser l'interpolation du phénomène sur une zone préalablement définie. Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais qui minimise l'erreur d'estimation.

Outre le krigeage ordinaire, il existe d'autres méthodes d'interpolation géostatistique. Dans le cas de l'existence d'une dérive fonction des coordonnées ou d'une dérive externe (c'est-à-dire portée par une variable auxiliaire corrélée spatialement au phénomène étudié), le krigeage universel permet d'intégrer ces informations pour améliorer l'interpolation du phénomène. A titre d'exemple de variables auxiliaires, on peut citer la topographie, une ancienne carte piézométrique, etc....

Pour résumer, les trois avantages principaux du krigeage sont :

- la prise en compte de la structure spatiale 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, dérive, contraintes...).

L'interpolation de la grille piézométrique est réalisée selon la démarche suivante (Cf. Illustration 24) :

- analyse et codage de données de mesures piézométriques et des points de contrainte imposés ;
- interpolation par krigeage avec modèle de variogramme de la cote piézométrique ;
- contrôle des résultats.

La suite GDM est conçue pour compiler, interpoler et visualiser des données géoscientifiques, dont des données hydrogéologiques. Le « workflow standard » mis en place comprend la vérification des données, la gestion des paramètres de calcul, les contrôles de cohérence entre les données, la génération automatique des interpolations des surfaces piézométriques et les restitutions graphiques en cartes des interpolations.

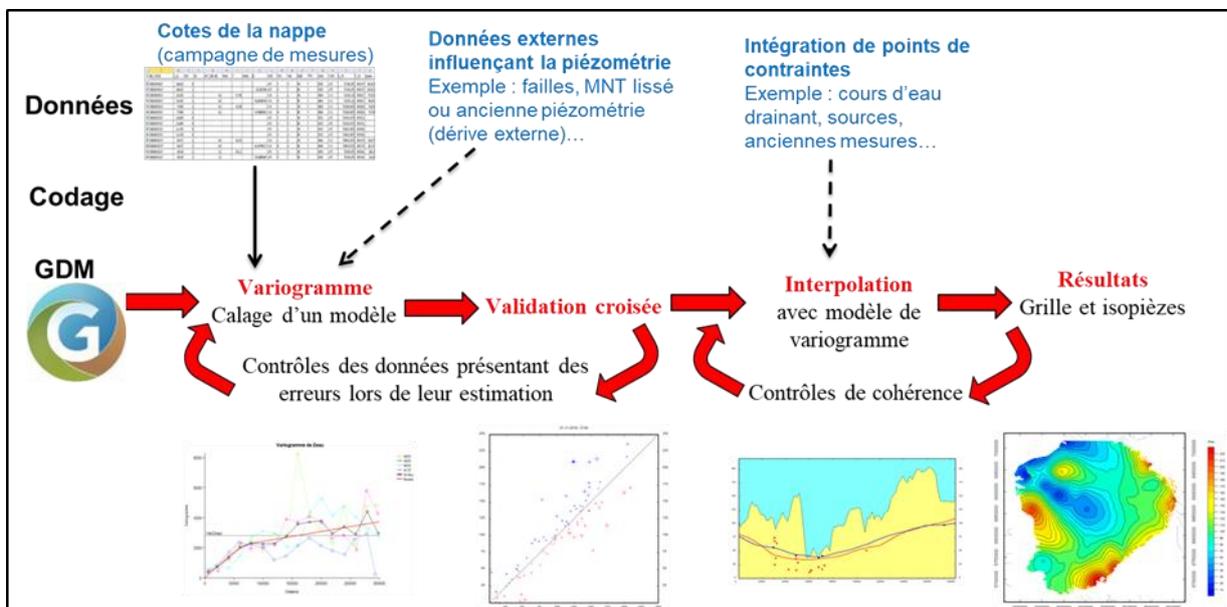


Illustration 23 – Principe standard de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM

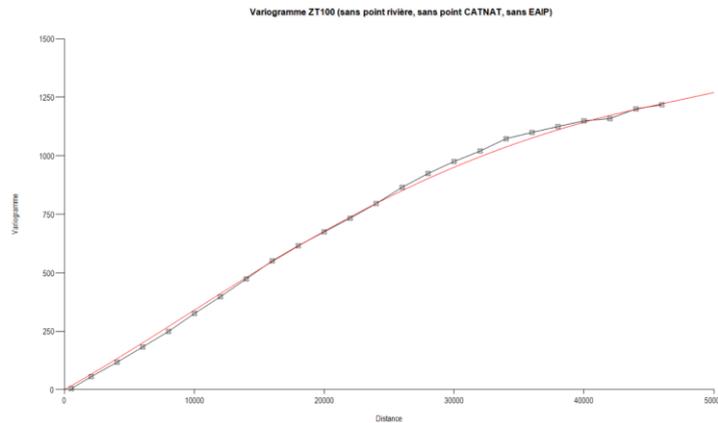
3.2.2. Analyse variographique

Dans un premier temps, le variogramme a été calculé en excluant les données « CATNAT » et « rivières ». Ces dernières, très nombreuses en proportion et de profondeur nulle, auraient biaisé l'analyse variographique (baisse artificielle de la variabilité de la profondeur). Ces points seront réintégrés progressivement au stade de l'interpolation.

Le variogramme expérimental (omni-directionnel) obtenu est présenté sur l'illustration 24. Ce variogramme peut être ajusté par un modèle (cf. courbe rouge) dont les caractéristiques sont reportées dans le tableau de l'illustration 24.

Une variation croisée de ce modèle de variogramme est ensuite effectuée. Elle consiste à estimer par krigeage chaque cote Z_{max_prob} au droit d'un point en faisant comme si la valeur n'y était pas connue et en cherchant à l'estimer à partir des données voisines. Cette opération est itérée sur tous les points disponibles. Cela permet d'identifier les points pour lesquels l'estimation donnerait des performances médiocres.

Pour les données « eaux souterraines », les performances du krigeage sont satisfaisantes avec des erreurs relativement faibles et d'amplitude bien restituée par l'écart-type de krigeage.

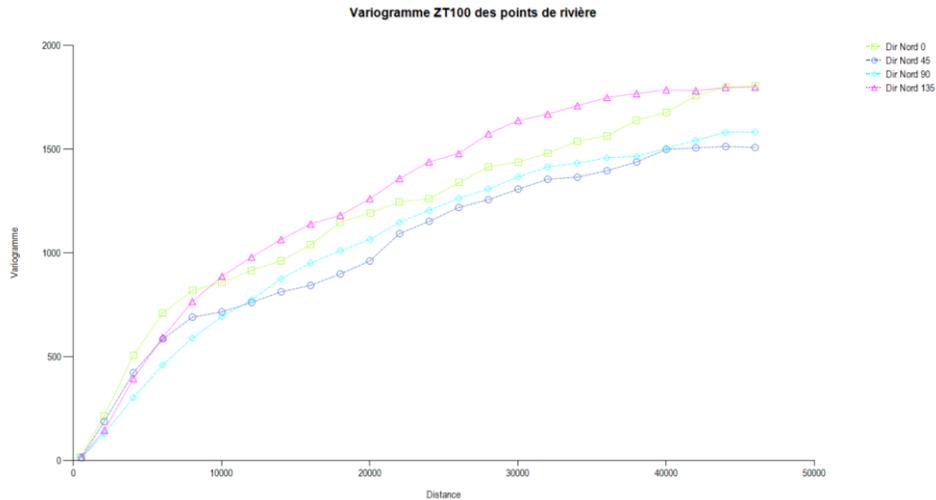


Paramètres de calcul du variogramme expérimental	
Pas de calcul	2000
Nombre de pas	23
Direction de calcul	Omni directionnel (hypothèse d'isotropie)

Variogramme modèle		
Modèle	Portée (m)	Palier (m ²)
Cubique	110	41000
Sphérique	560	44000
Linéaire	-	0.012

Illustration 24 – Variogramme expérimental de la variable Z_{max_prob} pour les points « eaux souterraines » et caractéristiques du modèle ajusté

La même analyse variographique a été menée pour les points « rivières » dans le but notamment d'identifier les points anomaux (Illustration 25).



Paramètres de calcul du variogramme expérimental	
Pas de calcul	2000
Nombre de pas	23
Direction de calcul	Omni directionnel (hypothèse d'isotropie)

MODELE	Portée (m)	Palier (m ²)
Cubique	385	10000
Sphérique	535	35000
Linéaire	-	0.0173

Illustration 25 – Variogramme expérimental de la variable Z_{max_prob} pour les points « rivières » et caractéristiques du modèle ajusté

Pour les points « rivières », la validation croisée a permis d'identifier 307 valeurs aberrantes. A titre d'exemple, des points renseignés comme points de rivières se trouvaient au-dessus de petites collines avec une cote piézométrie relativement haute comparativement aux points rivières avoisinants. Suite à l'interpolation, il a été constaté que ces points faisaient anormalement remonter le niveau piézométrique. Ces points ont été écartés avant de poursuivre l'interpolation.

3.2.3. Validation croisée

La validation croisée en géostatistique est une méthode qui permet de s'assurer de la robustesse du modèle vis-à-vis du variogramme expérimental et d'identifier les points aberrants dans les données du phénomène étudié. Elle consiste à réaliser de façon itérative, en chaque point de donnée, un krigeage à partir du variogramme et des points de données dans le voisinage. Ainsi en chaque point de donnée on connaît à la fois la valeur mesurée et la valeur calculée par krigeage (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

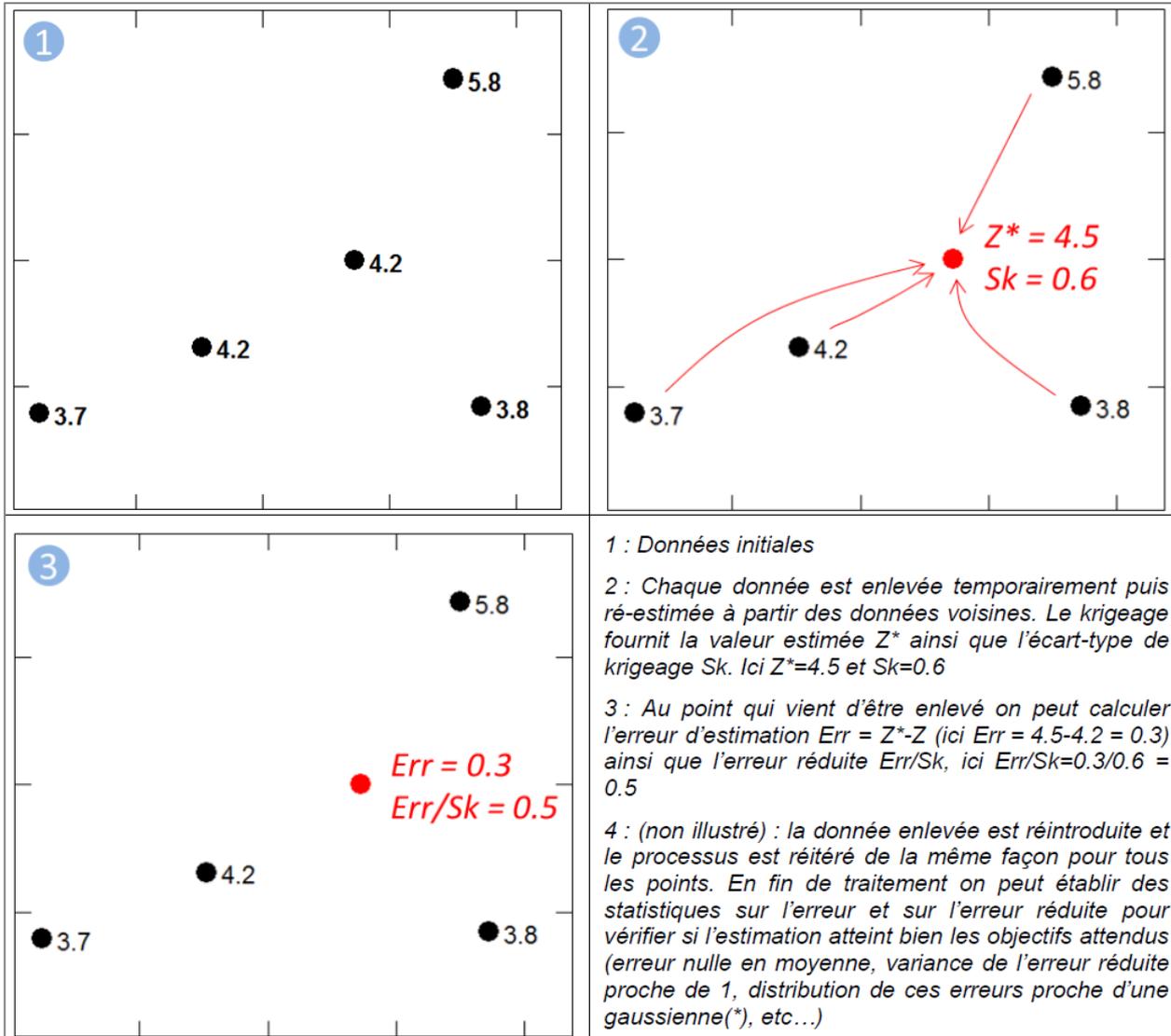


Illustration 26 – Principe de la validation croisée (extrait du rapport BRGM/RP-67538-FR)

L'erreur d'estimation est donc accessible au final.

Si on note Z la variable étudiée, en chaque point de donnée on dispose alors de trois valeurs :

- la **valeur vraie** $Z(x,y)$;
- la **valeur estimée** (interpolée/krigée) en ce point à partir des points voisins : $Z^*(x,y)$;
- l'**écart-type d'estimation** $S_k(x,y)$ si on a utilisé un modèle géostatistique.

Ce processus est répété pour tous les points (x,y) où la variable est connue. On peut alors calculer :

- l'**erreur d'estimation** $Err(x,y) = Z^*(x,y) - Z(x,y)$,
- et dans le cas d'une estimation par modèle géostatistique l'**erreur réduite** : $Ered(x,y) = Err(x,y) / S_k(x,y)$ (erreur brute divisée par l'écart-type de krigeage).

Il a été expérimentalement observé que l'erreur de d'estimation est une gaussienne de moyenne nulle et d'écart type l'écart-type de krigeage. L'erreur réduite est par construction de moyenne nulle et d'écart-type 1.

Les résultats de la validation croisée sont fournis sous forme de statistiques et de cartes : statistiques sur les erreurs et les erreurs réduites (moyennes, nuages de corrélation, histogrammes).

Idéalement, les erreurs d'estimation doivent respecter les points suivants :

- être de moyenne nulle (pas de biais global) ;
- ne pas présenter de zones systématiquement sur ou sous-estimées (à voir sur la carte des erreurs) ;
- ne pas présenter de corrélation entre la valeur estimée et l'erreur (coefficient de corrélation proche de 0 entre Z^* et Err , et nuage Z^*/Err non structuré) ;
- l'estimation doit être proche de la valeur vraie (corrélation Z^*/Z proche de 1, voir nuage Z^*/Z), et présenter un écart-type des erreurs le plus faible possible ;
- si on utilise un modèle géostatistique, l'erreur réduite doit être de moyenne nulle, et d'écart-type doit être proche de 1 ;
- il doit y avoir peu (en théorie de l'ordre de 1%) de données « non robustes » (c'est-à-dire avec une erreur réduite supérieure à 2.5 en valeur absolue (*)).

3.2.4. Interpolation

Une approche « pas à pas » a été suivie pour l'interpolation par krigeage, avec notamment un jeu de données d'entrée évolutif :

Cas 1 : les données « CATNAT » et « Chroniques_Min_Max » sont exclues tandis que les points « rivières » ne sont pas tous retenus (distance inter-points = 2000 m). Méthode de krigeage ordinaire. Concernant les données « eaux souterraines », il s'agit donc du jeu de données utilisé pour l'analyse variographique (§ 3.2.1).

Cas 2 : ajout des données « CATNAT », « Chroniques_Min_Max » et resserrement de l'échantillonnage des points « rivières » (distance de 500 m). Méthode de krigeage ordinaire.

Cas 3 : reprise du cas 2 avec une méthode de krigeage avec dérive externe. On suppose ici que l'interpolation de la variable régionalisée Z_{max_prob} peut être améliorée par celle d'une autre variable régionalisée connue en tout point du champ d'étude ; dans notre cas la topographie. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps évalué la corrélation linéaire entre le MNT 100m lissé (calculé par moyenne mobile du MNT25) et Z_{max_prob} (Cf. Illustration 27). Dans les régions présentant des lacunes d'échantillonnage de Z_{max_prob} , la dérive externe, la topographie, « guide » l'interpolation.

Cas 4 : reprise du cas 2 avec ajout de points de contrainte en fond de vallées pour corriger certaines erreurs d'interpolation ($Z_{max_prob} \gg$ MNT). Cela concerne principalement des densifications locales de points « rivières ».

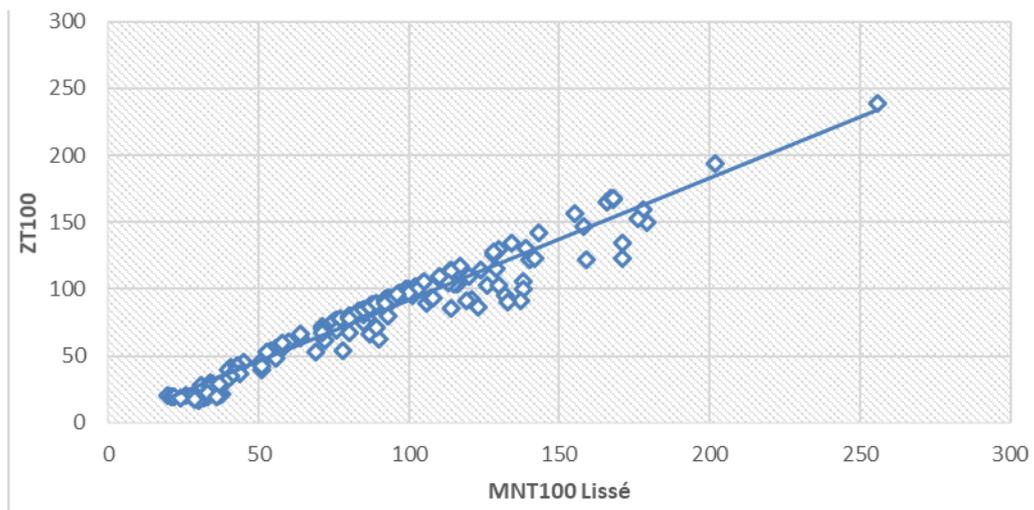


Illustration 27 – Corrélation entre le MNT100 lissé et Zmax_prob

Une façon de vérifier la qualité de l'interpolation a été l'usage des points dit points d'inégalité. En effet, ces points constituent un sous-ensemble de données correspondant aux relevés piézométriques ponctuels issus de la BSS-EAU (profondeurs inférieures à 5 m). Pour chaque cas d'interpolation, le Zmax_prob est interpolé au droit de ces points à partir du même variogramme modèle et des mêmes paramètres d'interpolation pour chaque cas. Ainsi, en chaque point d'inégalité, il a été possible de vérifier la proportion de points pour lesquels la méthode utilisée a permis d'assurer le respect de l'inégalité.

La qualité de l'interpolation peut être approchée avec l'analyse conjointe de la moyenne de l'écart-type de krigeage (Illustration 28) et le respect des contraintes d'inégalités (Illustration 29).

Si la méthode avec dérive externe (cas 3) permet de réduire la moyenne de l'écart-type de krigeage (Illustration 28) et de respecter davantage d'inégalités (Illustration 29), elle génère de nombreux artefacts. Ceux-ci se traduisent par une sur-estimation du risque de remontée de nappe, notamment en zone de plateaux. En effet, en l'absence de données, l'interpolation du Zmax_prob tend à reproduire à l'identique les variables de relief (Cf. coupe, Illustration 30).

Une méthode krigeage ordinaire a finalement été retenue avec l'intégration d'un maximum de points de contrainte (Cas 4). L'échantillon de données n'est, en effet, pas suffisamment dense pour se permettre de ne pas intégrer toutes les données « eaux souterraines ».

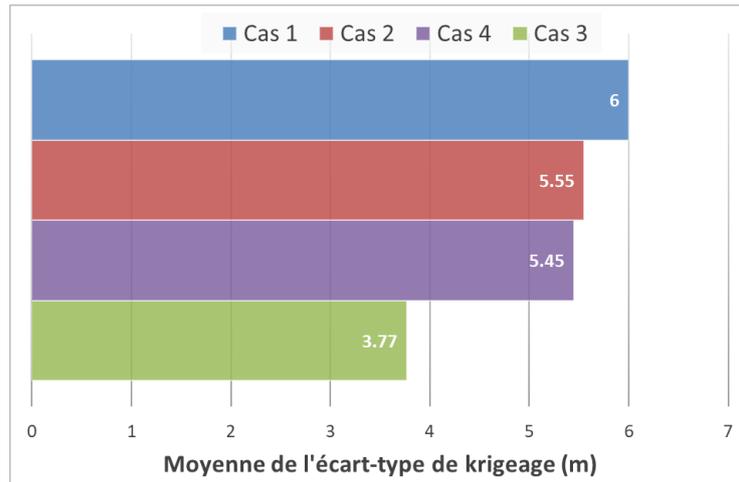


Illustration 28 – Moyenne de l'écart-type de krigeage pour les 4 cas d'interpolation

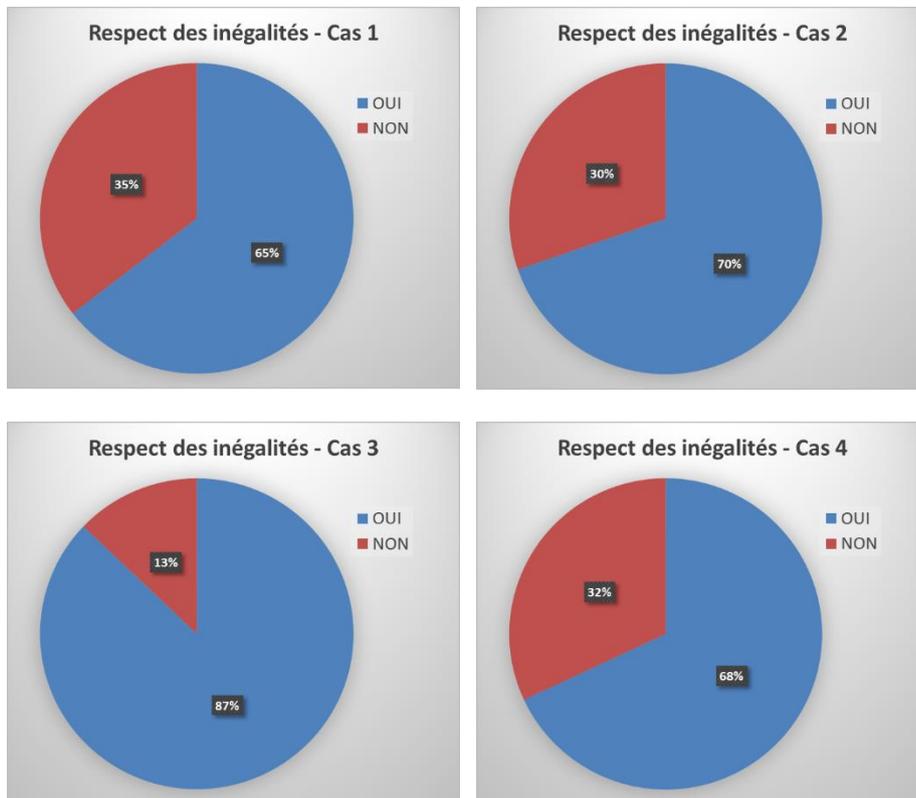


Illustration 29 – Respect des inégalités pour les 4 cas d'interpolation

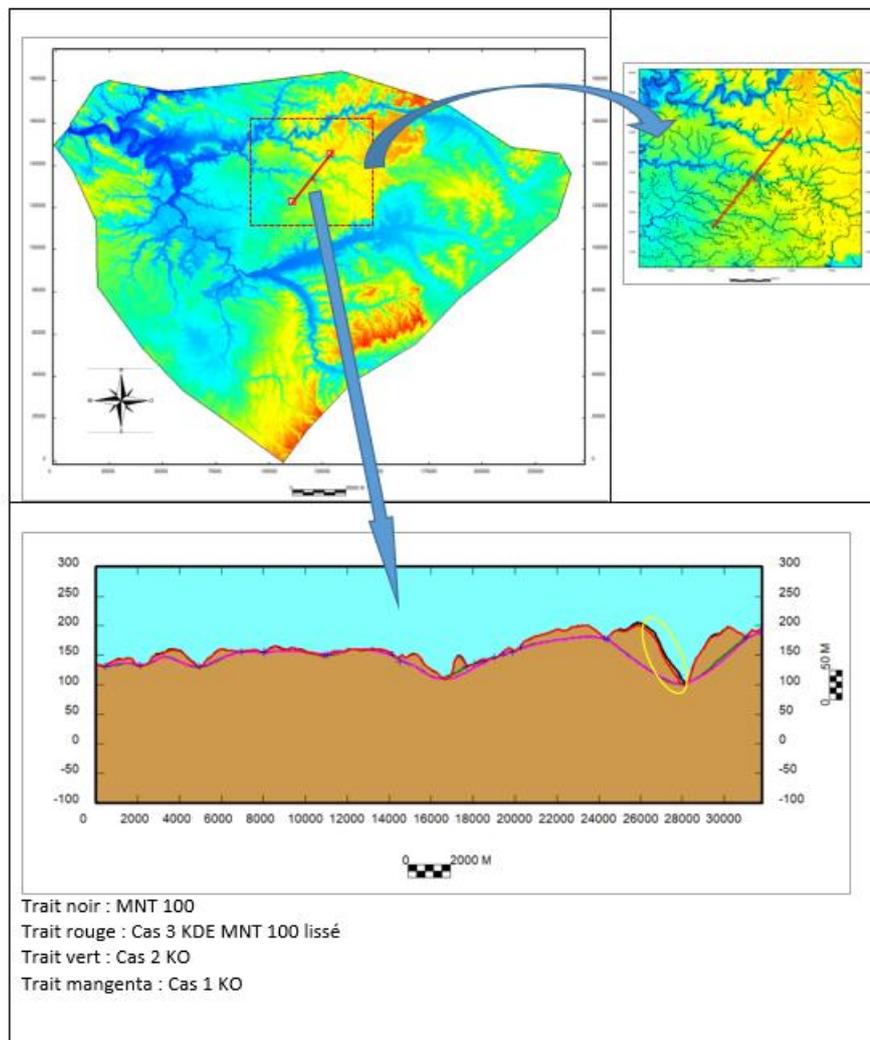


Illustration 30 – Exemple d'artefact généré par la méthode de krigeage avec dérivé externe (MNT). (KO : krigeage ordinaire, KDE : krigeage avec dérivé externe). On voit dans le cas 3 (trait rouge) la reproduction du MNT lissé

3.3. ETAPE 3 : CARTOGRAPHIE ET ERREURS ASSOCIEES

Une fois la surface Z_{max_prob} interpolée à la maille de 100 m, la sensibilité aux remontées de nappe est obtenue par différence avec le MNT25 moyen agrégé par maille de 100 m (moyenne mobile du MNT 25m). Au regard des incertitudes, et après différentes configurations testées, une classification légèrement différente de celle de la cartographie nationale est proposée à ce stade :

- ✓ « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT moyenné et la cote Z_{max_prob} interpolée est négative ou inférieure à 1 m (contre < 0 m pour la carte nationale) ;
- ✓ « zones potentiellement sujettes aux inondations de cave » : lorsque la différence est comprise entre 1 et 5 m (contre 0-5 m pour la carte nationale) ;
- ✓ « pas de débordement de nappe ni d'inondation de cave » : lorsque la différence est supérieure à 5 m (identique pour la carte nationale).

Cette classification n'est pas figée, c'est cependant celle qui semble la mieux refléter la sensibilité aux remontées de nappe avec notamment des zones de débordement au droit du réseau hydrographique (Illustration 31).

Les principales différences et évolutions vis-à-vis de la carte nationale sont discutées dans le paragraphe suivant.

L'illustration 32 présente une cartographie de l'écart-type de krigeage. Sans surprise, l'erreur d'estimation est grande dans les zones sans donnée. Celles-ci sont localement supérieures à 8 m dans des secteurs dépourvus d'information : nord du département de l'Yonne (89), Seine-Saint-Denis (93), extrémité sud de la Seine et Marne (77), moitié nord de l'Aube (10) et extrémité sud de l'Oise (60) pour les principaux (Cf. plages orange et rouge, Illustration 32).

De ce fait, on pourrait dire que le risque de remontée de nappe dans ces secteurs reste majoritairement faible bien que l'erreur de l'estimation soit grande comme traduit par l'illustration 33. Pour construire cette carte, l'erreur d'estimation a d'abord été ajoutée à la cote Z_{max_prob} interpolée et le calcul de la profondeur de nappe associée à cette nouvelle surface piézométrique a ensuite été réalisée. Les secteurs représentés en gris correspondent aux secteurs pour lesquels l'ajout de l'erreur fait passer la sensibilité aux remontées de nappe de nulle à moyenne / élevée. On peut constater que l'extension des secteurs impactés est modérée.

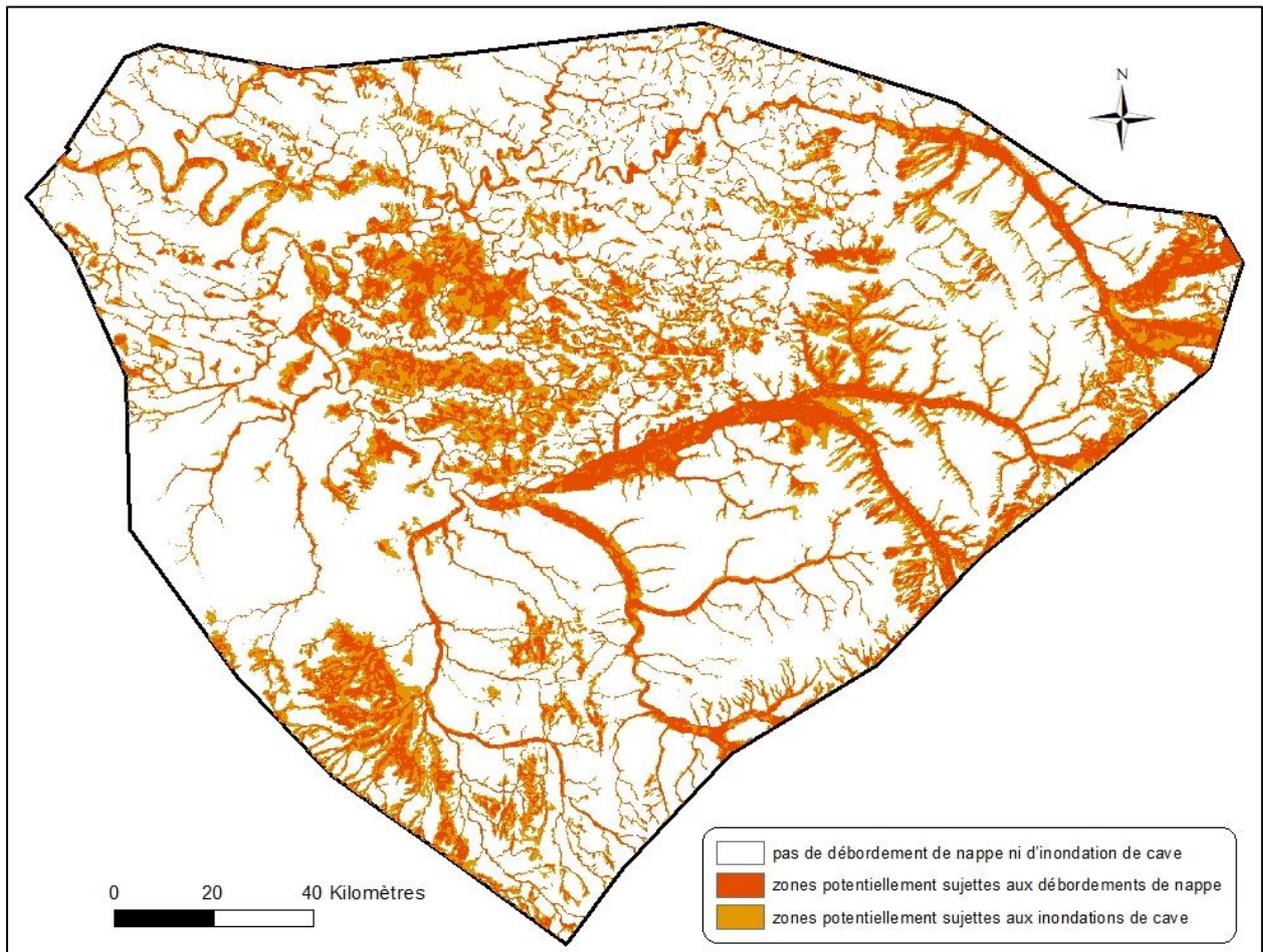


Illustration 31 – Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe sur les bassins de la Seine Amont et Moyenne

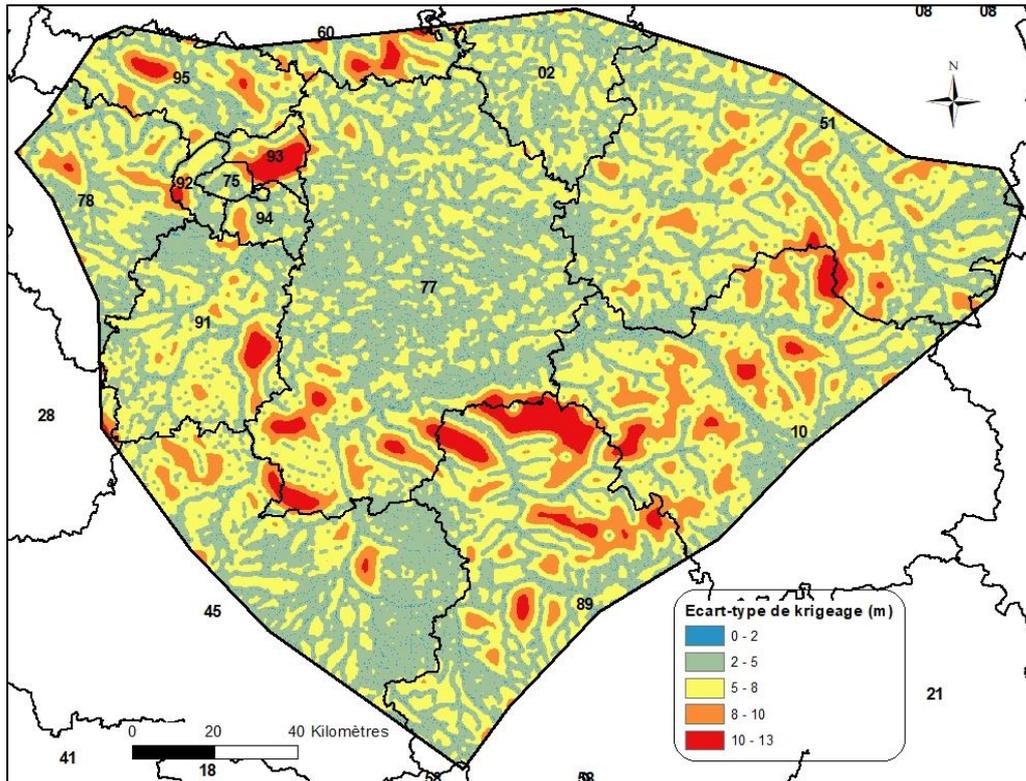


Illustration 32 – Carte de l'écart-type de krigeage

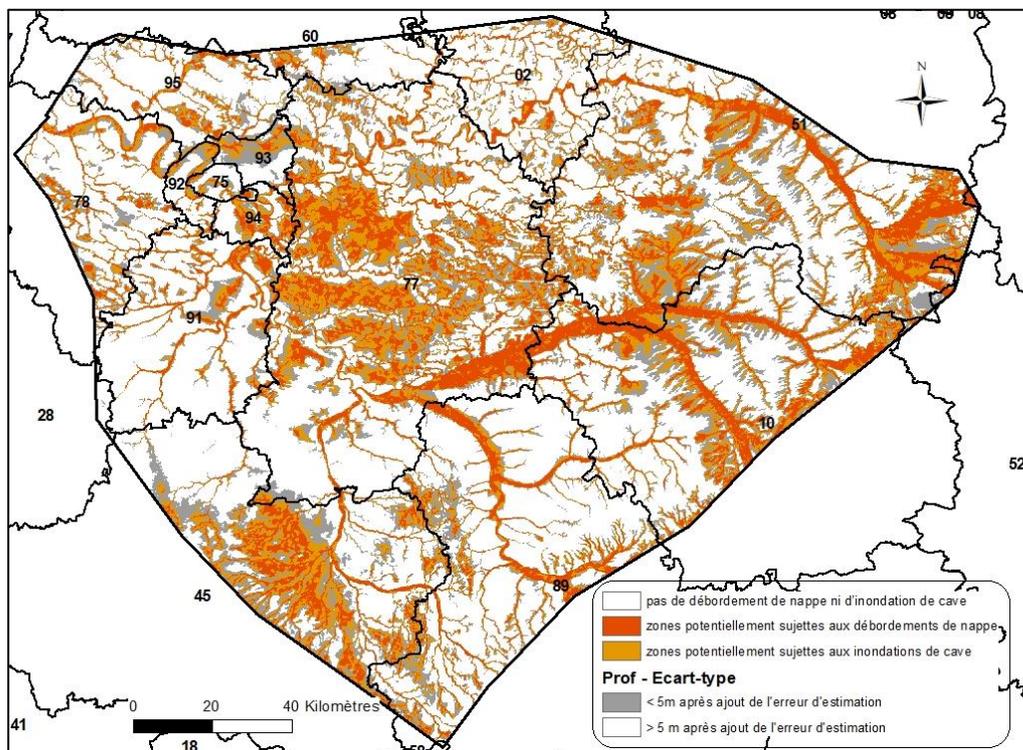


Illustration 33 – Carte des zones potentiellement sujettes aux débordements ou à l'inondation de caves après ajout de l'erreur à la cote Z_{max_prob} interpolée (en gris : secteurs passant en sensibilité moyenne à élevée après ajout de l'erreur)

3.4. ETAPE 4 : VALIDATION ET LIMITES D'UTILISATION

3.4.1. Comparaison avec la carte nationale

Une confrontation avec la cartographie nationale est proposée par les 4 illustrations suivantes. Pour une meilleure lisibilité, la zone d'étude a été découpée en 4 secteurs : nord-ouest (Illustration 34), nord-est (Illustration 35), sud-ouest (Illustration 36) et sud-est (Illustration 37).

On peut tout d'abord constater que malgré la non prise en compte des EAIPce, la sensibilité aux remontées de nappe reste bien mise en évidence au droit des vallées principales, avec dans de nombreux cas des étendues similaires : la Marne amont, la Seine amont, l'Aube (Illustration 35 et Illustration 37) et le Loing (Illustration 36). Dans d'autres cas, l'étendue des zones sensibles apparaît moins importante avec la nouvelle carte produite, c'est notamment le cas de la Seine en aval de sa confluence avec la Marne et de la Marne aval (Illustration 35). Cela va dans le sens des résultats issus de l'imagerie satellitale (Cf. § 4). Ces observations viendraient ici confirmer le caractère maximisant des EAIPce déjà discuté précédemment.

Pour les EAIPce concernant les cours d'eau secondaires et les vallées sèches, la sensibilité aux remontées apparaît beaucoup moins significative dans ces secteurs. Cette différence est globalement constatée sur toute la zone d'étude mais elle est particulièrement nette dans le sous-secteur nord-est. Aussi, afin de souligner l'impact des EAIPce sur le résultat final, la délimitation des EAIPce est également présentée au niveau de l'illustration 35. Les données de terrain disponibles (Catnat ou profondeurs d'eau inférieures à 5m) sont toutes situées au droit des zones sensibles identifiées par la nouvelle carte, mais aucune ne permettrait de valider les zones sensibles attribuées aux EAIPce. Même s'il faut rester prudent, il est probable que les EAIPce soient localement à l'origine d'une surestimation de la sensibilité aux remontées de nappe dans de tels secteurs.

Globalement, la continuité d'une sensibilité élevée au droit des cours d'eau est assurée avec la nouvelle cartographie, ce qui n'était pas toujours le cas pour la carte nationale (Cf. Illustration 38). L'hypothèse forte retenue étant que les cours d'eau naturels correspondent à des affleurements de nappe.

Après une première analyse de la cartographie nationale sur notre zone d'étude, des résultats douteux / biaisés avaient été mis en évidence pour trois secteurs. Certains d'entre eux ont déjà été brièvement discutés dans les paragraphes précédents :

- Sensibilité avérée aux remontées de nappe **au cœur de la Brie**, là où les calcaires de Brie sont affleurants et peu épais. En l'absence de donnée, la sensibilité est sous-estimée par la carte nationale. Grâce à la collecte de nouvelles données relatives à cet aquifère (suivis piézométriques du CD94 et d'AQUI'Brie + modèle hydrodynamique AQUI'Brie), la sensibilité importante de ce secteur est désormais mieux traduite (Cf. secteur encerclé, Illustration 34). La cartographie restituée est notamment cohérente avec la cartographie des milieux potentiellement humides produite par le MEDDE et le GIS Sol en 2014.
- Une surestimation de la sensibilité a été constatée sur des **versants crayeux en Champagne**, en lien avec des surcotes abusives appliquées à des relevés piézométriques datés d'avril 2001 (très hautes eaux). Ce biais est bien visible en rive gauche de la Seine, à l'extrémité amont de la zone d'étude (Cf. secteur encerclé, Illustration 37). Cela a pu être corrigé avec l'intégration des points de mesure utilisées pour l'élaboration de la carte piézométrique de très hautes eaux de la craie champenoise (Illustration 37).

- De façon secondaire, quelques incohérences entre les zones humides (MEDDE et GIS Sol, 2014) et la sensibilité aux remontées de nappe cartographiée au niveau national pouvaient enfin interroger en **Beauce** (Cf. secteur encerclé, Illustration 36). Les différences sont modérées, mais les zones sensibles de la nouvelle carte couvrent désormais davantage les zones humides modélisées par le MEDDE. Une amélioration significative de la carte semble donc avoir également été obtenue dans ce secteur (Illustration 36).

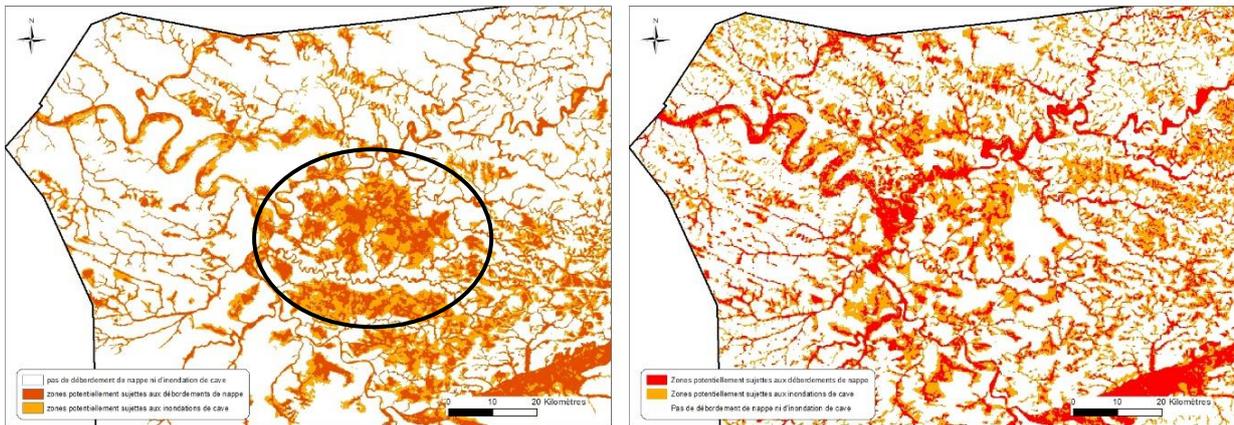


Illustration 34 – Comparaison des résultats cartographiques avec l'étude nationale – Secteur Nord-Ouest (carte 2019 à gauche)

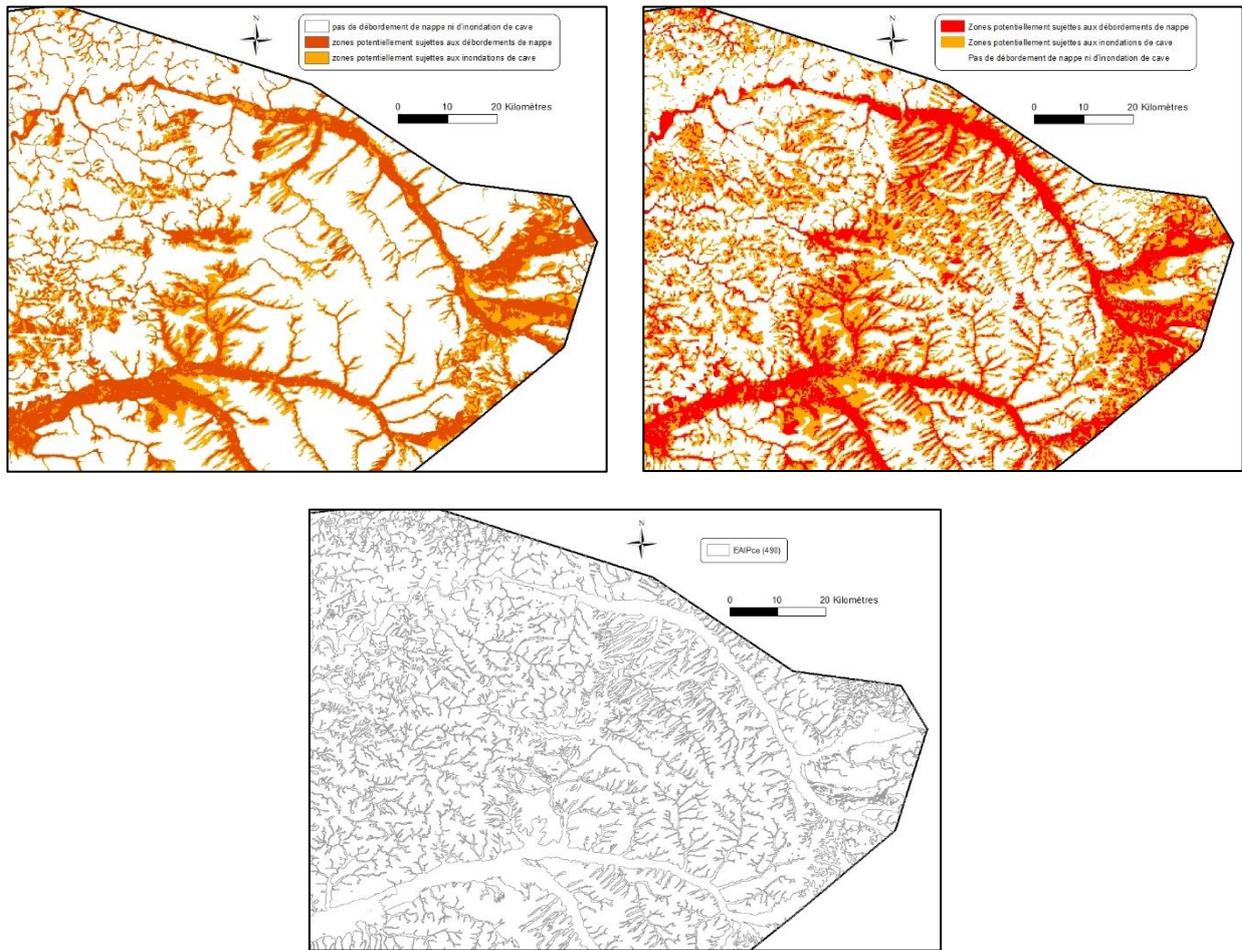


Illustration 35 – Comparaison des résultats cartographiques avec l'étude nationale – Secteur Nord-Est (carte 2019 en haut à gauche)

Pour le reste, les deux cartes présentent globalement des résultats relativement similaires à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne.

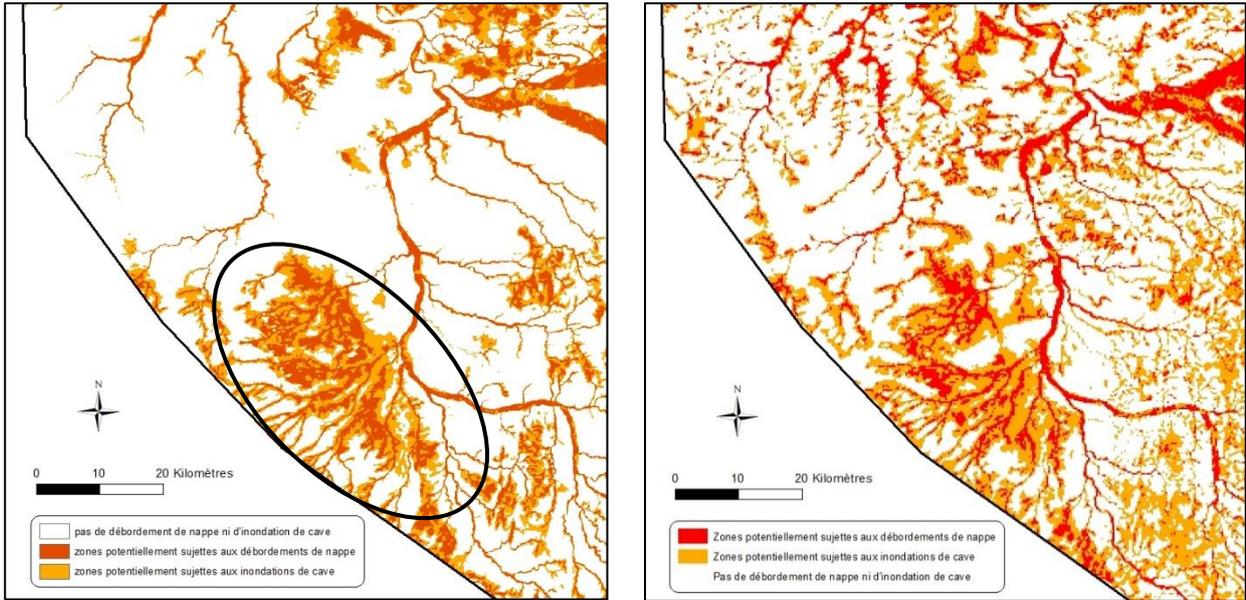


Illustration 36 – Comparaison des résultats cartographiques avec l'étude nationale – Secteur Sud-Ouest (carte 2019 à gauche)

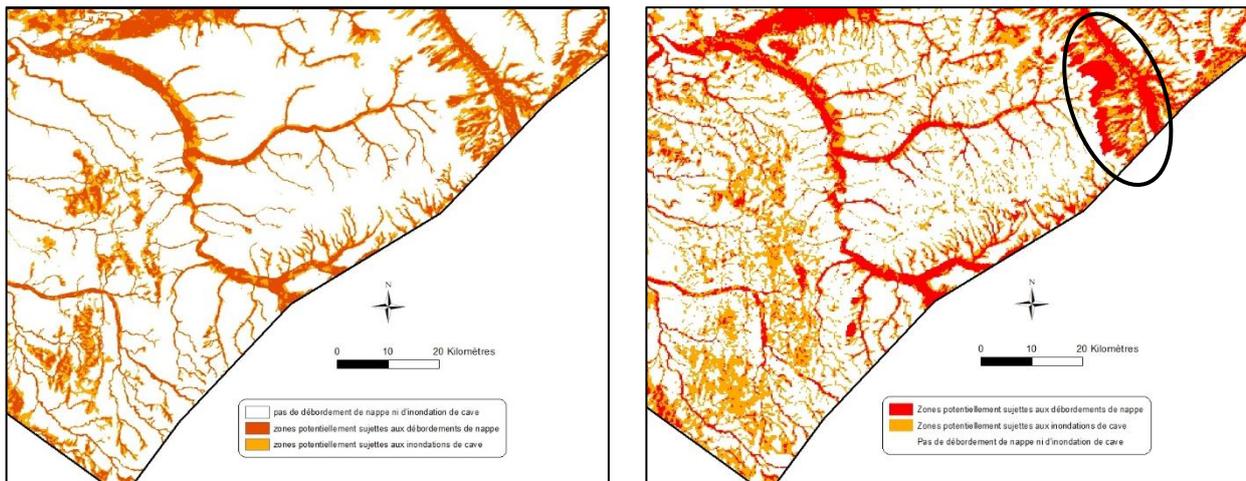


Illustration 37 – Comparaison des résultats cartographiques avec l'étude nationale – Secteur Sud-Est (carte 2019 à gauche)

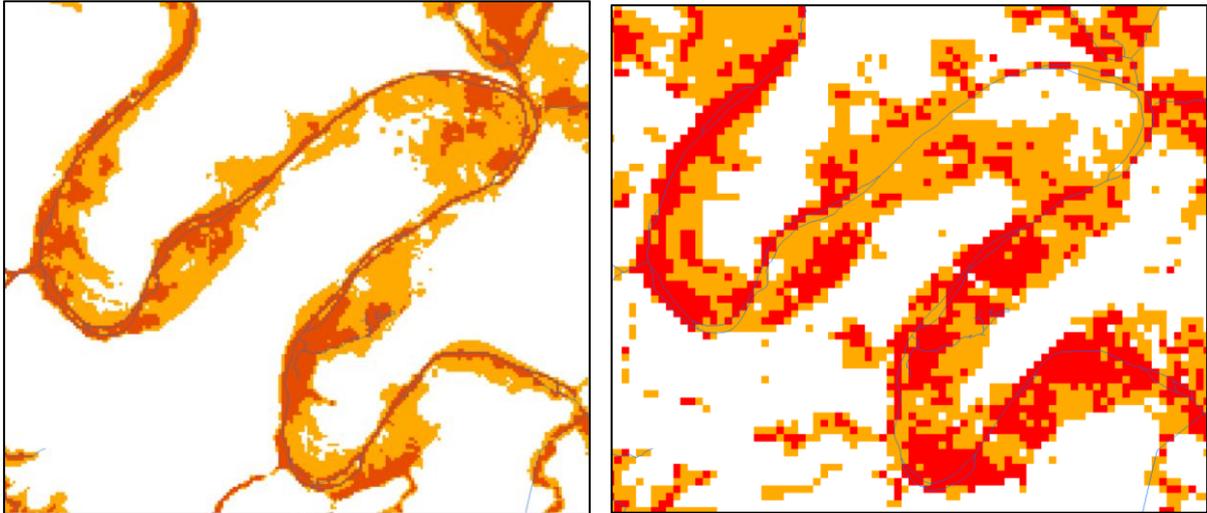


Illustration 38 – Comparaison des résultats cartographiques avec l'étude nationale – Zoom sur les boucles de la Seine (carte 2019 à gauche)

3.4.2. Limites d'utilisation

Même si des améliorations significatives ont pu être obtenues à l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne, la cartographie produite comporte toujours de fortes incertitudes, déjà soulignées dans l'étude nationale :

- données d'entrée de natures et de qualités hétérogènes ;
- absence de données « eaux souterraines » dans plusieurs secteurs (Cf. carte de l'écart-type de krigeage, Illustration 32) ;
- MNT, pour lequel l'incertitude est évaluée en plaine à +/- 2 mètres (Brugeron et al., 2018) ;
- incertitudes intrinsèques aux méthodes géostatistiques.

Pour ces raisons, il ne semble pas possible d'exploiter la carte à une échelle supérieure au 1 / 100 000.

Une méthode globale a été appliquée sur l'ensemble de la zone d'étude (2 700 km²), elle n'est donc pas forcément adaptée aux contextes urbains pour lesquelles l'imperméabilisation des sols justifie d'une approche plus fine. En zone urbaine, les résultats obtenus sont à considérer avec circonspection.

A cette échelle, il apparaît difficile de réduire les incertitudes ; l'exercice consistant à réaliser des traitements automatisés et géostatistiques atteint donc ici ses limites. Seules des validations terrain (reconnaitances, enquêtes, etc.) et une confrontation à des études ciblées, aux connaissances des acteurs de terrain pourraient permettre de consolider la cartographie à une échelle plus locale.

4. Traitement de l'imagerie satellitale

L'objectif de l'étude est d'utiliser des techniques de télédétection à partir des données de la mission Copernicus Sentinel pour identifier les zones potentiellement inondées par des remontées de nappe.

4.1. DONNEES UTILISEES

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. 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 radar **Sentinel-1** (Sentinel-1A, Sentinel-1B) à la fréquence de 6 jours permet de détecter des changements temporels sur des images satellitaires pouvant être associés à l'apparition d'étendues d'eau en surface. La mission d'imagerie haute résolution multispectrale **Sentinel-2** est appropriée pour la surveillance des surfaces en eau, cependant elle n'est pas toujours exploitable car l'imagerie optique par satellite ne permet pas de traverser la couverture nuageuse. 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 dans les micro-ondes).

Les données ont été consultées via le Open Access Hub du programme Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>) et la plate-forme française PEPS (Plateforme d'Exploitation des Produits Sentinel, <https://peps.cnes.fr>). Le traitement a été effectué à l'aide de la boîte à outils open source ESA SNAP (Sentinel Application Platform, <http://step.esa.int>).

Le SNAP consiste en une collection d'outils de traitement, de lecteurs et d'écrivains de produits de données, ainsi que d'une application d'affichage et d'analyse pour prendre en charge les vastes archives de données provenant des diverses missions SAR.

Compte tenu du grand nombre de données utilisées 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 Processin On Demand (G-POD, <http://gpod.eo.esa.int>). G-POD offre une haute performance de calcul et un grand potentiel de ressource 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 sur la période d'avril 2015 à juillet 2018 (non disponibles auparavant). Pour la crue de janvier-février 2018, des données Sentinel-1B ont également été obtenues ; cela a permis 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. Au total, les images Sentinel-1 collectées sur la zone d'étude correspondent à 107 scènes.

Concernant la disponibilité des données Sentinel-2, une seule image sans nuage était disponible (25 février 2018), elle correspond donc 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, la crue étant survenue tout début février).

4.2. METHODOLOGIE GENERALE

Pour la cartographie des inondations, un traitement couramment appliqué consiste à comparer les images SAR avant et après l'événement, puis à délimiter les régions pour lesquelles une réduction significative de l'intensité de rétrodiffusion SAR est détectée. Cette réduction de l'intensité de rétrodiffusion SAR indique la présence d'eau en surface et peut donc se traduire par des zones potentiellement inondées.

Cette démarche ne peut simplement être appliquée pour cartographier les inondations par remontée de nappe. Un développement méthodologique a donc spécifiquement été mis œuvre pour tenter de distinguer parmi les secteurs inondés : ceux concernés par un débordement de cours d'eau et ceux liés à une remontée de la nappe.

La méthode développée repose sur les principales étapes de travail suivantes (Illustration 39) :

- Au cours de la première étape, la période de surveillance complète (2015-2018) est examinée avec les données radar Sentinel-1 qui contiennent finalement deux événements d'inondation (juin 2016 et janvier/février 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 (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 de manière plus précise les étendues d'inondation événement par événement. Par conséquent, pour détecter et cartographier individuellement les différents événements d'inondation, un algorithme dédié a été développé, basé sur l'analyse des séries chronologiques. Enfin, la caractérisation des signaux temporels liés aux crues induites par les eaux souterraines et leur séparation par rapport à des débordements de cours d'eau a également été tenté. L'avantage de la méthodologie proposée est sa capacité à détecter l'eau persistante et à identifier la période et l'étendue exactes de l'inondation. **Les temps de calcul associés étant très importants, les traitements n'ont pu être menés sur l'ensemble des bassins de la Seine amont et moyenne ; seuls deux sous-secteurs ont été étudiés : un premier centré sur la confluence entre l'Aube et la Seine et un second centré sur la Seine entre ses confluences avec la Marne et l'Essonne.**

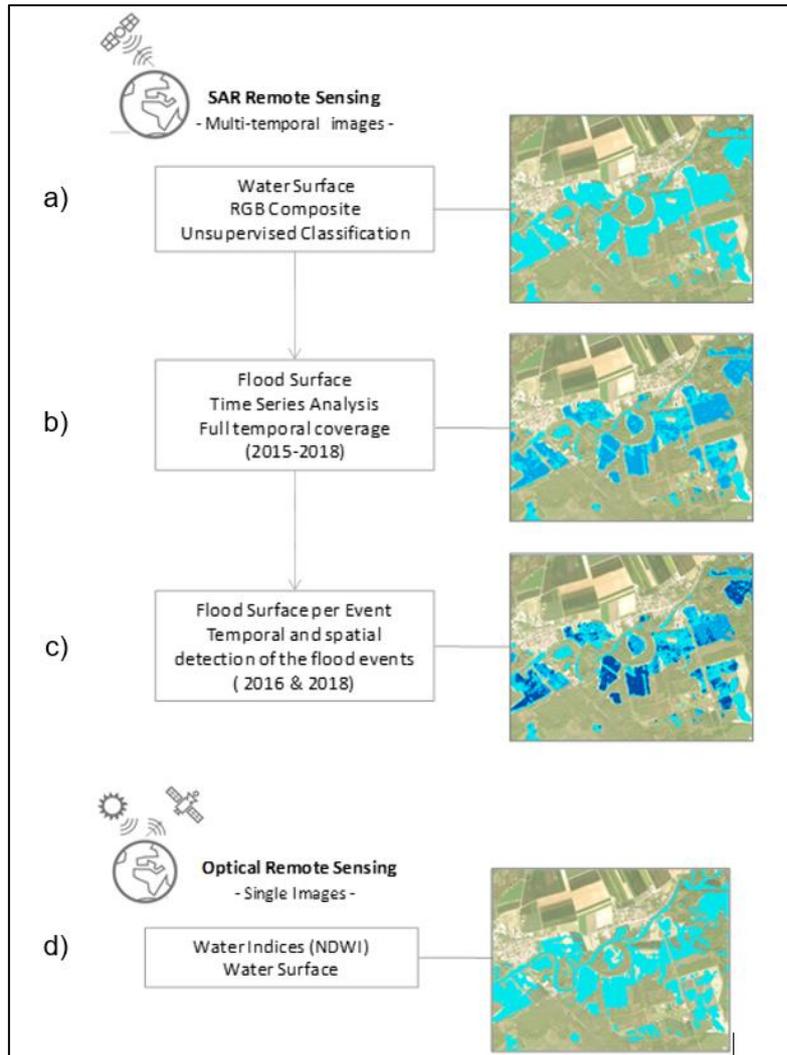


Illustration 39 – Logigramme de la méthodologie mise en œuvre pour la cartographie des zones inondées à partir de l'imagerie satellitale

4.3. CARTOGRAPHIE SAR ET OPTIQUE DES INONDATIONS

4.3.1. Principales difficultés d'interprétation

La précision de la cartographie des inondations basée sur le **SAR** peut varier considérablement en fonction de l'occupation du sol de la zone d'intérêt. Les surfaces planes telle qu'une surface en 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 pourrait paraître assez simple, mais d'autres environnements peuvent présenter des niveaux de rétrodiffusion similaires : réseaux routiers, pistes d'aéroport, auvents végétalisés, fonds de vallées profonds, etc. Par ailleurs, 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 : tenir compte des facteurs pouvant conduire à une surestimation (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 surfaces en eau. 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.

Concernant la précision de la cartographie des inondations basée sur l'**optique**, un certain nombre de facteurs peuvent conduire à une sous-estimation ou une surestimation des surfaces. 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 d'eau peut être complexe en raison de la confusion avec les sols saturés en eau.

4.3.2. Détection des inondations basée sur le SAR

Les méthodes SAR les plus couramment utilisées pour la cartographie des crues sont basées sur le seuillage par histogramme. Cette approche consiste à étudier l'inondation sur la base d'une seule date. Quand l'inondation se déroule sur une période plus longue (plusieurs jours, semaines), comme dans les cas des remontées de nappe, l'analyse doit être basée sur des traitements de séries temporelles SAR. Cela est rendu possible par le grand nombre d'images SAR disponibles.

Les différentes étapes de traitement des données radar Sentinel-1 sont résumées ci-dessous :

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

Toutes ces étapes sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Le prétraitement

Pour le traitement des images SAR, plusieurs étapes, présentées dans l'illustration 40, 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 σ_0 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 40 – Schéma adopté pour le traitement des données SAR Sentinel-1 GRD.

Détection initiale des surfaces en eaux

La détection initiale des eaux de surface peut se subdiviser en trois étapes :

- 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 est 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) sur une base de pixels. Des calculs arithmétiques supplémentaires ont été effectués, spécifiquement pour identifier la plage de valeurs de rétrodiffusion pour chaque pixel, exprimée par les différences entre les valeurs de rétrodiffusion minimale et maximale (Illustration 41).

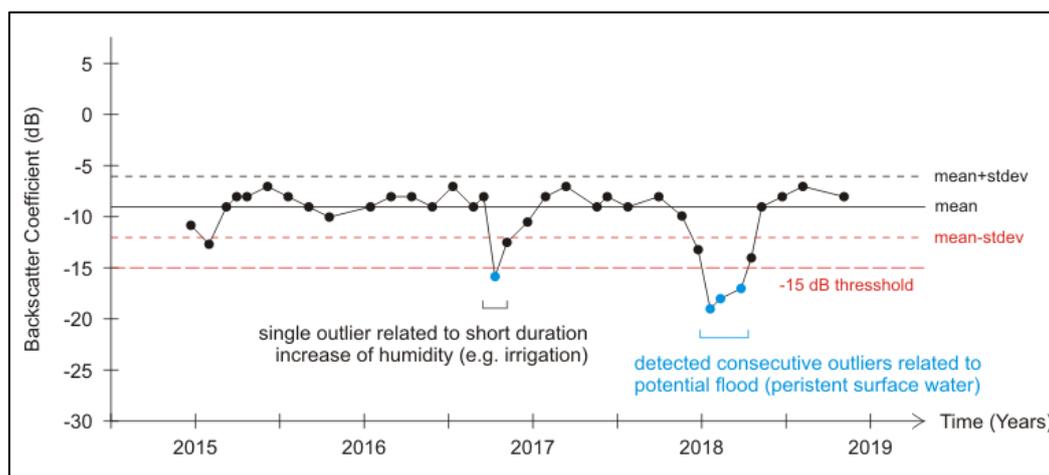


Illustration 41 – Evolution de la rétrodiffusion radar au cours du temps issue de l'analyse des séries temporelles SAR Sentinel-1 (la réduction du signal correspond à l'apparition d'eau en surface)

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 (G), tandis que les valeurs de rétrodiffusion minimales inversées (liées à la présence d'eau de surface) dans le canal bleu (B).

Avant la combinaison, chaque couche de données est 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 de surfaces inondées. La composition RVB résultante sur les bassins de la Seine Amont et Moyenne est présentée par l'illustration 42.

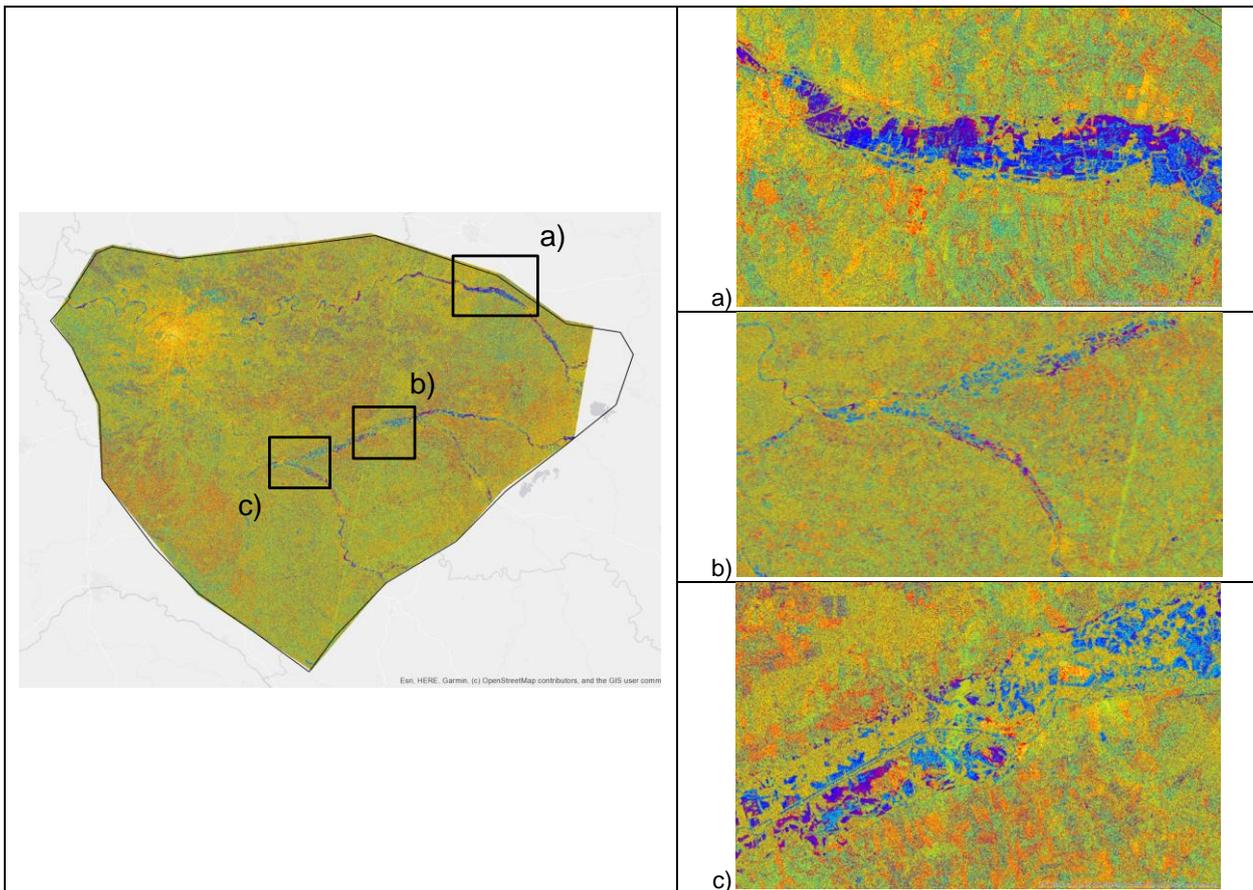


Illustration 42 – Composition couleurs RVB basée sur l'analyse des données Sentinel-1 (période 2015-2018)

Analyse des séries temporelles

Suite à l'identification des surfaces en eau pendant toute la période d'observation, en examinant leurs propriétés statistiques, un examen détaillé des séries chronologiques de rétrodiffusion SAR a été mené pour déterminer les périodes exactes où des inondations se sont produites. 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 mentionnés en dernier. 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 les eaux souterraines.

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.

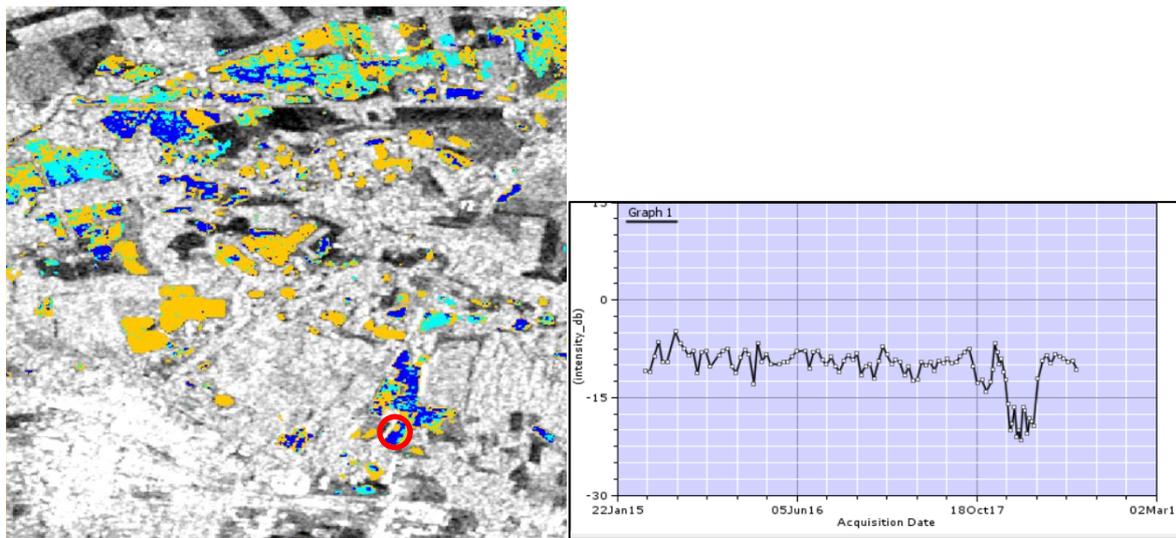
Le concept principal de l'algorithme est de détecter les valeurs anomaliques en contrôlant plusieurs paramètres parmi lesquels l'écart-type et la rétrodiffusion maximale de la pile multi-temporelle. Plus précisément :

- Tout point (date d'acquisition) de la série chronologique est caractérisé comme anomal 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 41). Pour la détection des valeurs anomales, dans notre cas les pixels affectés par l'eau dans la série chronologique, la notion de valeur moyenne 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 anomales consécutives nécessaires (3 par défaut, soit 12 jours) pour caractériser la valeur anomale comme un événement d'inondation de longue durée. Autrement dit, l'algorithme vise à détecter les pixels « noyés » pendant 12 jours consécutifs.

Les résultats de l'analyse des séries chronologiques sont (cf. carte, Illustration 43) :

- a) une image binaire d'inondation pour toute la période d'observation et,
- b) une image associée à une période d'intérêt sélectionnée, accompagnée d'un fichier texte détaillé (au format CSV) répertoriant les valeurs anomales identifiées (pixels affectés par inondation), leurs coordonnées géographiques, 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.



en jaune : résultats issus de la classification RGB sur la période complète (2015-2018)
 en bleu : résultats issus de l'analyse des séries temporelles sur la période complète (2015-2018)
 en cyan : résultats issus de l'analyse des séries temporelles sur la période décembre 2017-mars 2018

Illustration 43 – Exemple de résultats cartographiques et d'une série chronologique de la rétrodiffusion SAR

4.3.3. Détection des inondations basée sur l'optique

Comme vu précédemment, 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 particulièrement adaptée à de telles applications.

Les méthodes couramment utilisées pour extraire les plans d'eau de l'imagerie optique multi spectrale sont basées sur des indices de bande, spécifiquement conçus 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). Elle s'appuie sur la combinaison des bandes spectrales proche infrarouge (NIR, Near Infrared) et l'onde courte infrarouge (SWIR, Short Wave Infrared) :

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

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.

Un exemple est représenté sur l'illustration 44.

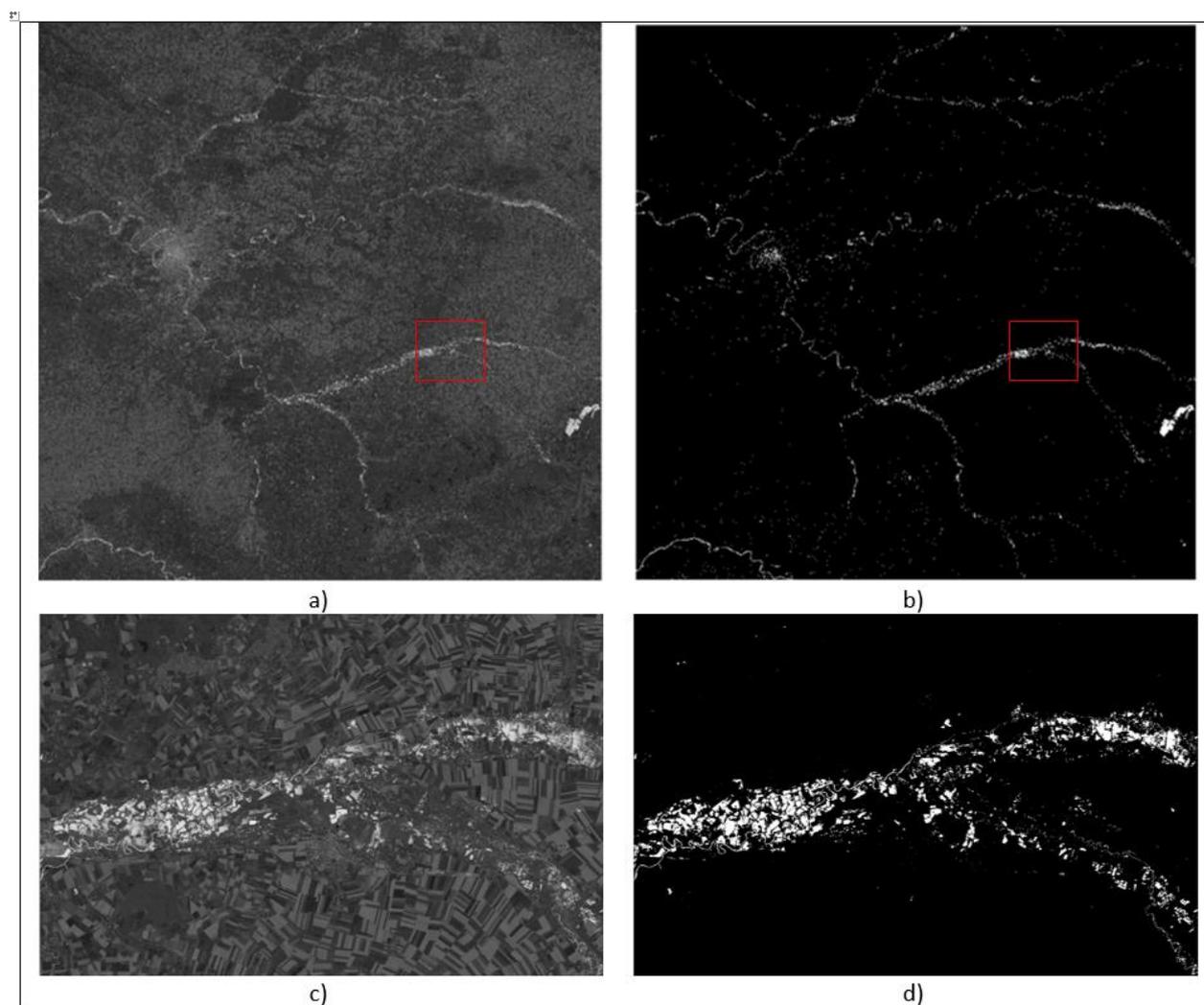


Illustration 44 – Carte NDWI (à gauche) et carte binaire des zones inondées (à droite) à l'échelle de la zone d'étude (a et b) et zoom centré sur la confluence entre la Seine et l'Aube (c et d). Image Sentinel-2 datée du 25/02/2018 (post-inondation)

4.4. EXEMPLES DE RESULTATS

4.4.1. Cartographie des inondations basées sur la classification RVB

Des exemples de résultats issus de la classification RVB de l'ensemble de données Sentinel-1 (avril 2015 - juillet 2018) sont présentés par les Illustration 45, Illustration 46 et Illustration 47. Sont distinguées les eaux permanentes (bleu foncé) et les zones inondées (bleu clair).

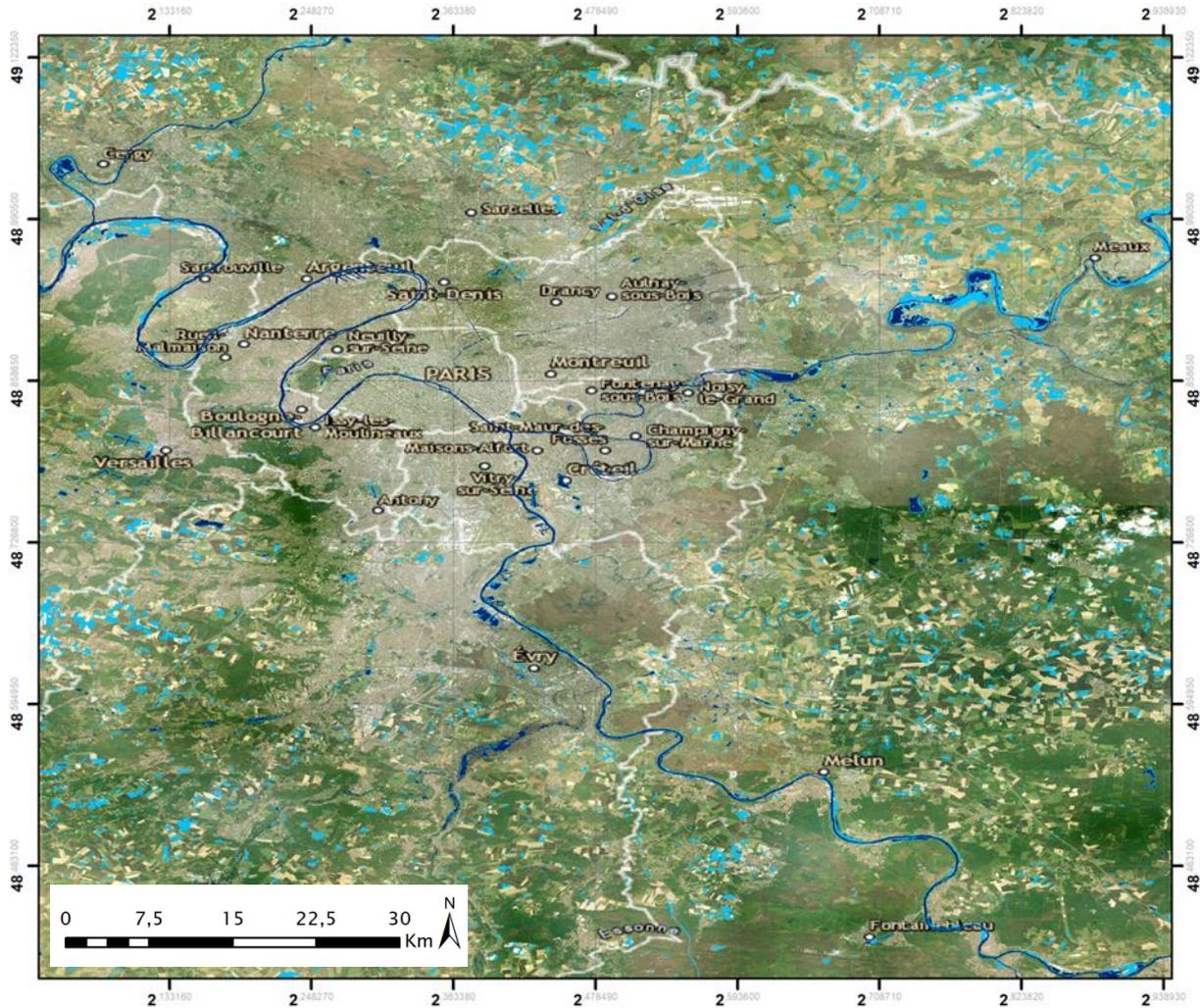


Illustration 45 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d'observation : avril 2015 - juillet 2018) pour le nord-ouest de la zone d'étude

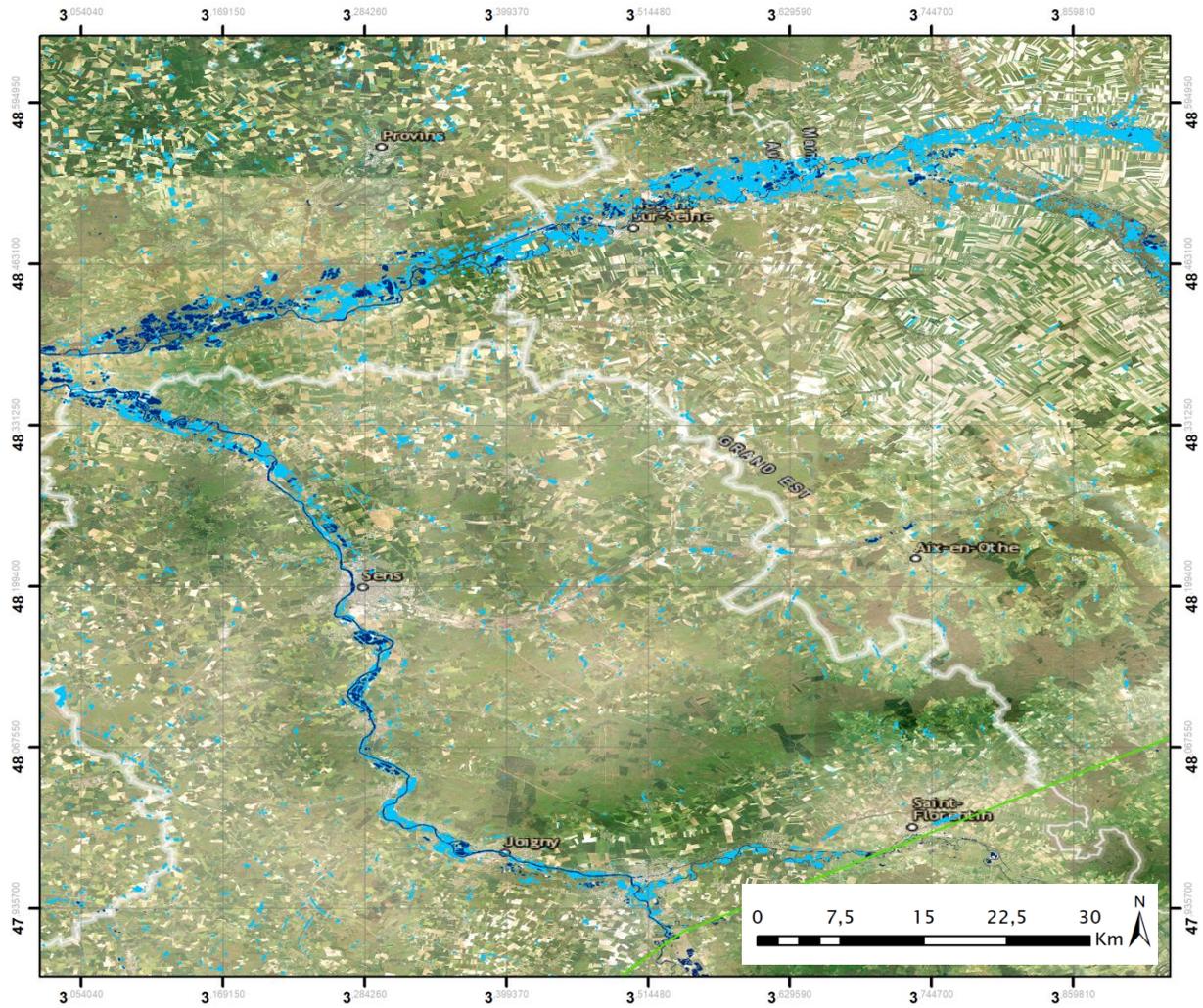


Illustration 46 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d'observation : avril 2015 - juillet 2018) pour le sud-est de la zone d'étude

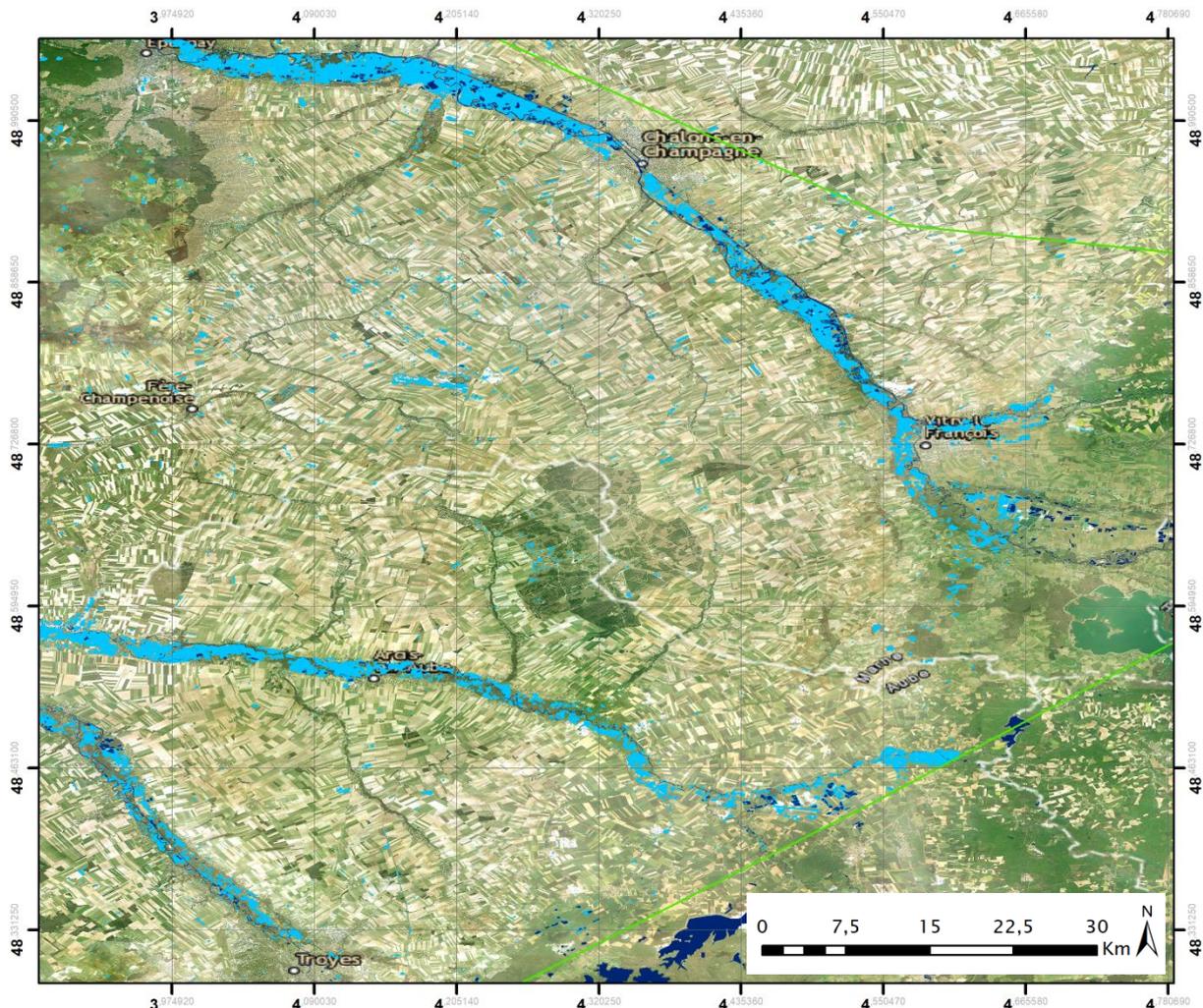


Illustration 47 – Délimitation des zones potentiellement inondées issue de la classification RVB (période d'observation : avril 2015 - juillet 2018) pour l'est de la zone d'étude

4.4.2. 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 trois cartes suivantes (Illustration 48). Elles spécifient les surfaces qui sont restées en eau plus de 12 jours consécutifs pendant toute la période 2015-2018, et lors de chaque crue de 2016 et 2018.

L'exemple traité du secteur de la confluence de la Seine et de l'Aube. Les résultats montrent que ce secteur a été particulièrement touché par les inondations de 2018 et de façon très secondaire par l'épisode de juin 2016.

Le croisement de la classification RVB Sentinel-1 et de l'analyse des séries temporelles améliore la précision de l'algorithme développé, car les surfaces inondées produites se trouvent dans les surfaces d'eau initialement détectées à partir de l'analyse de classification.

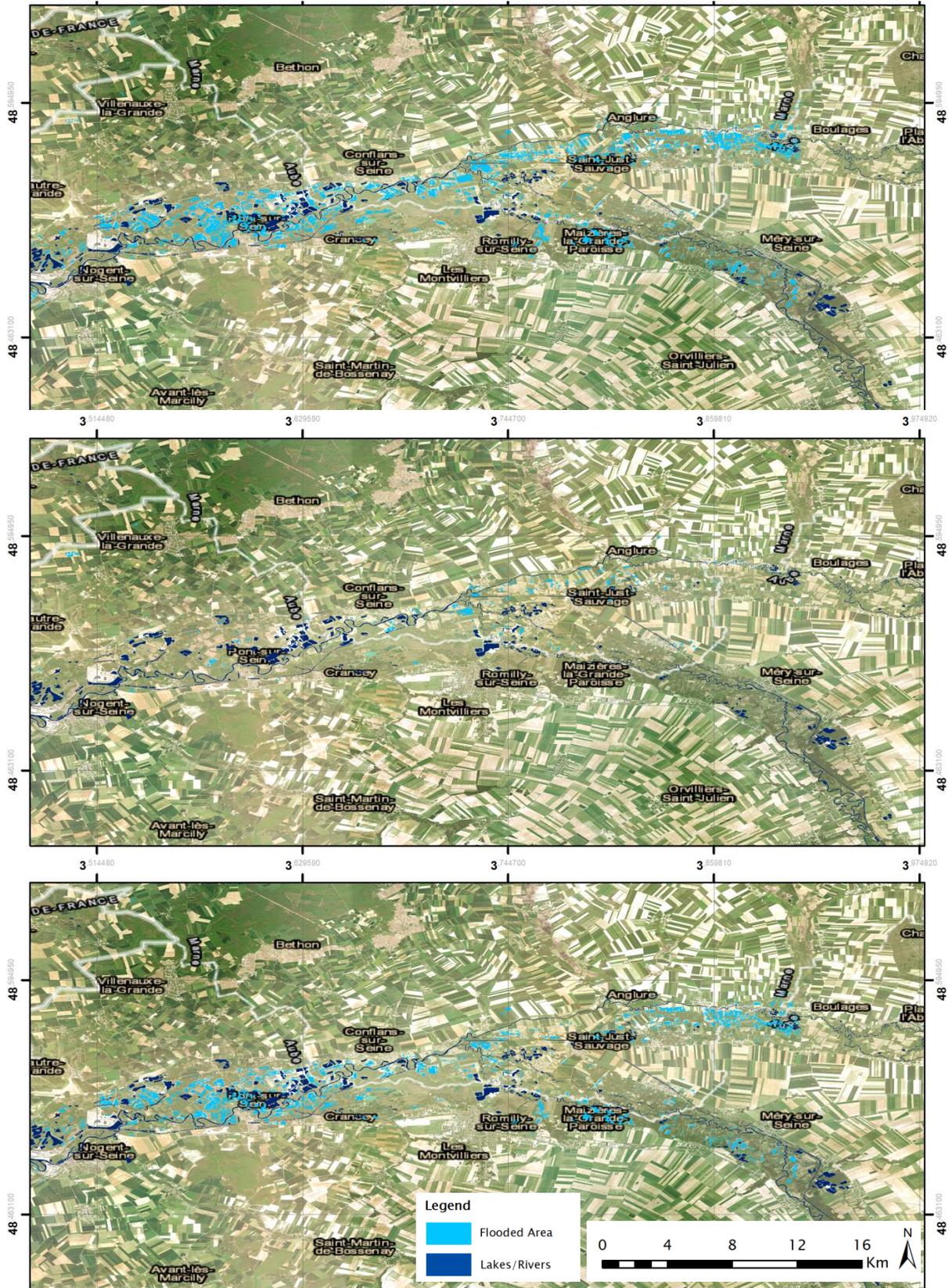


Illustration 48 – Exemple de délimitation des zones potentiellement inondées issue de l'analyse des séries temporelles de rétrodiffusion pour les périodes 2015-2018 (en haut), mai-juin 2016 (au milieu) et janvier-février 2018 (en bas)

4.4.3. Cartographie des inondations basées sur la détection optique

Pour finir, les résultats issus des données optiques Sentinel-2 sont présentés sur deux secteurs pour l'inondation de 2018 (Illustration 49). Ils reposent sur l'analyse optique de la seule image disponible (en date du 25/02/2018, post inondation).



Illustration 49 – Détection de l'eau (en bleu) avec un processus de seuillage simple (NDWI) issue de l'analyse de l'image Sentinel-2 (datée du 25/02/2018). Au sud de Paris (en haut) et au niveau de la confluence de la Seine et (en bas)

4.5. LIMITES ET PERSPECTIVES

4.5.1. Principales limites identifiées

- Fourniture d'informations concernant les eaux de surface, mais pas directement sur le mécanisme réel d'inondation. Il reste difficile de 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 (fréquente lors des inondations). Il en résulte un nombre limité d'images Sentinel-2 exploitables. De ce fait, les résultats SAR et optiques ne peuvent pas être directement comparés (périodes d'observation vs date unique).
- 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. Par exemple, dans le cadre d'une étude réalisée en Nouvelle Aquitaine, les résultats étaient biaisés par des cultures irriguées sur de très longues périodes.
- Besoins en ressources informatiques élevés pour traiter de grandes séries temporelles d'images satellites. Il est notamment rappelé que les algorithmes développés n'ont pu être lancés sur toute notre zone d'étude dans le cadre de ce projet. En effet, l'extension de la zone est considérablement plus grande que la limite de matrice de Matlab (deux sous-ensembles traités).

4.5.2. Perspectives

Tout d'abord, pour pallier aux contraintes d'utilisation de Matlab évoquées précédemment, la parallélisation du code de calcul pourrait être envisagée dans le futur afin de permettre la gestion d'ensembles de données plus grands.

A ce stade, les résultats issus du traitement des images satellites ne peuvent être directement utilisés comme donnée d'entrée du modèle géostatistique pour interpolation de la surface piézométrique de très hautes eaux mais peuvent apporter des éléments de validation très intéressants. Ce travail de validation / confrontation n'a pas pu être mené dans le cadre du projet, mais pourrait être envisagé sur des secteurs de plus grande échelle.

Enfin, différentes pistes d'amélioration pour le traitement des images satellites sont envisageables :

- 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 piézométriques 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.

- L'utilisation de systèmes SAR spatio-portés 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.

5. Conclusions

Pour la cartographie de la sensibilité aux inondations par remontée de nappe, le jeu de données d'entrée a tout d'abord été enrichi. On peut notamment souligner l'intégration d'inondations répertoriées lors des épisodes récents de 2016 et 2018, de chroniques piézométriques de longue durée non présentes dans ADES ou dans la BSS-EAU ou encore, de façon ciblée, sur la nappe des calcaires de Brie, la prise en compte de résultats de simulations issus du modèle hydrodynamique développé par Mines ParisTech et mis à disposition par l'association AQUI'BRIE.

Concernant les données d'entrée, suite à un échange avec les SPC SAMA et SMYL, il a été décidé de ne contraindre l'interpolation qu'à partir du tracé des cours d'eau issu de la BDCarthage© et de ne plus s'appuyer sur les EAIpce, souvent maximisantes.

Dans un second temps, l'estimation du niveau maximum probable des nappes a été consolidée :

- Les niveaux ont été rapportés à la valeur du MNT25 de la maille associée au point de mesure. L'objectif était de conserver l'information sur la profondeur de la nappe.
- Une analyse probabiliste plus approfondie a été mise en œuvre avec l'ajustement de différentes lois de probabilité pour les chroniques piézométriques de longue durée (> 10 ans) : lois Normale, Log normale, Gamma, Gumbel et GEV. En complément, le calcul selon l'approximation de la loi Normale utilisée pour l'étude nationale a également été réalisé.
- Pour les chroniques de courte durée (entre 1 et 10 années), le calcul du niveau maximum probable s'est appuyé sur la méthodologie développée par le BRGM pour la nappe d'Alsace (Bessière, 2019). L'objectif était de fiabiliser une approche qui avait pu apparaître localement trop pessimiste dans la méthode nationale.

La densité des données d'entrée ainsi obtenue a permis de mener l'interpolation à la maille de 100 m (contre 250 m pour l'étude nationale). Les travaux d'interpolation ont été réalisés avec le logiciel GDM du BRGM. Après plusieurs tests, une méthode krigeage ordinaire a finalement été retenue avec l'intégration d'un maximum de points de contrainte. Seuls les relevés piézométriques ponctuels indiquant une profondeur d'eau inférieure à 5 m ont été utilisés en phase de validation.

Au regard des incertitudes, et après différentes configurations testées, une classification légèrement différente de celle de la cartographie nationale a été proposée :

- « zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe » : lorsque la différence entre la cote altimétrique du MNT moyenné et la cote Z_{max_prob} interpolée est négative ou inférieure à 1 m (contre < 0 m pour la carte nationale) ;
- « zones potentiellement sujettes aux inondations de cave » : lorsque la différence est comprise entre 1 et 5 m (contre 0-5 m pour la carte nationale) ;
- « pas de débordement de nappe ni d'inondation de cave » : lorsque la différence est supérieure à 5 m (identique pour la carte nationale).

A l'échelle des bassins de la Seine Amont et Moyenne, des améliorations significatives ont été obtenues sur les principaux secteurs où l'approche nationale avait pu être mise en défaut : nappe des calcaires de Brie à l'affleurement, versants crayeux en Champagne, zones humides en Beauce et meilleure continuité d'une sensibilité élevée aux remontées de nappe en fond de vallées. Pour le reste, les résultats apparaissent très cohérents.

La carte de sensibilité produite est accompagnée d'une carte de l'écart-type de krigeage dans le but d'appréhender l'erreur d'estimation. Celle-ci peut localement être importante dans les secteurs dépourvus d'information : nord du département de l'Yonne (89), Seine-Saint-Denis (93), extrémité sud de la Seine et Marne (77), moitié nord de l'Aube (10) et extrémité sud de l'Oise (60) pour les principaux.

A cette échelle, il apparaît difficile de réduire les incertitudes ; l'exercice consistant à réaliser des traitements automatisés et géostatistiques atteint donc ici ses limites. Seules des validations terrain (reconnaitances, enquêtes, etc.) et une confrontation à des études ciblées, aux connaissances des acteurs de terrain pourraient permettre de consolider la cartographie à une échelle plus locale. Il ne semble pas possible d'exploiter la carte à une échelle supérieure au 1 / 100 000.

En parallèle de ce travail de cartographie, une approche complémentaire par le traitement d'images satellites a été conduite à partir des données de la mission Copernicus Sentinel.

Afin de parvenir à discriminer les surfaces inondées par les débordements de cours d'eau de celles potentiellement inondées par des remontées de nappe, des algorithmes ont spécifiquement été développés par le BRGM sous Matlab™ (analyse statistique de séries temporelles centrées sur les crues de 2016 et 2018). Les temps de calcul associés étant très importants, les traitements n'ont pu être menés sur l'ensemble des bassins de la Seine amont et moyenne ; seuls deux sous-secteurs ont été étudiés : un premier centré sur la confluence entre l'Aube et la Seine et un second centré sur la Seine entre ses confluences avec la Marne et l'Essonne.

A ce stade, les résultats issus du traitement des images satellites ne peuvent être directement utilisés comme donnée d'entrée du modèle géostatistique pour interpolation de la surface piézométrique de très hautes eaux mais peuvent apporter des éléments de validation très intéressants. Ce travail de validation / confrontation n'a pas pu être mené dans le cadre du projet, mais il pourrait être envisagé sur des secteurs de plus grande échelle.

6. Bibliographie

Allier D., Manceau J.-C., Buscarlet E., Klinka T., Marly X. (2019) – Sécheresse hydrogéologique : mise en place d'indicateurs piézométriques adaptés à la dynamique des eaux souterraines. Colloque international « Sécheresses, étiages et déficits en eau ». Paris 11-13 décembre 2019.

Bault V., Bourguine B., Loiselet C., Anquetil E. (2015) – Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'yprésien supérieur dans le Bassin parisien. Rapport BRGM/RP-64887-FR.

Bellier S. (2013) – Modélisation de la contamination nitrique de la nappe des calcaires de Champigny. Application à la protection des captages prioritaires de la fosse de Melun et de la basse vallée de l'Yerres. Thèse de doctorat, MINES ParisTech, 325 p.

Bellier S. (2015) – Nappe du Champigny : Amélioration du modèle – Etude et travaux complémentaires à la thèse de S. Bellier sur la nappe du Champigny. Rapport Armines R150901SBEL, 63 p.

Bessière H. (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 BRGM/RP-68600-FR.

Bourguine B. (2018) – Outils (géo)statistiques. Manuel de référence. Rapport BRGM/RC-67358-FR.

Coquelet L., Bellier S. (2019) – Etat des connaissances sur la nappe des calcaires de Brie : bilan des suivis quantitatifs, édition 2019. Rapport AQUI'Brie.

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

Gao B.-C. (1994) – NDWI - A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing Environment* 58:257-266.

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, MG. (1975) – Rank correlation methods. London:Griffin.

Lepiller M. (2003) – Carte piézométrique de la nappe de la craie à l'est du Loing. Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Orléans.

Mann, HB. (1945) – Nonparametric tests against trend. *Econometrica*; 13:245-259.

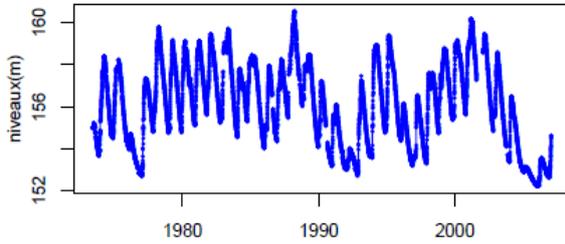
- MEDDE, GIS Sol** (2014) – Enveloppe des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, 50 pages.
- Megnien C., Rampon G., Turland M.** (1967) – Etude de la nappe du calcaire de Champigny en Brie. Rapport BRGM DSGR.67.A76.
- Megnien C.** (1979) – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris, contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Thèse Université Paris VI. Mémoires du BRGM n° 98. 532 p.
- Mercier R.** (1981) – Inventaire des ressources aquifères et vulnérabilité des nappes du département des Yvelines. Rapport BRGM n° 81SGN348IDF.
- Pettitt, AN.** (1979) – A non-parametric approach to the change-point detection. Applied Statistics 28: 126–135.
- Rouxel-David E.** (2002) – Cartographie de la piézométrie de la nappe de la craie en Champagne-Ardenne. Rapport BRGM/RP-52332-FR.
- Verley F., Brunson F., Verjus P., Cholez M.** (2003) – Nappe de Beauce. Piézométrie hautes eaux 2002.
- Vernoux J.-F., Barbier J., Donsimoni M., Seguin J.-J., Vairon J.** (1999) – Etude hydrogéologique du plateau de Saclay (Essonne). Rapport BRGM SGR/IDF R 40840.
- 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.

Annexe 1

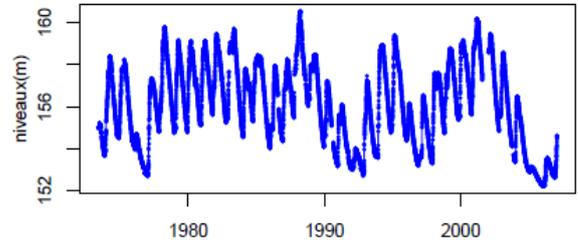
Exemple des sorties générées (script R) pour un premier contrôle des chroniques piézométriques

Analyse automatique des chroniques à l'ouvrage n° 02226X0019/S1

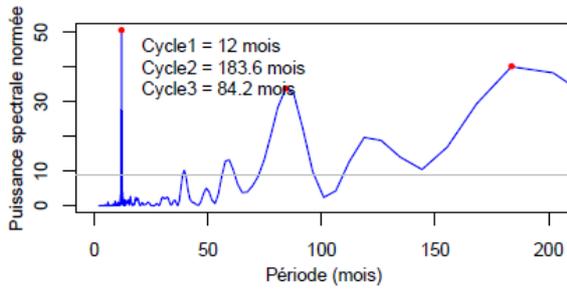
Chronique initiale



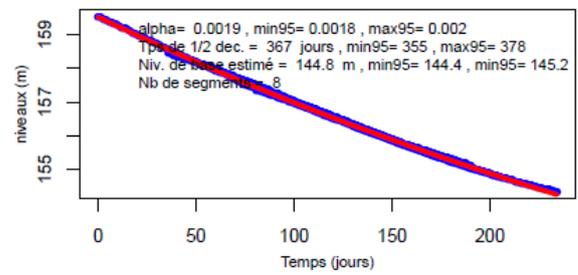
Chronique prise en compte



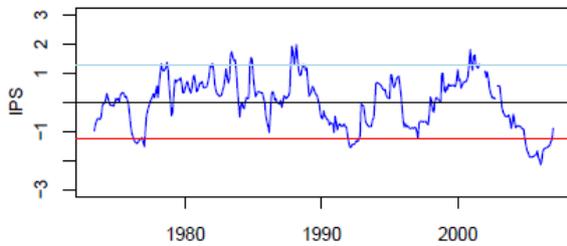
Périodogramme



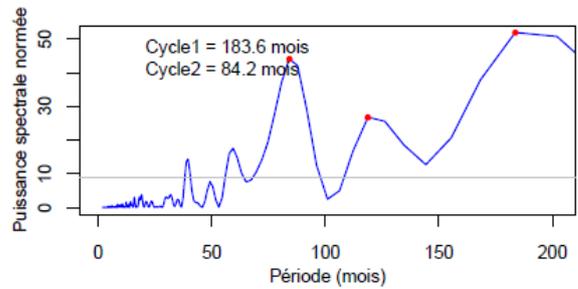
Courbe de décharge



Variation du IPS1

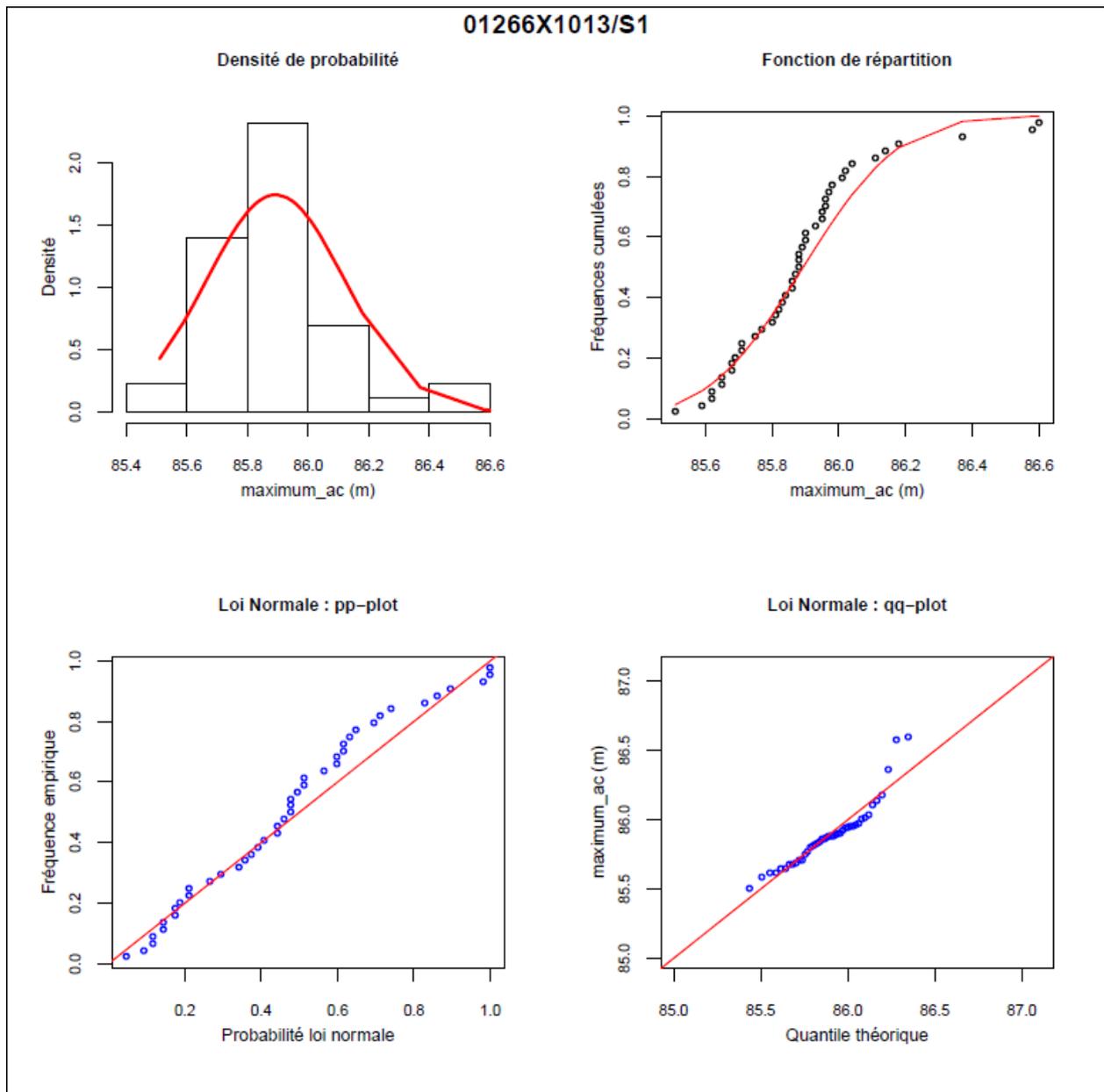


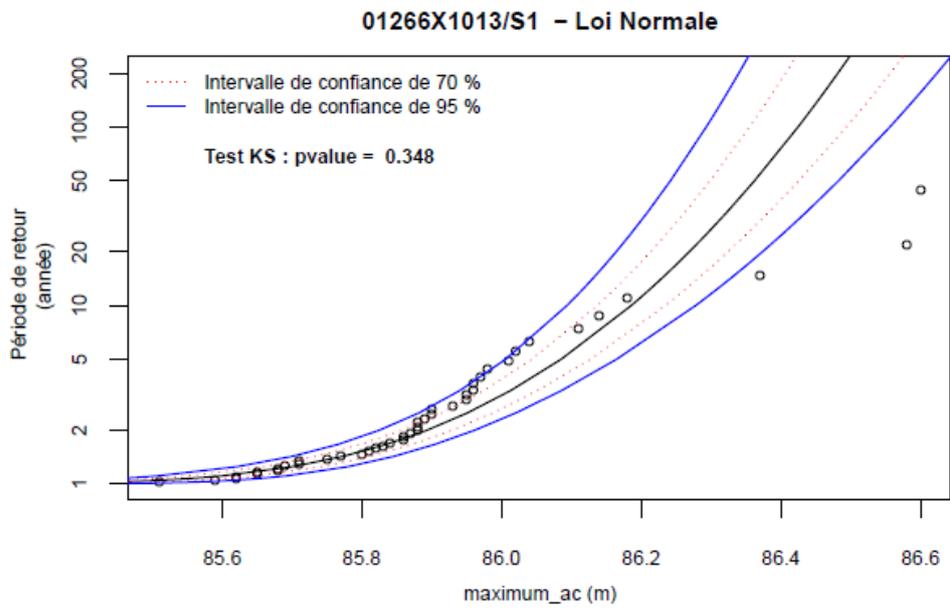
Périodogramme



Annexe 2

Exemple des sorties générées (script R) pour les ajustements de lois de probabilité (chronique piézométrique de longue durée 01266X1013)





Périodes de retour et quantiles correspondant

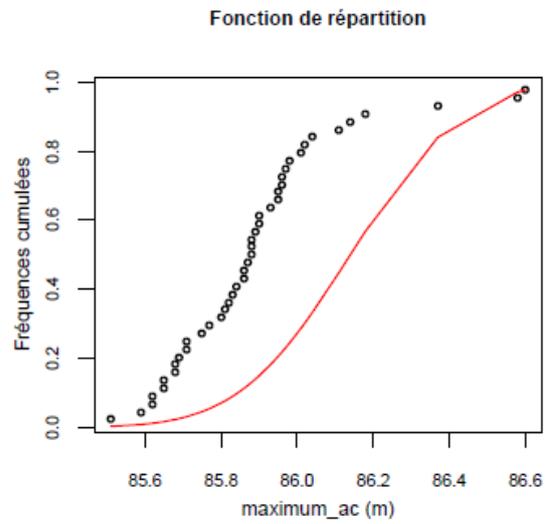
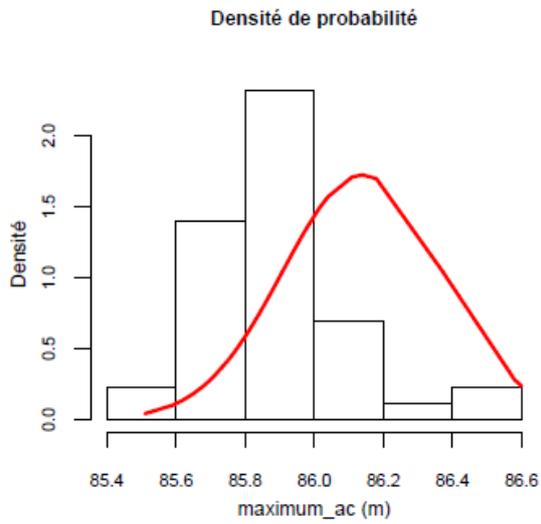
20 ans humide : 86.27

50 ans humide : 86.36

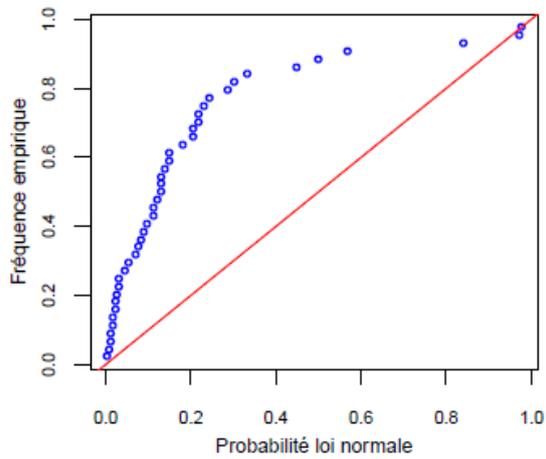
100 ans humide : 86.42

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

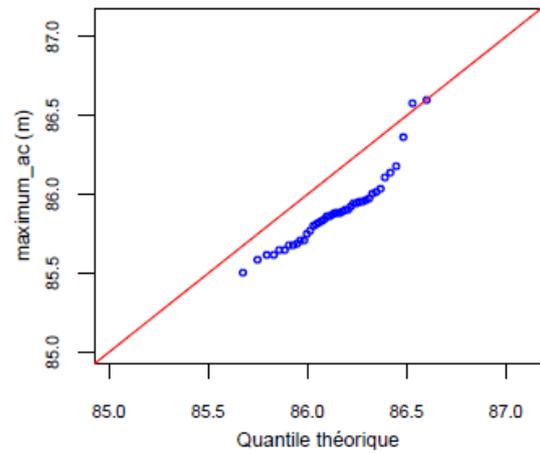
01266X1013/S1

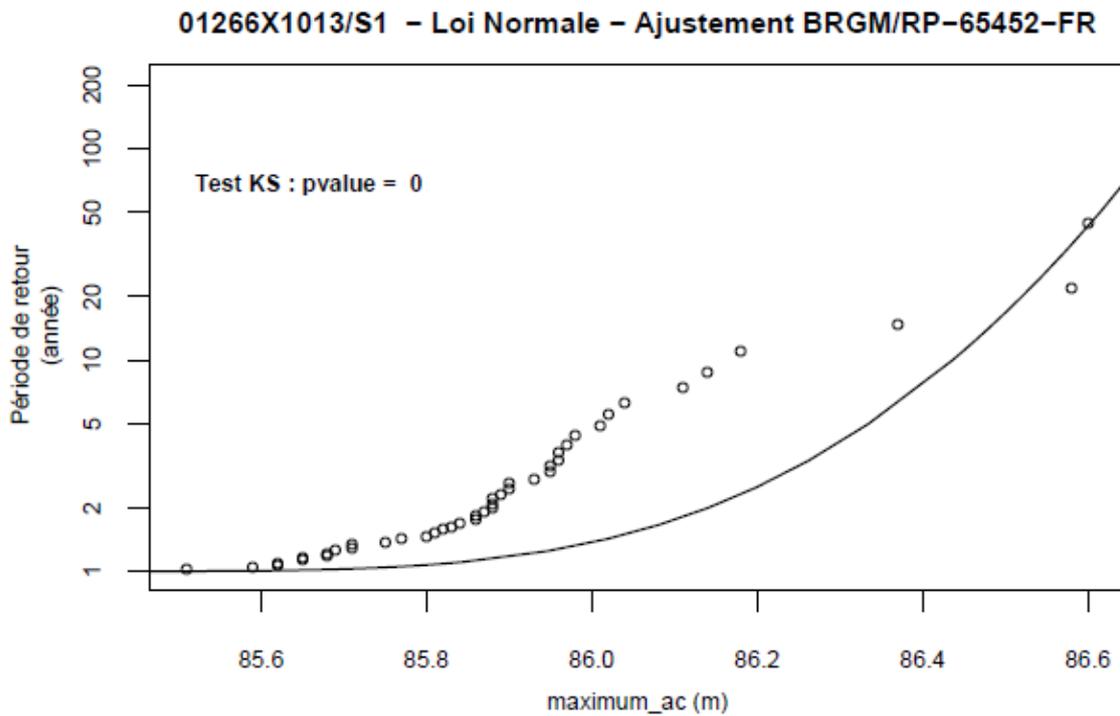


Loi Normale – Ajustement BRGM/RP-65452-FR : pp-plot



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

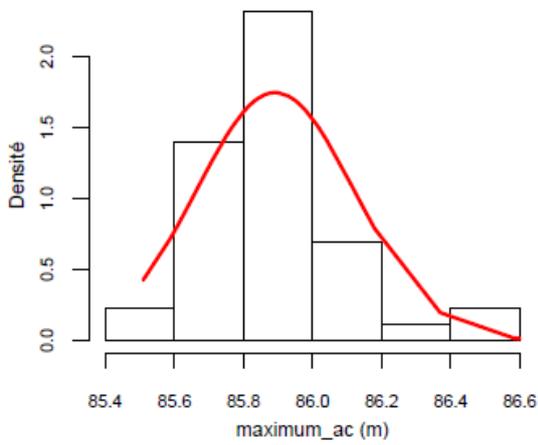
100 ans humide : 86.68

100 ans humide (formule analytique) : 86.68

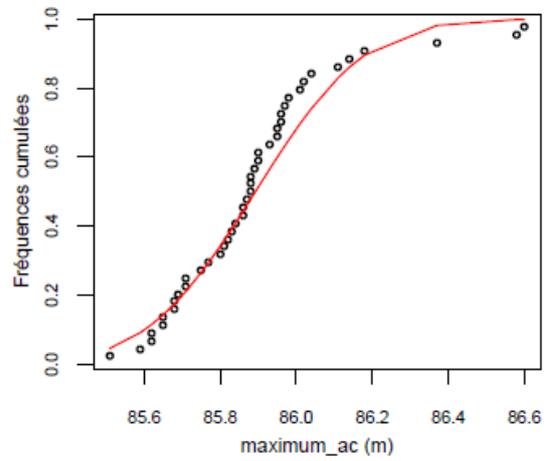
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

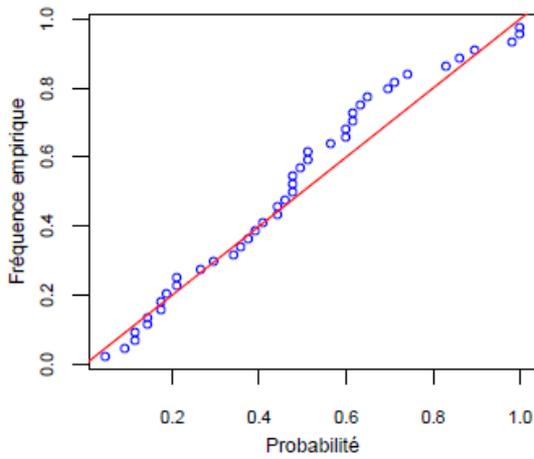
Densité de probabilité loi Log-normale



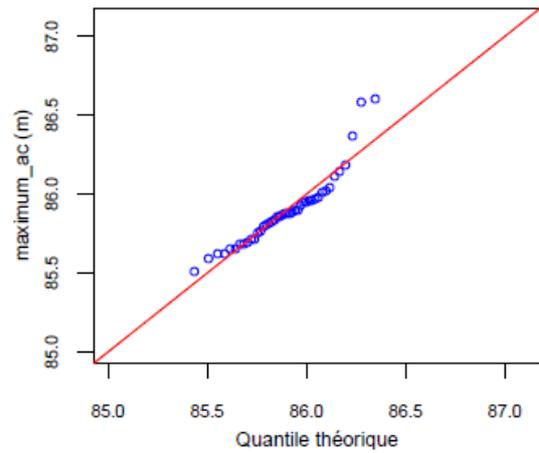
Fonction de répartition loi Log-normale

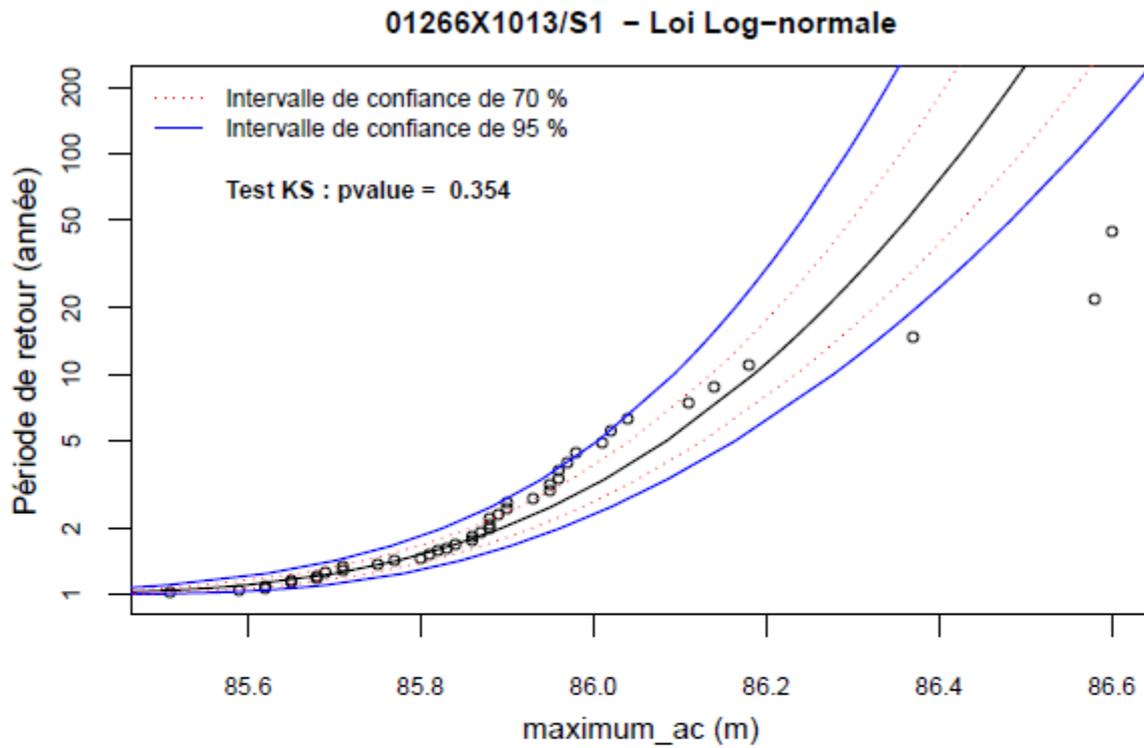


Loi Log-normale : pp-plot



Loi Log-normale : qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.27

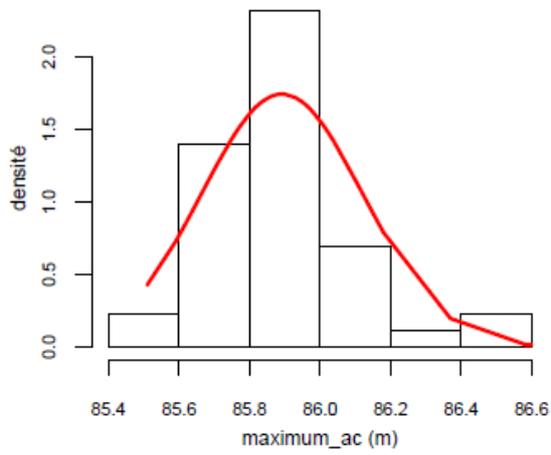
50 ans humide : 86.36

100 ans humide : 86.42

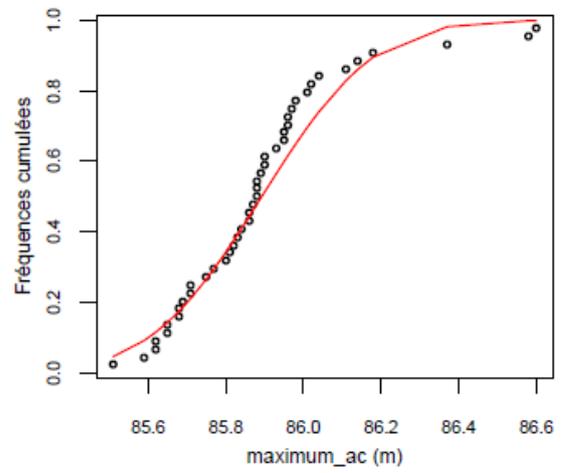
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

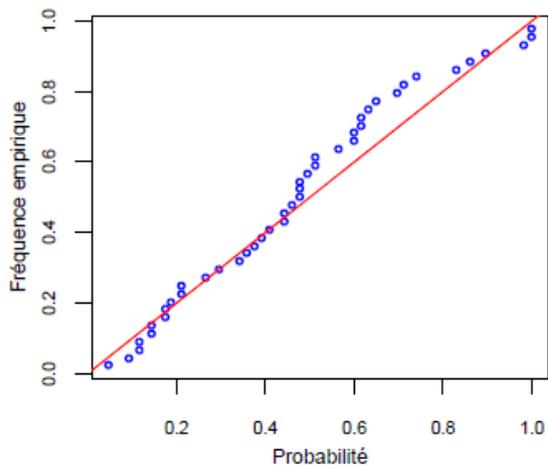
Densité de probabilité loi Gamma



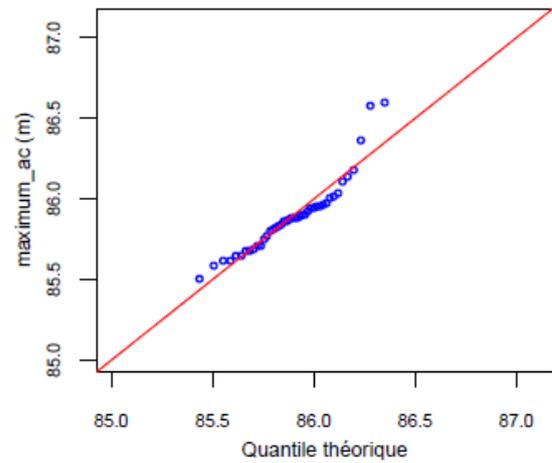
Fonction de répartition loi Gamma

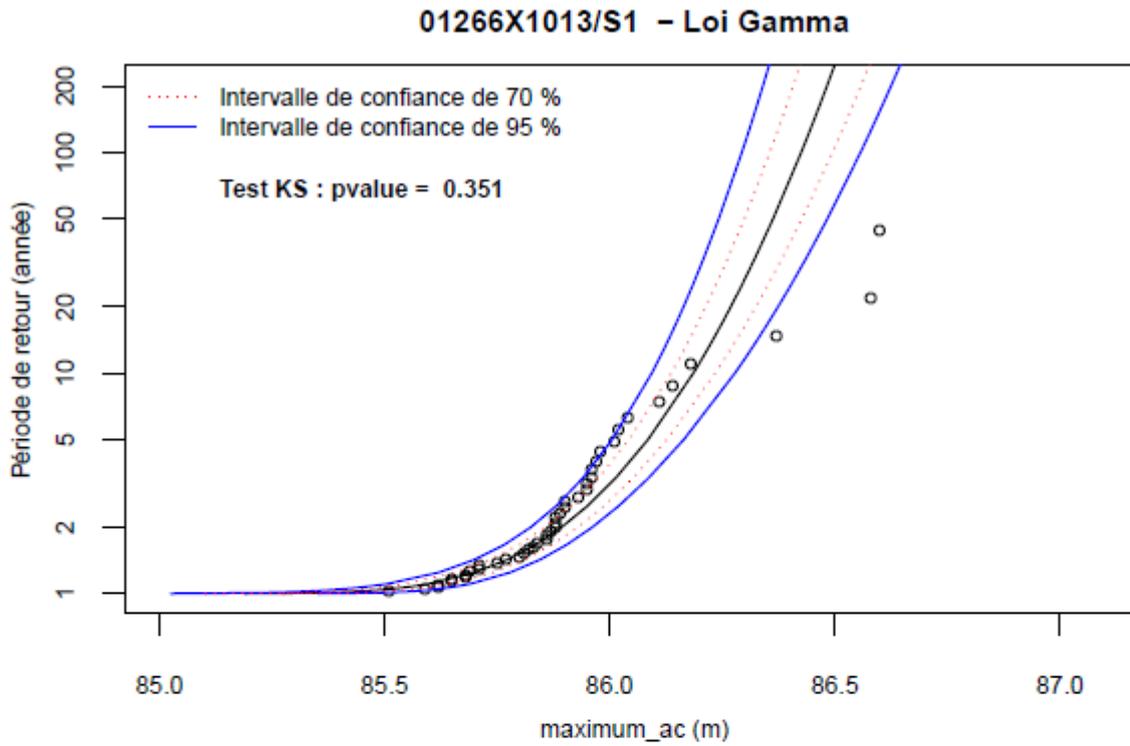


Loi Gamma: pp-plot



Loi Gamma: qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.27

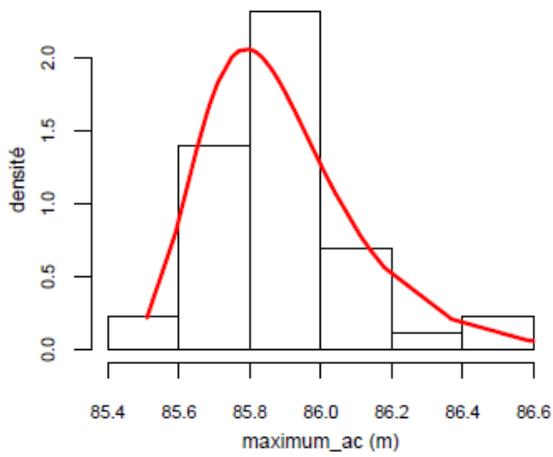
50 ans humide : 86.36

100 ans humide : 86.43

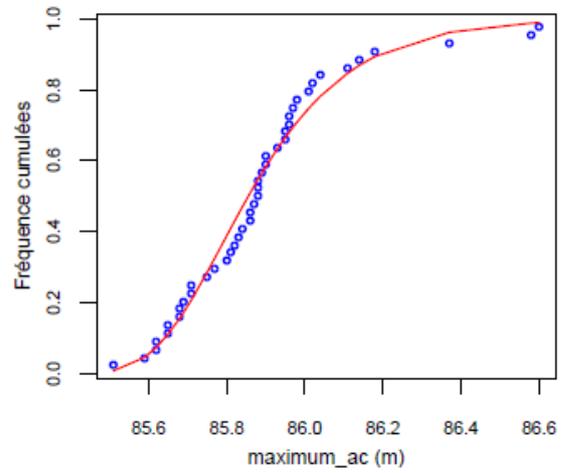
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

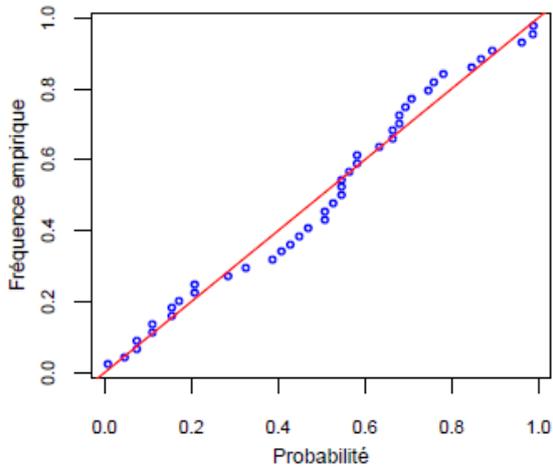
Densité de probabilité loi de Gumbel



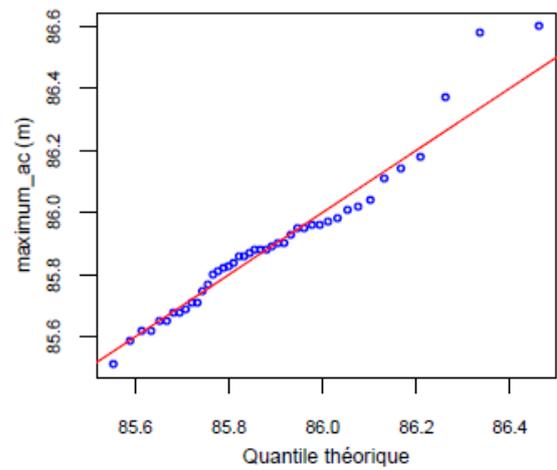
Fonction de répartition loi de Gumbel

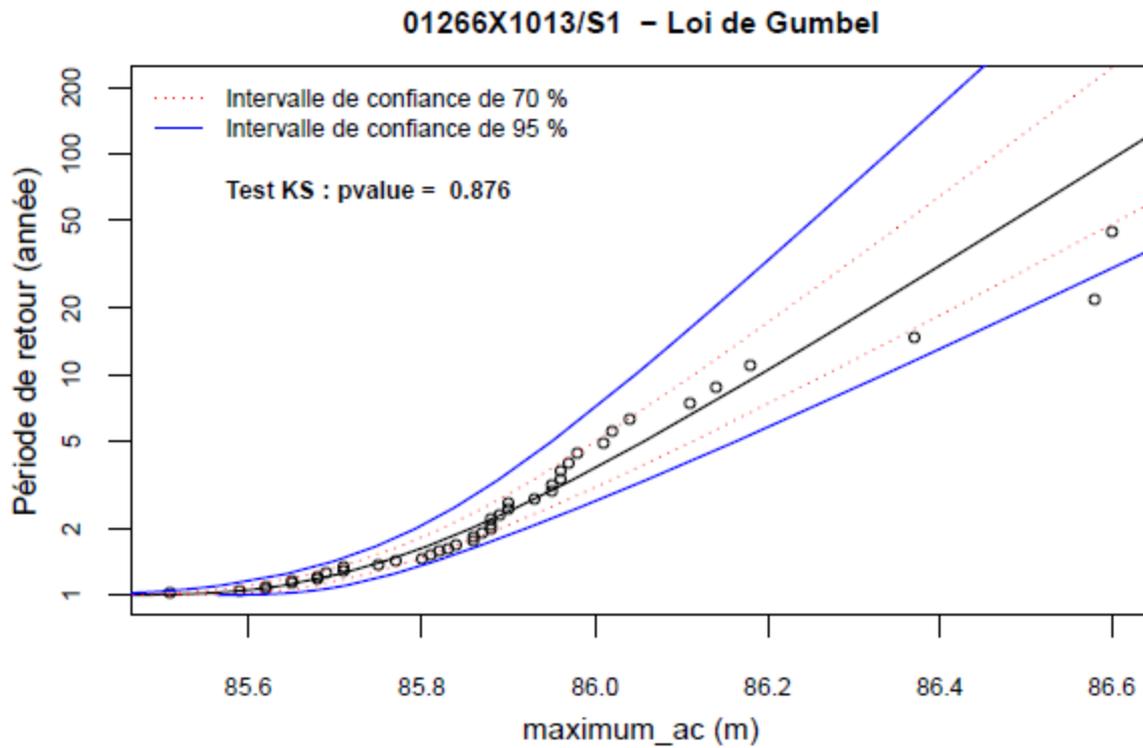


Loi de Gumbel : pp-plot



Loi de Gumbel : qq-plot





Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans humide : 86.32

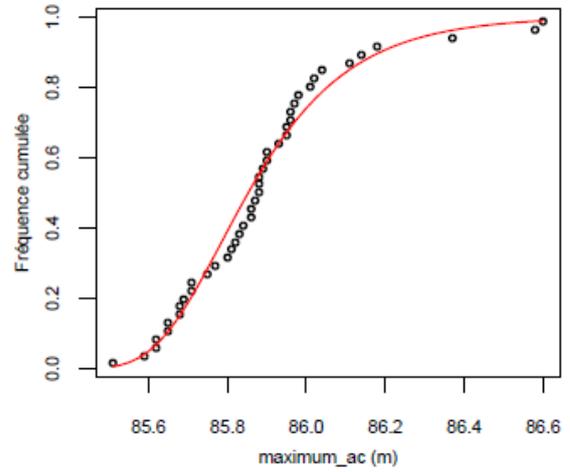
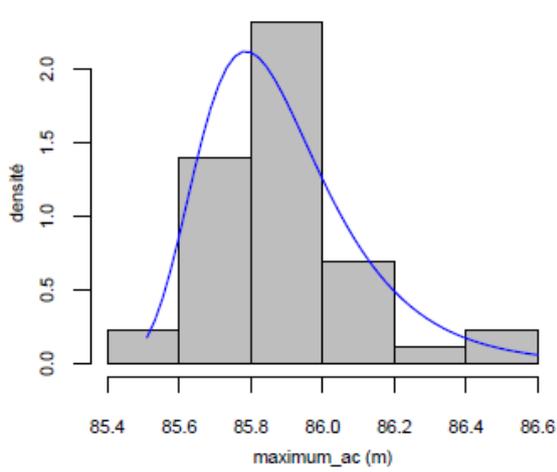
50 ans humide : 86.49

100 ans humide : 86.61

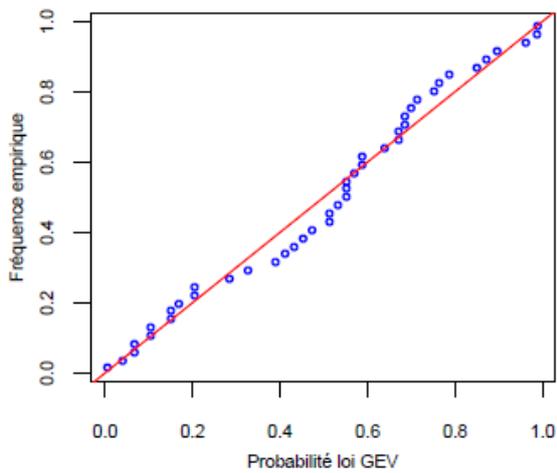
En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

01266X1013/S1

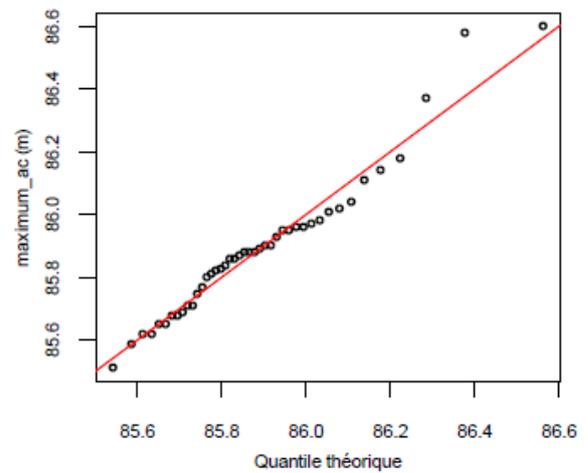
DCF empirique et GEV



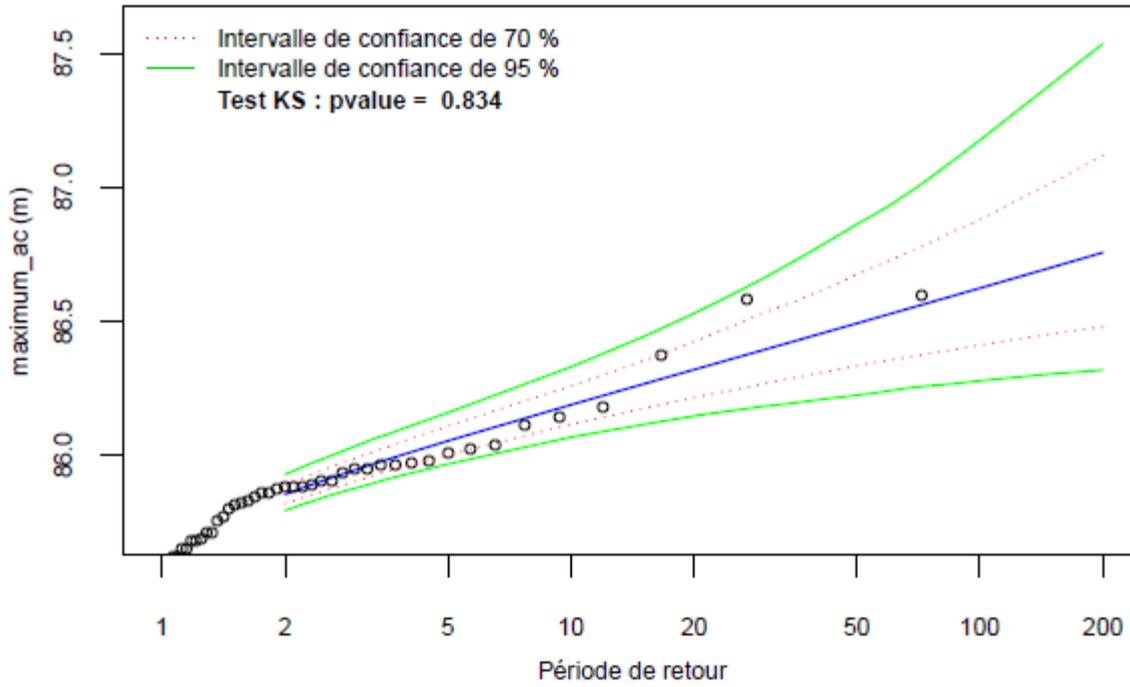
Loi GEV : pp-plot



Loi GEV : qq plot

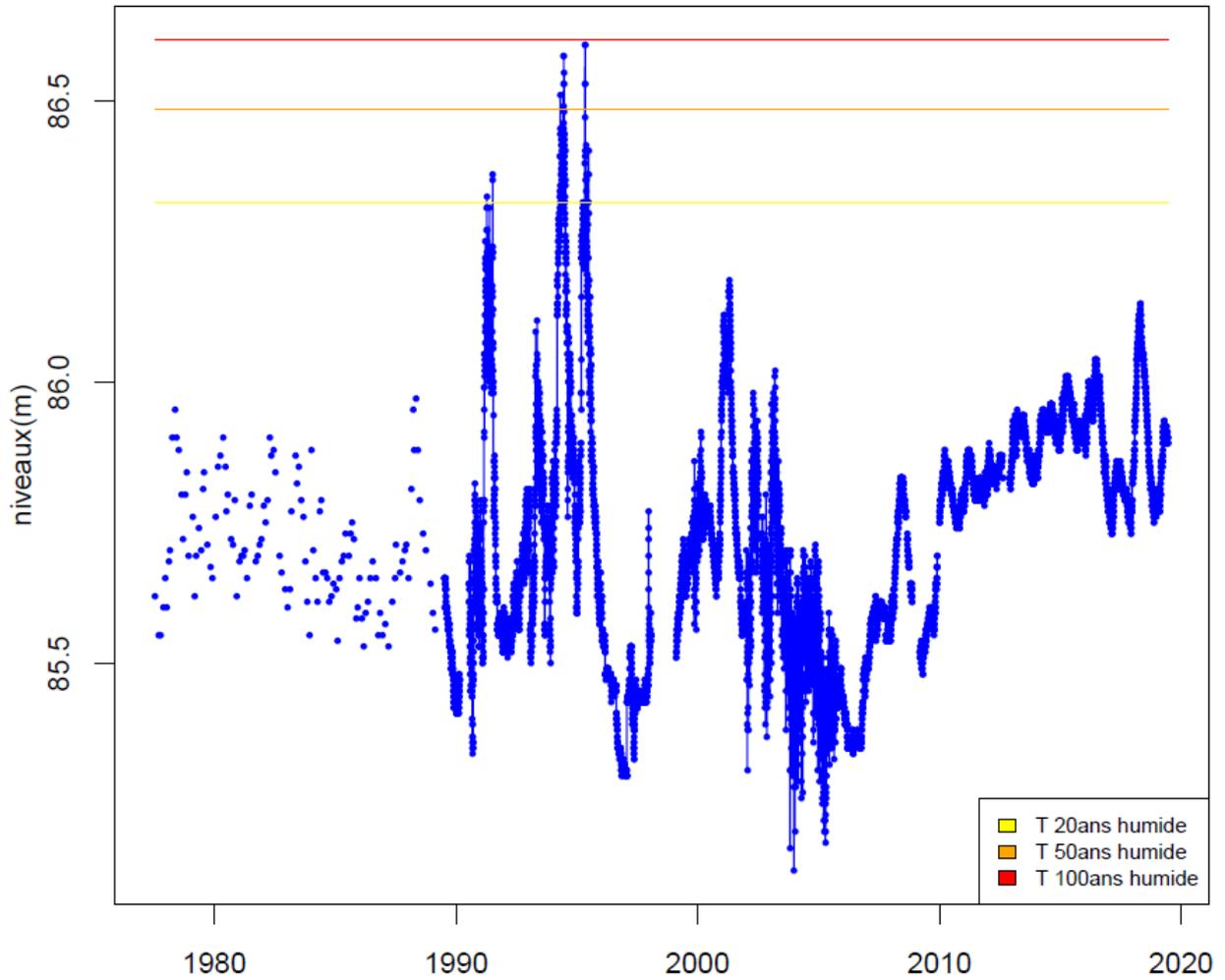


01266X1013/S1 – Loi GEV



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

01266X1013/S1





Siège - 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