

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès immédiat

Outils d'Aide à la Gestion et Protection des Ressources en eau du département de l'Orne (61) - Réalisation de cartes piézométriques départementales

Rapport final

BRGM/RP-73813-FR
Version 1 du 1er mai 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement partagés avec le soutien financier des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne

Maillot M., Boisson A., Boivin B., Idée E., Jallais N.

Avec la collaboration de Batut. K, Guerard Q., Brunel M., Billières C.

Vérificateur :		**Approbateur :**	
Nom :	Martin Wieskotten	Nom :	Manuel Parizot
Fonction :		Fonction :	Directeur Régional
Date :	13/09/2024	Date :	18/09/2024
Signature :		Signature :	Manuel PARIZOT Directeur Régional BRGM Normandie

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

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

agence de l'eau Loire-Bretagne

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

AGENCE eau seine NORMANDIE

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse **https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq** ou par ce code :

Mots clés : Hydrogéologie; Piézométrie; Bajocien-Bathonien; Oxfordien; Craie; Socle ; France; Normandie; Orne

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

Maillot M., Boisson A., Boivin B., Idée E., Jallais N. 2024. Outils d'Aide à la Gestion et Protection des Ressources en eau du département de l'Orne (61) - Réalisation de cartes piézométriques départementales. Rapport final V1. BRGM/RP-73813-FR, 57 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Lors de la phase 1 du programme de mise à disposition d'un Outil d'Aide à la décision et de Gestion des Principales Ressources aquifères du département de l'Orne (OAGPRO 61), il avait été mis en évidence que l'information piézométrique était morcelée à l'échelle du département. Les données collectées se trouvaient à des échelles et précisions variables et ne couvraient le plus souvent qu'une portion réduite de bassin versant ou d'un aquifère.

La disparité et la répartition inégale de l'information ne permettait pas une gestion efficace des ressources en eau souterraine du département. En effet, il s'est avéré que le domaine sédimentaire était bien mieux couvert d'études piézométriques que le domaine de socle, domaines respectivement répartis entre la moitié Est et Ouest du département. Ce dernier secteur se trouvant même presque dépourvu de données ou d'informations globales ou locales à valoriser ou diffuser.

Fort de ce constat, le BRGM a proposé à l'ensemble des partenaires de produire des cartes piézométriques (représentation de la surface des nappes d'eau souterraine) des principales formations aquifères du département de l'Orne, dans le cadre de la phase 2 du programme OAGPRO61. Celui-ci est mené en partenariat avec le Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne (SDE61) avec le soutien des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Dans ce cadre, les cartes produites concernent les nappes d'eau souterraine des principaux aquifères du département de l'Orne (61) : formations du socle armoricain, formations du Dogger (Aalénien, Bajocien, Bathonien), formations de l'Oxfordien, formations crétacées (craie et sables du Perche principalement).

Les données utilisées pour réaliser les cartes sont issues de différentes sources bibliographiques : principalement de la banque de données du sous-sol (BSS), d'études à caractère hydrogéologique fournies au BRGM par le SDE61, le tout complété par quelques mesures réalisées en 2021 dans le sud-ouest du département. Il s'agit donc d'un ensemble de données disparates et asynchrones.

Le jeu de données disponible n'a pas permis d'estimer et de représenter la variabilité des situations de hautes et basses eaux des nappes. Aussi une seule représentation de l'altitude des nappes a pu être proposée dans le rapport dans une situation de moyennes eaux.

Il est très important de rappeler que les cartes ont été réalisées à une échelle départementale, au 1/250 000^{e} pour la zone de socle et au 1/150 000^{e} pour la zone sédimentaire (Dogger, Oxfordien, Crétacé). Le BRGM rappelle que tout usage en dehors de ces échelles pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

Sommaire

1. Introduction 9
1.1. Contexte general 9
1.2. Contexte spécifique 9

2. Description du jeu de données 13
2.1. Origine des données utilisées 13
2.1.1. Compilation des données 13
2.1.2. Campagne de mesure 14
2.1.3. Rattachement des données aux grands ensembles aquifères 16
2.2. Traitement préalable des données 16
2.2.1. Choix de la situation hydrologique 16
2.2.2. Choix de contraintes (failles-lithologie) 17
2.2.3. Hypothèses sur le fonctionnement hydrogéologique 17
2.2.4. Sélection des données 18
2.3. Points de contrôles 19

3. Choix de l'outil et de la méthode d'interpolation 21
3.1. Analyse variographique 21
3.2. Prédictibilité de la piézométrie à l'échelle régionale 21
3.3. Krigeage avec dérive externe (KDE) 22
3.4. Application du KDE aux données piézométriques 22
3.4.1. Etablissement d'une dérive représentative de la variable 22
3.4.2. Prise en compte des failles 24
3.4.3. Analyse variographique des jeux de données 25
3.4.4. Evaluation des performances de la méthodologie par validation croisée 26
3.5. Prise en compte du réseau hydrographique 27
3.6. Résultats cartographiques 28
3.7. Contrôle des resultats 32
3.7.1. Comparaison avec les données locales existantes 32
3.7.2. Comparaison avec les cartes départementales existantes 33
3.7.3. Comparaison avec la carte des premières eaux rencontrées dans le sous-sol (DREAL Normandie) 35

4. Spatialisation de la structure hydrogéologique du milieu à partir des cartes piézométriques 37
4.1. Introduction 37
4.2. Méthodologie 38
4.2.1. Principe de la méthode d'inversion 38
4.2.2. Application au domaine de socle armoricain 39
4.2.3. Discussion sur la méthode proposée 42
4.3. Application à la carte piézométrique du secteur crayeux 43
4.4. Conclusions et recommandations pour aller plus loin 45

5. Conclusion Générale 47
5.1. Bon usage et limites des cartes produites 47
5.2. Recommandations 48

6. Bibliographie 49

Liste des figures

Figure 1 : Données piézométriques collectées lors de la phase 1 du programme d'étude (état 2019) pour l'ensemble du département de l'Orne (source : BRGM/RP-69332-FR) 9

Figure 2 : Formations lithologiques du domaine armoricain qui feront l'objet d'une esquisse piézométrique (source : RP-69332-FR)..... 11

Figure 3 : Ensembles géologiques du domaine sédimentaire qui feront l'objet d'une esquisse piézométrique (source : rapport RP-69331-FR) 12

Figure 4 : Densification de l'information hydrogéologique sur le département (BRGM, 2021) .. 13

Figure 5 : Carte des indices de sources répertoriées (origine des données BSS et IGN)..... 14

Figure 6 : Chronique de niveau de quelques piézomètres du SDE61 de l'ouest du département de l'Orne 15

Figure 7 : Campagne piézométrique sur 2 secteurs à enjeux définis par le SDE61, en noir les points mesurés par le BRGM en août 2021..... 15

Figure 8 : Rattachement des données aux principales formations aquifères du département .. 16

Figure 9 : Choix des principales contraintes à appliquer au calcul (structures faillées à gauche et cours d'eau à droite) 17

Figure 10 : Carte des différents contextes hydrogéologiques du département de l'Orne 18

Figure 11 : Profils piézométriques schématiques d'une nappe libre 21

Figure 12 : Niveau piézométrique en fonction de l'altitude 23

Figure 13 : Localisation du réseau de failles du département de l'Orne..... 25

Figure 14 : Variogrammes expérimentaux et modèles variographiques ajustés à chaque jeu de données (a. secteur socle, b. Bajocien-Bathonien, c. Oxfordien-Kimméridgien, d. Craie et Sables du Perche) 26

Figure 15 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de socle 28

Figure 16 : Carte piézométrique du secteur des aquifères du Bajocien-Bathonien..... 29

Figure 17 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de l'Oxfordien-Kimméridgien..... 30

Figure 18 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de la Craie et des Sables du Perche 31

Figure 19 : Digitalisation des données collectées lors de la phase 1 du projet (Rapport RP-69332-FR) 32

Figure 20 : Comparaison de la piézométrie interpolée de l'Oxfordien-Kimméridgien avec les données locales du secteur de Bellême (source SDE61), secteur sédimentaire 32

Figure 21 : Comparaison de la piézométrie interpolée en domaine de socle avec les données locales du secteur de la Chapelle d'Andaine (source SDE61), domaine de socle 33

Figure 22 : Comparaison de la donnée produite avec celles de l'Atlas Hydrogéologique du Calvados (BRGM, 2007), Cénomanien du Pays d'Auge 34

Figure 23 : Comparaison des données produites, avec celles de l'Atlas Hydrogéologique du Calvados (BRGM, 2007), pour le Bathonien du bassin versant de la Dives 34

Figure 24 : Comparaison de la donnée produite pour le crétacé supérieur avec les moyennes eaux de la nappe de la craie de l'Atlas départemental numérique de l'Eure (BRGM, 2004) 35

Figure 25 : Ecart entre la carte des premières eaux souterraines rencontrées et les cartes produites par le BRGM 36

Figure 26 : Schémas illustrant le contrôle de la nappe par: a) la topographie (aquifères peu perméables), et b) la recharge (aquifères très perméables) ; d'après Haitjema et Mitchell-Bruker (2005). c) Détail montrant l'impact de la pente topographique (Dewandel et al., 2020)..... 38

Figure 27 : Schéma illustrant la corrélation entre la carte piézométrique et la topographie pour la régression linéaire avec : En haut à gauche - la carte du MNT de la zone d'étude avec un lissage de 10 pixels ; en bas à gauche – la carte piézométrique homogène sans faille ; à droite – régression linéaire du niveau piézométrique et le MNT 39

Figure 28 : Carte de la piézométrie résiduelle et la régression linéaire de la piézométrie résiduelle et de la topographie..... 40

Figure 29 : Carte des pentes de la piézométrie résiduelle avec en comparaison la carte des lithologies simplifiées issue des cartes géologiques imprimées au 1/50 000e 41

Figure 30 : Carte illustrant les pentes de la piézométrie résiduelle avec les zones cartographiées comme indurées dans l'élaboration de la carte piézométrique du socle 42

Figure 31 : Cartes comprenant le MNT, la carte de la piézométrie résiduelle et de ses pentes ainsi que la lithologie 44

Liste des annexes

Annexe 1 Variogrammes testés 51

Annexe 2 Cartes piézométriques 57

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GENERAL

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de mise à disposition d'un Outil d'Aide à la décision et de Gestion des Principales Ressources aquifères du département de l'Orne (OAGPRO 61). Celui-ci est mené en partenariat avec le Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne (SDE61) avec le soutien des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Ce travail fait suite à une première phase de synthèse et valorisation des données géologiques et hydrogéologiques existantes, qui s'est terminée en 2019. Il s'inscrit donc dans une seconde phase du programme qui consiste à fournir des éléments opérationnels de connaissance, quantitatifs et qualitatifs, devant permettre une meilleure gestion des ressources en eau souterraine du département de l'Orne (Atlas hydrogéologique).

1.2. CONTEXTE SPECIFIQUE

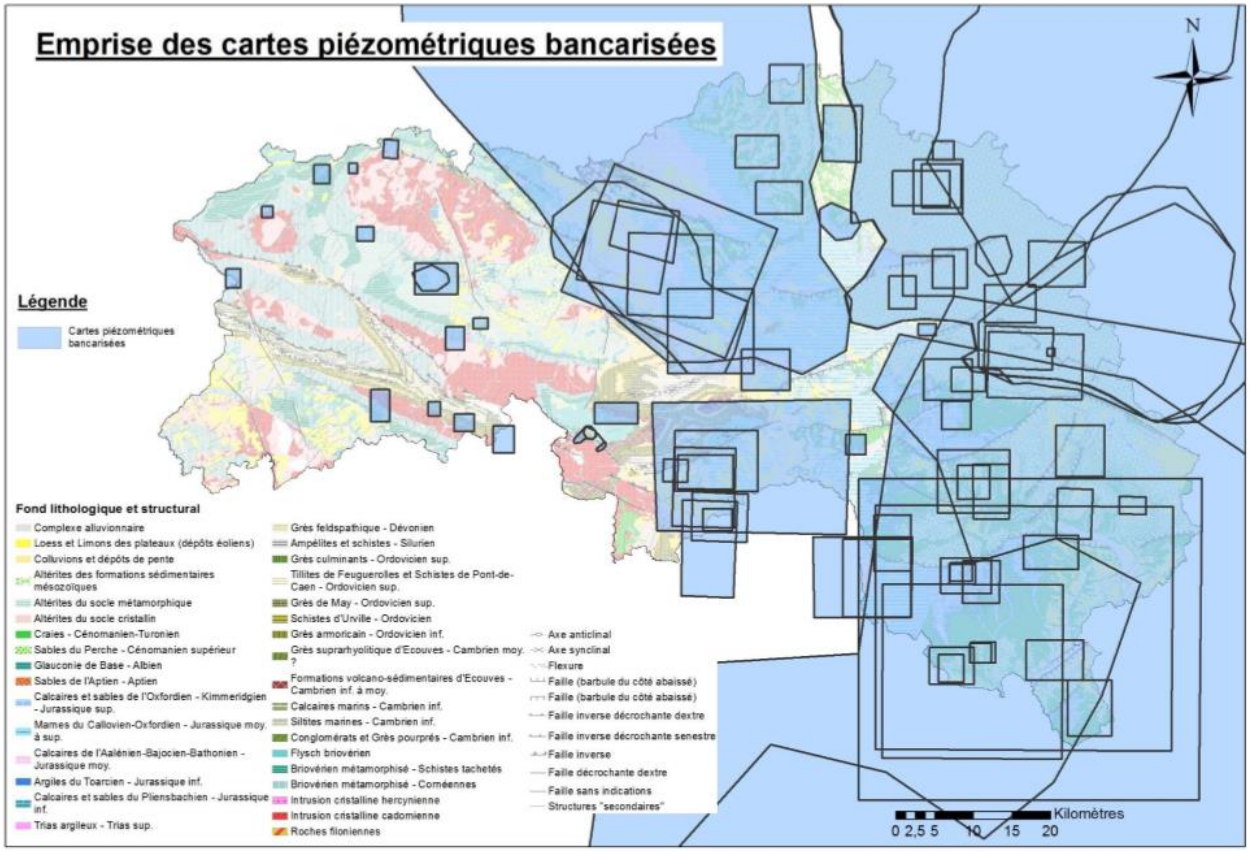


Figure 1 : Données piézométriques collectées lors de la phase 1 du programme d'étude (état 2019) pour l'ensemble du département de l'Orne (source : BRGM/RP-69332-FR)

Lors de la phase 1, il avait été mis en évidence que l'information piézométrique était morcelée à l'échelle du département. Les données collectées se trouvaient à des échelles et précisions

variables et ne couvraient, le plus souvent, qu'une portion réduite de bassin versant ou d'un aquifère (Figure 1).

Il s'est également avéré que le domaine sédimentaire était bien mieux couvert d'études piézométriques que le domaine de socle, domaines respectivement répartis entre la moitié Est et Ouest du département. Ce dernier secteur se trouvant même presque dépourvu de données ou d'informations globales ou locales à valoriser ou diffuser.

Fort de ce constat, le BRGM a proposé à l'ensemble des partenaires de produire des cartes piézométriques (représentation de la surface des nappes d'eau souterraine) des principales formations aquifères du département de l'Orne, dans le cadre de la phase 2 du programme OAGPRO61.

Lors de l'élaboration du programme technique, il a été convenu de réaliser ce travail aux ensembles aquifères du département de l'Orne suivants (cf, paragraphe 2.2.3 pour plus de détails, voir également Figure 2 et Figure 3 suivantes) :

- Domaine armoricain regroupé, en tenant compte de deux types de faciès : faciès indurés représentés par les grès et cornéennes vs faciès type granites et flyschs ;
- Bajocien-Bathonien, différencié à l'affleurement ou sous couverture et donc son régime libre ou captif ;
- Oxfordien-Kimméridgien, différencié à l'affleurement ou sous couverture ;
- Craie et Sables du Perche, si possible en essayant de distinguer les deux entités.

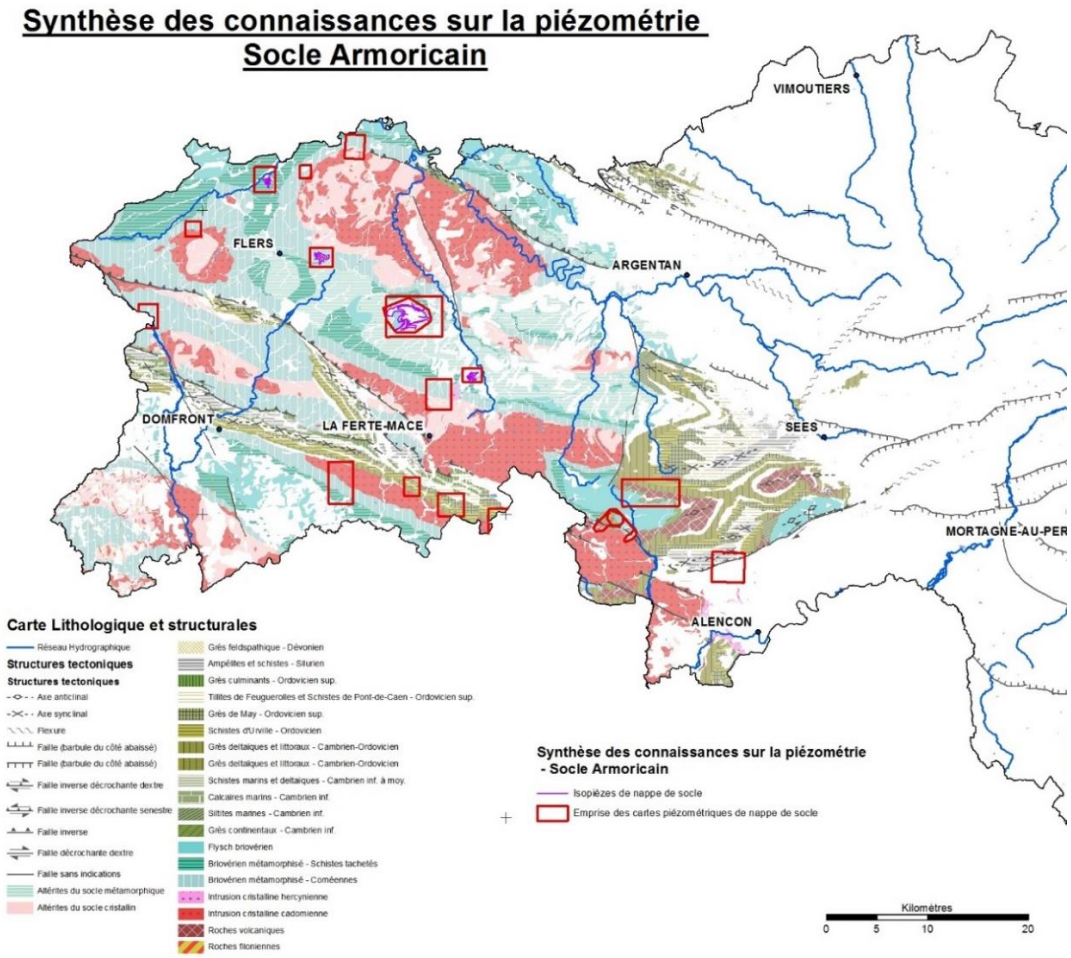


Figure 2 : Formations lithologiques du domaine armoricain qui feront l'objet d'une esquisse piézométrique (source : RP-69332-FR)

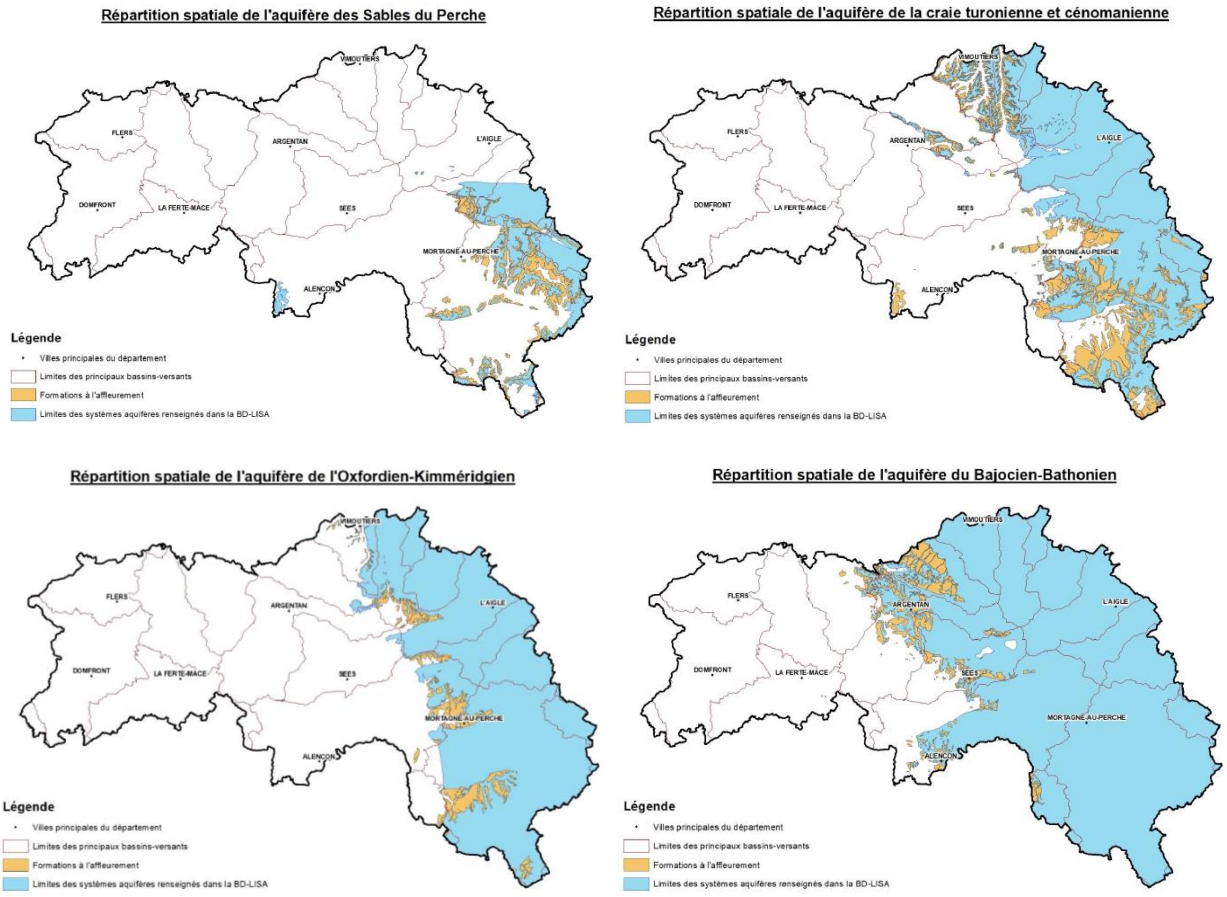


Figure 3 : Ensembles géologiques du domaine sédimentaire qui feront l'objet d'une esquisse piézométrique (source : rapport RP-69331-FR)

Les paragraphes suivants s'attachent, en conséquence, à décrire le jeu de données disponibles, les outils et méthodes d'interpolation utilisés pour produire les cartes, ainsi que les incertitudes associées à certaines hypothèses ou choix méthodologiques. Ces derniers éléments ont conduit à rappeler, en conclusion, les limites d'usage des cartes produites.

Le BRGM propose également dans ce rapport, un test méthodologique pour : 1) vérifier la pertinence de certaines hypothèses simplificatrices utilisées, 2) représenter spatialement la variabilité hydrodynamique des aquifères et 3) de se questionner sur les paramètres ou facteurs pouvant influencer cette variabilité, à l'échelle de ces grands ensembles.

2. Description du jeu de données

2.1. ORIGINE DES DONNEES UTILISEES

2.1.1. Compilation des données

Lors de la restitution de la phase 1 du programme d'étude, le BRGM avait fait le constat d'une densité d'information comparativement moins importante dans le département de l'Orne que dans les autres départements de Normandie.

En conséquence, le BRGM a travaillé à densifier l'information géologique et hydrogéologique sur le département : un important travail de rattrapage a permis d'ajouter 33 % de nouveaux « points d'eau » à la BSS ; pour un total de 3561, dont 46 % rattachés à la BD-LISA (à fin 2021).

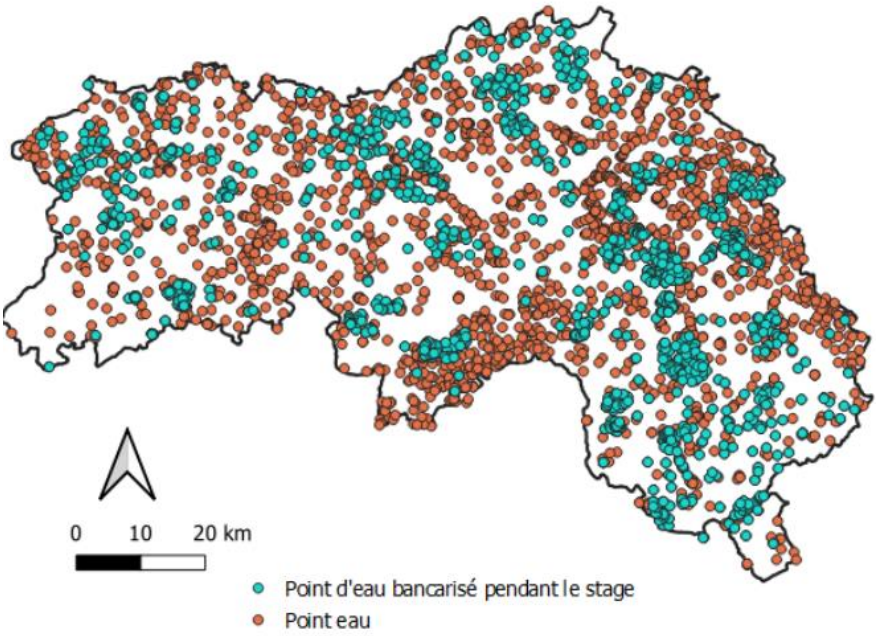


Figure 4 : Densification de l'information hydrogéologique sur le département (BRGM, 2021)

De manière générale, on remarque que les points d'eau sont plus importants en nombre dans le secteur des formations sédimentaires. A l'inverse, les points d'eau sont moins nombreux en domaine de socle ancien, notamment dans le sud-ouest du département, dans la région de Passais.

Les sources, qui sont les points de rencontre entre la surface de la nappe et la surface topographique, ont été identifiées à partir de la BSS et sur les cartes IGN. Elles ont fait l'objet d'un travail de compilation qui a permis de répertorier près de 825 indices à l'échelle de l'ensemble du département de l'Orne (Figure 5).

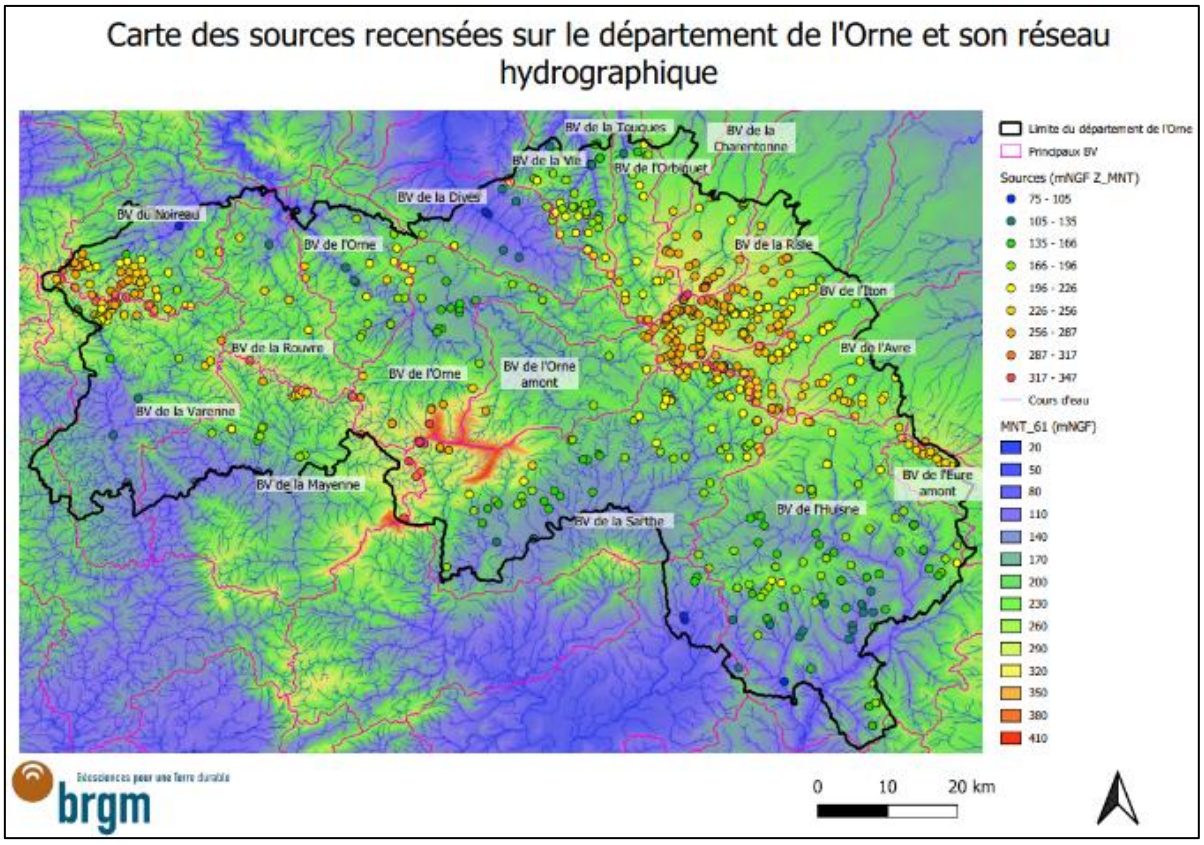


Figure 5 : Carte des indices de sources répertoriées (origine des données BSS et IGN)

On remarque, une fois encore, une répartition assez inégale des données à l'échelle du département de l'Orne. On constate, en effet, une densité de ces indices de sources un peu plus importante sur le Pays d'Ouche (au nord-est) et sur l'amont du bassin versant du Noireau (au nord-ouest).

2.1.2. Campagne de mesure

Pour compléter le jeu de données existantes, le BRGM a réalisé, en collaboration avec le SDE61, le levé d'une centaine de points de mesures sur l'ouest du département, en zone armoricaine.

Les mesures ont été réalisées pendant l'été 2021 (début août), en situation de moyennes eaux, comme le laisse voir la Figure 6 suivante.

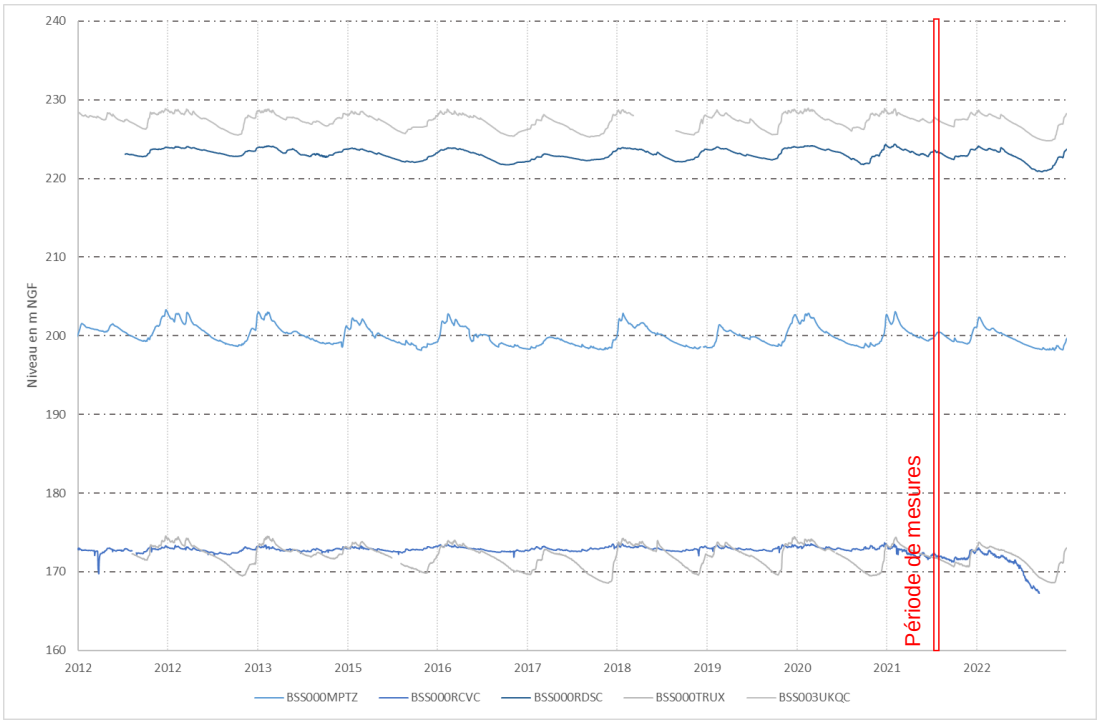


Figure 6 : Chronique de niveau de quelques piézomètres du SDE61 de l'ouest du département de l'Orne

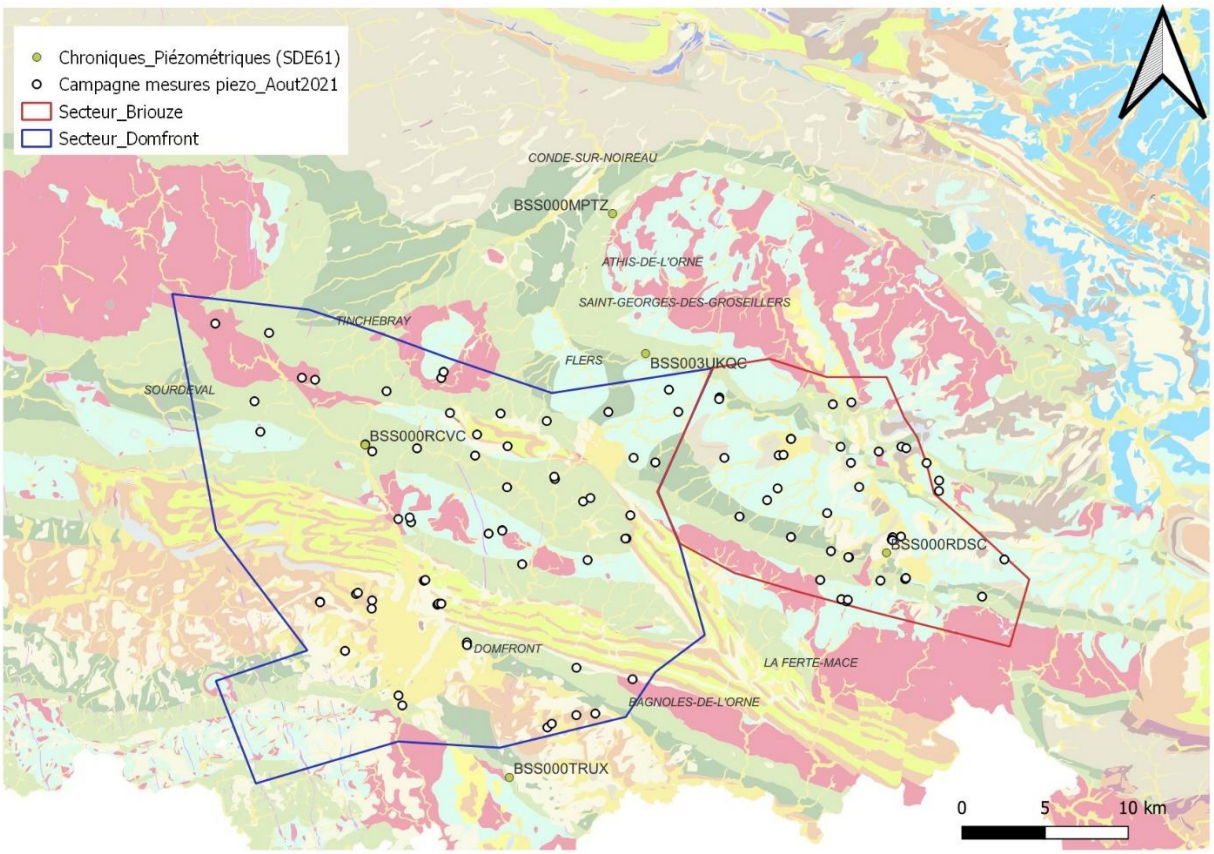


Figure 7 : Campagne piézométrique sur 2 secteurs à enjeux définis par le SDE61, en noir les points mesurés par le BRGM en août 2021

2.1.3. Rattachement des données aux grands ensembles aquifères

Après vérification de la complétude des données, ce sont près de 3140 indices qui ont fait l'objet d'un rattachement aux principaux ensembles aquifères du département (Figure 8).

Le nombre d'indices est très important dans les formations sédimentaires crétacées de l'est du département. Les formations aquifères les moins denses sont celles du Paléozoïque et de l'Oxfordien-Kimmeridgien, dont les surfaces à l'affleurement sont également plus réduites (cf. RP-69331-FR)

A titre de comparaison, l'Atlas départemental du Calvados (2007) s'appuie sur un nombre total de 3912 points d'eau, ce qui est assez équivalent au nombre de sources et ouvrages disponibles pour le département de l'Orne.

Dans le département de l'Eure (Atlas numérique de 2004), ce chiffre est beaucoup plus conséquent, le calcul statistique s'appuyait sur un nombre de points d'eau nettement supérieur : 7189 au total.

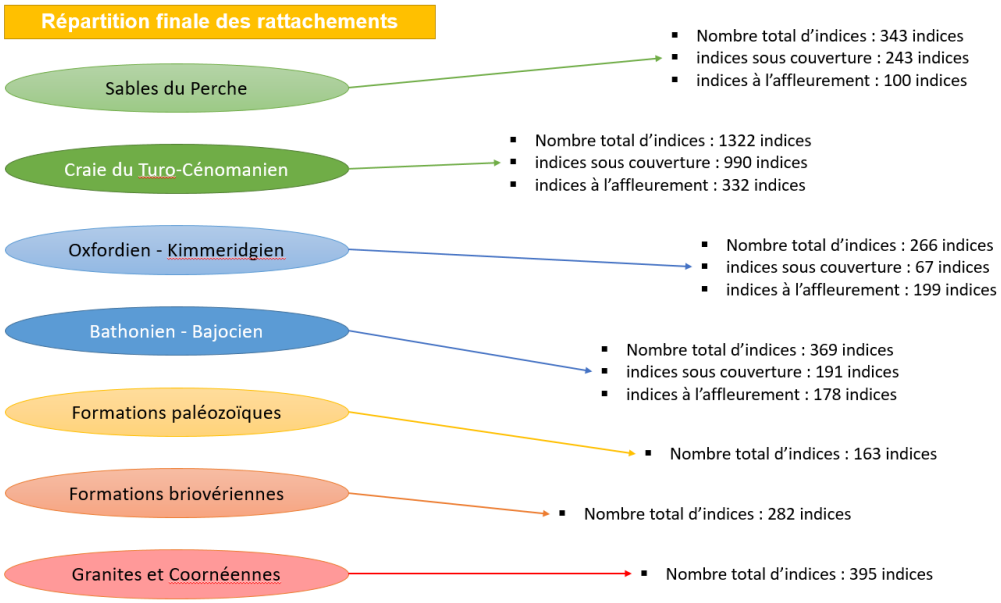


Figure 8 : Rattachement des données aux principales formations aquifères du département

2.2. TRAITEMENT PREALABLE DES DONNEES

2.2.1. Choix de la situation hydrologique

Le jeu de données agrège un ensemble de mesures réalisées sur une période de temps longue (données asynchrones). De plus, le nombre et la profondeur de chroniques piézométriques (cf. Chap.6 du rapport RP-69331-FR), ou de mesures ponctuelles répétées dans le temps sur un même point, n'est pas suffisante pour permettre une caractérisation statistique de ces mesures ; ce qui ne permet pas de réaliser une interpolation fiable de situations hydrologiquement contrastées.

En conséquence, il n'a pas été possible de réaliser une carte de situation de hautes ou basses eaux. **Le BRGM a donc constitué une variable « niveau piézométrique moyen » des grands ensembles hydrogéologiques** à partir des mesures disponibles.

2.2.2. Choix de contraintes (failles-lithologie)

Le BRGM a proposé de retenir des contraintes des systèmes aquifères modélisés. Elles sont de plusieurs types dans le cas présent (hydrologiques et structurales) :

- Pour l'ensemble du département, d'ajouter le réseau hydrographique avec coefficient de Strahler inférieur à 5 : valeur MNT tous les kilomètres en faisant l'hypothèse que les rivières drainent la nappe, sauf dans certains secteurs du domaine sédimentaire où cette hypothèse n'était pas vérifiée ;
- Pour l'ensemble du département également, d'ajouter les **principales structures faillées** décrites lors de la phase 1 du programme (cf. rapport BRGM/RP-69292-FR).

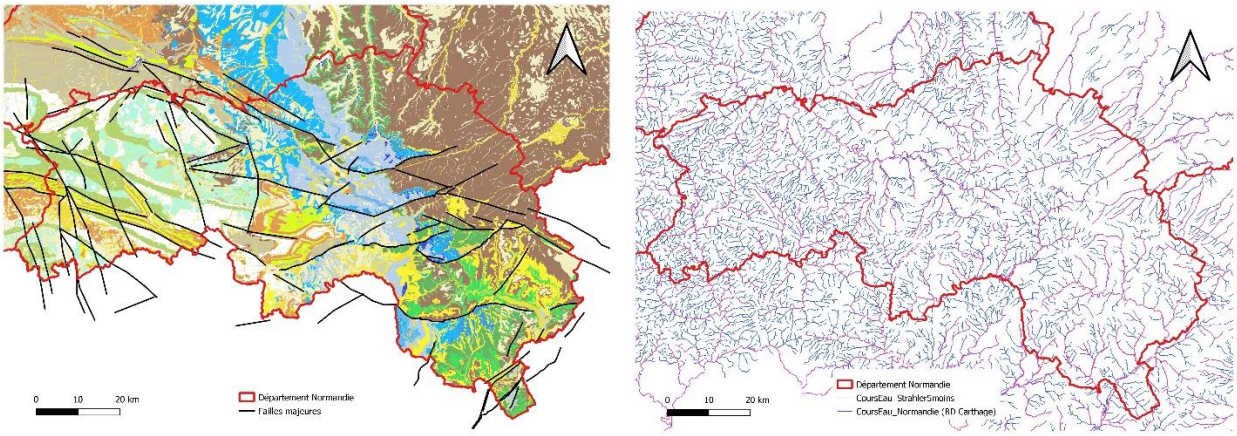


Figure 9 : Choix des principales contraintes à appliquer au calcul (structures faillées à gauche et cours d'eau à droite)

2.2.3. Hypothèses sur le fonctionnement hydrogéologique

Le BRGM a retenu les hypothèses simplificatrices[1] suivantes :

- En domaine de socle :
  - L'ensemble des nappes représentées sont libres ;
  - On distingue plusieurs ensembles hydrogéologiques distincts où pourront être appliquées des règles géostatistiques différentes : les granites, les flyschs, les cornéennes et les formations plissées du Paléozoïque.
- En domaine sédimentaire :
  - Les formations du dogger et de l'oxfordien sous couverture sont captives ;
  - En l'absence de campagne de mesure synchrone à grande échelle, les formations crayeuses et sableuses du Crétacé ne peuvent être différenciées du point de vue géostatistique. Elles seront donc regroupées.

[1] Voir le rapport BRGM RP-69331-FR pour les caractéristiques et spécificités de chaque ensemble aquifère

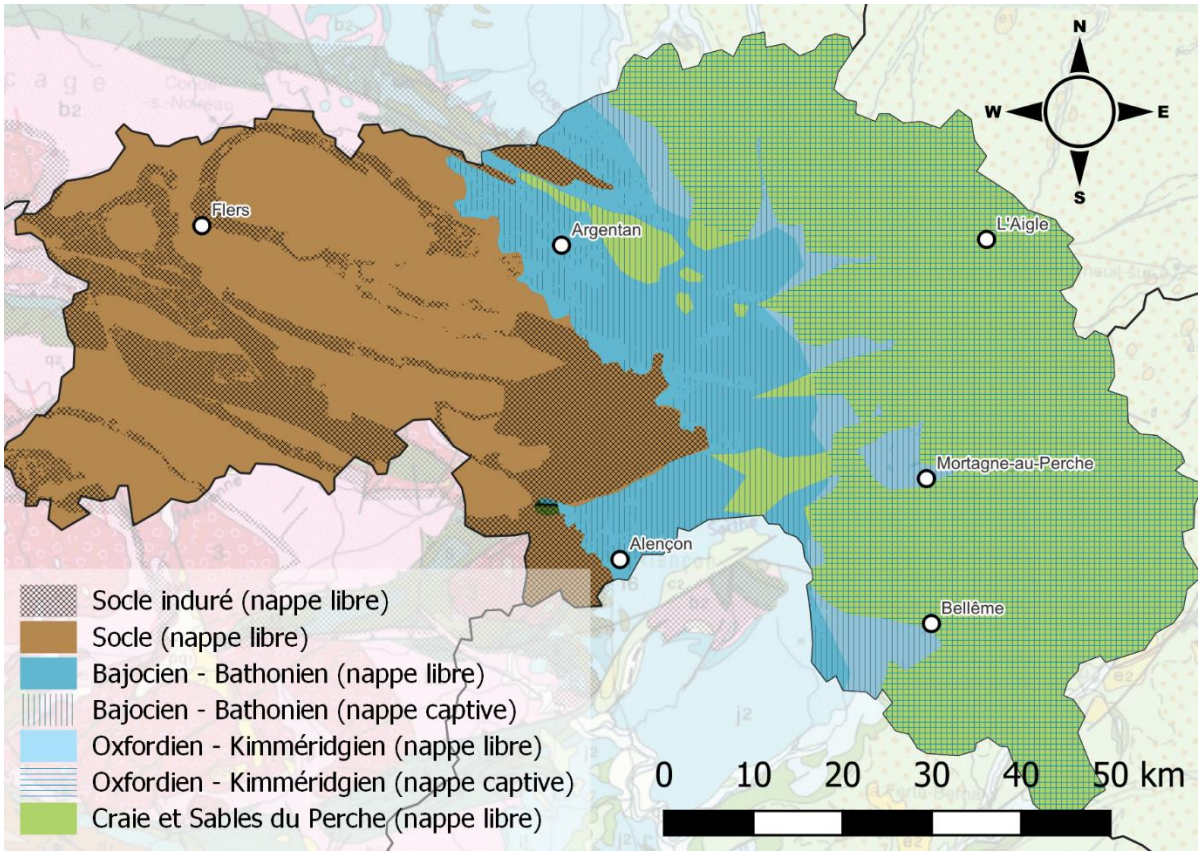


Figure 10 : Carte des différents contextes hydrogéologiques du département de l'Orne

2.2.4. Sélection des données

En raison de l'origine variée des données, et de l'hétérogénéité qui en découle sur le jeu de données complet, un filtrage des points à interpoler a été appliqué préalablement à l'interpolation. Différents critères ont été appliqués pour choisir les points les plus représentatifs d'un état piézométrique moyen :

- Premièrement, les doublons géographiques (mesures au même point) ont été supprimés, soit en conservant la valeur médiane (dans le cas où le nombre d'observations le permet), soit en conservant la valeur la plus proche du niveau observé au droit des points les plus proches ;
- Deuxièmement, certaines valeurs considérées aberrantes ont été supprimées, soit parce qu'elles n'étaient pas représentatives d'un état piézométrique moyen (mesures de hautes eaux, ou de basses eaux), soit en raison d'une singularité hydrogéologique locale ;
- Troisièmement, les données jugées redondantes, présentant des valeurs très proches les unes des autres à des distances de l'ordre de la taille du pixel interpolé (150-250 m), ont également été supprimées afin d'éviter une surestimation de l'auto-corrélation de la variable lors de l'analyse variographique.

Le compte des effectifs pour le jeu de données complet et regroupé pour chaque ensemble hydrogéologique est résumé dans le Tableau 1.

nombre de points	Socle	Bajocien-Bathonien	Oxfordien - Kimméridgien	Craie et Sables du Perche	total
Avant filtrage	1084	447	275	1756	3562
Après filtrage	373	288	200	1118	1979

Tableau 1 : Récapitulatif des effectifs des jeux de données par ensemble aquifère avant le filtrage et après le filtrage des données

2.3. POINTS DE CONTROLES

L'ajout de points de contrôle des données dans les secteurs moins densément dotés en mesures du niveau piézométrique, s'est également avéré nécessaire :

- Topographie (comparaison de la valeur du point au MNT 25 m de la BDALTI® - IGN) ;
- Captages AEP artésiens, issus des informations fournies par le SDE61 et l'ARS Normandie ;
- Autres points disponibles en BSS pour affiner la représentation sur secteurs spécifiques, en fonction du contexte hydrogéologique : secteurs captifs, ou faillés, buttes témoins ou portions isolées d'aquifères, influence du karst par exemple.

3. Choix de l'outil et de la méthode d'interpolation

3.1. ANALYSE VARIOGRAPHIQUE

L'analyse variographique est la première étape d'une interpolation par krigeage d'une variable. Cette analyse consiste à caractériser la variabilité spatiale de chaque jeu de données. Traditionnellement, le variogramme expérimental, calculé à partir des données, est représenté en projetant la semi-variance de la variable considérée en fonction de différentes classes de distance séparant chaque point de mesure. Un modèle de variogramme, qui sera employé lors de l'application du krigeage, est ensuite ajusté au variogramme expérimental.

Le modèle de variogramme peut être caractérisé suivant la portée du variogramme (distance entre deux points à partir de laquelle la variable est considérée stationnaire), et le seuil (semi-variance atteinte à une distance supérieure ou égale à la portée). Un variogramme stationnaire présente un seuil proche de la variance du jeu de données, et une portée ne dépassant pas les dimensions de l'emprise de la carte.

3.2. PREDICTIBILITE DE LA PIEZOMETRIE A L'ECHELLE REGIONALE

L'objectif de cette étude est de produire une cartographie du niveau piézométrique à l'échelle du département de l'Orne. Bien que le jeu de données constitué couvre ce territoire de la manière la plus homogène possible, il est attendu que la variabilité spatiale de la piézométrie ne soit pas entièrement représentée par les données elles-mêmes et intègre une importante non-stationnarité. En dehors d'une construction manuelle de carte piézométrique, qui serait basée sur une connaissance locale d'expert, et sur une analyse au cas par cas de chaque point interpolé, il n'existe pas de traitement numérique capable de produire de surface piézométrique « réaliste » uniquement à partir d'un jeu de données ponctuelles. À l'échelle régionale, il est nécessaire de considérer une variable supplémentaire pour décrire le niveau piézométrique.

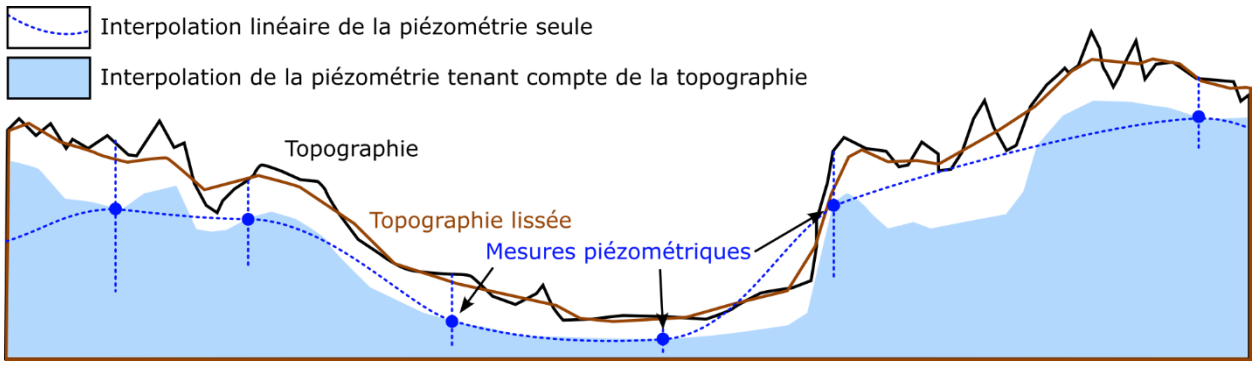


Figure 11 : Profils piézométriques schématiques d'une nappe libre

Dans le cas d'une nappe libre (Figure 11), il est largement établi que la variabilité spatiale de la topographie est corrélée à celle du niveau piézométrique (King, 1899 ; Tóth,1962, Haitjema & Mitchell-Bruker, 2005 ; maillot et al. 2019). Les données topographiques usuellement employées (MNT raster) intègrent généralement une variabilité haute fréquence liée à l'activité humaine (remblayage, excavation, etc…) ou bien à la géomorphologie locale (rochers, gouffres, etc..) qui n'est pas représentative de la variabilité attendue du niveau piézométrique. Il est donc nécessaire de lisser la topographie brute pour s'affranchir de cette variabilité haute fréquence. Dans cette étude, le lissage a été effectué par le calcul d'une moyenne mobile calculée à partir d'un rayon

de recherche circulaire. Dans l'absolu, ce rayon de recherche dépend de la résolution à laquelle il est prévu d'estimer le niveau piézométrique, néanmoins, il peut également être ajusté en fonction des caractéristiques de l'aquifère. En effet, dans le cas d'un aquifère peu perméable, un lissage moins important de la topographie que dans le cas d'un aquifère très perméable peut être appliqué afin d'obtenir une meilleure représentation des gradients hydrogéologiques de ces différents contextes.

Dans le cas d'une nappe captive, l'aquifère étant séparé de la surface par une couche semi-perméable, la corrélation entre le niveau piézométrique et la topographie ne peut être établie. Cependant, le niveau piézométrique étant principalement conditionné par les écoulements latéraux au sein de la nappe, présenterait donc une variabilité moins forte que dans le cas d'une nappe libre. Ainsi, il est attendu que la surface piézométrique d'une nappe captive suive un gradient régional, estimable par des méthodes linéaires usuelles (régression polynomiale, spline, IDW) à partir des mesures piézométriques, voire par une modélisation déterministe régionale.

3.3. KRIGEAGE AVEC DERIVE EXTERNE (KDE)

Le krigeage avec dérive externe permet d'employer une variable spatialisée (la dérive) tout en conservant les propriétés de non biais d'un krigeage ordinaire. Son emploi est généralement indiqué dans le cas de l'interpolation du niveau piézométrique, car il permet, sous réserve de l'existence d'une corrélation entre la variable interpolée et la dérive, de s'affranchir de la non-stationnarité de la variable brute (cote piézométrique) en la projetant sur la dérive, pour utiliser le résidu. Dans le cas de l'utilisation de la topographie plus ou moins lissée, le résidu (différence entre la variable et la dérive) peut s'apparenter à l'épaisseur de la zone non saturée (relative au MNT lissé).

Il existe plusieurs logiciels permettant d'effectuer ce type de krigeage. Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués à l'aide des fonctionnalités du package R gstlearn, développé au Centre de Géosciences des Mines de Paris (Gstlearn 2024). Cet outil permet la mise en place d'une grande variété de fonctions géostatistiques intégrant le krigeage avec dérive externe. Son développement récent a également permis d'optimiser le temps de calcul, et ses fonctionnalités ont vocation à être développées à l'avenir. Enfin la cartographie établie à partir de script facilite la reproductibilité et le transfert de l'interpolation.

3.4. APPLICATION DU KDE AUX DONNEES PIEZOMETRIQUES

3.4.1. Etablissement d'une dérive représentative de la variable

Pour employer la topographie en tant que dérive, il est nécessaire de caractériser les relations de corrélation qui existent entre les données piézométriques mesurées dans les différents contextes hydrogéologiques et les différents degrés de lissage de la topographie. La topographie employée dans le cadre de cette étude est issue de RGE ALTI® Version 2.0 – Descriptif de contenu – Septembre 2018 16, réactualisée en continu depuis 2014 à partir des données à haute résolution du RGE ALTI® (IGN 2018).

Le domaine cartographié est différencié selon sept différents contextes hydrogéologiques (Figure 10) pour chacun desquels une relation différente entre la topographie et la piézométrie peut être envisagée. Sur l'intégralité du jeu de données, il existe une bonne corrélation entre la topographie et la piézométrie (Figure 12), néanmoins, il est nécessaire d'analyser cette corrélation en fonction du contexte géologique.

Les coefficients de corrélation entre le niveau piézométrique et la topographie sont reportés dans le Tableau 2 pour chacun des contextes hydrogéologiques considérés, ainsi que pour différents degrés de lissage. Dans l'ensemble, il existe une bonne corrélation entre la topographie et la piézométrie, justifiant l'emploi de la topographie en tant que dérive externe pour le jeu de données global.

Dans le cas des zones d'aquifère de socle, une différenciation suivant les régions « consolidées » et les régions « non-consolidées » se reflète suivant les différents degrés de lissage du MNT : un lissage moins fort a été appliqué aux régions aux lithologies indurées que dans les régions moins indurées (cf. cases en gras du Tableau 2 page suivante).

Dans le cas des deux ensembles aquifères du Jurassique, le coefficient de corrélation est moins bon dans le contexte captif que dans le contexte libre. Bien que le coefficient de corrélation demeure important sur les secteurs captifs, la relation entre la piézométrie et la topographie ne peut être conceptuellement établie. Ainsi, il a été choisi de ne pas utiliser la topographie en tant que dérive externe sur les zones de nappe captive, et la dérive y a donc été définie par une interpolation préliminaire (spline) des mesures piézométriques. Sur les secteurs de nappe libre, un lissage moyen a été retenu pour les deux aquifères.

Enfin, en raison du comportement libre et très inertielle à l'échelle régionale des aquifères de la Craie et des Sables du Perche, et en l'absence de différence significative entre les corrélations en fonction des différents degrés de lissage, le plus haut degré de lissage du MNT y a été retenu.

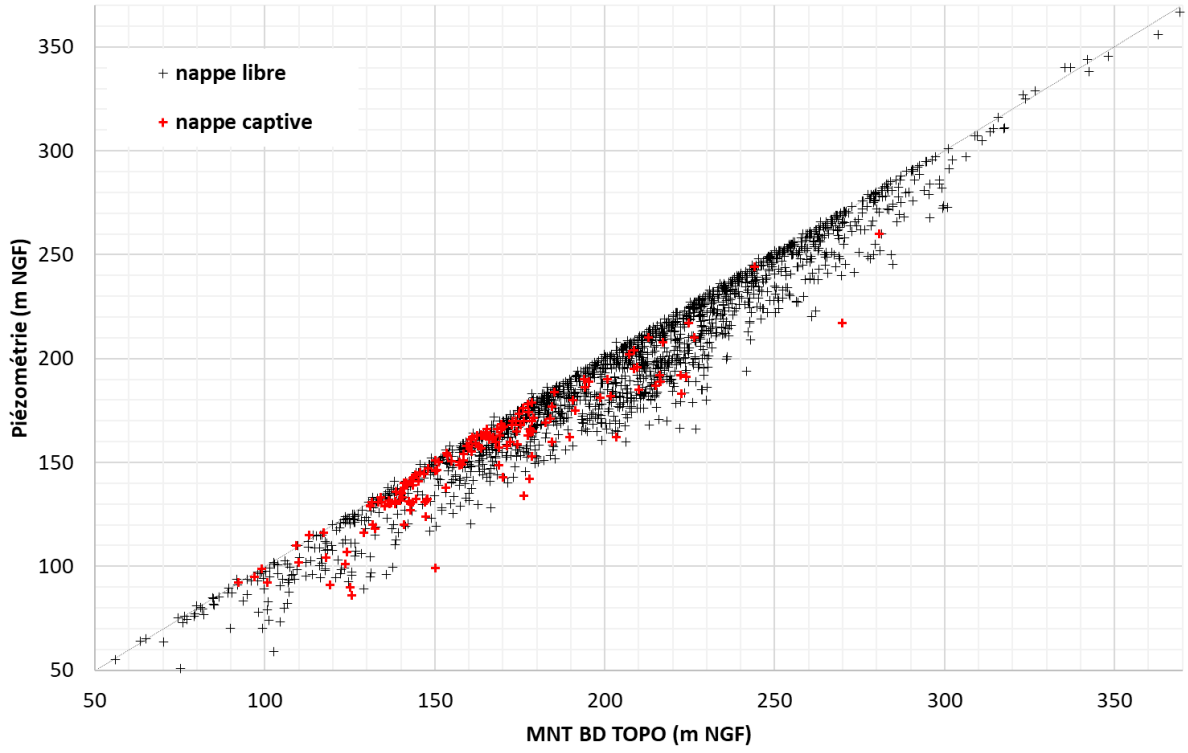


Figure 12 : Niveau piézométrique en fonction de l'altitude

	tout (n=1979)	Socle induré (n=260)	Socle non consolidé (n=113)	Bajocien-Bathonien libre (n=151)	Bajocien-Bathonien captif (n=137)	Oxfordien - Kimméridgien libre (n=173)	Oxfordien - Kimméridgien captif (n=27)	Craie et Sables du Perche (n=1118)
MNT brut	97.7%	99.0%	99.2%	96.9%	92.3%	99.0%	96.6%	96.7%
lissage 250 m	98.0%	***99.1%***	99.4%	97.0%	92.5%	99.1%	96.5%	97.4%
lissage 500 m	98.0%	98.9%	***99.3%***	***96.6%***	92.5%	***98.8%***	96.5%	97.6%
lissage 750 m	97.7%	98.3%	99.0%	96.2%	92.4%	98.4%	95.8%	97.4%
lissage 1 km	97.3%	97.4%	98.6%	95.7%	92.0%	98.0%	94.9%	***97.2%***

Tableau 2 : Coefficients de corrélation entre la piézométrie et la cote topographique pour l'ensemble du jeu de données (les valeurs en gras correspondent aux degrés de lissage retenu pour chaque contexte correspondant)

3.4.2. Prise en compte des failles

Les réseaux de faille peuvent avoir des effets divers sur le niveau piézométrique, suivant le degré de fracturation et la perméabilité des matériaux ayant colmaté cette fracturation. La méthodologie de krigeage permet de tenir compte des failles sur la surface interpolée telles que celles-ci s'assimilent à une barrière imperméable aux écoulements. Il convient donc d'abord d'identifier les failles pour lesquelles des données piézométriques sont disponibles de part et d'autre de la faille. Les failles sélectionnées permettant une description du niveau piézométrique de part et d'autre de la faille sont reportées sur la Figure 13.

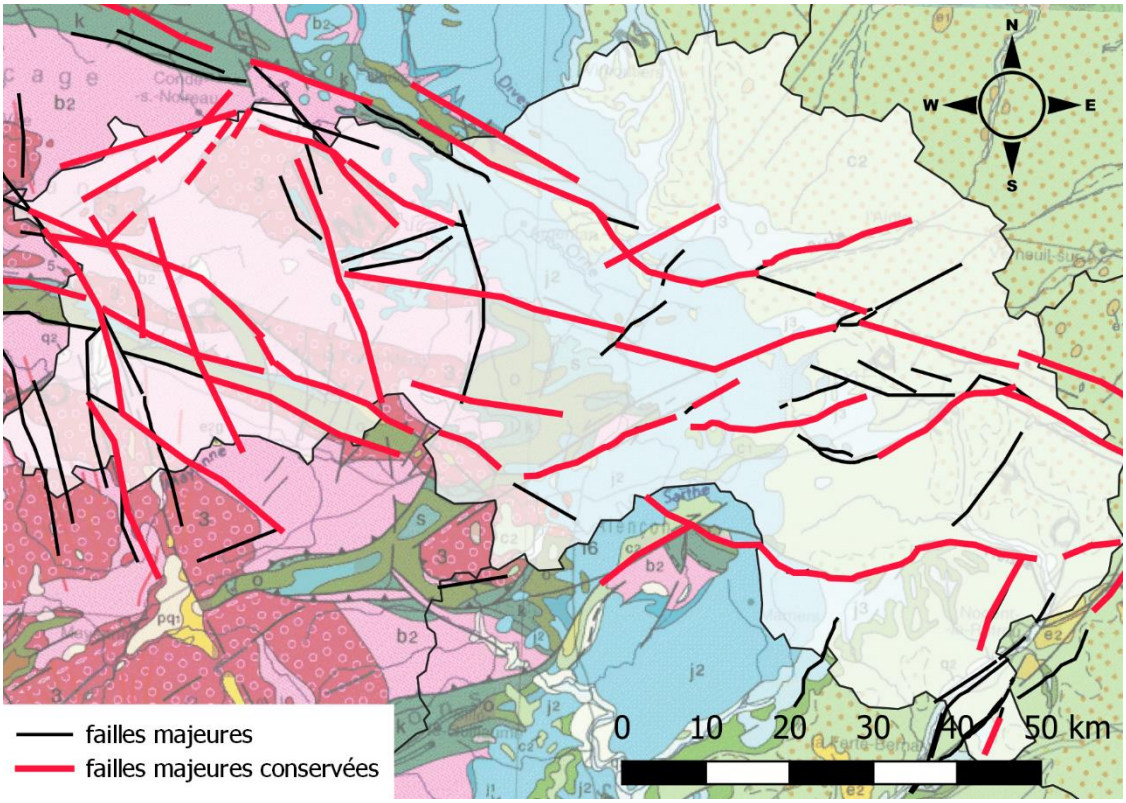


Figure 13 : Localisation du réseau de failles du département de l'Orne

La localisation des failles est ensuite prise en compte dans les caractéristiques du voisinage du krigeage (rayon d'influence de chaque point lors de l'interpolation). La pertinence de la présence, ou de l'absence de cette faille pour la description du niveau piézométrique peut ensuite être établie lors de l'analyse variographique et de la validation croisée.

3.4.3. Analyse variographique des jeux de données

Une analyse variographique a été appliquée à chaque jeu de données représentatif des ensembles aquifères de socle, des systèmes aquifères du Jurassique (Bajocien-Bathonien et Oxfordien-Kimméridgien), et enfin de la Craie et des Sables du Perche.

Conformément à l'application d'une méthodologie de krigeage avec dérive externe, le calcul du variogramme expérimental a été effectué à partir du résidu issu de la différence entre la variable interpolée (niveau piézométrique) et la dérive (cf. section 3.4.1). La Figure 14 présente les variogrammes expérimentaux et les modèles de variogramme ajustés pour chaque jeu de données. L'ajustement du modèle de variogramme a été effectué suivant la méthodologie décrite par Desassis et al. (2013), et les modèles ainsi obtenus sont des variogrammes omnidirectionnels à une seule composante (sphérique).

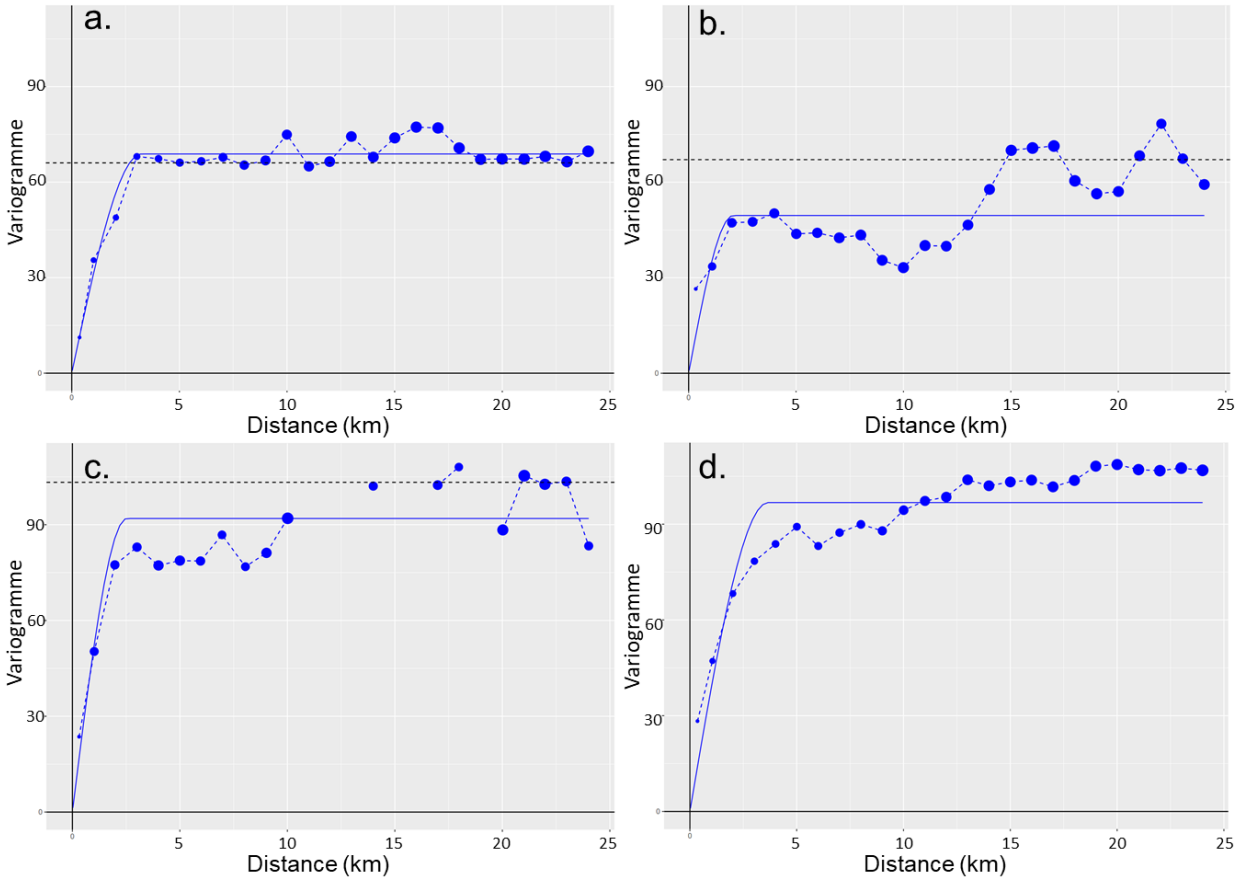


Figure 14 : Variogrammes expérimentaux et modèles variographiques ajustés à chaque jeu de données (a. secteur socle, b. Bajocien-Bathonien, c. Oxfordien-Kimméridgien, d. Craie et Sables du Perche)

Les quatre variogrammes présentent des caractéristiques proches, avec une portée atteignant environ 2,5 km et un seuil situé entre 90 et 65 m². Les variogrammes des jeux de données plus importants (Fig.14.a et d.) sont plus stables que ceux les moins dotés (Fig.14.b. et c.). Ces derniers peuvent également présenter des lacunes en raison de la disposition géographique des observations réparties en longueur (du Nord au Sud), sur une faible largeur de l'ordre de 10 à 15 km.

À titre de comparaison, les variogrammes expérimentaux calculés à partir des mesures brutes du niveau piézométrique (m NGF) sont exposés en annexe de ce rapport.

3.4.4. Evaluation des performances de la méthodologie par validation croisée

La validation croisée consiste à évaluer la qualité de l'interpolation d'un jeu de données en répétant une « interpolation aveugle » de chaque point de mesure. Cette opération permet de calculer une erreur entre la valeur interpolée à l'aveugle et la valeur mesurée qui peut être étendue à l'ensemble du jeu de données afin d'obtenir des indicateurs statistiques d'évaluation de l'interpolation (Tableau 3).

Pour les quatre jeux de données, tous les indicateurs de biais obtenus par la méthodologie de krigeage avec dérive externe sont meilleurs que ceux obtenus par le krigeage ordinaire. Ce constat permet de valider ainsi l'emploi de la méthodologie de krigeage avec dérive externe.

La prise en compte des failles au cours de l'interpolation a généralement pour effet de dégrader les résultats de la validation croisée dans le cas d'un krigeage ordinaire du niveau piézométrique. Ce constat est plus nuancé dans le cas de l'application d'un krigeage avec dérive externe. En effet, à l'exception des données du Bajocien-Bathonien, la prise en compte des failles n'entraine ni amélioration, ni dégradation significative de la qualité de l'interpolation. En revanche, la prise en compte des failles dans l'interpolation améliore l'interpolation du Bajocien-Bathonien.

		socle		**Bajocien - Bathonien**		**Oxfordien - Kimméridgien**		**Craie - Sables du Perche**	
n		373		288		200		1118	
Failles		***sans***	***avec***	***sans***	***avec***	***sans***	***avec***	***sans***	***avec***
Krigeage ordinaire	*erreur moyenne (m)*	-2.58	-6.24	-1.96	-3.72	-3.96	-4.34	-0.47	-1.17
	erreur moyenne quadratique (m²)	549	733	240	346	447	476	116	188
	erreur moyenne standardisée	1.50	1.50	1.53	2.70	1.34	1.36	1.14	1.19
Krigeage avec dérive externe	*erreur moyenne (m)*	-0.07	-0.10	-0.20	-0.17	-0.10	-0.25	-0.07	-0.15
	erreur moyenne quadratique (m²)	56	58	45	40	71	71	65	66
	erreur moyenne standardisée	1.27	1.29	1.62	1.48	1.91	1.98	1.95	1.85

Tableau 3 : Indicateurs statistiques de caractérisation des biais obtenus par validation croisée pour chacun des jeux de données et chacune des méthodologies appliquées (histogrammes des erreurs standardisées en annexe)

3.5. PRISE EN COMPTE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La prise en compte du réseau hydrographique lors d'une interpolation est une question complexe, car elle dépend du type de relation entre la nappe interpolée et le réseau hydrographique. En l'absence de données permettant de trancher sur la connectivité nappe-rivière à l'échelle régionale, le réseau hydrographique est intégré en tant que points de contrôle de l'interpolation conditionnés par l'élévation du MNT de référence (ici, la BDTOPO). Le choix de l'application ou non de points de contrôle ne peut, à cette échelle, qu'être établi par les retours d'expérience d'expertise locale.

Ainsi, une sélection du réseau hydrographique issu de la BD TOPAGE présentant un coefficient de Strahler inférieur ou égal à 5 a été appliquée en tant que points de contrôle discrétisé suivant un semis de points espacés de 500 m. Les secteurs auxquels ont été appliqués ces points de contrôle sont :

- Le secteur des aquifères de socle
- Le Bajocien-Bathonien dans sa partie affleurante
- L'Oxfordien-Kimméridgien dans sa partie affleurante
- Les cours d'eau de la Vie, de la Touques et de l'Huisne pour le secteur de la Craie et des Sables du Perche. Les autres cours d'eau éligibles étant localisés dans des secteurs présentant des incertitudes quant au régime d'échange nappe-rivière, notamment en raison de la présence de karst, n'ont pas été pris explicitement en compte, mais leur présence demeure apparente via la dérive topographique.

3.6. RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Les cartes présentées dans cette section ont été interpolées sur une grille de pixel de 150 m de côté. Chaque carte correspond au résultat de l'interpolation « optimale » parmi les différentes options parcourues (prise en compte des failles, krigeage ordinaire ou avec dérive externe, etc…). L'extension des cartes suit l'emprise des différents secteurs aquifères dans les limites du département de l'Orne.

Carte piézométrique des aquifères de socle

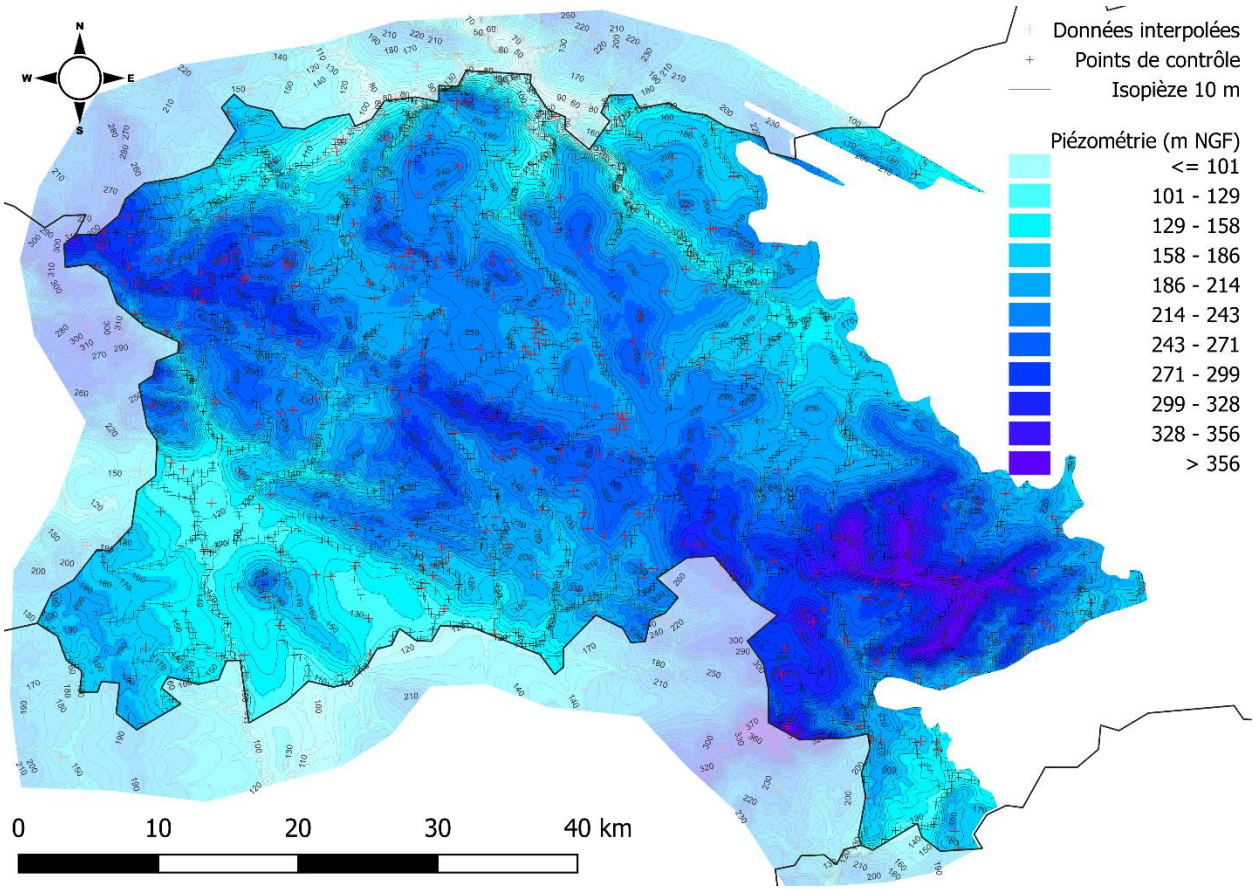


Figure 15 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de socle

Carte piézométrique de l'ensemble Bajocien - Bathonien

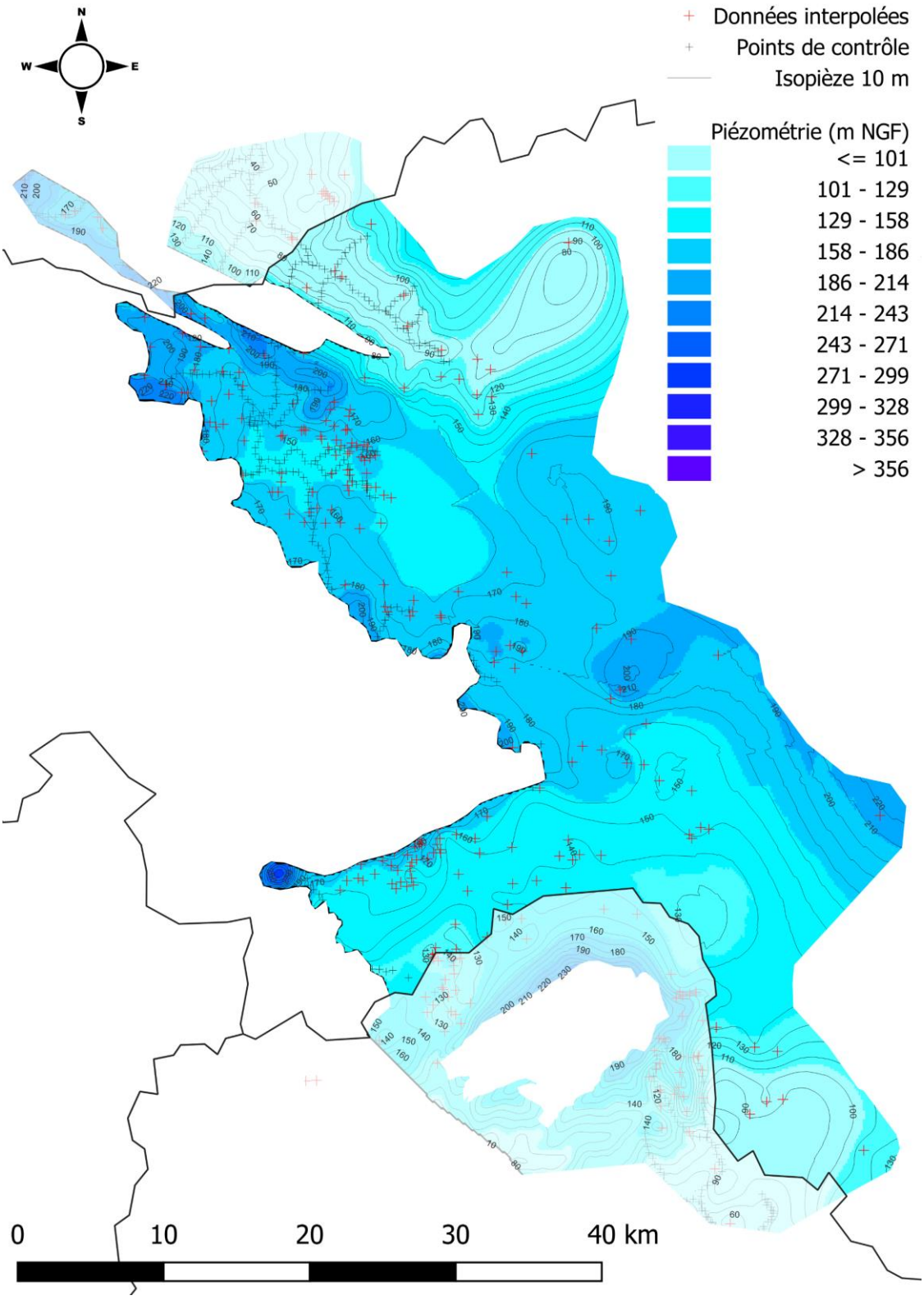


Figure 16 : Carte piézométrique du secteur des aquifères du Bajocien-Bathonien

Carte piézométrique de l'ensemble Oxfordien - Kimmeridgien

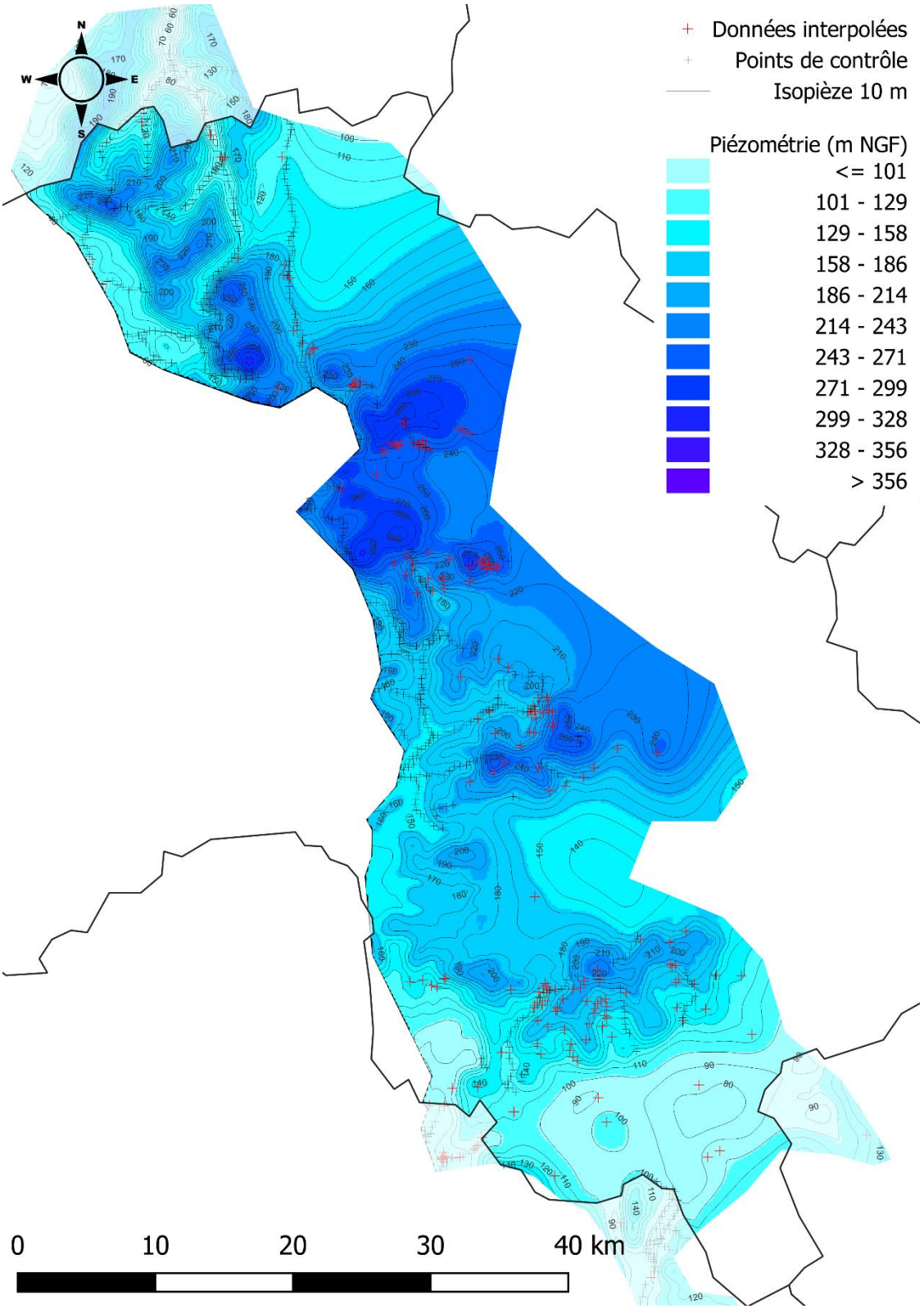


Figure 17 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de l'Oxfordien-Kimméridgien

Carte piézométrique de l'ensemble Craie et Sables du Perche

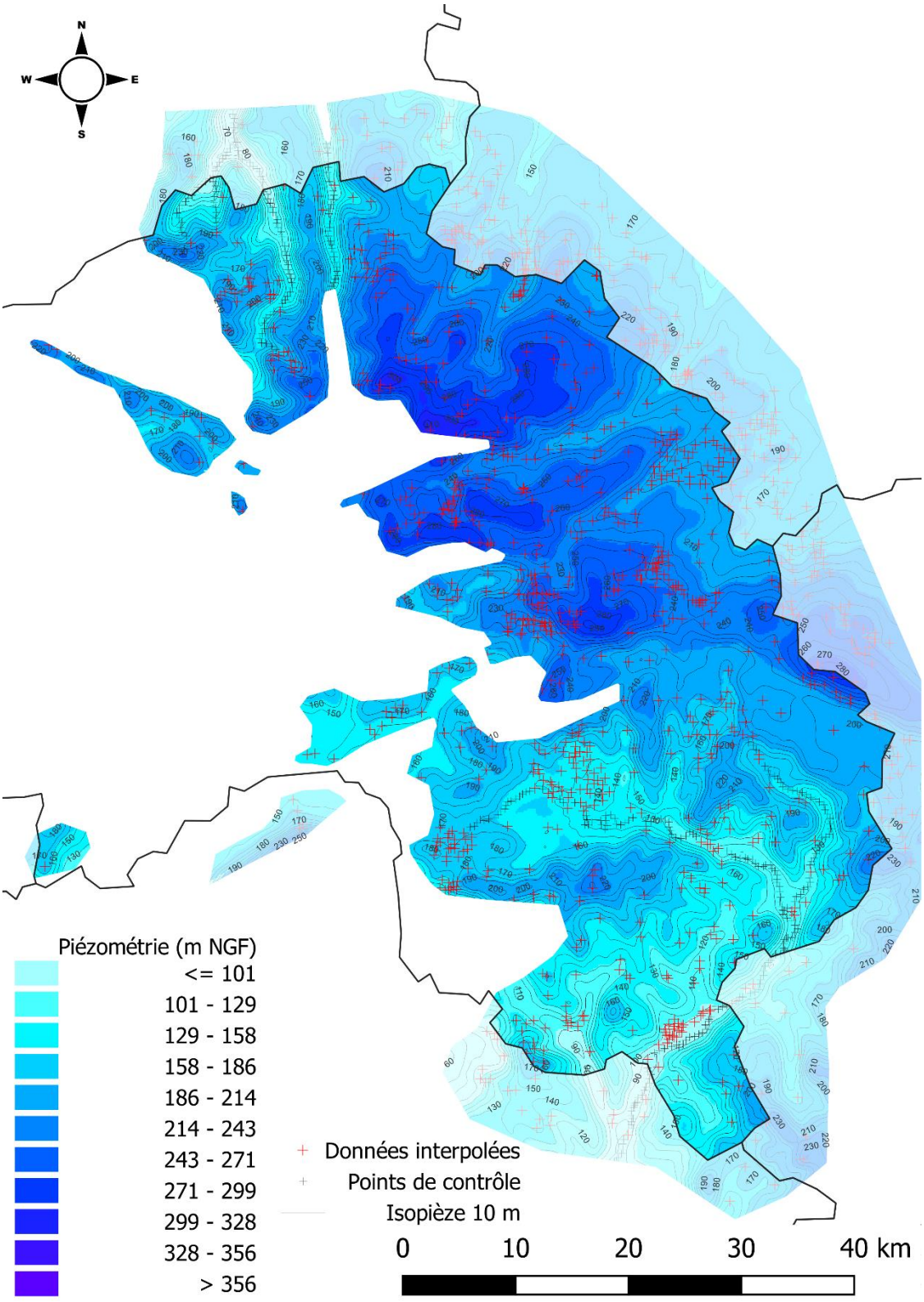


Figure 18 : Carte piézométrique du secteur des aquifères de la Craie et des Sables du Perche

3.7. CONTROLE DES RESULTATS

3.7.1. Comparaison avec les données locales existantes

Dans ce paragraphe, nous avons cherché à comparer les cartes produites aux données locales collectées et digitalisées lors de la phase 1 (Figure 19).

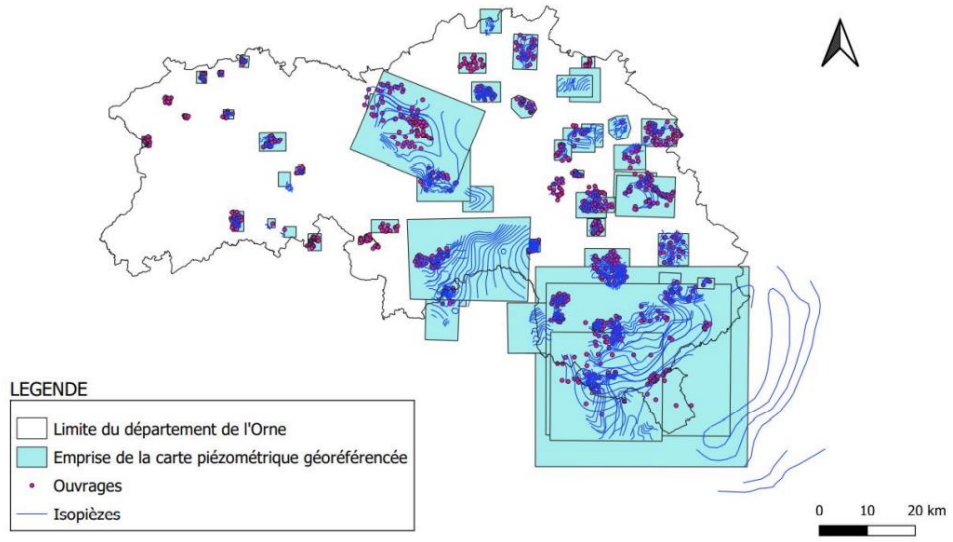


Figure 19 : Digitalisation des données collectées lors de la phase 1 du projet (Rapport RP-69332-FR)

Deux exemples sont donnés ci-dessous en domaine de socle et domaine sédimentaire.

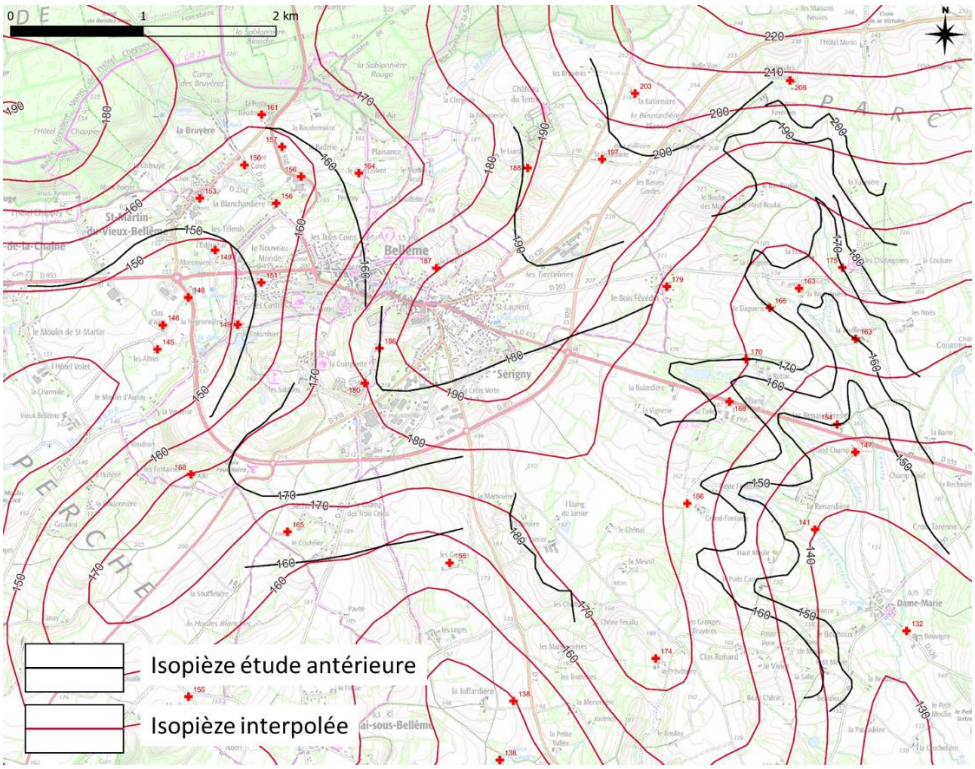


Figure 20 : Comparaison de la piézométrie interpolée de l'Oxfordien-Kimméridgien avec les données locales du secteur de Bellême (source SDE61), secteur sédimentaire

Sur la Figure 20, la géométrie des isopièzes des cartes locales est globalement respectée pour l'aquifère Oxfordien. On note toutefois, à proximité des zones d'affleurement, le choix de représenter la piézométrie avec une influence topographique plus forte encore que celle proposée par le BRGM (attention à la notion d'échelle).

On peut donc estimer que la représentation proposée est satisfaisante dans son ensemble pour cet aquifère.

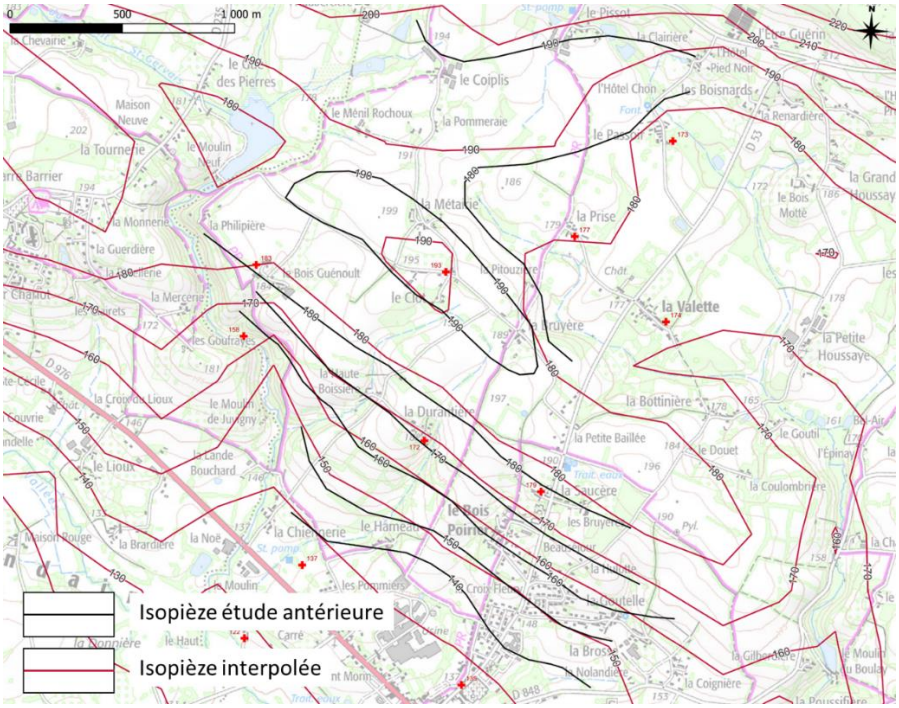


Figure 21 : Comparaison de la piézométrie interpolée en domaine de socle avec les données locales du secteur de la Chapelle d'Andaine (source SDE61), domaine de socle

Bien que les possibilités de comparaison soient plus limitées en domaine de socle, on constate sur la Figure 21 que la géométrie et les côtes des isopièzes proposées par le BRGM respectent globalement l'interprétation locale qui a été faite lors d'études plus spécifiques. Le résultat du calcul est donc a priori satisfaisant.

3.7.2. Comparaison avec les cartes départementales existantes

Les Figure 22 à Figure 24 suivantes montrent que le tracé des isolignes produites pour le département de l'Orne est cohérent avec celles des départements voisins (Eure et Calvados). Les tracés montrent une influence certaine de la topographie, les différences observées peuvent refléter le choix de la part des auteurs d'appliquer une dérive externe topographique plus ou moins importante.

Le drainage apparait ainsi comme plus accentué sur les cartes produites dans le Calvados, avec des gradients assez forts au niveau des versants des principales vallées. Traduisant une dérive externe topographique plus forte. A l'inverse, pour la craie limitrophe entre les départements de l'Eure et de l'Orne, c'est sur les cartes de dernier que la dérive topographique est plus forte, apparaissant comme moins lissée.

La comparaison des isovaleurs piézométriques, pour une situation de moyennes eaux des nappes, fait apparaitre une bonne correspondance entre les différentes cartes produites.

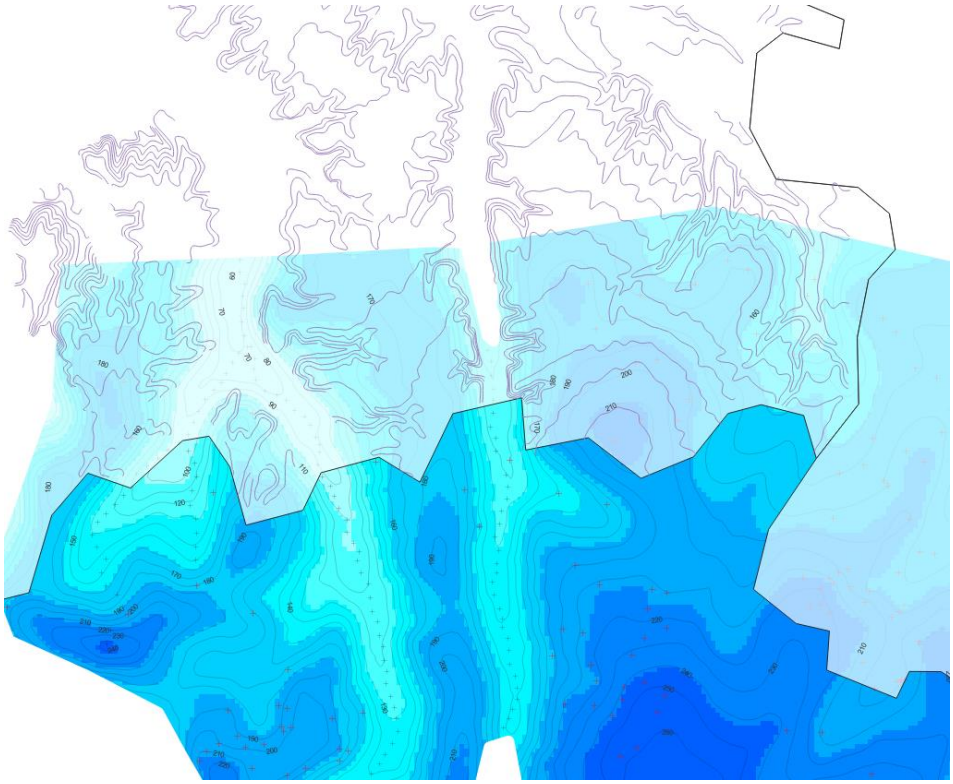


Figure 22 : Comparaison de la donnée produite avec celles de l'Atlas Hydrogéologique du Calvados (BRGM, 2007), Cénomanien du Pays d'Auge

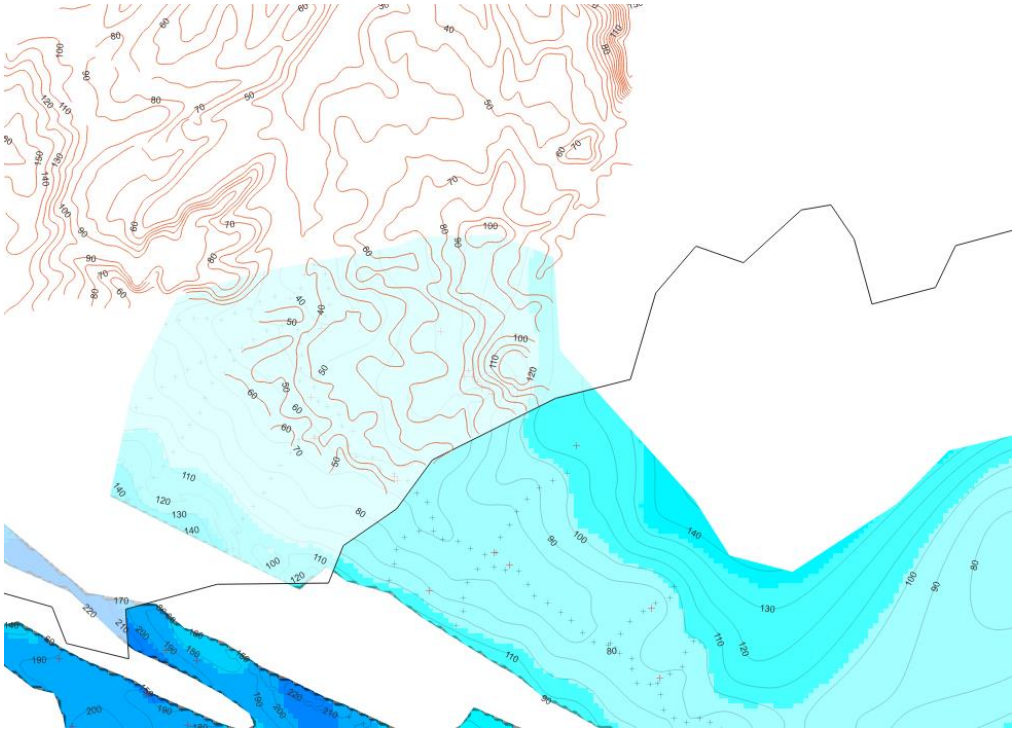


Figure 23 : Comparaison des données produites, avec celles de l'Atlas Hydrogéologique du Calvados (BRGM, 2007), pour le Bathonien du bassin versant de la Dives

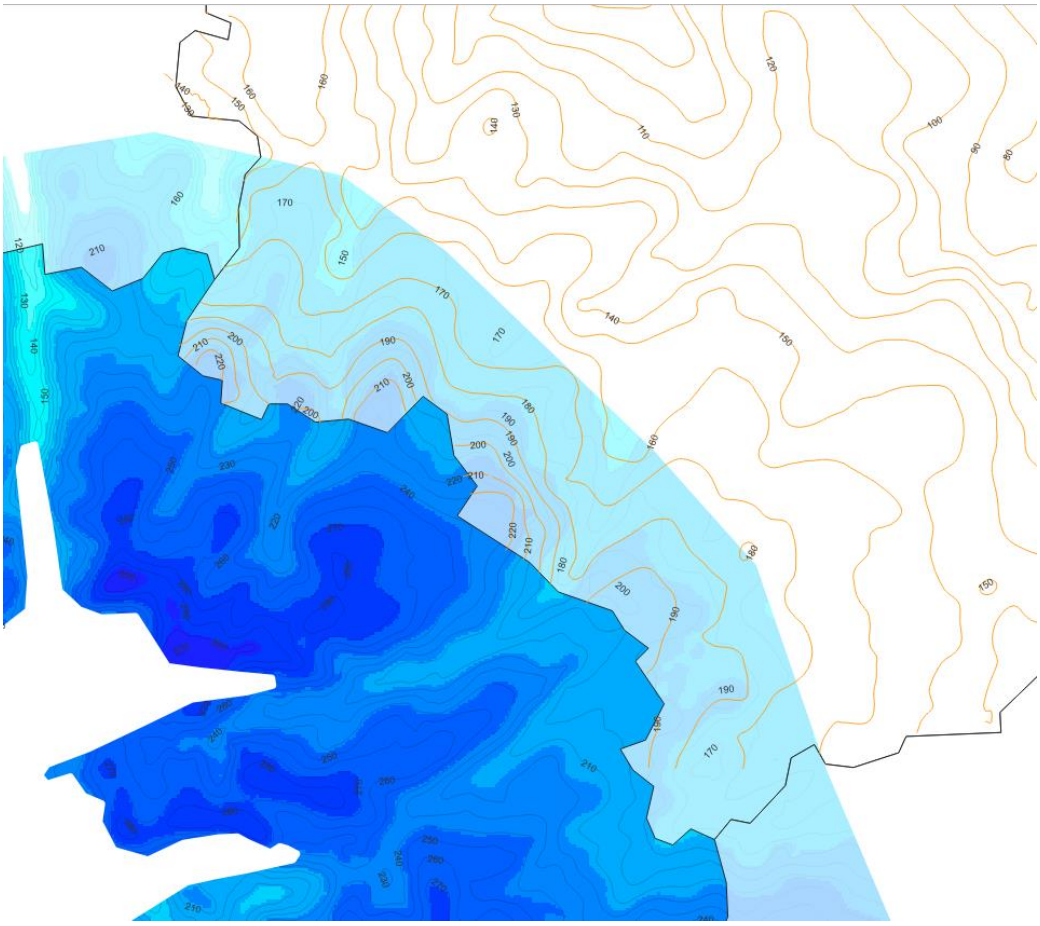


Figure 24 : Comparaison de la donnée produite pour le crétacé supérieur avec les moyennes eaux de la nappe de la craie de l'Atlas départemental numérique de l'Eure (BRGM, 2004)

3.7.3. Comparaison avec la carte des premières eaux rencontrées dans le sous-sol (DREAL Normandie)

Dans ce paragraphe, nous avons cherché à comparer la carte des premières eaux souterraines rencontrées produite par la DREAL Normandie, pour évaluer la susceptibilité des territoires de l'ex Basse-Normandie aux phénomènes de remontées de nappes, avec celles produites par le BRGM dans le cadre du programme OAGPRO61 (Figure 25).

Le calcul des écarts fait apparaitre qu'en zone de socle armoricain, la carte du BRGM ne représente pas cette frange d'eau superficielle. En effet, les niveaux estimés sont quasi-systématiquement inférieurs à ceux proposés par la DREAL, en particulier dans les zones de socle induré (cf. paragraphe 1.3.4).

Sur la zone sédimentaire, les secteurs où les niveaux piézométriques estimés par le BRGM sont inférieurs à ceux de la DREAL sont localisés sur les versants des principales cuestas (sur les secteurs où existent vraisemblablement colluvions et formations de versants). Partout ailleurs, la piézométrie produite par la DREAL apparait, à l'inverse, comme étant équivalente ou inférieure à celle du BRGM. La carte de la DREAL sous-estime alors probablement les niveaux de très hautes eaux susceptibles d'être rencontrées dans les eaux souterraines des principaux aquifères ou dans les nappes temporaires qui peuvent apparaitre dans les formations superficielles (limons et altérites par exemple).

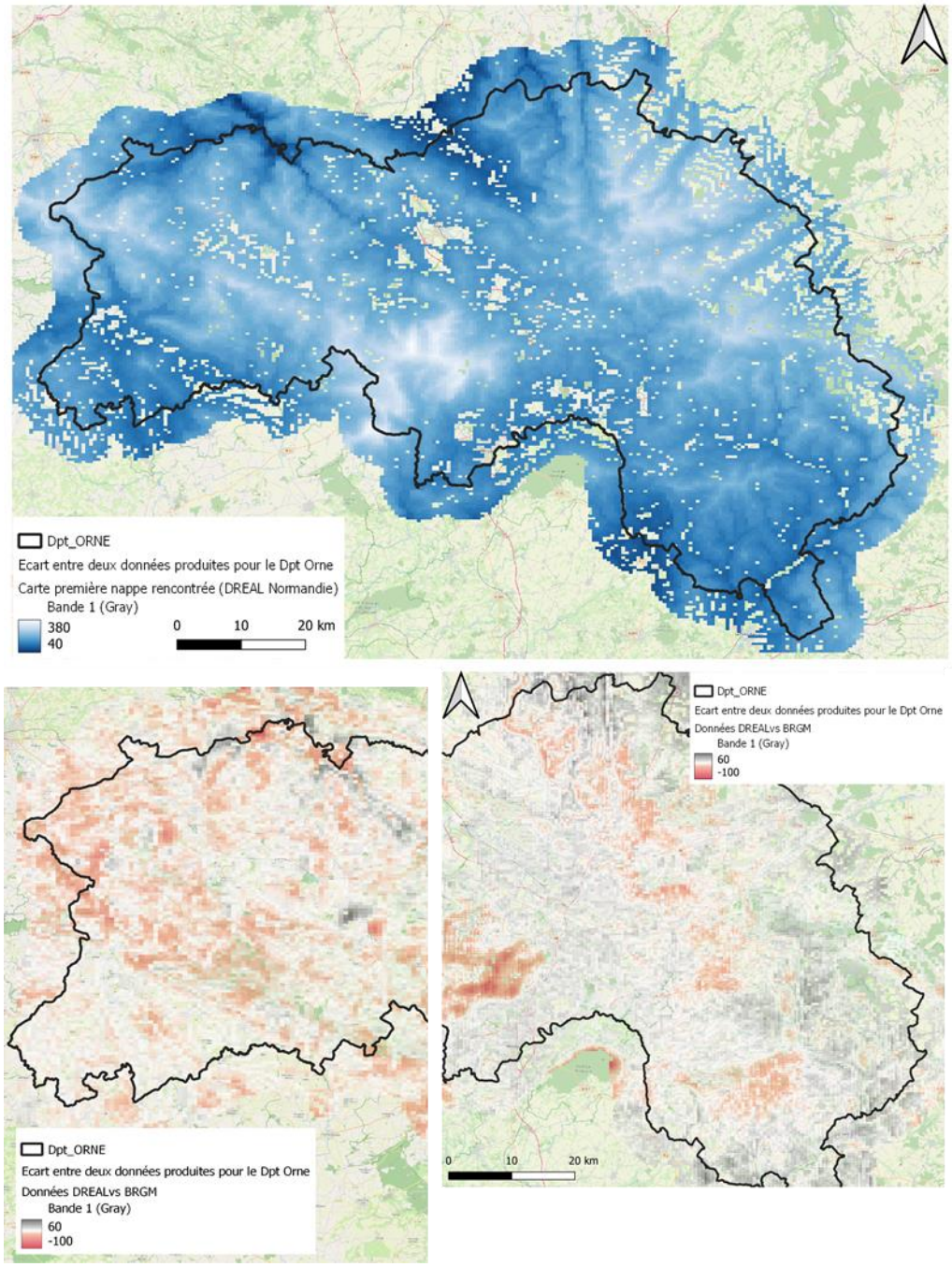


Figure 25 : Ecart entre la carte des premières eaux souterraines rencontrées et les cartes produites par le BRGM

4. Spatialisation de la structure hydrogéologique du milieu à partir des cartes piézométriques

4.1. INTRODUCTION

Les cartes piézométriques sont utilisées pour définir les sens d'écoulement au sein des aquifères. La position de la nappe au sein des aquifères dépend de la recharge et des propriétés hydrodynamiques du milieu souterrain. Dans les aquifères peu perméables, tels que les aquifères de socle, cette surface piézométrique est généralement fortement influencée par la topographie. Sur les cartes piézométriques, les différences importantes de gradient (pente) sont dans certains cas interprétées comme des hétérogénéités au sein du milieu (zones plus ou moins perméables). Cependant, du fait du lien fort avec la topographie, dans de nombreux cas, ces observations restent difficiles à interpréter et à quantifier en tant que propriétés du milieu.

Dans les aquifères, les informations sur les propriétés hydrodynamiques du milieu (transmissivité, emmagasinement) sont limitées aux forages et plus particulièrement à ceux sur lesquels des essais de pompage ont été réalisés. Sur la zone d'étude, seulement 14 valeurs de transmissivité sont disponibles pour une surface de plus de 2700 km^2. Dans les milieux fortement hétérogènes tels que les aquifères de socle, ce faible nombre de points de données en comparaison de la surface d'intérêt ne permet pas d'obtenir une vision des propriétés du milieu qui soit exploitable à l'échelle départementale. De plus, les points mesurés ne sont pas toujours généralisables à une lithologie du fait d'une forte hétérogénéité des propriétés au sein d'une même lithologie.

Pour combler ce manque d'information, ce chapitre présente une méthodologie visant à extraire des informations sur le milieu à partir du croisement de la topographie et d'une carte piézométrique dans le but d'obtenir une spatialisation de la structure hydrogéologique du milieu. Cette structuration peut notamment permettre de déceler des zones ou des lithologies plus perméables que d'autres. Cette approche est fondée sur le fait que, dans le cas d'une nappe libre, notamment dans les régions de socle, malgré l'existence d'un fort contrôle topographique sur la piézométrie (King, 1899 ; Tóth, 1962 ; Haitjema & Mitchell-Bruker, 2005 ; Maillot et al., 2019), il est possible de filtrer cette topographie pour obtenir des informations sur les propriétés du milieu. Des études récentes (Dewandel et al., 2012, 2017, 2020, 2021) ont exploité cette relation pour régionaliser les paramètres hydrodynamiques des aquifères, tels que la perméabilité. Cette méthodologie sera appliquée à la zone de socle située à l'ouest du département de l'Orne (Figure 10 page 18), avec un objectif qualitatif plutôt que quantitatif. **Elle est pour la première fois testée ici à l'échelle départementale** pour évaluer l'impact de grands ensembles lithologiques sur l'hydrogéologie départementale. L'intérêt de la démarche réside notamment dans la résolution spatiale de l'information qui n'est pas accessible aux méthodes couramment utilisées, telles que les informations ponctuelles issues d'essais de pompage ou les regroupements statistiques par lithologies.

Ce chapitre permettra aussi de vérifier les hypothèses formulées pour le krigeage de la carte piézométrique, telles que l'utilisation de lissages différents entre les socles indurés et non indurés. Initialement développée à l'échelle de bassins versants de quelques dizaines de km^2 pour estimer le champ de perméabilité dans un aquifère de socle (Dewandel et al., 2017a), cette méthode est particulièrement utile dans les secteurs dépourvus d'ouvrages exploités mais disposant d'une densité élevée de piézomètres d'observation permettant la création de cartes piézométriques détaillées.

4.2. METHODOLOGIE

4.2.1. Principe de la méthode d'inversion

La méthode proposée pour évaluer le champ de transmissivité, ou de perméabilité, repose sur le concept que les variations à grande échelle de la charge hydraulique peuvent fournir des informations sur les propriétés à grande échelle de l'aquifère. Dans un aquifère naturellement drainé, où le flux vertical souterrain peut être négligé et où le niveau de la nappe est en état pseudo-permanent, principalement contrôlé par la topographie plutôt que par la recharge de l'aquifère (Haitjema & Mitchell-Bruker, 2005), il est supposé que le gradient de la nappe dépend à la fois de la pente topographique et de la transmissivité horizontale de l'aquifère.

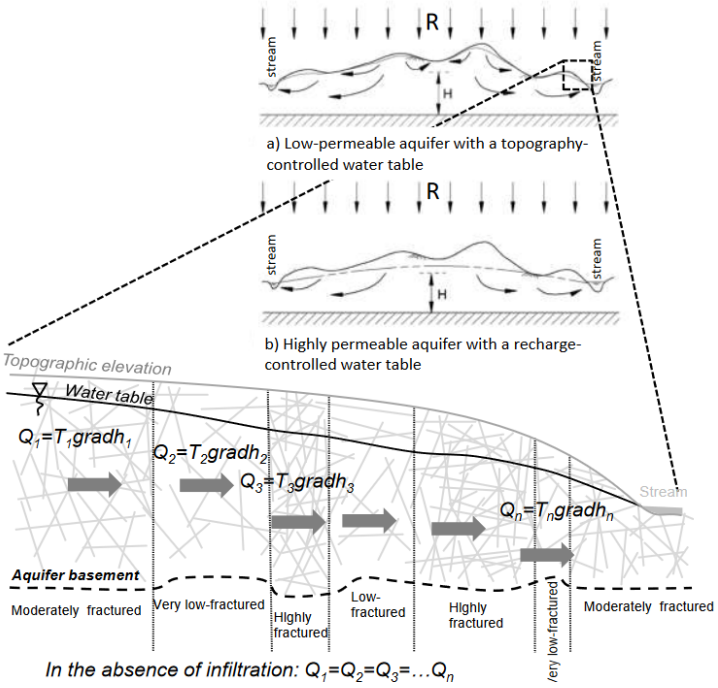


Figure 26 : Schémas illustrant le contrôle de la nappe par: a) la topographie (aquifères peu perméables), et b) la recharge (aquifères très perméables) ; d'après Haitjema et Mitchell-Bruker (2005). c) Détail montrant l'impact de la pente topographique (Dewandel et al., 2020)

Dans le cas d'une topographie relativement plane où l'écoulement des eaux souterraines est horizontal, l'application de l'équation de continuité le long d'une même ligne de courant (loi de Darcy ; $Q = T_1 gradh_1 = T_2 gradh_2 ...$; T_i représentant la transmissivité du compartiment i et $gradh_i i$ le gradient hydraulique) montre de faibles gradients hydrauliques là où la transmissivité est élevée, et des gradients élevés là où elle est faible. Par conséquent, lorsque la topographie varie peu, la variation du gradient hydraulique dépend principalement des variations de la transmissivité de l'aquifère, de manière inversement proportionnelle au gradient hydraulique (Dewandel et al., 2020).

En revanche, lorsque les variations d'altitude sont significatives, il est nécessaire d'éliminer l'influence de la topographie sur la piézométrie avant de pouvoir obtenir des informations sur la transmissivité, ce qui peut se faire en utilisant une relation linéaire entre la piézométrie et l'altitude (Dewandel et al., 2012, 2017, 2020, 2021). Une fois cette tendance éliminée, la pente de la piézométrie résiduelle est calculée. Ainsi, toute variation dans les données est attribuée à une

hétérogénéité, avec une variation horizontale de la transmissivité modifiant le gradient hydraulique indépendamment de la topographie.

4.2.2. Application au domaine de socle armoricain

Pour appliquer ce principe dans la zone d'étude, une carte piézométrique et un modèle numérique de terrain (MNT) homogènes spatialement et à une résolution identique ont été utilisés. Le MNT initial à la résolution de 25 m a été lissé à 10 pixels, puis est rééchantillonné pour obtenir une résolution de 250 m identique à celle de la carte piézométrique. La carte piézométrique est issue d'un krigeage ne comprenant pas d'hypothèses définies sur les propriétés du milieu et le rôle des failles afin d'éviter toute altération de l'analyse par des hypothèses liées à la méthodologie de construction de la carte. Les paramètres du krigeage garantissent la concordance de la carte avec les points de mesure piézométriques et les points de vérification par les cours d'eau. La carte piézométrique initiale est donc différente de la carte finale de l'étude.

La première étape de la méthodologie consiste à évaluer la relation entre la topographie et la surface piézométrique afin d'obtenir une quantification de la relation entre les deux variables. Cette corrélation montre une relation linéaire du niveau piézométrique en fonction de la topographie, ce qui permet d'obtenir une équation de droite sous la forme $y = ax + b$ (Figure 27 et Eq.1).

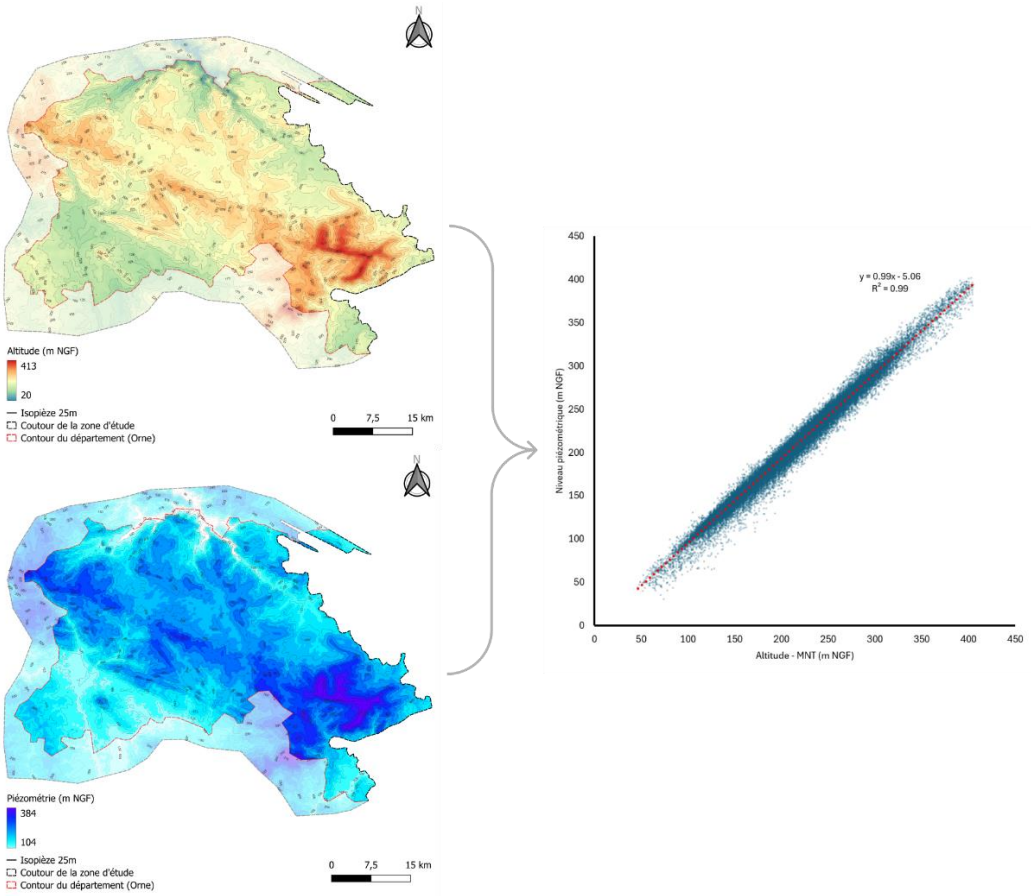


Figure 27 : Schéma illustrant la corrélation entre la carte piézométrique et la topographie pour la régression linéaire avec : En haut à gauche - la carte du MNT de la zone d'étude avec un lissage de 10 pixels ; en bas à gauche – la carte piézométrique homogène sans faille ; à droite – régression linéaire du niveau piézométrique et le MNT

Cette équation permet de calculer une surface piézométrique théorique définie par :

$$Piézométrie_{théorique} = 0.99 * MNT - 5.06 \qquad Eq.1$$

Ensuite, la surface piézométrique théorique est soustraite de la surface piézométrique obtenue par krigeage (Eq.2), ce qui permet d'obtenir la piézométrie résiduelle (Figure 28) mettant en avant les divergences entre une piézométrie affectée uniquement par la topographie et une carte affectée par des variations de propriétés du milieu.

$$Piézométrie_{résiduelle} = Piézométrie_{réel\,(krigeage)} - Piézométrie_{théorique} \qquad Eq.2$$

Pour vérifier que toute influence directe de la topographie, utilisée en dérive externe lors du krigeage, a bien été écartée, deux méthodes ont été mises en œuvre pour valider la procédure.

La première consiste à effectuer une régression entre les résidus de la piézométrie et de la topographie, montrant qu'aucune corrélation significative n'existe entre ces deux variables (Figure 28).

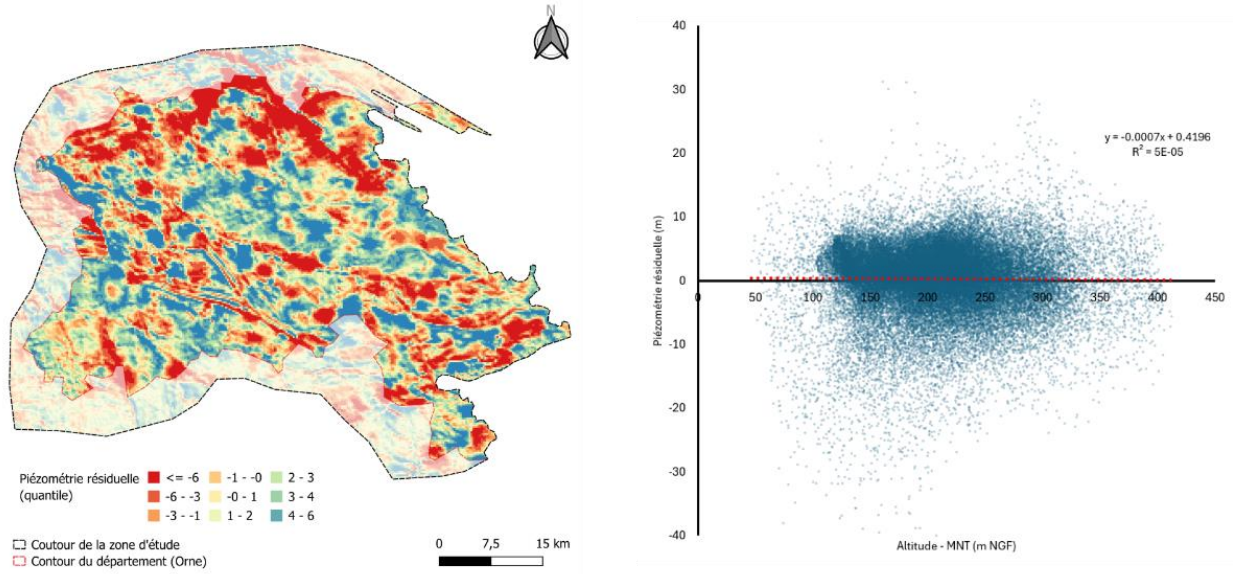


Figure 28 : Carte de la piézométrie résiduelle et la régression linéaire de la piézométrie résiduelle et de la topographie

La seconde méthode génère une carte de la piézométrie résiduelle en appliquant une régression locale à chaque pixel, en utilisant une fenêtre glissante de 13 par 13 pixels (établie à partir du variogramme). Cette approche vise à éliminer l'influence des extrêmes topographiques qui n'auraient pas été correctement filtrés dans la première approche. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de la régression globale, confirmant ainsi l'élimination de l'influence topographique.

À partir de la carte de la piézométrie résiduelle (Figure 28), une carte des pentes de ces résidus est générée (Figure 29) pour servir de gradient, pouvant s'apparenter à des gradients hydrauliques (cf. Figure 26) en accord avec la méthodologie de Dewandel et al., (2012, 2017, 2020, 2021).

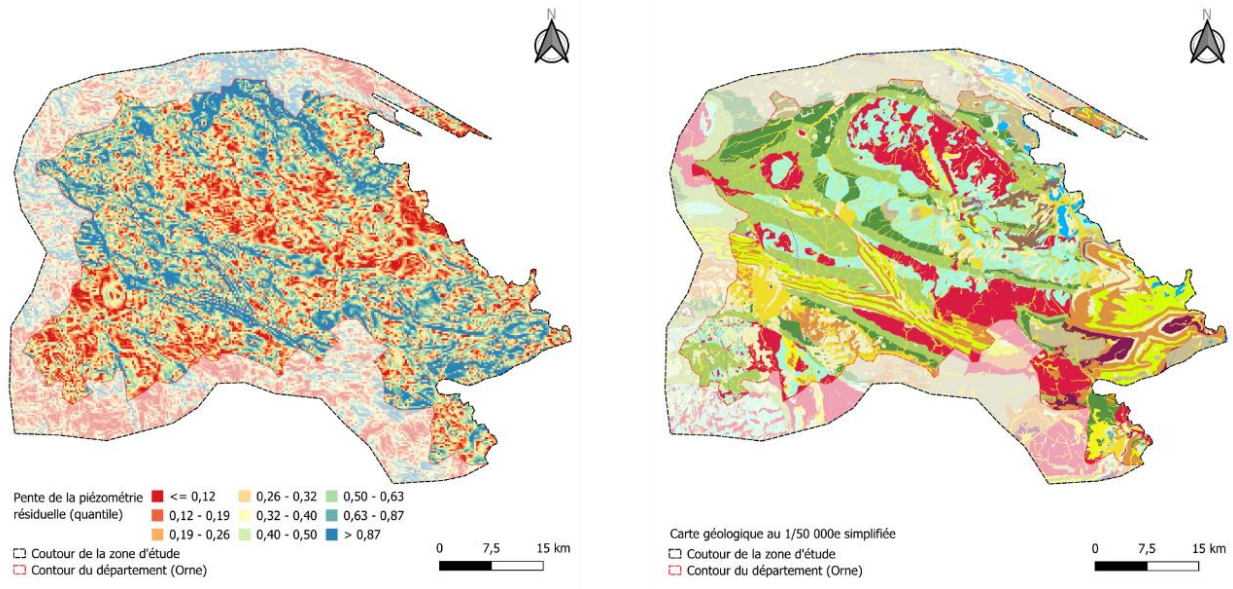


Figure 29 : Carte des pentes de la piézométrie résiduelle avec en comparaison la carte des lithologies simplifiées issue des cartes géologiques imprimées au 1/50 000e

Cette carte montre une structuration du territoire avec des zones rouges, représentatives des faibles pentes, et des zones bleues aux pentes plus prononcées. Cette représentation est basée sur les quantiles des distributions pour mettre en avant les extrêmes. Cette distribution peut être comparée à la géologie (Figure 29). Cette comparaison montre que certaines géologies ressortent distinctement. Principalement, les altérites (bleu clair) présentent de très faibles gradients de pente, tandis que les cornéennes (vert clair), grès (marron), les plutons granitiques (rouge) et les zones de schiste briovérien (vert) montrent des gradients relativement élevés, indiquant potentiellement une plus faible perméabilité relative.

Cette comparaison permet de mettre en avant le fait que les zones d'altération se démarquent clairement, avec un niveau résiduel positif indiquant une nappe supérieure à l'attendu, et des pentes faibles indiquant une perméabilité potentiellement élevée.

Afin de tester les hypothèses émises en amont du rapport, lors de la constitution de la carte piézométrique, la comparaison de cette carte des pentes avec les zones définies comme indurées a été réalisée (Figure 30, page suivante). Cette approche permet de vérifier la cohérence entre les zones à gradients élevés et les zones indurées identifiées lors de l'élaboration de la carte piézométrique.

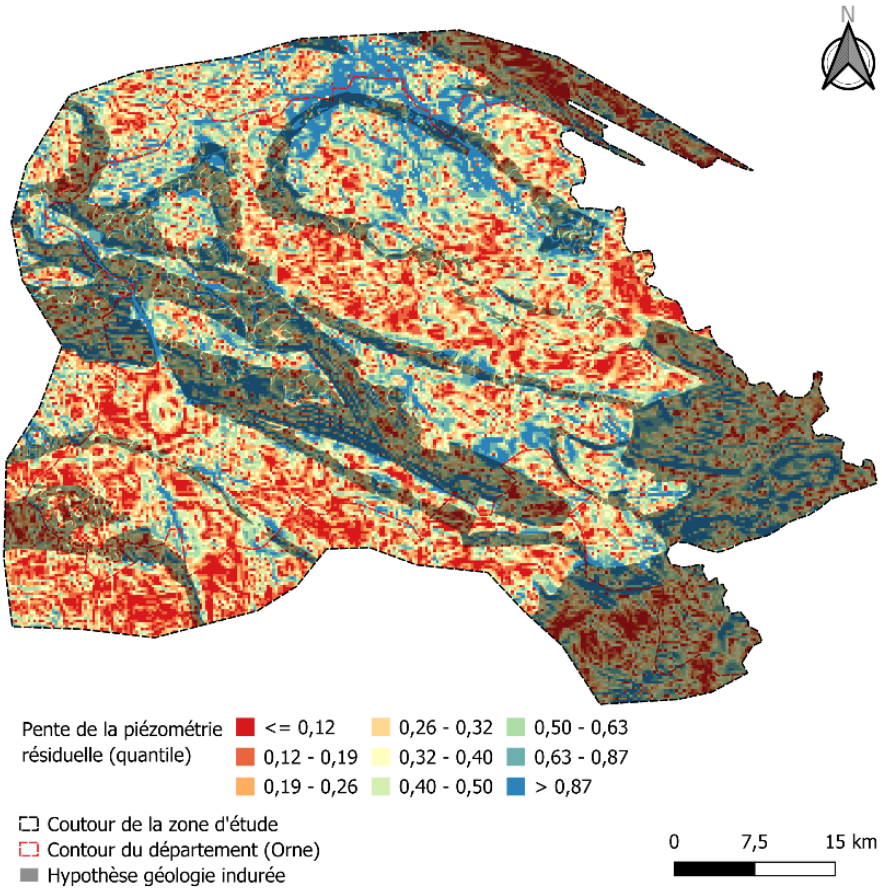


Figure 30 : Carte illustrant les pentes de la piézométrie résiduelle avec les zones cartographiées comme indurées dans l'élaboration de la carte piézométrique du socle

Les zones utilisées comme géologie indurée ressortent majoritairement avec de fortes pentes, ce qui indique des zones potentiellement de faible à très faible perméabilité, en accord avec l'hypothèse d'un socle induré. Cette comparaison permet une double validation. Elle valide d'un côté les hypothèses utilisées dans la constitution de la carte et de l'autre la capacité de cette méthode de traitement des cartes piézométriques pour l'identification de zones de faible perméabilité au sein de grands ensembles.

4.2.3. Discussion sur la méthode proposée

Concernant les autres lithologies, principalement utilisées comme zones indurées, celles-ci montrent des valeurs résiduelles négatives (altitude de nappe inférieure à l'attendu) et des pentes plus fortes, caractéristiques de milieux moins perméables. L'hypothèse d'un socle induré est donc cohérente avec les résultats obtenus.

Malgré un bruit important dans les données, il est possible d'isoler des zones similaires dans les cartes résiduelles et des pentes résiduelles, correspondant bien à la géologie. Bien que la géologie exacte ne soit pas identifiable par ces cartes, elles restent utiles dans leurs approches. Cette méthode est destinée à des zones où la lithologie est peu connue, et permet de mettre en évidence des zones où les altérites sont mal renseignées. Il est alors possible d'avoir une cartographie des zones de potentielle forte perméabilité qui pourraient être rattachées à des altérites.

Pour la régionalisation des paramètres hydrodynamiques et l'attribution de lithologie aux résultats obtenus, il faut prendre en compte la densité des données d'entrée. Pour le socle, 373 données ponctuelles ont été utilisées, ainsi que des points de contrôle tous les 500 mètres sur les cours d'eau dont l'ordre de Strahler est inférieur ou égal à 5, qui contraint les données, rendant fixe la valeur interpolée à ces points. Bien que cette densité soit suffisante pour produire une carte piézométrique détaillée, elle ne permet pas de détecter certains détails lithologiques non bordés par des données ponctuelles. Par exemple, une petite formation lithologique ou une faille ne pourra être identifiée sans la proximité d'au moins 2 à 3 points de données, donnant une continuité des données.

De même, certaines lithologies de surface ne se refléteront pas dans les résultats de la piézométrie résiduelle en raison de leur épaisseur. Comme vu au paragraphe 4.2.2, la nappe se situe théoriquement à plus de 5 mètres de profondeur en moyenne. Toute lithologie de surface ayant une épaisseur inférieure à ce seuil ne pourra donc pas influencer la piézométrie calculée.

D'après les travaux de Dewandel et al., 2021 il est envisageable de déduire la perméabilité en utilisant l'épaisseur de l'aquifère comme donnée supplémentaire, ainsi que les connaissances sur le socle breton pour les valeurs de transmissivité. En effet, les données de transmissivité pour le socle de l'Orne sont insuffisantes (11 valeurs exploitables). Cette approche permettrait d'obtenir une évaluation quantitative des données.

4.3. APPLICATION A LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU SECTEUR CRAYEUX

La méthodologie développée sur le socle a été appliquée aux aquifères de la craie et des sables du Perche. Comme pour le socle, la nappe est considérée dans ce secteur comme libre. Pour cette seconde carte, le lissage du MNT est de 40 pixels et la carte piézométrique utilisée est celle du rapport, avec les hypothèses de construction détaillée précédemment et notamment les failles considérées comme des barrières étanches. Les résultats de la méthodologie sont présentés dans la Figure 31 page suivante avec de haut en bas et de gauche à droite : le MNT de la zone, la carte des résiduels, la carte des pentes des résiduels et la carte géologique.

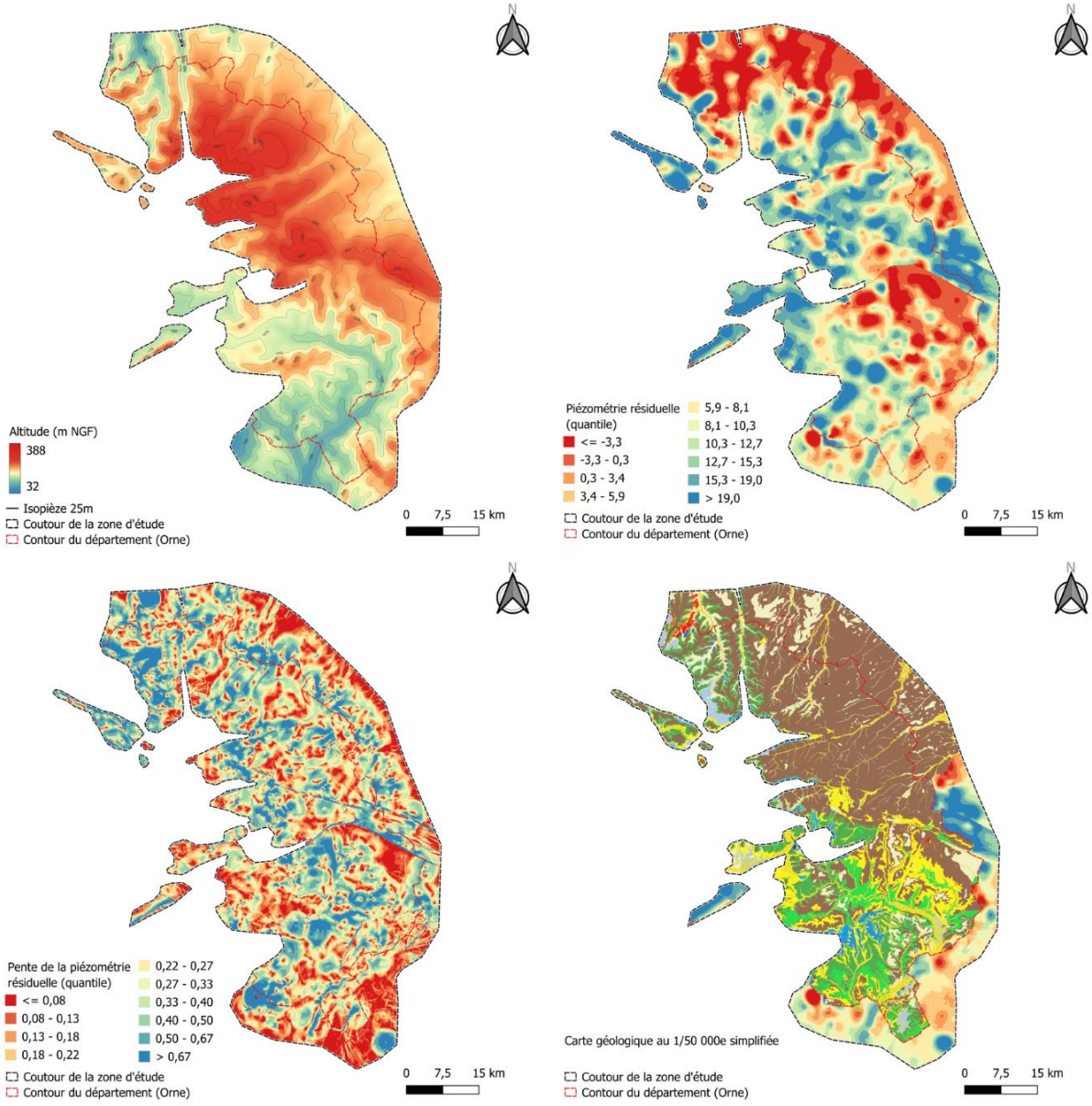


Figure 31 : Cartes comprenant le MNT, la carte de la piézométrie résiduelle et de ses pentes ainsi que la lithologie

Les cartes des résiduels et des pentes des résiduelles montrent une nouvelle fois une structuration du milieu indépendante de la topographie. Le milieu ainsi défini semble moins structuré que pour le socle. Les gradients estimés par cette méthode sont ici beaucoup moins importants que dans le socle. Cela peut provenir à la fois de variations du milieu mais aussi d'une résolution inférieure des cartes utilisées. Le zonage défini ne fait pas, comme pour le socle, ressortir un lien très fort avec la géologie. La présence de certaines structures faillées, ainsi que des formations telles que les sables du Perche ou les formations tertiaires et holocènes, semble accentuer la pente résiduelle. Au sein des grandes structures, telles que les argiles à silex (en marron) les hétérogénéités pourraient mettre en avant le rôle de l'altération et de la karstification de la craie. La cartographie de l'altération est malheureusement trop incomplète à cette échelle pour vérifier ces informations, ce qui ne permet donc pas de valider pleinement ces résultats. Cependant cette carte peut servir de base pour, par la suite, investiguer certains secteurs à la recherche d'indices d'altération ou de karstification.

4.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR ALLER PLUS LOIN

La méthode développée montre un fort potentiel sur les capacités à obtenir, à partir de cartes piézométriques, des informations sur la structuration du milieu. Les résultats prometteurs à l'échelle de petits bassins versants ont été ici appliqués à des zones plus larges à la fois dans un contexte de socle et dans un contexte sédimentaire crayeux.

Dans un contexte de socle, cette méthodologie a permis de montrer une forte structuration du milieu et d'identifier des propriétés différentes pour les altérites avec de faibles pentes piézométriques résiduelles et les zones indurées avec de plus fortes pentes. La qualité des cartes géologiques locales a permis de faire ce lien en raison d'une bonne représentation des altérites. Or, dans de nombreux territoires, ces altérites ne sont pas cartographiées. Cette méthode d'inversion des cartes piézométriques peut donc être un indicateur de la présence d'altérites dans des zones moins bien documentées. Les altérites, par leur porosité généralement plus élevée que les roches indurées sont, dans un contexte de socle, souvent considérées comme de potentiels réservoirs dont la géométrie est difficile à définir. **Cette inversion permet donc d'aiguiller des recherches dans certains secteurs à plus fort potentiel de stockage**.

Les résultats obtenus en contexte crayeux sont eux aussi intéressants même s'ils sont plus difficilement interprétables en raison de capacités de validation moindres. Sur cette seconde carte, la répartition des pentes pourrait aussi être un indicateur de la différence de potentiel entre formations géologiques : craie ou sables du Perche au sud-est du département, mais aussi des marqueurs de l'influence des formations d'altération ou de karstification (effet suspecté au nord-est du département de la Touques au bassin de l'Avre). Toutefois, ces hypothèses n'ont pas pu être validées faute de données suffisantes ; ces cartes pourront néanmoins orienter futures recherches.

Pour ces deux contextes, une validation des résultats par des mesures et identifications de terrain serait nécessaire pour une généralisation et opérationnalisation de la méthode.

Des travaux complémentaires seraient aussi nécessaires pour rendre plus opérationnels les résultats de cette étude, en allant notamment vers une définition plus précise des paramètres hydrodynamiques tels que réalisée précédemment à l'échelle du bassin versant.

Cette méthode fournit une vision de l'hétérogénéité du milieu pouvant aller de l'échelle du bassin versant à l'échelle du département. Ces échelles sont souvent complexes à investiguer car les méthodes ponctuelles basées sur des données de forages (essai de pompages, variations de fluctuations piézométriques) sont difficilement extrapolables dans les milieux hétérogènes. Les méthodes plus spatialisées telles que des investigations géophysiques peuvent être coûteuses à mettre en place sur de grandes échelles.

Enfin, les méthodes d'analyse des débits de cours d'eau sont limitées aux positions des stations de jaugeages et sont intégratives de superficies importantes. Cette méthode, même si la qualité de l'information peut être relative, fournit pour un coût acceptable des informations intéressantes qui peuvent notamment être utilisées par la suite dans la construction ou validation de modèles numériques (cf. volet quantitatif).

5. Conclusion Générale

5.1. BON USAGE ET LIMITES DES CARTES PRODUITES

IMPORTANT :

Le BRGM rappelle que les cartes produites concernent les **nappes d'eau souterraine des principaux aquifères du département** de l'Orne (61) : formations du socle armoricain, formations du Dogger (Aalénien, Bajocien, Bathonien), formations de l'Oxfordien, formations crétacées (craie et sables du Perche principalement). Attention toutes les formations aquifères ne sont pas représentées : limons et colluvions, alluvions, marnes et calcaires calloviens, trias pour les principales ressources secondaires sont notamment absentes.

Les données utilisées pour réaliser les cartes issues de différentes sources bibliographiques : en particulier de la banque de données du sous-sol (BSS), d'études à caractère hydrogéologiques fournies au BRGM par le SDE61, le tout complété par quelques mesures réalisées en 2021 par le BRGM dans le sud-ouest du département. Il s'agit donc d'un ensemble de données disparates et **asynchrones.**

Le jeu de données disponible (mesures ponctuelles ou de suivi piézométrique) n'a pas permis d'estimer et de représenter la variabilité des situations de hautes et basses eaux des nappes. Aussi une seule représentation de l'altitude des nappes est proposée dans le rapport dans une situation de **moyennes eaux**.

Mise en garde : le BRGM précise que ces cartes ne représentent pas la situation des premières nappes d'eaux souterraines rencontrées dans le sous-sol. En effet, une première nappe d'eau peut être présente (systématiquement ou ponctuellement en fonction des conditions locales) dans les formations superficielles ou d'altération des formations géologiques sous-jacentes ou dans d'autres formations géologiques peu ou pas aquifères, qui n'ont pas été représentées ici.

Bien que les résultats aient été vérifiés et contrôlés, les cartes produites, à partir de méthodes statistiques, peuvent ne pas reproduire fidèlement la réalité. En effet, les méthodes d'interpolation s'appuient principalement sur les données existantes : leur nombre et leur qualité peut parfois être insuffisante pour permettre une juste représentation de la situation locale.

En effet, il existe dans le département de l'Orne une grande diversité géologique au sein des ensembles aquifères, que nous avons ici regroupés, comme par exemple les formations oxfordiennes (en domaine sédimentaire) et les formations paléozoïques (en domaine de socle). Cette diversité lithologique et géométrique de ces ensembles va impacter le fonctionnement hydrogéologique des différentes unités et donc impacter le comportement des nappes libres ou captives, qui compte-tenu de l'échelle de travail, peut ne pas être fidèlement représenté (niveaux à l'interface entre deux formations différentes ou de part et d'autre de structures faillées par exemple).

A cet effet, l'utilisateur pourra vérifier au préalable sur les cartes qu'il existe bien, sur la ou les zones d'intérêt, un nombre d'ouvrages interpolés ou points de contrôle suffisant.

Enfin, il est très important de rappeler que les **cartes ont été réalisées à une échelle départementale**, au 1/250 000^{e} pour la zone de socle et au 1/150 000^{e} pour la zone sédimentaire (Dogger, Oxfordien, Crétacé). Tout usage en dehors de ces échelles pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

5.2. RECOMMANDATIONS

Pour des usages locaux, le BRGM recommande de s'appuyer sur des cartes de détails. Au besoin, une ou plusieurs campagnes piézométriques pourront être réalisées, notamment si les besoins concernent spécifiquement une représentation en situation d'étiage ou de hautes eaux.

Pour améliorer les connaissances sur le fonctionnement des aquifères, le BRGM préconise d'apporter des compléments sur le volet piézométrie :

- **En domaine sédimentaire :**
  - **des principales nappes captives du dogger et de l'oxfordien** car il existe assez peu d'ouvrages disponibles pour pouvoir mieux représenter la situation hydrogéologique de ces deux ressources ;
    - par exemple à l'échelle des bassins d'Argentan-Sées, Alençon pour le Dogger ;
    - par exemple sur les secteurs de Gacé – Courtomer, au Nord, de Mortagne et Bellême au Sud ;
  - **de la nappe de la craie et des sables du Perche**, en réalisant des campagnes piézométriques synchrones qui permettront probablement de distinguer ces deux entités : nappes en équilibre ou disjointes ;
  - de préciser l'organisation des écoulements autour des principaux **systèmes faillés ou karstiques** de l'est du département.

- **En domaine de socle :**
  - de **densifier l'information sur le secteur sud-ouest** du département. Le secteur de Juvigny-Domfront-Passais reste, malgré les efforts fournis par le BRGM et le SDE61, encore mal connu. En effet, le nombre de points de mesure y est, comparativement parlant, plus faible que sur le reste du département ;
  - de préciser l'organisation des écoulements autour des **principaux systèmes faillés** comme celui de l'Egrenne ou du Noireau par exemple.

Enfin il apparait indispensable au BRGM de sensibiliser les différents opérateurs du département à la nécessité de poursuivre les efforts de bancarisation des données géologiques et hydrogéologiques : d'une part dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), de rattacher les informations relatives aux données sur l'eau aux aquifères concernés (BD-LISA) pour faciliter leur usage, et d'autre part dans la base de données ADES pour les suivis piézométriques.

Les compléments apportés permettront de densifier et fiabiliser l'information territoriale. Ce qui pourrait permettre à l'avenir de préciser par exemple, entre autres : le potentiel aquifère, les relations nappes-rivières, la sensibilité des aquifères aux étiages ou aux risques de remontée de nappe…

6. Bibliographie

Desassis, N. and Renard, D. 2013 : Automatic Variogram Modeling by Iterative Least Squares: Univariate and Multivariate Cases, Mathemat. Geosci., 45, 453–470, https://doi.org/10.1007/s11004-012-9434-1.

Dewandel, B., J. C. Maréchal, O. Bour, B. Ladouche, S. Ahmed, S. Chandra, et H. Pauwels. 2012. « Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers ». *Journal of Hydrology* 416-417 (janvier):83-97. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038.

Dewandel, Benoît, Alexandre Boisson, Nadia Amraoui, Yvan Caballero, Bruno Mougin, Jean-Michel Baltassat, et Jean-Christophe Maréchal. 2021. « Improving Our Ability to Model Crystalline Aquifers Using Field Data Combined with a Regionalized Approach for Estimating the Hydraulic Conductivity Field ». *Journal of Hydrology* 601 (octobre):126652. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126652.

Dewandel, Benoît, Julie Jeanpert, Bernard Ladouche, Jean-Lambert Join, et Jean-Christophe Maréchal. 2017. « Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map ». *Journal of Hydrology* 550 (juillet):118-29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075.

Dewandel, Benoît, Nadia Amraoui, Jean-Michel Baltassat, Alexandre Boisson, Yvan Caballero, et Bruno Mougin. 2020. « Projet de recherche - MORPHEUS - MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle ». BRGM BRGM/RP-69431-FR. BRGM. http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-69431-FR.pdf.

Dewandel, Benoît, Yvan Caballero, Jérôme Perrin, Alexandre Boisson, Fabrice Dazin, Sylvain Ferrant, Subash Chandra, et Jean-Christophe Maréchal. 2017. « A Methodology for Regionalizing 3-D Effective Porosity at Watershed Scale in Crystalline Aquifers ». *Hydrological Processes* 31 (12): 2277-95. https://doi.org/10.1002/hyp.11187.

Gstlearn - Geostatistics and Machine Learning toolbox, 2024 - Copyright © MINES Paris - PSL University - Free download from https://gstlearn.org.

Haitjema, H. M. and Mitchell-Bruker, S. 2005 : Are Water Tables a Subdued Replica of the Topography?, Ground Water, 43, 781–786, https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x .

Idée E., Jallais N. avec la collaboration de Eid P. et Malassigne V. 2019 – Synthèse géologique et hydrogéologique du département de l'Orne. Volet bancarisation des données. Rapport final BRGM/RP-69332-FR, 55 p., 17 ill., 2 ann., 1 CD.

Idée E., Jallais N., Boisson A., Neveux A. avec la collaboration de Gresselin F., Dugué O. 2019 – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne, Volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-69331-FR, 258p., 122 ill., 20 tabl., 3 ann.

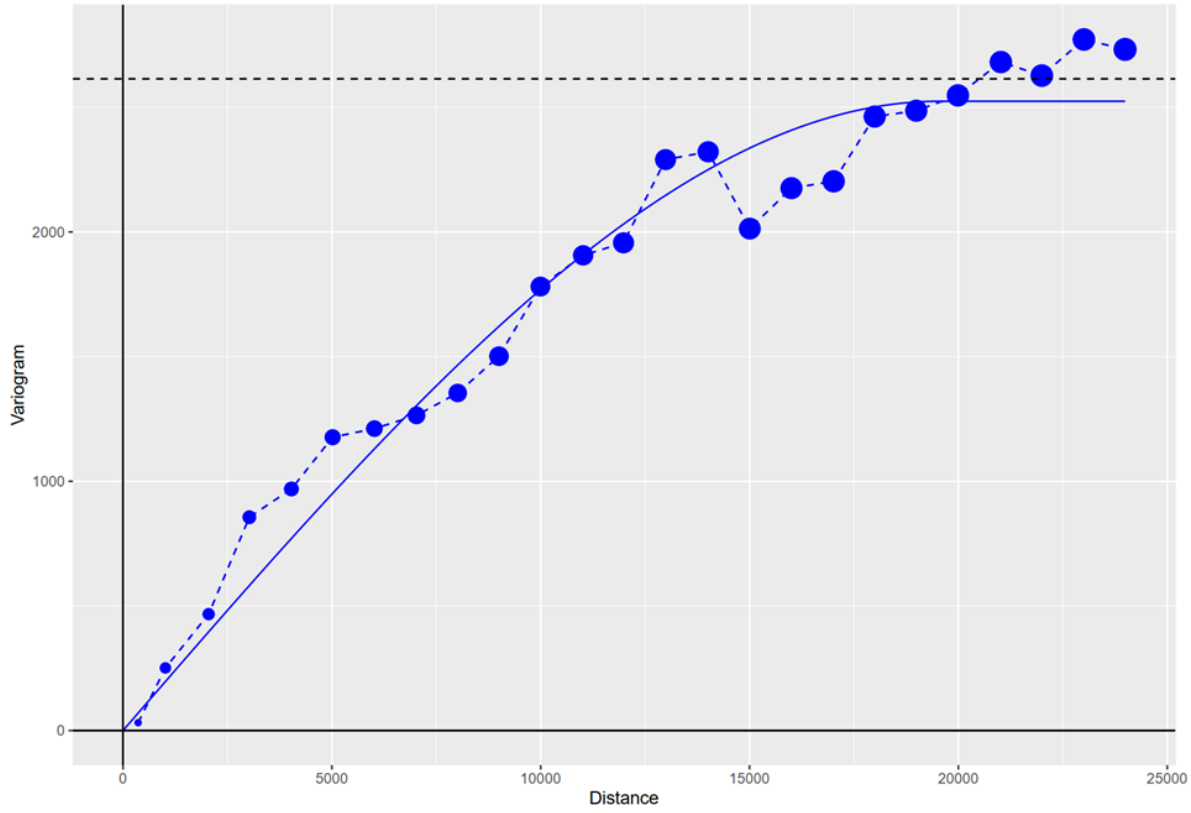
King, F. H. 1899 : Principles and conditions of the movements of ground water, US Geological Survey 19th Annual Report, Part 2, 59–294.

Maillot, M., Flipo, N., Rivière, A., Desassis, N., Renard, D., Goblet, P., and Vincent, M. 2019: Technical note: Water table mapping accounting for river–aquifer connectivity and human pressure, Hydrol. Earth Syst. Sci., 23, 4835–4849, https://doi.org/10.5194/hess-23-4835-2019 .

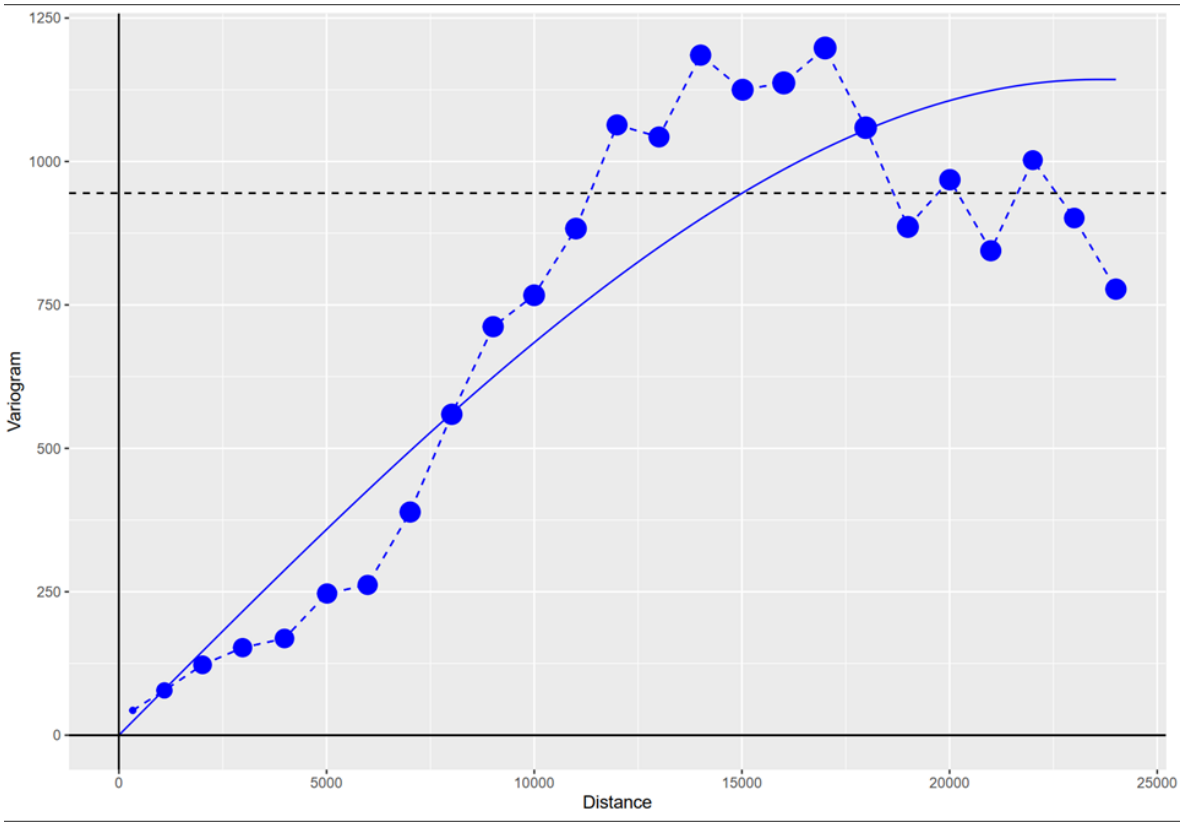
Meire B., Caritg S., Idée E. avec la collaboration de Gresselin F. Dugué O. 2019 – Synthèse géologique et hydrogéologique du département de l'Orne. Volet géologique et structural. Rapport final. BRGM/RP-69292-FR, 169 p., 74 ill., 1 ann.

Tóth, J. 1962 : A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada, J. Geophys. Res., 67, 4375–4388, https://doi.org/10.1029/JZ067i011p04375

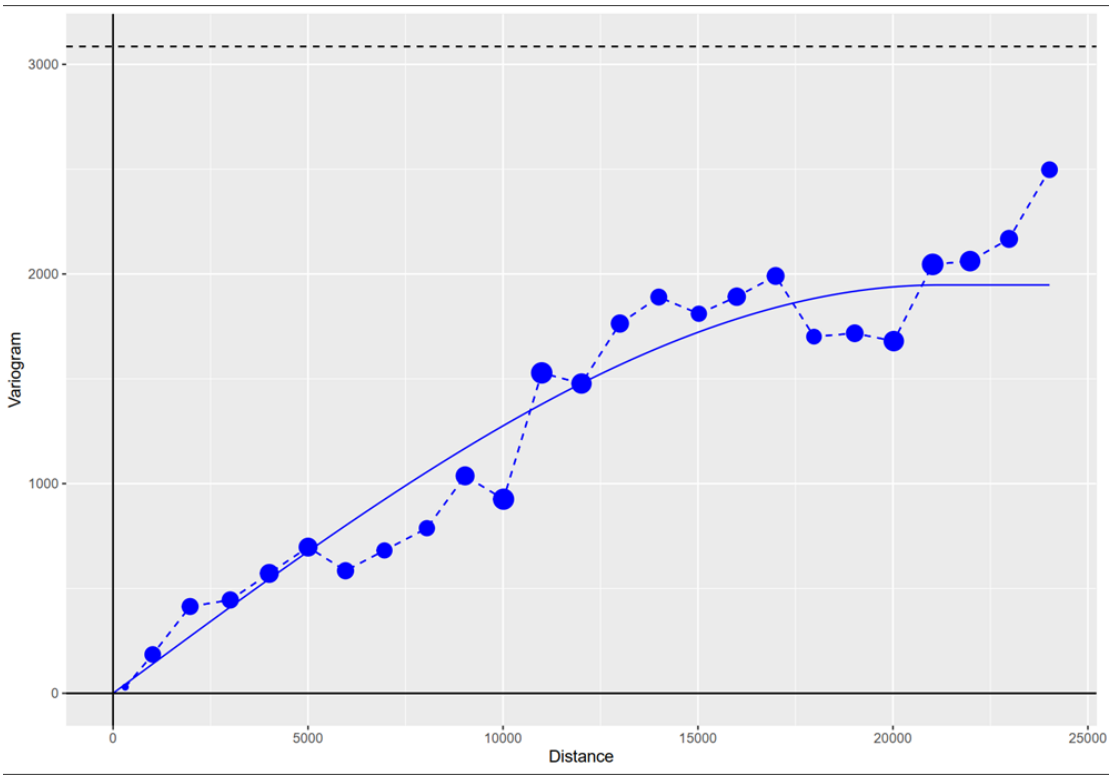
Annexe 1 - Variogrammes testés



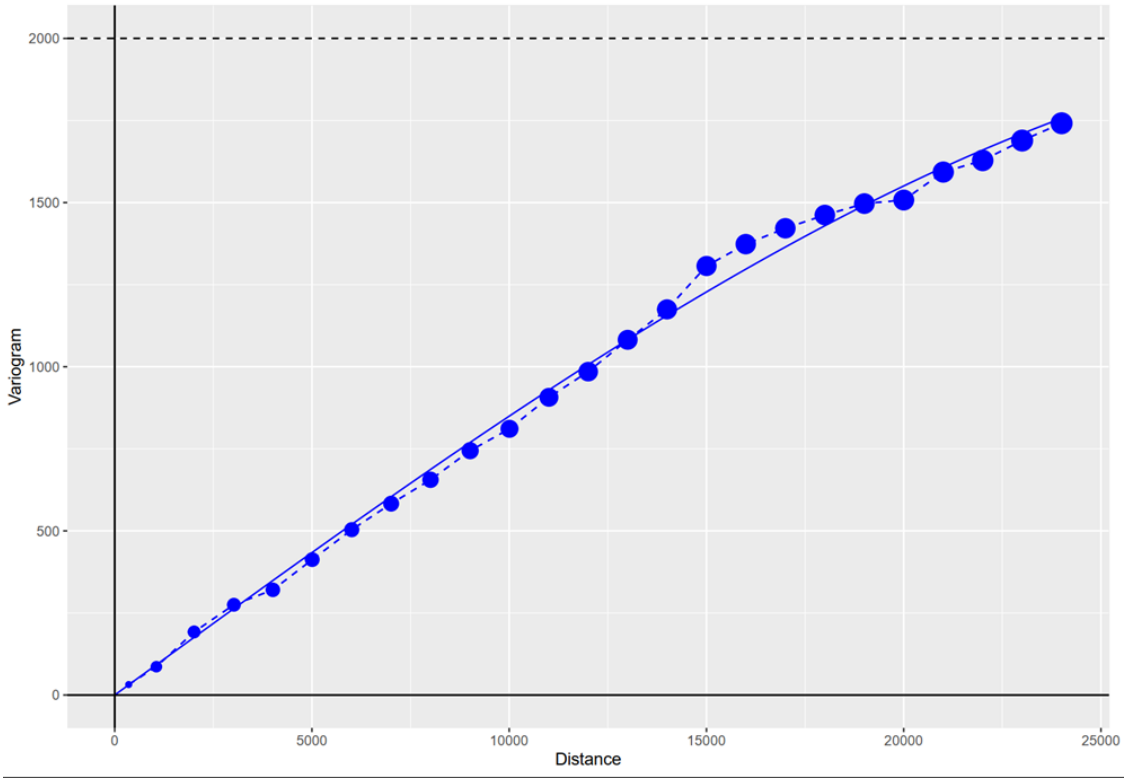
Variographie de la variable brute (niveau piézométrique) pour le jeu de données du secteur de socle



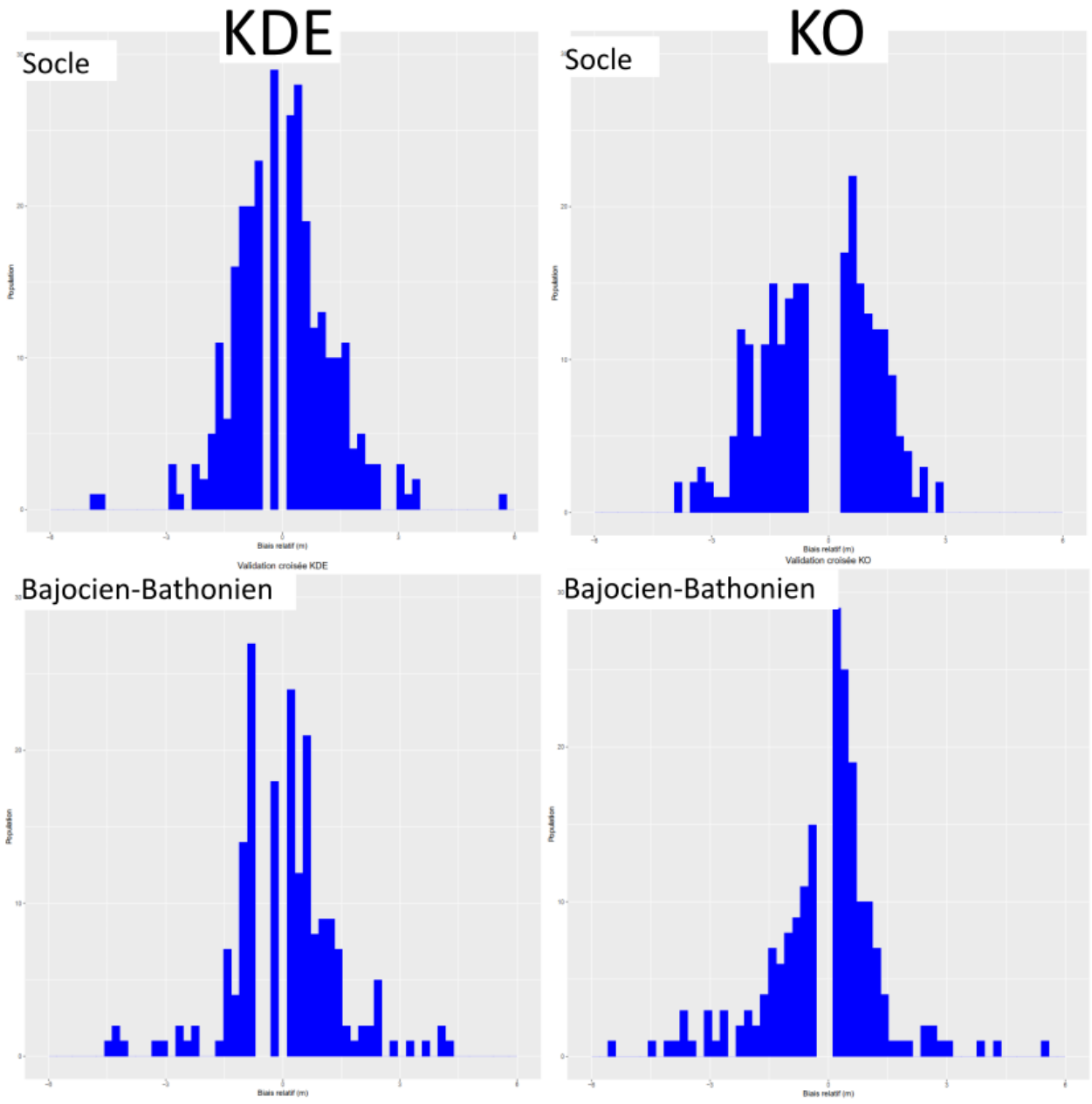
Variographie de la variable brute (niveau piézométrique) pour le jeu de données du Bajocien-Bathonien



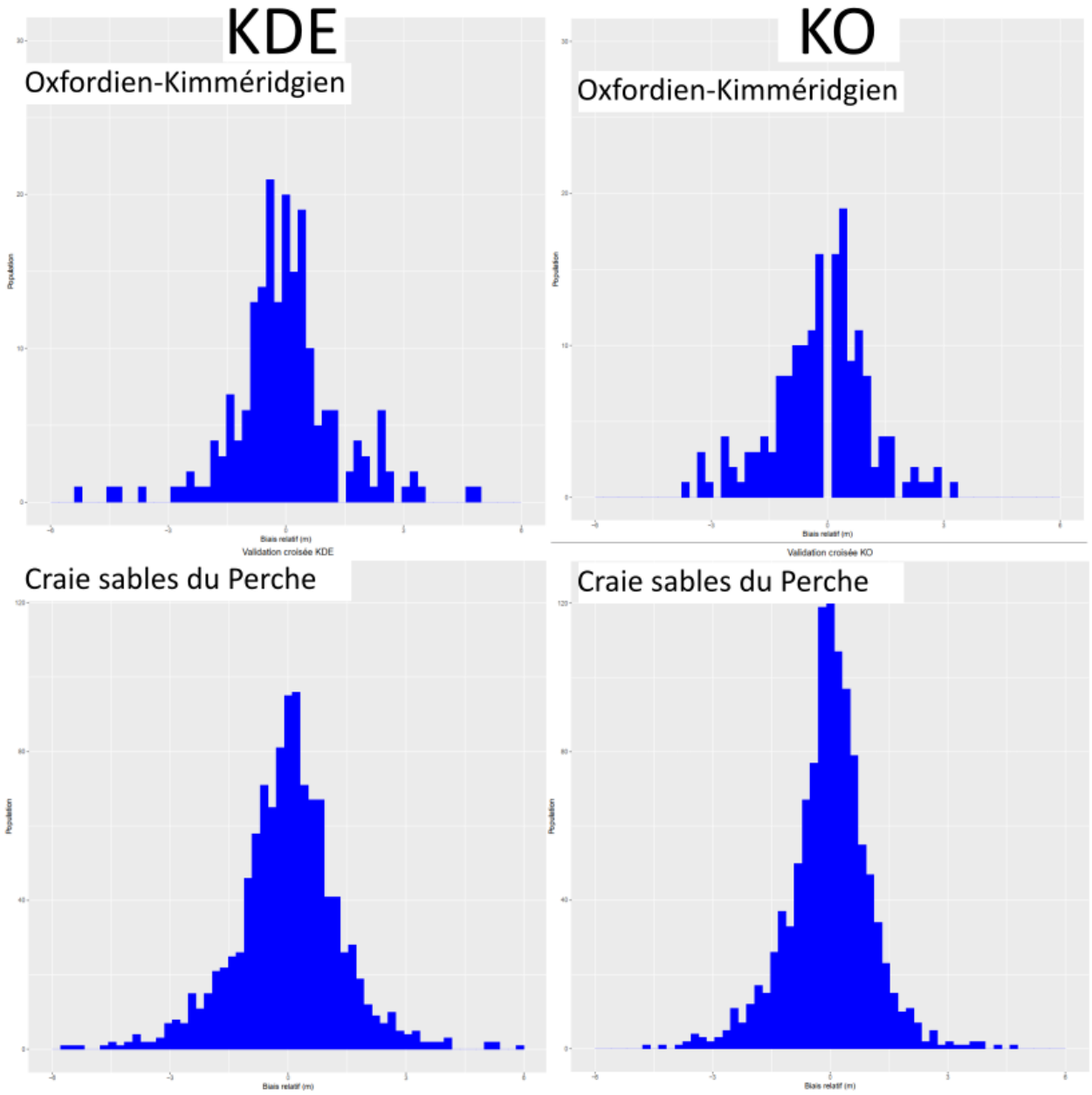
Variographie de la variable brute (niveau piézométrique) pour le jeu de données de l'Oxfordien-Kimméridgien



Variographie de la variable brute (niveau piézométrique) pour le jeu de données du secteur de la Craie et des Sables du Perche



Histogrammes des erreurs standardisées de la validation croisée pour les jeux de données du socle et du Bajocien- Bathonien



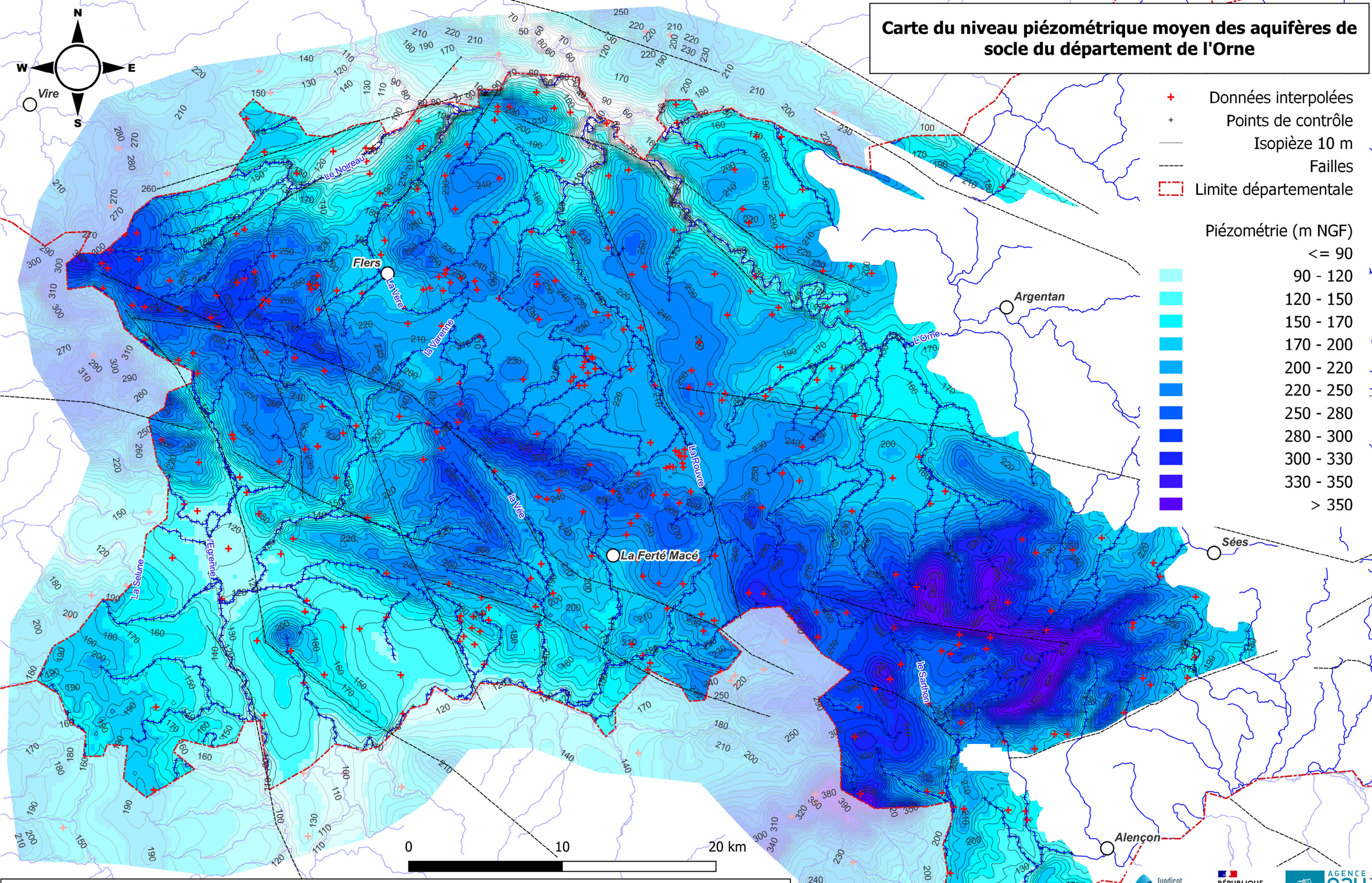
Histogrammes des erreurs standardisées de la validation croisée pour les jeux de données de l'Oxfordien-Kimméridien et de la Craie et Sables du Perche

Annexe 2 - Cartes piézométriques

4 Planches à l'échelle départementale, au format A3 :

- Piézométrie des aquifères du Domaine de Socle
- Piézométrie des formations du Bajocien-Bathonien
- Piézométrie des formations de l'Oxfordien
- Piézométrie des formations du Crétacé

Carte du niveau piézométrique moyen des aquifères de socle du département de l'Orne



Données interpolées
Points de contrôle
Isopièze 10 m
Failles
Limite départementale

Piézométrie (m NGF)
<= 90
90 - 120
120 - 150
150 - 170
170 - 200
200 - 220
220 - 250
250 - 280
280 - 300
300 - 330
330 - 350
> 350

Les données utilisées pour réaliser cette carte sont issues de différentes sources bibliographiques : banque de données du sous-sol (BSS), études à caractère hydrogéologique fournies au BRGM par le SDE61, quelques mesures réalisées en 2021 par le BRGM dans le sud-ouest du département. Il s'agit d'un ensemble de données disparates et asynchrones.

Cette carte a été réalisée à une échelle départementale, au 1/250 000e. Tout usage en dehors de cette échelle pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

Bien que les résultats aient été vérifiés et contrôlés, cette carte est produite à partir de méthodes statistiques. Les méthodes d'interpolation s'appuient principalement sur les données existantes : leur nombre et leur qualité pouvant parfois être insuffisants pour permettre une juste représentation de la situation locale.
À cet effet, l'utilisateur pourra vérifier au préalable qu'il existe bien sur sa zone d'intérêt, un nombre d'ouvrages interpolés suffisant.

Rapport RP-73813-FR
2 août 2024

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
AGENCE eau SEINE NORMANDIE
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
brgm Géosciences pour une Terre durable
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
agence de l'eau Loire-Bretagne

Carte du niveau piézométrique moyen des aquifères du Bajocien-Bathonien du département de l'Orne

N
W
E
S

Livarot
Argentan
Sées
Alençon
Mortagne-au-Perche
Bellême
Forêt de Perseigne
La Dives
L'Orne
La Touques
La Risle
L'Iton
la Sarthe
l'Huisne

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
AGENCE eau seine NORMANDIE
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
Géosciences pour une Terre durable brgm
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
agence de l'eau Loire-Bretagne

- Données interpolées
- Points de contrôle
- Isopièze 10 m
- Failles
- Limite départementale

Piézométrie (m NGF)

- <= 90
- 90 - 120
- 120 - 150
- 150 - 170
- 170 - 200
- 200 - 220
- 220 - 250
- 250 - 280
- 280 - 300
- 300 - 330
- 330 - 350
- > 350

0 10 20 km

Les données utilisées pour réaliser cette carte sont issues de différentes sources bibliographiques : banque de données du sous-sol (BSS), études à caractère hydrogéologique fournies au BRGM par le SDE61. Il s'agit d'un ensemble de données disparates et asynchrones.

Cette carte a été réalisée à une échelle départementale, au 1/150 000e. Tout usage en dehors de cette échelle pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

Bien que les résultats aient été vérifiés et contrôlés, cette carte est produite à partir de méthodes statistiques. Les méthodes d'interpolation s'appuient principalement sur les données existantes : leur nombre et leur qualité pouvant parfois être insuffisants pour permettre une juste représentation de la situation locale.
À cet effet, l'utilisateur pourra vérifier au préalable qu'il existe bien sur sa zone d'intérêt, un nombre d'ouvrages interpolés suffisant.

Rapport RP-73813-FR
2 août 2024

Carte du niveau piézométrique moyen des aquifères de l'Oxfordien-Kimméridgien du département de l'Orne

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne — RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité — AGENCE eau SEINE NORMANDIE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité — Géosciences pour une Terre durable brgm — RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité — agence de l'eau Loire-Bretagne

N W E S

Livarot

La Touques

La Dives

L'Aigle

La Risle

Sées

Alençon

la Sarthe

L'Iton

Mortagne-au-Perche

Bellême

L'Huisne

L'Eure

La-Ferté-Bernard

+ Données interpolées

+ Points de contrôle

Isopièze 10 m

Failles

Limite départementale

Piézométrie (m NGF)

- <= 90
- 90 - 120
- 120 - 150
- 150 - 170
- 170 - 200
- 200 - 220
- 220 - 250
- 250 - 280
- 280 - 300
- 300 - 330
- 330 - 350
- > 350

0 10 20 30 km

Les données utilisées pour réaliser cette carte sont issues de différentes sources bibliographiques : banque de données du sous-sol (BSS), études à caractère hydrogéologique fournies au BRGM par le SDE61. Il s'agit d'un ensemble de données disparates et asynchrones.

Cette carte a été réalisée à une échelle départementale, au 1/150 000e. Tout usage en dehors de cette échelle pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

Bien que les résultats aient été vérifiés et contrôlés, cette carte est produite à partir de méthodes statistiques. Les méthodes d'interpolation s'appuient principalement sur les données existantes : leur nombre et leur qualité pouvant parfois être insuffisants pour permettre une juste représentation de la situation locale.
À cet effet, l'utilisateur pourra vérifier au préalable qu'il existe bien sur sa zone d'intérêt, un nombre d'ouvrages interpolés suffisant.

Rapport RP-73813-FR
2 août 2024

Carte du niveau piézométrique moyen des aquifères de la Craie et des Sables du Perche du département de l'Orne

N
W
E
S

Livarot
Argentan
Sées
Alençon
Mortagne-au-Perche
L'Aigle
Bellême
La-Ferté-Bernard
Forêt de Gouffern
Forêt de Perseigne
La Touques
La Vie
La Dives
La Risle
L'Iton
L'Avre
la Sarthe
l'Huisne
L'Eure

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
AGENCE eau seine NORMANDIE
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
Géosciences pour une Terre durable brgm
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
agence de l'eau Loire-Bretagne

+ Données interpolées
+ Points de contrôle
Isopièze 10 m
Failles
Limite départementale

0 5 10 km

Piézométrie (m NGF)

<= 90
90 - 120
120 - 150
150 - 170
170 - 200
200 - 220
220 - 250
250 - 280
280 - 300
300 - 330
330 - 350
> 350

Les données utilisées pour réaliser cette carte sont issues de différentes sources bibliographiques : banque de données du sous-sol (BSS), études à caractère hydrogéologique fournies au BRGM par le SDE61. Il s'agit d'un ensemble de données disparates et asynchrones.

Cette carte a été réalisée à une échelle départementale, au 1/150 000e. Tout usage en dehors de cette échelle pourrait conduire à des erreurs de lecture, d'interprétation et d'appréciation hydrogéologique.

Bien que les résultats aient été vérifiés et contrôlés, cette carte est produite à partir de méthodes statistiques. Les méthodes d'interpolation s'appuient principalement sur les données existantes : leur nombre et leur qualité pouvant parfois être insuffisants pour permettre une juste représentation de la situation locale.
À cet effet, l'utilisateur pourra vérifier au préalable qu'il existe bien sur sa zone d'intérêt, un nombre d'ouvrages interpolés suffisant.

Rapport RP-73813-FR
2 août 2024

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
Direction régionale Normandie
7 rue Andrei Sakharov
76130 Mont Saint Aignan
Tél. : 02.32.60.12.00, mél : normandie@brgm.fr
www.brgm.fr