

ZOBREST : Cartographie du niveau des nappes superficielles sur le territoire de Brest Métropole

Rapport final

BRGM/RP-71268-FR
Décembre 2021

BRGM/RP-71268-FR
 Décembre 2021

PIEZOBREST : Cartographie du niveau des nappes superficielles sur le territoire de Brest Métropole

Rapport final

BRGM/RP-71268-FR

Décembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations
d'appui aux politiques publiques du BRGM AP19REN008

F. Lucassou et V. Bault

Avec la collaboration de

F. Koch, C. Lejars, L. Ridel, C. Becquet, J. Mathieu, T. De Cathelineau, M. Poulain

Vérificateur :

Nom : Bruno MOUGIN

Fonction : Chef de projet
hydrogéologue

Date : 06/12/2021

Signature :

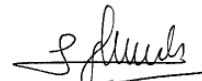


Approbateur :

Nom : Mélanie BARDEAU

Fonction : Directrice régionale
Bretagne

Date : 14/12/2021



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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : hydrogéologie, aquifère, nappe, eaux souterraines, carte piézométrique, Bretagne, Brest Métropole

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

Lucassou F. et Bault V. (2021) avec la collaboration de Koch F., Lejars C., Ridet L., Becquet C., Mathieu J., De Cathelineau T., Poulain M. – PIEZOBREST : Cartographie du niveau des nappes superficielles sur le territoire de Brest Métropole. Rapport final BRGM/RP-71268-FR, 53 p., 44 ill., 2 ann., 1 CD.

Synthèse

La gestion des eaux pluviales en domaine urbain est une préoccupation importante dans la gestion du petit cycle de l'eau, et s'intègre pleinement dans les réflexions et les actions visant à construire les stratégies de ville durable. Dans ce domaine, Brest Métropole est une collectivité innovante et pionnière.

Le projet PIEZOBREST (Cartographie du niveau des aquifères superficiels du territoire de Brest Métropole) a été réalisé dans le cadre d'une convention de recherche et de développement partagés entre Brest Métropole et le BRGM. Il a pour objectif d'identifier les nappes d'eaux souterraines en présence sur le territoire de Brest Métropole et d'établir deux cartes piézométriques : la première en période de hautes eaux et la seconde en période de basses eaux.

Une première campagne de mesures des niveaux d'eau de la première nappe rencontrée a été réalisée en période de basses eaux en septembre-octobre 2020. Elle a permis le tracé précis d'une carte piézométrique associée à cette période. Les mesures ont été interpolées grâce au logiciel GDM du BRGM (Geological Data Management - <http://gdm.brgm.fr>), pour produire une grille des altitudes de la nappe à une maille de 5 m de côté.

Une deuxième campagne de mesures des niveaux d'eau a été réalisée en période de hautes eaux en mars 2021. Elle a permis de tracer une seconde carte piézométrique à la même résolution (maille de 5 m de côté).

Le nombre de mesures a été inférieur à ce qui était attendu, compte-tenu de la difficulté à rechercher des points de mesure en centre-ville de Brest et à la disparition de nombreux ouvrages déclarés, suite à l'urbanisation de certains secteurs. Le bilan de ces deux campagnes est tout de même satisfaisant car la densité de points a permis de réaliser une interpolation avec le logiciel GDM du BRGM et de produire des cartes piézométriques en hautes et basses eaux (avec des mailles de 5 m de côté).

Ces cartes montrent que la piézométrie est fortement influencée par la topographie. La nappe est drainée par les principaux cours d'eau existant sur le territoire. Le battement de la nappe entre les basses eaux et les hautes eaux est assez faible, de l'ordre de 2,7 m en moyenne.

Les cartes piézométriques et les informations associées ont été fournies à Brest Métropole aux formats image et SIG (CD joint à ce présent rapport) :

- Carte piézométrique de basses eaux (grille)
- Carte piézométrique de hautes eaux (grille)
- Isopièzes en basses eaux (polylignes)
- Isopièzes en hautes eaux (polylignes)

L'écart-type d'interpolation et l'indice de confiance en hautes et basses eaux ont également été fournis au format grille.

Compte tenu des informations utilisées, cette cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 ni se substituer à des études à la parcelle.

Pour améliorer cette cartographie et la connaissance des eaux souterraines dans le secteur, il serait intéressant d'installer des sondes de mesures en continu des niveaux piézométriques et de la conductivité des eaux souterraines dans un ou plusieurs piézomètres (soit en équipant un forage existant, soit en créant un nouveau piézomètre) :

- en centre-ville de Brest (secteur manquant de données),
- dans les gneiss de Brest et dans les schistes briovériens au Relecq-Kerhuon ou à Guipavas, pour mieux comprendre les écoulements souterrains entre ces deux formations.

Ces cartes piézométriques pourront être valorisées de plusieurs façons :

- Les données acquises permettront de calculer l'épaisseur minimale de la zone non saturée (ZNS), nécessaire pour calculer le potentiel d'infiltration des eaux pluviales (par analyse multicritères) ;
- De connaître (et localiser) l'impact des eaux souterraines sur les ouvrages souterrains (canalisations d'eau potable et d'assainissement) et inversement ;
- Les cartes piézométriques en hautes et basses eaux permettront de représenter une carte du battement de la nappe et de coupler ces informations aux données sur la vulnérabilité de certaines falaises à l'érosion et aux mouvements de terrain ;
- D'évaluer le potentiel géothermique sur nappes et sur sondes sèches du territoire de Brest Métropole.

Dans l'éventualité d'une construction d'un modèle géologique urbain en 3 dimensions du territoire de Brest Métropole, ces cartes piézométriques pourront être à nouveau valorisées et alimenter considérablement la réflexion pour l'élaboration d'un outil d'aide à un aménagement efficace du territoire.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. OBJECTIFS	9
1.2. SECTEUR D'ETUDE.....	10
1.2.1. Contexte géographique	10
1.2.2. Contexte géologique	11
1.2.3. Contexte hydrogéologique	14
1.3. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	16
2. Cartes piézométriques	19
2.1. PREPARATION ET DEROULEMENT DES CAMPAGNES PIEZOMETRIQUES.....	19
2.1.1. Préparation des campagnes piézométriques.....	19
2.1.2. Mesures piézométriques en basses eaux.....	20
2.1.3. Mesures piézométriques en hautes eaux.....	24
2.1.4. Bilan des campagnes piézométriques.....	26
2.2. INTERPOLATION DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE	28
2.2.1. Préparation des données.....	28
2.2.2. Elaboration des cartes piézométriques	32
2.3. PRESENTATION ET ANALYSE DES CARTES PIEZOMETRIQUES.....	42
2.3.1. Caractéristiques et limites d'utilisation des cartes piézométriques.....	42
2.3.2. Clés de lecture des cartes piézométriques	42
2.3.3. Carte piézométrique de basses eaux.....	43
2.3.4. Carte piézométrique de hautes eaux	44
2.3.5. Indice de confiance	47
2.3.6. Coupes hydrogéologiques	50
2.3.7. Sens d'écoulement et axes de drainage	50
3. Conclusion.....	51
4. Bibliographie	53

Liste des illustrations

Illustration 1 : Altitudes sur Brest Métropole (MNT 5 m – source : Brest Métropole)	11
<i>Illustration 2 : Carte des domaines et des structures majeures du Massif Armoricaïn (modifié d'après Chantraine et al., 2001)</i>	<i>12</i>
Illustration 3 : Carte géologique au 1/50 000 du territoire de Brest Métropole (à gauche) et carte géologique simplifiée au 1/250 000 (à droite)	13
Illustration 4 : Failles majeures de la partie occidentale du Massif Armoricaïn (Ballèvre et al., 2013)	14
Illustration 5 : Entités hydrogéologiques BD LISA de niveau 3 et d'ordre 1 sur le territoire de Brest Métropole	16
Illustration 6 : Carte de localisation des piézomètres du réseau de suivi quantitatif de Bretagne dans le secteur de Brest Métropole (carrés bleus) - Source : SIGES Bretagne – BRGM	17
Illustration 7 : Chronique piézométrique de l'ouvrage BSS000SYKG situé à St Divy (29) – Source : ADES	18
Illustration 8 : Chroniques piézométriques 2020 et 2021 de l'ouvrage BSS000SYKG de St Divy (29) et statistiques mensuelles – Source : ADES.....	18
Illustration 9 : Sectorisation de la zone d'étude pour les campagnes piézométriques	20
Illustration 10 : Chroniques piézométriques des trois piézomètres du réseau régional situés à proximité de la zone d'étude (source : ADES)	21
Illustration 11 : Coefficients de marée pendant la campagne piézométrique de basses eaux – source : maree.info	22
Illustration 12 : Bilan des points d'eau recherchés lors de la campagne piézométrique de basses eaux.....	23
Illustration 13 : Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique de basses eaux	23
Illustration 14 : Chroniques piézométriques des trois piézomètres du réseau régional situés à proximité de la zone d'étude (source : ADES)	24
Illustration 15 : Coefficients de marée pendant la campagne piézométrique de basses eaux – source : maree.info	25
Illustration 16 : Bilan des points d'eau recherchés lors de la campagne piézométrique de basses eaux.....	25
Illustration 17 : Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique de hautes eaux	26
Illustration 18 : Nature des points d'eau mesurés lors des 2 campagnes piézométriques sur Brest Métropole	27
Illustration 19 : Statistiques de profondeur de la nappe pendant les 2 campagnes piézométriques et du battement de la nappe	27
Illustration 20 : Localisation des 2 points d'eau artésiens relevés en hautes eaux.....	28
Illustration 21 : Localisation des données piézométriques validées et écartées pour l'interpolation en basses eaux	30
Illustration 22 : Localisation des données piézométriques validées et écartées pour l'interpolation en hautes eaux.....	31
Illustration 23 : Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM	33

Illustration 24 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de basses eaux	34
Illustration 25 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de basses eaux	34
Illustration 26 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de hautes eaux	35
Illustration 27 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de hautes eaux	35
Illustration 28 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)	36
Illustration 29 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de basses eaux	37
Illustration 30 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de basses eaux	37
Illustration 31 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de hautes eaux	38
Illustration 32 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de hautes eaux	38
Illustration 33 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de basses eaux	40
Illustration 34 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de hautes eaux	40
Illustration 35 : Gamme théorique de diffusivité dans le secteur de Brest Métropole	41
Illustration 36 : Estimation de propagation d'une onde de crue dans la Seine (Boisson et al., 2017)	41
Illustration 37 : Exemple d'une carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes piézométriques (Bault et al., 2015)	43
Illustration 38 : Carte piézométrique de basses eaux 2020 sur le territoire de Brest Métropole	45
Illustration 39 : Carte piézométrique de hautes eaux 2021 sur le territoire de Brest Métropole	46
Illustration 40 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de basses eaux	47
Illustration 41 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de hautes eaux	48
Illustration 42 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de basses eaux	49
Illustration 43 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de hautes eaux	49
Illustration 44 : Coupe hydrogéologique est-ouest entre Guipavas et la Penfeld (trait de coupe en rouge sur la carte de gauche)	50

Liste des annexes

Annexe 1 Fiche de terrain et exemple de résultats	55
Annexe 2 Géostatistique et interpolation par la géostatistique	59

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS

La gestion des eaux pluviales en domaine urbain est une préoccupation importante dans la gestion du petit cycle de l'eau, et s'intègre pleinement dans les réflexions et les actions visant à construire les stratégies de ville durable. Dans ce domaine, Brest Métropole est une collectivité innovante et pionnière.

Avec la mise en œuvre de la compétence GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) de la Loi NOTRe (Nouvelle Organisation Territoriale de la République) du 7 août 2015, la bonne gestion des eaux pluviales devient un enjeu majeur, et la solution de l'infiltration de l'eau de pluie à la parcelle constitue une solution très intéressante pour limiter l'impact des surfaces imperméabilisées.

Brest Métropole a pris en compte très tôt la gestion des eaux pluviales dans son Plan local d'urbanisme (PLU) : un zonage pluvial et des règles de gestion associées ont été intégrés au PLU « Facteur 4 », approuvé en janvier 2014. Brest Métropole est également très présente au niveau du suivi des travaux d'aménagement des ouvrages d'eaux pluviales pour favoriser la biodiversité et l'intégration paysagère, levier important pour le développement et l'intégration des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales.

Par ailleurs, Brest Métropole a choisi d'intégrer le réseau d'acteurs sur la gestion des eaux en milieu urbain, aux côtés de Rennes Métropole et avec l'appui du CRESEB (Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau en Bretagne, <https://www.creseb.fr/>), afin de construire une plateforme d'échanges collaboratifs sur cette thématique.

Le Pôle Espace Public et Environnement de la collectivité souhaite aujourd'hui aller plus loin dans la connaissance du sous-sol de la métropole, afin d'évaluer les capacités du milieu à infiltrer les eaux pluviales (et adapter si besoin le zonage pluvial en conséquence) et évaluer l'impact des eaux souterraines sur les infrastructures (canalisations d'eau potable et d'assainissement) et sur la stabilité des falaises.

Brest Métropole est également engagée dans une démarche de maîtrise de l'énergie conformément aux engagements du Pacte électrique breton. Dans ce cadre, la métropole et la ville de Brest œuvrent, depuis 2009, à la réalisation et la mise en œuvre de leur Plan climat commun. Brest Métropole s'intéresse à l'énergie géothermique de très basse énergie et souhaiterait profiter des données hydrogéologiques collectées pour établir une carte du potentiel géothermique de son territoire.

C'est dans ce cadre que Brest Métropole a demandé au BRGM de proposer un programme permettant d'apporter des éléments de réponse spatialisés, à travers une convention de recherche et de développement.

Les objectifs de ce projet visent donc à identifier les nappes d'eaux souterraines en présence sur le territoire de Brest Métropole, et établir une carte piézométrique en période de hautes eaux et une seconde en période de basses eaux.

Cette première phase de travaux permettra de collecter et centraliser des informations utiles à la compréhension du fonctionnement des aquifères présents au droit du territoire de Brest Métropole.

Par ailleurs, dans l'éventualité d'une construction d'un modèle géologique urbain en 3 dimensions du territoire de Brest Métropole, ces données pourront être à nouveau valorisées et alimenter considérablement la réflexion pour l'élaboration d'un outil d'aide à un aménagement efficace du territoire.

1.2. SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude correspond au territoire de Brest Métropole qui se situe dans le département du Finistère en région Bretagne. Créée en 1974, la Communauté urbaine de Brest est devenue Brest Métropole le 1^{er} janvier 2015. Elle regroupe les huit communes fondatrices, soit environ 212 000 habitants (Brest, Bohars, Gouesnou, Guilers, Guipavas, Le Relecq-Kerhuon, Plougastel-Daoulas, Plouzané ; <https://www.brest.fr/deux-institutions/brest-metropole/les-huit-communes-de-la-metropole-1664.html>). Son territoire couvre une superficie de 220 km².

Ce secteur comporte des zones urbanisées, où il est souvent difficile de trouver des points d'accès aux eaux souterraines (notamment le centre-ville de Brest) et des secteurs plus ruraux, comme au niveau de la presqu'île de Plougastel-Daoulas. Il faut d'ailleurs noter que la presqu'île de Plougastel est séparée du reste du secteur d'étude par l'Elorn, fleuve côtier se jetant dans la rade de Brest.

Même si la recherche de points de mesure de niveau de nappe s'est concentrée sur les 8 communes de Brest Métropole, le secteur d'étude a été légèrement étendu (tampon de 2 km autour des communes de Brest Métropole) et couvre une superficie de 323 km².

1.2.1. Contexte géographique

Le secteur d'étude est morphologiquement complexe, et les reliefs témoignent à la fois des déformations tectoniques, des érosions différentielles, des phases successives d'aplanissement continental et d'érosion marine.

Sur les 8 communes de Brest Métropole, les altitudes s'échelonnent du niveau de la mer jusqu'à plus de 130 m de hauteur (Illustration 1). La topographie est accidentée : les altitudes les plus élevées se situent à l'est du secteur d'étude (dans le centre-ville de Plougastel-Daoulas (133 m) et au nord-est de Guipavas (131 m)). Les altitudes les plus faibles (inférieures au niveau de la mer) se rencontrent au niveau des carrières en activité (carrière de Kerguillo à Guilers et carrière Moulin du Roz à Guipavas). La topographie est caractérisée par des zones de replats limités en général par des zones à forte pente et par des vallées très encaissées.

Les cours d'eau principaux sont généralement de direction nord-sud (affluents en est-ouest) et la ligne de partage des eaux se situe très au sud du territoire. La Penfeld, le Stang Alar et de petits fleuves côtiers s'écoulent vers le sud en entaillant profondément les vallées (rias), et se jettent dans la rade de Brest. A l'inverse, les cours d'eau situés au nord du territoire s'écoulent vers le nord à travers le plateau du Léon dans des vallées plus larges (Aber Ildut).

Plougastel-Daoulas est séparé du reste du territoire par l'Elorn, fleuve parcourant 56 km depuis sa source dans les monts d'Arrée.

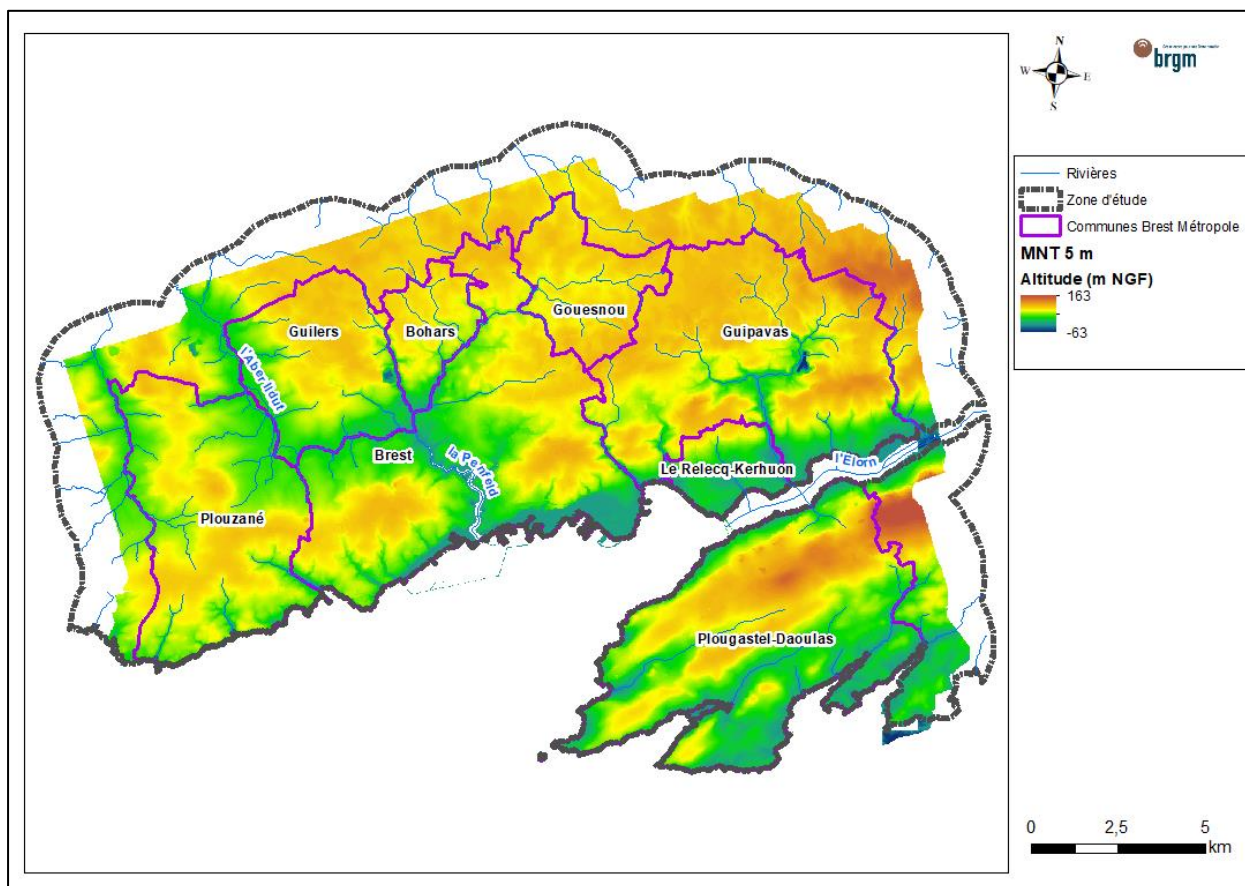


Illustration 1 : Altitudes sur Brest Métropole (MNT 5 m – source : Brest Métropole)

1.2.2. Contexte géologique

Le Massif Armoricain a été soumis à des phénomènes tectoniques ayant engendré la formation de chaînes de montagne (orogénèses « cadomienne » et « hercynienne »).

Ce massif est divisé en plusieurs domaines géologiques, séparés du nord au sud par deux zones de cisaillement majeures : le Cisaillement Nord Armoricain (CNA) et le Cisaillement Sud Armoricain (CSA) - Illustration 4. En Bretagne, on compte neuf grands domaines géologiques (Illustration 2).

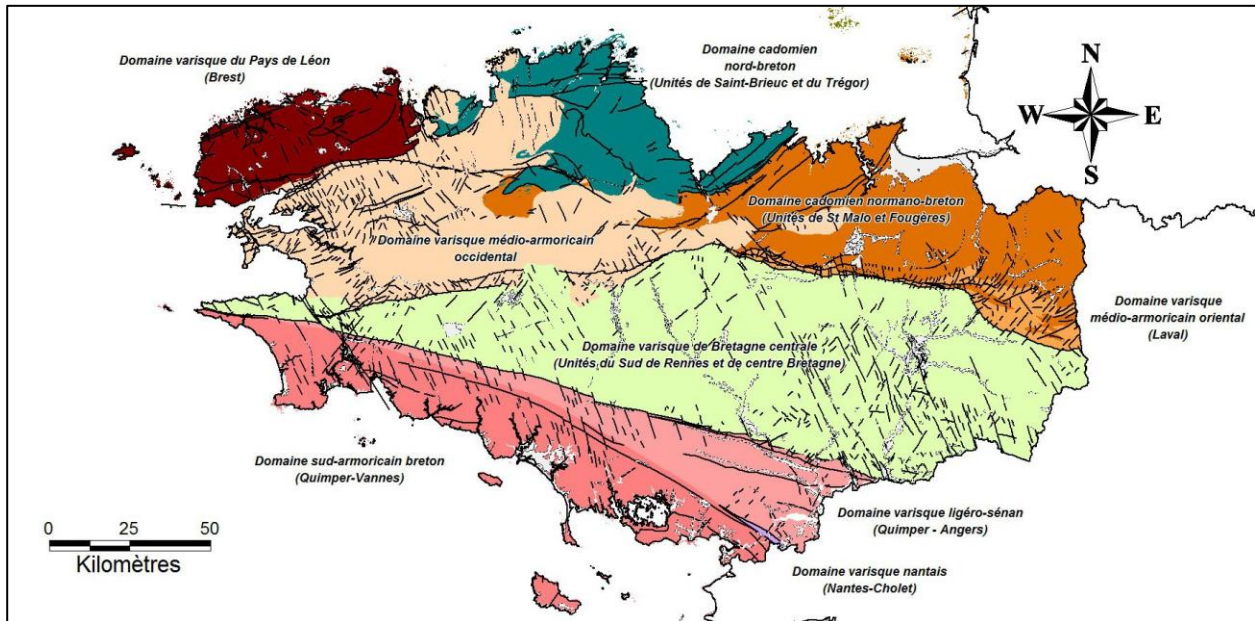


Illustration 2 : Carte des domaines et des structures majeures du Massif Armoricaire (modifié d'après Chantraine et al., 2001)

Le territoire de Brest Métropole se situe à cheval sur deux domaines du Massif Armoricaire : le Domaine varisque du Léon au nord (en marron sur l'illustration 2) et le Domaine varisque médio-armoricain occidental au sud (en beige). La limite entre ces deux domaines est marquée par de nombreux accidents tectoniques, dont certains sont très visibles dans la topographie. Le complexe schisto-gréseux briovérien de la vallée de l'Elorn sépare les deux domaines (Illustration 3).

Au nord de ce complexe, le Léon est formé d'un vaste plateau qui s'incline vers le nord. On y trouve essentiellement des formations granitiques et métamorphiques (Gneiss de Brest, micaschistes - Illustration 3). D'importants accidents tectoniques de direction N150 affectent les Gneiss de Brest. Le nord du territoire de Brest Métropole se situe sur des terrains plutoniques, correspondant à la bordure sud du plateau du Léon.

Au sud, la presqu'île de Plougastel est marquée par un réseau de failles très dense, de directions N150 et N20. Elle est constituée de formations paléozoïques (empilement de roches sédimentaires déformées : schistes, quartzites, grès et calcaires).

Les formations du Briovérien de la vallée de l'Elorn et les formations paléozoïques de Plougastel sont séparées par une ensemble de failles dont la principale est appelée « faille de l'Elorn » (Illustration 4), de direction est-nord-est – ouest-sud-ouest.

Le cisaillement nord-armoricain, de direction est-ouest, qui traverse toute la Bretagne, affecte les granites de Saint Renan et de Kersaint (voir Illustration 3 et Illustration 4).

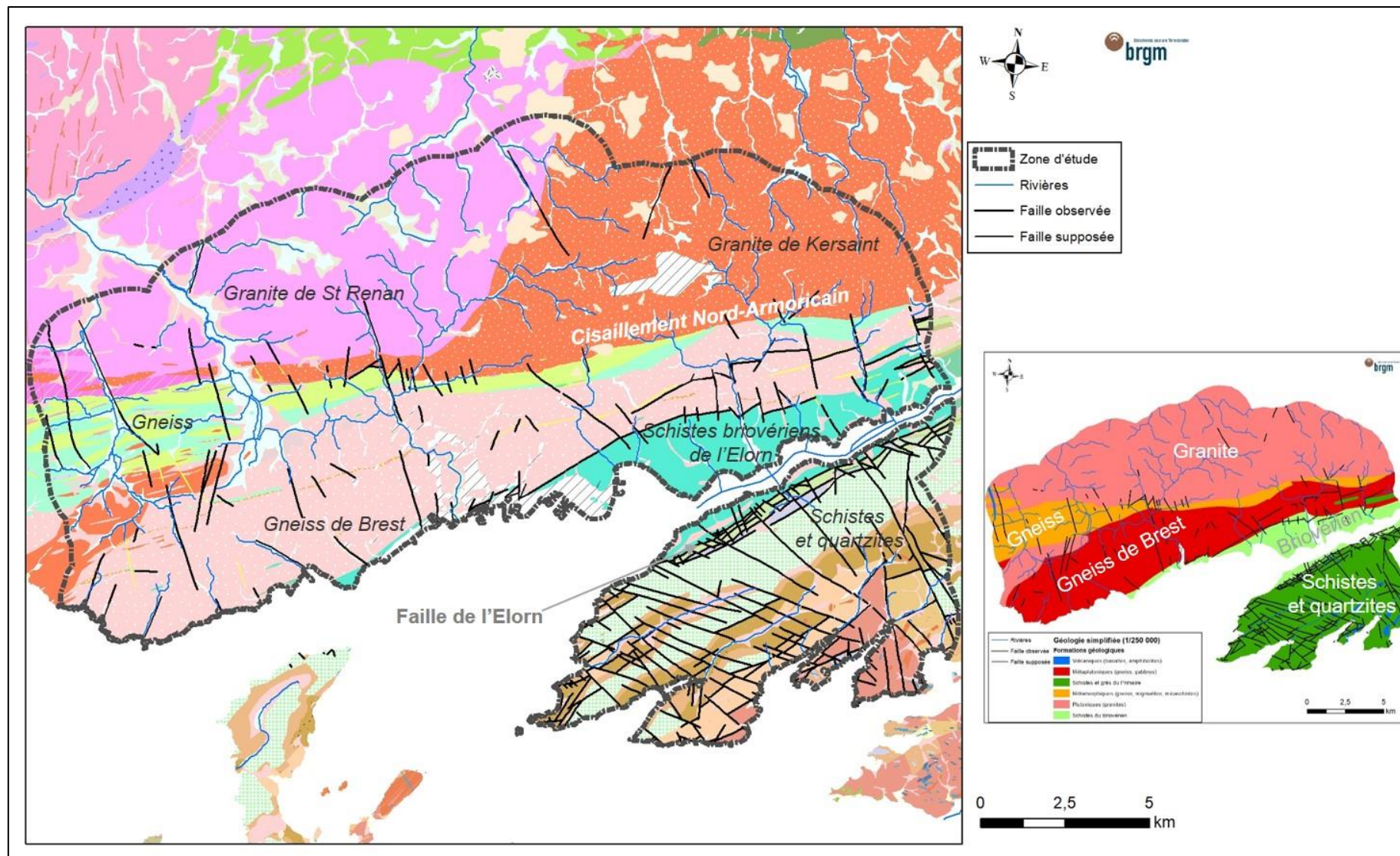


Illustration 3 : Carte géologique au 1/50 000 du territoire de Brest Métropole (à gauche) et carte géologique simplifiée au 1/250 000 (à droite)

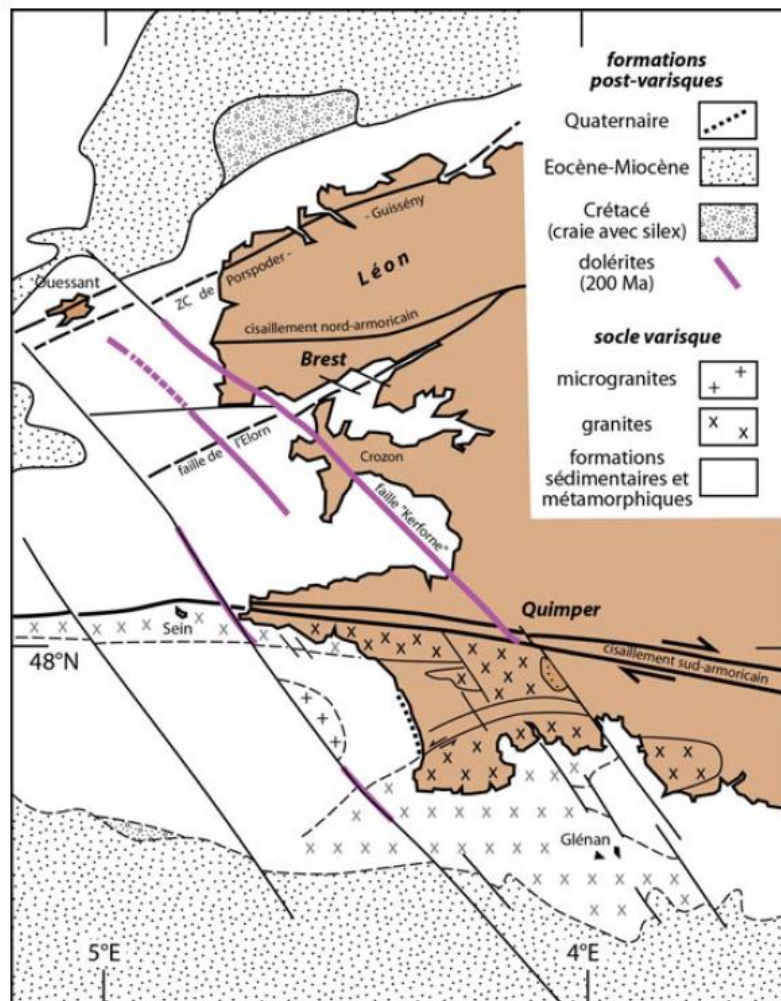


Illustration 4 : Failles majeures de la partie occidentale du Massif Armoricain (Ballèvre et al., 2013)

1.2.3. Contexte hydrogéologique

La présence de ressource en eau souterraine est fortement conditionnée par le substrat géologique. En Bretagne, il n'existe pas de grands aquifères, mais une mosaïque de petits systèmes imbriqués (la surface au sol de chacun d'eux n'excède pas en général quelques dizaines d'hectares), indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles des exploitations qui en sont faites.

Le Finistère, comme la majorité du Massif Armoricain, est constitué de roches dures anciennes (formations dites « de socle »).

Trois types d'aquifères sont dénombrés pour le Massif Armoricain, même si certains sont très réduits en termes de superficie. En fonction de ces trois types, il peut en exister tout un panel par combinaison, d'interaction et de superposition d'un modèle sur un autre :

- Le plus important en terme de superficie est **l'aquifère de socle** s.l. (voir <https://sigesbre.brgm.fr/Aquiferes-bretons.html>) situé dans l'altération et la fracturation d'origine latéritique, mais aussi tectonique, des roches du socle armoricain. L'altération et la fracturation ont généré un horizon meuble de roches altérées (de 20 à 30 m

d'épaisseur) avec une porosité permettant l'infiltration et le stockage des eaux météoritiques vers un horizon plus compact et fissuré de 40 à 60 m d'épaisseur et soutenant le débit des cours d'eau. Cet ensemble socle-altération a subi des événements tectoniques créant de petits bassins d'effondrements tertiaires ;

- Les **bassins sédimentaires**, dont le plus important en région Bretagne est celui de Chartres-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine), renferment des aquifères de type sédimentaire dans lesquels la ressource en eau, malgré leur superficie réduite, est plus importante et contenue dans les couches sédimentaires les plus perméables ;
- Le troisième type d'aquifère est **alluvial**, commun à tous les fleuves et cours d'eau. Ces aquifères sont contenus dans les alluvions des fleuves et cours d'eau et leur capacité de production d'eau (généralement utilisée pour l'eau potable) est importante mais ils sont vulnérables aux pollutions ;

Enfin, un type particulier d'aquifère peut se rencontrer en bord de mer, l'aquifère côtier, dont une des limites est constituée par la mer et l'autre par les premiers reliefs côtiers.

Sur le territoire de Brest Métropole, on rencontre essentiellement des aquifères de socle. Ces aquifères sont en contact avec la mer mais il n'existe pas d'aquifère côtier à proprement parler compte-tenu de la topographie de la rade de Brest (altitudes relativement élevées à quelques kilomètres des côtes).

Le territoire de Brest Métropole se trouve sur 4 entités hydrogéologiques BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères ; <https://bdlisa.eaufrance.fr/> - Illustration 5) de niveau 3 :

- 191AC01 – Socle métamorphique dans les bassins versants de l'Aber Ildut et de la Penfeld de leurs sources à la mer & côtiers, île d'Ouessant ;
- 191AA03 - Socle métamorphique dans les bassins versants côtiers de l'Aber Wrac'h (inclus) à l'Aber Benoit (inclus) ;
- 191AA04 – Socle métamorphique dans le bassin versant de l'Elorn de sa source à la mer ;
- 191AE01 – Socle plutonique dans les bassins versants de la Mignonne et l'Hôpital Camfrout de leurs sources à la mer & côtiers.

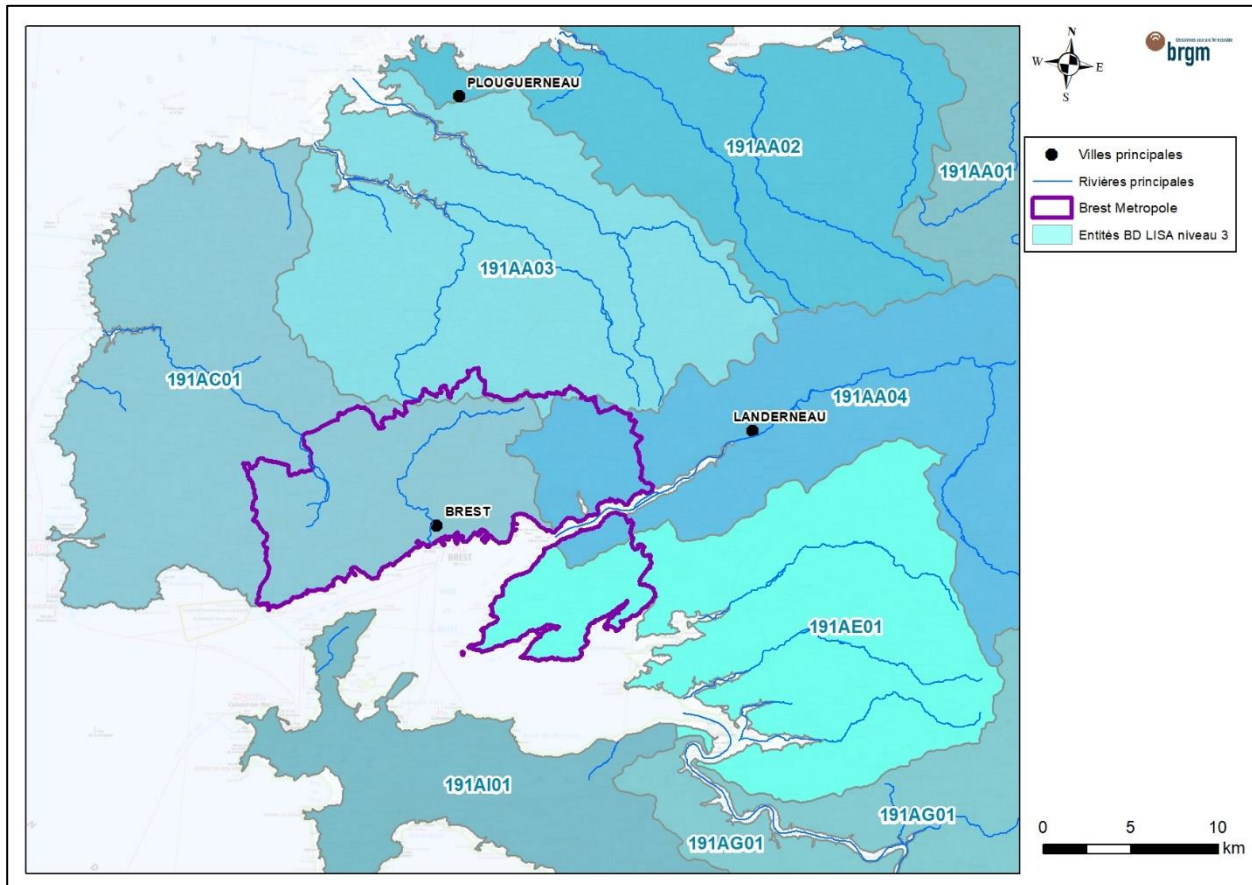


Illustration 5 : Entités hydrogéologiques BD LISA¹ de niveau 3 et d'ordre 1 sur le territoire de Brest Métropole

1.3. CONTEXTE DE L'ETUDE

Une carte piézométrique a été réalisée en 2002 (maille de 100 m de côté) sur les bassins versants de la rade de Brest, en période de moyennes eaux (Mougin et al., 2004), à partir des niveaux piézométriques disponibles dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et d'une campagne de mesures réalisée en juillet 2002.

Il n'existe pas de carte piézométrique détaillée couvrant l'ensemble du territoire de Brest Métropole. Celle-ci doit donc être réalisée sur la base de mesures piézométriques effectuées dans des ouvrages souterrains (puits, forages, piézomètres...), sur une période la plus courte possible (afin d'obtenir des données relativement synchrones).

Cette carte doit couvrir l'ensemble du territoire de Brest Métropole (220 km²) afin d'obtenir une vision homogène.

La période la plus défavorable à l'infiltration des eaux pluviales étant celle des **hautes eaux souterraines**, il est nécessaire de réaliser une campagne lors de cette période qui survient en

¹ La BD LISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) est un référentiel cartographique du Système d'Information sur l'Eau. Elle classe le sous-sol en entités hydrogéologiques selon différentes propriétés : aquifère ou imperméable, écoulements libres ou captifs, milieu poreux, fracturé, karstique.

principe en hiver, entre les mois de janvier et d'avril, sachant que le pic des niveaux des eaux souterraines varie d'une année sur l'autre, en fonction de la pluviométrie.

Les autres problématiques envisagées dans le cadre du projet (canalisations, stabilité des falaises) impliquent d'avoir également une connaissance du niveau des nappes souterraines en période de **basses eaux**, et d'avoir une connaissance spatialisée du battement de la nappe (variation des niveaux entre les hautes eaux et les basses eaux). Une seconde campagne de mesure en basses eaux a donc été réalisée sur les mêmes ouvrages qu'en hautes eaux, en début d'automne (les plus bas niveaux des eaux souterraines arrivant souvent en octobre, en fonction des années hydrologiques).

Les campagnes de mesures ont été organisées à des périodes correspondant le plus possible aux pics des hautes eaux et des basses eaux observées dans les piézomètres suivis en continu par le BRGM et appartenant au réseau piézométrique régional (<https://siges.brgm.fr/Reseau-piezometrique-regional.html>).

Le piézomètre le plus proche de la zone d'étude est situé sur la commune de Saint Divy au lieu-dit Pen-Ar-Forest (code BSS : [BSS000SYKG](#) - Illustration 6). Il capte un aquifère superficiel (ouvrage de 20 m de profondeur) situé dans le granite de Kersaint. Ce piézomètre se trouve à 120 m d'altitude et la cote piézométrique moyenne est située autour de 113 m NGF, avec un battement annuel moyen de 3,46 m sur la période 1993-2020. Il est suivi en continu depuis 1993 et indique des pics de hautes eaux aux mois de décembre-janvier-février et des minima d'étiage généralement en septembre-octobre (Illustration 7).

Deux autres ouvrages situés non loin du territoire de Brest Métropole (Pencran - [BSS000SZLF](#) et Plourin - [BSS000SXEa](#)) sont également suivis par le BRGM (Illustration 6).



Illustration 6 : Carte de localisation des piézomètres du réseau de suivi quantitatif de Bretagne dans le secteur de Brest Métropole (carrés bleus) - Source : SIGES Bretagne – BRGM

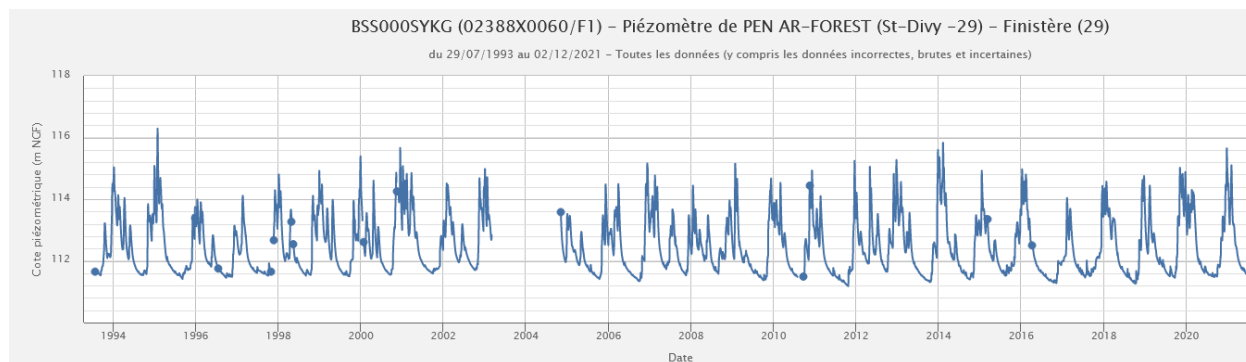


Illustration 7 : Chronique piézométrique de l'ouvrage BSS000SYKG situé à St Divy (29) – Source : ADES

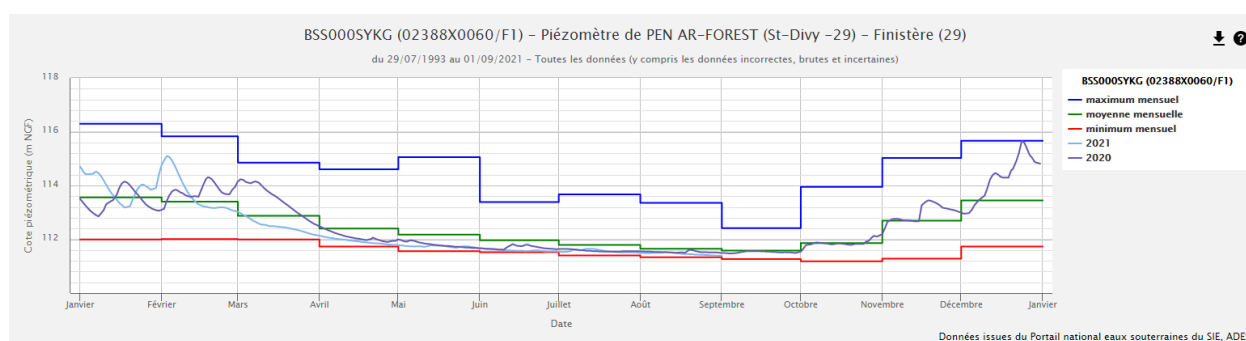


Illustration 8 : Chroniques piézométriques 2020 et 2021 de l'ouvrage BSS000SYKG de St Divy (29) et statistiques mensuelles – Source : ADES

2. Cartes piézométriques

2.1. PREPARATION ET DEROULEMENT DES CAMPAGNES PIEZOMETRIQUES

2.1.1. Préparation des campagnes piézométriques

En amont des campagnes piézométriques, l'ensemble des points d'eau souterraine (puits, forages, sources) ont été recensés sur la zone d'étude à partir des bases de données suivantes, organisées et gérées par le BRGM :

- La BSS (Banque de données du Sous-Sol ; <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>) : toutes les données sur les ouvrages (forages, sondages, puits et sources) souterrains du territoire sont collectées pour être conservées dans une base de données ;
- Le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines ADES (<https://ades.eaufrance.fr/>) met à disposition les données sur la qualité de l'eau souterraine et sur les niveaux des eaux souterraines. Guichet unique d'accès à ces données, il constitue un outil pour suivre l'état des ressources en eaux souterraines ;
- La BSS EAU est la base de données relative aux informations sur les eaux souterraines, et respecte le format SANDRE (Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau) : données sur la qualité des eaux souterraines, niveaux d'eau, prélèvements, etc. Elle diffuse des informations spécifiques sur le descriptif du point d'eau (mode de gisement, entités hydrogéologiques et masses d'eau associées...).

Ce premier recensement a permis d'identifier 461 points d'eau mais sans information sur le niveau de leur accessibilité sur le terrain. La BSS étant une base de données déclarative (pour des ouvrages de plus de 10 m de profondeur) récoltant des données durant la foration, le devenir des ouvrages n'est pas toujours bancarisé. Certains de ces ouvrages peuvent donc être rebouchés, ou avec des incertitudes de localisation (selon la qualité des données fournies par le pétitionnaire).

Statistiquement, au vu de possibles problèmes d'accès et de visibilité en milieu urbain et compte tenu de l'expérience du BRGM dans ce type d'étude, l'objectif de ces campagnes piézométriques était de mesurer 300 points sur la zone d'étude, soit une densité d'environ 1 point tous les 0,75 km².

L'équipe de travail pour ces campagnes piézométriques a été composée de 5 techniciens en hydrogéologie. La zone d'étude a donc été partagée en cinq secteurs pour permettre une meilleure adéquation entre les trajets et la densité de points à mesurer (Illustration 9).

En parallèle, un travail de communication a été mis en place avant le déroulement de chaque campagne de mesures sur le terrain afin de faciliter l'accès des techniciens aux puits et aux forages. Pour cela, un courrier a été envoyé aux mairies des communes de Brest Métropole et un communiqué de presse a été écrit à destination de la presse quotidienne régionale (https://sigesbre.brgm.fr/IMG/pdf/communiqu%C3%A9_presse_piezobrest_brest_metropole_he.pdf).

D'autre part, une plaquette d'information a été distribuée aux habitants lors des campagnes de mesures. Une actualité a été mise en ligne sur le site SIGES Bretagne pour chacune des campagnes :

- <https://sigesbre.brgm.fr/Campagne-piezometrique-sur-le-territoire-de-Brest-Metropole.html>
- <https://sigesbre.brgm.fr/Campagne-piezometrique-sur-le-territoire-de-Brest-Metropole-495.html>

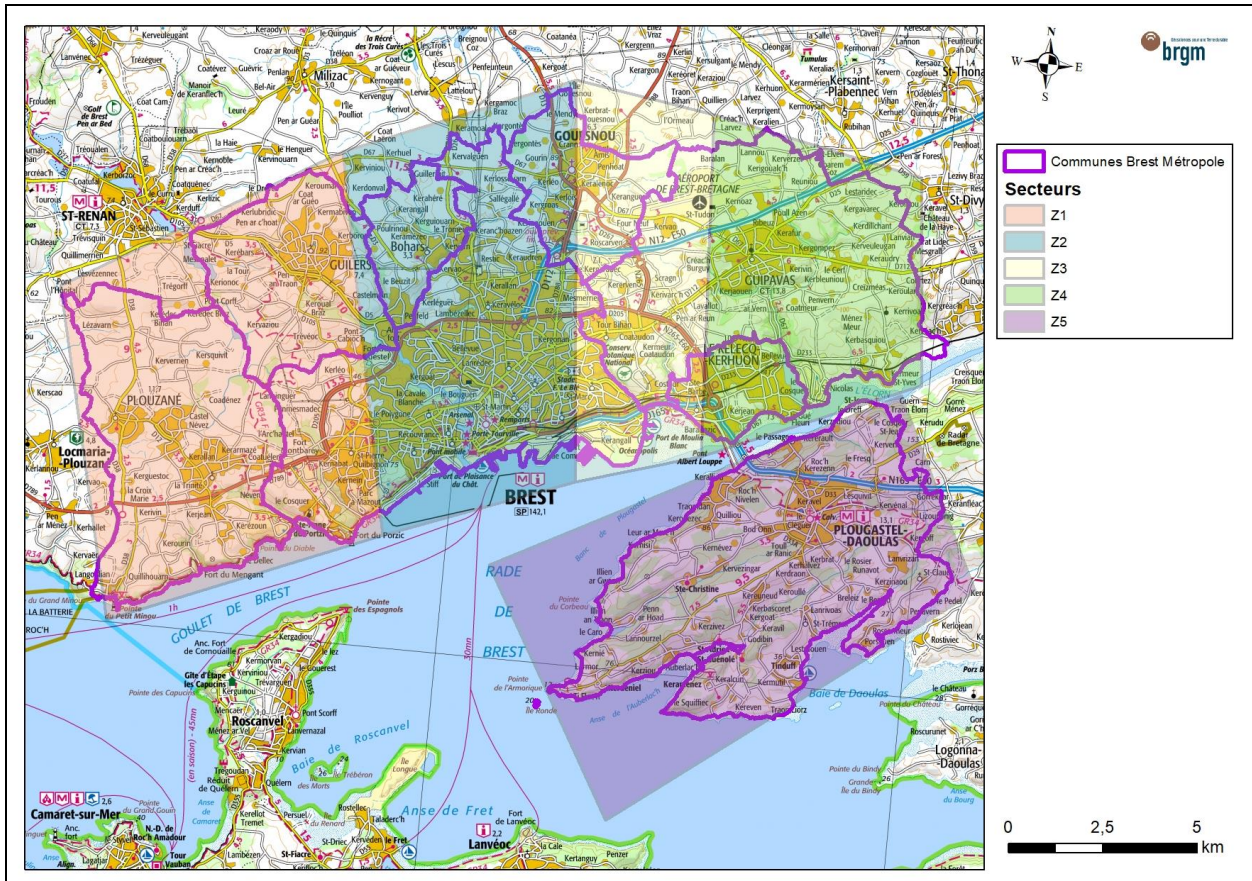


Illustration 9 : Sectorisation de la zone d'étude pour les campagnes piézométriques

2.1.2. Mesures piézométriques en basses eaux

La première campagne piézométrique devait se dérouler au printemps 2020 en période de hautes eaux. Cependant, en raison de la crise sanitaire (COVID-19), cette campagne a dû être reportée au printemps 2021.

La première campagne piézométrique s'est en réalité déroulée du 25 septembre au 1^{er} octobre 2020. Pour les eaux souterraines, cette période est normalement caractéristique des basses eaux.

Les trois piézomètres de référence du BRGM dans le secteur d'étude qui ont un suivi piézométrique disponible en continu, indiquaient effectivement une période de basses eaux, avec les niveaux : les plus bas de l'année 2020, proches des niveaux historiques moyens (sur les piézomètres de Saint-Divy et Plourin) et proches des niveaux historiques minimums (piézomètre de Pencran) comme le montrent les chroniques piézométriques ci-dessous (Illustration 10).

La campagne s'est déroulée juste avant l'arrivée de la tempête Alex (dans la nuit du 1^{er} au 2 octobre 2020) qui a marqué le début de la recharge des nappes.

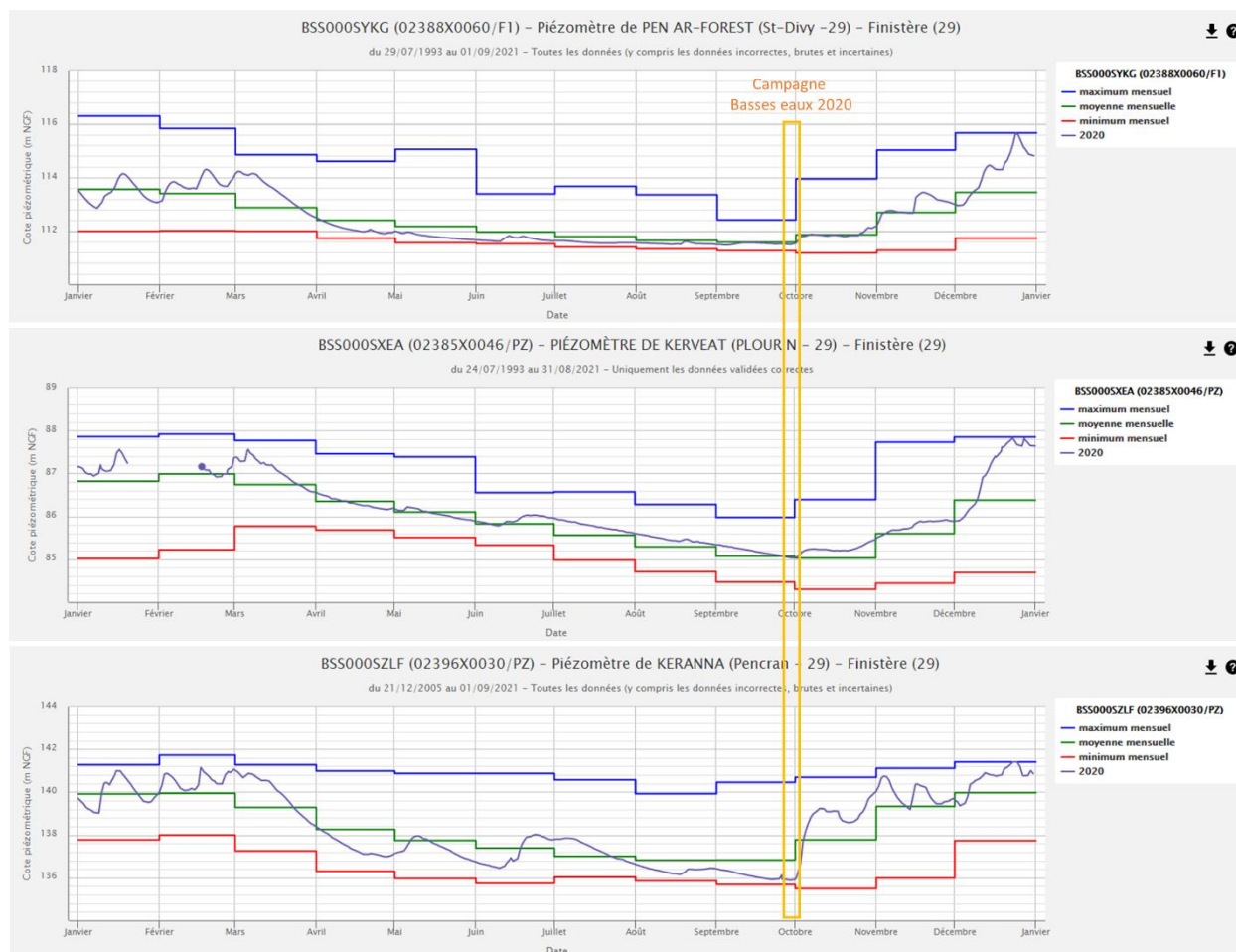


Illustration 10 : Chroniques piézométriques des trois piézomètres du réseau régional situés à proximité de la zone d'étude (source : ADES)

Afin de s'affranchir au maximum d'un possible effet des marées sur les niveaux piézométriques, les mesures ont été réalisées en période de faible coefficient de marée. Les coefficients de marée à Brest pendant la campagne piézométrique de basses eaux étaient compris entre 40 et 85. Sur la période de mesure, les niveaux enregistrés au marégraphe de Brest étaient compris entre - 1,912 et 3,489 m NGF (niveau moyen : 0,564 m NGF).



Illustration 11 : Coefficients de marée pendant la campagne piézométrique de basses eaux – source : maree.info

Les mesures réalisées sur le terrain ont fait l'objet de fiche de terrain (Annexe 1) et comportent notamment les informations suivantes :

- les coordonnées X, Y du site,
- la cote topographique Z du sol,
- l'identification d'un repère et la mesure de sa hauteur par rapport au sol,
- le niveau piézométrique par rapport au repère de mesure (RM),
- la profondeur de l'ouvrage par rapport au repère de mesure (RM),
- les photographies du site.

La cote topographique du sol, celle du repère de mesure et du niveau piézométrique, ont été déterminées par calcul à partir du Modèle numérique de terrain (MNT) à 5 m fourni par les services de Brest Métropole.

Lors de la campagne piézométrique de basses eaux, 169 points ont été recherchés (Illustration 12) et 121 ont pu être mesurés (72% des points recherchés), soit une densité de 1 point tous les 1,8 km² sur le territoire de Brest Métropole (Illustration 12 et Illustration 13).

Parmi les points mesurés, 3 étaient secs (ce qui indique que le niveau piézométrique au droit de l'ouvrage est plus bas que le fond de l'ouvrage) et 5 étaient en pompage (le niveau dynamique mesuré est plus bas que le niveau piézométrique statique de la nappe au repos).

De nombreux points présents dans la BSS n'ont pu être retrouvés sur le terrain. Ils ont probablement été rebouchés sans que l'information ait été mise à jour dans la BSS (base déclarative au moment de la création de l'ouvrage). D'autre part, des points d'eau non enregistrés en BSS, identifiés directement sur le terrain lors de la campagne piézométrique, ont pu être mesurés (voir bilan au chapitre 2.1.4).

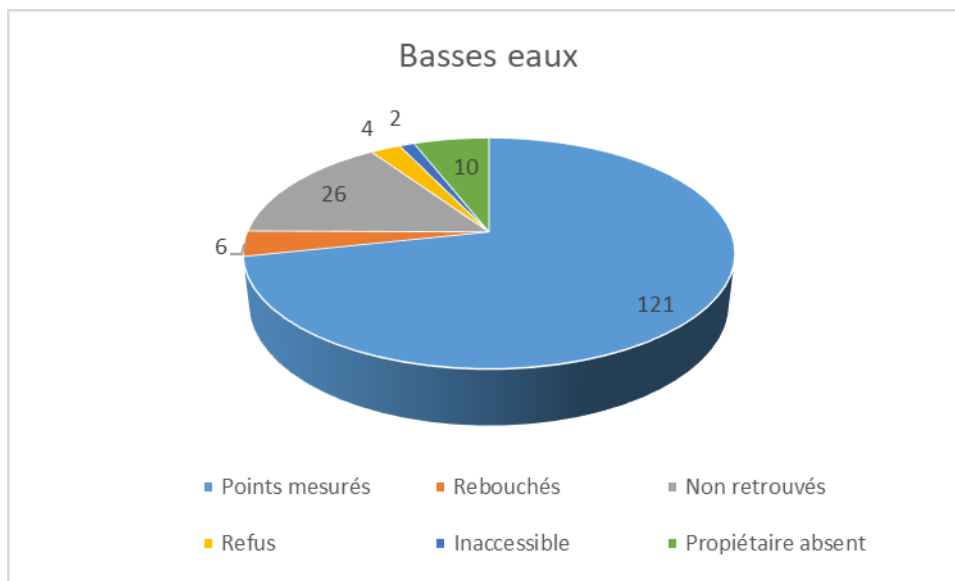


Illustration 12 : Bilan des points d'eau recherchés lors de la campagne piézométrique de basses eaux

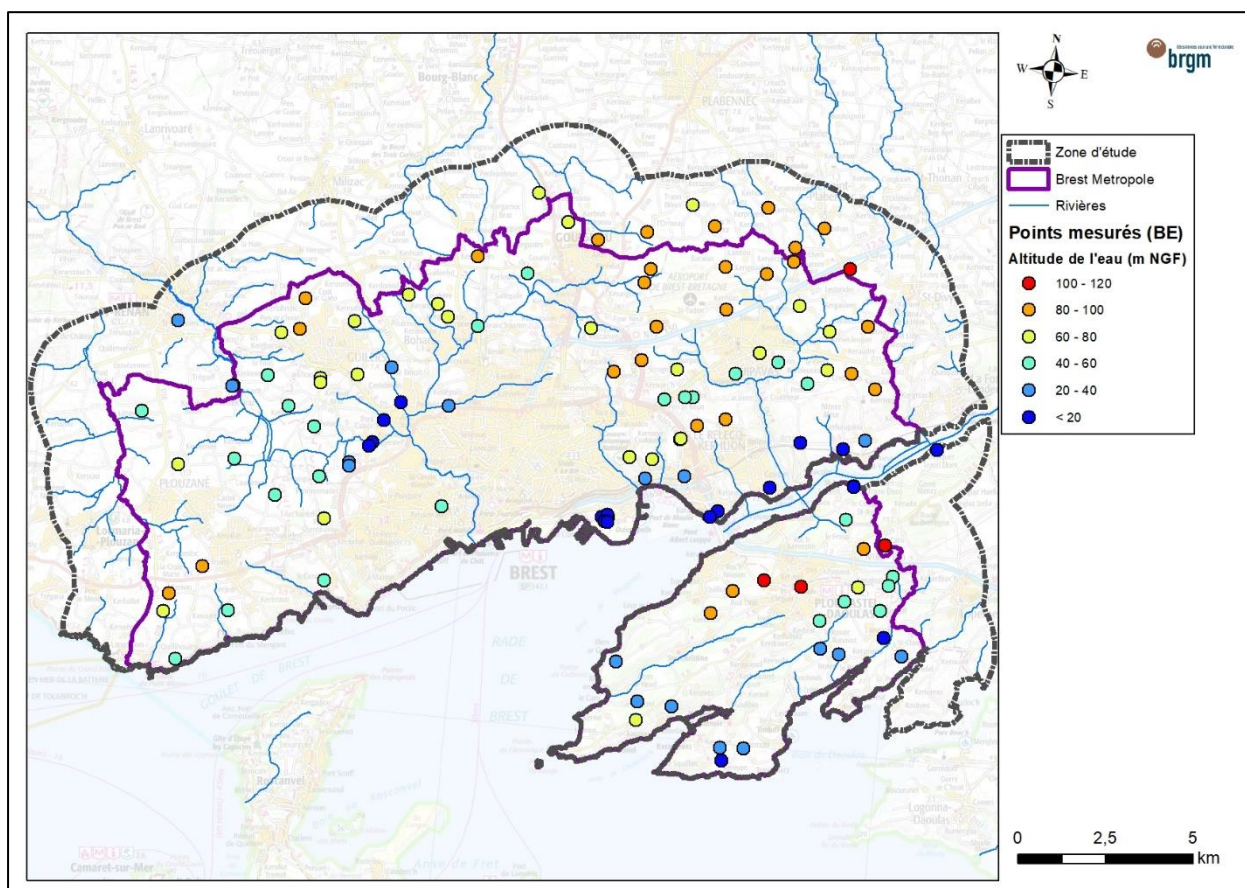


Illustration 13 : Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique de basses eaux

2.1.3. Mesures piézométriques en hautes eaux

La deuxième campagne piézométrique s'est déroulée du 4 au 12 mars 2021. Pour les eaux souterraines, cette période est normalement caractéristique des hautes eaux.

En 2021, la vidange des nappes a commencé de manière précoce, dès le mois de février. Les niveaux observés début mars 2021 sur les trois piézomètres de référence dans le secteur d'étude ne correspondent pas aux plus hautes eaux de l'année hydrologique (atteintes entre décembre 2020 et février 2021) mais il s'agit plutôt de niveaux historiques moyens pour un mois de mars, correspondant au début de la vidange des nappes, comme le montrent les trois chroniques piézométriques ci-dessous (Illustration 14).



Illustration 14 : Chroniques piézométriques des trois piézomètres du réseau régional situés à proximité de la zone d'étude (source : ADES)

Les coefficients de marée à Brest pendant la campagne piézométrique de hautes eaux étaient compris entre 42 et 87. Sur la période de mesure, les niveaux enregistrés au marégraphe de Brest étaient compris entre -2,269 et 3,314 m NGF (niveau moyen : 0,525 m NGF).

Février 2021			Mars 2021			Avril 2021	
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	
1	2	3	4	5	6	7	
106 106	105 102	98 93	87 79	71 63	55 49	44	
8	9	10	11	12	13	14	
42 43	48 54	60 67	72 78	83 86	89 91	92 92	
15	16	17	18	19	20	21	
92 90	88 85	82 77	72 67	61 55	49 43	37 32	
22	23	24	25	26	27	28	
28 26	28	33 40	48 56	65 74	82 90	97 103	
29	30	31	1	2	3	4	
107 111	112 112	111 107	107 107	107 107	107 107	107 107	

Illustration 15 : Coefficients de marée pendant la campagne piézométrique de basses eaux – source : maree.info

194 points ont été recherchés sur le terrain (Illustration 16) et 164 ont pu être mesurés (85% des points recherchés). 9 mesures effectuées par LABOCEA au niveau du Spérnot (ancienne décharge de Brest, bénéficiant d'un suivi piézométrique trimestriel) entre le 3 et le 8 mars 2021 ont pu être ajoutées aux mesures BRGM, soit un total de 173 points de mesures lors de cette campagne (Illustration 17), ce qui correspond à une densité de 1 point tous les 1,3 km² sur le territoire de Brest Métropole.

Parmi les points mesurés, 5 étaient secs et 5 étaient en pompage.

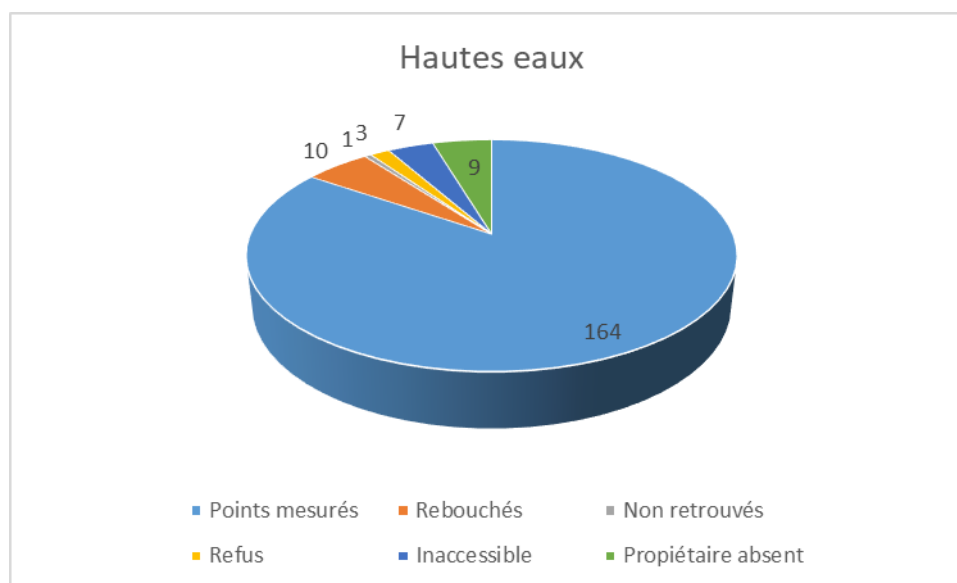


Illustration 16 : Bilan des points d'eau recherchés lors de la campagne piézométrique de basses eaux

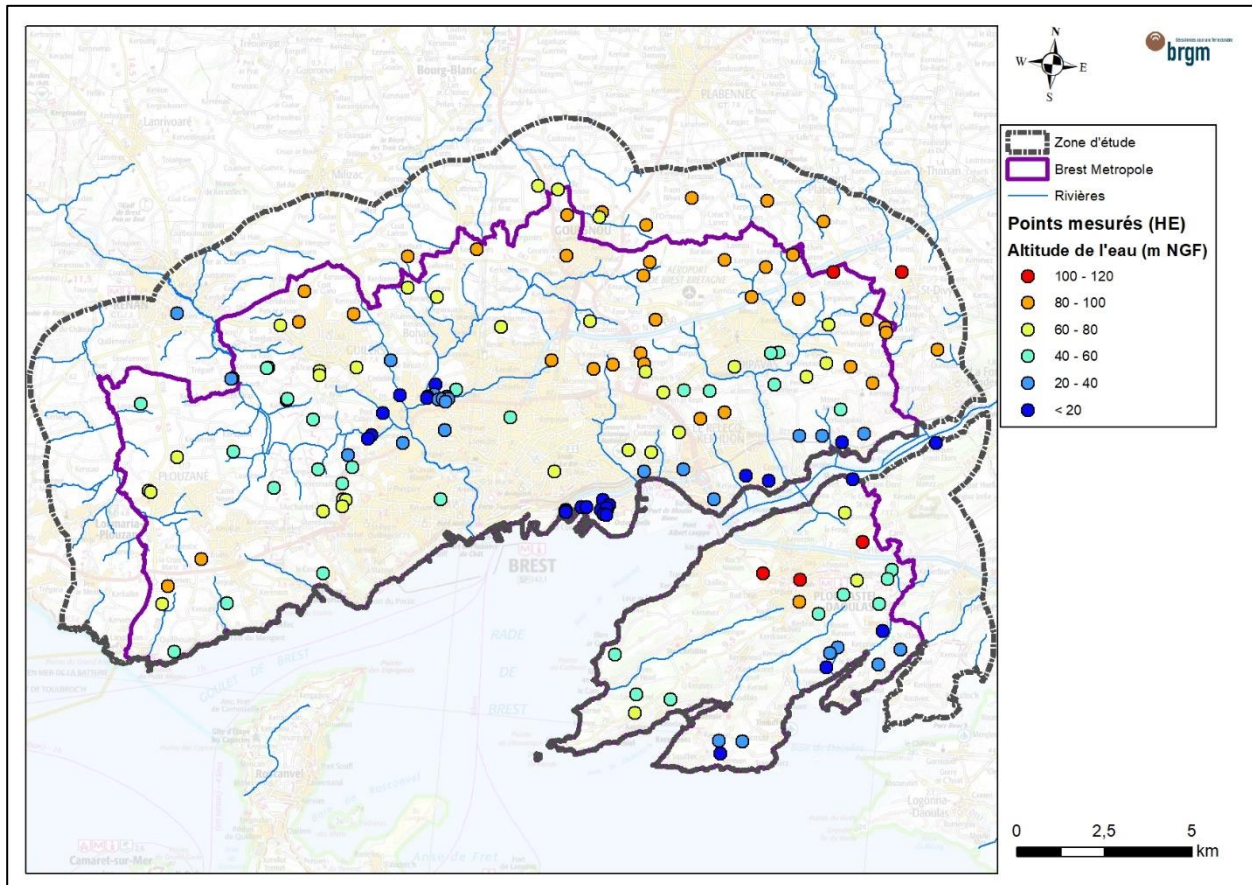


Illustration 17 : Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique de hautes eaux

On note que 64 nouveaux points ont été mesurés lors de cette campagne de hautes eaux par rapport à la campagne de basses eaux (100 points mesurés en hautes eaux avaient déjà été relevés en basses eaux), grâce à des contacts transmis par Brest Métropole et à des recherches encore plus poussées sur le terrain lors de cette 2^{ème} campagne.

Lors de cette 2^{ème} campagne, 112 points de mesures ont été nivelés par le BRGM grâce à des GPS différentiels, permettant d'obtenir une précision en altitude (Z) inférieure à 2 cm pour 50% des points nivelés et une précision inférieure à 5 cm pour 81 % des points nivelés. 12% des points nivelés ont une précision en Z de plus de 10 cm, en raison de la localisation de ces points (pied d'un bâtiment, sous des arbres...) ne permettant pas une réception optimale du signal GPS.

2.1.4. Bilan des campagnes piézométriques

Les premières analyses des campagnes piézométriques montrent que finalement, peu de points d'eau issus de la BSS (84) ont pu être mesurés. Beaucoup de points enregistrés en BSS n'existent plus ou sont inaccessibles du fait du développement de l'urbanisation dans certaines zones. A l'inverse, 106 points d'eau non enregistrés en BSS, identifiés directement sur le terrain lors de la campagne piézométrique, ont pu être mesurés. Ces 106 points ont par la suite été bancarisés dans la BSS. La recherche de points de mesure sur le terrain, notamment en centre-ville de Brest, s'est avérée particulièrement chronophage.

Sur les 2 campagnes confondues, un total de 190 points ont été mesurés, dont 104 en basses eaux et en hautes eaux. Il s'agit essentiellement de forages, mais aussi de piézomètres, de puits et de quelques sources (Illustration 18). Ces points sont répartis de façon homogène sur le territoire de Brest Métropole à l'exception de la zone urbaine de Brest, soit une densité de 1 point tous les 1,8 km² en basses eaux et 1 point tous les 1,3 km² en hautes eaux.

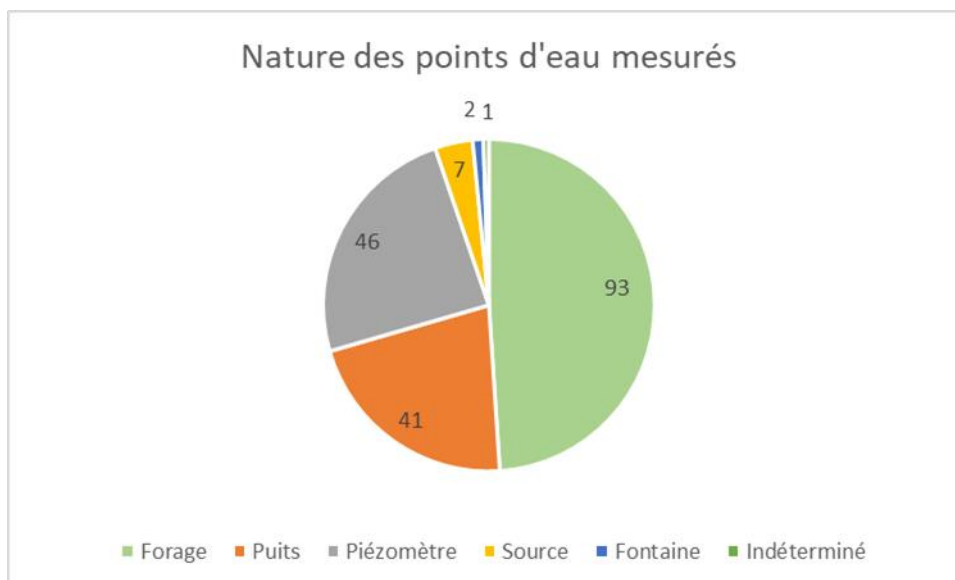


Illustration 18 : Nature des points d'eau mesurés lors des 2 campagnes piézométriques sur Brest Métropole

Malgré une recherche minutieuse d'ouvrages directement sur le terrain, le nombre de mesures a été inférieur à ce qui était espéré au début de l'étude (objectif initial de 1 point tous les 0,75 km²). Le bilan de ces campagnes est toutefois satisfaisant, notamment en hautes eaux, car la densité de points permet de réaliser une interpolation de bonne qualité. Cette interpolation a permis de produire une grille des altitudes de la nappe (hautes et basses eaux) au pas de 5 m.

Sur les points de mesure, la profondeur moyenne de la nappe par rapport au niveau du sol se situe à 8,73 m en basses eaux et à 5,79 m en hautes eaux (Illustration 19). Un seul point présente un niveau piézométrique plus élevé en basses eaux qu'en hautes eaux (+ 18 cm, battement négatif sur l'illustration 19). Le battement moyen de la nappe est de 2,71 m entre basses eaux et hautes eaux. Deux points d'eau artésiens ont été vus en hautes eaux (niveau piézométrique 68 cm au-dessus de la surface du sol pour un point situé à Plougastel-Daoulas et niveau piézométrique au niveau du sol pour un point situé à Brest - Illustration 20 et chapitre 2.2.1).

	Profondeur de la nappe (m)		Battement (m)
	Basses eaux (octobre 2020)	Hautes eaux (mars 2021)	Hautes eaux - Basses eaux
Minimum	0,41	-0,68	-0,18
Maximum	27,4	24,27	17,1
Moyenne	8,73	5,79	2,71

Illustration 19 : Statistiques de profondeur de la nappe pendant les 2 campagnes piézométriques et du battement de la nappe

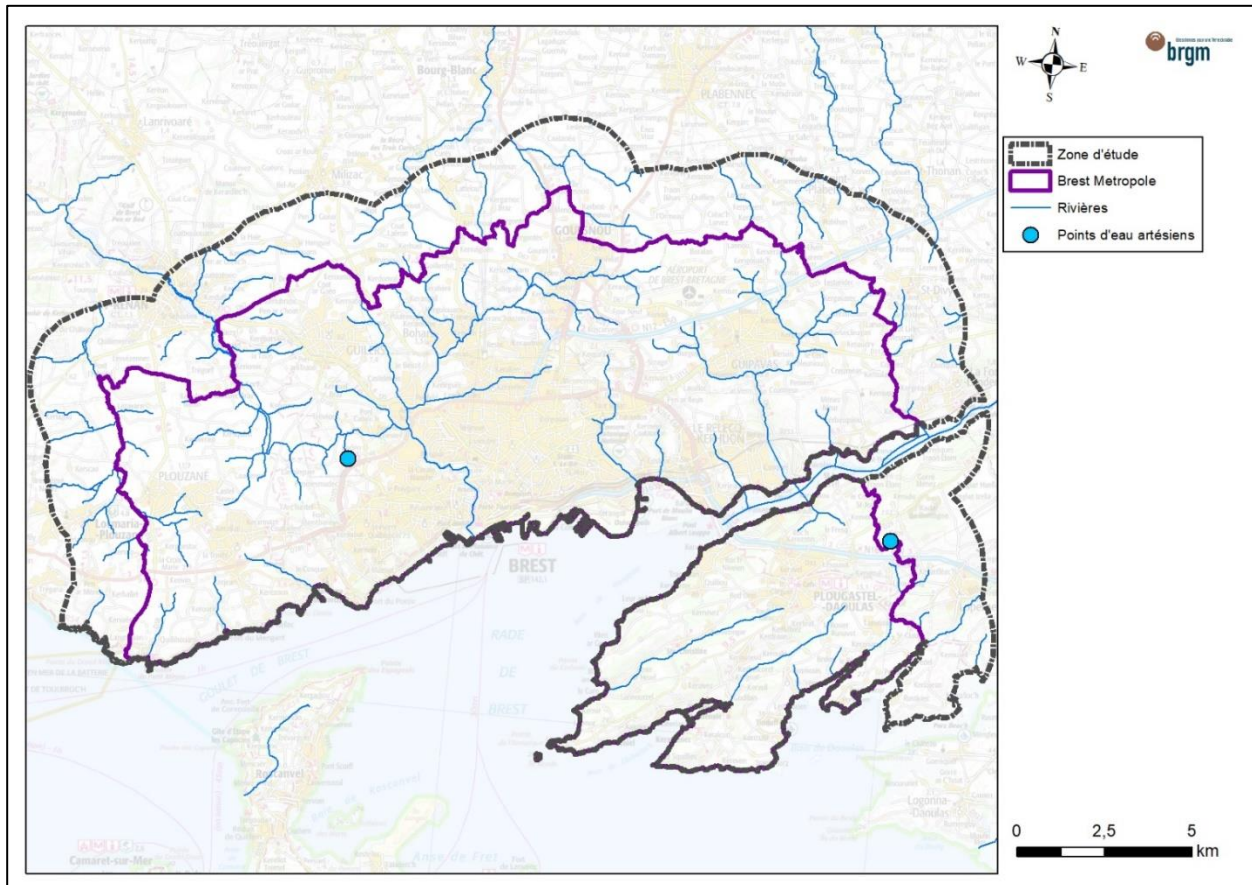


Illustration 20 : Localisation des 2 points d'eau artésiens relevés en hautes eaux

2.2. INTERPOLATION DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE

2.2.1. Préparation des données

Vérification des données des campagnes piézométriques et suppression des anomalies

Au droit de chaque ouvrage ayant fait l'objet d'une mesure du niveau piézométrique et n'ayant pas été nivelé lors des campagnes de mesure, l'altitude du sol (Zsol) a été extraite du MNT 5 m fourni par Brest Métropole. L'altitude de la nappe a été calculée en chaque point, en prenant en compte la hauteur du repère de mesure et la profondeur de la nappe par rapport à ce repère.

Chaque mesure du niveau piézométrique a fait l'objet d'une validation par un hydrogéologue. Certaines informations essentielles ont notamment été vérifiées, afin d'identifier les mesures ne représentant pas le niveau piézométrique statique de la nappe :

- les coordonnées géographiques ;
- la cohérence entre l'altitude mesurée du point et celle calculée d'après le MNT ;
- les éventuelles influences (pompage en cours ou pompage sur un point voisin), ...

Le contrôle des données et la phase d'élaboration des cartes piézométriques ont permis d'identifier et d'écarter certaines données incohérentes : influence d'un pompage (niveau

dynamique), niveau statique incohérent, ... Plusieurs mesures ont été écartées (Illustration 21 et Illustration 22) :

- 3 points étaient secs en basses eaux et 5 points étaient secs en hautes eaux. La cote du fond de ces points d'eau a été mesurée lors des campagnes : ces points peuvent néanmoins servir de points de contrôle de la carte piézométrique (la cote piézométrique au droit de ces points [altitude de la surface de la nappe phréatique] doit être inférieure à la cote du fond de l'ouvrage) ;
- en hautes eaux, 5 mesures de niveau ont été effectuées alors qu'un pompage était en cours et n'ont pas été prises en compte pour l'interpolation. Ces points peuvent également servir de points de contrôle de la carte piézométrique (la cote piézométrique au droit de ces points doit être supérieure au niveau piézométrique dynamique mesuré) ;
- une mesure en doublon (2 piézomètres situés cote à cote) a été supprimée en hautes eaux ;
- la mesure d'un point artésien en hautes eaux a été écartée, car apparaissant comme non robuste lors de l'étape de validation croisée ;
- une source nivelée en hautes eaux a été écartée (écoulement diffus) ;
- deux points n'ont pas été pris en compte dans l'interpolation en période de hautes eaux en raison d'imprécision dans leur localisation.

A l'inverse, 4 sources nivelées en hautes eaux ont été prises en compte pour l'interpolation en basses eaux.

Finalement, les cartes piézométriques basses eaux 2020 et hautes eaux 2021 ont été interpolées et élaborées respectivement sur la base de 121 et 159 mesures validées du niveau statique.

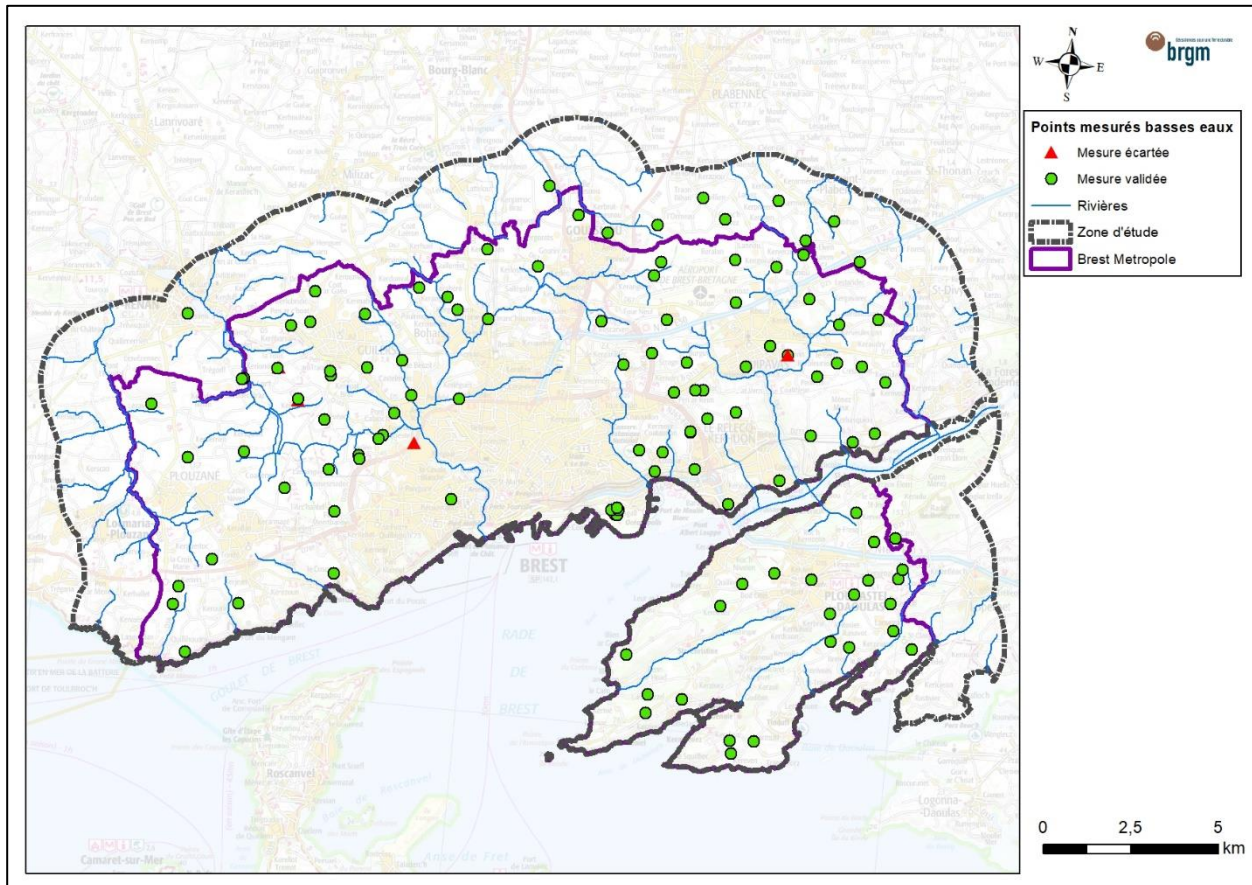


Illustration 21 : Localisation des données piézométriques validées et écartées pour l'interpolation en basses eaux

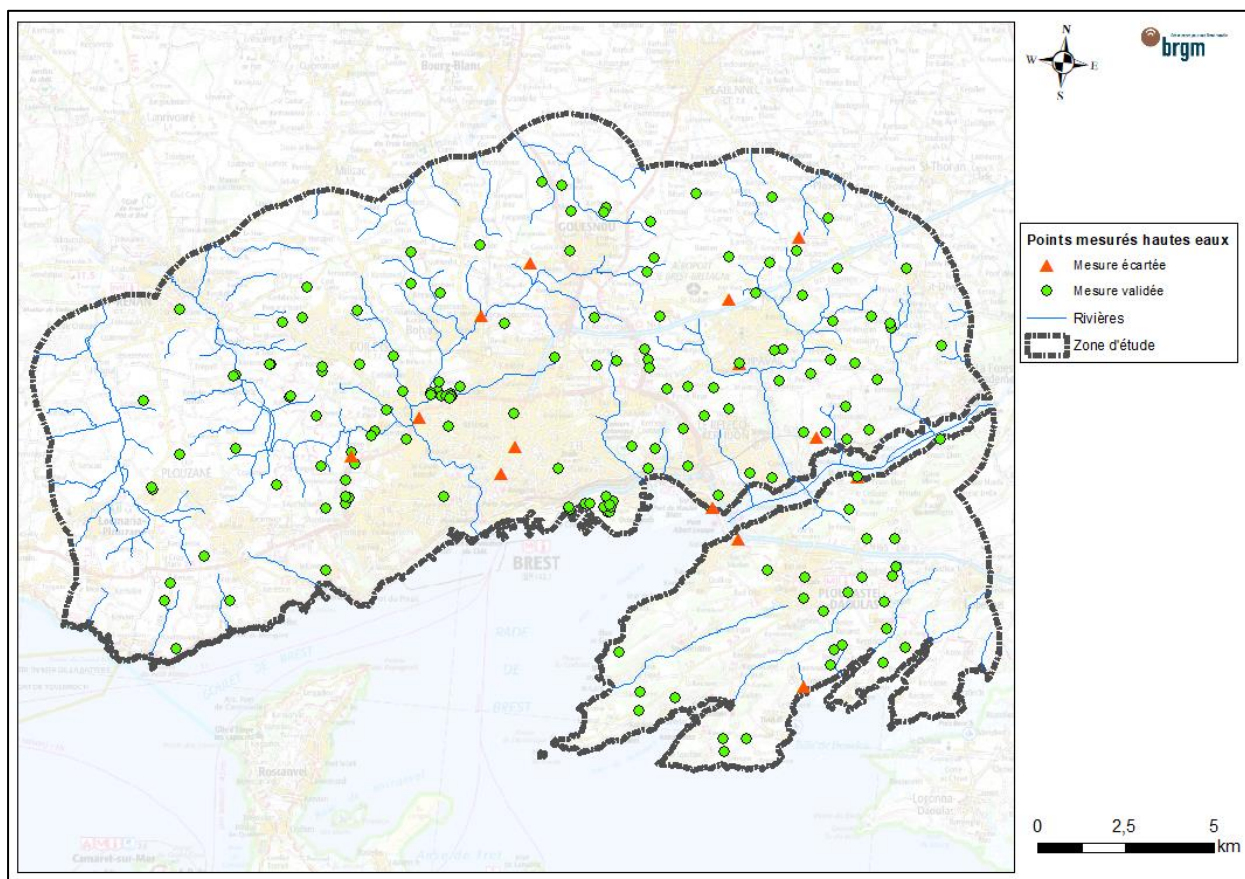


Illustration 22 : Localisation des données piézométriques validées et écartées pour l'interpolation en hautes eaux

Cas particuliers de points d'eau artésiens ou « secs »

L'artésianisme jaillissant d'un forage existe en présence d'un aquifère captif dont l'altitude du niveau piézométrique est supérieure à la cote du sol. Au cours des campagnes de mesure piézométrique, deux ouvrages en hautes eaux et aucun en basses eaux ont été considérés comme artésiens jaillissants. Des mesures correctes de niveau d'eau ont pu être réalisées sur ces points.

Lors des campagnes de mesures, 3 points d'eau en septembre-octobre 2020 (basses eaux) et 5 en mars 2021 (hautes eaux) se sont révélés secs.

Sur ces ouvrages, la mesure du niveau piézométrique n'a pas été possible. Il est cependant intéressant de rappeler que la piézométrie de la nappe est inférieure à la profondeur totale de l'ouvrage. A noter que lorsqu'un puits sec était rencontré, un point d'eau de remplacement était recherché à proximité afin de tenter d'obtenir une mesure du niveau piézométrique fiable.

6 sources ont été identifiées sur le terrain comme étant une résurgence de la nappe. Un nivellement a été effectué au niveau de l'affleurement d'eau lors de la campagne piézométrique de hautes eaux.

Création d'une base de données pour l'interpolation de l'altitude de la nappe

Les informations suivantes ont été intégrées dans une base de données utilisée pour la construction des cartes piézométriques :

- les 121 mesures piézométriques de la campagne basses eaux 2020 et les 173 mesures de la campagne hautes eaux 2021 ;
- 153 sources provenant de l'IGN (BD TOPO®) ;
- des anciennes mesures piézométriques issues de la BSS EAU (2 points), servant de points de contrôle ;
- les cours d'eau, représentés par 298 points associés à une altitude (celle du MNT 5 m au droit du point) et disposés le long des rivières tous les 500 m environ (points issus d'une étude sur le bassin Loire-Bretagne, Pinson *et al.*, 2019b, à partir de la BD TOPO® de l'IGN).

Le modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5 mètres fourni par Brest Métropole a également été utilisé.

L'interpolation finale de l'altitude de la nappe fournit une grille au pas de 5 m (grille du MNT au pas de 5 mètres intégrée au calcul).

2.2.2. Elaboration des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques ont été réalisées selon la démarche suivante (Illustration 23) :

- analyse et codage des données : des mesures piézométriques et des points de contrainte imposés ;
- approche géostatistique avec interpolation par krigeage avec modèle de variogramme de la cote piézométrique (cf. Annexe 2) ;
- contrôle des résultats.

Les cartes piézométriques ont été réalisées en utilisant le logiciel Suite GDM 2018 (Geological Data Management - <http://gdm.brgm.fr> et <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gdm-suite-gerer-modeliser-visualiser-donnees-geoscientifiques-3-dimensions>). La suite GDM 2018, développée et éditée par le BRGM, est conçue pour compiler, interpoler et visualiser des données géoscientifiques, dont des données hydrogéologiques. Le « workflow » mis en place comprend la vérification des données, la gestion des paramètres de calcul, les contrôles de cohérence entre les données, la génération des interpolations des surfaces piézométriques et les restitutions graphiques en cartes des interpolations (Illustration 23).

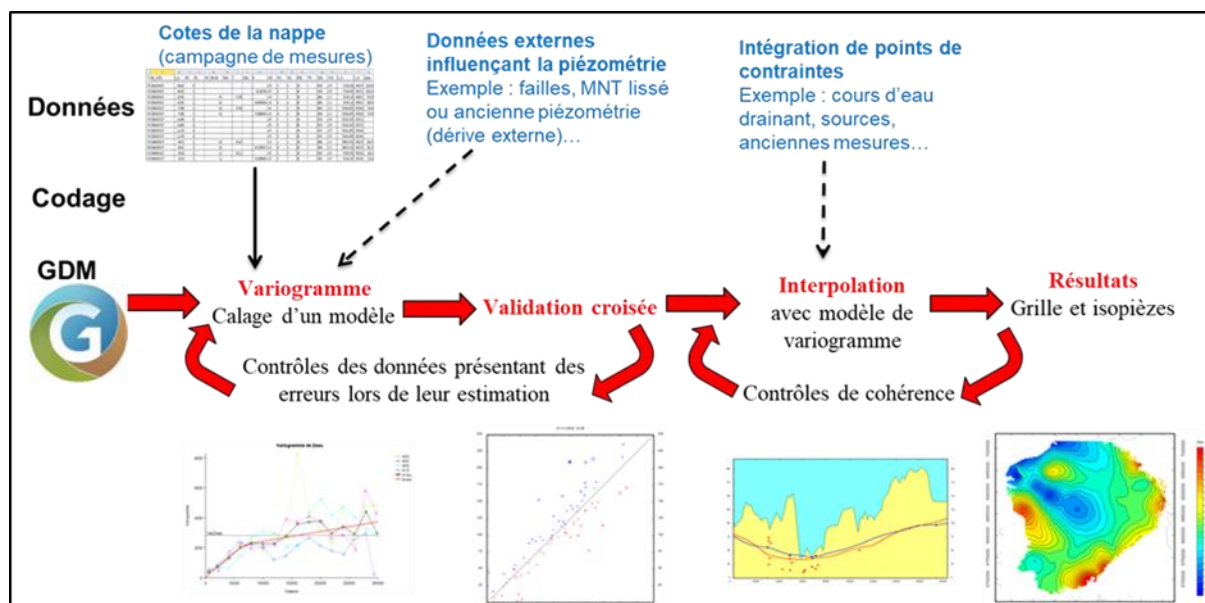


Illustration 23 : Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM

La base de données rassemblant les informations nécessaires à l'élaboration des cartes piézométriques a été organisée de façon à utiliser les mesures des piézomètres comme « points de passage » (équivalent aux données d'entrée) dans l'interpolation. L'ensemble des données est codé avec une valeur de « Zeau », correspondant au toit de la nappe (une colonne Zeau_BE pour les basses eaux et une colonne Zeau_HE pour les hautes eaux ; cf. Annexe 1).

Pour procéder à l'interpolation des surfaces piézométriques, une grille de calcul de maille 5 m par 5 m a été générée, identique à celle du MNT.

Tous les points de passage (Zeau) ont été pris en compte dans un premier temps lors du calcul du variogramme. Dans un second temps, 153 sources provenant de l'IGN (BD TOPO®) ont été intégrées au calcul du variogramme afin de pallier au manque de mesures et de mieux caractériser les zones géographiques de vallée. Il faut en effet trouver un variogramme représentatif de tous les contextes (densité homogène en plateau, vallée, coteau). C'est ce nouveau variogramme calculé après ajout des sources et le modèle ajusté qui ont été utilisés dans la suite de l'étude, en hautes eaux et en basses eaux.

La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage, avec un modèle de variogramme pour la surface piézométrique (Illustration 24). Le variogramme permet d'évaluer la corrélation entre les observations en fonction de la distance qui sépare les points d'observation. La méthode d'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme permet de procéder à une validation des estimations par la méthode nommée « validation croisée ». Cette méthode permet d'identifier rapidement des points erronés, sur ou sous-estimés. Une fois les points aberrants identifiés puis corrigés ou éliminés, un nouveau variogramme est calculé pour détecter les erreurs résiduelles. Le processus peut être réitéré plusieurs fois pour éliminer toutes les erreurs.

Variogramme et calage d'un modèle sur les mesures piézométriques et les sources

Plusieurs méthodes d'interpolation, intégrant des modèles de variogrammes différents, ont été testées (cf. Annexe 2). Selon la connaissance du contexte hydrogéologique, le modèle de variogramme le plus approprié et robuste a été adopté :

- en basses eaux, il s'agit d'un modèle emboîté sphérique et linéaire (Illustration 24 et Illustration 25). La variance est de 664 et l'écart type de 25,78.

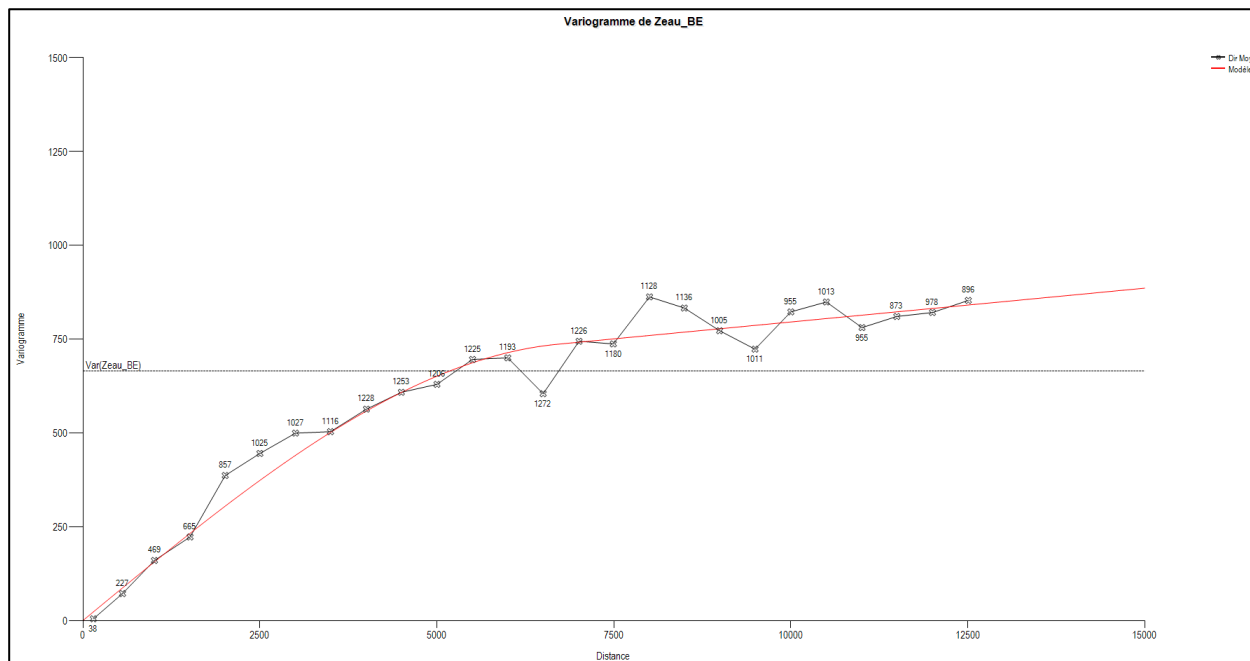


Illustration 24 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de basses eaux

Définition du modèle de variogramme

Effet de pépite :

N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	615	6700	Isotropique
2	Linéaire	1	0,018	Isotropique

Illustration 25 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de basses eaux

- en hautes eaux, il s'agit de deux modèles sphériques emboîtés (Illustration 26 et Illustration 27). La variance est de 720 et l'écart type de 26,84.

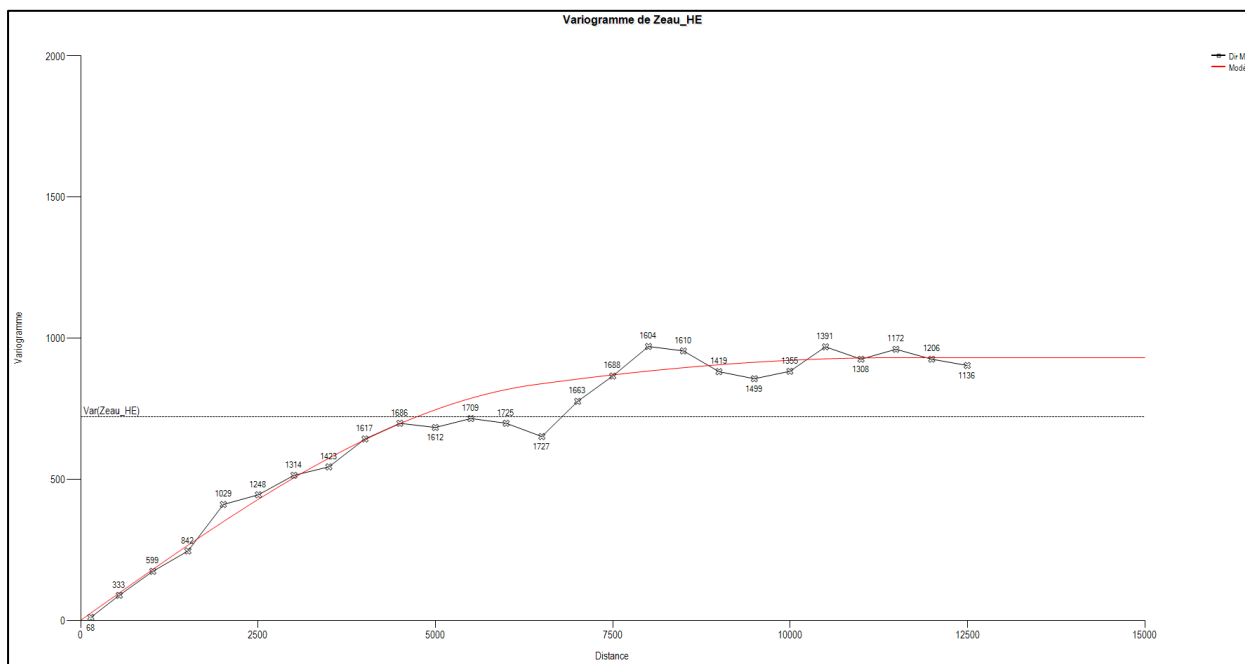


Illustration 26 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de hautes eaux

Définition du modèle de variogramme

Effet de pépite :

Composantes du modèle

N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	550	6400	Isotropique
2	Sphérique	380	11500	Isotropique

Illustration 27 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de hautes eaux

Plusieurs solutions ont été testées afin que le variogramme soit plus robuste et représentatif du contexte hydrogéologique.

Cas particulier du secteur de Plougastel-Daoulas

Le secteur de Plougastel-Daoulas constitue une presqu'île qui n'est pas directement connectée au reste du secteur d'étude. Afin de vérifier si ce secteur pouvait être traité avec le reste de la zone d'étude, un variogramme spécifique a été calculé sur les mesures réalisées sur la presqu'île de Plougastel.

Le variogramme des niveaux sur la presqu'île de Plougastel a globalement le même comportement que l'ensemble du secteur d'étude : la presqu'île ne nécessite donc pas d'être individualisée et peut être étudiée avec le reste de la zone d'étude.

Intégration des cours d'eau drainants

En contexte de nappe libre de socle, les cours d'eau pérennes sont considérés comme des zones d'affleurement de la surface piézométrique (Illustration 28). Les rivières représentent les exutoires

de la nappe et la surface piézométrique remonte sous les plateaux. La surface piézométrique est donc toujours comprise dans l'intervalle limité vers le haut par la surface topographique et vers le bas par la surface-enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Lors de l'interpolation de la carte piézométrique sur le territoire de Rennes Métropole (Pinson et al, 2019a), l'intégration de points de contraintes représentant l'altitude des cours d'eau a permis d'améliorer les résultats de l'interpolation et de tenir compte du contexte hydrogéologique local.

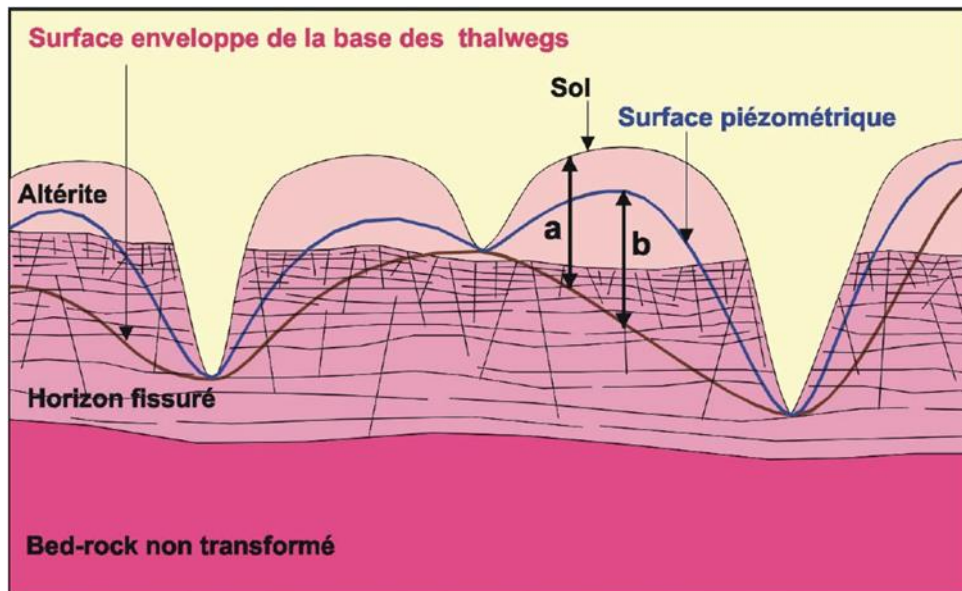


Illustration 28 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)

Au droit d'une vallée humide, l'altitude de la nappe est imposée par le niveau de la rivière lorsque celle-ci est en communication hydraulique avec la nappe. Il a été vérifié pour l'ensemble des cours d'eau si ceux-ci étaient ou non en communication hydraulique avec la nappe, en vérifiant si la surface piézométrique brute (tracée uniquement avec les mesures piézométriques des campagnes 2020-2021 et les sources) recoupait la topographie.

Dans un premier temps, 181 points à niveau piézométrique imposé, placés le long des cours d'eau (points issus d'une étude sur le bassin Loire-Bretagne, Pinson et al., 2019b, à partir de la BD TOPO de l'IGN, pour lesquels l'altitude était inférieure à la cote piézométrique) ont été ajoutés aux mesures initiales et pris en compte dans l'interpolation, pour contraindre les isopièzes à respecter cette configuration hydraulique. Ainsi, le niveau piézométrique correspondant aux altitudes des rivières a été imposé au niveau de ces 181 points. Comme l'intégration de ces points sur les rivières n'a pas permis d'obtenir une interpolation satisfaisante (10% de données non, robustes lors de la validation croisée), cette méthode a été écartée pour le calage du modèle de variogramme.

Intégration de la grille des cours d'eau comme dérive externe

Le variogramme des niveaux piézométriques n'est pas stationnaire aux grandes distances : le variogramme augmente au-delà de 7 000 m environ ; notamment en basses eaux. L'intégration d'une dérive d'ordre 1 (plan incliné) ou d'ordre 2 (cuvette) n'a pas permis de ramener le modèle de variogramme à un cas stationnaire. Une méthode a été développée en contexte de socle, afin de transcrire le contrôle de la piézométrie par le niveau des rivières. Il s'agit d'intégrer une dérive externe représentée par la grille interpolée de l'altitude des cours d'eau (Pinson et al, 2019b).

Pour améliorer les résultats, une grille a été interpolée à partir de l'altitude des points sur les cours d'eau (surface-enveloppe de la base des thalwegs) puis intégrée comme dérive externe lors du krigeage.

La corrélation linéaire entre la grille interpolée à partir des cours d'eau et les mesures piézométriques de 2020 et 2021 au droit des mêmes points est moyenne, avec un coefficient de corrélation de 0,79 en basses eaux et 0,78 en hautes eaux. La relation quasi linéaire qui existe entre ces deux variables justifie l'utilisation de la méthode dite du « krigeage avec dérive externe ». Quelques fortes variabilités locales existent toutefois entre les mesures piézométriques et les cours d'eau, notamment aux faibles altitudes, en centre-ville de Brest et dans la presqu'île de Plougastel-Daoulas.

Les résidus correspondent à la différence entre l'altitude des points d'après la grille des cours d'eau interpolée et l'altitude de la nappe mesurée au droit de chaque point lors des campagnes basses eaux et hautes eaux.

Le variogramme des résidus est stationnaire et structuré, représenté par un modèle cubique et un modèle sphérique emboîtés, en basses eaux (Illustration 29 et Illustration 30) et en hautes eaux (Illustration 31 et Illustration 32).

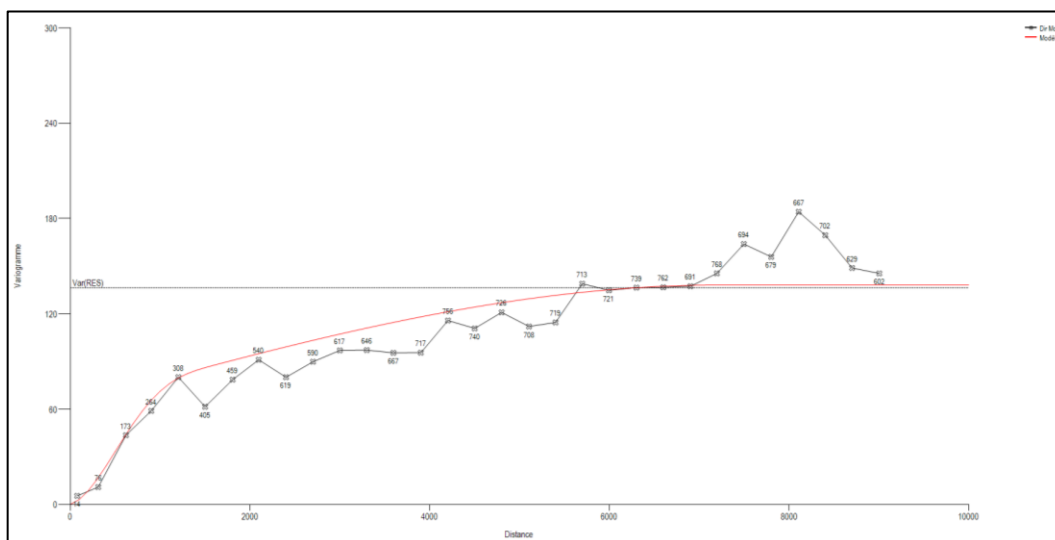


Illustration 29 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de basses eaux

Effet de pépité : 0				
Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Cubique	63	1660	Isotropique
2	Sphérique	75	7200	Isotropique

Illustration 30 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de basses eaux

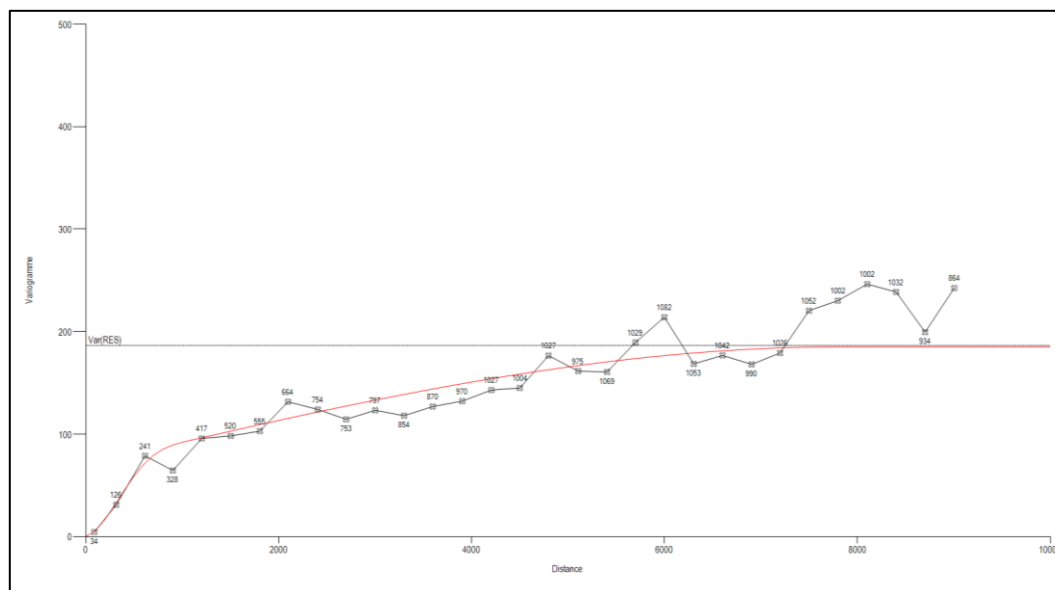


Illustration 31 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de hautes eaux

Effet de pépité : 0				
Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Cubique	70	1110	Isotropique
2	Sphérique	115	7800	Isotropique

Illustration 32 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de hautes eaux

Le krigeage avec dérive externe doit respecter certaines conditions. Dans le cas des variogrammes expérimentaux obtenus, l'effet de pépité est négligeable et la première portée (1660 en basses eaux et 1110 m en hautes eaux) est au moins aussi grande que l'espacement entre les points de mesure. La variance est très diminuée (138 en basses eaux et 185 en hautes eaux) par rapport à celle du variogramme ordinaire sans dérive (664 en basses eaux et 720 en hautes eaux).

Suite à ces divers tests effectués, la surface piézométrique a ensuite été calculée par « krigeage avec dérive externe » : l'interpolation est réalisée à partir du modèle du variogramme des résidus, en prenant en compte la grille des cours d'eau en dérive externe.

Contrôle des interpolations et points de contrainte imposés

Plusieurs tests de cohérences ont été effectués sur les données interpolées :

- vérification du variogramme et identification des éventuels points erronés (validation croisée) ;
- test sur les différences entre l'altitude de la topographie (Zsol) et l'interpolation de la surface de la nappe afin de vérifier que les niveaux piézométriques ne se situent pas au-dessus de la topographie ;

- test sur les différences entre l'altitude de la surface de la nappe en hautes eaux et en basses eaux et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle de cohérence au niveau des points secs et des points en pompage ;
- contrôle visuel des isopièzes (limites d'alimentation, drainage, artefacts, influence éventuelle des failles...) et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle de la carte piézométrique au droit des points de contrainte imposés.

Les données d'entrée ont été contrôlées et éventuellement corrigées ou non prises en compte. La base de données finale comprend 336 points de passage (Zeau), dont 312 ont servi à l'interpolation des surfaces piézométriques en hautes eaux et 274 en basses eaux (Illustration 33). Le contrôle des données et la phase d'élaboration des cartes piézométriques ont permis d'identifier et d'écarter les données incohérentes (niveaux dynamiques, valeurs aberrantes – voir chapitre 2.2.1). Ces données, considérées comme non valides ou incohérentes, ne sont pas prises en compte dans l'interpolation et ne sont, par conséquent, pas codées. Elles sont désactivées par un paramètre présent dans la base de données (paramètre KEEP=0; cf. Annexe 1).

Afin d'améliorer les résultats de l'interpolation et de tenir compte du contexte hydrogéologique local, des points de contrainte ont été intégrés lors de l'interpolation finale (Illustration 33 et Illustration 34) :

- 298 points de représentation des cours d'eau ;
- 2 anciennes mesures piézométriques issues de la BSS.

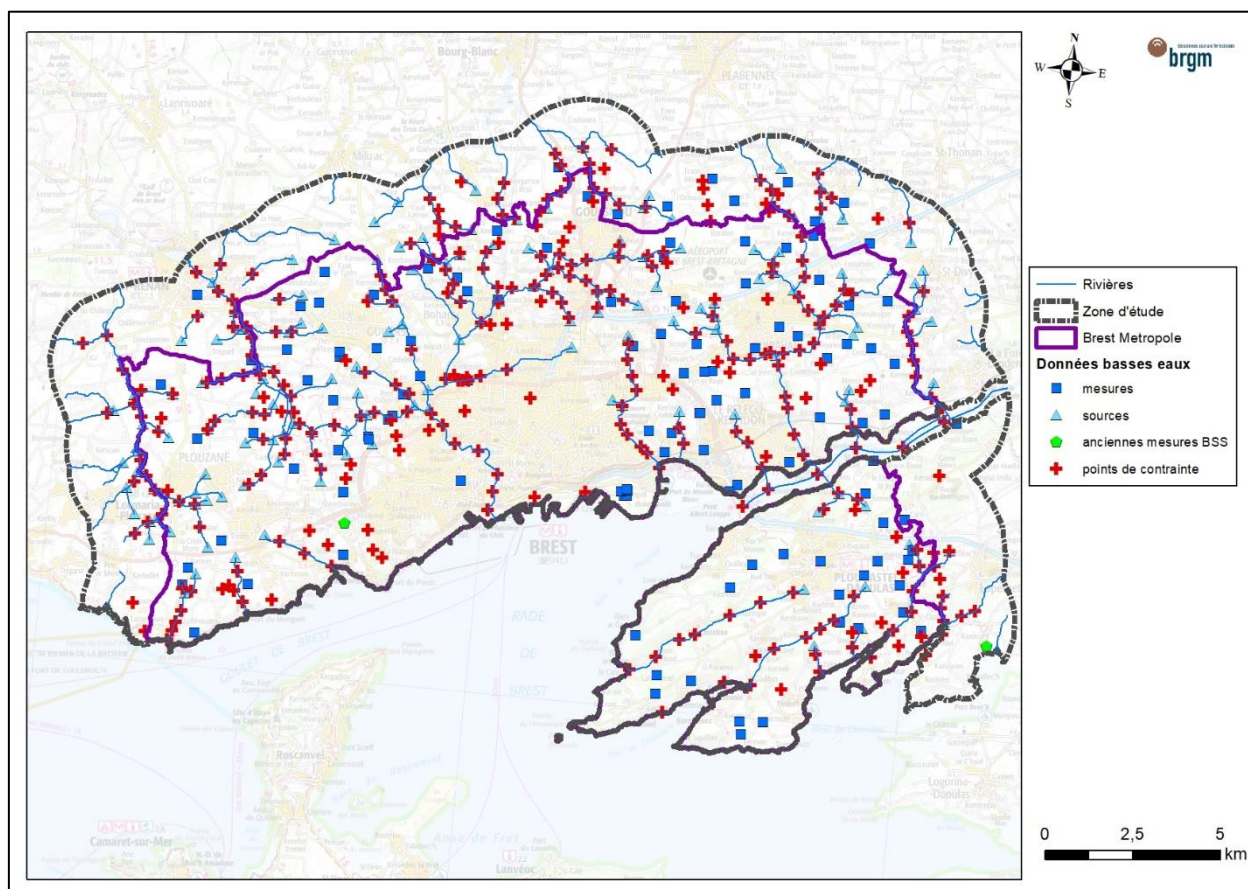


Illustration 33 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de basses eaux

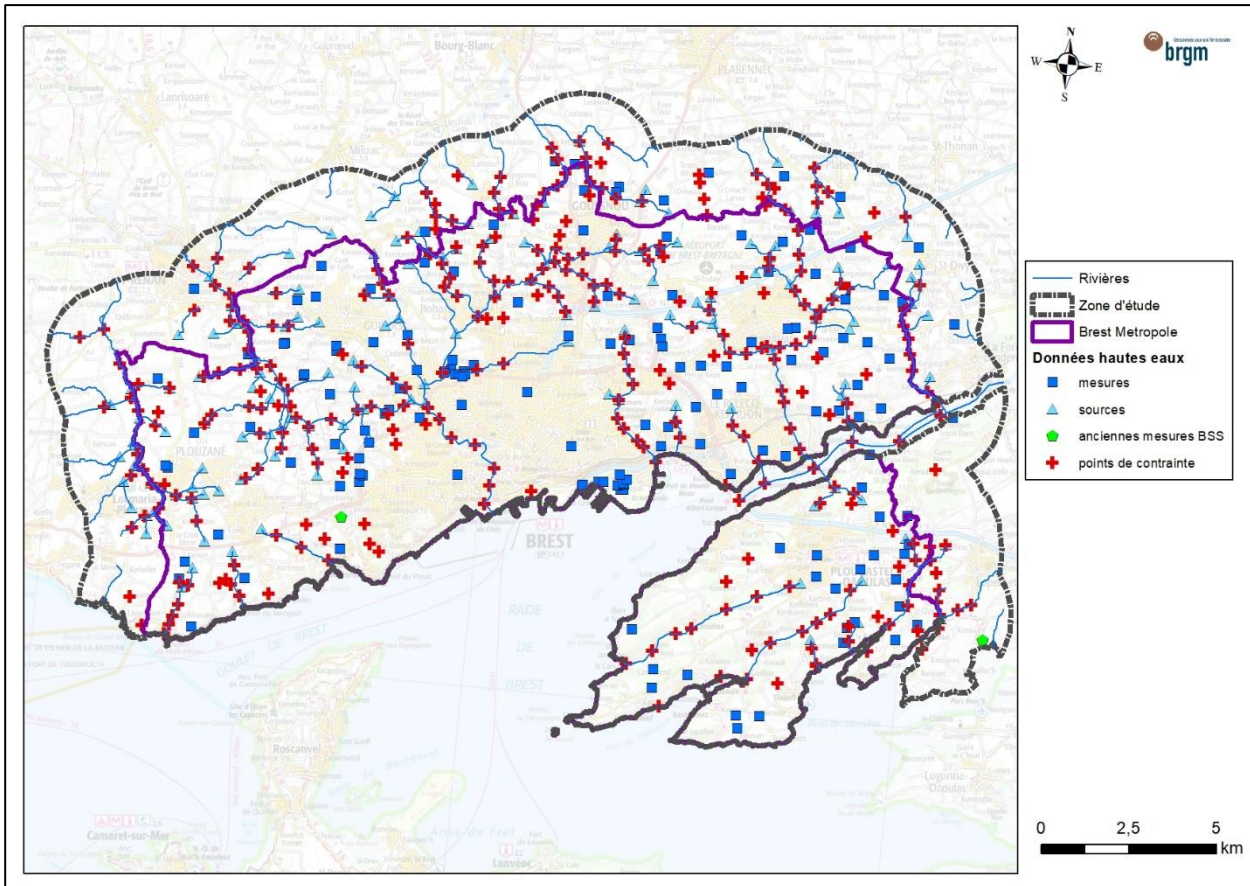


Illustration 34 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de hautes eaux

Interpolation finale de la surface piézométrique

L'ensemble des points de passage (Zeau) et des points de contrainte a été interpolé par krigeage avec dérive externe, avec le modèle de variogramme des résidus.

Le résultat final se présente sous forme d'une grille des altitudes de la nappe au pas de 5 m.

Influence de la marée

La diffusivité de l'aquifère contrôle l'évolution d'une onde au sein de celui-ci. La diffusivité D (m^2/s) est définie comme le rapport de la transmissivité T sur l'emménagement S .

$$D = T / S$$

Avec

- D : la diffusivité caractérise la vitesse de réaction d'un aquifère lors d'une perturbation et sa capacité à propager une onde de crue (m^2/s)
- T : la transmissivité est la capacité du milieu à l'écoulement (m^2/s)

- S : l'emmagasinement est la capacité du milieu à stocker les fluides. Il peut, dans le cas d'une nappe libre, être assimilé à la porosité

La diffusivité peut dans un premier temps être estimée en considérant les transmissivités et les emmagasinelements mesurés in situ lors d'essais de pompage sur le territoire de Brest Métropole. Les données sont consultables sur le SIGES Bretagne (<https://sigesbre.brgm.fr/>).

Les valeurs de transmissivité sont disponibles sur 14 forages dans le secteur : elles sont comprises entre $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, avec une moyenne de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Seulement 3 valeurs de coefficients d'emmagasinement sont disponibles dans le secteur (Illustration 34) : ils sont compris entre $3,5 \cdot 10^{-4}$ et $2,6 \cdot 10^{-2}$ ($9,3 \cdot 10^{-3}$ en moyenne).

	Forages (codes BSS)			Valeurs moyennes
	02744X0146/F	02837X0138/F	02837X0153/F3	
T (m^2/s)	6.90E-05	4.80E-04	1.47E-03	3.00E-03
S (-)	3.50E-04	1.50E-03	2.60E-02	9.30E-03
D (m^2/s)	1.97E-01	3.20E-01	5.65E-02	3.23E-01

Illustration 35 : Gamme théorique de diffusivité dans le secteur de Brest Métropole

La diffusivité est assez élevée ($3,23 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ en moyenne) et indique une assez bonne capacité du milieu à propager une onde dans l'aquifère.

A titre de comparaison, une estimation de la propagation d'une onde de crue dans la Seine a été réalisée pour une diffusivité comparable à celle estimée à Brest ($3,25 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, correspondant à un milieu avec une transmissivité plus forte qu'à Brest mais un coefficient d'emmagasinement plus faible), dans la région de Troyes (Boisson et al., 2017). L'évolution des niveaux dans l'aquifère à partir de l'onde de crue de la Seine a été estimée à des distances de 100, 250, 500, 1000 et 2000 m (Illustration 36).

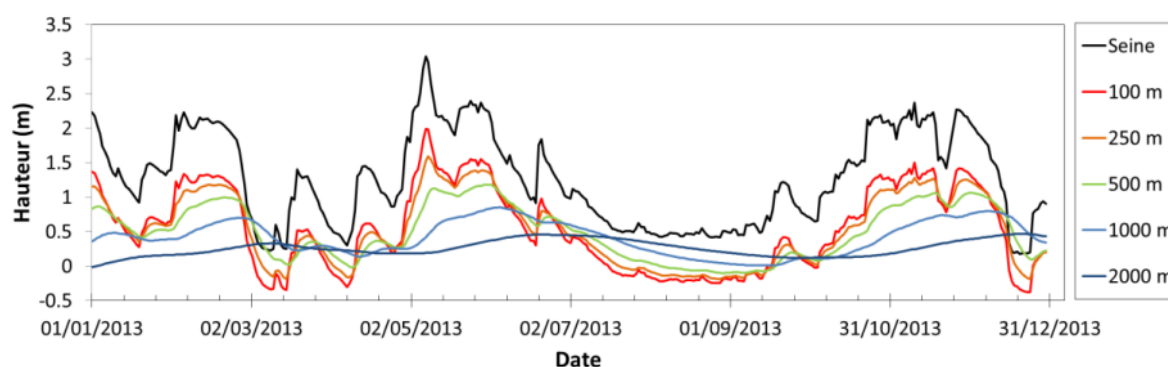


Illustration 36 : Estimation de propagation d'une onde de crue dans la Seine (Boisson et al., 2017)

Ces résultats illustrent la bonne capacité du milieu à conduire une onde de crue, jusqu'à 500 m de distance. L'atténuation de l'onde est toutefois assez forte (signal lissé) et les petites variations de niveaux n'apparaissent pas. Il est donc peu probable que l'influence des marées à Brest (cycles de 6 h) se fasse sentir sur la piézométrie à l'intérieur des terres dans la métropole. L'estimation de la diffusivité de l'aquifère pourrait être améliorée par l'analyse de chroniques de niveau d'eau dans un piézomètre situé à proximité du marégraphe de Brest (solutions analytiques

développées dans le logiciel CATHERINE du BRGM pour déterminer la diffusivité à partir de chroniques synchrones de niveau d'eau dans un cours d'eau et dans un piézomètre).

2.3. PRESENTATION ET ANALYSE DES CARTES PIEZOMETRIQUES

2.3.1. Caractéristiques et limites d'utilisation des cartes piézométriques

Les isopièzes (courbes d'égale valeur de l'altitude du niveau piézométrique) ont été tracées à partir des données recueillies lors des campagnes de mesures d'octobre 2020 et de mars 2021. Elles représentent respectivement les niveaux d'eau souterraine en basses eaux et en hautes eaux de la nappe de l'aquifère du socle au droit de la Métropole de Brest.

Les cartes piézométriques produites sont des documents de synthèse, établis à une échelle de 1 / 25 000. Leur utilisation est essentiellement scientifique pour la connaissance des eaux souterraines : ces cartes permettent de visualiser les sens d'écoulement, les gradients hydrauliques, les niveaux de basses eaux en 2020 et hautes eaux en 2021 de la nappe contenue dans les formations de socle au droit de Brest Métropole.

Les courbes piézométriques ont été établies lorsque les points d'observations étaient suffisamment nombreux pour permettre l'interpolation d'isopièzes. Certains secteurs ont cependant bénéficié d'un nombre réduit de mesures. Ainsi l'insuffisance de mesures en centre-ville de Brest et sur le littoral produit un lissage de la piézométrie lors de l'interpolation, qui peut générer une sous-estimation de l'altitude des crêtes piézométriques (hauts niveaux de la nappe).

2.3.2. Clés de lecture des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont une représentation cartographique, à un instant donné, de la surface des nappes libres ou de la pression hydrostatique des nappes captives. Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques. Les courbes de niveau (ou isopièzes) correspondent aux altitudes de la nappe au moment de la mesure piézométrique. Elles donnent donc des indications sur l'état hydraulique de la nappe, le sens des écoulements en son sein et leur vitesse (avec le gradient hydraulique entre deux points et la perméabilité de l'aquifère concerné). L'altitude de chaque courbe de niveau (ou isopièze) est indiquée en mètres et possède le même plan de référence qui est celui du réseau de Nivellement Général de la France (NGF).

a) Etat hydraulique

Dans le socle, les nappes d'eau souterraine sont généralement libres, aucun écran imperméable ne recouvrant les formations. Par croisement entre la topographie et les surfaces piézométriques, les zones où la piézométrie est sub-affleurante ou peu profonde peuvent alors être identifiées. Au droit de ces secteurs, les eaux souterraines peuvent potentiellement alimenter les rivières et les zones humides et l'infiltration d'eau de pluie est minimale.

b) Sens d'écoulement

Les isopièzes sont des équipotentiels : la charge hydraulique (altitude) est la même le long d'une isopièze. L'axe de l'écoulement des eaux souterraines est toujours perpendiculaire aux isopièzes et le sens d'écoulement va dans le sens des potentiels décroissants, de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible (Illustration 37). Ainsi, le trajet d'une goutte d'eau peut être déterminé en l'imaginant se déplacer le long d'un axe perpendiculaire à deux isopièzes

immédiates, de l'isopièze la plus élevée vers la plus basse. Les limites des bassins versants hydrogéologiques se définissent le long des crêtes piézométriques, tandis que les points les plus bas correspondent aux axes de drainage (Illustration 37).

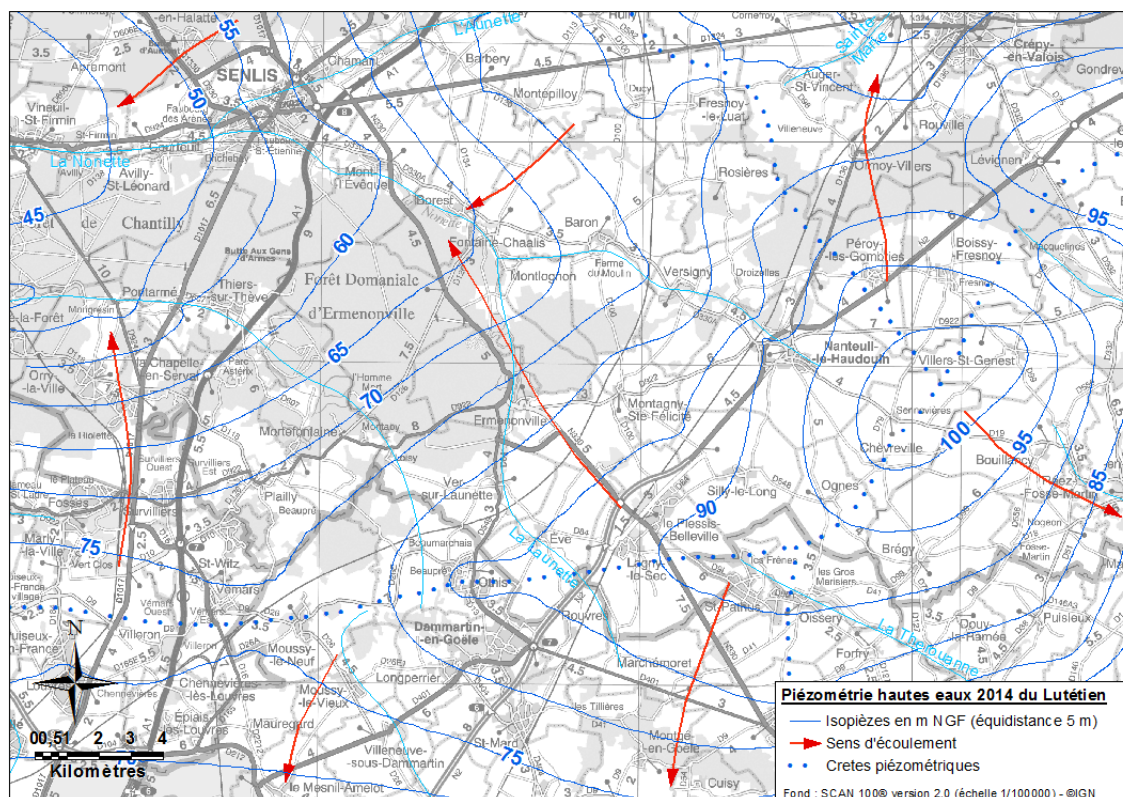


Illustration 37 : Exemple d'une carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes piézométriques (Bault et al., 2015)

c) Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique entre deux points de la surface piézométrique est l'équivalent de la pente en topographie. Il est déterminé par calcul du rapport de la différence de potentiel entre deux points (différence de charge hydraulique) sur la distance séparant les deux points. Les vitesses d'écoulement des nappes sont liées à la perméabilité des aquifères et au gradient hydraulique.

La nappe du socle du territoire de Brest Métropole est fortement influencée par la topographie. Les gradients hydrauliques sont alors plus faibles au droit des plateaux et des vallées drainantes que sous les coteaux.

2.3.3. Carte piézométrique de basses eaux

La carte piézométrique de basses eaux se présente sous forme de grille représentant les altitudes de la nappe issues de l'interpolation. Les isopièzes ont été tracées à partir de cette grille (avec un intervalle de 10 m NGF). Elles représentent les niveaux d'eau de la nappe sur Brest Métropole lors des basses eaux 2020 (Illustration 38).

2.3.4. Carte piézométrique de hautes eaux

La carte piézométrique de hautes eaux et les isopièzes (Illustration 39) représentent les niveaux d'eau de la nappe sur Brest Métropole lors des hautes eaux 2021.

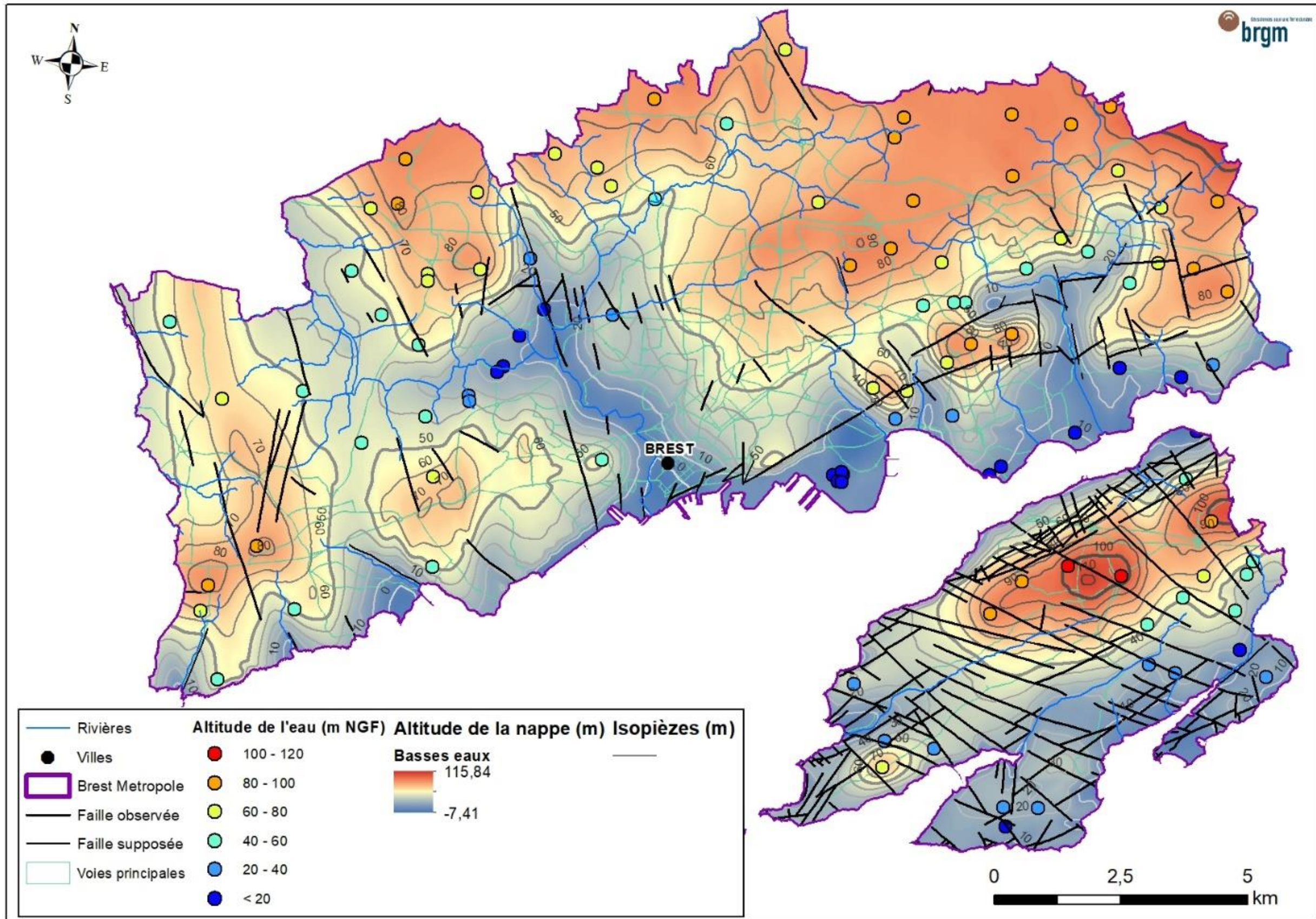


Illustration 38 : Carte piézométrique de basses eaux 2020 sur le territoire de Brest Métropole

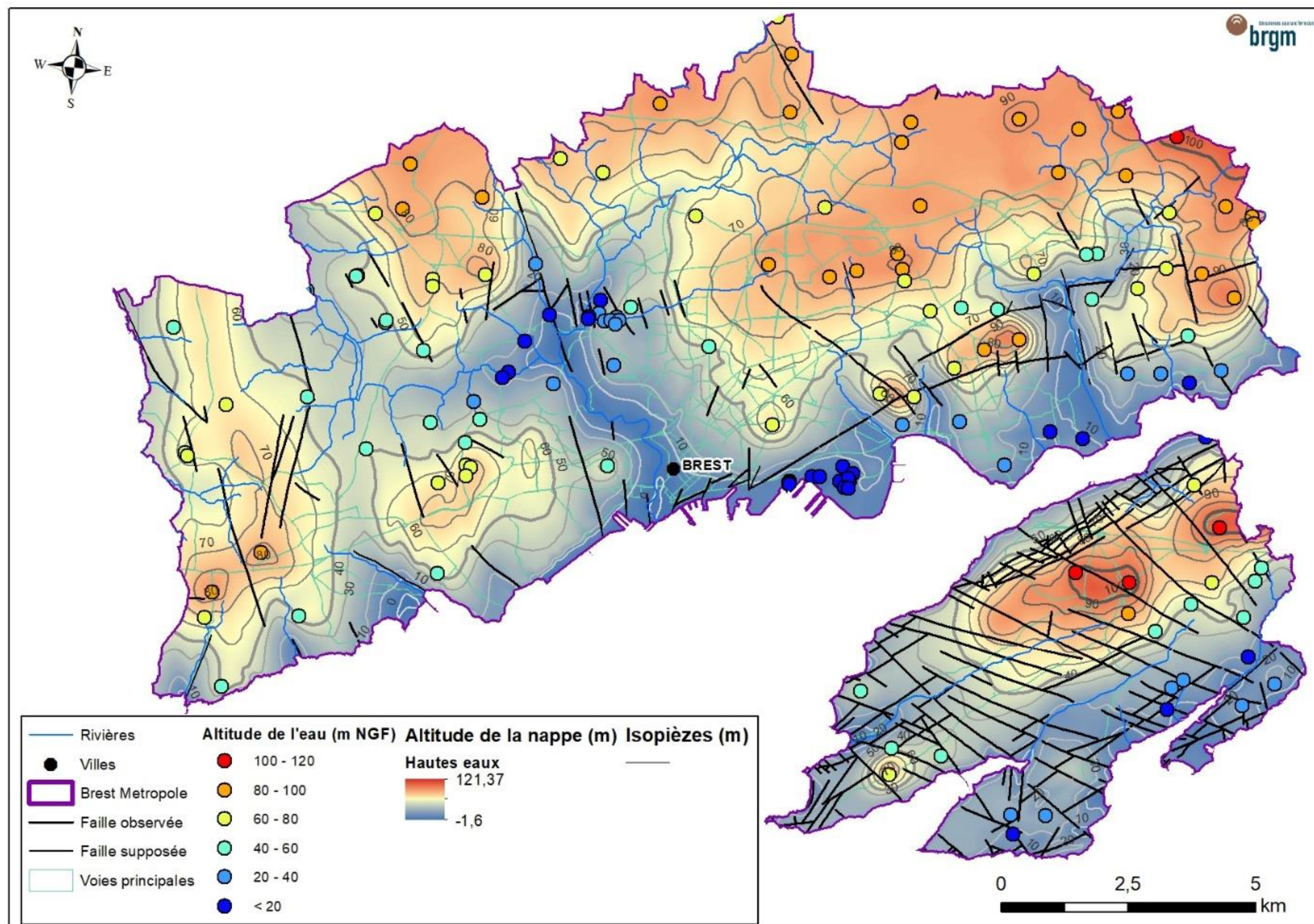


Illustration 39 : Carte piézométrique de hautes eaux 2021 sur le territoire de Brest Métropole

2.3.5. Indice de confiance

L'écart-type de krigeage est calculé lors de l'interpolation sur chaque maille, pour les mesures piézométriques de chaque campagne (Illustration 40 et Illustration 41). Cet écart-type caractérise la précision du résultat, si du moins le comportement de la variable est spatialement homogène. Il tient compte des points de contrainte : les zones bleues représentent les secteurs où l'interpolation est jugée fiable du fait de la bonne densité de points pris en compte. Plus la couleur tend vers le rouge, moins l'interpolation est fiable.

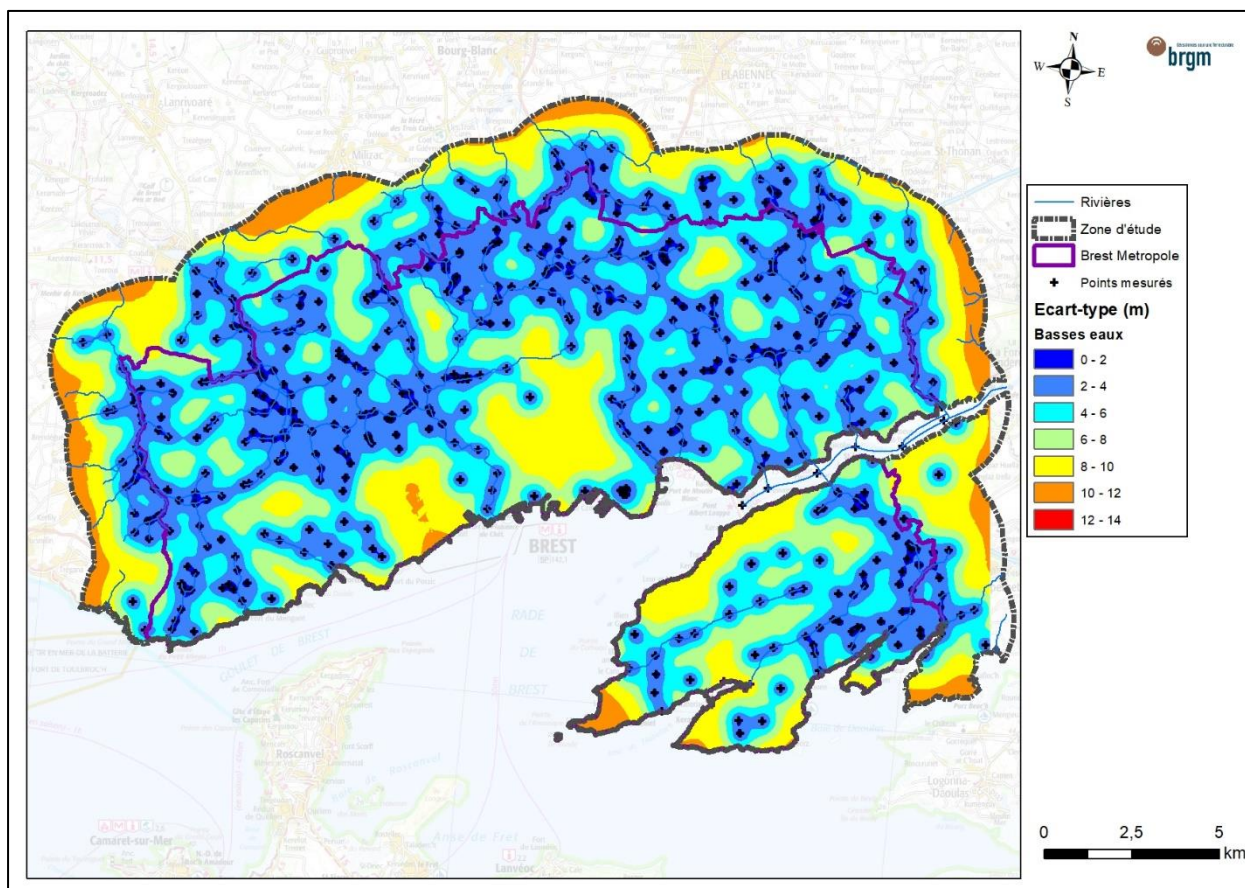


Illustration 40 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de basses eaux

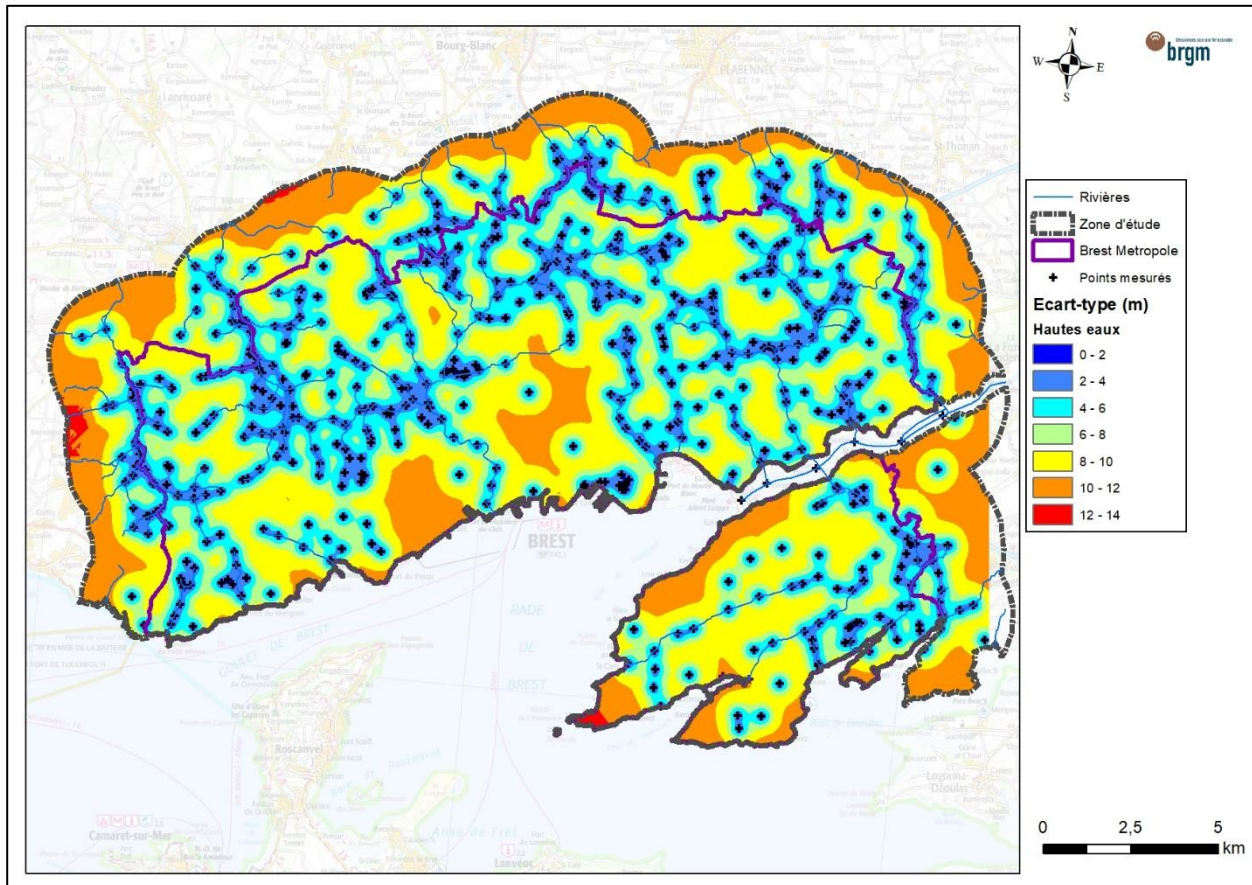


Illustration 41 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de hautes eaux

La carte d'indice de confiance représente les cartes de l'écart type de krigeage normé par le palier du modèle géostatistique. Pour chaque maille de la grille, l'écart-type de krigeage est divisé par l'écart-type du palier du variogramme. Le calcul de cette erreur relative permet de normaliser la notion d'indice de confiance et de faciliter ainsi les comparaisons entre 2 années.

Les zones bleues indiquent les secteurs où l'interpolation est jugée fiable du fait de la bonne densité de points pris en compte. Ensuite, plus la couleur tend vers le rouge, moins l'interpolation est fiable.

- 0 à 0,25 : très bon (bonne à très bonne confiance)
- 0,25 à 0,5 : bon (confiance assez bonne)
- 0,5 à 0,75 : moyen (confiance moyenne)
- 0,75 à 1 : mauvais (confiance faible)
- 1 à 1,25 ou plus : très mauvais (confiance très faible)

Il apparaît ainsi que le centre-ville de Brest en rive droite de la Penfeld et les limites du secteur d'étude correspondent à des zones où l'interpolation est jugée très peu fiable (couleurs orange et rouge - Illustration 42 et Illustration 43). Elle est moyennement fiable sur le reste du centre-ville de Brest et la partie nord de la presqu'île de Plougastel (couleur jaune). Sur le reste du territoire, on observe une prédominance de la couleur bleue indiquant une bonne fiabilité.

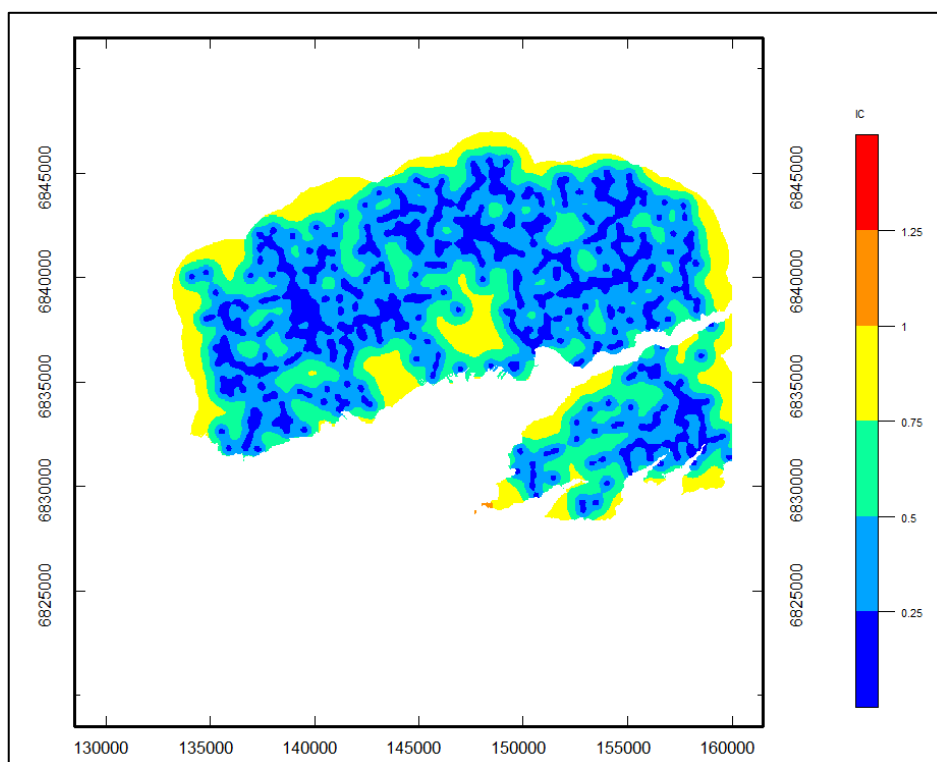


Illustration 42 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de basses eaux

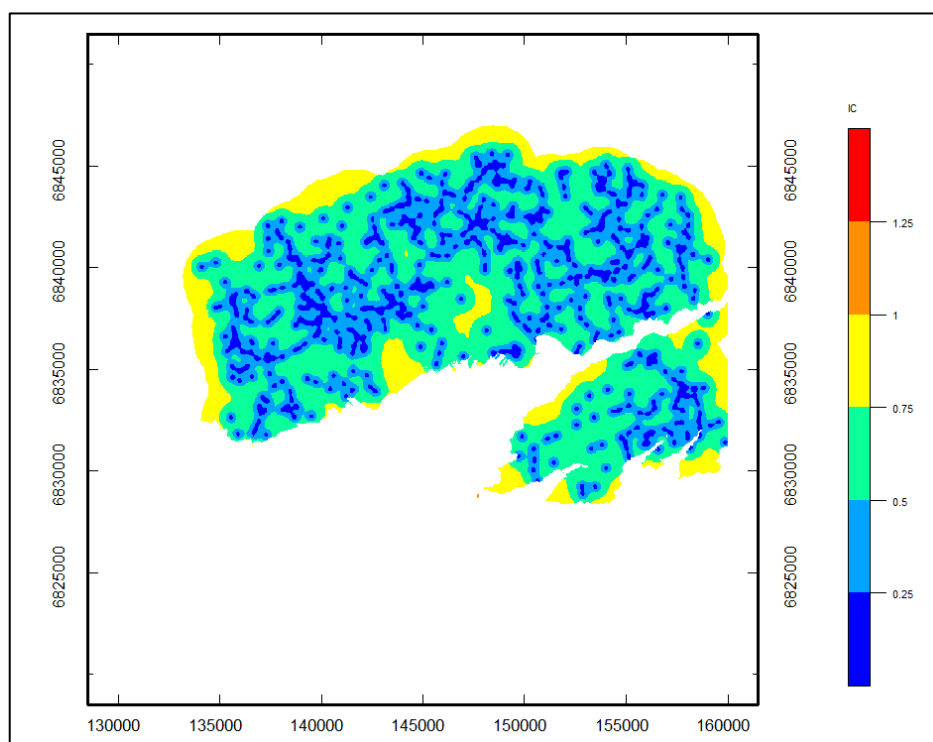


Illustration 43 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de hautes eaux

2.3.6. Coupes hydrogéologiques

Le logiciel GDM permet de tracer des coupes permettant de voir la surface topographique issue du MNT à 5 m (surface en noir sur l'illustration 44, graphique à droite), la zone non saturée (en beige), le niveau piézométrique hautes eaux (en bleu foncé) et le niveau piézométrique basses eaux (en turquoise).

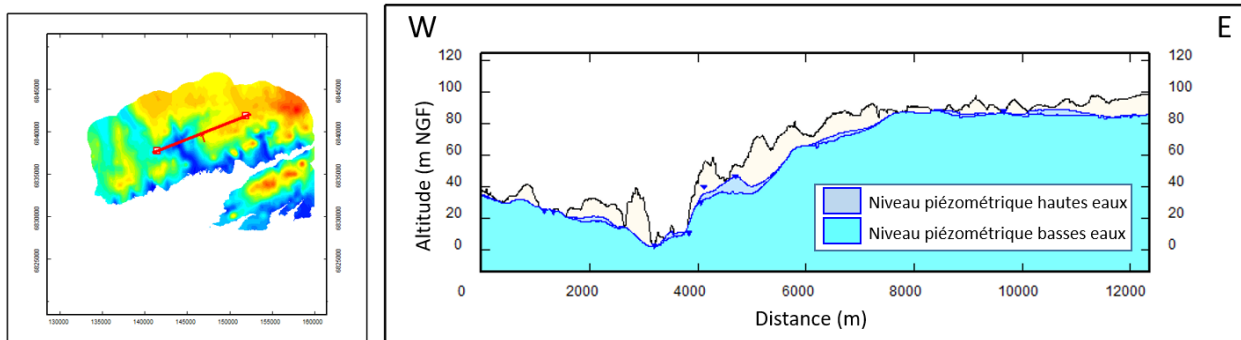


Illustration 44 : Coupe hydrogéologique est-ouest entre Guipavas et la Penfeld (trait de coupe en rouge sur la carte de gauche)

2.3.7. Sens d'écoulement et axes de drainage

L'analyse de la piézométrie de Brest Métropole montre que les lignes de courant partent généralement des plateaux et convergent vers les vallées. Ce constat prouve le rôle prédominant joué par la topographie et les vallées structurantes, notamment par l'Elorn et la Penfeld, ces rivières drainant la nappe. Les bassins versants hydrogéologiques se superposent alors globalement aux bassins versants topographiques.

Les failles principales décrites dans la carte géologique à 1/50 000 de la région de Brest (cf. Illustration 3), non prises en compte dans l'interpolation, pourraient avoir une influence (drainance, barrière hydraulique) sur l'écoulement des eaux souterraines. Les changements de lithologie pourraient également avoir une influence sur la piézométrie, du fait des différences de perméabilité entre les formations géologiques et du gradient topographique associé (notamment entre les Gneiss de Brest, dans la partie sud du plateau du Léon, et les schistes briovériens de l'Elorn, plus bas topographiquement - Illustration 3). La faible densité de mesures n'a pas permis de mettre en évidence la présence éventuelle de ces influences sur la piézométrie.

3. Conclusion

La gestion des eaux pluviales en domaine urbain est une préoccupation importante dans la gestion du petit cycle de l'eau, et s'intègre pleinement dans les réflexions et les actions visant à construire les stratégies de ville durable. Dans ce domaine, Brest Métropole est une collectivité innovante et pionnière.

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de recherche et de développement partagés entre Brest Métropole et le BRGM, afin de produire deux cartes piézométriques en période de hautes et basses eaux, couvrant l'ensemble du territoire métropolitain (220 km²).

Lors de la campagne piézométrique réalisée en septembre-octobre 2020 (période de basses eaux), 121 points ont été mesurés ; ils sont répartis de façon homogène sur le territoire de Brest Métropole à l'exception de la zone urbaine de Brest, soit une densité de 1 point tous les 1,8 km².

Lors de la campagne réalisée en mars 2021 (période de hautes eaux), 173 points ont été mesurés, soit une densité de 1 point tous les 1,3 km², grâce à des contacts transmis par Brest Métropole et à des recherches encore plus poussées sur le terrain lors de cette 2^{ème} campagne.

Le nombre de mesures a été inférieur à ce qui était attendu (objectif de 1 point tous les 0,75 km²), compte-tenu de la difficulté à rechercher des points de mesure en centre-ville de Brest et à la disparition de nombreux ouvrages déclarés, suite à l'urbanisation de certains secteurs. Le bilan de ces deux campagnes est tout de même satisfaisant car la densité de points a permis de réaliser une interpolation avec le logiciel GDM du BRGM et de produire des cartes piézométriques en hautes et basses eaux (avec des mailles de 5 m de côté).

Ces cartes montrent que la piézométrie est fortement influencée par la topographie. La nappe est drainée par les principaux cours d'eau existant sur le territoire. Le battement de la nappe entre les basses eaux et les hautes eaux est assez faible, de l'ordre de 2,7 m en moyenne.

Compte tenu des informations utilisées, cette cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 et se substituer à des études à la parcelle.

Les cartes piézométriques et les informations associées ont été fournies à Brest Métropole aux formats image et SIG (CD joint à ce présent rapport) :

- Carte piézométrique de basses eaux (grille)
- Carte piézométrique de hautes eaux (grille)
- Isopièzes en basses eaux (polylignes)
- Isopièzes en hautes eaux (polylignes)

L'écart-type d'interpolation et l'indice de confiance en hautes et basses eaux ont également été fournis au format grille.

Pour améliorer cette cartographie et la connaissance des eaux souterraines dans le secteur, il serait intéressant d'installer des sondes de mesures en continu des niveaux piézométriques et

de la conductivité des eaux souterraines dans un ou plusieurs piézomètres (soit en équipant un forage existant, soit en créant un nouveau piézomètre) :

- en centre-ville de Brest (secteur manquant de données),
- dans les gneiss de Brest et dans les schistes briovériens au Relecq-Kerhuon ou à Guipavas, pour mieux comprendre les écoulements souterrains entre ces deux formations.

Ces cartes piézométriques pourront être valorisées de plusieurs façons :

- Les données acquises permettront de calculer l'épaisseur minimale de la zone non saturée (ZNS), nécessaire pour calculer le potentiel d'infiltration des eaux pluviales (par analyse multicritères) ;
- De connaître (et localiser) l'impact des eaux souterraines sur les ouvrages souterrains (canalisations d'eau potable et d'assainissement) et inversement ;
- Les cartes piézométriques en hautes et basses eaux permettront de représenter une carte du battement de la nappe et de coupler ces informations aux données sur la vulnérabilité de certaines falaises à l'érosion et aux mouvements de terrain ;
- D'évaluer le potentiel géothermique sur nappes et sur sondes sèches du territoire de Brest Métropole.

Dans l'éventualité d'une construction d'un modèle géologique urbain en 3 dimensions du territoire de Brest Métropole, ces cartes piézométriques pourront être à nouveau valorisées et alimenter considérablement la réflexion pour l'élaboration d'un outil d'aide à un aménagement efficace du territoire.

4. Bibliographie

BALLEVRE M., BOSSE V., DABARD M.-P., DUCASSOU C., FOURCADE S., PAQUETTE J.-L., PEUCAT J.-J. et PITRA P., (2013) – Histoire Géologique du massif Armoricaire : Actualité de la recherche. Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, (D), 10-11, pp.5- 96.

BAULT V., BOURGINE B., LOISELET C., ANQUETIL E. (2015) - Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin Parisien. BRGM/RP-64887-FR, 119 p., 1 ann., 1 CD, 8 cartes

BOISSON A., CHABART M. (2017) – Remontées de nappe à l'échelle de l'agglomération du Grand Troyes – Etat des lieux des connaissances et proposition de réseau piézométrique. Rapport final BRGM/RP-66771-FR, 65 p., 52 ill., 5 ann.

CHANTRAINE J., RABU D., BECHENNEC F. (2001) - Synthèse et carte géologiques au 1/250 000 (non publiée).

MOUGIN B., THOMAS E., WYNS R., BLANCHIN R. et MATHIEU F. (2004) - Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - Rapport BRGM/RP-52656-FR.

PINSON S., BAULT V. (2019a) – Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole Projet PHOEBUS. Rapport final BRGM/RP-68599-FR, 74., 45 ill., 3 ann.

PINSON S., TILLIER L., BOURGINE B., SEDAN-MIEGEMOLLE O., LAURENCELLE M. (2019b) - Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 7 ann.

WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France, t. 175, n°1, pp. 21-34.

Annexe 1

Fiche de terrain et exemple de résultats

Exemple de fichier « Résultats »

ID_Campagne	Zone	Identifiant	X_L93 (m)	Y_L93 (m)	Zsol (m)	Precision_Z	Commune	Nature	date	niveau_HE	repere (m)	NP_HE_sol (m)	nature_repere	profondeur_tot (m)	pompage_HE	Niveau_dyn_HE (m)	Sec_HE	Zeau_HE (m NGF)	KEEP_HE	Commentaire_HE
Z1 - 1	1	BSS000VFGB	142249	6837331	38.777	GPS	Brest	F	08/03/2021	1.26	0.00	1.26	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	37.52	1	
Z1 - 10	1	BSS004CEQY	141441	6839608	73.815	GPS	Guilers	P	10/03/2021	2.24	0.50	1.74	margelle/tubage	6.3	NON		NON	72.08	1	
Z1 - 11	1	BSS004CEQZ	142485	6839832	89.463	GPS	Guilers	F	10/03/2021	10.1	0.56	9.54	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	79.92	1	
Z1 - 12	1	BSS004CERA	142419	6841358	85.111	GPS	Guilers	F	10/03/2021	4.05	0.00	4.05	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	81.06	1	
Z1 - 13	1	BSS0005XLC	141008	6842007	91.842	GPS	Guilers	F	10/03/2021	3.14	0.52	2.62	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	89.22	1	
Z1 - 14	1	BSS0005XLN	140853	6841138	88.910	GPS	Guilers	F	10/03/2021	6.17	0.07	6.10	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	82.81	1	
Z1 - 15	1	BSS0005XMI	140317	6841032	85.136	GPS	Guilers	F	11/03/2021	9.96	0.20	9.96	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	75.18	1	
Z1 - 16	1	BSS004CERB	139967	6839823	62.031	GPS	Guilers	P	10/03/2021	11.25	0.68	10.57	margelle/tubage	14.35	NON		NON	51.46	1	
Z1 - 17	1	BSS004CERC	139930	6839808	60.355	GPS	Guilers	P	10/03/2021	8.98	0.62	8.36	margelle/tubage	13.56	NON		NON	52.00	1	
Z1 - 18	1	BSS004CERD	141393	6836934	44.807	GPS	Brest	P	09/03/2021	4.2	1.18	3.02	margelle/tubage	6.03	NON		NON	41.79	1	
Z1 - 19	1	BSS004CERE	141544	6835731	73.286	GPS	Brest	F	09/03/2021	7.19	0.00	7.19	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	66.10	1	
Z1 - 2	1	BSS000LVZU	142258	6837236	39.182	GPS	Brest	F	08/03/2021	0	0.00	0.00	margelle/tubage	29.6	NON		NON	39.18	0	artésien
Z1 - 20	1	BSS000VFGA	141537	6833956	61.636	GPS	Brest	F	09/03/2021	6.78	-2.00	8.78	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	52.86	1	
Z1 - 21	1	BSS004CERF	138809	6833116	62.001	GPS	Plouzané	P	09/03/2021	8.9	0.59	8.31	margelle/tubage	11.3	NON		NON	53.69	1	
Z1 - 22	1	BSS004CERG	144882	6836067	60.429	GPS	Brest	P	10/03/2021	8.23	0	8.23	Sol		Non		NON	52.20	1	
Z1 - 23	1	BSS004CERH	137291	6831735	57.519	GPS	Plouzané	P	09/03/2021	7.83	0.36	7.47	margelle/tubage	9.04	NON		NON	50.05	1	
Z1 - 24	1	BSS004CERJ	136942	6833090	68.300	GPS	Plouzané	F	09/03/2021	1.21	0.72	0.49	margelle/tubage	2.6	NON		NON	67.81	1	
Z1 - 25	1	BSS004CERK	137105	6833593	88.345	GPS	Plouzané	P	09/03/2021	2.1	0.00	2.10	margelle/tubage	6.36	NON		NON	86.25	1	
Z1 - 26	1	BSS004CERL	138066	6834366	85.945	GPS	Plouzané	P	09/03/2021	2.2	0.07	2.13	margelle/tubage	5.75	NON		NON	83.82	1	
Z1 - 27	1	BSS004CERM	137370	6837270	72.295	GPS	Plouzané	P	09/03/2021	6.25	0.00	6.25	margelle/tubage	9.35	NON		NON	66.05	1	
Z1 - 28	1	BSS000VFIJ	138980	6837427	54.272	GPS	Plouzané	F	09/03/2021	2.31	0.46	1.85	margelle/tubage	50	NON		NON	52.42	1	
Z1 - 29	1	BSS000VFKN	138970	6839521	36.807	GPS	Saint-Renan	PZ	09/03/2021	0.95	0.16	0.80	margelle/tubage	5.1	NON		NON	36.01	1	
Z1 - 3	1	BSS000VFGV	142931	6837910	19.302	GPS	Guilers	P	10/03/2021	0.28	0.00	0.28	margelle/tubage	#N/A	NON		NON	19.02	1	
Z2 A - 1	2	BSS004CERU	148509	6844178	85.885	MNT-5m	Gouesnou	P	04/03/2021	5.41	-0.02	5.43	bord du morceau de bois (photo)	NM	non, mais équipé		NON	80.46	1	
Z2 A - 2	2	BSS004CERV	147355	6842716	87.220	MNT-5m	Gouesnou	F	05/03/2021		0	25.95	TN	NM	oui	25.95	NON		0	en pompage
Z2 A - 3	2	BSS000SXNN	145922	6843198	94.800	MNT-5m	Brest	F	/03/2021 11H	5.2	0.7	4.5	Tampon avec margelle béton	NM	non, mais équipé		NON	90.30	1	

Annexe 2

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

➤ DEFINITION

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

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

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

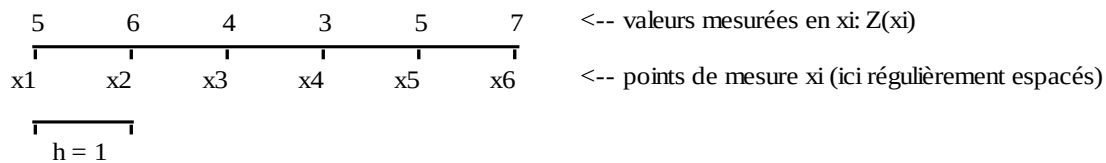
Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

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

➤ LE VARIOGRAMME

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

La Figure 1 illustre ce calcul.



On note **Z** la variable d'étude. Le **variogramme expérimental** est défini par :

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

avec :

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

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

Application à l'exemple 1D ci-dessus :

à la distance $h=1$ (5 couples de points distants de la distance 1) :

$$\begin{aligned}\gamma(1) &= 1/2 \text{ Moyenne}[Z(x_{i+1}) - Z(x_i)]^2 \\ &= 1/2 [(Z(x_2) - Z(x_1))^2 + (Z(x_3) - Z(x_2))^2 + \dots + (Z(x_6) - Z(x_5))^2] / 5 \\ &= 1/10 \cdot [(6-5)^2 + (4-6)^2 + \dots + (7-5)^2] = 1.4\end{aligned}$$

à la distance $h=2$ (4 couples de points distants de la distance 2) :

$$\begin{aligned}\gamma(2) &= 1/2 \text{ Moyenne}[Z(x_{i+2}) - Z(x_i)]^2 \\ &= 1/2 [(Z(x_3) - Z(x_1))^2 + (Z(x_4) - Z(x_2))^2 + (Z(x_5) - Z(x_3))^2 + (Z(x_6) - Z(x_4))^2] / 4 \\ &= 1/8 \cdot [(4-5)^2 + (3-6)^2 + (5-4)^2 + (7-3)^2] = 3.375\end{aligned}$$

etc.

Figure 1 : Définition et exemple de calcul du variogramme expérimental

Interprétation du variogramme

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

- **Continuité à l'origine.** En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet, il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du

phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La Figure 2 (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépité.

- **Continuité spatiale au-delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - Figure 2 (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine : $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible, et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie** (comportement différent du phénomène suivant les directions de l'espace considérées),
 - **imbrication d'échelles de variabilité** (structures emboîtées avec plusieurs échelles de corrélation spatiale),
 - **absence de portée finie** - Figure 2 (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

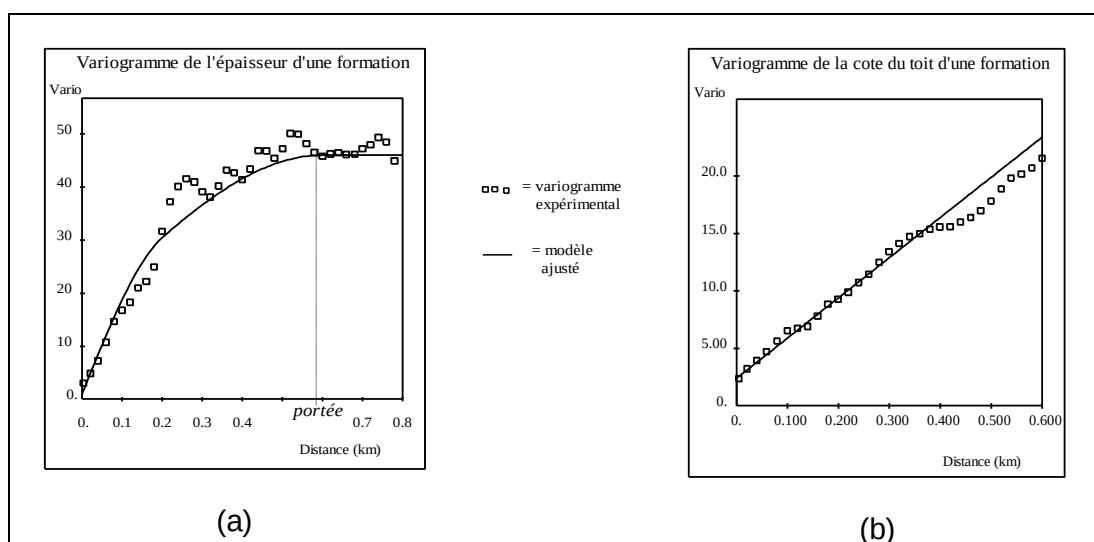


Figure 2 : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

➤ LE KRIGEAGE

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

Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,

- la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
- les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

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

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

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

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

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

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

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

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

Le système d'équation permettant d'obtenir les poids de krigeage est donné Figure 3.

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

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

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

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

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

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

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

Figure 3 : Equations du krigeage ordinaire

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

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

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

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

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

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

➤ LA VALIDATION CROISEE

Le principe de la validation croisée est illustré en Figure 4.

La validation croisée permet de contrôler que le modèle géostatistique est pertinent et de détecter d'éventuelles singularités dans les données.

La validation croisée consiste, pour chaque point de donnée, à l'enlever temporairement et à ré-estimer sa valeur à partir des données voisines. On obtient alors au point qui a été enlevé :

- la valeur réelle $Z(x)$
- la valeur estimée (interpolée) à partir des points voisins : $Z^*(x)$
- l'écart-type d'estimation $\sigma_k(x)$ si on a utilisé un modèle géostatistique.

Ce processus est répété pour tous les points x où la variable est connue : on re-estime la valeur en ce point à partir des autres données en faisant comme s'il n'existait pas.

On peut alors calculer en tout point qui disposait d'une mesure :

- l'erreur d'estimation $Err(x) = Z^*(x) - Z(x)$, et dans le cas d'une estimation par modèle géostatistique :
- l'erreur réduite : $Ered(x) = \frac{Err(x)}{\sigma_k(x)}$

Les résultats de la validation croisée sont fournis sous forme de statistiques et de cartes :

- ✓ statistiques sur les erreurs et les erreurs réduites : moyennes, nuages de corrélation, histogrammes
- ✓ cartes des erreurs $Err(x)$ ou carte des erreurs réduites $Ered(x)$ faisant apparaître les points mal re-estimés
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Z(x)$)
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Err(x)$) ou ($Z^*(x)$; $Ered(x)$)

La variable $Ered(x)$, appelée « erreur réduite », se rapproche d'une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance 1.

En réitérant la re-estimation de chaque donnée par les données voisines, on peut calculer l'histogramme de $Ered(x)$ et vérifier s'il se rapproche d'une loi gaussienne centrée normée.

Les points présentant une valeur de $Ered(x)$ s'éloignant du standard gaussien sont des points qui doivent être examinés car potentiellement liés à des erreurs (erreur de mesure, de localisation), ou à un comportement localement différent de la variable d'étude : il convient alors de vérifier et le cas échéant corriger la donnée de base. Lorsque la donnée est correcte et que le problème vient d'un mauvais calage du modèle géostatistique, ce modèle peut être amélioré ou recalculé localement.

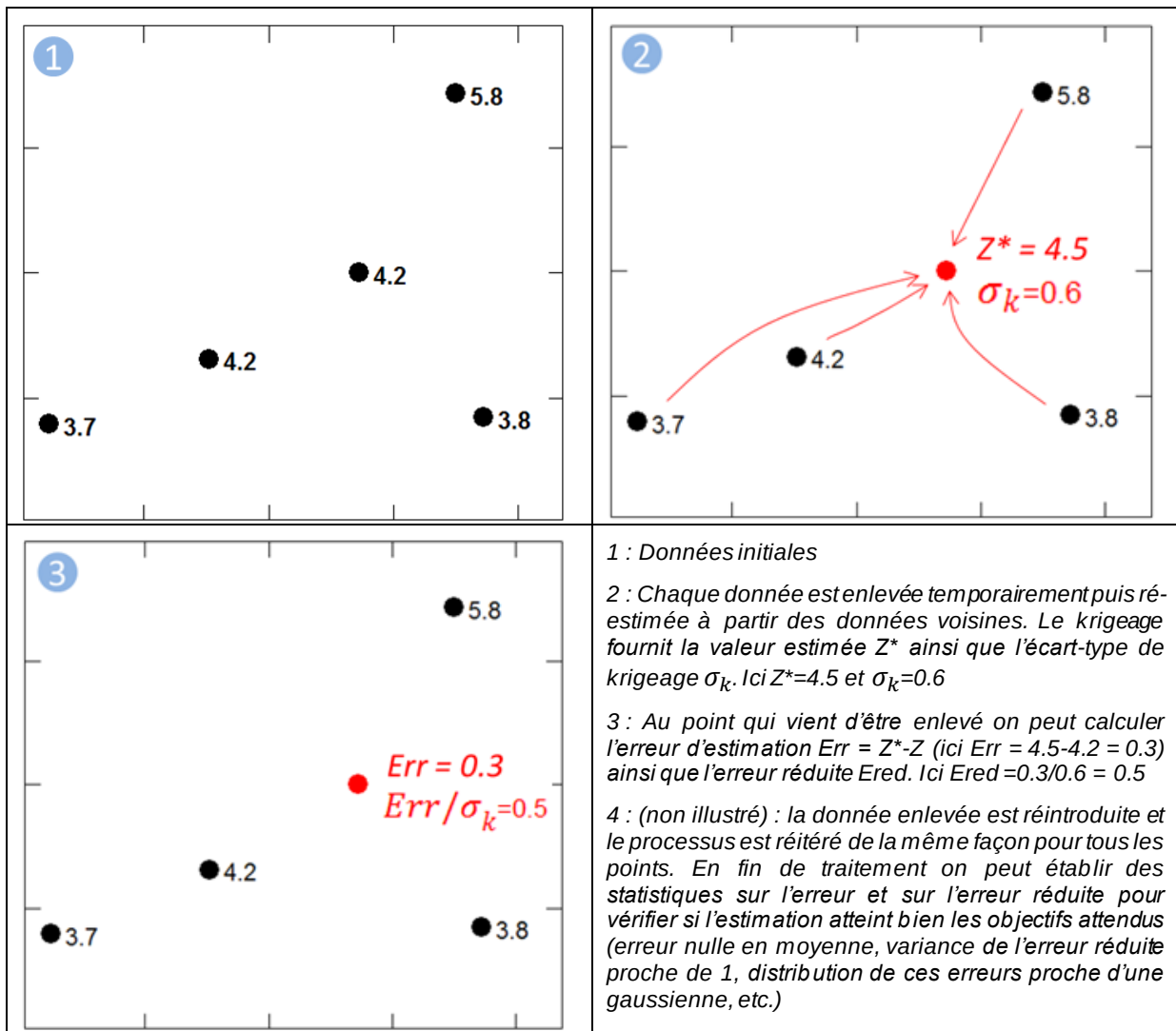


Figure 4 : Principe de la validation croisée



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Bretagne
2 rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70