



Mise en place d'une méthodologie de cartographie de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale – Application à la nappe d'Alsace au Sud de Strasbourg

Rapport final

BRGM/RP-68600-FR
Mars 2019

Mise en place d'une méthodologie de cartographie de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale – Application à la nappe d'Alsace au Sud de Strasbourg

Rapport final

BRGM/RP-68600-FR

Mars 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2018

H. Bessière

Avec la collaboration de

L. Tillier, B. Bourgine, A. Brugeron, M. Foumelis

Vérificateur :

Nom : D. Allier

Fonction : Hydrogéologue

Date : 22/03/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Laurence Gourcy

Fonction : Responsable unité EVE

Date : 02/04/2019

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Cartographie de sensibilité aux remontées de nappe, nappe d'Alsace, analyse géostatistique, imagerie satellitale

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

Bessière H., Tiller T., Bourgine B., Brugeron A, Foumelis M. (2019) – Mise en place d'une méthodologie de cartographie de risque d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale – Application à la nappe d'Alsace au Sud de Strasbourg. Rapport final. BRGM/RP-68600-FR, 86 p., 41 fig., 9 tabl.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans la continuité des actions 2016 et 2017 réalisées à l'échelle nationale, il est proposé de développer une méthodologie de cartographie d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale et de réaliser une carte test sur un site pilote préalablement choisi.

Afin de sélectionner la zone d'étude, une analyse croisée de différents critères comme la quantité de données disponibles, la qualité du MNT, la couverture karstique et imperméable, la présence de zones urbaines etc. a été réalisée. Après consultation des DREAL, DDT et Agences de l'eau, le choix s'est porté sur la nappe de l'Alsace au sud de Strasbourg. Ce secteur a déjà connu plusieurs épisodes d'inondation et représente un pôle économique d'intérêt de par le développement industriel et la proximité du Rhin. La nappe d'Alsace se compose d'alluvions quaternaires dont l'épaisseur atteint plus de 100 mètres par endroits. Il s'agit de l'une des plus importantes ressources en eau souterraine d'Europe.

Un travail d'analyse du contexte hydrogéologique et de collecte des données piézométriques, à partir des bases de données nationale ADES et BSS Eau a été fait. Dans l'optique d'apporter des données complémentaires pour la réalisation de la carte et sa validation, une enquête a été menée auprès des collectivités et des riverains ; elle a également été diffusée auprès de la DREAL et des DDT. Après dépouillement des réponses à l'enquête, une campagne de nivellement des secteurs inondés a été lancée. En complément de ce recensement des données, une analyse comparative des MNT au pas de 5 m et de 25 m a été réalisée. Les MNT 5 m et 25 m sont relativement comparables en terme de précision. L'avantage du MNT 5 m réside surtout dans sa résolution spatiale.

La méthodologie pour la réalisation de la carte s'inspire de celle utilisée pour la carte nationale. Les principales modifications et améliorations ont porté sur :

- un travail de sélection plus approfondi des données piézométrique qualifiées comme « fiables » et « peu fiables » ;
- une méthode d'évaluation moins pessimiste de la cote piézométrique maximale de période de retour 100 ans pour les points d'eau qualifiés « peu fiables » que pour la méthode nationale ;
- un modèle de variogramme plus complexe pour l'interpolation des cotes piézométriques maximales.

L'analyse géostatistique a permis d'estimer les incertitudes des résultats liés à l'interpolation, donnant ainsi un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote piézométrique maximale de période de retour 100 ans ($Z_{maxT100}$). Les écart-types d'interpolation obtenus sont en moyenne de 1,35 m sur la zone d'étude (où ils varient de 0,5 à 4 m). La qualité de l'interpolation est donc, dans le cas de la zone d'étude, du même ordre de grandeur que celle du MNT. L'analyse géostatistique a également confirmé que le fait de compléter les piézomètres « fiables » par les piézomètres jugés « peu fiables » permet de réduire les écart-types d'interpolation.

Il a été proposé une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe avec quatre classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux (période de retour 100 ans) :

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

Cette classification paraît pertinente à l'échelle locale. L'échelle maximale d'utilisation préconisée pour cette carte au sein de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg est le 1/25 000.

La carte de sensibilité aux remontées de nappe réalisée a pu être validée par l'utilisation de différents types de données et de résultats :

- La carte ZmaxT100 interpolée montre le même style de variations que les isopièzes issues de la carte hautes eaux 2012 de l'APRONA, quelques différences locales mises à part. La comparaison des 2 cartes montre que la cote piézométrique ZmaxT100 est supérieure à la cote piézométrique hautes eaux 2012 de plus de 1 m.
- La comparaison avec les données collectées sur le terrain a démontré que la cote ZmaxT100 calculée semble correcte dans la majorité des cas. Il existe toutefois quelques points pour lesquels le calcul n'est pas satisfaisant. Ceci peut peut-être s'expliquer par des perturbations locales de l'écoulement (contexte urbain).
- L'utilisation des données radar à synthèse d'ouverture par satellite pour la cartographie des inondations provoquées par les eaux souterraines fournit des résultats intéressants. La plupart des secteurs ciblés en « zones très sensibles » se retrouvent à l'intérieur des polygones délimités par traitement de l'imagerie satellitaire. Certains polygones couvrent une superficie plus importante que les zones en rouge mais cela est probablement dû au fait que l'imagerie satellitaire ne permet pas de discriminer l'origine des inondations (remontées de nappe ou débordements de cours d'eau ou autre).

Sommaire

1	Contexte et déroulement de l'étude	11
1.1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	11
1.2.	METHODOLOGIE DEVELOPPEE POUR REALISER UNE CARTOGRAPHIE A L'ECHELLE LOCALE	11
2.	Choix de la zone d'étude.....	15
2.1.	CRITERES DE SELECTION DU SITE	15
2.2.	CROISEMENT D'INDICATEURS ET CALCUL D'UN SCORE GLOBAL	15
2.3.	SECTEUR RETENU	23
3.	Contexte hydrogéologique du secteur retenu.....	25
3.1.	CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR.....	25
3.2.	HYDRODYNAMISME ET PROPRIETES INTRINSEQUES.....	27
3.3.	ENTITE BDLISA CONCERNEE	28
4.	Collecte des données.....	31
4.1.	EXTRACTION DES DONNEES	31
4.2.	TRAITEMENT DES DONNEES ET DES ANOMALIES	31
4.2.1.	Classement par fiabilité et correction	31
4.2.2.	Optimisation des données : utilisation d'outils statistiques	32
4.3.	ESTIMATION DE LA COTE PIEZOMETRIQUE MAXIMALE T100.....	36
4.3.1.	Points d'eau à fiabilité moyenne à forte.....	36
4.3.2.	Points d'eau à fiabilité faible.....	36
4.3.3.	Comparaison de ces associations avec la sectorisation de la nappe d'Alsace réalisé par Urban <i>et al.</i> (2010)	38
4.3.4.	Calcul du « ZmaxT100V2 » pour les points peu fiables.....	41
5.	Campagne et enquête de terrain	43
6.	Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale	47
6.1.	CHOIX DE L'EVENEMENT A TRAITER	47
6.2.	CONSTRAINTES	47
6.3.	RESULTATS DU TRAITEMENT DE L'IMAGERIE SATELLITALE	47

7. Analyse comparative des modèles numériques de terrain	51
7.1. OBJECTIF	51
7.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE DU MNT	51
7.2.1. MNT testés	51
7.2.2. Points nivelés	51
7.3. RESULTATS	53
7.3.1. Comparaison des MNT 5m et 25m entre eux	53
7.3.2. Comparaison des MNT 5m et 25m aux points nivelés	56
8. Analyse géostatistique et test d'utilisation des méthodes géostatistiques	59
8.1. OBJECTIF	59
8.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE	59
8.3. ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES POINTS « FIABLES »	62
8.4. COMPARAISON DES PIEZOMETRES « FIABLES » ET « PEU FIABLES »... ..	66
8.5. INTERPOLATION AVEC LES DEUX JEUX DE DONNEES ET COMPARAISON.....	68
8.6. CONCLUSIONS DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE	72
9. Production d'une carte test au droit de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg	73
10. Validation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe.....	76
10.1. VALIDATION PAR COMPARAISON AUX OBSERVATIONS DE TERRAIN ..	76
10.2. VALIDATION PAR COMPARAISON AVEC LA CARTE PIEZOMETRIQUE HAUTES EAUX DE 2012	76
10.3. VALIDATION PAR L'IMAGERIE SATELLITALE	79
11. Conclusion	83
12. Bibliographie	85

Liste des figures

Figure 1 Carte de fiabilité globale pour la méthode employée à l'échelle nationale	12
Figure 2 Zone pilote potentielle au sud de l'Alsace.....	17
Figure 3 Zone pilote potentielle à l'ouest de l'Aquitaine.....	18
Figure 4 Zone pilote potentielle à l'est du bassin d'Arcachon.....	19
Figure 5 Zone pilote potentielle en région Centre.....	20
Figure 6 Zone pilote potentielle au Nord-Pas-de Calais.....	21
Figure 7 Zone pilote potentielle en Normandie.....	22
Figure 8 Zone d'étude retenue : nappe d'Alsace au sud de Strasbourg.....	24
Figure 9 Epaisseur de la nappe d'Alsace en moyenne eaux (Risler et al., 2006).....	26
Figure 10 Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (Flèches rouges = direction d'écoulement souterrain) & carte krigée de l'écart-type des variations piézométriques, assimilable au battement (Schomburgk et al., 2005).....	27
Figure 11 Entités hydrogéologique BDLISA de niveau 3 présentes à l'affleurement dans la zone d'étude.....	29
Figure 12 Coupe schématique du bloc Sud du fossé Rhénan (Urban et al., 2013).....	30
Figure 13 Exemple de chronique piézométrique valable avec une mesure erronée (Code BSS : 03784X0025/81, origine : BSS Eau).....	32
Figure 14 Exemples des entités hydrogéologiques 221AA13 et 221AA17, avec respectivement 4 (figure du haut) et 7 points de mesures (2 figures du bas) à partir d'ADES... 34	
Figure 15 Zoom sur des points associés à un cours d'eau n'appartenant pas au même bassin versant.....	37
Figure 16 Représentation des zones homogènes selon leur complexité, combinaison des critères « battement moyen » et « gradient hydraulique » (Urban et al., 2010).....	39
Figure 17 Localisation des groupes de points fiables / peu fiables et comparaison avec la sectorisation réalisée par Urban et al. (2010).....	40
Figure 18 Exemple des piézomètres 03788X0041/57 (ADES), point fiable, en haut, et 03788X0077/58B (BSSEAU), point peu fiable associé, en bas.	42
Figure 19 Données mesurées lors de la campagne de nivellement.....	44
Figure 20 Composite de couleur SAR Sentinel-1 couvrant l'ensemble de la région Alsace (France). La couleur bleue correspond aux eaux de surface, la couleur verte aux terres cultivées et / ou généralement aux terres végétalisées, la couleur marron aux zones boisées et les centres urbains jaunes. Les régions de présence potentielle d'eau de surface sont délimitées (polygones blancs). L'emplacement des puits est également indiqué sous forme de cercles en blanc.	49
Figure 21 Réinterprétation des secteurs inondés par l'imagerie satellitale de l'événement de juin 2016. La couleur bleue claire correspond à la surface en eau obtenue par classification semi-automatique alors que le bleu foncé à des zones en eau permanentes. Les zones à présence potentielle de surface en eau ont été délimitées visuellement (polygones blancs). La position des piézomètres est également indiquée par des cercles blancs.	50
Figure 22 Localisation des points nivelés pour la comparaison avec les MNT IGN.....	53
Figure 23 Carte des différences entre le MNT 5 m et le MNT maille 25m (Z 25m – Z 5m).....	55
Figure 24 Histogramme des différences entre MNT IGN 5 m et points de nivellement IGN.....	58

Figure 25	Histogramme des différences entre MNT IGN 25 m et points de nivellement IGN	58
Figure 26	Localisation des piézomètres « fiables » et « peu fiables » disposant d'une valeur de ZmaxT100	60
Figure 27	Localisation, en superposition, des piézomètres « fiables » et « peu fiables » disposant d'une valeur de ZmaxT100	61
Figure 28	Variogramme directionnel de Zmaxi (piézomètres « fiables »)	62
Figure 29	Variogramme de ZmaxT100 (toutes directions confondues) et son ajustement	63
Figure 30	Validation croisée : carte des erreurs normalisées. Les points mal recalculés sont figurés par des ronds bleu ou rouge	64
Figure 31	Zoom sur la carte des anomalies de validation croisée, au voisinage du piézomètre 03082X0094/ECH	65
Figure 32	Comparaison des variogrammes de Zmaxi aux « petites » distances. Calcul avec point fiables et ensemble des 588 points peu fiables	66
Figure 33	Comparaison des variogrammes de Zmaxi au « petites » distances. Calcul avec point «fiables» et sélection des 280 points «peu fiables» pouvant être reliés à un point fiable.....	67
Figure 34	Comparaison des variogrammes de ZmaxT100. Calcul avec point fiables et points peu fiables.....	68
Figure 35	Variogramme de l'ensemble des 490 points « fiables » (210) + "peu fiables" (280) ..	69
Figure 36	Interpolation de la cote ZmaxT100 à partir des 2 jeux de données	70
Figure 37	Carte des écarts-type de krigeage obtenus avec les deux jeux de données	71
Figure 38	Comparaison des cartes des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe au pas 25 m (à gauche) et 5 m (à droite) – proposition de 3 zones de sensibilité	74
Figure 39	Comparaison des cartes de sensibilité aux remontées de nappe au pas 25 m (à gauche) et 5 m (à droite) – proposition de 4 zones de sensibilité	75
Figure 40	Carte de ZmaxT100 avec superposition de la carte et des données HE2012 Aprona78	
Figure 41	Comparaison de la carte de sensibilité aux remontées de nappe (grille de 5 m avec 4 zones de sensibilité) au traitement de l'imagerie satellitale pour l'événement de juin 2016.	80

Liste des tableaux

Tableau 1 Modalité d'attribution des classes de fiabilité globale pour la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe	12
Tableau 2 Résultats du croisement d'indicateurs pour le choix de la zone d'étude	16
Tableau 3 Classification des niveaux de nappe en fonction de la valeur de l'IPS	35
Tableau 4 Statistiques des différences entre les mesures de terrain avec le GPS différentiel et les MNT 5m et MNT 25m.....	45
Tableau 5 Différence entre le MNT 5 m et le MNT 25m de l'IGN sur la zone d'étude.....	54
Tableau 6 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux 41 points nivelés par le BRGM	56
Tableau 7 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux 337 points de nivellement IGN.....	56
Tableau 8 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux Z sol des 220 piézomètres « fiables » .	57
Tableau 9 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux Z sol des 280 piézomètres « peu fiables ».....	57

1 Contexte et déroulement de l'étude

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de la directive du parlement européen relative à l'évaluation et la gestion des risques inondation et sa transposition en droit français (loi du 12 juillet 2010), le MTES (Ministère de la transition écologique et solidaire) a demandé en première phase, au BRGM d'améliorer, valider et fiabiliser la méthode de cartographie de la sensibilité des territoires au « risque d'inondation par remontée de nappe » à l'échelle nationale. Une cartographie nationale a donc été produite et mise à disposition via le site Géorisques¹ ainsi que le rapport méthodologique (Brugeron et al., 2018) associé et une carte de fiabilité associée.

Il a été conclu, au vue des incertitudes associées à cette carte :

- Que cette cartographie nationale doit être considérée comme un outil d'identification maximisante de grandes zones potentiellement soumises à la remontée de nappe, à étudier localement ;
- Que celle-ci ne doit pas être exploitée à une échelle supérieure au 1/100 000^{ème},
- Que ces éléments plaident pour une approche locale des phénomènes et de leur caractérisation.

Dans la continuité de ces actions, il est proposé le développement méthodologique pour une cartographie d'inondation par remontée de nappe à l'échelle locale et la carte test sur un site pilote préalablement choisi.

1.2. METHODOLOGIE DEVELOPPEE POUR REALISER UNE CARTOGRAPHIE A L'ECHELLE LOCALE

Il s'agit ici de transposer et d'affiner la méthodologie de cartographie du risque inondation par remontée de nappe à l'échelle locale et de l'appliquer à une zone pilote.

Cette cartographie ne peut être envisagée qu'aux conditions suivantes :

- le nombre de points de mesure piézométrique est suffisant à l'échelle de la zone pilote,
- la durée des chroniques piézométriques est supérieure à 9 ans,
- la qualité du MNT est satisfaisante.

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

¹ <http://www.georisques.gouv.fr/>

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

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

La représentation cartographique de cet indice de fiabilité global, mêlant fiabilité des données sources utilisées pour l'interpolation et fiabilité des cotes altimétriques du MNT du RGE ALTI®, est retranscrite sur la Figure 1.

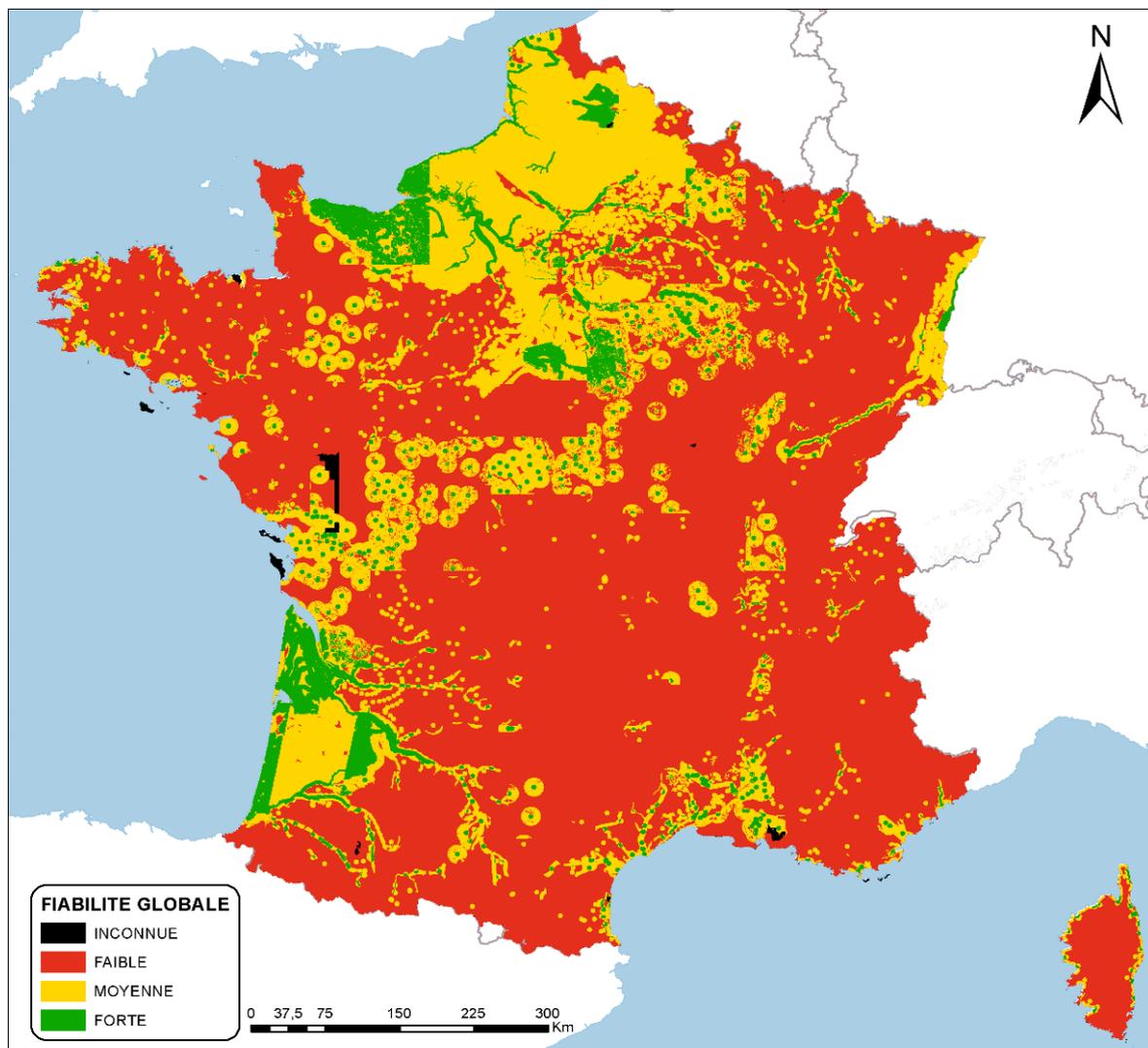


Figure 1 Carte de fiabilité globale pour la méthode employée à l'échelle nationale

Après avoir sélectionné la zone d'étude, un travail d'analyse du contexte hydrogéologique et de collecte des données piézométriques sera réalisé. Des enquêtes menées auprès de la DREAL, de la DDT, des collectivités et des riverains, ainsi que des campagnes de terrain (nivellement des ouvrages) permettront d'apporter des précisions et des données complémentaires.

En parallèle, une piste intéressante sera explorée en exploitant l'imagerie satellite, celle-ci est susceptible d'apporter des informations relativement précises sur l'étendue des zones inondées. Des images issues du programme Sentinelle seront acquises à différentes dates, ortho rectifiées et comparées de manière à identifier des zones temporairement immergées.

Une fois toutes ces données collectées et mises en forme, un nouveau travail d'interpolation à l'échelle du territoire pilote sera réalisé. Pour cela, différentes techniques géostatistiques sont à tester afin d'améliorer le calcul de la surface piézométrique « maximale » et de permettre un calcul d'erreur.

En connaissant le contexte hydrogéologique de la zone d'étude (perméabilité, surface piézométrique etc.), cette étude apportera éventuellement des indications sur la densité de points nécessaire pour que la carte réalisée soit satisfaisante.

Les travaux proposés comportent les principales étapes suivantes :

- Choix de la zone d'étude
- Collecte des données et analyse du contexte hydrogéologique
- Campagne de terrain (enquêtes, nivellement de points...)
- Utilisation de l'imagerie satellitale
- Analyse géostatistique : étude du variogramme et possibilité d'application au calcul de la surface piézométrique et au calcul d'erreur
- Développement méthodologique de tracé à l'échelle locale et choix de l'échelle de rendu cartographique
- Production d'une carte test au droit du territoire

Parmi les secteurs à choisir, des zones présentant une fiabilité globale forte sont précibées : au sud-est du Pas de Calais, en Normandie dans le département du Calvados, région aquitaine à l'ouest de la Gironde, le Loiret au centre et à l'est du département.

Seuls les secteurs hors zones urbaines seront sélectionnés.

L'objectif est donc la réalisation d'une carte remontée de nappe à l'échelle locale sur le site pilote choisi.

2. Choix de la zone d'étude

2.1. CRITERES DE SELECTION DU SITE

La sélection d'une zone pilote pour la création d'une méthodologie de cartographie du risque d'inondation par remontée de nappe s'est faite en fonction de plusieurs critères. Ceux-ci sont des conditions à respecter afin de permettre une bonne représentativité des surfaces interpolées ainsi qu'une cohérence hydrogéologique.

Des critères d'exclusions ont été utilisés pour la sélection :

- La fiabilité de la carte nationale d'inondation par remontée de nappe se doit d'être **majoritairement forte**.
- La couverture de la zone par des lithologies imperméables à l'affleurement ou des karsts se doit d'être **majoritairement faible**.
- La couverture de la zone par des terrains urbanisés ou forestiers se doit d'être **majoritairement faible**.

Cette sélection a permis de délimiter plusieurs zones sur la métropole :

- Alsace (sud de Strasbourg)
- Aquitaine (Ouest)
- Aquitaine (Est Arcachon)
- Nord-Pas-de-Calais (Sud-Est)
- Centre (Est Loiret)
- Normandie (Calvados)

Ces 6 zones se prêtent, en théorie, bien à l'exercice de cette étude. Pour choisir celle qui sera le site pilote de l'étude, il est possible de croiser des informations quantifiables sur chacune d'entre elles et faire ainsi un tri pertinent et objectif.

2.2. CROISEMENT D'INDICATEURS ET CALCUL D'UN SCORE GLOBAL

Un total de 6 « indicateurs » quantitatifs et/ou qualitatifs a été mis en avant. Ils vont être calculés et/ou mesurés pour classer les différentes zones d'études possibles les unes par rapport aux autres.

- A) **Quantité et répartition des données** : Un maximum d'ouvrages donnant une information sur un niveau de la nappe et une répartition géographique la plus homogène possible (les données utilisées pour ce critère sont celles utilisées pour l'élaboration de la carte nationale des inondations par remontée de nappe) ;
 - o Note entre 1 et 6 : 1 = Bon et 6 = moins bon
- B) Calage de la zone sur un ou plusieurs **bassins versants** : afin de s'affranchir des problèmes d'interpolation au niveau des crêtes topographiques ;
 - o Classement : 0 = Oui ; 1 = Approximatif ; 2 = Non
- C) Couverture par des **couches imperméables à l'affleurement** : entrave l'inondation par remontée de nappe ;
 - o Classement 1 – 6 : 1 = Bon et 6 = moins bon

- D) Couverture **Karst** : carte non valide pour les secteurs karstiques ;
 - o Classement 1 – 6 : 1 = **Bon** et 6 = **moins bon**
- E) Couverture par des **aires urbaines** ou des **forêts** (Corine Land Cover) : pour permettre un traitement d'imagerie satellite optimal ;
 - o Classement 1 – 6 : 1 = **Bon** et 6 = **moins bon**
- F) Quantité de **dossier « CATNAT »** inondation par remontée de nappe répertorié : Inondations par remontée de nappe déjà observées.
 - o Classement 1 – 6 : 1 = **Bon** et 6 = **moins bon**

Pour chacune des zones, les points de mesure d'eau ont été comptés, l'aire des différentes surfaces : couche imperméable, couche karstique, couche d'aires urbaines et forêts, ont été calculées (m²). En fonction de ces données chiffrées, les zones sont classées et obtiennent un rang. Pour chaque zone, les rangs obtenus pour chaque critère sont sommés en une note globale. L'ordre croissant de ces notes représentera un classement des zones de la plus pertinente à la moins propice à la réalisation de cette étude.

En plus de ce classement, une part importante du choix est basée sur des notions plus abstraites d'enjeux environnementaux et économiques. Mais aussi plus concrètes, sur les connaissances des incertitudes du RGE Alti hautes résolutions (5 m) et des incertitudes liées aux données sur les eaux souterraines.

Les résultats de ce classement sont présentés dans le Tableau 2. Les cartes des secteurs associés sont présentées sur les figures Figure 2 à Figure 7.

Indicateurs	A	B	C	D	E	F	Somme	Classement
Alsace (Sud)	4	1	2	2	4	4	17	3
Aquitaine (Ouest)	3	1	6	5	5	5	25	6
Aquitaine (Est Arcachon)	6	1	4	3	6	3	23	5
Nord-Pas-de-Calais	5	0	5	1	2	1	14	2
Centre	1	1	1	6	3	6	18	4
Normandie	2	2	3	4	1	2	14	1

Tableau 2 Résultats du croisement d'indicateurs pour le choix de la zone d'étude

Zone pilote potentielle : Sud de l'Alsace

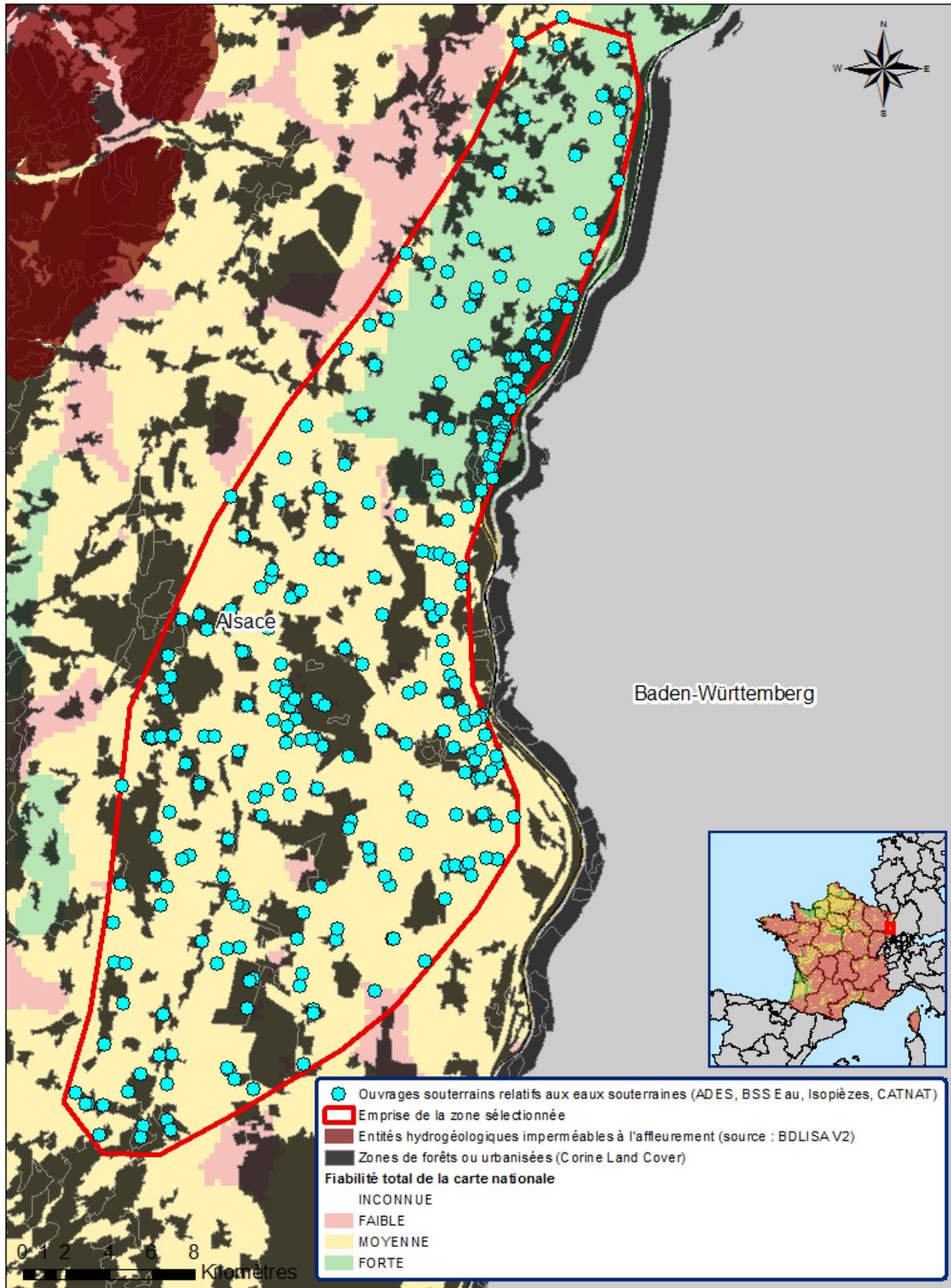


Figure 2 Zone pilote potentielle au sud de l'Alsace

Zone pilote potentielle : Ouest de l'Aquitaine

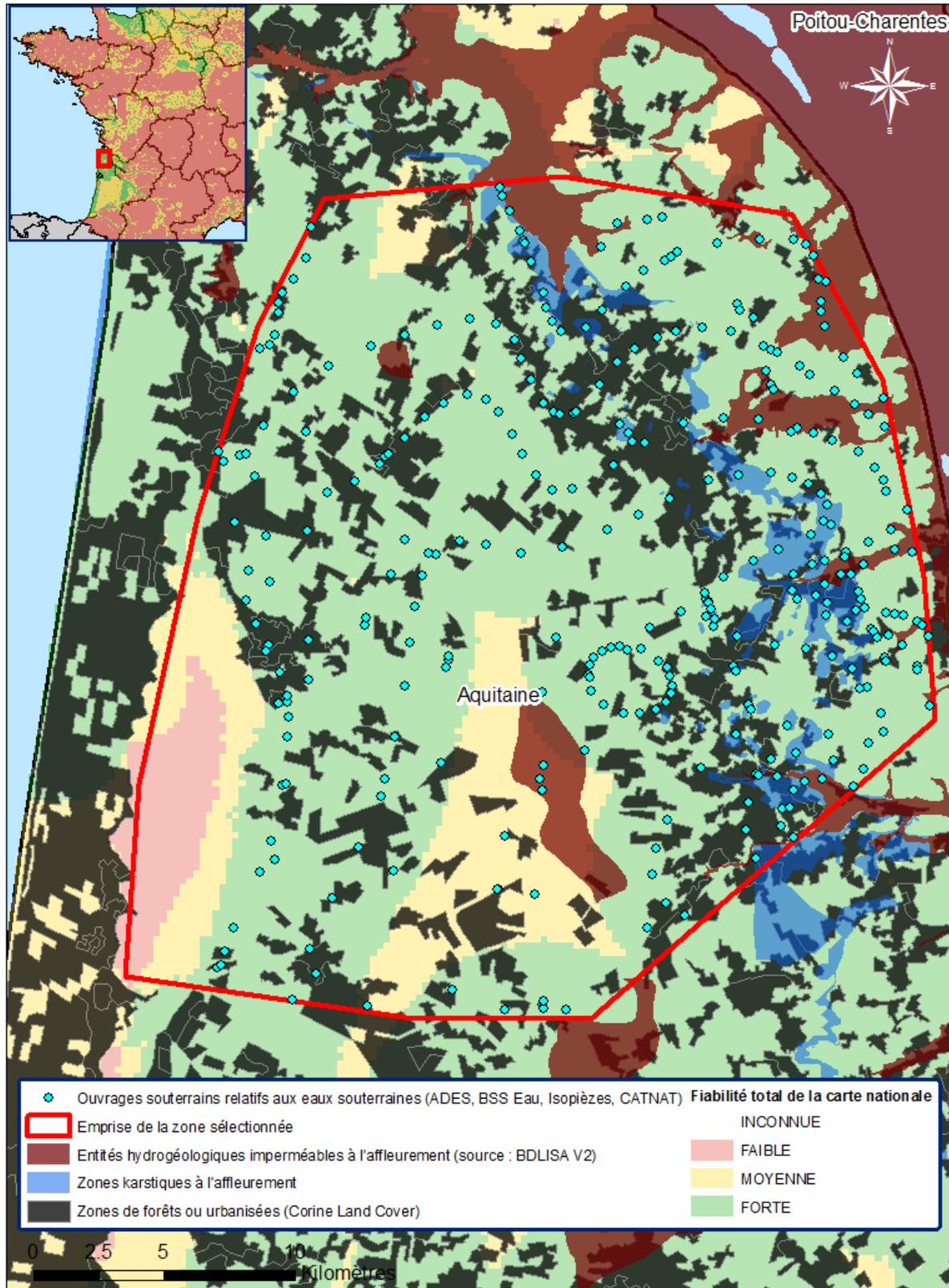


Figure 3 Zone pilote potentielle à l'ouest de l'Aquitaine

Zone pilote potentielle : Est du bassin d'Arcachon

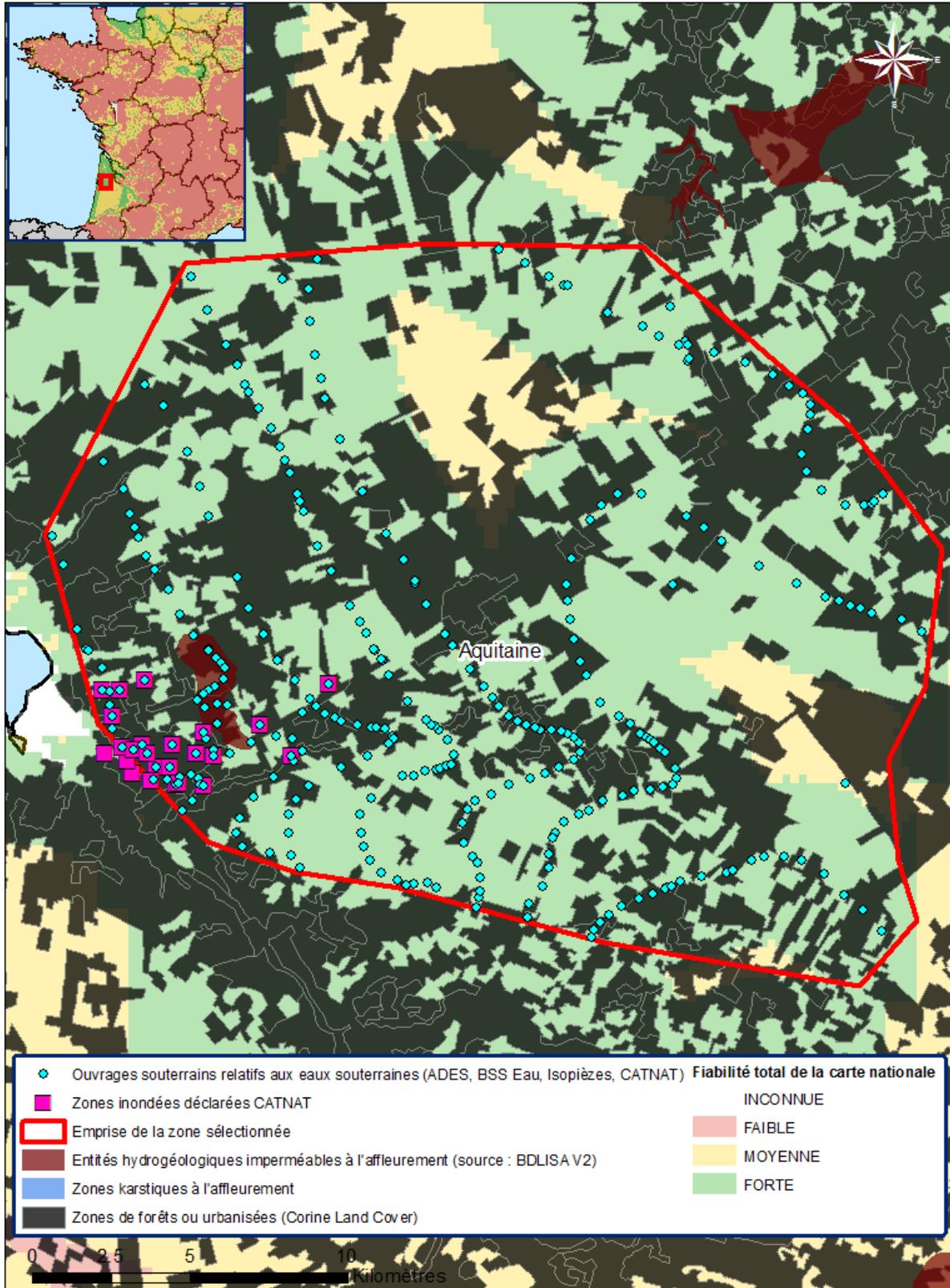


Figure 4 Zone pilote potentielle à l'est du bassin d'Arcachon

Zone pilote potentielle : Centre

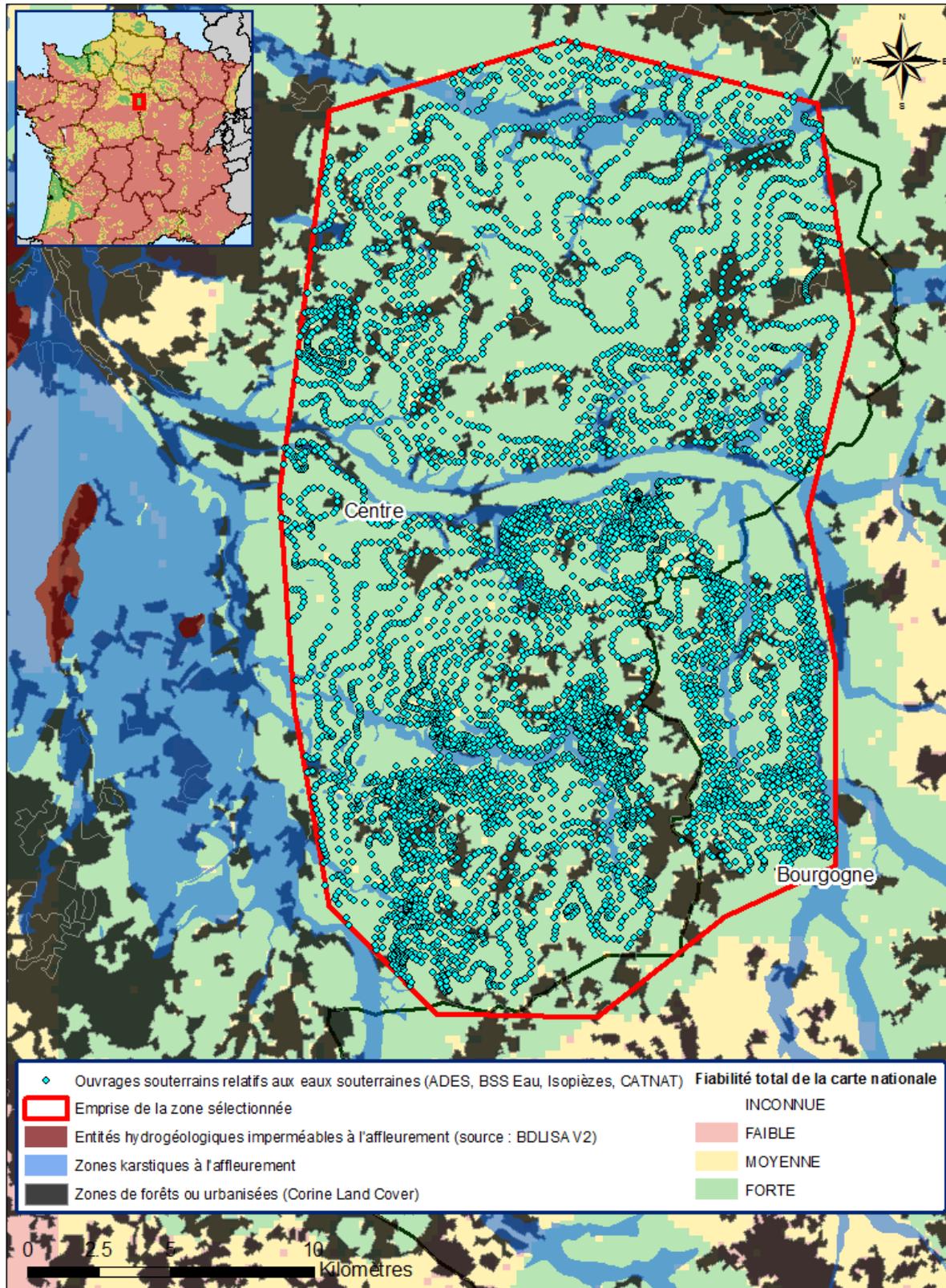


Figure 5 Zone pilote potentielle en région Centre

Zone pilote potentielle : Nord-Pas-de-Calais

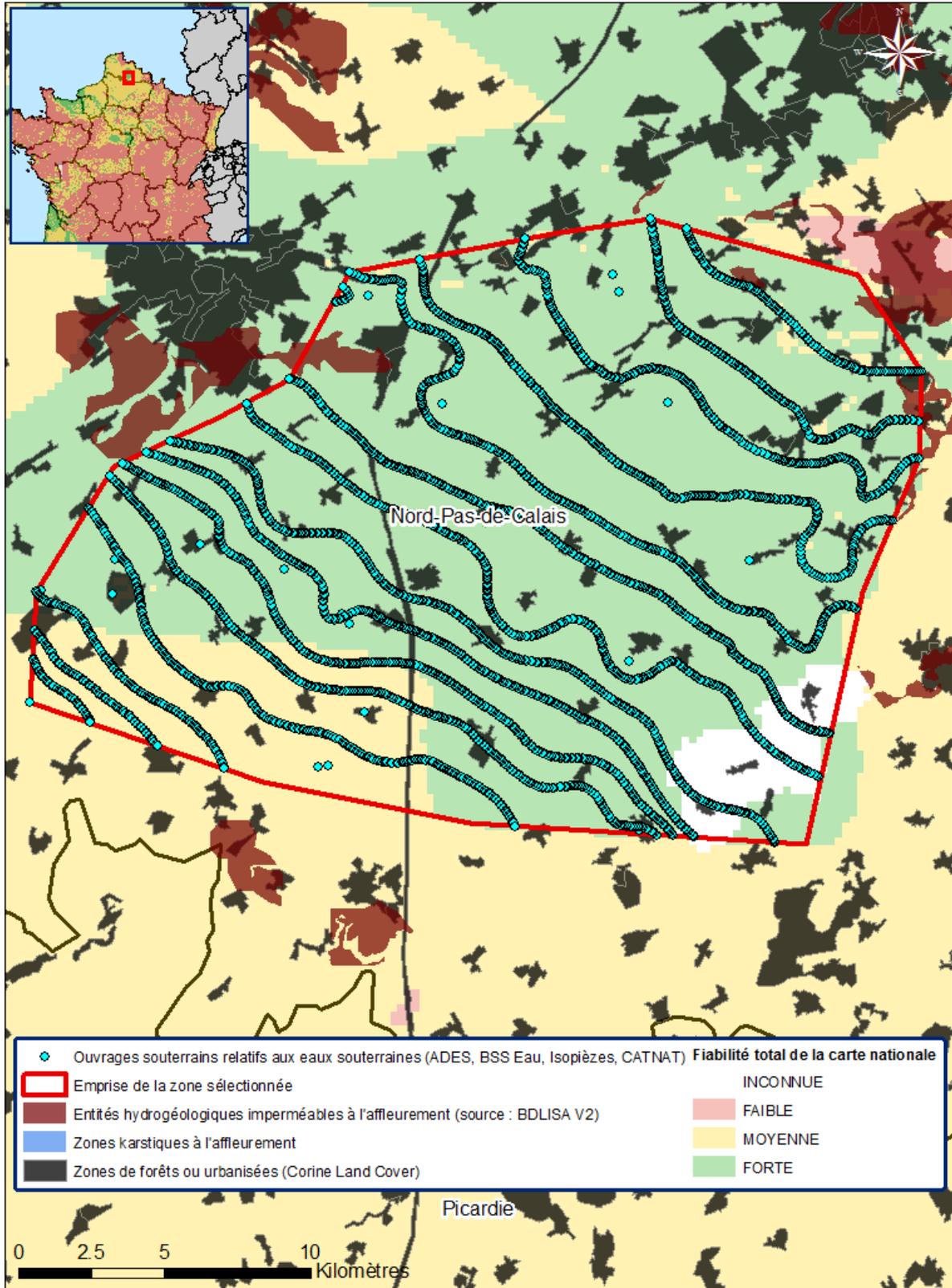


Figure 6 Zone pilote potentielle au Nord-Pas-de-Calais

Zone pilote potentielle : Normandie

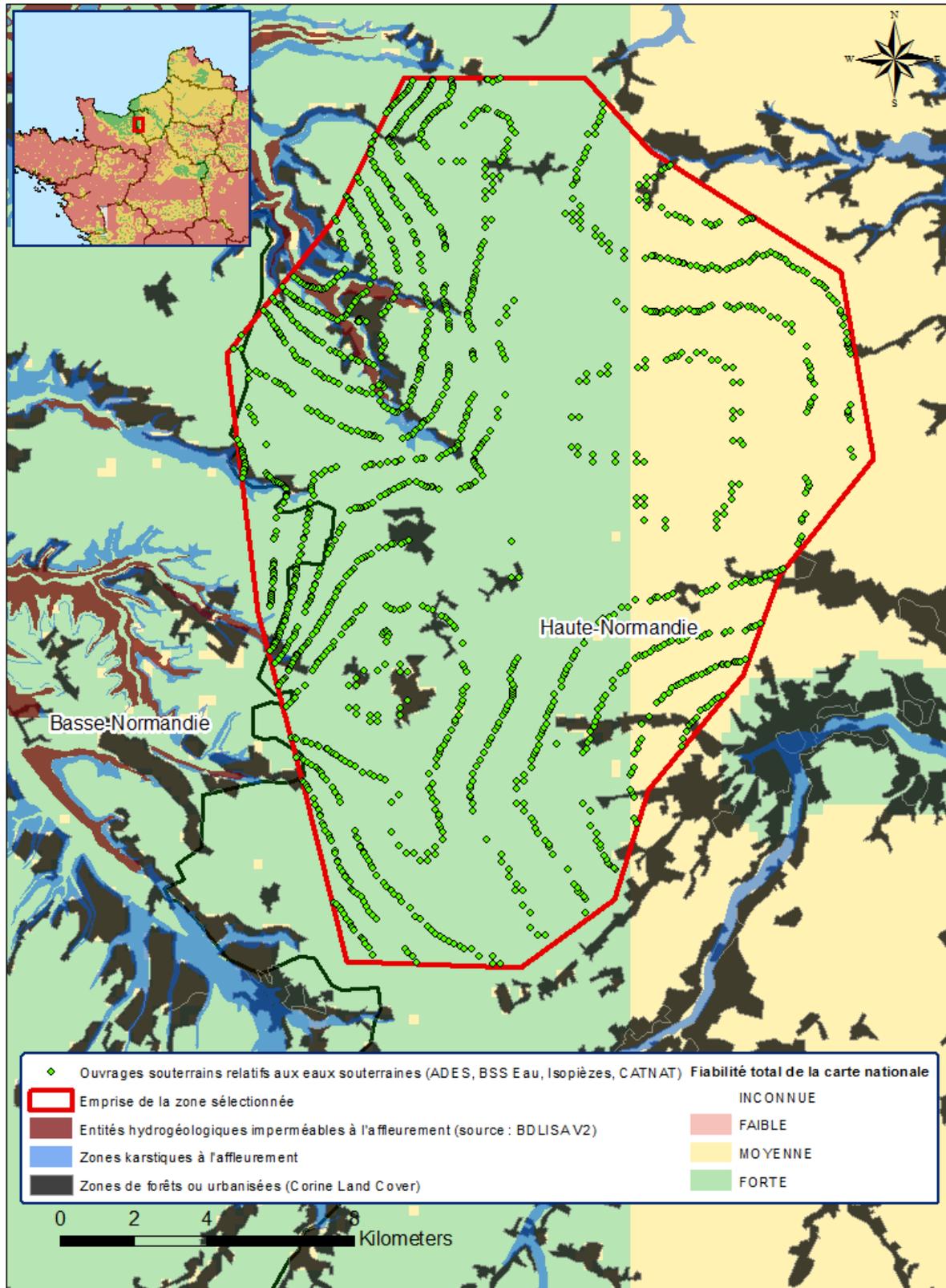


Figure 7 Zone pilote potentielle en Normandie

2.3. SECTEUR RETENU

Le choix du secteur se fera donc sur l'un des 3 meilleurs secteurs ressortis dans le classement : celui en Normandie, en Nord-Pas-de-Calais ou dans le sud de l'Alsace. Après consultation des DEAL, DDT, le choix s'est porté sur la zone en Alsace (Figure 8). Ce secteur a déjà connu plusieurs épisodes d'inondation et représente un pôle économique d'intérêt de par le développement industriel et la proximité du Rhin. De plus, la répartition, la diversité et la qualité des données (une quantité importante de piézomètres avec des chroniques relativement longues) en font un bon candidat pour réaliser une interpolation par krigeage. Son contexte hydrogéologique relativement homogène (grande nappe alluviale d'Alsace) nous permettra d'utiliser un maximum des données disponibles.

Une réunion du comité d'experts n'a pu être organisée pour valider le choix de la zone d'étude et la méthodologie envisagée pour le tracé mais il a été validé par échange de mails entre la DGPR, le BRGM et les DDT et DEAL concernés. Suite à ces échanges, la zone a été légèrement ajustée (étendue) pour répondre aux enjeux.

Zone pilote finale : Alsace

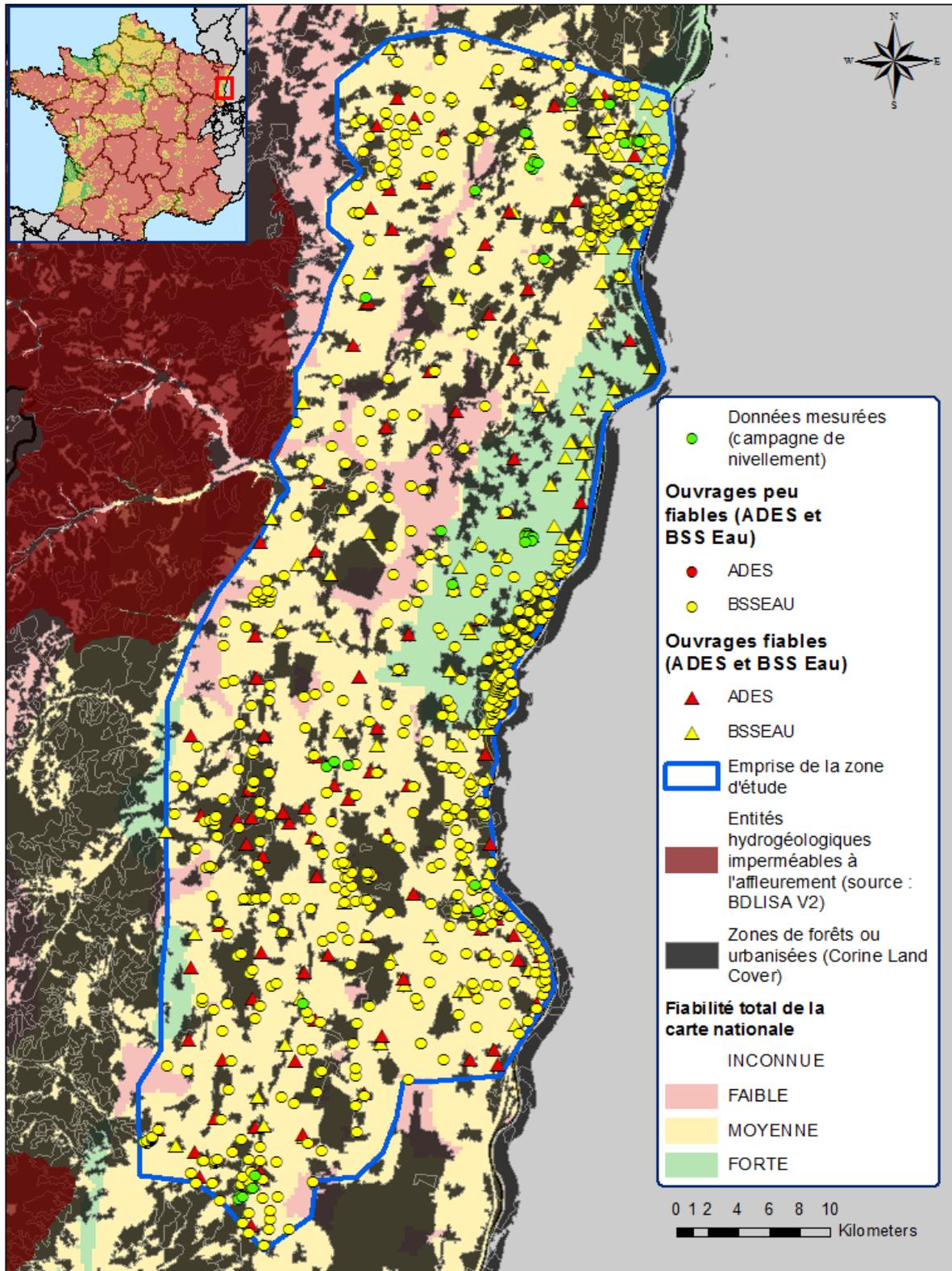


Figure 8 Zone d'étude retenue : nappe d'Alsace au sud de Strasbourg

3. Contexte hydrogéologique du secteur retenu

La nappe d'Alsace constitue la partie française de l'aquifère rhénan qui occupe la majeure partie du Fossé rhénan. Il se compose d'alluvions quaternaires dont l'épaisseur atteint plus de 100 mètres par endroits.

Il s'agit de l'une des plus importantes ressources en eau souterraine d'Europe. En effet, le volume total de l'aquifère rhénan entre Bâle et Lauterbourg est estimé entre 65 et 80 milliards de m³ d'eau (Source : réseau LOGAR²). La quantité d'eau stockée, pour sa seule partie alsacienne, est estimée à environ 35 milliards de m³ d'eau (source : APRONA³), ce qui en fait un réservoir de première importance pour les activités humaines situées sur ce secteur.

Accessible à faible profondeur, la nappe d'Alsace permet de couvrir une grande partie des besoins en eau potable, alimente les industries fortes consommatrices d'eau de bonne qualité et contribue à l'existence de milieux naturels typiques. Néanmoins, peu protégée par des terrains perméables, elle reste vulnérable et sensible aux pollutions diffuses ou ponctuelles, d'origine industrielle, agricole ou domestique. Assez réactive aux variations météorologiques et alimentée pour une grande part par les précipitations, elle peut également être le théâtre d'inondations par remontée de son niveau piézométrique, dans certaines circonstances exceptionnelles.

3.1. CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR

L'aquifère principal de la nappe d'Alsace est constitué d'alluvions rhénanes d'origine alpine, pouvant s'étendre presque jusqu'au piémont vosgien. Sur les bordures, le long des collines sous-vosgiennes et dans les cônes de déjections des rivières des vallées vosgiennes, il comprend également des alluvions d'origine vosgiennes qui sont généralement plus grossières, plus argileuses et entrecoupées de niveau de loess et d'argiles.

Au Sud, entre Bâle et Mulhouse, les alluvions forment un chenal encaissé dans les marnes oligocènes du Sundgau dit « Fossé de Sierentz », bien que son origine tectonique soit controversée. Les alluvions sont très grossières et les blocs supérieurs à 25 cm sont abondants. D'anciennes terrasses, aujourd'hui sur la bordure du Sundgau à quelques dizaines de mètres au-dessus de la plaine, témoignent du soulèvement de cette région au Quaternaire (Figure 9).

Entre Mulhouse et le seuil d'Erstein, l'épaisseur des alluvions perméables avec des intercalations locales moins perméables reposant sur les marnes oligocènes est en moyenne de 120 m mais elle dépasse 200 m dans la « fosse de Geiswasser », et les dômes diapiriques tels que le « dôme de Hettenschlag », constitué de sel et de marnes oligocènes qui atteint presque la surface de la plaine, s'expliquent par des phénomènes de subsidence et de diapirisme d'âge quaternaire à actuel. La partie ouest de la plaine, au niveau du bassin potassique, est constituée par les alluvions vosgiennes de la Doller et de la Thur, moins puissantes (inférieures à 40 m), beaucoup plus argileuses et moins perméables.

² Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l'Aquifère Rhénan (<http://www.logar2050.eu/logar/reseau>)

³ Association pour la Protection de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace (<https://www.aprona.net/>)

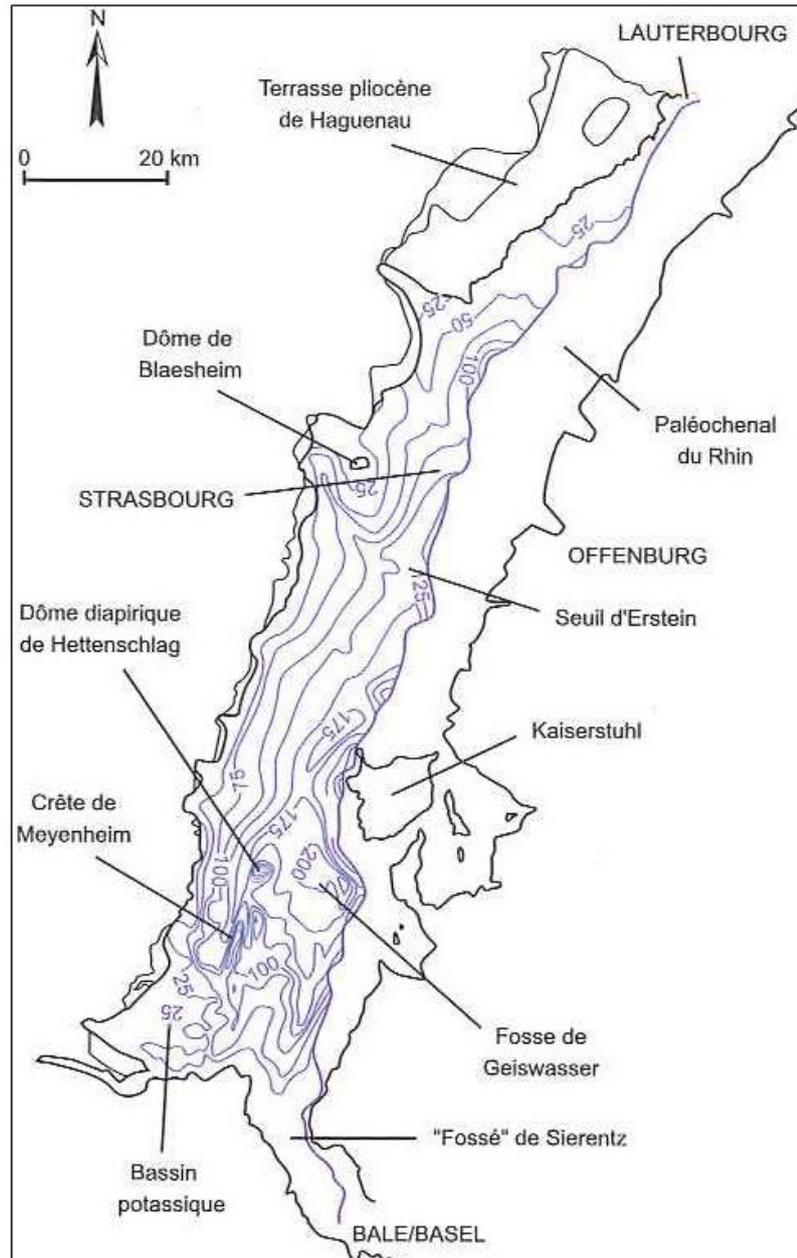


Figure 9 Epaisseur de la nappe d'Alsace en moyenne eaux (Risler et al., 2006)

Au Nord du seuil d'Erstein, les alluvions reposent sur les formations sablo-argileuses du Pliocène. Leur granulométrie est moins grossière, les blocs étant rares, et elles sont entrecoupées d'intercalations silto-argileuses. Sous Strasbourg, ces dernières sont suffisamment continues vers 30 m de profondeur pour constituer une barrière hydraulique limitant les circulations verticales entre les différents niveaux, conférant au réservoir un caractère multicouche. Le cône de déjection de la Bruche orienté vers le Sud-Est au Quaternaire ancien, passe depuis au Nord du dôme de marnes oligocènes de Blaesheim, transportant des sables rouges de démantèlement des Grès vosgiens jusqu'à Strasbourg.

3.2. HYDRODYNAMISME ET PROPRIETES INTRINSEQUES

L'écoulement principal de la nappe est orienté parallèlement au Rhin, du Sud vers le Nord (Figure 10). La pente de la surface piézométrique est faible, de l'ordre de 0,1% (Risler *et al.*, 2006).

Les perméabilités des alluvions rhénanes diminuent de façon générale d'Est en Ouest avec des valeurs comprises entre 1.10^{-1} m/s en bordure du Rhin et 2.10^{-3} m/s à proximité des Vosges (Source : BRAR) où les alluvions des cônes de déjection des cours d'eau renferment une proportion d'argile plus importante que les alluvions rhénanes du centre plaine. En général, les transmissivités les plus élevées sont localisées en milieu de fossé, là où, à la fois, la perméabilité et l'épaisseur de la nappe sont les plus fortes.

L'eau s'écoule à une faible vitesse, de l'ordre de quelques mètres par jour en moyenne, soit près de 600 m par an. Cependant, du fait de l'hétérogénéité du réservoir, les vitesses de circulation peuvent atteindre localement plusieurs dizaines de mètres par jour avec une variation spatiale importante. En bordure de la nappe, côté alsacien, l'écoulement se fait globalement des Vosges vers l'Est pour converger vers le Rhin (Schomburgk *et al.*, 2005).

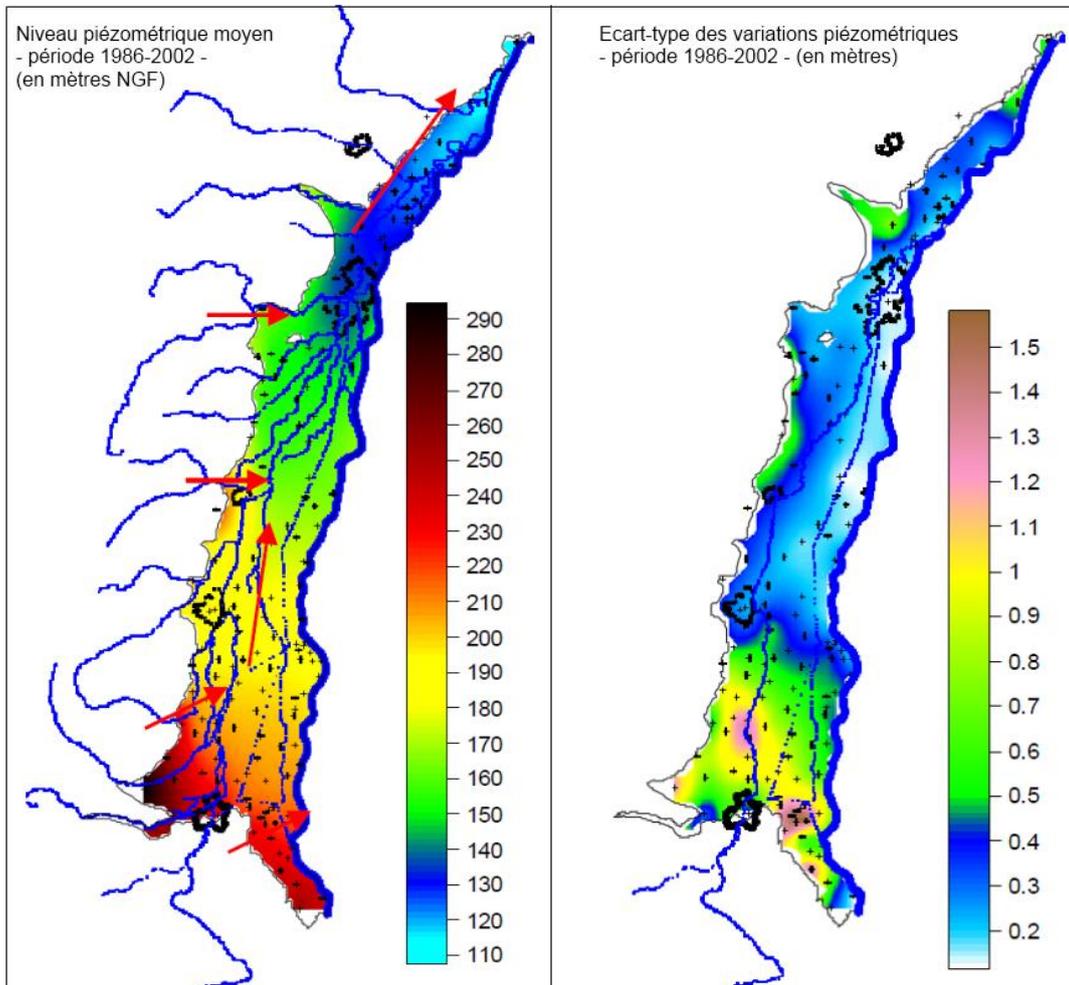


Figure 10 Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (Flèches rouges = direction d'écoulement souterrain) & carte krigée de l'écart-type des variations piézométriques, assimilable au battement (Schomburgk *et al.*, 2005)

Le comportement hydrologique de la nappe rhénane n'est pas totalement homogène des Vosges à la Forêt Noire (Ouest-Est), de Bâle à Lauterbourg (Sud-Nord). Selon les secteurs, les variations du niveau piézométrique ont pour origine principale, soit les précipitations, soit les échanges avec le Rhin, l'III, et les rivières vosgiennes, soit une combinaison de ces origines.

Le régime hydrologique du Rhin est de type « pluvio-nivo-glaciaire » : hautes eaux estivales entre mai et juillet, étiage entre décembre et mars. Ce régime résulte des conditions climatiques régnant dans la partie alpine de son bassin versant et conditionne les oscillations de la nappe phréatique et les inondations en pleine période de végétation.

Un des paysages naturels les plus typiques de la vallée rhénane est constitué par les rieds. L'eau souterraine y joue un rôle primordial. L'alternance de marais, de roseaux, de prairies humides et de bosquets donne à ces milieux une grande diversité de formes et de couleurs. La nappe donne naissance aux sources phréatiques du ried qui alimentent les rivières phréatiques, ou « Brunnenwasser », lesquelles, grâce aux échanges avec la nappe, présentent des débits particulièrement réguliers et une eau à température constante. Le grand Ried ello-rhénan est caractérisé par le plus important réseau de rivières phréatiques d'Europe. L'élévation du niveau d'eau du Rhin canalisé, surtout au niveau des barrages, favorise des infiltrations directes d'eau du fleuve vers la nappe phréatique.

Les cours d'eau vosgiens, dans leurs cônes de déjection, alimentent fortement la nappe à leurs débouchés en plaine. Dans ces secteurs, ce processus de recharge de l'aquifère s'avère d'ailleurs beaucoup plus puissant que la seule alimentation due aux précipitations efficaces.

Les niveaux piézométriques de la nappe d'Alsace sont relevés depuis le début du XX^{ème} siècle et de manière plus régulière depuis 1950. Le suivi détaillé de l'évolution des niveaux de la nappe est maintenant effectué à l'aide d'un réseau piézométrique régional géré actuellement par l'APRONA, réseau patrimonial de gestion constitué de 170 points d'observation répartis de manière homogène sur l'ensemble du territoire alsacien.

3.3. ENTITE BDLISA CONCERNEE

Une seule entité du référentiel hydrogéologique BDLISA⁴ affleure sur l'essentiel du territoire d'étude, localisé dans la plaine du Rhin. Il s'agit des alluvions rhénanes récentes à actuelles, codée 221AA17 (Figure 11). Cette entité repose généralement sur une seconde entité des alluvions de même origine (rhénane donc alpine) mais plus anciennes, codée 221AC09.

4

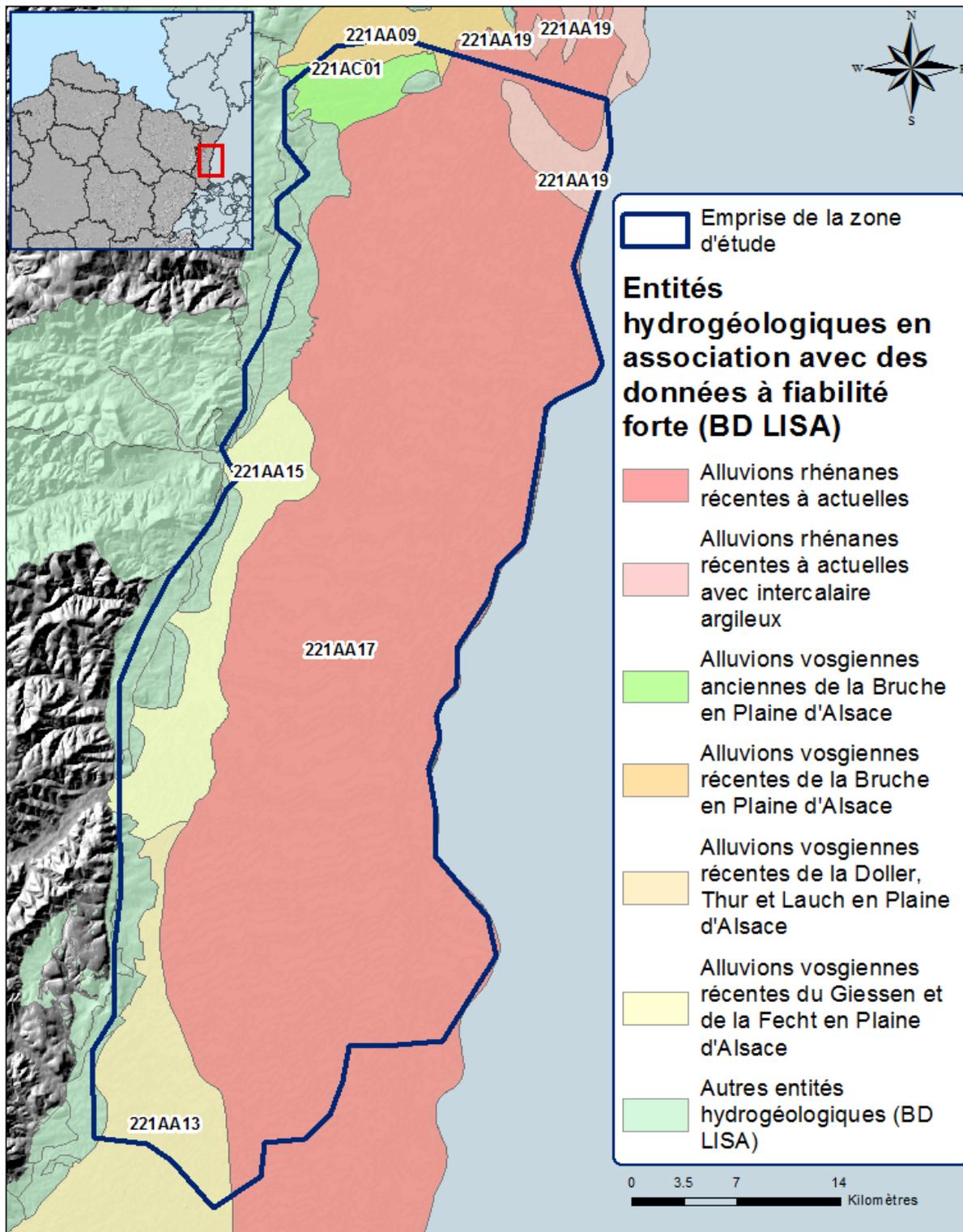


Figure 11 Entités hydrogéologique BDLISA de niveau 3 présentes à l’affleurement dans la zone d’étude

Cette dichotomie verticale entre alluvions récentes (tranche superficielle de l’aquifère) et alluvions anciennes reste délicate à observer sur le terrain ou lors de foration. Il est d’usage de considérer l’aquifère rhénan comme un ensemble unique, du moins pour ce qui concerne ces deux entités centrales. Néanmoins, elle est bien définie dans les travaux de modélisation hydrogéologique

réalisée dans le cadre du projet LOGAR au titre du programme INTERREG IV (<http://www.logar2050.eu/>). Les variations verticales et latérales en terme de composition au sein de ce grand système aquifère sont illustrées sur la coupe de la Figure 12.

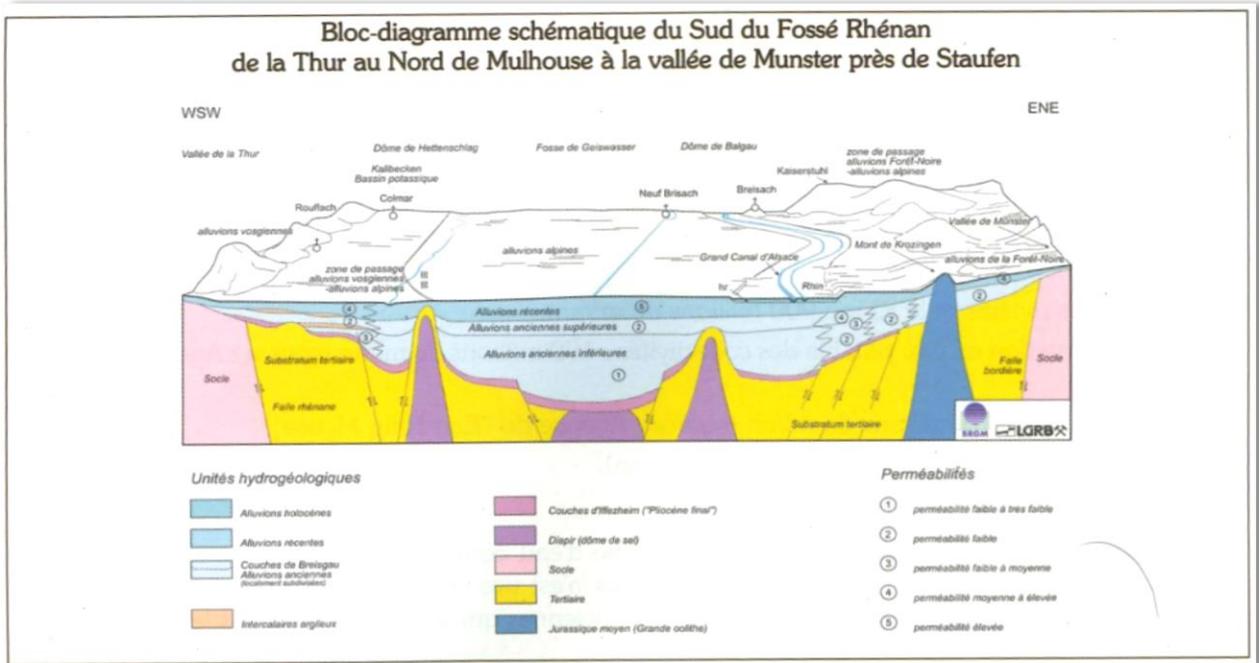


Figure 12 Coupe schématique du bloc Sud du fossé Rhénan (Urban et al., 2013)

Très perméable et d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 250 m en partie centrale, l'aquifère rhénan intègre également des alluvions d'origine vosgiennes en bordure Ouest, dont la composition lithologique diffère des alluvions d'origine rhénane. Dans le référentiel BDLISA, ces alluvions vosgiennes récentes à anciennes sont codées 221AC01 (Bruche), 221AA15 (Giessen, Fecht) et 221AA13 (Doller, Thur, Lauch).

Le comportement de la nappe contenue au sein de ces entités vosgiennes peut s'avérer bien différent de celui en partie centrale de la nappe d'Alsace (influence des cours d'eau vosgiens, flux latéraux provenant des formations géologiques vosgiennes, plus fort gradient de la nappe, nappe sub-affleurante très réactive...etc...).

Les ouvrages captants ces secteurs particuliers, situés en bordure Ouest, peuvent par conséquent présenter des signaux piézométriques désynchronisés voire sans rapport à ceux enregistrés dans la majorité des ouvrages captant la nappe d'Alsace *sensu stricto*. Ceci se verra dans l'analyse géostatistique des points, lors de l'interpolation (cf. chapitre 8).

4. Collecte des données

Un travail de collecte des données est effectué sur le site d'étude ainsi qu'une analyse critique et un descriptif du contexte hydrogéologique.

4.1. EXTRACTION DES DONNEES

L'ensemble des points d'eau situés en Alsace ont été extraits, au 11/07/2018, de la banque d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES) et de la Banque du Sous-sol répertoriant les ouvrages souterrains relatifs aux eaux souterraines (BSS Eau, BRGM).

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

- le « code BSS », un identifiant unique pour chaque ouvrage,
- les coordonnées géographiques des points de mesures en Lambert 93,
- les mesures des cotes piézométriques minimales, maximales et moyennes,
- les dates auxquelles ces mesures ont été réalisées,
- la longueur des chroniques piézométriques en années et le nombre moyen de mesure par an,
- les informations relatives au nivellement de chaque ouvrage (cote NGF au droit du point et précision de la mesure).

Un total de près de 830 points de mesure, issus de la banque ADES et de la BSS Eau ont été dénombrés dans la zone d'étude. Ces points vont être soumis à un tri et des vérifications afin d'identifier, corriger ou écarter d'éventuelles anomalies.

Des suites de la campagne de terrain, des contacts ont été pris avec les Voies Navigables de France (VNF) ainsi qu'EDF dans le but de partager les données. Malheureusement, elles n'ont pu être exploitées pour plusieurs raisons.

La première est l'absence de réels historiques des niveaux mesurés. Pour les données VNF, un travail de traitement de données lourd et chronophage était nécessaire pour modifier le format et sélectionner les ouvrages mesurant un niveau piézométrique représentatif du niveau de la nappe et cohérent hydrogéologiquement. Ce travail nécessitant trop de ressources pour un résultat estimé faible, il a été décidé de ne pas utiliser ces données.

Les piézomètres d'EDF servent au contrôle du niveau d'eau dans les digues de remblais, séparant le vieux Rhin des différents canaux d'amenées ou de drainage. Ce contrôle a pour but de réguler artificiellement le débit au niveau du canal d'amenée puis utiliser comme force motrice pour optimiser la production des ouvrages hydro-électriques. Cela étant, le niveau piézométrique des données d'EDF ne peut pas être utilisé.

4.2. TRAITEMENT DES DONNEES ET DES ANOMALIES

4.2.1. Classement par fiabilité et correction

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

Les points de mesures d'eau ont donc été classés en fonction de la longueur de la chronique piézométrique (en années) et du nombre moyen de mesures par an, en accord avec la méthodologie utilisée pour réaliser la carte nationale :

- Fiabilité Forte : ≥ 10 ans de chronique minimum PUIS ≥ 120 mesures par an en moyenne
- Fiabilité Moyenne : ≥ 10 ans de chronique minimum PUIS ≥ 40 mesures par an en moyenne
- Fiabilité Faible : ≤ 10 ans de chronique piézométrique

Une attention particulière a été portée sur les points dit « fiables » (Fiabilité moyenne et forte). Pour chacun, les chroniques piézométriques ont été analysées une par une dans le but de corriger les valeurs aberrantes de cote piézométrique minimale et maximale ou les écarter le cas échéant (Figure 13). Dans la plupart des cas, les valeurs aberrantes ont été ignorées et les véritables mesures maximale et/ou minimale ont été prises en compte.

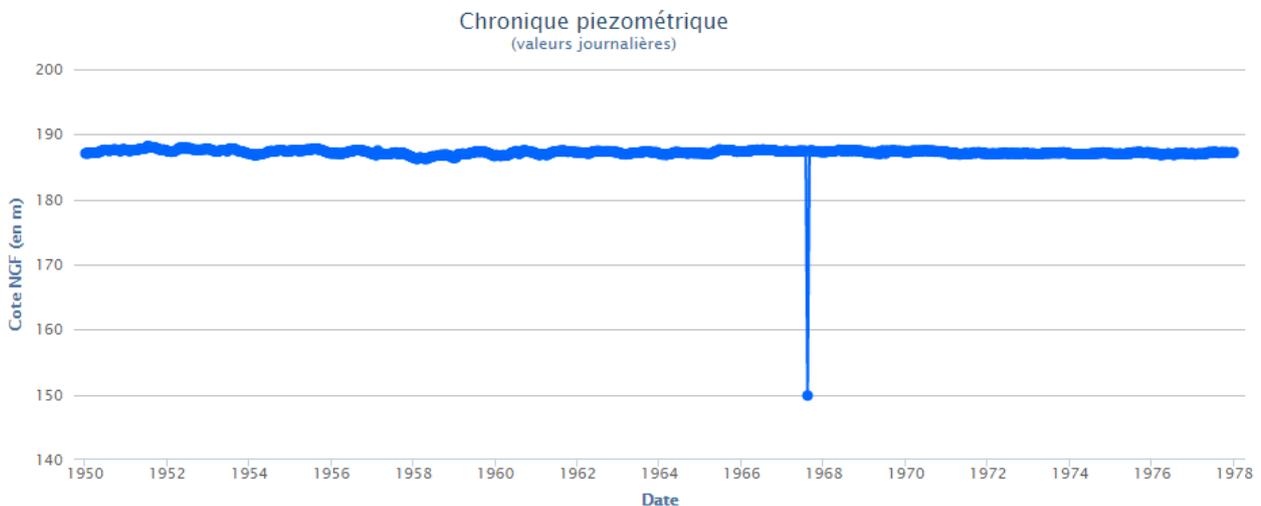


Figure 13 Exemple de chronique piézométrique valable avec une mesure erronée (Code BSS : 03784X0025/81, origine : BSS Eau).

Le tri et la correction des données ont abouti à ces résultats après correction des données :

- 588 points fiabilité Faible (principalement issus de la BSS Eau) ;
- 210 points fiabilité Moyenne à Forte (principalement issus de la banque ADES).

4.2.2. Optimisation des données : utilisation d'outils statistiques

Une réflexion sur les possibilités d'augmenter le nombre de données fiables a été menée autour des outils statistiques développés dans le code de calcul ESTHER (Seguin et al., 2018) et en utilisant l'Indicateur Piézométrique Standardisé ou IPS (Vernoux et Seguin, 2013 et Seguin, 2015).

L'IPS est un indicateur utilisé pour analyser, de façon homogène sur tout un territoire, des épisodes de sécheresse ou de hautes eaux à différentes échelles de temps, en ne faisant intervenir qu'une seule variable (le niveau piézométrique). L'IPS est défini sur une échelle dite « standard », sa valeur numérique varie de -3 à +3 (sans unité), il permet d'avoir une vision homogène de l'état des nappes libres (ou captives) à l'échelle nationale, et est cohérent avec deux autres indicateurs utilisés par Météo France : le SPI (Standardized Precipitation Index ou index

standardisé des précipitations) et le SSWI (Standardized Soil Wetness Index ou index standardisé d'humidité du sol)

L'IPS étant un indicateur standardisé, l'échelle de valeurs est commune à toutes les nappes, ce qui permet de les comparer entre elles et facilite ainsi le calcul de l'indicateur global à l'échelle d'une nappe. De plus, il est applicable à toutes les nappes.

L'utilisation de ces outils statistiques permet :

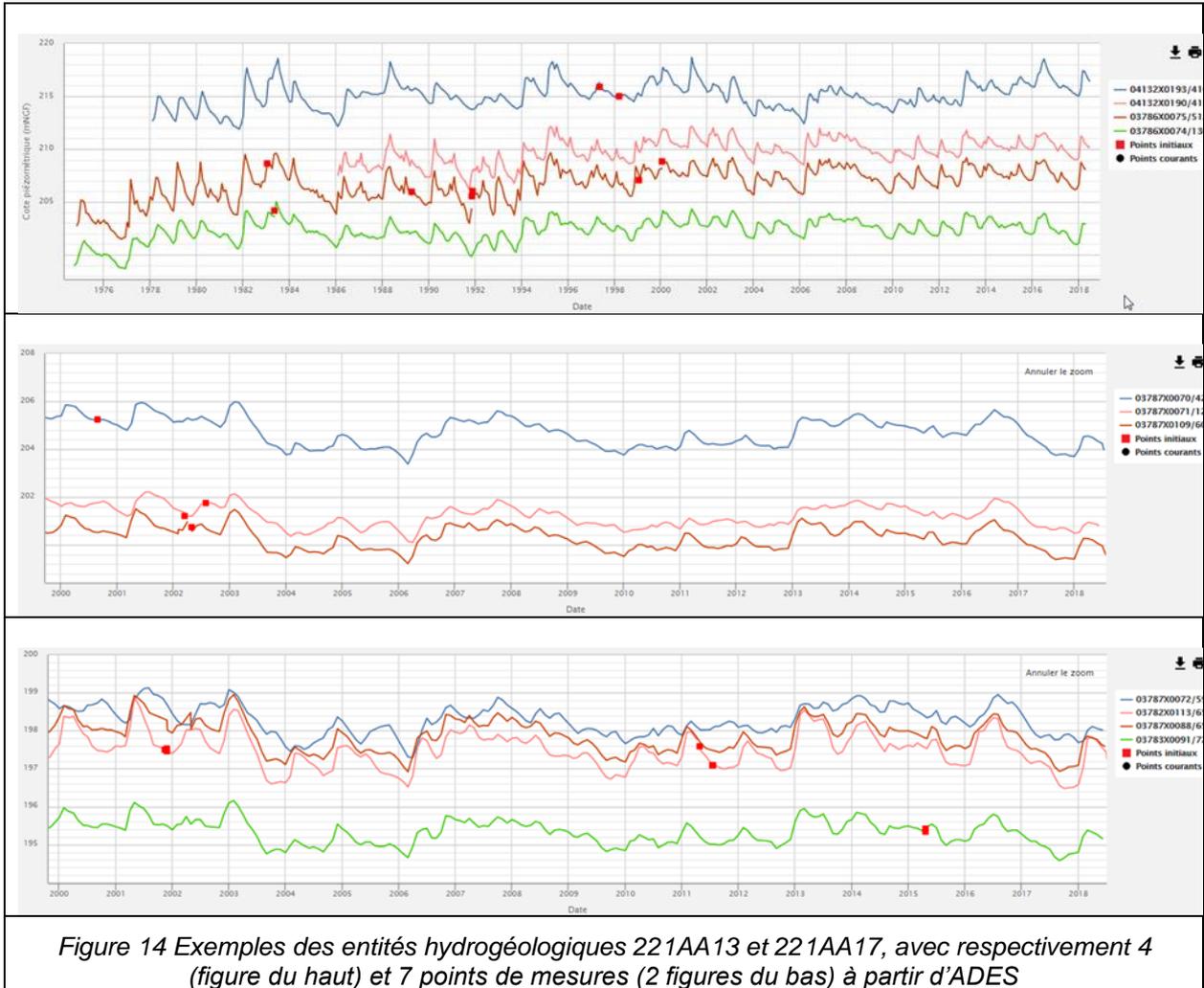
1/ de qualifier la situation des nappes à une date donnée à l'aide de l'analyse des chroniques piézométriques.

2/ de vérifier l'homogénéité des fluctuations piézométriques au sein d'une même entité BDLISA.

L'objectif de ce travail est d'extrapoler les statistiques obtenues à l'échelle d'une entité BDLISA (distribution statistique des périodes de Hautes Eaux) aux points disposant de peu d'informations.

Au préalable, chaque point de mesure a été rattaché à une entité hydrogéologique de la BDLISA (Figure 11). Les statistiques ont été calculées sur les chroniques piézométriques qui le permettaient, soit 29 points issus de la banque ADES ont suffisamment d'années de chronique et de mesures.

Un travail de comparaison des chroniques de ces points a été fait, par entité hydrogéologique, pour vérifier la concordance dans le temps des variations des niveaux piézométriques (Figure 14).



Par entité, le comportement semble homogène. Il est donc possible d'associer ces statistiques (ESTHER et IPS) aux entités, puis d'extrapoler les informations obtenues aux points de mesure de fiabilité faible.

La procédure comprend deux étapes :

- Une première pour le calcul de l'IPS, un calcul statistique réalisé au pas de temps mensuel pour la caractérisation du niveau de nappe d'un mois donné,
- Une seconde permettant de caractériser les mois où le niveau piézométrique est le plus haut au cours de l'année.

Une description de chacune de ces étapes est décrite ci-dessous.

ETAPE 1 :

1. Calcul de l'IPS sur les 29 points ADES (Requis : 15 années de chroniques et plus de 120 mesures par an).
2. Association de cet IPS aux entités hydrogéologiques. Calcul de la moyenne des IPS par entité et par date.

3. Association des entités et des points BSSEAU : piézométries min et max des points peu fiables inclus dans un même ordre de grandeur que les piézométries min et max des points ADES dit « fiables ».
4. Association de la valeur d'IPS calculée à la date de la mesure du maximum piézométrique (mois/année) des points peu fiables sur une même entité hydrogéologique.
5. Classement niveau piézométrique des points peu fiables en fonction des classes IPS (Tableau 3)

Min.	Max.	Qualification des niveaux	Période de retour
≥ 1.282	≤ 3.000	Niveaux très hauts	> 10 ans humide
≥ 0.842	< 1.282	Niveaux hauts	entre 5 ans humide et 10 ans humide
≥ 0.253	< 0.842	Niveaux modérément hauts	entre 2.5 ans humide et 5 ans humide
≥ -0.253	< 0.253	Niveaux autour de la moyenne	entre 2.5 ans humide et 2.5 ans sec
≥ -0.842	< -0.253	Niveaux modérément bas	entre 2.5 ans sec et 5 ans sec
≥ -1.282	< -0.842	Niveaux bas	entre 5 ans sec et 10 ans sec
≥ -3.000	< -1.282	Niveaux très bas	> 10 ans sec

Tableau 3 Classification des niveaux de nappe en fonction de la valeur de l'IPS

ETAPE 2 :

1. Calcul avec le logiciel ESTHER sur les 29 points ADES
2. Mis en évidence du (des) mois pour le(s)quel(s) le niveau maximal piézométrique a été mesuré
3. Correspondance entre ces mois et la date de mesure des niveaux piézométriques maximums des points peu fiables.
4. Qualification en Haute Eau (HE) ou Basse Eau (BE).

Finalement, une mesure piézométrique maximale d'un point peu fiable n'est considérée comme un vrai niveau maximal seulement si l'IPS est supérieur à 1.28 (étape 1) et que si le mois correspond à des HE (étape 2).

Le résultat de ce traitement n'est malheureusement pas à la hauteur des attentes en termes de classification des points. En effet, seulement 26 points ont été validés comme étant des très hautes eaux (supérieur à la décennale humide), dont seulement 8 en fiabilité « faible ». Cette étape a malgré tout permis de vérifier la cohérence hydrogéologique des résultats obtenus et démontre qu'une surcote doit bien être utilisée afin de ramener les points en situation de très hautes eaux. Il est donc nécessaire de mettre au point un calcul d'estimation de la cote piézométrique de période de retour 100 ans permettant d'utiliser un maximum des données disponibles, à l'instar de la méthode utilisée pour l'élaboration de la carte nationale.

4.3. ESTIMATION DE LA COTE PIEZOMETRIQUE MAXIMALE T100

4.3.1. Points d'eau à fiabilité moyenne à forte

Le calcul de la cote piézométrique maximale de période de retour 100 ans pour les points de fiabilité moyenne à forte utilise ici la même méthode que pour les points fiables de la carte nationale (Brugeron *et al.*, 2018). Le détail du calcul est présenté dans le rapport BRGM/RP-65452-FR.

4.3.2. Points d'eau à fiabilité faible

Le travail avec les statistiques IPS et ESTHER n'étant pas suffisant pour qualifier l'ensemble des points de fiabilité faible, le calcul des $Z_{maxT100}$ des points peu fiables restants se fait avec une logique similaire à celle de la carte nationale (Brugeron *et al.*, 2018), à savoir au travers d'une association préalable entre ces points et des points fiables à proximité.

Au préalable, chaque point, qu'il soit de fiabilité faible, moyenne ou forte, est associé au bassin versant dans lequel il se trouve, ainsi qu'au cours d'eau le plus proche. Contrairement à la méthode utilisée pour la carte nationale, le cours d'eau associé n'est pas forcément situé dans le même bassin versant que le point d'eau. En effet, une rapide analyse des résultats de la méthode nationale a montré que certaines associations pouvaient être inadéquates. C'est le cas notamment pour des régions planes comme la plaine d'Alsace, au sein desquelles les crêtes topographiques sont très peu marquées (Figure 15).

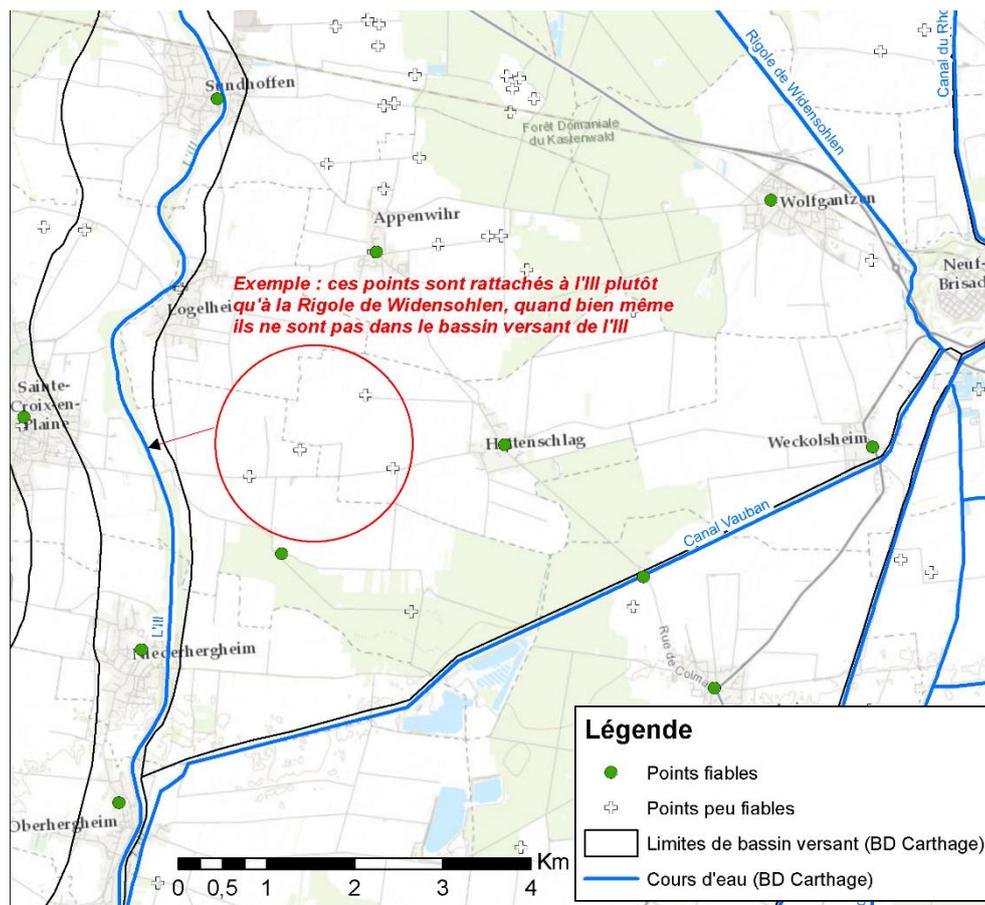


Figure 15 Zoom sur des points associés à un cours d'eau n'appartenant pas au même bassin versant

Le travail de rattachement comprend les différentes phases successives suivantes :

Phase 1 :

Les points peu fiables sont rattachés en fonction du critère « **proximité au même cours d'eau** » :

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

Au total, 476 des 588 points peu fiables ont été associés en phase 1.

Phase 2 :

Les points peu fiables non rattachés après la phase 1, sont rattachés en fonction du critère « points proches de cours d'eau différents mais appartenant au même bassin versant » (81 points concernés) :

- Pour chaque point peu fiable, recherche de l'ensemble des points fiables situés à une distance inférieure à 5 km et dans le même bassin versant,

- Comparaison des niveaux piézométriques moyens de chaque point fiable avec le niveau piézométrique moyen du point peu fiable,
- Rattachement du point peu fiable au point fiable ayant le niveau piézométrique moyen le plus proche.

Au total, 81 des 588 points peu fiables ont été associés en phase 2.

Phase 3 :

Les points peu fiables non rattachés après les phases 1 et 2, sont rattachés en fonction du critère « point fiable le plus proche ».

Pour chaque point peu fiable est recherché le point fiable le plus proche, qui sera donc forcément dans un autre bassin versant et associé à un autre cours d'eau.

Au total, 31 des 588 points peu fiables ont été associés en phase 2.

4.3.3. Comparaison de ces associations avec la sectorisation de la nappe d'Alsace réalisé par Urban *et al.* (2010)

Dans un contexte d'optimisation du réseau de surveillance des eaux souterraines, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et la Région Alsace ont demandé en 2010 au BRGM de travailler sur la définition d'un réseau piézométrique minimal de référence devant rester pérenne en Alsace.

Ce travail a porté sur trois aspects complémentaires :

1. Réaliser une étude historique de l'évolution du réseau ;
2. Établir un bilan des usages actuels et de ceux souhaités pour l'avenir ;
3. Déployer une méthodologie qui aboutira à une proposition de réseau optimisé.

Le résultat de cette démarche a abouti à la délimitation de **42 zones homogènes de complexité différente couvrant la nappe d'Alsace** et une partie des aquifères associés, dont la formation plio-quadernaire de Haguenau-Riedseltz (Figure 16). Deux éléments d'appréciation de la complexité de chaque zone ont été déterminés. Le battement et le gradient hydraulique ont chacun été associés à une échelle de valeur pour l'ensemble de l'aire d'étude.

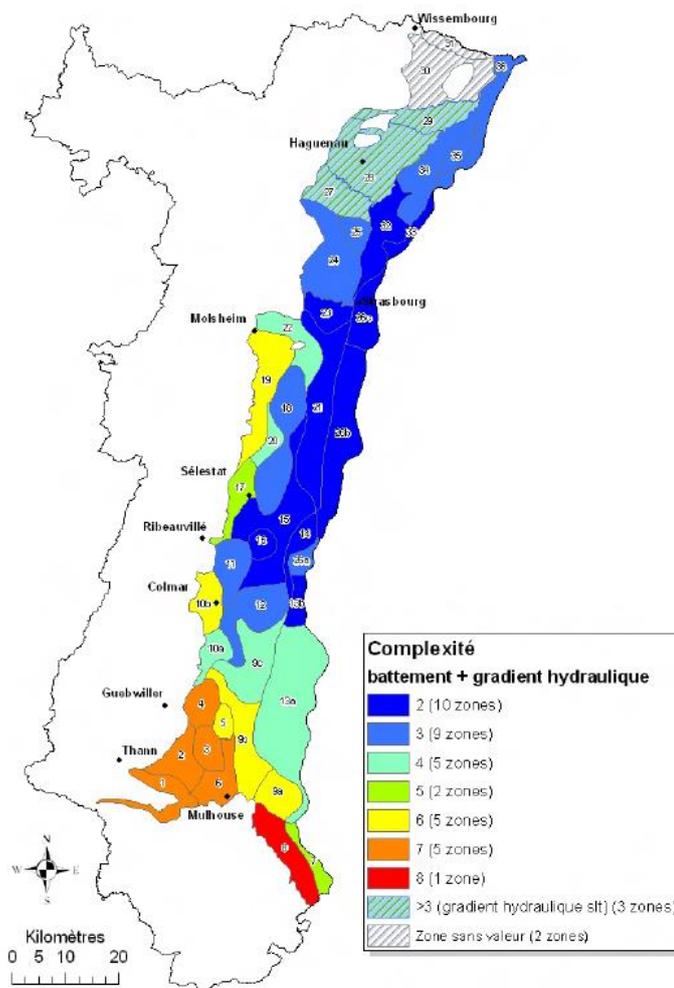


Figure 16 Représentation des zones homogènes selon leur complexité, combinaison des critères « battement moyen » et « gradient hydraulique » (Urban et al., 2010)

Il est à noter que ce travail de sectorisation s’est appuyé sur le croisement de plusieurs sources d’informations :

- une cartographie issue de l’analyse statistique ACP sur les chroniques longues des piézomètres du réseau APRONA captant la nappe d’Alsace (Longuevergne, 2006) ;
- la cartographie issue de la mise à jour du référentiel hydrogéologique BDLISA pour la région Alsace (Urban et al., 2010) ;
- une cartographie des zones de nappes sub-affleurantes (cartographie de remontée de nappe inférieure à 2 Mètres, cartographie DIREN) ;
- les limites hydrographiques (banque de données BD Carthage) ;
- une analyse des battements (cartographie issue du traitement statistique réalisé par l’APRONA en 2002-2003) ;
- les isopièzes 1991 en basses eaux de la nappe d’Alsace (Cartographie APRONA).

Cette sectorisation montre que le comportement de la nappe d’Alsace n’est pas véritablement homogène, avec des battements, un gradient et des apports extérieurs qui diffèrent selon où l’on se trouve.

Le travail d’association entre points fiables et peu fiables décrits dans les chapitres précédents a donc été comparé à cette sectorisation afin de vérifier leur pertinence vis-à-vis des

caractéristiques de la nappe, changeantes d'un secteur à l'autre. Chaque point fiable a ainsi été rattaché à la zone homogène tirée des travaux de 2010, puis l'ensemble des points peu fiables associés à ces points fiables a été identifié (Figure 17). Un code couleur unique a été appliqué par zone de manière à faciliter la comparaison avec ces secteurs homogènes.

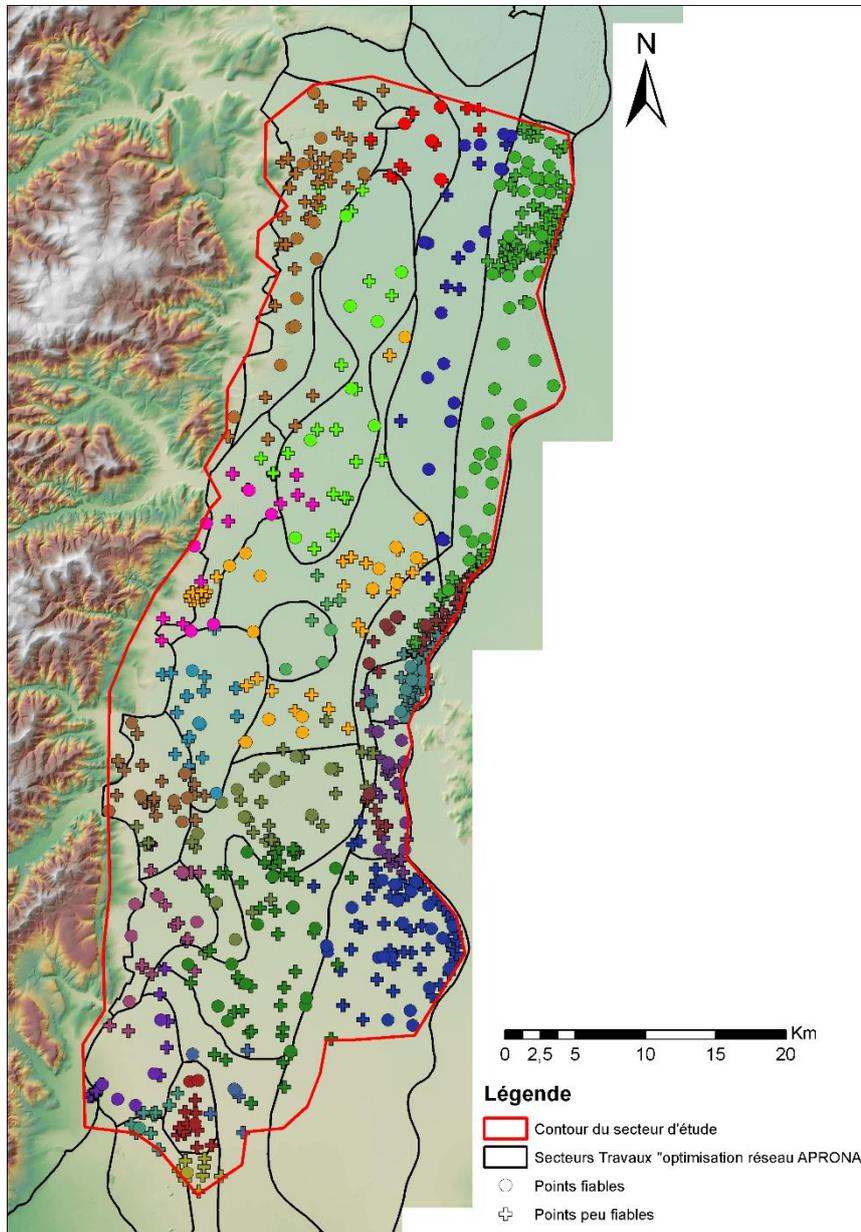


Figure 17 Localisation des groupes de points fiables / peu fiables et comparaison avec la sectorisation réalisée par Urban et al. (2010)

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

En conclusion, les associations réalisées se retrouvent au sein de secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques et temporelles de la nappe captée. Ce qui nous permet de valider les deux estimations, proposées dans le chapitre suivant, des cotes piézométriques extrêmes (période de retour à 100 ans) pour ces points peu fiables.

4.3.4. Calcul du « ZmaxT100V2 » pour les points peu fiables

L'objectif est de trouver une méthode d'estimation du niveau piézométrique pour un événement extrême plus élaboré que celle utilisée pour la carte nationale. L'idée est toujours d'ajouter une correction à la cote piézométrique maximale observée du point peu fiable mais d'affiner un peu ce calcul qui pouvait être trop pessimiste dans la méthode nationale.

Partant du postulat que l'essentiel des points peu fiables sont rattachés à des points fiables au sein d'une même zone homogène (cf. § 4.3.3) ; il est supposé un comportement hydrogéologique homogène et synchrone de ces points respectifs.

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

La nouvelle formule proposée pour l'estimation du Zmax de période de retour 100 ans pour les points peu fiables s'écrit comme suit :

$$Z_{max}(T100)_{V2\text{-fiable}} = Z_{max}(T0)_{\text{-fiable}} + (Z_{max}(T100) - Z(T0))_{\text{+fiable}} \times \frac{(Z_{max} - Z_{min})_{\text{-fiable}}}{2 \times (Z_{max} - Z_{moy})_{\text{+fiable}}}$$

avec :

- **Zmax(T0)_{-fiable}** = Cote piézométrique maximale du point peu fiable
- **Zmax(T100)_{+fiable}** = Cote piézométrique extrême du point fiable associé
- **Z(T0)_{+fiable}** = cote piézométrique du point fiable à la date T0.
- **Zmax** = Cote piézométrique maximale mesurée du point fiable associé
- **Zmoy** = Cote piézométrique moyenne du point fiable associé

La Figure 18 illustre à partir des chroniques piézométriques, d'un point peu fiable et de son point fiable associé, le calcul de la cote piézométrique extrême des points peu fiables. A partir du point

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

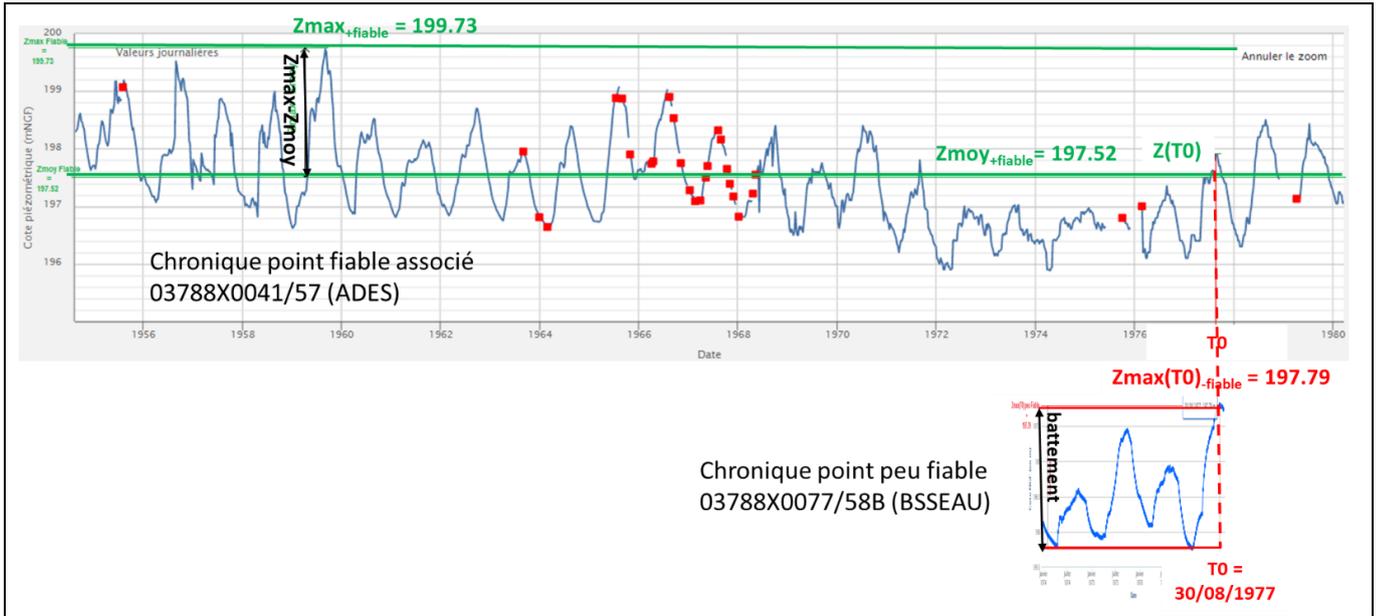


Figure 18 Exemple des piézomètres 03788X0041/57 (ADES), point fiable, en haut, et 03788X0077/58B (BSSEAU), point peu fiable associé, en bas.

Pour que ce calcul soit réalisé, il est nécessaire de pouvoir calculer un **battement de nappe** pour le point peu fiable ($(Z_{max} - Z_{min})_{-fiable}$). Une nouvelle sélection des points a ainsi été faite à partir des points ayant **au minimum 1 an de chronique**.

Après cette double sélection, le jeu de données final sur la zone se compose donc de :

- 280 points « -fiables »
- 210 points « +fiables »

Cela réduit considérablement le nombre de point peu fiables de 588 à 280 mais la répartition spatiale des points reste acceptable pour les travaux d'interpolation qui s'en suivront.

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

5. Campagne et enquête de terrain

L'objectif de cette phase de l'étude est d'augmenter le nombre de points utilisables et d'en fiabiliser la qualité afin d'optimiser l'échelle de rendu de la carte.

Une enquête auprès des habitants ainsi que des services de l'État et des collectivités a été lancée afin de réaliser un inventaire des phénomènes d'inondation connus et d'obtenir des informations complémentaires (mesures de niveaux à des dates précises, hauteurs d'eau estimées, durée de l'épisode...). La rencontre des particuliers et des services de l'état (Mairies) s'est avérée décisive pour connaître les secteurs les plus touchés historiquement. Mais également parfaire la compréhension du système de canaux anthropiques qui ont modifié le comportement des écoulements d'eau souterraine dans toute la région.

Les retours de l'enquête ont apporté 126 réponses avec :

- 51 cas d'inondations,
- 7 inondations dues à des orages (ruissellement et épisodes pluvieux rapides et courts),
- 44 inondations dues vraisemblablement à une remontée de nappe.

Il faut noter que la diffusion du questionnaire d'enquête s'est fait via affichage sur des panneaux d'informations des mairies, par newsletter ou encore par nouvelles sur le site internet des mairies possédant une page internet. Mais le nombre de retours était suffisant pour compléter 5 jours de campagne de nivellement et a tout de même permis de couvrir relativement bien la zone d'étude.

La campagne de terrain a eu pour objectifs :

- De mener des investigations pour déterminer si l'inondation par remontée de nappe est avérée (eau claire, venant du sol, épisode relativement long...) et mesurer la cote NGF de l'eau (hauteur d'eau déclarée par les particuliers),
- De prendre des mesures de nivellement à l'aide d'un GPS différentiel au droit des parcelles ayant subi une inondation par remontée de nappe. Ceci permettant d'estimer au mieux la cote NGF de l'eau lors des inondations connues,
- D'informer les particuliers et les collectivités du travail du BRGM et de la nature de cette étude.

Au total, 37 mesures ont été réalisées dans différentes communes : Ensisheim pour l'extrême sud de la zone d'étude, Saasenheim au centre ou encore Plobsheim au nord, sont les communes pour lesquelles sont revenues le plus de réponses à l'enquête.

Localisation des mesures effectuées lors de la campagne de nivellement

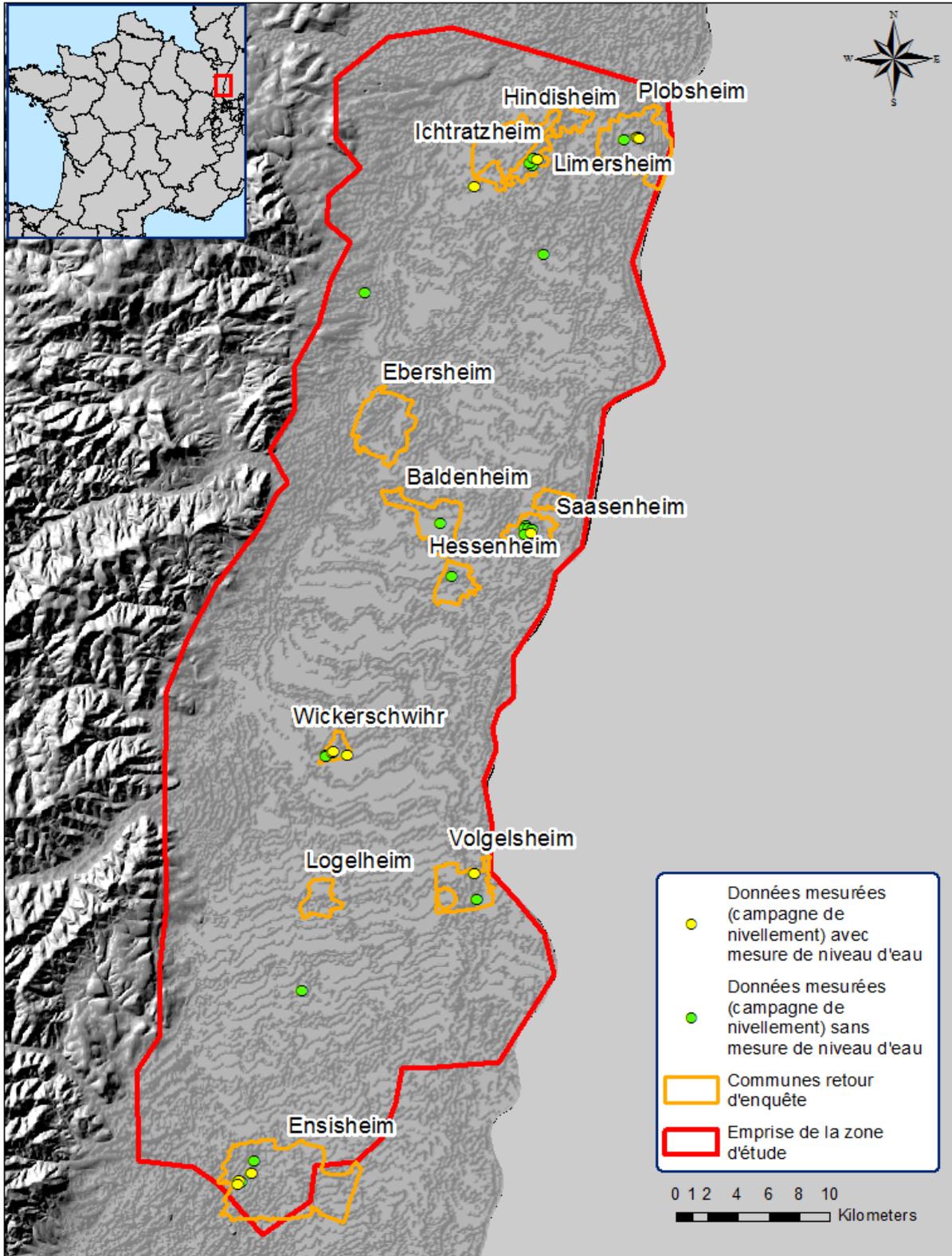


Figure 19 Données mesurées lors de la campagne de nivellement

Le GPS utilisé est un GPS différentiel qui permet d'obtenir une mesure en X, Y et Z précise jusqu'au centimètre, en fonction de plusieurs paramètres propres à son principe. Pour effectuer la mesure, le matériel se base sur une couverture satellite maximale (jusqu'à 19 satellites lors des mesures pour cette étude) et sur un réseau de stations fixes de référence. L'outil utilise l'écart de la position mesurée avec des stations fixes connues pour améliorer la précision du signal et donc de la mesure. Plus le terrain est dégagé, meilleure sera la couverture satellite. Lors de cette campagne, la précision des mesures s'est située entre 1 et 4 centimètres.

Les mesures de GPS différentiel faites lors de la campagne de nivellement ont été comparées aux Modèle Numérique de Terrain au pas de 25 mètres (BDAlti, IGN) et au pas de 5 mètres. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

	Différence entre mesures GPS et MNT 5m (m)	Différence entre mesures GPS et MNT 25m (m)
Minimum	-1.837	-2.219
Maximum	0.910005	0.53
Moyenne	-0.271352	-0.794595
Ecart-type	0.558407	0.66405

Histogramme

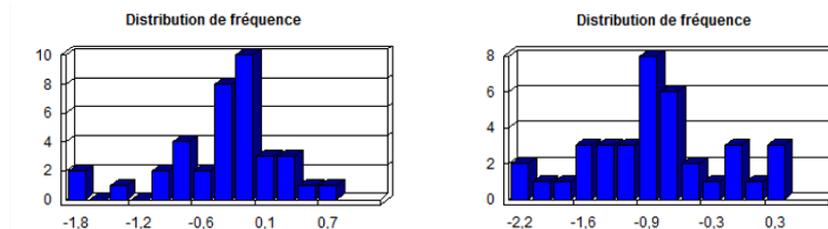


Tableau 4 Statistiques des différences entre les mesures de terrain avec le GPS différentiel et les MNT 5m et MNT 25m

En moyenne, la différence entre les mesures GPS et les MNT est relativement bonne : environ 27 cm pour le MNT au pas de 5 m et environ 80 cm pour celui au pas de 25 m, avec des écarts-types respectifs de 0.56 m et 0.66 m.

Pour 17 points sur les 37, il a été possible de mesurer une valeur de la cote de l'eau, des suites d'une inondation déclarée par le particulier. Plusieurs possibilités sont envisagées pour valoriser ces données : ajouter les 17 points au jeu de données servant à interpoler la surface piézométrique maximale et utiliser les 20 restants comme élément de validation de l'interpolation, pour contrôler la validité du résultat ; ou bien tous les utiliser comme élément de validation. C'est la deuxième option qui a été choisie.

6. Utilisation et traitement de l'imagerie satellitale

L'objectif est de détecter, pour des périodes de temps bien définies, des évolutions sur des images satellitaires pouvant être associées à l'apparition d'étendues d'eau en surface. Cette technique permet de cartographier, en première approche, les secteurs concernés.

6.1. CHOIX DE L'ÉVÉNEMENT À TRAITER

Afin de choisir l'événement à traiter par l'imagerie satellitale, il a été sélectionné un certain nombre de piézomètres (ADES et BSSEAU) pour lesquels un potentiel débordement aurait eu lieu. Une localisation de ces piézomètres et la date de l'événement ont été extraites comme informations à partir des bases de données.

Les dates qui en sont ressorties sont : 28/06/2016, 30/07/2014, 17/02/2014, 21/10/2013, 12/08/2007, 04/10/2006, 24/03/2001 à 04/04/2001, 25/05/1999 et 30/01/1995.

L'événement le plus récent a été choisi car à partir de 2015, les images SAR C Band Sentinel 1 et Sentinel 2 optique sont disponibles à des fréquences plus courtes, tous les 6 jours, avec une résolution de 10 mètres ; ce qui est adapté pour ce genre de traitement.

6.2. CONTRAINTES

Un inconvénient de la technique concerne la limitation du signal SAR à pénétrer dans des sols à fort couvert végétal (forêts, etc.). Il faut donc s'attendre à une sous-estimation partielle du nombre et / ou de l'extension des régions inondées. Il convient également de garder à l'esprit que, compte tenu de la résolution spatiale moyenne des données SAR utilisées, les sites inondés d'une superficie inférieure à 100 m² pourraient être difficiles à identifier. De plus, toute activité d'irrigation entreprise pendant la période d'observation est indissociable des inondations réelles.

6.3. RESULTATS DU TRAITEMENT DE L'IMAGERIE SATELLITALE

L'objectif de l'étude était donc d'utiliser des images satellitaires et des techniques de traitement pertinentes pour cartographier les régions touchées par l'élévation du niveau de la nappe phréatique entraînant des inondations dans la grande région d'Alsace au cours de la période allant de mai à juin 2016.

Aux fins de l'étude, nous avons utilisé les données SAR (en français RSO: radar à synthèse d'ouverture) librement disponibles de la mission Copernicus Sentinel-1. Il s'agit par défaut d'images couvrant 250 km de fauchée avec une résolution d'environ une quinzaine de mètres. Plus précisément, des produits GRD (Sentinel-1 Ground Range Detected) (avril à juillet 2016) ont été analysés pour identifier les modifications de la rétrodiffusion RSO attribuées à la présence d'eau de surface. Le traitement impliquait un étalonnage radiométrique, un filtrage et une analyse statistique de la pile de données, tandis que la résolution spatiale finale (taille en pixels) des sorties orthorectifiées était de 10 m.

La représentation spatiale des régions potentiellement inondées pour la période de mars à août 2016 a été obtenue en combinant la moyenne, le minimum et la différence de rétrodiffusion (Min-Max) sous forme de canaux dans un composite RVB (Figure 30). Les zones en bleu indiquent les zones où l'eau est présente, alors que l'intensité du bleu peut être associée au pourcentage

de contenu en eau dans chaque pixel. D'après l'analyse temporelle de l'ensemble de données, il semble que des inondations se soient produites dans la zone d'intérêt entre le début et la fin juin 2016.

Pour la cartographie des zones inondées, deux approches ont été suivies: i) une délimitation précise par interprétation visuelle des résultats SAR (Figure 30) et ii) par extraction semi-automatique à l'aide de la classification par images (algorithme de classification ISODATA) (Figure 31). En ce qui concerne la cartographie automatique, un post-traitement, comprenant plusieurs procédures de nettoyage, a été nécessaire pour compenser les fausses alertes. Dans le cadre de la classification des images, les masses d'eau permanentes ont également été distinguées des zones inondées.

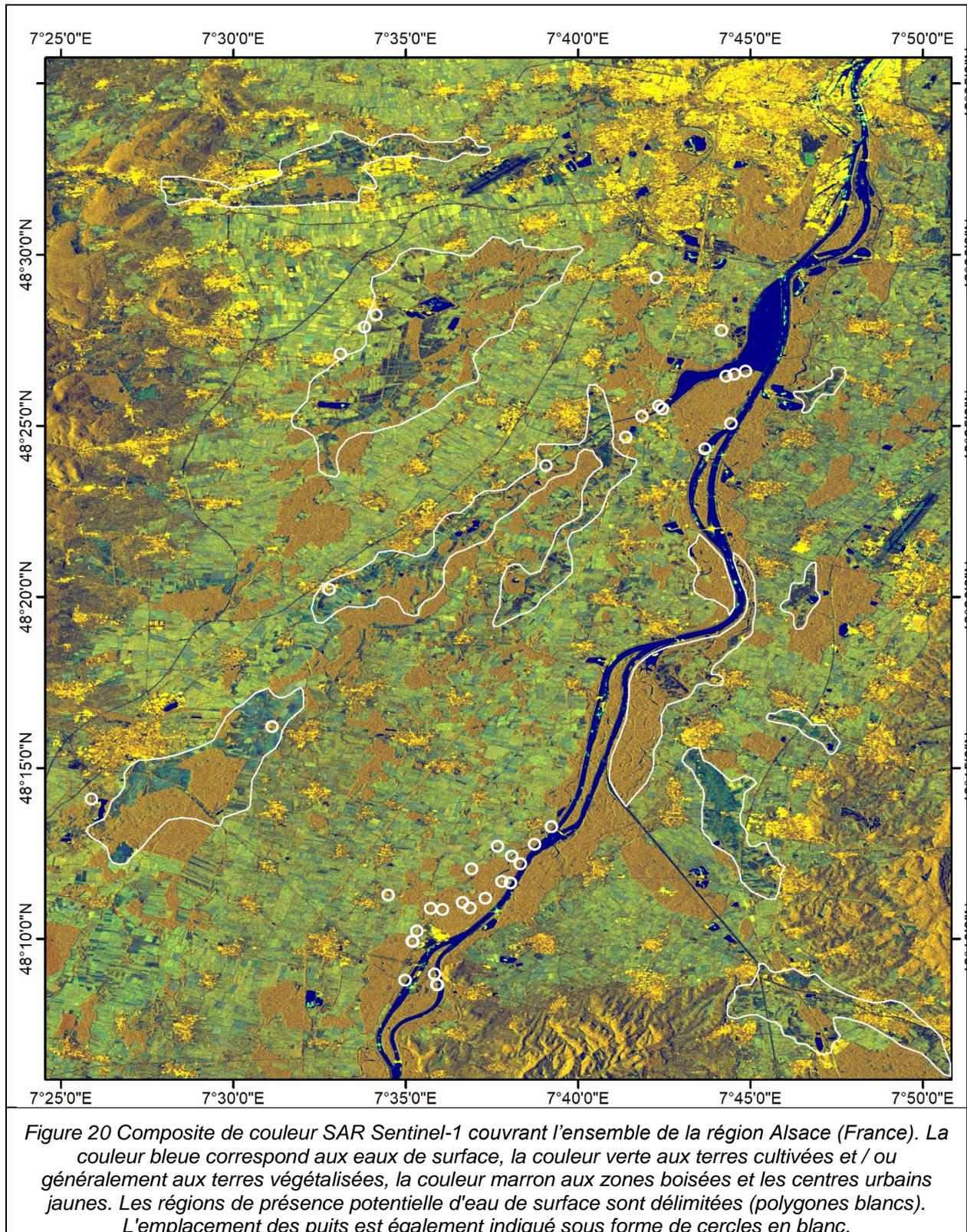
Les résultats par interprétation visuelle et la classification semi-automatique semblent globalement compatibles. On notera que la cartographie automatique des zones inondées ne peut pas prendre en compte les eaux recouvertes de végétation. Ainsi, dans ce cas, l'interprétation visuelle donne de meilleurs résultats, car il est possible de relier des régions voisines avec une teneur en eau accrue.

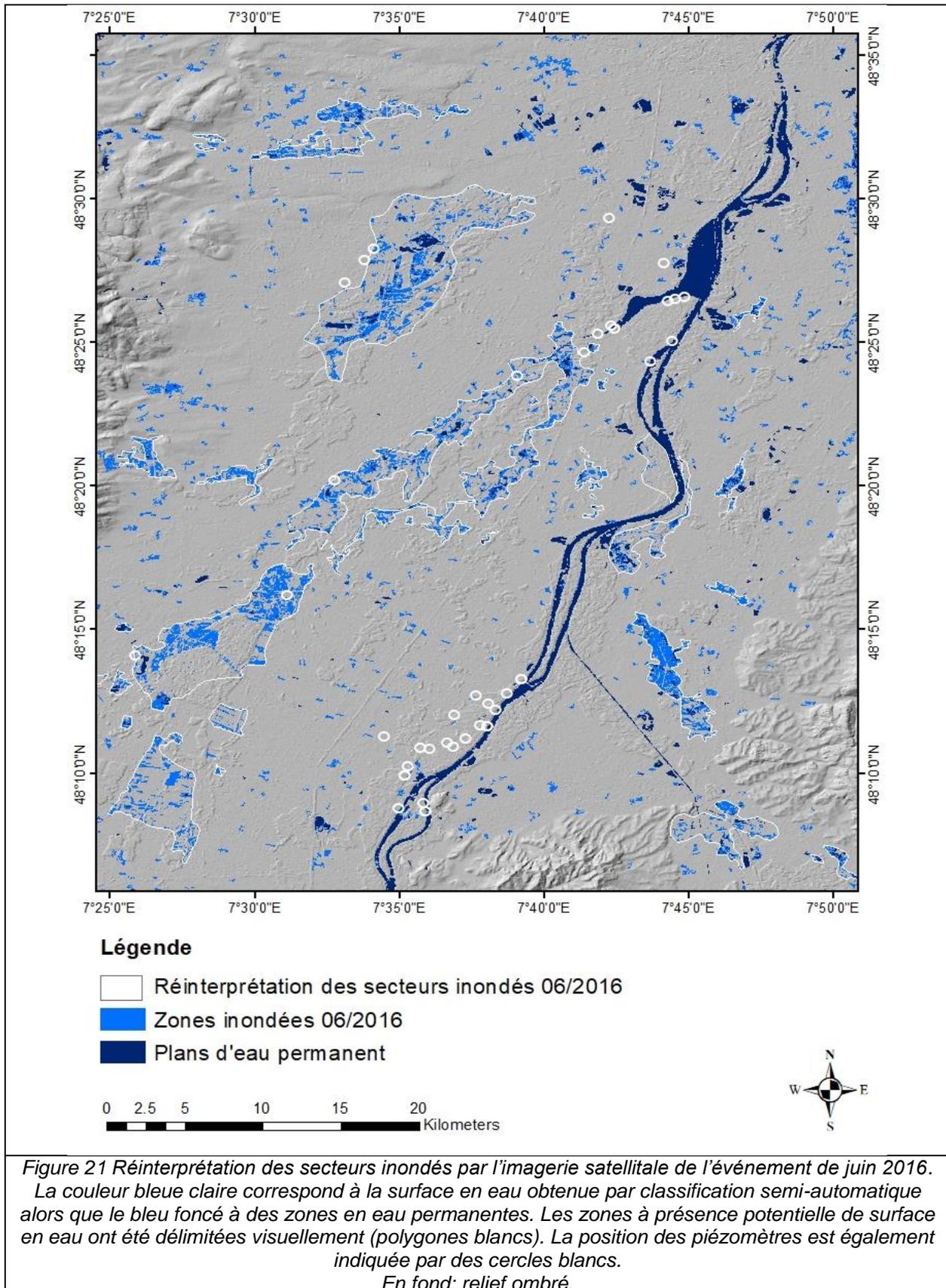
L'utilisation des données RSO par satellite pour la cartographie des inondations provoquées par les eaux souterraines est prometteuse, en particulier lorsqu'il manque d'autres sources d'informations in situ. Les régions touchées ainsi que le comportement temporel des phénomènes peuvent être abordés.

Enfin, il convient de noter qu'une compatibilité totale avec les résultats de la modélisation ne peut pas être obtenue car ce qui est cartographié par télédétection ne porte que sur une période très spécifique (mai à juin 2016), alors que les résultats de la modélisation ne font pas référence à un événement particulier. Plus précisément, il y a des régions de la partie centre-sud de la région d'intérêt où la télédétection n'a révélé aucune zone inondée. En fait, bien qu'il existe de nombreux sites d'observation in situ (piézomètres), la plupart des terres sont très végétalisées, ce qui limite la télédétection.

L'utilisation de systèmes SAR spatiaux en bande L capables de pénétrer dans le couvert forestier ou de données SAR à très haute résolution est recommandée dans de tels cas, bien qu'un coût d'acquisition de ces données commerciales doit être envisagé.

Les résultats obtenus vont être utilisés comme données de validation de la carte réalisée.





7. Analyse comparative des modèles numériques de terrain

7.1. OBJECTIF

L'objectif de cette analyse est d'essayer de caractériser la précision du MNT fourni par l'IGN (@BDAlti).

En effet le MNT maillé distribué par l'IGN fournit l'altitude du sol avec une marge d'erreur qu'il est difficile d'apprécier facilement. L'IGN utilise une combinaison de méthodes pour construire ses MNT (parmi lesquelles des levés lidar, de la restitution photogrammétrique, des MNT fournis par des partenaires de l'IGN, d'anciens MNT, ...), mais ne fournit pas de grille d'erreur permettant de quantifier, pour chaque maille, l'ordre de grandeur de la précision de l'altitude sol.

7.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE DU MNT

Les données utilisées sont :

- Le MNT de l'IGN, à différentes mailles
- Des points nivelés avec précision, fournissant l'altitude sol

En comparant ces différentes sources d'information on peut arriver à quantifier les incertitudes attachées aux MNT testés.

7.2.1. MNT testés

2 types de MNT ont été analysés :

- Le MNT maille 5 m découpé sur la zone d'étude
- Le MNT maille 25 m découpé sur cette même zone

Ces MNT fournissent l'altitude du nœud situé au centre de la maille. D'après les informations recueillies auprès de l'IGN, ces MNT sont obtenus par décimation d'un MNT sous-jacent à maille 1m, lui-même calculé par différentes méthodes (point le plus proche dans les zones où du lidar est disponible, interpolation des courbes de niveau obtenues par photogrammétrie, etc...)

7.2.2. Points nivelés

Deux types de points ont été utilisés :

- Les points de nivellement, fournis par l'IGN
- Des points nivelés mesurés par le BRGM

a) *Points de nivellement IGN*

Les points de nivellement de l'IGN sont des points nivelés avec une précision altimétrique au moins centimétrique (<https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>). Il s'agit le plus souvent de points mesurés sur des églises, monuments, bord de route, etc... Le fichier transmis par l'IGN fournit l'altitude du repère de nivellement, ainsi que la hauteur du point de nivellement par rapport au sol. Par différence on obtient l'altitude du sol. Le fichier fourni par l'IGN comprenait plus de 1132 points sur la zone d'intérêt. Beaucoup de ces points n'ont pas été

utilisés car non représentatifs de l'altitude du sol (points sur des ponts, points dont on ne connaissait pas la hauteur du repère par rapport au sol, etc...). Au final seuls 337 ont pu être exploités (voir localisation Figure 22).

Précision importante : les coordonnées X, Y de ces points sont arrondies (par l'IGN) à 10m près dans ce fichier. La localisation planimétrique n'est donc pas parfaite.

b) *Points nivelés par le BRGM*

41 points ont été levés au GPS différentiel (voir localisation Figure 22).

Ces points correspondent à des sites où des débordements de nappe ont été observés par le passé. Ils ont été levés dans l'objectif de servir au calage du calcul des zones de débordement de nappe, mais on les a également utilisés pour l'analyse de précision du MNT.

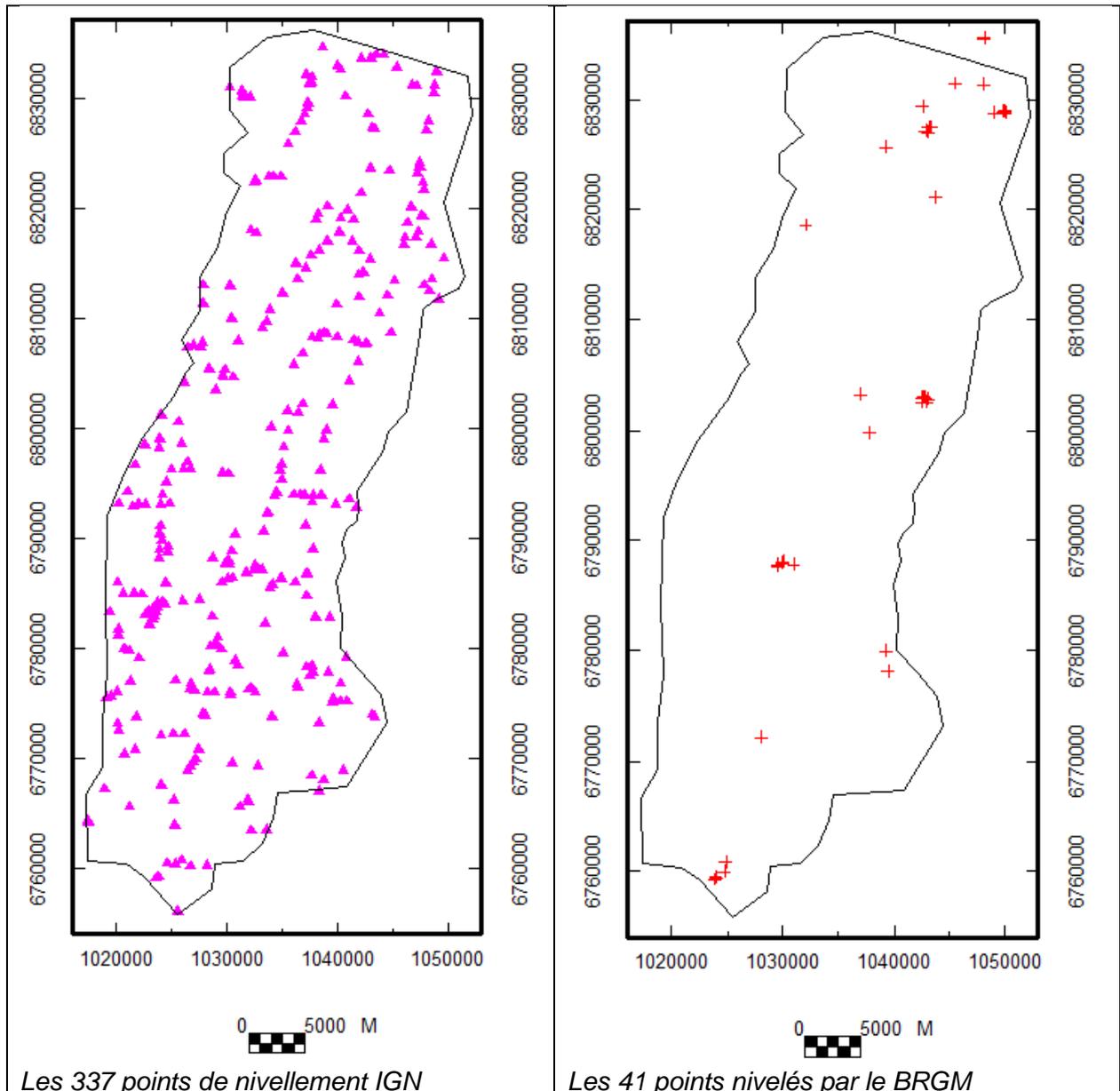


Figure 22 Localisation des points nivelés pour la comparaison avec les MNT IGN

7.3. RESULTATS

7.3.1. Comparaison des MNT 5m et 25m entre eux

Ce test consiste à comparer la valeur de l'altitude (au centre de la maille) fournie par le MNT 25m à l'altitude au même point fournie par la grille à la maille 5m

Les résultats figurent dans le Tableau 5 ci-dessous.

Variable	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Z 5 m	141.9 m	410.69 m	182.72 m	25.52 m
Z 25 m	143.0 m	403.00 m	183.19 m	25.38 m
Différence Z25m – Z 5m	-31.6 m	27.9 m	+0.47 m	0.72m

Tableau 5 Différence entre le MNT 5 m et le MNT 25m de l'IGN sur la zone d'étude

Le principal enseignement de ce tableau est qu'il semble exister un biais global entre le MNT 25m et le MNT 5m : le MNT 25m est en moyenne près de 47 cm au-dessus du MNT 5m.

Cette différence est surprenante et pour l'instant inexpiquée. Peut-être provient-elle d'une méthode différente ou de différences dans les données utilisées pour construire ces MNT. L'IGN peut sans doute fournir des éléments de réponse.

La différence entre les 2 MNT peut même atteindre environ 30 m localement.

La carte des différences (Figure 23) montre des bandes successives vert-jaune-orange probablement liées au fait que la valeur du MNT dans la maille de 25 m est arrondie au mètre alors que celle du MNT 5 m comporte 2 décimales.

Ainsi une cote MNT=140.44 dans le MNT 5 m est probablement retranscrite en 140 dans le MNT 25 m, alors qu'une cote de 140.54 se traduira réciproquement par une valeur de 141m dans le MNT 25 m. De ce fait on devrait observer une majorité de différences entre -0.5 et +0.5m (couleurs jaune et verte de l'échelle de couleur ci-dessous).

A ceci se superpose la différence moyenne de 0.47m entre le MNT 25m (plus haut) et le MNT 5 m, ce qui décale vers le jaune et l'orange les différences observées.

Les différences supérieures à +/- 1m (couleurs rouge et bleu foncé sur la carte) s'observent préférentiellement :

- en bordure Ouest du domaine : ceci est probable dû au plus fort relief,
- dans une zone au Centre-Est et en bordure Est de la zone d'étude.

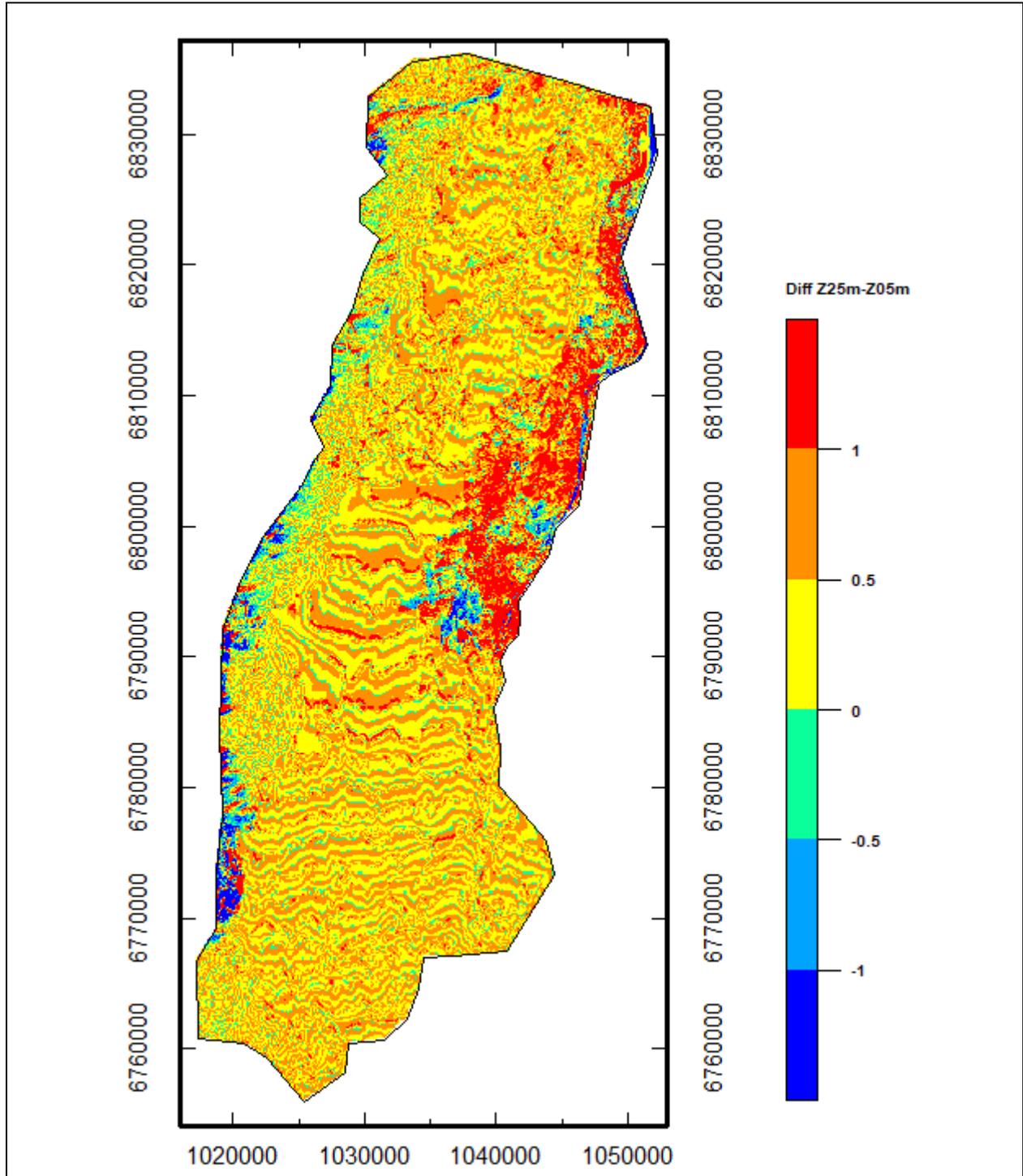


Figure 23 Carte des différences entre le MNT 5 m et le MNT maille 25m (Z 25m – Z 5m)

7.3.2. Comparaison des MNT 5m et 25m aux points nivelés

Les MNT IGN 5 m et 25 m sont comparés aux 41 points nivelés par le BRGM et aux 337 points de nivellement de l'IGN.

- **Comparaison des MNT 5m et 25m aux 41 points nivelés par le BRGM**

Les statistiques sur les différences observées sont présentées Tableau 6.

Les écarts sont en moyenne de 0.16 m pour le MNT 5 m et 0.70 m pour le MNT 25 m. Ils peuvent atteindre jusqu'à 2.65 m.

L'écart-type des écarts est comparable (légèrement plus faible dans le cas du MNT 5 m).

Jeu de données	Min (m)	Max (m)	Moy (m)	Ecart-type (m)
Z BRGM (41 points)	142.9	218.7	170.50	23.48
(ZIGN 5m) – (Z BRGM)	-2.65	1.83	0.16	0.79
(ZIGN 25m) – (Z BRGM)	-1.74	2.21	0.70	0.81

Tableau 6 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux 41 points nivelés par le BRGM

- **Comparaison des MNT 5m et 25m aux 337 points de nivellement de l'IGN**

Les statistiques sur les différences observées sont présentées Tableau 7.

Les écarts sont en moyenne de -0.28m pour le MNT 5 m et 0.03 m pour le MNT 25 m. Ils peuvent atteindre jusqu'à 6m56.

Les écart-type des écarts sont comparables (légèrement plus faible dans le cas du MNT 5 m).

Jeu de données	Min (m)	Max (m)	Moy (m)	Sigma (m)
Points de nivellement IGN (337 points)	144.61	268.49	183.70	22.74
(ZIGN 5m) – (Z Pt niv)	-3.54	6.07	-0.28	1.14
(ZIGN 25m) – (Z Pt niv)	-5.12	6.56	0.03	1.25

Tableau 7 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux 337 points de nivellement IGN

- **Comparaison des MNT 5m et 25m aux Zsol des piézomètres**

Le même exercice peut être réalisé pour comparer les MNT IGN aux nivellements des piézomètres « fiables » (Tableau 8) et « peu fiables » (Tableau 9).

Jeu de données	Min (m)	Max (m)	Moy (m)	Sigma (m)
Z Piézomètres fiables (220)	140.2	237.04	178.34	21.53
(ZIGN 5m) – (Z Pt)	-2.8	8.91	-0.1	1.11
(ZIGN 25m) – (Z Pt)	-2.5	9.8	0.46	1.18

Tableau 8 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux Z sol des 220 piézomètres « fiables »

Jeu de données	Min (m)	Max (m)	Moy (m)	Sigma (m)
Z Piézomètres « peu » fiables (280)	141.6	242.3	179.9	20.18
(ZIGN 5m) – (Z Pt)	-9.38	13.31	0.17	2.48
(ZIGN 25m) – (Z Pt)	-9.12	14.25	0.61	2.49

Tableau 9 Comparaison des MNT IGN 5m et 25m aux Z sol des 280 piézomètres « peu fiables »

• Synthèse des comparaisons aux MNT IGN

Sur la base de la comparaison aux 337 points de nivellement de l'IGN, le MNT 25 m paraît meilleur que le MNT 5 m (le biais est quasi nul). Par contre la conclusion inverse peut être tirée de la comparaison aux 41 points nivelés par le BRGM, où le MNT IGN 5 m paraît moins biaisé globalement.

Pour relativiser l'analyse, il faut rappeler que les coordonnées des points de nivellement IGN ne sont connues qu'à 10m près, ce qui rend la comparaison moins « robuste » que dans le cas de points nivelés par le BRGM, qui sont localisés avec une parfaite résolution (centimétrique).

Par ailleurs, si l'on compare les MNT IGN à l'altitude sol (nivelée) des piézomètres « fiables » (Tableau 8), on observe une meilleure correspondance pour le MNT 5 m que pour le MNT 25 m. Les différences d'altitude dans le cas des piézomètres « peu fiables » (Tableau 9) fait apparaître également des résultats meilleurs pour le MNT 5 m, mais avec un écart-type plus fort (plus du double), du fait que le nivellement de certains piézomètres « peu fiables » est de moins bonne qualité.

Les histogrammes des différences entre les MNT 5 m et 25 m d'une part, et les 337 de nivellement de l'IGN montrent que l'erreur sur le MNT est supérieure à +/- 1m dans environ 30% des cas.

En conclusion il apparaît que les MNT 5 m et 25 m sont relativement comparables en terme de précision, avec peut-être un léger avantage pour le MNT 5 m, pour lequel l'écart-type des erreurs est légèrement moins fort. Pour les deux MNT, en moyenne l'erreur sur la cote Z est inférieure à +/- 1m dans 70% des cas, et supérieure à +/- 1 m dans 30% des cas. L'avantage du MNT 5 m réside surtout dans sa résolution spatiale.

Enfin le MNT 25 sur la zone d'intérêt est en moyenne presque 50 cm plus haut que le MNT 5 m. L'explication de ce biais est à demander à l'IGN.

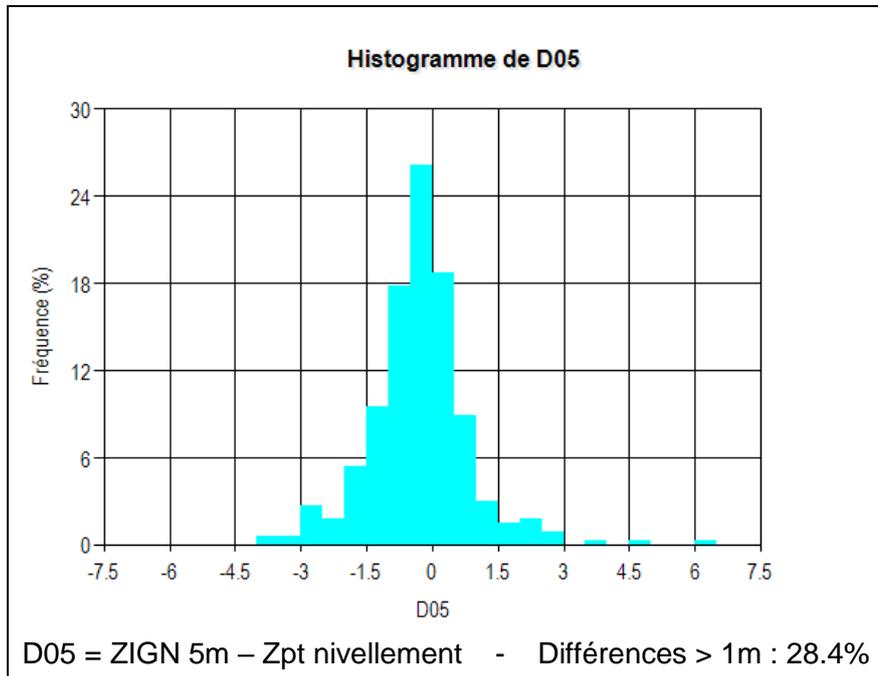


Figure 24 Histogramme des différences entre MNT IGN 5 m et points de nivellement IGN

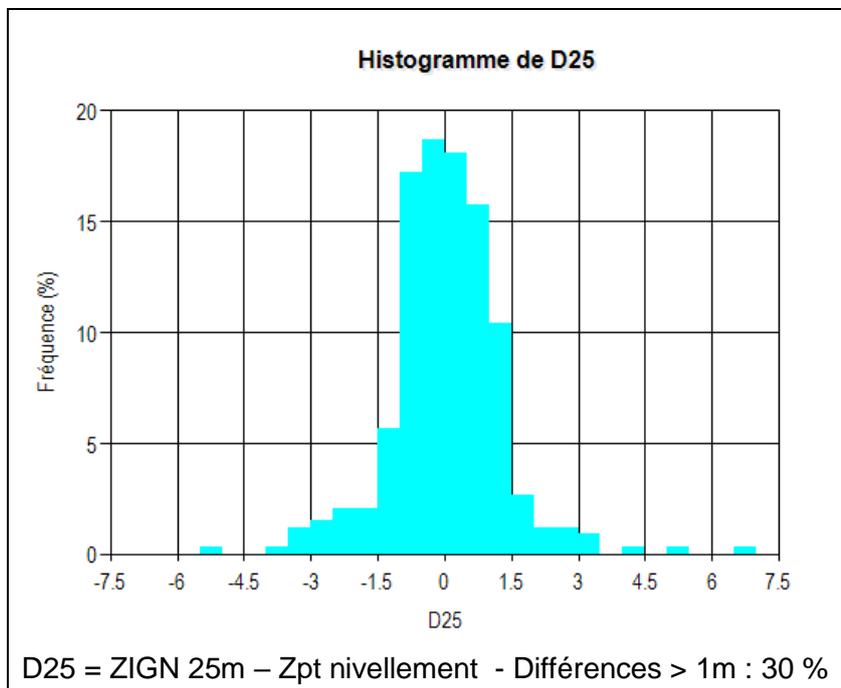


Figure 25 Histogramme des différences entre MNT IGN 25 m et points de nivellement IGN

8. Analyse géostatistique et test d'utilisation des méthodes géostatistiques

8.1. OBJECTIF

L'objectif de cette analyse est de caractériser le niveau piézométrique « maximum » d'un point de vue géostatistique, afin de :

- Choisir les meilleurs paramètres d'interpolation,
- Pouvoir obtenir une carte de l'erreur d'interpolation (du moins de l'écart-type de cette erreur), c'est-à-dire pouvoir caractériser l'incertitude sur la carte du niveau piézométrique maximal (avec période de retour de 100 ans).

8.2. DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

Les données utilisées sont :

- Les cotes piézométriques « maximales » observées sur les chroniques ($Z_{\max i}$) et les cotes corrigées en tenant compte d'une période de retour de 100 ans ($Z_{\max T100}$) des piézomètres jugés « fiables » (210 points)
- Les cotes piézométriques $Z_{\max i}$ et $Z_{\max T100}$ des piézomètres jugés « peu fiables » (488 points avec une valeur de $Z_{\max i}$, dont 280 avec une valeur de $Z_{\max T100}$)

Les deux variables $Z_{\max i}$ et $Z_{\max T100}$ sont analysées mais au final seul la variable $Z_{\max T100}$ est interpolée. Le fait de faire l'analyse sur les 2 variables permet aussi de tester la pertinence de la surcote proposée pour ramener la cote maximale à une période de retour 100 ans.

La localisation des points fiables et peu fiables disposant d'une valeur de $Z_{\max T100}$ est représentée Figure 26 et leur superposition sur la Figure 27.

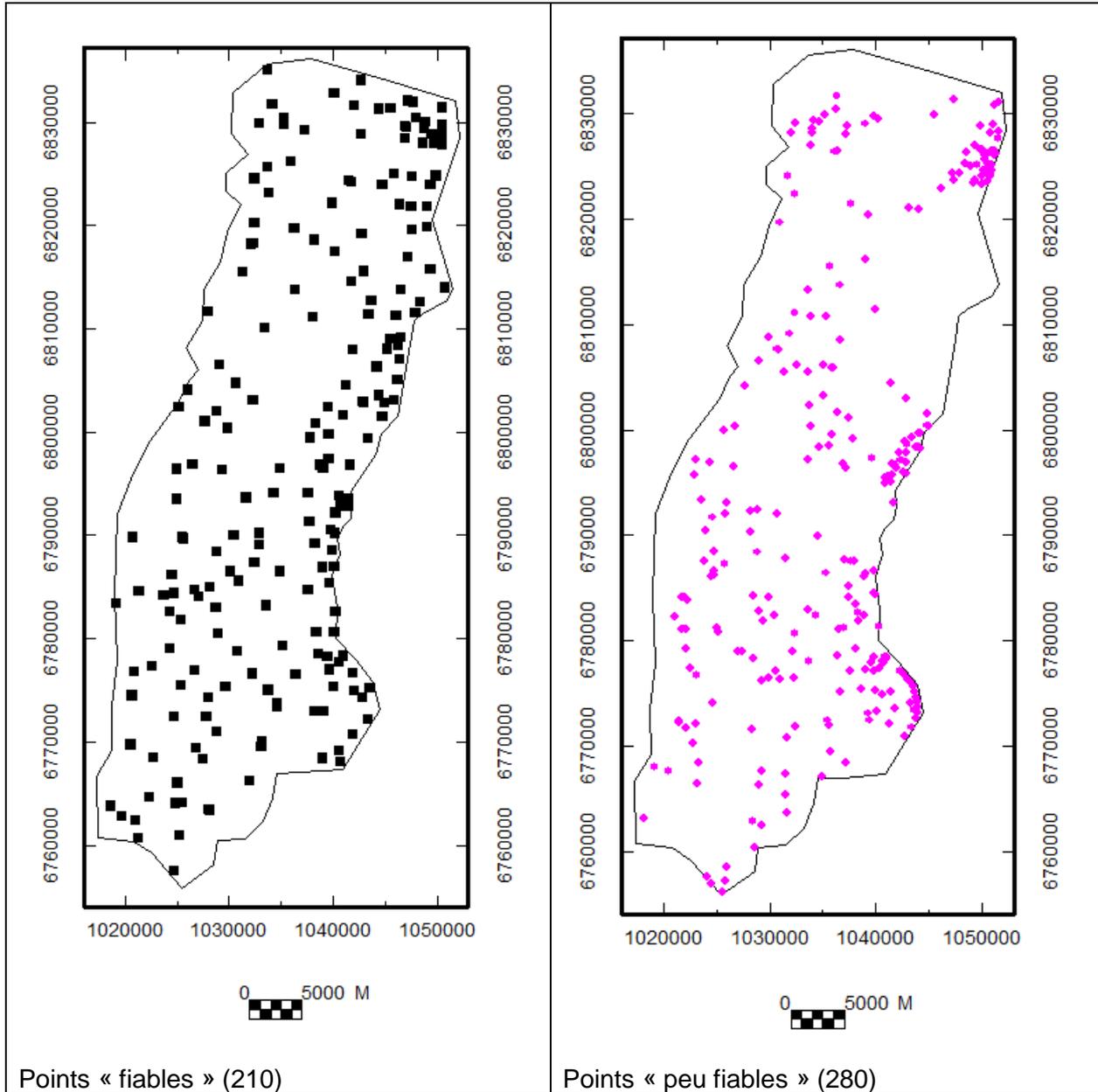


Figure 26 Localisation des piézomètres « fiables » et « peu fiables » disposant d'une valeur de $Z_{maxT100}$

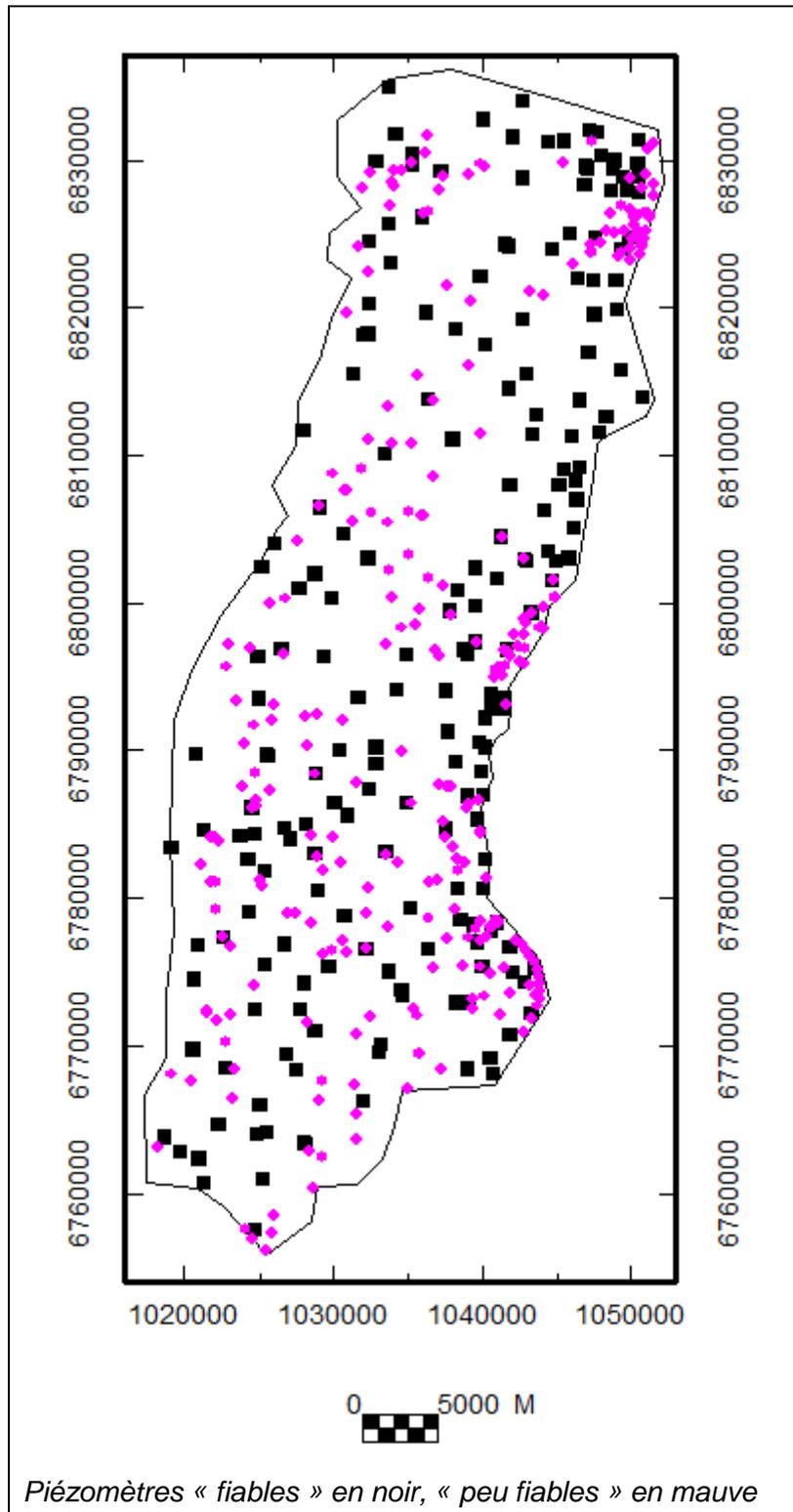


Figure 27 Localisation, en superposition, des piézomètres « fiables » et « peu fiables » disposant d'une valeur de $Z_{maxT100}$

8.3. ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES POINTS « FIABLES »

Les variogrammes des cotes piézométriques « Zmaxi » et « ZmaxT100 » sont calculés :

- A échelle globale au pas de 2 000 m,
- A échelle locale au pas de 200 m.

Les variogrammes des variables Zmaxi et ZmaxT100 sont très proches et traduisent un comportement non stationnaire au sens géostatistique : le variogramme augmente avec la distance, sans atteindre un palier (Figure 28). Ceci s'explique bien évidemment par l'altitude constamment décroissante de la surface piézométrique de l'amont vers l'aval.

Les variogrammes de Zmaxi et ZmaxT100 montrent des valeurs de variogramme différentes selon la direction de calcul (Figure 28). Aux « grandes » distances (au-delà de 15km), on observe un contraste entre les valeurs calculées selon la direction Nord65°Est (valeurs du variogramme maximales) et selon la direction Nord 155° (variabilité minimale). Aux « petites » distances (<5km), la variabilité maximale est observée selon la direction N110 et N20. Ces comportements sont évidemment liés aux axes de drainage de la nappe et aux directions des isopièzes. Mais comme ces axes tournent selon qu'on se situe en bordure Ouest ou Sud, ou dans la majeure partie de la plaine, la résultante fournit le variogramme observé Figure 28. Ce type d'anisotropie « tournante » étant difficile à modéliser avec les outils géostatistiques, il est préférable de considérer le variogramme toutes directions confondues, sachant que les directions locales seront restituées lors de l'interpolation à condition de disposer de suffisamment de données dans le voisinage d'interpolation.

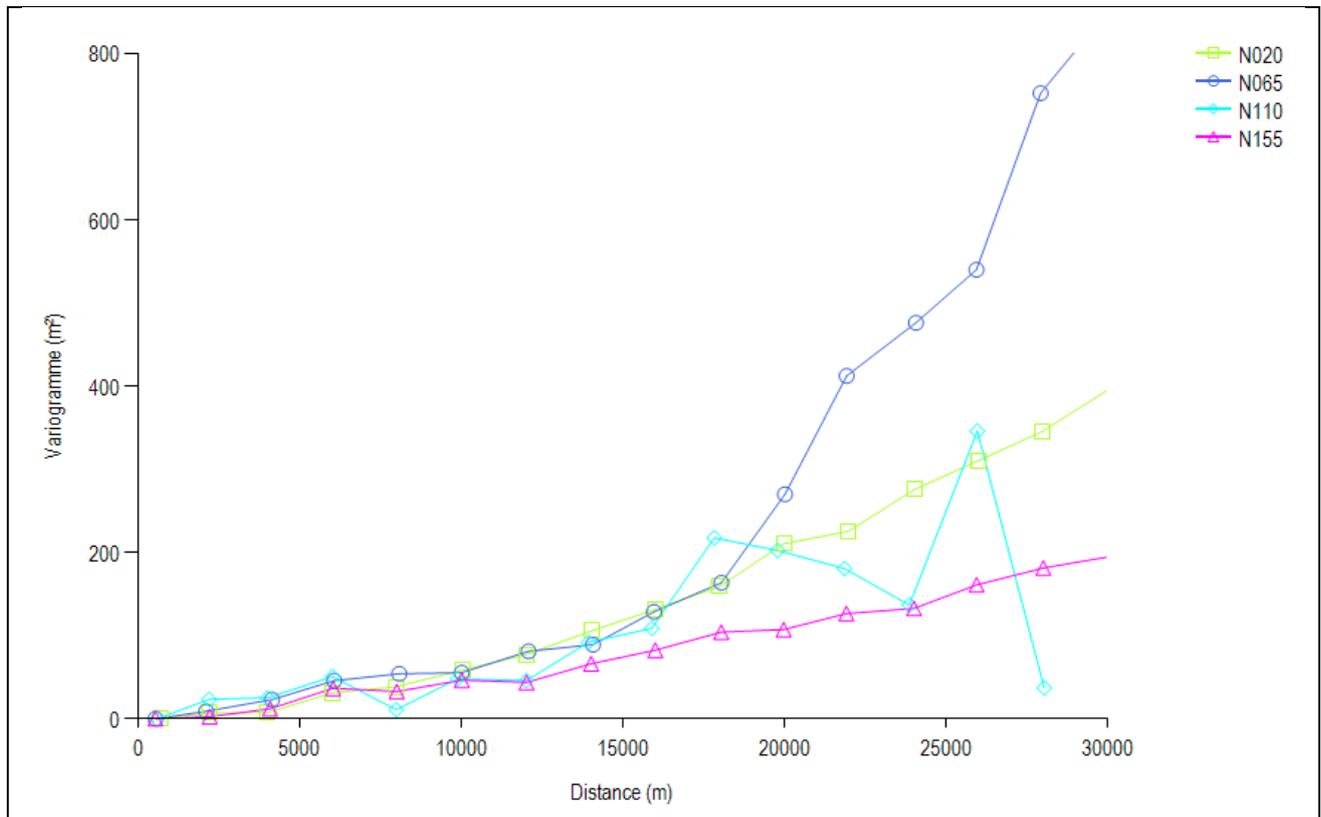


Figure 28 Variogramme directionnel de Zmaxi (piézomètres « fiables »)

Pour la suite de l'étude, on considère donc le variogramme toutes directions confondues.

Le variogramme de la variable $Z_{maxT100}$ (toutes directions confondues) est représenté Figure 29. Ce variogramme peut être ajusté par un modèle (en rouge sur la figure) dont les caractéristiques sont reportées sur la figure précitée.

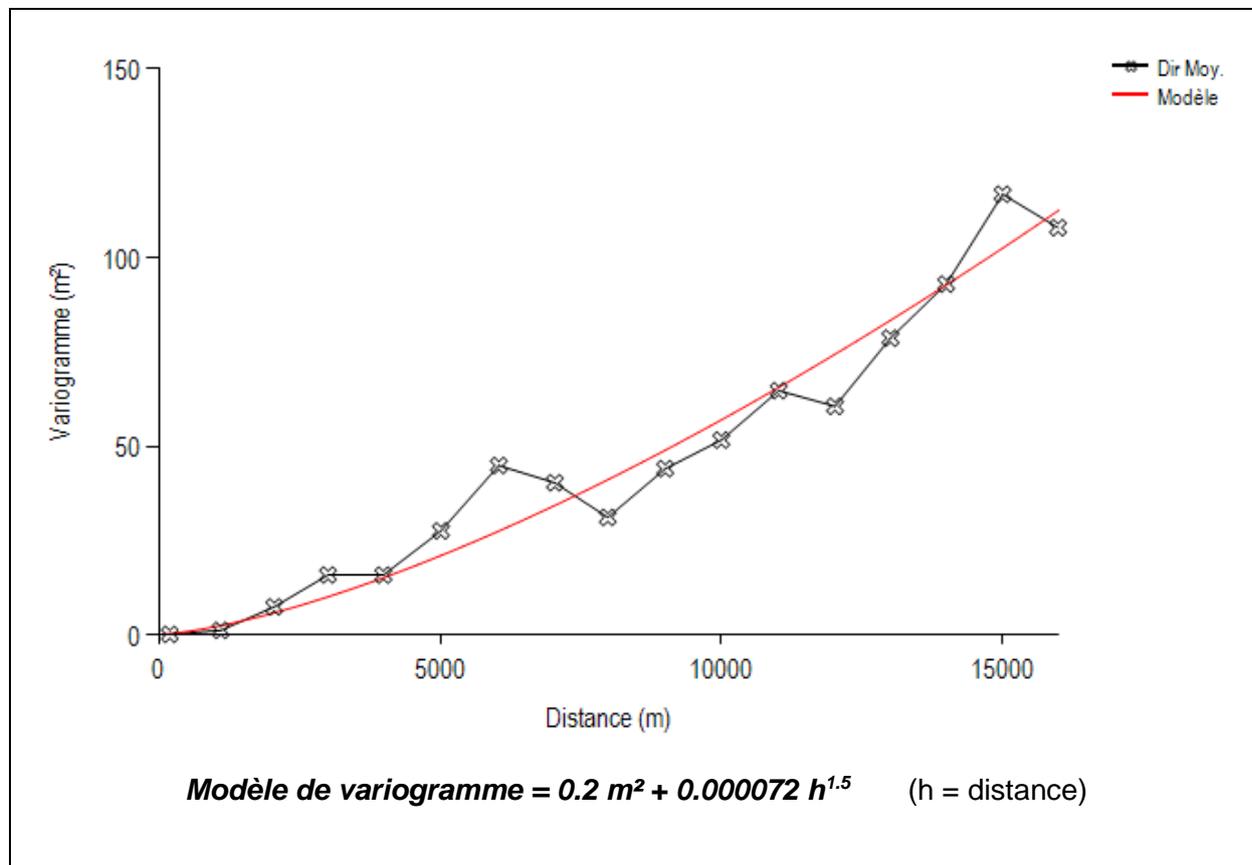


Figure 29 Variogramme de $Z_{maxT100}$ (toutes directions confondues) et son ajustement

Une validation croisée de ce modèle de variogramme est ensuite effectuée.

La validation croisée consiste à estimer par krigeage (méthode d'interpolation de la géostatistique) chaque cote $Z_{maxT100}$ au droit d'un piézomètre P en faisant comme si la valeur en P n'était pas connue et en cherchant à l'estimer à partir des données voisines. En chaque piézomètre P on dispose alors :

- De la cote $Z_{maxT100}$ connue au point P : $Z_{maxT100}(P)$
- De la cote $Z_{maxT100}^*$ estimée à partir des données voisines, en faisant comme si P n'était pas connu
- D'une estimation de l'erreur d'estimation par le biais de l'écart-type de krigeage $\sigma_k(P)$ au point P

A partir de ces données on peut calculer :

- L'erreur d'estimation au point P : $Erreur(P) = Z_{maxT100}^*(P) - Z_{maxT100}(P)$
- L'erreur normalisée au point P : $Ered(P) = Err(P) / \sigma_k(P)$

Cette opération est itérée sur tous les points P disponibles.

Des statistiques sont effectuées sur les deux variables $Erreur(P)$ et $Ered(P)$. En supposant que la distribution des erreurs de krigeage est gaussienne (ce qui n'est pas rigoureusement le cas, mais cela permet d'obtenir des ordres de grandeur), on peut vérifier :

- Si l'estimation est non biaisée (en moyenne l'erreur doit être nulle)
- Si les amplitudes des erreurs de krigeage sont bien estimées (en moyenne l'écart-type de $Ered(P)$ doit tendre vers 1)

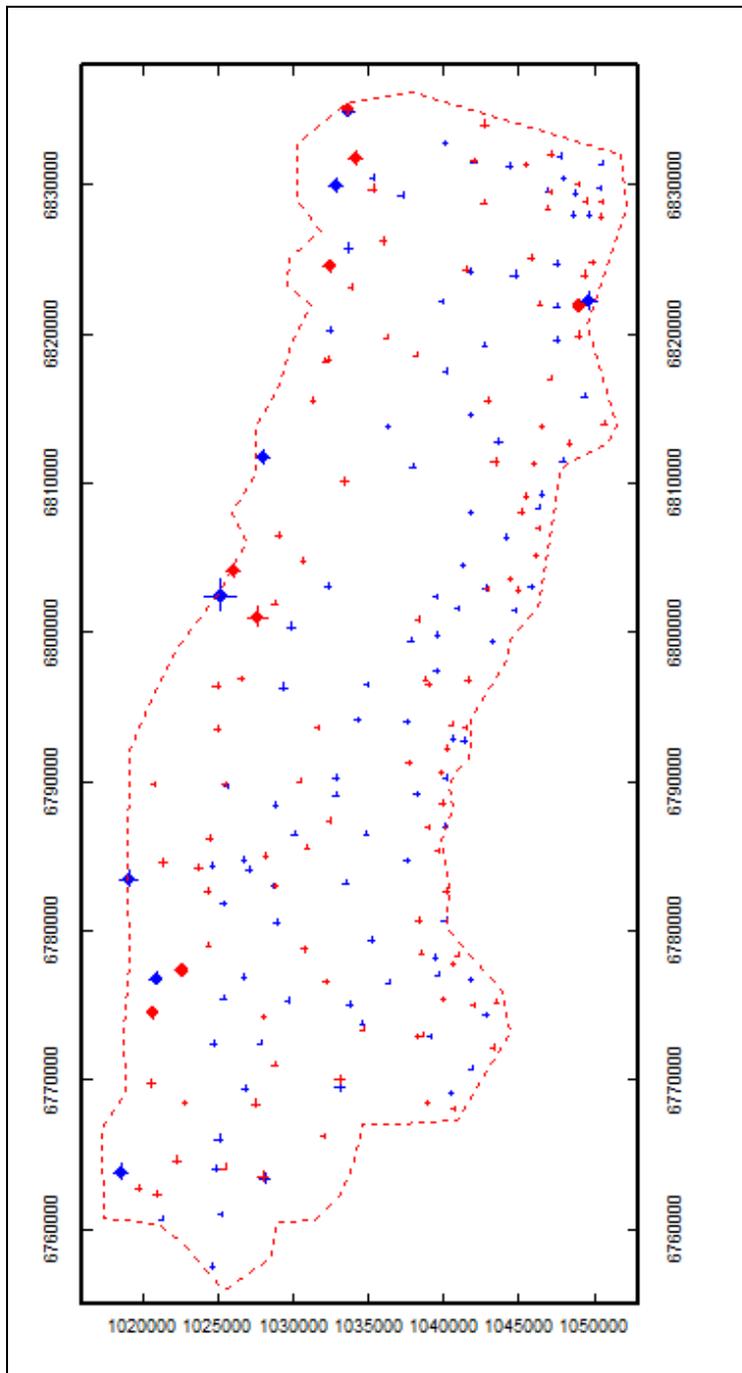


Figure 30 Validation croisée : carte des erreurs normalisées. Les points mal recalculés sont figurés par des ronds bleu ou rouge

Les résultats sont traduits sous forme de carte ou histogramme, sur lesquelles les piézomètres P pour lesquels l'estimation donne des performances médiocres sont identifiés.

La Figure 30 montre par exemple la carte des erreurs normalisées (variable $E_{red}(P)$ ci-dessus). Les ronds bleu ou rouge de cette carte correspondent aux piézomètres pour lesquels l'erreur normalisée est trop importante. La quasi-totalité de ces points est localisée en bordure Ouest du domaine d'étude. Cela correspond aux zones de plus fort gradient de la nappe.

Les points concernés sont vérifiés. S'il s'agit d'une erreur de donnée, l'erreur est corrigée ou le point éliminé. Par exemple le piézomètre 03082X0094/ECH et son voisin (Figure 31) correspondent aux points rouge et bleu situés au NE de la zone d'étude, non loin du Rhin. Ces points ressortent en anomalie lors de la validation croisée. Ceci est dû à la cote $Z_{maxT100}$ anormalement élevée du piézomètre 03082X0094/ECH. Après vérification ce piézomètre est éliminé (erreur due à un changement du repère de mesure).

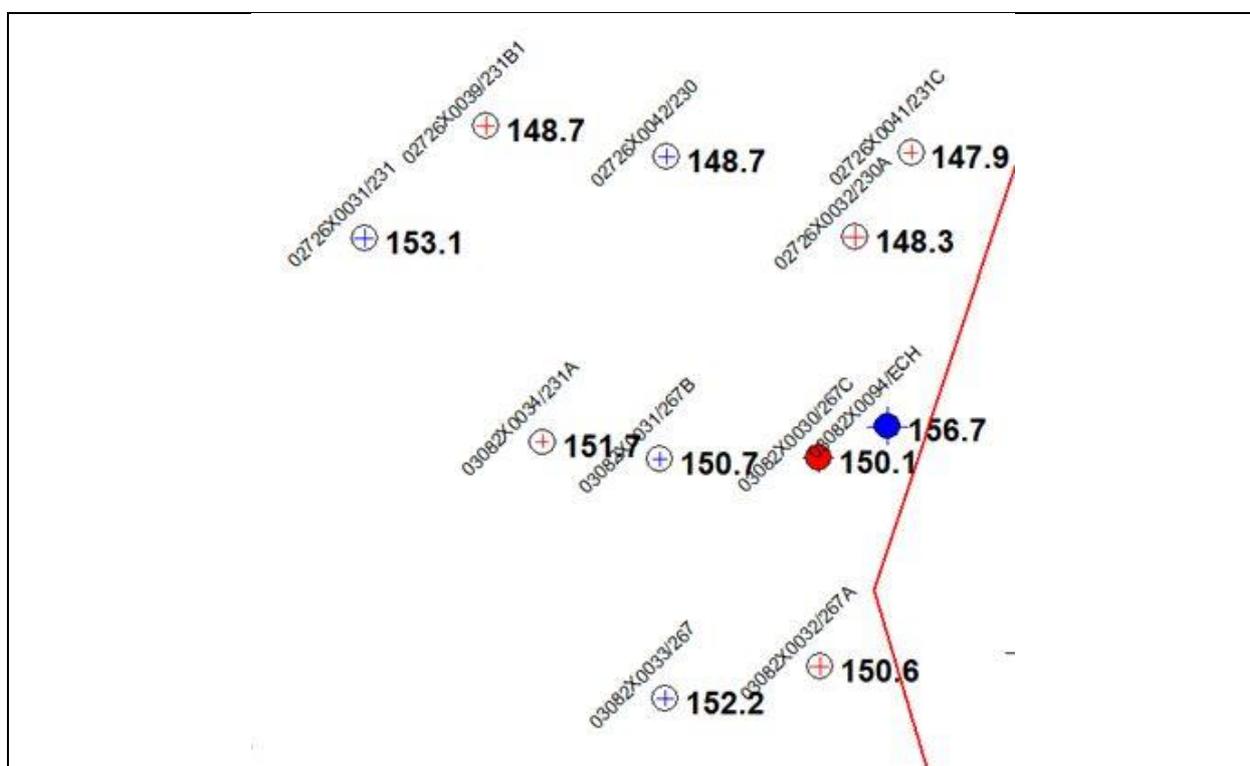


Figure 31 Zoom sur la carte des anomalies de validation croisée, au voisinage du piézomètre 03082X0094/ECH

La vérification des autres points pour lesquels l'erreur normalisée est trop importante, situés en bordure Ouest et Sud de la zone, ne révèle pas d'anomalie particulière. Ces points sont situés dans une zone de plus fort gradient de la nappe. Ils sont difficiles à prévoir à partir de leurs voisins, et l'écart-type d'estimation fourni par le krigeage s'avère trop faible : l'estimateur est dans cette zone trop « optimiste » quand à l'incertitude associée aux résultats.

Par contre sur le reste de la zone les performances du krigeage sont satisfaisantes, avec des erreurs relativement faibles et d'amplitude bien restituée par l'écart-type de krigeage.

Le modèle de variogramme est donc considéré comme globalement valide, sauf en bordure Ouest, où les incertitudes d'estimation calculées sont sous estimées : en réalité l'incertitude réelle est plus forte que celle avancée par le krigeage.

8.4. COMPARAISON DES PIEZOMETRES « FIABLES » ET « PEU FIABLES »

Après avoir caractérisé les piézomètres « fiables » d'un point de vue géostatistique, il convient de tester l'apport des points complémentaires jugés « peu fiables ». Potentiellement ceux-ci peuvent être affectés d'une incertitude plus importante qui rendrait leur utilisation non pertinente, ou au contraire s'avérer utiles pour densifier les données disponibles, à condition de n'en pas trop dégrader la qualité.

Le variogramme des données « peu fiables » est alors calculé et comparé à celui des données « fiables ».

Dans un premier temps on s'intéresse à la variable « Zmaxi » (le Z max sur la durée de la chronique), en faisant un zoom sur le comportement à l'origine du variogramme.

Pour les points « peu fiables », le calcul est dans un premier temps effectué sur la totalité des points présélectionnés (588 points).

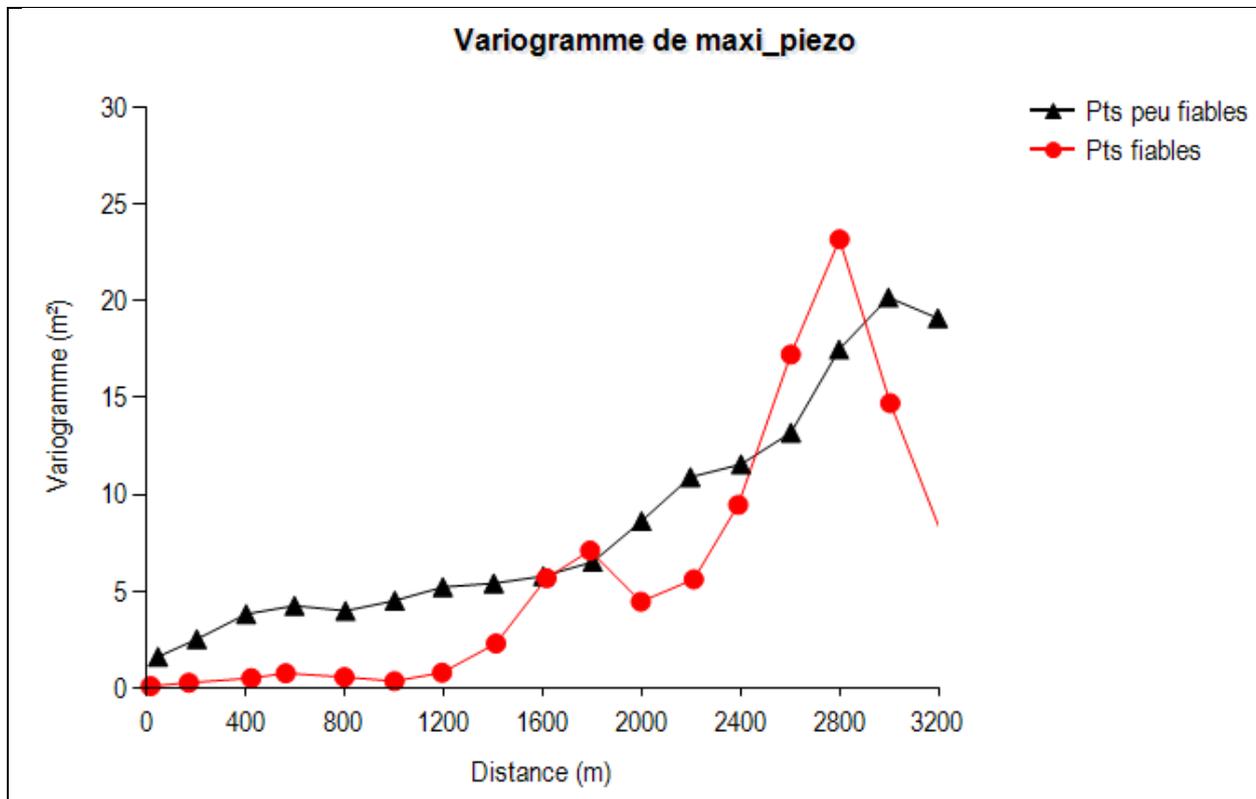


Figure 32 Comparaison des variogrammes de Zmaxi aux « petites » distances. Calcul avec point fiables et ensemble des 588 points peu fiables

La comparaison des deux variogrammes à l'origine (Figure 32) montre que si le variogramme des piézomètres « fiables » est proche de zéro pour des distances inférieures à 1200 m, traduisant une très bonne continuité de la nappe, c'est moins le cas pour le variogramme des piézomètres « peu fiables », pour lequel le variogramme montre un effet de pépité (il ne démarre pas de zéro) et atteint très vite environ 5m². Ceci est dû à la moins bonne robustesse des points « peu fiables »

Si l'on s'intéresse maintenant au sous ensemble des points « peu fiables » pour lesquels des critères supplémentaires sont imposés (disponibilité d'une mesure au même moment sur un point

« fiable » et durée chronique >1an), on obtient un nouveau sous ensemble de 280 piézomètres « peu fiables ». La comparaison des variogrammes aux petites distances montre une bien meilleure correspondance (Figure 33). Cette fois-ci le variogramme des 280 points « peu fiables » est beaucoup plus proche de celui des 211 points « fiables », et l'effet de pépite est plus faible que précédemment (0.8m² environ). Le fait d'être sélectif sur les points « peu fiables » permet donc d'en améliorer la qualité.

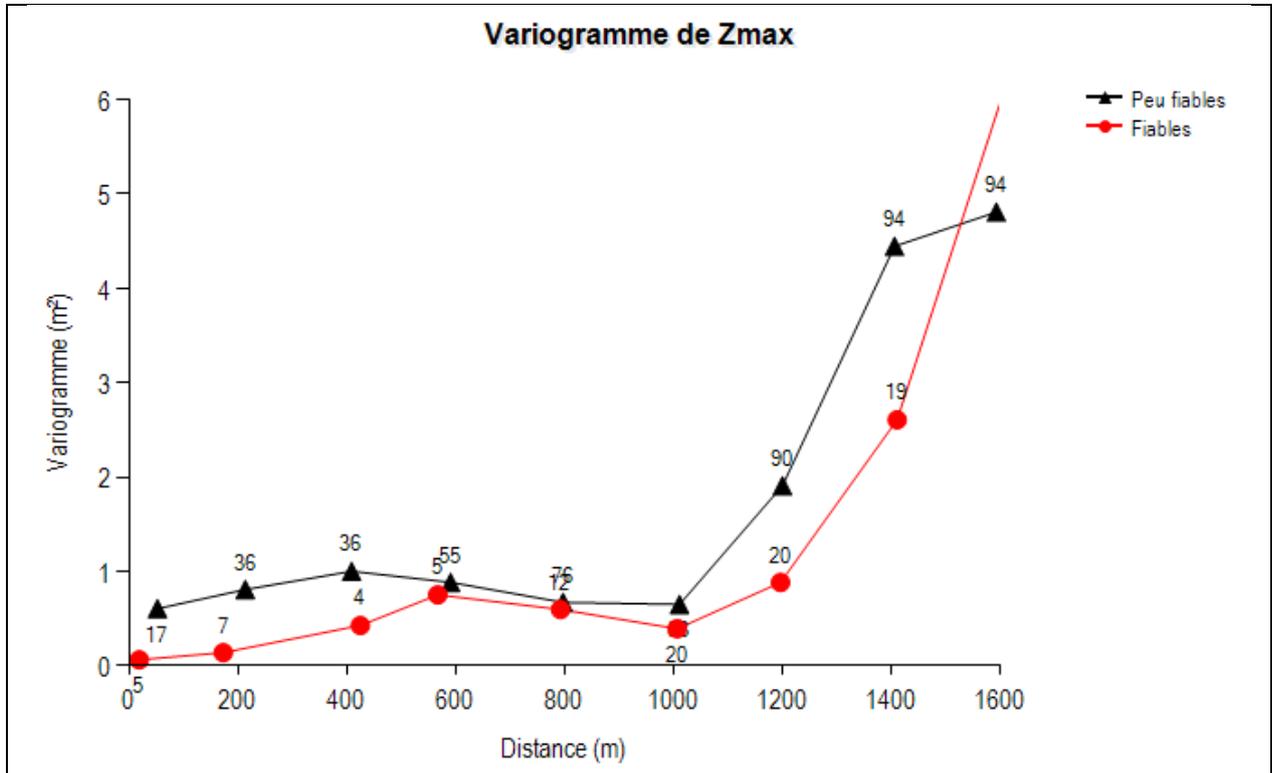


Figure 33 Comparaison des variogrammes de Zmaxi au « petites » distances. Calcul avec point « fiables » et sélection des 280 points « peu fiables » pouvant être reliés à un point fiable

Si l'on compare le comportement des deux jeux de données aux « grandes » distances on obtient le résultat illustré Figure 34 (le résultat est montré pour ZmaxT100 mais il est identique pour Zmaxi).

Les deux variogrammes montrent une forme similaire mais le variogramme des points « peu fiables » est un peu plus faible aux grandes distances. L'examen de la carte des données disponibles montre que cela est probablement dû :

- à un effet de regroupement de nombreuses données « peu fiables » en bordure Est du domaine (le long du Rhin), là où la nappe présente le moins de variations,
- et à l'absence de points en limite de bordure Ouest, là où la nappe présente le plus de variabilité et où la cote piézométrique est la plus forte.

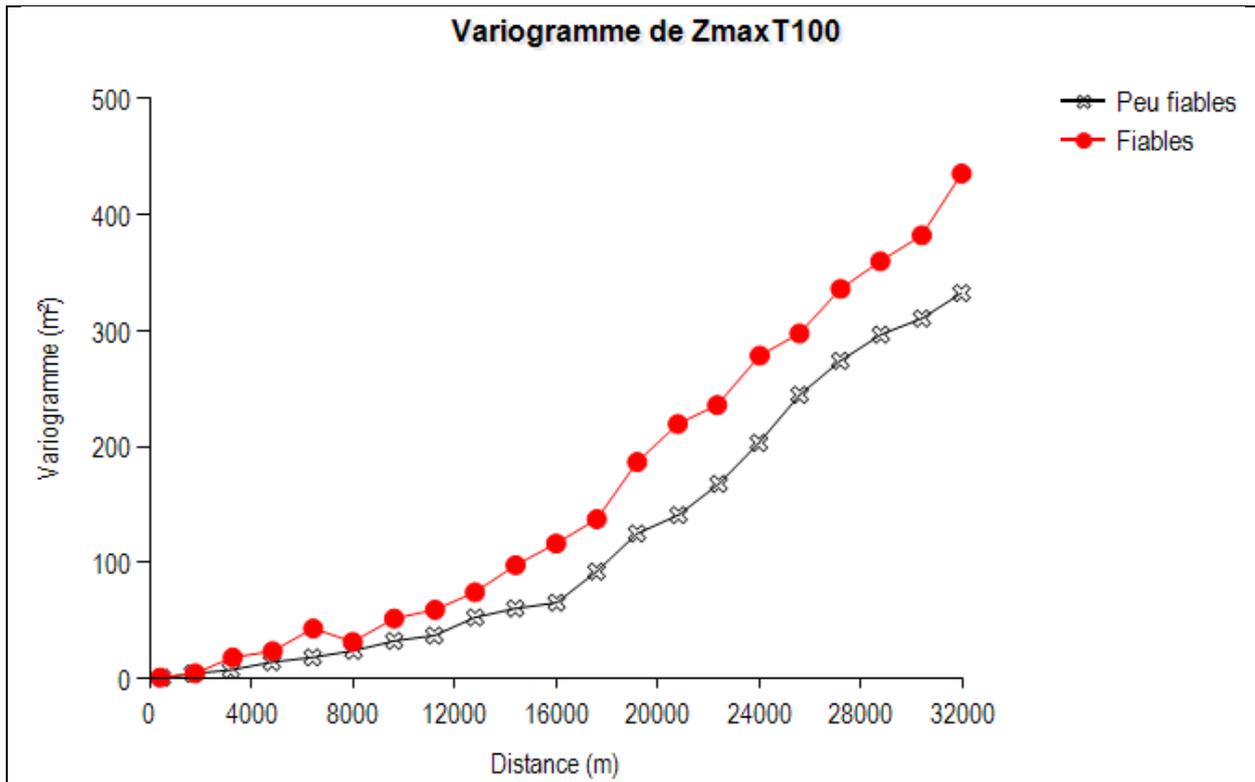


Figure 34 Comparaison des variogrammes de ZmaxT100. Calcul avec point fiables et points peu fiables

8.5. INTERPOLATION AVEC LES DEUX JEUX DE DONNEES ET COMPARAISON

En conséquence un jeu de 490 points (ZmaxT100) regroupant les 210 points « fiables » et les 280 points « peu fiables » est créé. Le variogramme de l'ensemble ces données (variable ZmaxT100) et son ajustement sont représentés Figure 35.

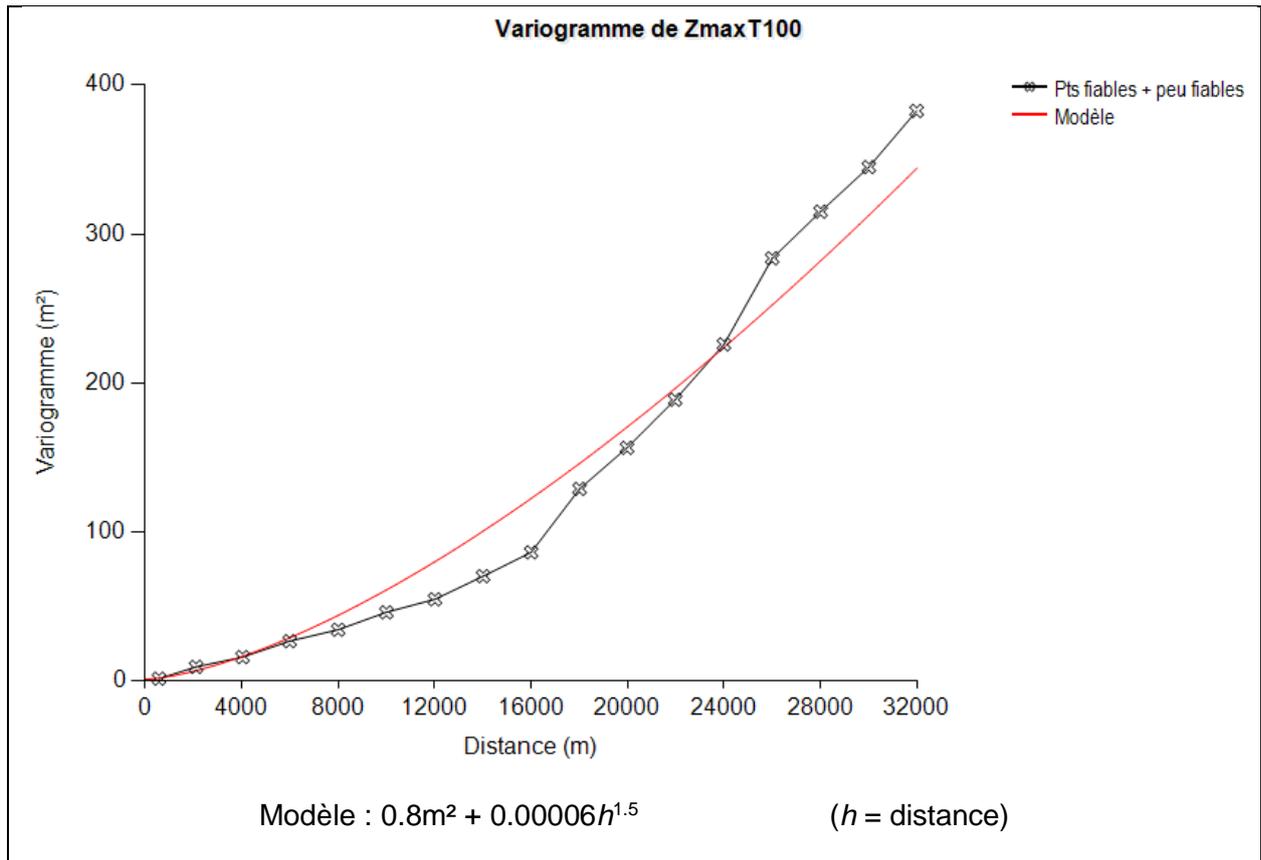


Figure 35 Variogramme de l'ensemble des 490 points « fiables » (210) + "peu fiables" (280)

Deux interpolations sont ensuite effectuées :

- La première en utilisant les seuls points « fiables », avec le modèle de variogramme associé (Figure 29),
- La seconde avec l'ensemble des points « fiables » + « peu fiables », avec le variogramme associé (Figure 35).

Les résultats sont représentés Figure 36 à la même échelle de couleur.

Les deux cartes apparaissent assez semblables.

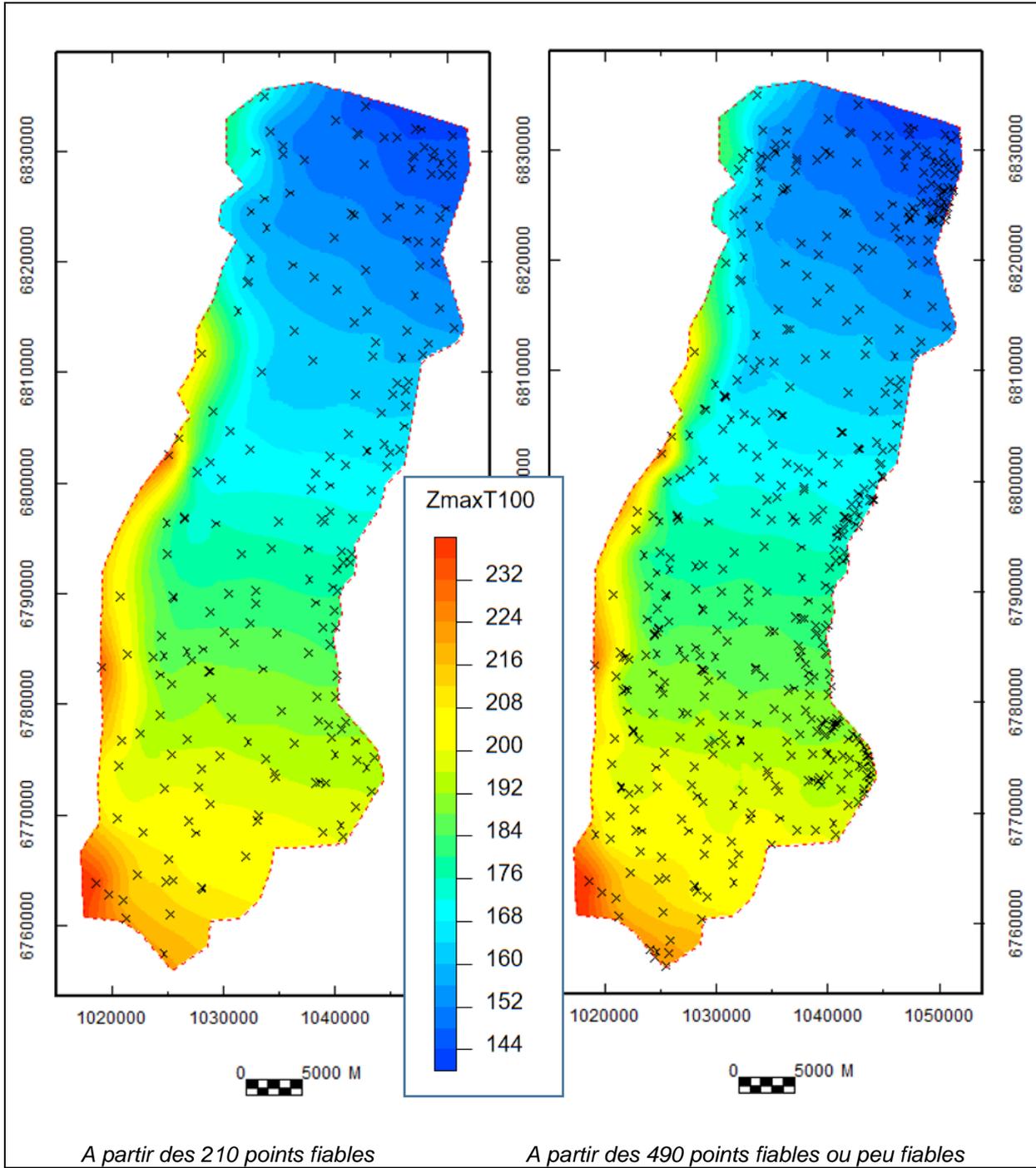


Figure 36 Interpolation de la cote ZmaxT100 à partir des 2 jeux de données

La Figure 37 montre que le fait de compléter les piézomètres « fiables » par les piézomètres jugés « peu fiables » permet de réduire les écarts-types d'interpolation (malgré l'effet de pépité un peu plus fort).

L'écart-type de krigeage moyen est d'environ 1.35 m dans ce cas.

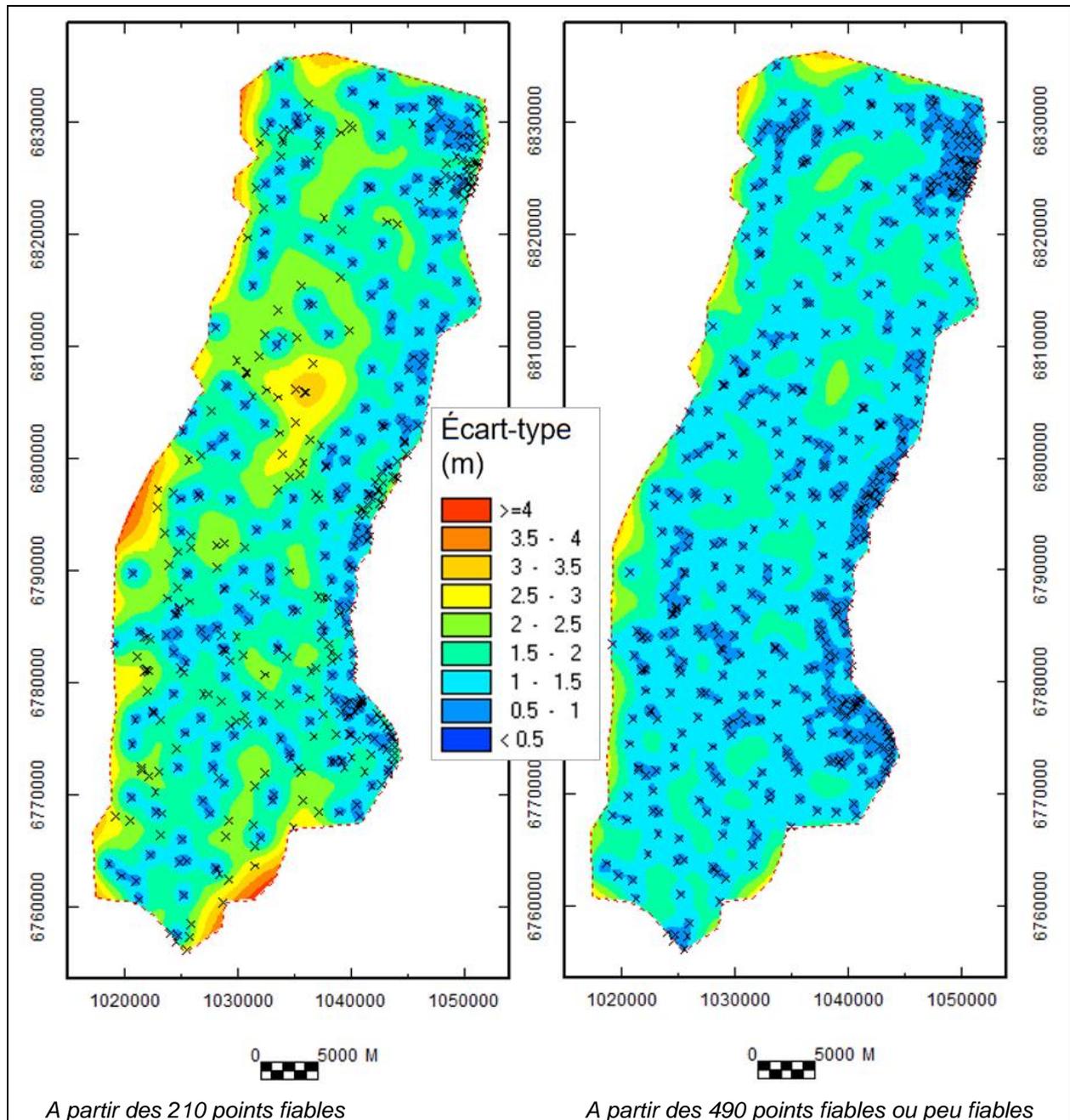


Figure 37 Carte des écarts-type de krigeage obtenus avec les deux jeux de données

8.6. CONCLUSIONS DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

L'analyse géostatistique des données de la cote piézométrique maximale ou de la cote piézométrique maximale avec période de retour de 100 ans montre que :

- ces variables sont bien structurées dans l'espace,
- leur variogramme montre une non stationnarité. L'effet de pépite reste faible,
- les données « fiables » peuvent être complétées par les données « peu fiables » sous réserve que leur sélection soit faite selon le mode opératoire décrit au chapitre 4.3.2. La moindre qualité de ces points ne dégrade pas la précision de l'estimation.

Les écart-types d'interpolation obtenus sont en moyenne de 1.35 m sur la zone d'étude (où ils varient de 0.5 à 4 m). La qualité de l'interpolation est donc, dans le cas de la zone d'étude, du même ordre de grandeur que celle du MNT.

Cette qualité d'interpolation est bien sûr liée au relativement grand nombre de piézomètres qui ont pu être utilisés.

La prise en compte de l'écart-type d'estimation donne un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote $Z_{maxT100}$.

9. Production d'une carte test au droit de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg

Les figures suivantes présentent les zones potentielles de débordement ; résultats obtenus par soustraction du MNT à la grille interpolée de la surface piézométrique maximale probable (de période de retour 100 ans) :

$$\text{Cotes altimétriques du MNT} - \text{Cotes Points niveau maximal} = \text{Zones potentielles de débordement}$$

Deux calculs ont été réalisés, le premier au pas de 25 m et le second au pas de 5 m.

La Figure 38 illustre les résultats obtenus selon les deux grilles en utilisant la même légende que pour la méthode nationale. Pour mémoire :

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

La grille au pas de 5 m fait ressortir plus de mailles en zone de débordement potentielle de la nappe (zones rouges plus importantes). Cela vient du fait que le MNT 25m est en moyenne près de 47 cm au-dessus du MNT 5m comme précisé au chapitre 7.3.1.

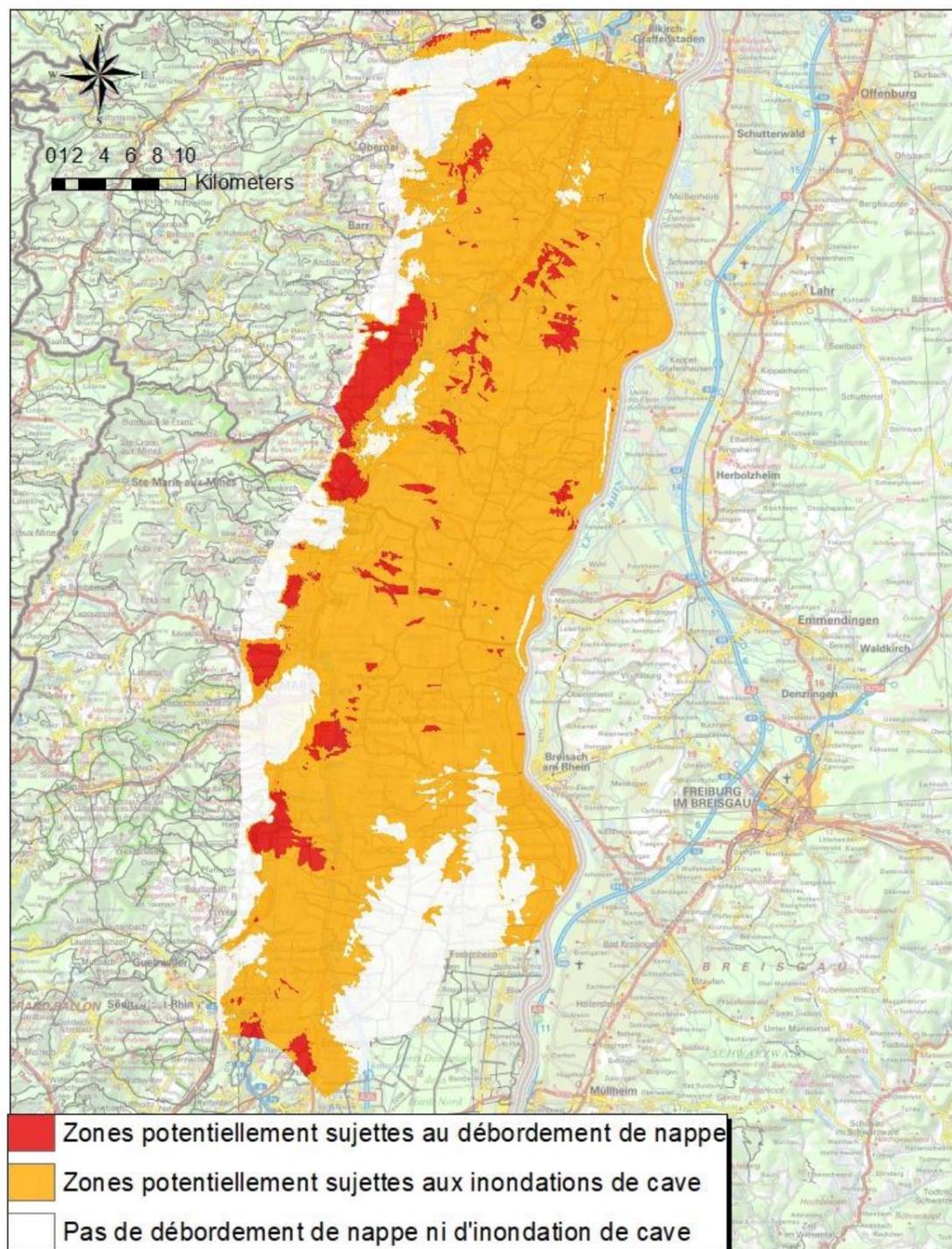
Il a été demandé en comité d'expert de réaliser une cartographie plus précise et d'utiliser une représentation comprenant quatre classes. Il a ainsi été proposée une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe (Figure 39) avec des classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux (période de retour 100 ans) :

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

Cette classification paraît plus pertinente à l'échelle locale.

L'échelle maximale d'utilisation préconisée pour cette carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe au sein de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg est le 1/25 000.

Carte des zones potentielles d'inondations
par remontée de nappe au pas 25 m
3 zones de sensibilité proposées



Carte des zones potentielles d'inondations
par remontée de nappe au pas 5 m
3 zones de sensibilité proposées

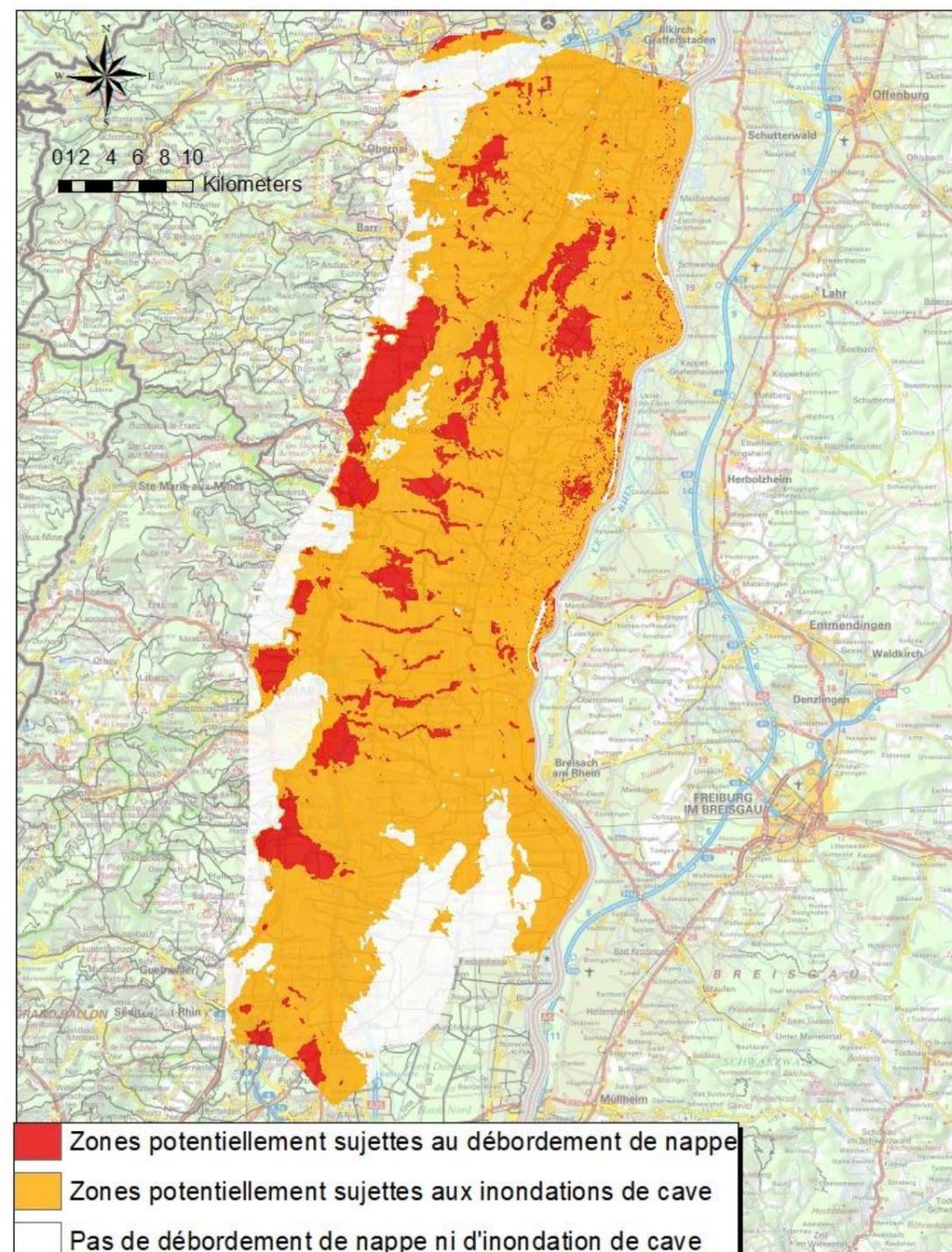
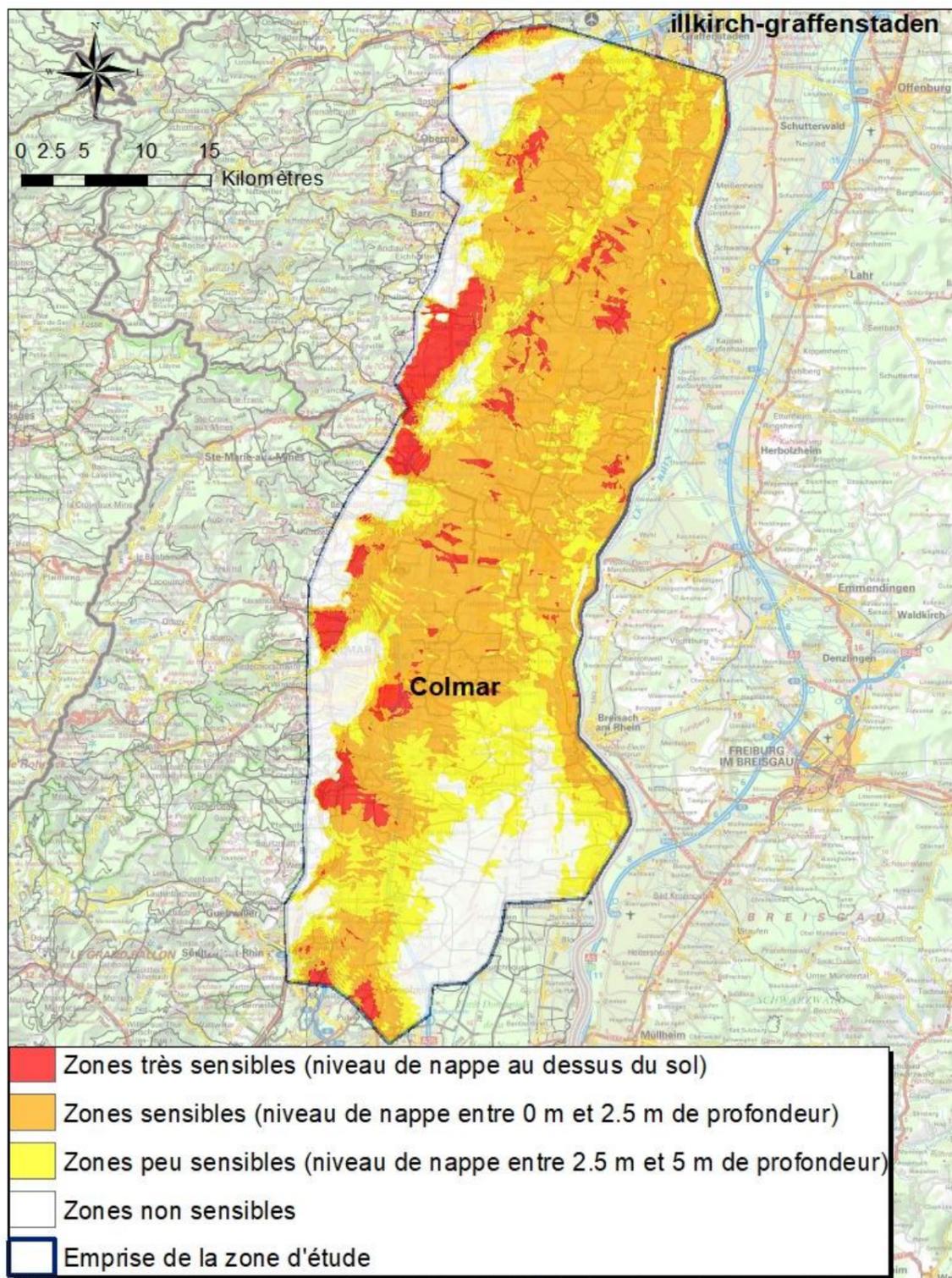


Figure 38 Comparaison des cartes des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe au pas 25 m (à gauche) et 5 m (à droite) – proposition de 3 zones de sensibilité

Carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe (grille de 25 m)



Carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe (grille de 5 m)

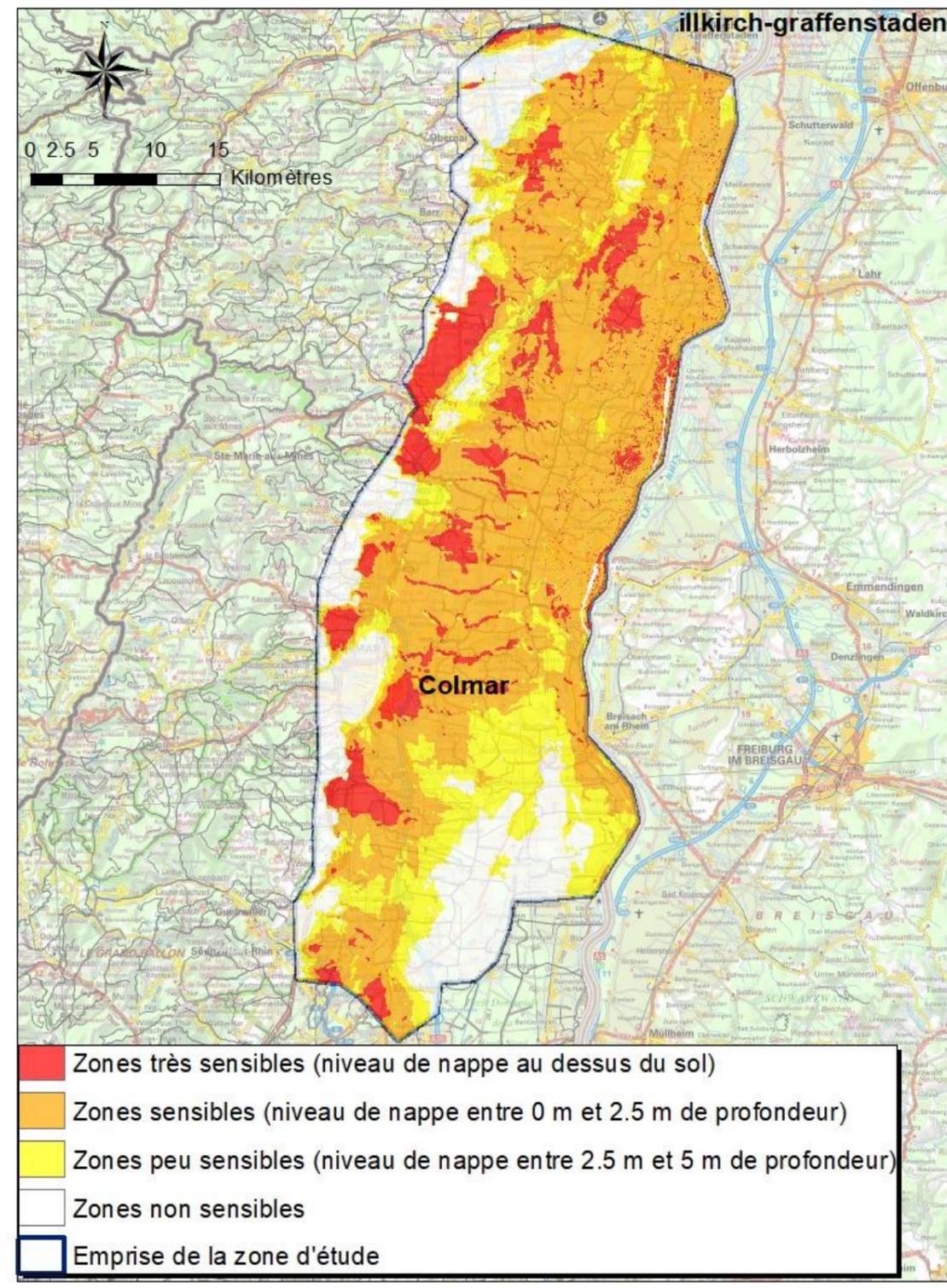


Figure 39 Comparaison des cartes de sensibilité aux remontées de nappe au pas 25 m (à gauche) et 5 m (à droite) – proposition de 4 zones de sensibilité

10. Validation de la carte de sensibilité aux remontées de nappe

10.1. VALIDATION PAR COMPARAISON AUX OBSERVATIONS DE TERRAIN

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

Parmi les 17 points « terrain » disponibles, 12 points se révèlent exploitables (avec une bonne confiance par jugement d'expert) et peuvent être comparés à la carte $Z_{maxT100}$.

Parmi ces 12 points :

- Pour 7 d'entre eux, la cote $Z_{maxT100}$ obtenue est effectivement supérieure à la cote Zeau de remontée de nappe. Le calcul de $Z_{maxT100}$ semble donc pertinent pour ces points.
- Pour les 5 autres, la cote $Z_{maxT100}$ calculée est inférieure à la cote Zeau indiquée par le propriétaire. En d'autres termes, la cote $Z_{maxT100}$ calculée n'est pas correcte. Dans le détail, la cote $Z_{maxT100}$ pour 3 de ces 5 points est inférieure respectivement de 4cm, 14cm et 18cm à la cote eau indiquée sur le terrain. On est donc dans la marge d'erreur des différents variables $Z_{maxT100}$ et Zeau. Par contre, pour les 2 autres points, la cote $Z_{maxT100}$ est inférieure de près d'1 mètre au niveau de l'eau observé. La cote $Z_{maxT100}$ calculée n'est donc pas suffisamment haute. Pour l'un de ces deux points on se situe en contexte urbain, donc potentiellement perturbé d'un point de vue hydrogéologique. Pour le second la confiance est bonne donc la cote $Z_{maxT100}$ calculée n'est pas correcte. L'écart-type d'estimation de $Z_{maxT100}$ pour ce point est de 1.28m, à comparer à la différence de niveau calculée de 0.86 m ($Z_{maxT100}$ inférieur de 86 cm à la cote du niveau d'eau).

En conclusion, si l'on considère les données de remontée de nappe les plus fiables parmi celles collectées sur le terrain, la cote $Z_{maxT100}$ calculée semble correcte dans la majorité des cas. Il existe toutefois quelques points pour lequel le calcul n'est pas satisfaisant. Ceci peut s'expliquer peut-être par des perturbations locales de l'écoulement (contexte urbain), mais aussi parce que l'estimation de $Z_{maxT100}$ peut être entachée d'erreur. La prise en compte de l'écart-type d'estimation donne un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote $Z_{maxT100}$.

10.2. VALIDATION PAR COMPARAISON AVEC LA CARTE PIEZOMETRIQUE HAUTES EAUX DE 2012

Plusieurs cartes piézométriques ont été réalisées sur la nappe d'Alsace. La plus intéressante en termes d'usage pour les problématiques de remontées de nappe sur le secteur d'étude est celle réalisée en Hautes Eaux 2012 par l'APRONA.

La Figure 40 montre les isopièzes de la carte HE 2012 (hautes eaux 2012) de l'APRONA en superposition avec la carte de $Z_{maxT100}$. La carte $Z_{maxT100}$ montre le même style de variations de la cote piézométrique, mises à part quelques différences locales. La comparaison des 2 cartes montre que la cote piézométrique $Z_{maxT100}$ est supérieure à la piézométrie HE 2012 de plus de 1m. Ceci est cohérent avec les valeurs utilisées pour le calcul des 2 cartes. En effet, la comparaison des points communs entre les données 2012 utilisées par l'Aprona et les

piézomètres utilisés pour le calcul de $Z_{maxT100}$ sur la zone d'étude (54 piézomètres) montre que $Z_{maxT100}$ est en moyenne supérieur de 1.3 mètres à $Z_{HE 2012}$ (et que le Z_{maxi} est pour sa part supérieur à $Z_{HE 2012}$ de 1.16m en moyenne). On peut noter également que la densité des points « $Z_{maxT100}$ » est supérieure à la densité des points « HE 2012 » puisque les points « $Z_{maxT100}$ » sont construits à partir de piézomètres pouvant avoir atteint leur maximum à des dates différentes.

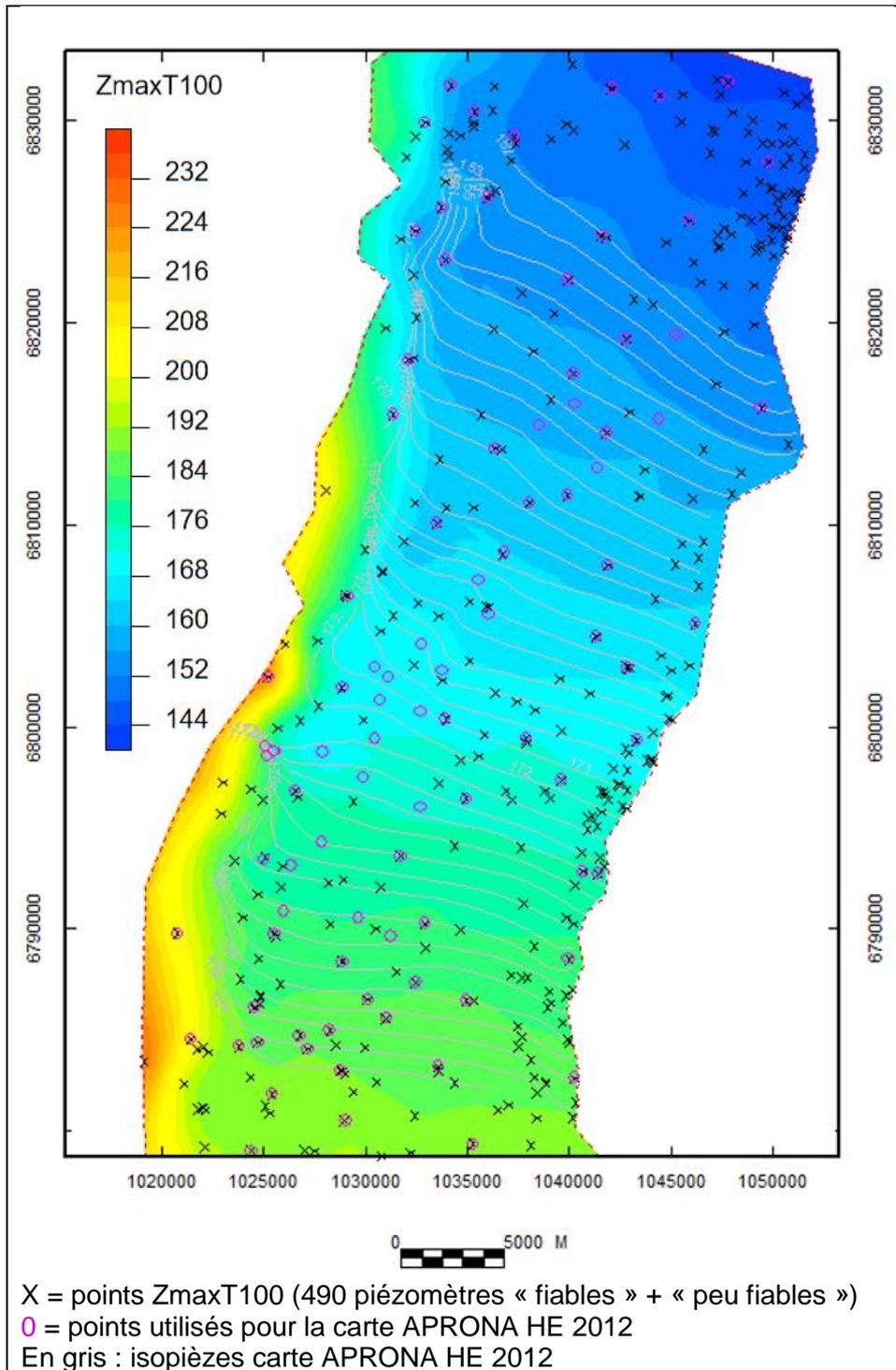


Figure 40 Carte de ZmaxT100 avec superposition de la carte et des données HE2012 Aprona

10.3. VALIDATION PAR L'IMAGERIE SATELLITALE

La Figure 41 superpose la carte de sensibilité aux remontées de nappe au pas 5 m et la délimitation des zones inondées par traitement de l'imagerie satellitaire pour l'événement de juin 2016. Il est possible d'observer une bonne correspondance entre les deux traitements.

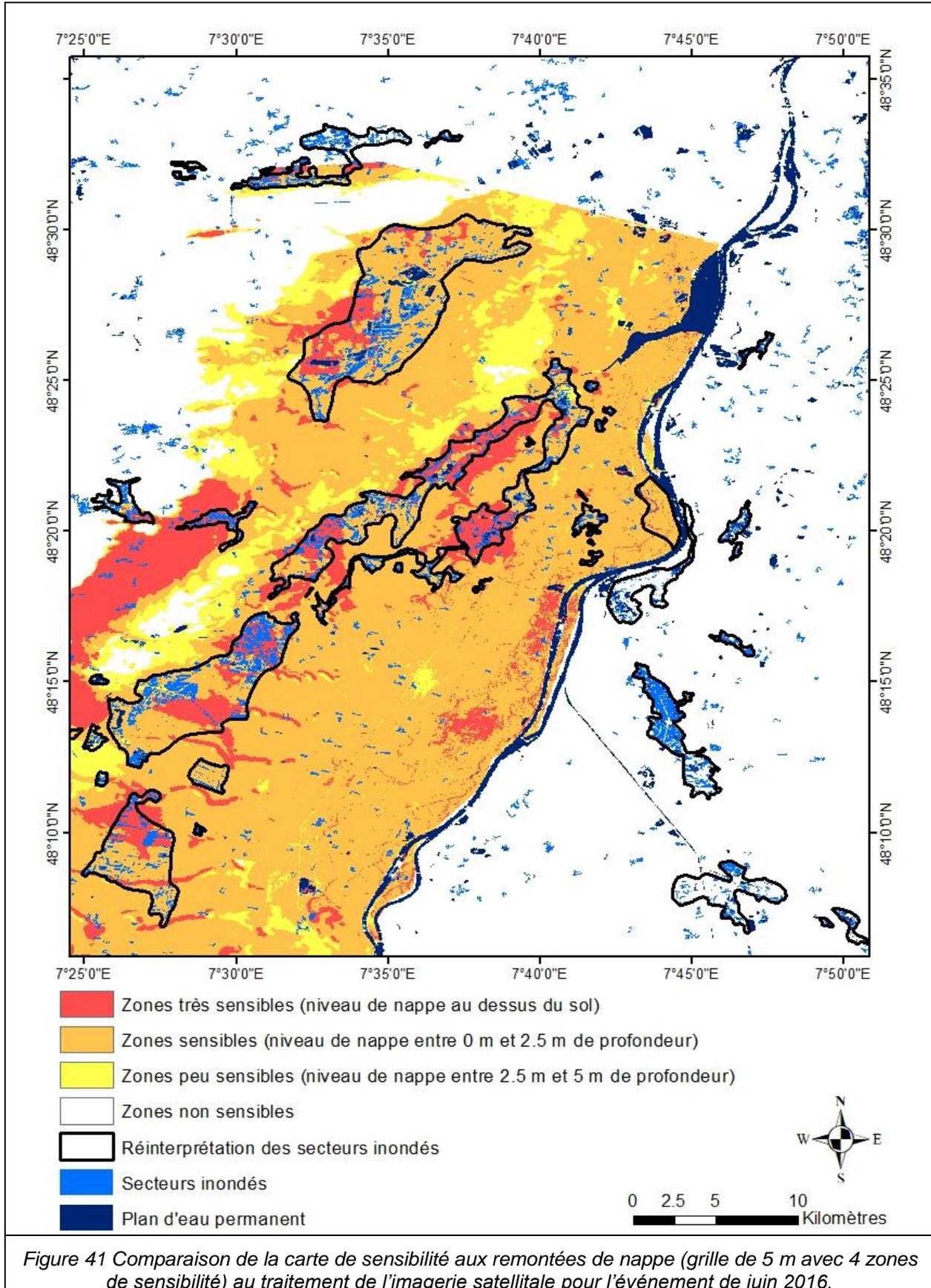
La plupart des secteurs ciblés en rouge « zones très sensibles » se retrouve à l'intérieur des polygones délimités par traitement de l'imagerie satellitaire. Certains polygones couvrent une superficie plus importante que les zones en rouge mais cela est probablement dû au fait que l'imagerie satellitaire ne permet pas de discriminer les secteurs inondés à cause des remontées de nappe ou à cause des débordements de cours d'eau.

Une large zone en rouge à l'ouest ne ressort pas du traitement de l'imagerie satellitaire. Soit parce que ce secteur n'a pas été touché pendant l'événement de 2016, soit parce que les inondations proviendraient de nappes perchées qui pourraient se vidanger rapidement et ne seraient pas détectables par les images satellite qui ont une fréquence d'acquisition au mieux tous les 6 jours.

Ce résultat est encourageant concernant l'utilisation de cette technique pour des problématiques de cartographie d'inondation.

Il faut toutefois garder à l'esprit que le traitement a été réalisé uniquement sur un événement d'inondation et ne couvre pas tous les secteurs susceptibles d'être en eau et ne permet pas de faire la distinction sur l'origine des inondations.

Afin d'aller encore plus loin dans l'analyse, il serait intéressant de répéter l'opération sur d'autres épisodes d'inondation et de fusionner les résultats. Mais comme il est précisé au chapitre 6 , il est préférable de traiter les événements apparus après 2015 pour des contraintes d'utilisation des données.



11. Conclusion

Pour la réalisation d'une cartographie de sensibilité aux remontées de nappe, plus précise que celle construite à l'échelle nationale, la nappe de l'Alsace au Sud de Strasbourg a été choisie comme territoire test.

Afin de réaliser cette carte, plusieurs sources d'informations ont été utilisées : une nouvelle extraction des données eaux souterraines à partir des bases de données nationales ADES et BBSEau, une enquête auprès des habitants sur les événements historiques d'inondation et une acquisition de données sur le terrain, l'imagerie satellitale, un MNT plus précis au pas de 5 m et l'exploitation d'études hydrogéologiques locales.

Un total de près de 830 points de mesure, issus de la banque ADES et de la BSS Eau ont été dénombrés dans la zone d'étude. Les retours de l'enquête ont apporté 126 réponses avec : 51 cas d'inondations, 7 inondations dues à des orages et 44 inondations dues vraisemblablement à une remontée de nappe. Une campagne de nivellement des secteurs inondés a été lancée et 37 points ont été nivelés dont 17 mesures d'eau.

En complément de ce recensement des données, une analyse comparative des MNT 5 M et MNT 25 m a été réalisée. Cette analyse a montré que le MNT 25m est en moyenne près de 47 cm au-dessus du MNT 5m. Les MNT 5 m et 25 m sont relativement comparables en terme de précision, avec peut-être un léger avantage pour le MNT 5 m, pour lequel l'écart-type des erreurs est légèrement moins fort. L'avantage du MNT 5 m réside surtout dans sa résolution spatiale.

La méthodologie pour la réalisation de la carte s'inspire de celle utilisée pour la carte nationale. Les principales modifications et améliorations ont porté sur :

- un travail de sélection plus approfondi des points fiables et peu fiables. Les associations réalisées se retrouvent bien au sein de secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques et temporelles de la nappe captée ;
- une méthode d'évaluation moins pessimiste de la cote piézométrique maximale de période de retour 100 ans pour les points d'eau qualifiés « peu fiables » que pour la méthode nationale ;
- un modèle de variogramme plus complexe pour l'interpolation des cotes piézométriques maximales.

L'analyse géostatistique a permis d'estimer les incertitudes des résultats liés à l'interpolation, donnant ainsi un ordre de grandeur de l'erreur possible sur l'estimation de la cote $Z_{maxT100}$. Les écart-types d'interpolation obtenus sont en moyenne de 1.35 m sur la zone d'étude (où ils varient de 0.5 à 4 m). La qualité de l'interpolation est donc, dans le cas de la zone d'étude, du même ordre de grandeur que celle du MNT. L'analyse géostatistique a également confirmé que le fait de compléter les piézomètres « fiables » par les piézomètres jugés « peu fiables » permet de réduire les écart-types d'interpolation ; ce qui permet de valider également le nouveau calcul réalisé.

Il a été proposée une carte des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe avec quatre classes de sensibilité dépendante de la profondeur de la nappe en situation de très hautes eaux (période de retour 100 ans) :

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

- Zones peu sensibles : niveau de nappe entre 2 et 5 m de profondeur
- Pas d débordement

Cette classification paraît plus pertinente à l'échelle locale. L'échelle maximale d'utilisation préconisée pour cette carte au sein de la nappe d'Alsace au sud de Strasbourg est le 1/25 000.

La carte de sensibilité aux remontées de nappe réalisée a pu être validée par l'utilisation de différents types de données et de résultats :

- La carte ZmaxT100 interpolée montre la même gamme de variations que les isopièzes issues de la carte hautes eaux 2012 de l'APRONA, mises à part quelques différences locales. La comparaison des 2 cartes montre que la cote piézométrique ZmaxT100 est supérieure à la cote piézométrique HE 2012 de plus de 1m.
- La comparaison avec les données collectées sur le terrain a démontré que la cote ZmaxT100 calculée semble correcte dans la majorité des cas. Il existe toutefois quelques points pour lesquels le calcul n'est pas satisfaisant. Ceci peut s'expliquer peut-être par des perturbations locales de l'écoulement (contexte urbain).
- L'utilisation des données RSO par satellite pour la cartographie des inondations provoquées par les eaux souterraines montre des résultats intéressants. La plupart des secteurs ciblés en « zones très sensibles » se retrouve à l'intérieur des polygones délimités par traitement de l'imagerie satellitaire et donc probablement réellement inondés en mai-juin 2016. Certains polygones couvrent une superficie plus importante que les zones en rouge mais cela est probablement dû au fait que l'imagerie satellitaire ne permet pas de discriminer l'origine des inondations (remontées de nappe ou débordements de cours d'eau ou autre).

Les études de développement méthodologique pour la réalisation de cartographie de sensibilité aux inondations par remontée de nappe à l'échelle locale vont se poursuivre dans la convention DGPR-BRGM 2019. Un autre site sera testé afin de confirmer ou d'adapter la méthodologie à un contexte hydrogéologique différent.

12. Bibliographie

APRONA / ARAA (2002/2003) – Note méthodologique relative au découpage de l'Alsace en « bassins versants », ou zones d'action, 11 p.

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

Longuevergne L. (2006) – Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace. Rapport de stage dans le cadre du projet Région Alsace - Interreg III « Outils pédagogiques sur la nappe rhénane ». BRGM RP-53326-FR, 80 p., 55 fig.

Risler J.-J., Elsass P., Kauffmann C., Schafer G. (2006) – Plaine d'Alsace. Aquifères & Eaux souterraine en France - Tome 1. Éditions BRGM.

Urban S., Boucher J., Mardhel V., Xu D. (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA ; Bassin Rhin-Meuse ; Année 4. Rapport BRGM/RP-58091-FR, 70 p., 5 ann.

Urban S., Genevier M., Guignat S. (2010) – Optimisation du réseau piézométrique de la Nappe d'Alsace. Rapport final BRGM/RP-58670-FR. Octobre 2010.

Schomburgk S., Pinault J.-L., Longuevergne L. (2005) – Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport BRGM/RP-53579-FR.

Seguin J.J. (2015) – Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation Hydrologique « nappes ». Rapport final. BRGM/RP-64147-FR. 89 p., 39 ill., 6 tabl., 4 ann.

Seguin J.J., Allier D., Croiset N., Klinka T., Manceau J.C. (2018) - ESTHER. Etudes de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final. BRGM/RP-67518-FR. 299 p., 126 fig., 10 ann.

Vernoux J. F., Seguin J. J. (2013) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé - BRGM/RP-61807-FR.



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