Document public

Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux

Rapport final

BRGM/RP-59301-FR
juin 2011

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
HAUTE-NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux

Rapport final

BRGM/RP-59301-FR
juin 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 EAU I43

B. Mougin, M. Branellec, P-Y. David, C. Zammit, B. Bourgine

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Yves BARTHELEMY	Nom : Eric GOMEZ
Date : 19/06/2011	Date : 24/06/2011

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
HAUTE-NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : atlas hydrogéologique, aquifère de la craie, eau souterraine, nappe, piézométrie hautes eaux, piézométrie basses eaux, forages, puits, piézomètres, réseau piézométrique, sources, interpolation, échelle 1/100 000, zones humides potentielles, SIG, MapInfo, ArcGis, Haute-Normandie, Seine-Maritime, Eure, France.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : MOUGIN B., BRANELLEC M., DAVID P-Y., ZAMMIT C., BOURGINE B. (2011) - Atlas hydrogéologique régional de Haute-Normandie - Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux - Rapport final - BRGM/RP-59301-FR - 102 p., 51 ill., 2 ann., 1 CD.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Des relevés piézométriques synchrones ont été réalisés sur le territoire de la région Haute-Normandie au printemps 2001 (conditions de très hautes eaux) et en automne 2006 (basses eaux) dans la nappe de la craie. Ces données ont été valorisées par le BRGM, dans le cadre contractuel de la convention de recherche et développement à coûts partagés DREAL de Haute-Normandie - BRGM du 1er octobre 2009, en élaborant des cartes piézométriques régionales et en délimitant des zones humides potentielles.

Pour établir les cartes piézométriques numériques en condition de très hautes eaux et de basses eaux sur le secteur d'étude retenu (dépassant la limite de la région Haute-Normandie, superficie de 15 100 km^2), les jeux de données des campagnes de terrain ont été densifiés en intégrant plusieurs informations :

- informations provenant des régions voisines (Basse-Normandie, Centre, Ile-de-France, et Picardie) ;
- données issues des réseaux piézométriques régionaux et départementaux ;
- relevés piézométriques de la Banque du Sous-Sol du BRGM ;
- sources issues d'un travail de numérisation de la DREAL de Haute-Normandie ;
- mesures effectuées dans le cadre de l'autosurveillance dans les Installations Classées ou Sites Pollués ;
- points issus des cours d'eau drainants et des rivières perchées ;
- points issus de corrélations inter-campagnes.

À l'issue d'un important travail d'analyse critique des données, 12 327 points étaient disponibles dans le jeu de données 2001 et 9 315 pour le jeu de données 2006. Les altitudes piézométriques de 2001 et de 2006 ont été interpolées par krigeage.

Les grilles obtenues ont subi toute une série de contrôles (comparaison avec la surface topographique, avec le mur de la craie, vérification du battement hautes eaux - basses eaux…). Suite aux tests de cohérence, la moyenne des grilles 2001 et 2006 validées a permis d'obtenir la grille de l'altitude de la surface piézométrique de moyennes eaux. Elle a elle-même servi à tracer les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie.

Un atlas hydrogéologique régional à l'échelle 1/100 000 a été créé puis imprimé en version papier en 200 exemplaires. Une notice explicative accompagne cette carte pour préciser notamment ses conditions d'usage.

Grâce aux grilles d'altitude des surfaces piézométriques 2001 et 2006, plusieurs cartes dérivées ont été réalisées : épaisseur de la zone non saturée (hautes, moyennes et basses eaux), battement inter-annuel, et épaisseur de la craie mouillée (hautes, moyennes et basses eaux).

De façon à disposer de documents d'aide à la décision sur la limite nappe de la craie / nappe alluviale (qui constitue une notion administrative pour les Services en charge de la Police de l'Eau), les zones suivantes ont été dessinées : nappe d'accompagnement du cours d'eau, limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau, limite potentielle de la nappe alluviale, et zones humides potentielles.

Toutes ces couches d'informations numériques géoréférencées, présentant un intérêt pour la gestion des eaux souterraines en Haute-Normandie, ont été rassemblées dans un CD-Rom diffusé à la DREAL en 15 exemplaires.

La DREAL souhaite que ces données puissent être prochainement intégrées au SIGES Seine-Normandie (Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines, http://sigessn.brgm.fr/).

Sommaire

1. Présentation du projet 9

2. Contexte régional (climatique, géologique et hydrogéologique)..... 11

2.1. LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE HAUTE-NORMANDIE..... 11

2.2. LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE 12

2.3. LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE..... 15

2.3.1. Description et caractéristiques de l'aquifère de la craie 15

2.3.2. Exploitation des eaux souterraines..... 17

2.3.3. Vulnérabilité des eaux souterraines..... 17

3. Réalisation de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie..... 19

3.1. ÉLABORATION DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES NUMÉRIQUES EN CONDITION DE TRÈS HAUTES EAUX (PRINTEMPS 2001) ET DE BASSES EAUX (AUTOMNE 2006) 19

3.1.1. Description des campagnes piézométriques de terrain (2001 et 2006)... 19

3.1.2. Délimitation du secteur d'étude et prise en compte de failles 22

3.1.3. Recueil, extraction et traitement des données piézométriques existantes. Densification des jeux de données. 25

3.1.4. Compilation et mise en forme des jeux de données 30

3.1.5. Utilisation de données complémentaires dans des zones pauvres en informations..... 32

3.1.6. Analyse critique des données..... 35

3.1.7. Travail d'interpolation et insertion des résultats dans un système d'information géographique (SIG)..... 37

3.1.8. Contrôle des résultats 42

3.1.9. Nettoyage graphique..... 54

3.2. CRÉATION DE L'ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL EN VERSION PAPIER (ÉCHELLE À 1/100 000) 56

3.2.1. Mise en page de l'atlas régional 56

3.2.2. Édition en 200 exemplaires 58

3.2.3. Rédaction d'une notice..... 59

3.3. PISTES D'AMÉLIORATION DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE..... 59

4. Traitements cartographiques 61

4.1. ÉLABORATION DES CARTES DÉRIVÉES 61

4.2. ÉLABORATION DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES HUMIDES POTENTIELLES EN HAUTE-NORMANDIE 69

4.2.1. Apport de l'outil IDPR 69

4.2.2. Cartographie des zones humides potentielles 72

5. Constitution d'un jeu de données numériques 75

6. Conclusions 79

7. Bibliographie 81

Liste des illustrations

Illustration 1 - Carte des précipitations moyennes interannuelles (données Météo-France - période 1971-2000 - Fichier AURELHY) 11

Illustration 2 - Localisation des mesures piézométriques de la campagne de terrain du printemps 2001 20

Illustration 3 - Localisation des mesures piézométriques de la campagne de terrain de l'automne 2006 20

Illustration 4 - Chronique piézométrique 1968-2009 du puits de Rocquemont (00773X0002/S1) et aperçu des dates des campagnes de terrain 22

Illustration 5 - Étapes de délimitation du secteur d'étude 23

Illustration 6 - Emprise du secteur d'étude (en bleu) par rapport à la région Haute-Normandie (en rouge) et aux départements (en gris) 24

Illustration 7 - Sections de rivières perchées par rapport à la surface piézométrique (surlignées en orange) (Roux J.-C. et al. 2006) 29

Illustration 8 - Localisation des six secteurs de rivières perchées retenus (en rose) 29

Illustration 9 - Origine des données piézométriques rassemblées avant le travail d'analyse critique des données 30

Illustration 10 - Mesures piézométriques disponibles au printemps 2001 31

Illustration 11 - Mesures piézométriques disponibles à l'automne 2006 31

Illustration 12 - Corrélation entre cotes piézométriques de très hautes eaux 2001 et de basses eaux 2006 33

Illustration 13 - Points ajoutés (en rouge) au jeu de données du printemps 2001 (petits points bleus) à partir d'une mesure 2006 34

Illustration 14 - Points ajoutés (en bleu) au jeu de données de l'automne 2006 (petits points rouges) à partir d'une mesure 2001 34

Illustration 15 - Origine des données retenues pour les piézométries 2001 et 2006.....38

Illustration 16 - Impact d'un point de contrainte sur le rendu de la grille interpolée (image de gauche avant insertion du point, image de droite après insertion) 39

Illustration 17 - Altitude de la piézométrie de très hautes eaux (2001).....40

Illustration 18 - Écart-type du krigeage de l'altitude de la piézométrie de très hautes eaux (2001) 40

Illustration 19 - Altitude de la piézométrie de basses eaux (2006) 41

Illustration 20 - Écart-type de krigeage de l'altitude de la piézométrie de basses eaux (2006) 41

Illustration 21 - Courbes isohypses du mur de la craie (rapport BRGM/RP-52989-FR, 2004)....43

Illustration 22 - Altitude du mur de la craie interpolée sous forme d'une grille 43

Illustration 23 - Secteurs problématiques où la surface piézométrique calculée pour 2001 est en-dessous de celle de 2006 (en rouge clair (la différence Z2001-Z2006 varie de -10 à 0 m) et en rouge foncé (-16 à 10 m)). Les secteurs en vert sont cohérents.....45

Illustration 24 - Zoom sur le secteur problématique entre les rivières de l'Eaulne et l'Arques en Seine-Maritime 46

Illustration 25 - Localisation des secteurs où la surface piézométrique calculée se situe au-dessus de la topographie (en rouge) 47

Illustration 26 - Secteurs problématiques où la surface piézométrique calculée pour 2006 se situe sous le mur de la craie (en rouge, la différence Z2006-Zmur varie de -74 à 0 m). Les secteurs en bleu sont cohérents. En vert, les courbes isohypses du mur de la craie. 49

Illustration 27 - Piézométrie de « moyennes eaux » (moyenne entre 2001 et 2006) 50

Illustration 28 - Superposition des anciennes isopièzes de moyennes eaux (en rouge) avec celles établies dans le cadre de cette étude (en noir). Les limites départementales sont en marron. 51

Illustration 29 - Exemples de courbure des isopièzes en 1990 (en rouge) à proximité des petits thalwegs (courbures moins marquées en 2011, en noir) 53

Illustration 30 - Correction des isopièzes moyennes eaux dans le secteur Eaulne-Arques.....54

Illustration 31 - Étapes du nettoyage graphique et du lissage des isopièzes moyennes eaux de la craie.....55

Illustration 32 - Écart-type de krigeage de la piézométrie de moyennes eaux (maxima de 2001 et 2006) 56

Illustration 33 - Localisation des bassins versants souterrains digitalisés (en vert les sous-bassins versants) 57

Illustration 34 - Extrait de la carte (échelle à 1/100 000) de l'atlas hydrogéologique régional 58

Illustration 35 - Épaisseur de la zone non saturée en période de très hautes eaux (2001) 63

Illustration 36 - Épaisseur de la zone non saturée en période de basses eaux (2006).....63

Illustration 37 - Épaisseur de la zone non saturée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006).....64

Illustration 38 - Épaisseur du battement inter-annuel (altitude 2001 - altitude 2006) 64

Illustration 39 - Épaisseur de craie mouillée en période de très hautes eaux (2001) 65

Illustration 40 - Épaisseur de craie mouillée en période de basses eaux (2006)..... 65

Illustration 41 - Épaisseur de craie mouillée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)..... 66

Illustration 42 - Localisation des zones dites « nappe d'accompagnement du cours d'eau » (en bleu) et « limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau » (en orange), sur fond d'alluvions (en gris)..... 68

Illustration 43 - Principe de construction de l'IDPR 70

Illustration 44 - IDPR calculé sur le secteur d'étude (version 2007) 71

Illustration 45 - Valeurs de l'IDPR..... 71

Illustration 46 - Cartographie des zones humides potentielles du secteur d'étude 72

Illustration 47 - Cartographie des zones humides définies par l'AESN en avril 2006 sur le secteur d'étude 73

Illustration 48 - Superposition des zones humides de l'AESN d'avril 2006 (en jaune) sur celles issues de l'outil IDPR (en rose) 74

Illustration 49 - Liste des documents SIG (sous forme de polygones) mis à disposition dans le CD-Rom du projet 75

Illustration 50 - Liste des documents SIG (sous forme de grilles) mis à disposition dans le CD-Rom du projet..... 76

Illustration 51 - Visualisation de la version interactive de la carte de synthèse à 1/100 000. Enlèvement de l'affichage des bétoires sur la carte (on décoche l'œil sous le cercle rouge)..... 77

Liste des annexes

Annexe 1 - Interpolation par la géostatistique - Description du krigeage..... 83

Annexe 2 - Notice explicative de la carte poster à 1/100 000 93

Annexe 3 - CD-Rom rassemblant les données du projet 101

1. Présentation du projet

Des relevés piézométriques synchrones ont été réalisés sur le territoire de la région Haute-Normandie au printemps 2001 (conditions de très hautes eaux) et en automne 2006 (basses eaux) dans la nappe de la craie. Ces données restaient à valoriser par l'élaboration de cartes piézométriques régionales et par la délimitation des zones humides potentielles.

Cette valorisation a été réalisée dans le cadre contractuel de la convention de recherche et développement à coûts partagés DREAL de Haute-Normandie – BRGM du 1er octobre 2009.

Comme décidé en accord avec la DREAL de Haute-Normandie, l'étude se décompose en trois volets :

- volet 1 : réalisation de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie :
    - tâche 1 : élaboration de cartes piézométriques numériques en condition de très hautes eaux et de basses eaux ;
    - tâche 2 : création de l'atlas hydrogéologique régional en version papier (échelle 1/100 000).
- volet 2 : traitements cartographiques :
    - tâche 1 : élaboration des cartes dérivées ;
    - tâche 2 : élaboration de la cartographie des zones humides potentielles en Haute-Normandie.
- volet 3 : constitution d'un jeu de données numériques aux formats MapInfo et ArcGis (mise à disposition de différentes couches SIG[1] présentant un intérêt pour la gestion des eaux souterraines).

Ce rapport reprend les 3 volets du projet et débute par un rappel du contexte régional de la Haute-Normandie (climatique, géologique et hydrogéologique).

Ce projet a fait l'objet d'un suivi par un Comité de pilotage composé de représentants : de la DREAL de Haute-Normandie, du BRGM SGR Haute-Normandie, de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, de l'Hydrogéologue agréé coordinateur de la Seine-Maritime, et du Conseil Général de l'Eure. Ce Comité s'est réuni deux fois les 9 juillet et 4 novembre 2010.

Le projet initialement prévu sur 11 mois (jusqu'au 1er septembre 2010) a finalement duré 18 mois et s'est achevé en mars 2011. Ce prolongement a été validé par la DREAL de Haute-Normandie à l'issue du Comité de pilotage du 4 novembre 2010.

[1] SIG : Système d'Information Géographique

2. Contexte régional (climatique, géologique et hydrogéologique)

2.1. LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE HAUTE-NORMANDIE

Les précipitations moyennes interannuelles varient entre 574 et 1075 mm sur la région (source : Météo-France, moyenne 1971-2000, fichier AURELHY ; cf. Illustration 1). Le secteur le plus arrosé est situé à l'Ouest de la Seine-Maritime sur le Pays de Caux vers Goderville et le secteur le moins arrosé est localisé au Sud-Est de l'Eure.

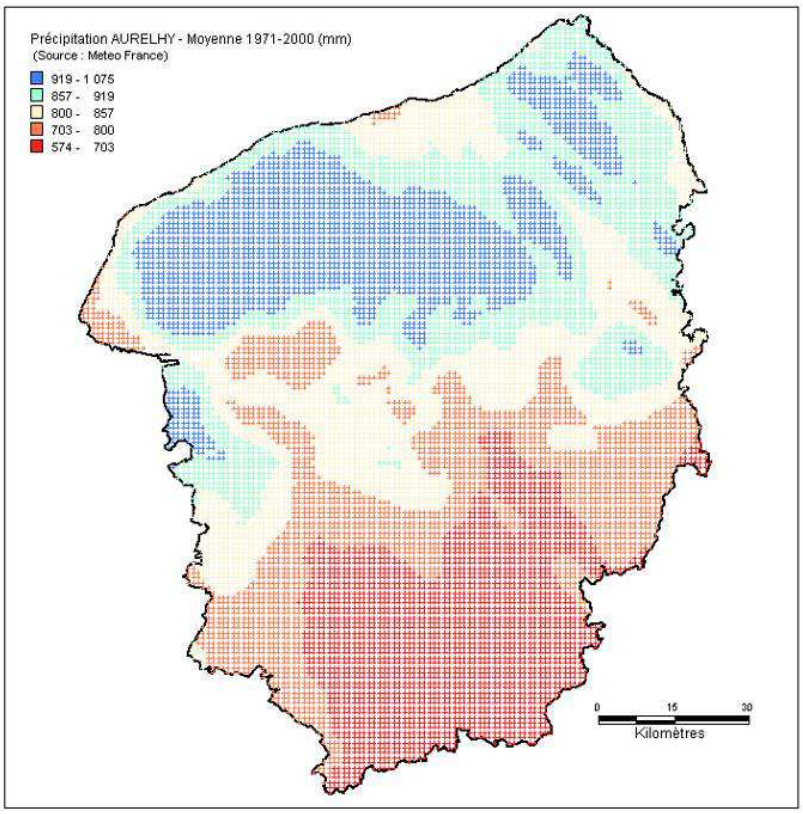


Illustration 1 - Carte des précipitations moyennes interannuelles (données Météo-France - période 1971-2000 - Fichier AURELHY)

Les précipitations efficaces moyennes interannuelles suivent la même répartition géographique et évoluent entre 100 et 400 mm.

En général, la période de recharge des aquifères s'étend de novembre à mars et celle de la vidange d'avril à octobre.

2.2. LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

L'aquifère crayeux en Haute-Normandie constitue le principal aquifère de la région. Les deux autres réservoirs, qui sont les *Calcaires et les Sables de l'Éocène* sur le plateau de Madrie et les *Sables Verts de l'Albien*, sont très peu utilisés du fait, respectivement, d'une faible capacité de production et d'une assez grande profondeur (120 à 200 m). Le premier contient une nappe libre, le second une nappe captive.

L'aquifère de la craie, formée par une puissante assise crayeuse (> 100 mètres), repose sur les formations de l'Albien (Crétacé Inférieur : Sables verts, Argiles du Gault et Gaize affleurant dans le Pays de Bray). La série crayeuse affleure très largement sur la région sauf au niveau de la boutonnière du Pays de Bray (Crétacé Inférieur et Jurassique Moyen). Elle est recouverte par une formation résiduelle à Silex (Argiles à silex), produit de décalcification de la craie (altération lors de ses phases d'exondation), et par des sables du Paléocène.

La surface de l'aquifère crayeux atteint 12.000 km^2 environ, auxquels il faut soustraire 430 km^2 (Pays de Bray, estuaire de la Seine, plateau de Madrie). Ses limites sont constituées par 370 km de limites à potentiel constant (Manche, Bresle, Epte, Eure, Avre) ; à l'Ouest, l'aquifère se prolonge sur le versant oriental de la vallée de la Touques qui constitue une limite d'affleurement.

L'épaisseur de l'aquifère (zone saturée et non saturée), exceptés les effets plus ou moins locaux des accidents structuraux, passe d'une cinquantaine de mètres au SW de la région (limite départementale Eure-Calvados-Orne) à plus de 200 mètres dans la majorité du territoire, pour atteindre une valeur maximale supérieure à 300 mètres dans le Vexin. L'ensemble de ces valeurs est réduit par les effets de l'érosion en vallées.

La formation géologique concernée par la carte piézométrique est celle de la craie du Sénonien, Turonien et Cénomanien (du plus récent au plus ancien). La série stratigraphique appartient au système du Crétacé Supérieur ; elle offre une grande diversité de faciès. Concrètement, les cuttings des forages montrent de fortes variations lithologiques, avec des séquences de bancs donnant des débris très durs, de la craie molle ou des galets de craie durcie englobés dans une matrice pâteuse.

Cénomanien

Au Cénomanien Inférieur, les faciès transgressifs se répartissent globalement selon une polarité Ouest-Est guidée par la présence de la bordure du Massif Armoricain émergeant à faible distance vers l'Ouest. On retrouve des sables (Sables du Perche), puis des craies sableuses et glauconieuses à l'Ouest, dans l'Eure, et des dépôts plus franchement crayeux ailleurs.

Au Cénomanien Moyen à Supérieur, la transgression se poursuit. La polarité Ouest-Est antérieure s'estompe et un faciès pélagique franchement crayeux homogène, sans influence continentale notable, se généralise. La fin du Cénomanien coïncide avec la culmination de la transgression. La craie franche laisse place à une craie légèrement

argileuse à passées noduleuses et glauconieuses, voire à des marnes crayeuses, sans silex.

Turonien

Un hard-ground régional (Antifer n°3) séparerait la craie cénomanienne de la craie turonienne. La craie turonienne affleure sur les versants de la plupart des grandes vallées, et notamment celle de la Seine. Sur les plateaux, elle est systématiquement masquée par les formations superficielles. Trois faciès se distinguent au Turonien :

- Turonien Inférieur : la *Craie marneuse à Inoceramus labiatus*, contrairement à ce que laisse supposer son qualificatif, est très carbonatée, (80 à 90% de $CaCO_3$). Elle est homogène, en gros bancs d'épaisseur métrique, et généralement dépourvue de silex ;
- Turonien Moyen : la *Craie de Maromme* est bien représentée dans les affleurements du Lieuvin et du Roumois. C'est une craie blanche tendre, en gros bancs à litage fruste, à rares lits de silex, se terminant localement par deux hard-ground noduleux bioturbés à galets (dénommés Tilleul n^{os}1 et 2). Elle est parfois nommée craie à Conulus subrotondus ;
- Turonien Supérieur : la *Craie de Blosseville-Bonsecours* possède un caractère légèrement régressif. Elle est assez grossière, coquillière, à lits de silex noirs. Vers le sommet, elle admet des niveaux dolomitiques, ainsi qu'un faisceau de hard-grounds associés à une structure noduleuse.

Sénonien

C'est sous le recouvrement Tertiaire, que la série crayeuse sénonienne (Coniacien, Santonien et Campanien) est la plus complète. En dehors de ce domaine, elle est tronquée par les altérations et érosions post-crétacées.

Après un court épisode régressif à la base, les faciès de craie se généralisent, dans un contexte de sédimentation relativement dynamique. À l'aplomb de haut-fonds localisés s'édifient des bioaccumulations de bryozoaires et se produisent des concentrations magnésiennes.

Les **craies coniaciennes** s'organisent en deux formations successives, qui sont, de la base au sommet :

- la *Craie de Saint-Étienne-du-Rouvray*, craie dolomitique dure, jaunâtre, en bancs épais, à lits de silex, et à pigments noirs d'oxydes de manganèse (d'où l'appellation de Craie poivrée qui lui est parfois attribuée). Sa partie basale est parfois individualisée sous la dénomination de *Craie à Micraster normanniae*, qui pourrait encore appartenir au Turonien terminal ;
- la *Craie de Quevilly* est une craie blanche assez grossière, en bancs épais séparés par des lits de silex.

Les **craies strictement santoniennes**, dont l'épaisseur peut dépasser 80 mètres du Pays de Caux au Pays d'Ouche, se répartissent en trois formations qui sont, de la base au sommet :

- La *Craie d'Orival,* série crayeuse de la transition Coniacien-Santonien. Il s'agit d'une craie blanche grossière, granuleuse, à bryozoaires, à lits de silex zonés et niveaux phosphatés. Son épaisseur varie de 40 à 70 mètres. Elle est parfois désignée sous différentes appellations locales équivalentes : *Craie de Moulineaux*, *Craie à Silex zonés*, *Craie à bryozoaires* et *Craie à Micraster intermedius*. Elle correspond à la partie inférieure de la « Craie à *Micraster coranguinum* », dont les parties médiane et supérieure, strictement santoniennes, sont représentées respectivement par la *Craie de Canteleu* et la *Craie de Belbeuf* (cf. ci-dessous) ;
- La *Craie de Canteleu*, craie fine, blanche, à nombreux silex noirs. Son épaisseur avoisine 30 mètres ;
- La *Craie de Belbeuf* est une craie fine, tendre, blanche, traçante, à nombreux silex noirs et quelques ébauches de hard-grounds. Son épaisseur, résiduelle sous les argiles à silex, est de l'ordre de 20 à 30 mètres.

La **série crayeuse campanienne** comporte également deux formations successives, de la base au sommet :

- La *Craie de St-Pierre-les-Elbeuf*, tendre et fine, blanc-crème, traçante, à rares silex noirs. À l'affleurement, son épaisseur résiduelle et tronquée par les argiles à silex est de 10 à 15 mètres ;
- La *Craie d'Ailly*, blanche à silex noirs, épaisse d'une dizaine de mètres.

En raison de leur relative homogénéité de couleur, les craies sénoniennes sont parfois désignées de manière globale sous le terme de ***Craie blanche***. Il s'agit cependant d'un emploi commode mais contestable car cette appellation est spécifiquement réservée au Sénonien du Nord du bassin de Paris.

Les principaux accidents structuraux qui affectent le sous-sol crayeux sont : l'anticlinal de Bray, la faille de la Seine NW-SE (évènement important et ancien à l'échelle du Bassin de Paris), la faille de Lillebonne à Fécamp, l'anticlinal de Bourgtheroulde et son compartiment axial effondré, et la faille de Pont-Authou à Cormeilles. Les assises du Vexin sont affectées par de nombreuses ondulations anticlinales et synclinales qui se prolongent vers le Nord-Ouest et provoquent une certaine fissuration du milieu.

Ces accidents tectoniques sont orientés selon la direction Armoricaine (NNW-SSE ou NW-SE). Les structures plissées témoignent du rejet de vieilles structures hercyniennes depuis la fin du Crétacé jusqu'au Quaternaire.

Par ailleurs, on suppose l'existence d'une flexure au niveau de la vallée de l'Eure et d'accidents orientés NW-SE au Neubourg et à Saint-André-de-l'Eure (masqués par la

couverture des formations superficielles dans des secteurs où les sondages géologiques sont rares), responsables de l'approfondissement de la nappe vers la rivière Eure.

De nombreux autres accidents géologiques, connus et répertoriés sur les cartes géologiques ou estimés probables par une argumentation hydrogéologique ou morphologique, affectent l'aquifère.

La texture de la craie est modifiée par ces phénomènes : en effet, à chaque fois que les levés cartographiques ou des études ont pu mettre en évidence un accident géologique, une zone de fissuration et souvent de circulation rapide des eaux souterraines a été constatée.

2.3. LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

2.3.1. Description et caractéristiques de l'aquifère de la craie

Sur le plan hydrogéologique, la craie a une faible perméabilité intrinsèque. Elle ne contient de l'eau mobilisable que lorsqu'elle est fracturée, condition rencontrée le long des failles géologiques et sur les bombements anticlinaux, ou qu'elle est altérée sous les plaines alluviales des grands cours d'eau.

L'aquifère de la craie est caractérisé par l'existence d'une triple porosité (une porosité de matrice, de fracture et de conduits) telle que décrite ci-dessous :

- la porosité matricielle inter-granulaire a une fonction capacitive conséquente de 15 à 45% selon les horizons lithologiques et les auteurs ; cependant la porosité efficace reste faible ; les valeurs de conductivité hydraulique ou perméabilité sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6} m/s. Ces valeurs conduisent à des vitesses de transport dans le milieu souterrain de l'ordre du mètre par an ;
- la porosité de fracture, selon l'importance de la fracturation et des processus de dissolution qui peuvent les affecter, conduit à des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} m/s à 10^{-6} m/s, soit des vitesses de transfert de l'ordre de quelques mètres par mois. Cette porosité est associée à la fonction de stockage temporaire dans les formations superficielles ; elle pourrait expliquer le retard de la recharge de l'aquifère comme l'atteste les variations piézométriques au cours d'un cycle hydrologique. Cette porosité peut ainsi jouer un rôle dans la fonction capacitive de l'aquifère, mais exerce surtout un rôle primordial dans la fonction transmissive de l'aquifère et dans l'organisation des gradients hydrauliques ;
- la porosité de conduits karstiques peut, localement (selon des connexions actives avec les bétoires), assurer des vitesses de transfert (depuis un point d'infiltration préférentiel à l'exutoire du système karstique) pouvant atteindre et dépasser 100 m/h. Les perméabilités associées sont de l'ordre de 10^{-1} m/s à 10^{-3} m/s. La porosité de conduits n'a qu'un rôle transmissif dans les transferts rapides. Ce rôle reste en partie contrôlé par les gradients hydrauliques hérités de la porosité de

fracture et le contexte structural régional ; son importance et les vitesses de transfert qui en découlent exercent aussi un rôle primordial sur la vulnérabilité des ressources exploitées.

Partout où affleure le Crétacé Supérieur, la nappe est libre, l'alimentation s'effectue par les pluies efficaces que n'arrêtent pas les recouvrements limoneux et la couverture d'argiles à silex, lacunaire le long de thalwegs et percée en de multiples lieux (bétoires). La recharge de la nappe s'effectue donc en deux temps, presqu'immédiatement après les pluies en vallées et par le jeu des bétoires, plusieurs semaines ou mois plus tard sous les plateaux. Cet étalement amortit les alternances de périodes sèches et humides et régularise le débit de la nappe.

Après avoir atteint la zone non saturée (ZNS) de la craie, les eaux s'écoulent vers les exutoires de la nappe. La vitesse d'écoulement est très variable selon la perméabilité du réservoir. Contrairement au karst qui se développe dans la craie non saturée, le karst noyé n'est pas facilement explorable. Son étude est faite sur la base d'expériences de traçages. Plusieurs expériences se sont révélées positives et elles sont reportées sur la carte à 1/100 000.

Après avoir convergé des plateaux vers les vallées sèches et humides, les eaux de la nappe de la craie alimentent la nappe alluviale et le cours d'eau qui la draine.

La surface piézométrique de la nappe de la craie épouse fortement la morphologie du sol qui, elle, dépend en partie de la répartition de la fissuration de la craie. Elle forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère, peu fissuré, a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive (vallées humides et sèches, réseaux « karstiques »).

Les vallées qui entament les formations de surface constituent des axes de drainage de cette nappe, et la présence de nombreuses sources sur les flancs de ces vallées constituent les phénomènes visibles de cette drainance.

Les sources importantes sur le territoire régional (débit et répartition géographique) sont également l'indice de l'existence des réseaux karstiques. On peut citer les plus importantes : sources d'Yport (1.5 m^3/s), de Bonneville sur Iton (1250 l/s), de Hondouville (1180 l/s)…

Les fluctuations de la nappe sont de plusieurs types : elles comportent des variations annuelles et interannuelles du fait de la fonction à la fois capacitive et conductrice de l'aquifère selon les secteurs.

2.3.2. Exploitation des eaux souterraines

Du point de vue ressource, la nappe de la craie est fortement sollicitée pour tous les usages (agriculture, eau potable...), car elle constitue souvent l'unique ressource économiquement exploitable.

La quasi-totalité des besoins en eau potable de la région est satisfaite à partir des eaux souterraines prélevées dans la nappe de la craie. Les autres aquifères exploités (ou ayant été exploités) sont les Sables de l'Albien et les formations du Tertiaire (sables et calcaires). Les alluvions de la vallée de la Seine sont quant à elles très utilisées par l'industrie.

2.3.3. Vulnérabilité des eaux souterraines

Là où la nappe de la craie est libre, les puits traditionnels sont nombreux et, de par leur conception, ils peuvent contribuer au transfert des eaux superficielles polluées vers la nappe. Plusieurs captages d'eau potable ont ainsi été abandonnés en raison de la mauvaise qualité de l'eau et de l'impossibilité de les protéger efficacement.

Le karst haut normand[2] génère en surface des effondrements naturels[3] qui constituent des points d'engouffrement des eaux superficielles vers la nappe phréatique de la craie, sans filtration naturelle par le sol. Le karst de la craie est à l'origine de la turbidité : la qualité des eaux souterraines en Haute-Normandie est soumise à de fortes contraintes liées aux phénomènes d'érosion des sols sur les plateaux ainsi qu'au système d'écoulement souterrain des eaux de pluie qui s'engouffrent dans ces pertes karstiques (bétoires), traversent la craie en partie dans des conduits naturels à écoulement rapide (karst) avant de ressortir aux exutoires ou dans les forages (notamment AEP). Les données de l'inventaire du karst de Haute-Normandie sont consultables sur le SIGES Seine Normandie (http://sigessn.brgm.fr/).

La vulnérabilité de la nappe de la craie est donc très variable d'un point à un autre de la région ; elle doit être définie localement par la prise en compte de l'ensemble des conditions naturelles favorables (recouvrement, nappe profonde, terrains de surface peu perméables, vitesse d'écoulement lente, lit de cours d'eau colmaté…) et défavorables (bétoires, puits de marnières, nappe subaffleurante, craie fissurée, pertes en cours d'eau…).

---

[2] le « karst de la craie » abrite des écoulements dans des fissures élargies au sein du calcaire, voire de véritables réseaux pénétrables par des spéléologues.

[3] différents par essence des effondrements de « marnières », d'origine anthropique.

3. Réalisation de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie

3.1. ÉLABORATION DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES NUMÉRIQUES EN CONDITION DE TRÈS HAUTES EAUX (PRINTEMPS 2001) ET DE BASSES EAUX (AUTOMNE 2006)

3.1.1. Description des campagnes piézométriques de terrain (2001 et 2006)

Campagne piézométrique du printemps 2001

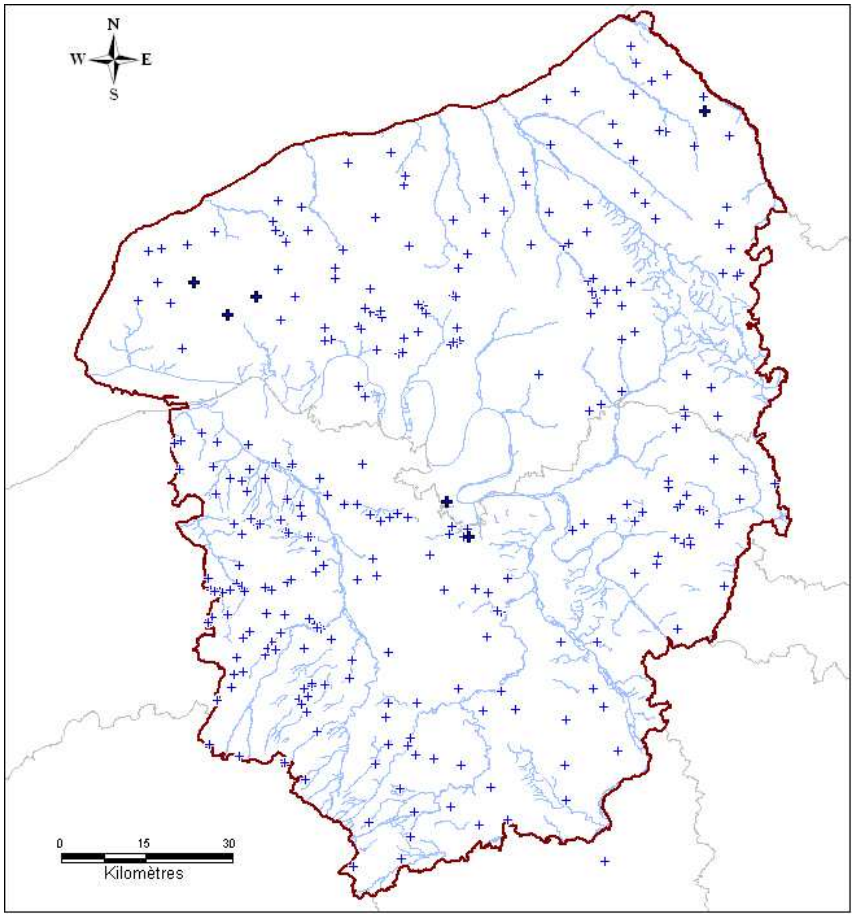
Les informations de ce paragraphe proviennent du rapport BRGM/RP-51153-FR de septembre 2001.

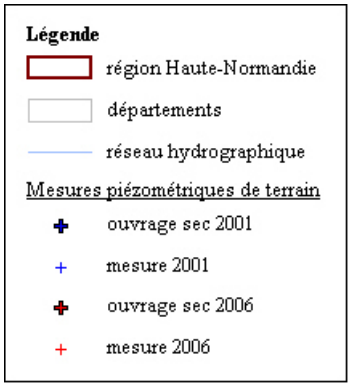
À la demande de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le BRGM Haute-Normandie a coordonné un ensemble de relevés piézométriques en Haute-Normandie qui ont été réalisés durant 1,5 mois, du 13 mai au 26 juin 2001. Au vu du caractère exceptionnel des niveaux d'eau dans l'aquifère de la craie (situation de très hautes eaux), l'objectif était d'enregistrer et garder en mémoire un nombre de mesures suffisant pour disposer dans le futur de valeurs extrêmes pour la région.

L'exhaustivité des mesures dans une zone n'a pas été recherchée, mais plutôt un maillage indicatif sur toute la région, correspondant approximativement à une donnée récupérée par 1/8e de carte géologique. Considérant qu'il est toujours possible, avec une marge d'erreur maitrisée, de calculer par modélisation une valeur piézométrique aval à partir d'une mesure piézométrique effectuée en amont, priorité a été donnée aux zones amont des aquifères régionaux (hauts thalwegs et puits sur les plateaux).

Les mesures de terrain ont été confiées à deux sous-traitants : T. Leboulanger (ingénieur hydrogéologue, coordinateur des mesures) et C. Lorain (technicien ABSYS). Deux GPS différents ont été employés : un Garmin fournissant une donnée de positionnement valide à ± 5 m près et un Magellan fournissant des données à ± 20 m.

À la suite de ce travail de terrain, le BRGM a isolé 368 mesures et 6 puits secs (cf. Illustration 2). Ce travail a été considéré comme imparfait compte-tenu de l'urgence dans laquelle il a été réalisé (effectuer le plus de mesures possibles en un délai le plus court possible). Il est mentionné dans le rapport BRGM/RP-51153-FR une répartition inégale des données mesurées (cf. Illustration 2).





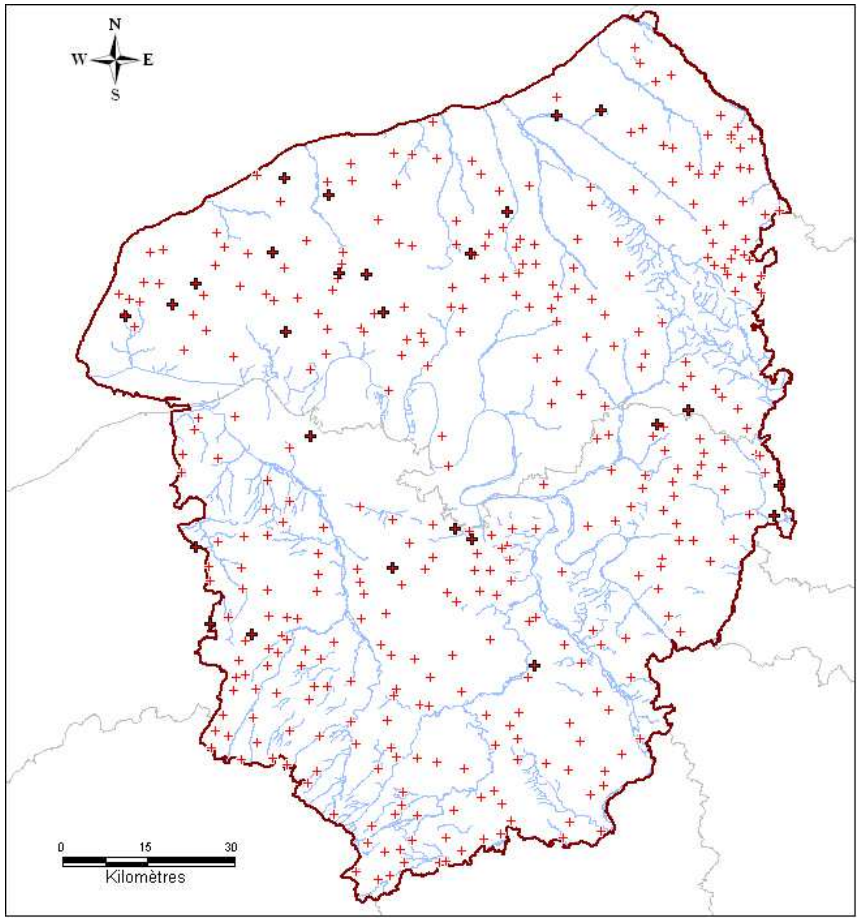


Illustration 2 - Localisation des mesures piézométriques de la campagne de terrain du printemps 2001

Illustration 3 - Localisation des mesures piézométriques de la campagne de terrain de l'automne 2006

Campagne piézométrique de l'automne 2006

Les informations de ce paragraphe proviennent du rapport BRGM/RP-55028-FR de novembre 2006.

La DIREN de Haute-Normandie et le BRGM se sont associés pour le financement et la réalisation d'une campagne de mesures piézométriques de la nappe libre de la craie en Haute-Normandie. La campagne de mesures a été menée durant environ 1 mois, du 26 septembre au 20 octobre 2006, pour obtenir un jeu de données synchrones représentatif d'un étiage sévère de la nappe de la craie (situation de basses eaux).

La convention passée entre la DIREN et le BRGM était basée sur un objectif de 400 points d'eau mesurés pour 500 à 600 points visités.

Les mesures ont été confiées sur le terrain à 3 agents du BRGM qui ont visité 750 points d'eau. En termes de points visités, les objectifs ont largement été atteints ; malheureusement, compte tenu du très grand nombre de puits inaccessibles dans la région (puits ou forages comblés, condamnés, propriétés inaccessibles…), les 400 mesures n'ont pu être réalisées.

Cependant, la campagne de terrain a permis de collecter 388 niveaux piézométriques dans la nappe de la craie, dont 26 puits secs (cf. Illustration 3). La fiabilité de quelques données est mise en doute (points influencés, présence d'une nappe perchée, puits effondrés…). Il est également mentionné dans le rapport BRGM/RP-55028-FR une répartition assez homogène des données mesurées (cf. Illustration 3), malgré le peu d'accès à la craie sous le Tertiaire (Nord-Est de l'Eure).

Contextes des périodes de mesure 2001 et 2006

Le puits de Rocquemont (00773X0002/S1) est situé en Seine-Maritime ; il constitue l'un des plus anciens points de mesure du « réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de la région Haute-Normandie » (RRESOUPHNO, code SANDRE 0300000163), puisque le suivi piézométrique a débuté le 26/01/1968 (cf. Illustration 4). Il s'agit d'un ouvrage de 46.65 m de profondeur dont le repère est à +0.95 m/sol. L'Illustration 4 permet de montrer que la campagne du printemps 2001 a bien été réalisée lors des plus hautes eaux connues depuis 1968, tandis que celle d'automne 2006 s'est déroulée durant une période de basses eaux.

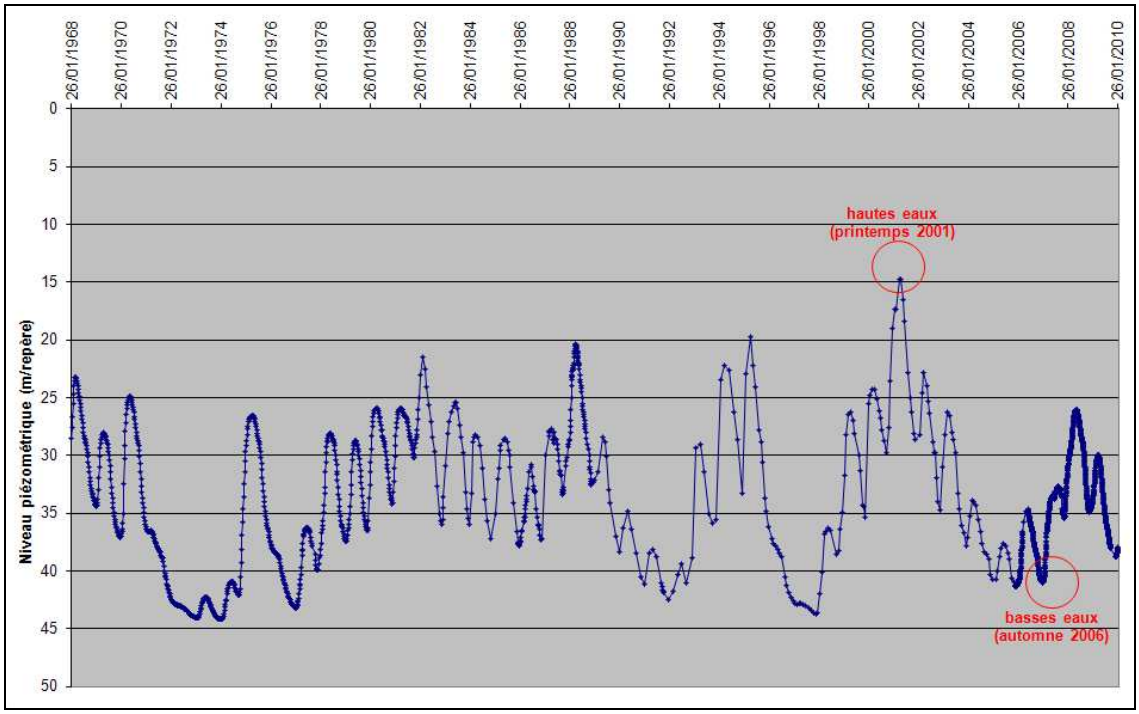


Illustration 4 - Chronique piézométrique 1968-2009 du puits de Rocquemont (00773X0002/S1) et aperçu des dates des campagnes de terrain

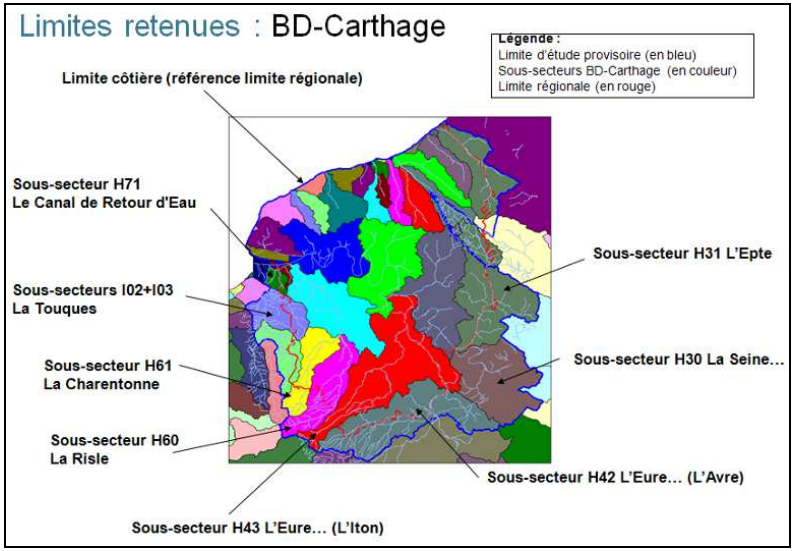
3.1.2. Délimitation du secteur d'étude et prise en compte de failles

Secteur d'étude

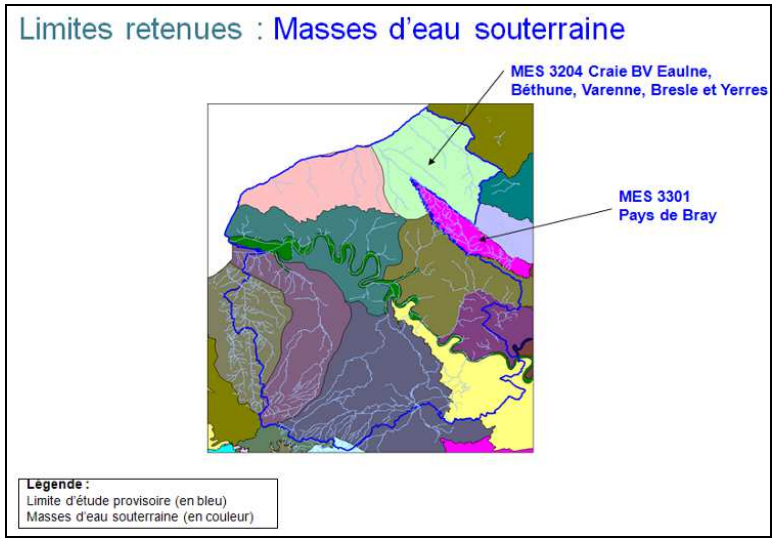
Dans le cahier des charges de l'étude, la DREAL de Haute-Normandie a souhaité ne pas arrêter le tracé des cartes piézométriques numériques aux limites administratives de la région. Le contour régional a donc été agrandi de façon à intégrer les vallées suivantes : Bresle, Iton amont, Charentonne, Avre, Risle, Touques, Epte et une partie de l'Eure-et-Loir.

Le secteur d'étude a été délimité en s'appuyant sur les sous-secteurs de BD-Carthage, les masses d'eau souterraines, la géologie à 1/1 000 000 (pour isoler les zones où la nappe de la craie n'existe pas) et les SAGE Risle-Charentonne et Iton (cf. Illustration 5).

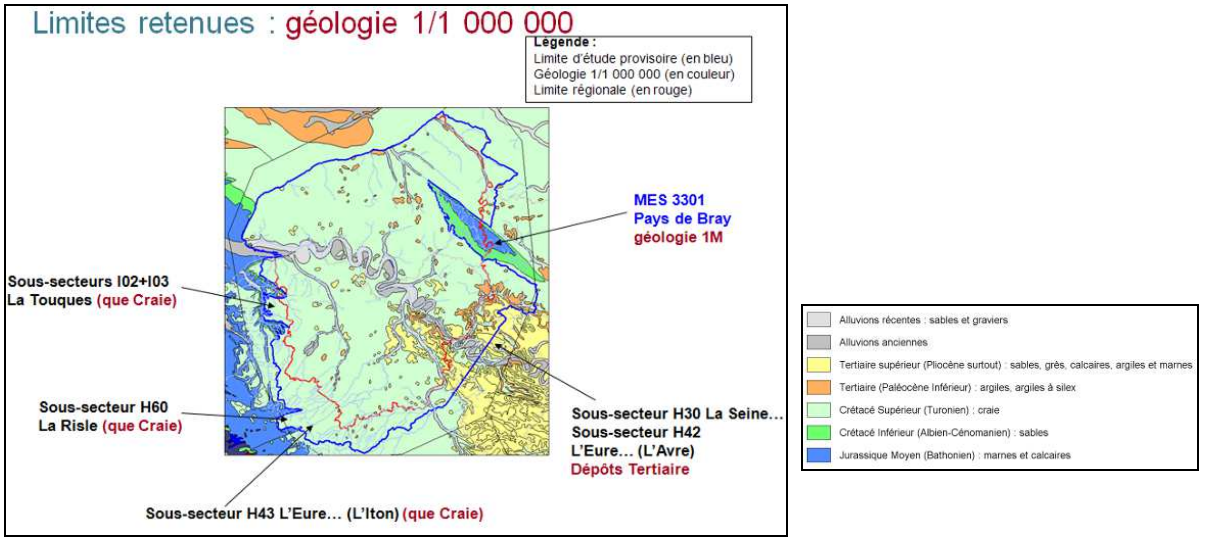
La superficie du secteur d'étude ainsi obtenu est de 15 100 km^2 (cf. Illustration 6 ; à titre de comparaison la région Haute-Normandie couvre 12 315 km^2).



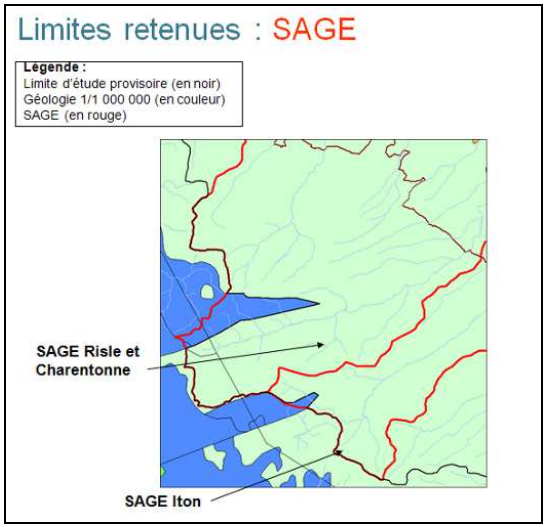
1)



2)



3)



4)

Illustration 5 - Étapes de délimitation du secteur d'étude

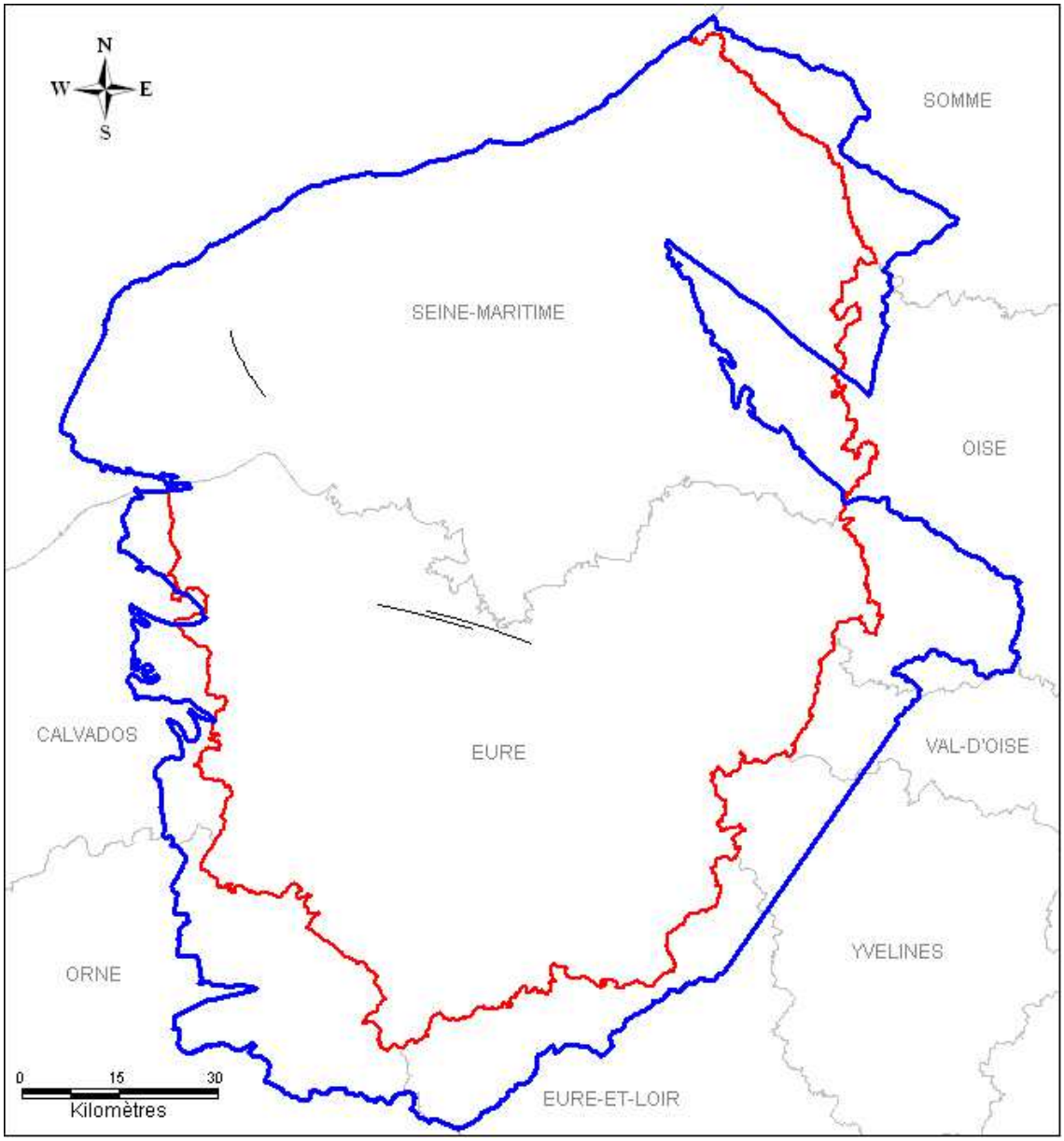


Illustration 6 - Emprise du secteur d'étude (en bleu) par rapport à la région Haute-Normandie (en rouge) et aux départements (en gris)

Les membres du Comité de pilotage ont validé cette limite. Le BRGM et la DREAL ont signalé que la prise en compte des données limitrophes dans les cartes piézométriques serait conditionnée par la densité de points disponibles.

Prise en compte de failles dans le secteur d'étude

Dans les précédentes cartes piézométriques départementales du BRGM à 1/100 000 (Hole J.P. et al. 1990, et Chemin J. et al. 1989), plusieurs failles décalaient la piézométrie de moyenne eaux (impact de ces failles sur les écoulements de la nappe de la craie) : la faille de Fécamp à Lillebonne, de direction NW-SE, la faille de la Seine NW-SE de Rouen à Vernon, les deux failles parallèles Ouest-Est de l'anticlinal de Bourgtheroulde.

En observant les données piézométriques mesurées en 2001 et en 2006 de part et d'autre de ces failles, trois d'entre elles ont été identifiées comme décalant effectivement la profondeur de la nappe de la craie lors des deux années : la faille de Fécamp-Lillebonne a été raccourcie, les deux failles de Bourgtheroulde ont été conservées, et la faille de la Seine a été enlevée (les failles ont été retracées à partir des cartes géologiques harmonisées du BRGM à 1/50 000).

À l'intérieur du secteur d'étude, trois failles ont donc été prises en compte dans la suite du travail réalisé (cf. Illustration 6). Elles constitueront des obstacles infranchissables dans le travail d'interpolation des données piézométriques de 2001 et 2006.

3.1.3. Recueil, extraction et traitement des données piézométriques existantes. Densification des jeux de données.

Pour établir les cartes piézométriques numériques en condition de très hautes eaux et de basses eaux sur tout le secteur d'étude retenu, il a été nécessaire de densifier les jeux de données des campagnes de terrain.

Tout d'abord, une recherche a été effectuée auprès des Services Géologiques Régionaux du BRGM pour collecter sur les régions limitrophes (Basse-Normandie, Centre, Ile-de-France, et Picardie ; cf. Illustration 6) : 1) des données piézométriques complémentaires sur 2001 et 2006 (éventuelles campagnes piézométriques de terrain), 2) des cartes piézométriques de moyennes eaux. Les données récupérées ont concerné :

- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie éditées en mars 2006 pour le Conseil Général d'Eure-et-Loir (espacement de 5 m) ;
- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie cénomanienne sur le département du Calvados (rapport BRGM/RP-55670-FR d'octobre 2007) (espacement de 10 m) ;
- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie (espacement de 10 m) sur les départements de l'Oise et de la Somme (novembre 2007), élaborées à partir de la totalité des mesures piézométriques disponibles dans la BSS Picardie et calées entre les basses eaux de 2005 et les hautes eaux (printemps 2001 et quelques mesures de l'hiver 2001-printemps 2002) ;
- des mesures piézométriques synchrones issues d'une campagne réalisée au printemps 2001 sur les départements de l'Oise et de la Somme ;

- l'existence du réseau de l'association « Aqua Picardie Maritime » comportant 80 piézomètres situés au Nord-Est du Tréport, dans le Vimeu. Les mesures ont débuté en 2004 et elles sont effectuées au rythme de 2 campagnes par an (basses eaux et hautes eaux). Sur ADES (http://www.ades.eaufrance.fr/) ce réseau est décrit comme « RLESOUPPIC : Réseau de suivi de la piézométrie des eaux souterraines sur la Picardie Maritime (secteur d'Abbeville) ».

De la même façon, les cartes piézométriques disponibles au Service Géologique Régional Haute-Normandie (SGR/HNO) ont été utilisées pour cette étude :

- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie sur le département de l'Eure (Chemin J. et al. 1989) (espacement de 10 m) ;
- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie sur le département de Seine-Maritime (Hole J.P. et al. 1990) (espacement de 10 m) ;
- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie sur le département de l'Eure (RP-52989-FR de février 2004) (espacement de 5 m), réalisées à partir des données asynchrones de la BSS, exceptée pour la carte en conditions de hautes eaux (campagne de terrain 2001) ;
- les isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie sur le département de la Seine-Maritime (Hanot F. et al. Compagnie Générale de Géophysique CGG, 1998) (espacement de 5 m), élaborées à partir de données asynchrones de la BSS.

Les cartes établies en 1989-1990 constituent encore aujourd'hui des références tandis que les cartes de 1998 et 2004 ont été peu utilisées jusqu'alors.

Une concertation avec le Laboratoire de Géologie de l'Université de Rouen a eu lieu le 2 février 2010, pour examiner le travail réalisé à partir des données des deux campagnes de terrain et pour lister les problèmes rencontrés. Cette réunion a montré que les données de 2006 n'avaient pas été valorisées, et que celles de 2001 avaient fait l'objet d'un essai de valorisation peu concluant (grille interpolée avec GDM à une maille de 600 m).

Ensuite, les informations complémentaires suivantes ont été recensées : les données issues du réseau de surveillance piézométrique patrimonial du bassin Seine-Normandie (réseaux piézométriques régionaux et départementaux), les relevés piézométriques de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM, les sources issues du travail de numérisation de la DREAL de Haute-Normandie (mesures effectuées dans les années 1970), et les mesures effectuées dans le cadre de l'autosurveillance des Installations Classées ou Sites Pollués (ICSP).

Ces données ont été extraites de différentes bases de données : ADES (réseaux piézométriques régionaux), BSS (mesures piézométriques ponctuelles), et base Access de la DREAL (sources). Les mesures ICSP ont fait l'objet d'un dépouillement papier suivi d'une saisie informatique (sur les 168 sites ICSP de Haute-Normandie,

environ 30 présentaient des suivis trimestriels sur des ouvrages nivelés, potentiellement suivis sur les périodes 2001 ou 2006).

Les extractions des données piézométriques bancarisées dans ADES ont été effectuées sur deux périodes : d'avril à juin 2001 (pour avoir des mesures synchrones avec la campagne 2001), et d'octobre à décembre 2006 (campagne 2006). Les mêmes périodes ont été utilisées pour extraire les mesures piézométriques de la BSS. Les données retenues ne devaient concerner que les ouvrages captant la craie.

À titre d'exemple, on peut préciser les résultats obtenus à partir des 83 piézomètres appartenant ou ayant appartenu aux réseaux piézométriques de la région Haute-Normandie (dont 8 faisant partie du réseau départemental du Conseil Général de l'Eure et 14 du réseau du département de Seine-Maritime). Pour la période du printemps 2001, 54 piézomètres étaient utilisables (5 ouvrages étaient en interruption de mesures, 23 débutaient leurs mesures après juin 2001 et 1 avait arrêté ses mesures avant avril 2001), tandis qu'à l'automne 2006 ils étaient 70 (3 ouvrages étaient en interruption des mesures, 3 débutaient leurs mesures après décembre 2006 et 7 avaient arrêté leurs mesures avant octobre 2006).

Comme indiqué ci-dessus, les sources ont été extraites via la base Access de la DREAL. L'objectif était d'identifier des sources pérennes en période de sécheresse, actives aussi bien en hautes eaux (2001) qu'en basses eaux (2006) (pour information : aucune source n'a été jaugée en 2001 et en 2006). Les étiages historiques retenus sont : octobre 1971 à octobre 1974, novembre 1990 à octobre 1992, novembre 1996 à mars 1998, octobre 2005 à février 2006, et novembre 2006 à février 2007. Ces périodes ont été mises en évidence en observant mois par mois les chroniques piézométriques de deux ouvrages : 00773X0002 (Rocquemont) et 01245X0010 (Montaure). On peut signaler que ces sources font partie de la base de données « bétoires ». De cette base ont également été extraites les sources littorales, car elles émergent au niveau des falaises ou sur le platier des côtes Nord de la région (les sources de falaises sont d'ailleurs appelées « les pleureuses »).

Enfin, les jeux de données décrits précédemment ont été densifiés en prenant en compte les deux types de relation nappe-rivière : cours d'eau drainants (la rivière draine la nappe) et rivières perchées (la nappe décroche du cours d'eau). Des points de contrainte appropriés ont été ajoutés au niveau du fond des lits mineurs.

Le réseau hydrographique qui a été utilisé provient de BD-Carthage édition 2008 (Base de Données sur la CARtographie THématique des AGences de l'eau et du Ministère de l'Environnement) téléchargée le 21/10/2010 sur le site Internet du SANDRE. Les polylignes des cours d'eau ont été transformées en points tous les 400 m et renseignés ensuite par la valeur de l'altitude du Modèle Numérique de Terrain de l'IGN (MNT au pas de 50 m, BDALTI - IGN, 2005).

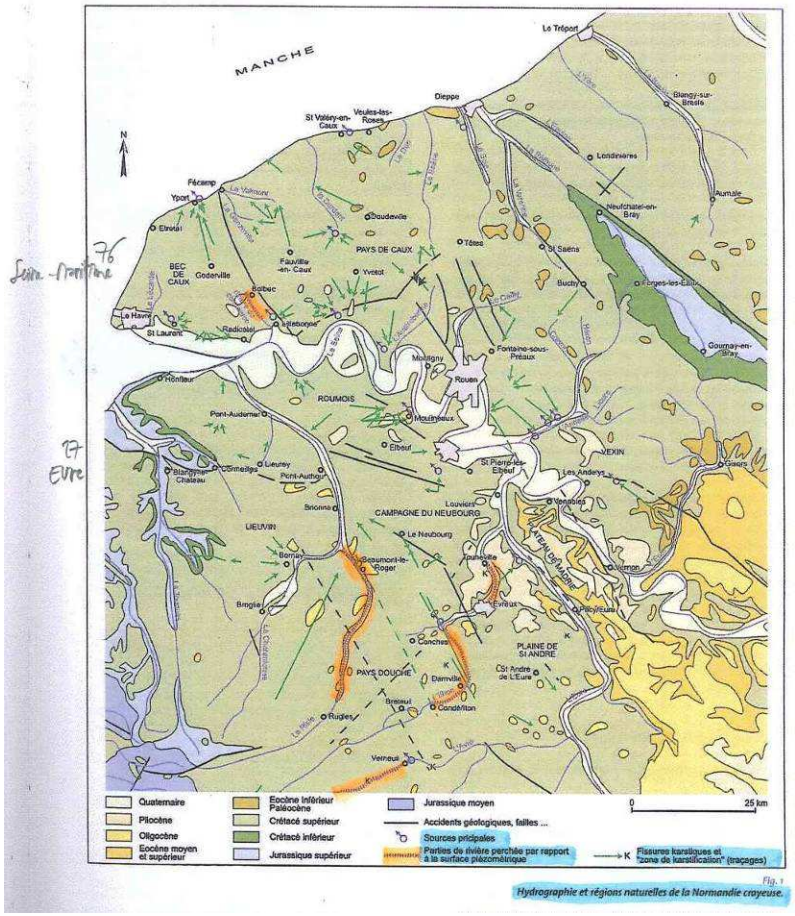
Pour les portions de rivière perchées par rapport à la nappe (exemple du sec Iton), un travail précis de délimitation a été entrepris (une fois les secteurs identifiés, une zone

de 1 à 2 km a été étudiée de part et d'autre des rivières). Le choix des portions perchées :

- s'est appuyé sur la figure 1, page 249 du livre sur les « Aquifères et eaux souterraines en France » (Roux J.-C. et al. 2006 ; Chapitre III « Bassin de Paris », paragraphe n°12, « Normandie Crayeuse », c f. Illustration 7),
- et s'est basé sur l'observation des bétoires au droit des rivières : une importante densité de bétoires ou indices de bétoires dans le lit d'un cours d'eau signifie que la craie est karstifiée et donc que le cours d'eau est perché au-dessus de la nappe (travail réalisé à partir des données disponibles dans l' « Inventaire des bétoires, traçages, exutoires » de Haute-Normandie en date du mois de novembre 2010).

Les six secteurs perchés retenus (cf. Illustration 8) ont été validés par les membres du comité de pilotage du projet, et par Philippe DE LA QUERIERE (Hydrogéologue Agréé, coordonnateur de l'Eure).

Au niveau des six sections de rivières perchées, la valeur du MNT de l'IGN au droit des points de rivières a été abaissée de plusieurs mètres (cf. Illustration 8), pour restituer de façon réaliste le décrochement de la nappe. Les cotes piézométriques sous les rivières ont été argumentées sur la base des cartes établies en 1989-1990 et de comparaisons entre mesures du réseau piézométrique régional et altitudes des rivières.



Sections de rivières perchées et encaissements :

La rivière du Commerce
pas perchée en 2001,
perchée de 12 m en 2006

L'Iton Nord
pas perché en 2001,
perché de 8 m en 2006

L'Iton Sud
pas perché en 2001,
perché de 17 m en 2006

L'Avre
perché de 7 m en 2001,
perché de 16 m en 2006

La Risle
pas perchée en 2001,
perchée de 10 m en 2006

La Guiel
pas perchée en 2001,
perchée de 12 m en 2006

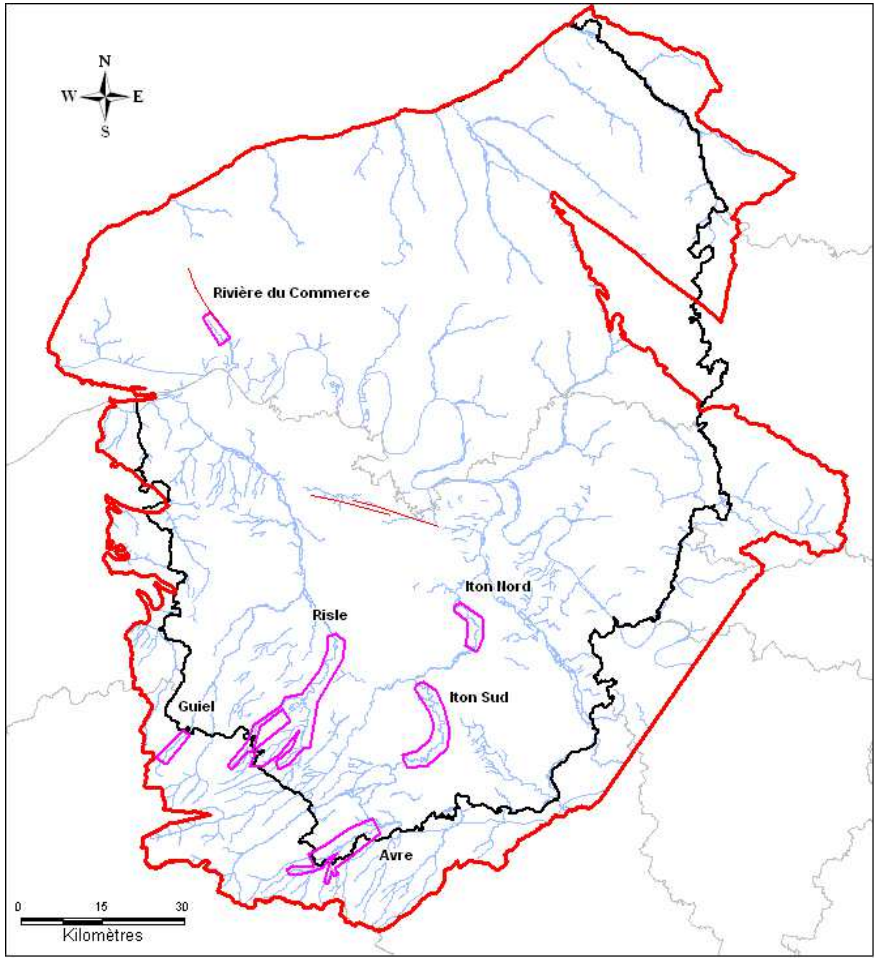


Illustration 7 - Sections de rivières perchées par rapport à la surface piézométrique (surlignées en orange) (Roux J.-C. et al. 2006)

Illustration 8 - Localisation des six secteurs de rivières perchées retenus (en rose)

3.1.4. Compilation et mise en forme des jeux de données

Pour chacune des cartes piézométriques (très hautes eaux et basses eaux), toutes les données listées ci-dessus ont été compilées et assemblées sur un même fichier Excel. L'Illustration 9 détaille l'origine des données potentiellement utilisables (car pas encore corrigées) ; l'Illustration 10 et l'Illustration 11 montrent leurs répartitions géographiques pour respectivement les périodes 2001 et 2006. De façon à ne pas surcharger ces deux illustrations, les points issus du réseau hydrographique ne sont pas représentés.

Origine données	Nombre points 2001	Nombre points 2006
Campagne 2001 BRGM SGR/HNO	368	
Campagne 2006 BRGM SGR/HNO		367
Campagne 2001 BRGM SGR/PIC	96	
Camp. 2006 Association Aqua Picardie Maritime		45
BRGM SGR/BNO	4	4
Conseil Général 14	2	1
Conseil Général 61 SDE	3	3
BRGM SGR/HNO	50	69
Conseil Général 76	3	1
Conseil Général 27	1	0
BRGM SGR/PIC	11	11
BRGM SGR/IDF	4	5
DREAL Région Centre	4	4
BSS 2001	18	
BSS 2006		54
Exutoires littoral BD bétoires	93	93
Sources pérennes BD bétoires	77	77
ADES ICSP	10	15
Point de rivière	11688	11688
Points de rivières perchées	110	406
Points issus de corrélation2006	263	
Points issus de corrélation2001		249
total	12805	13092

Illustration 9 - Origine des données piézométriques rassemblées avant le travail d'analyse critique des données

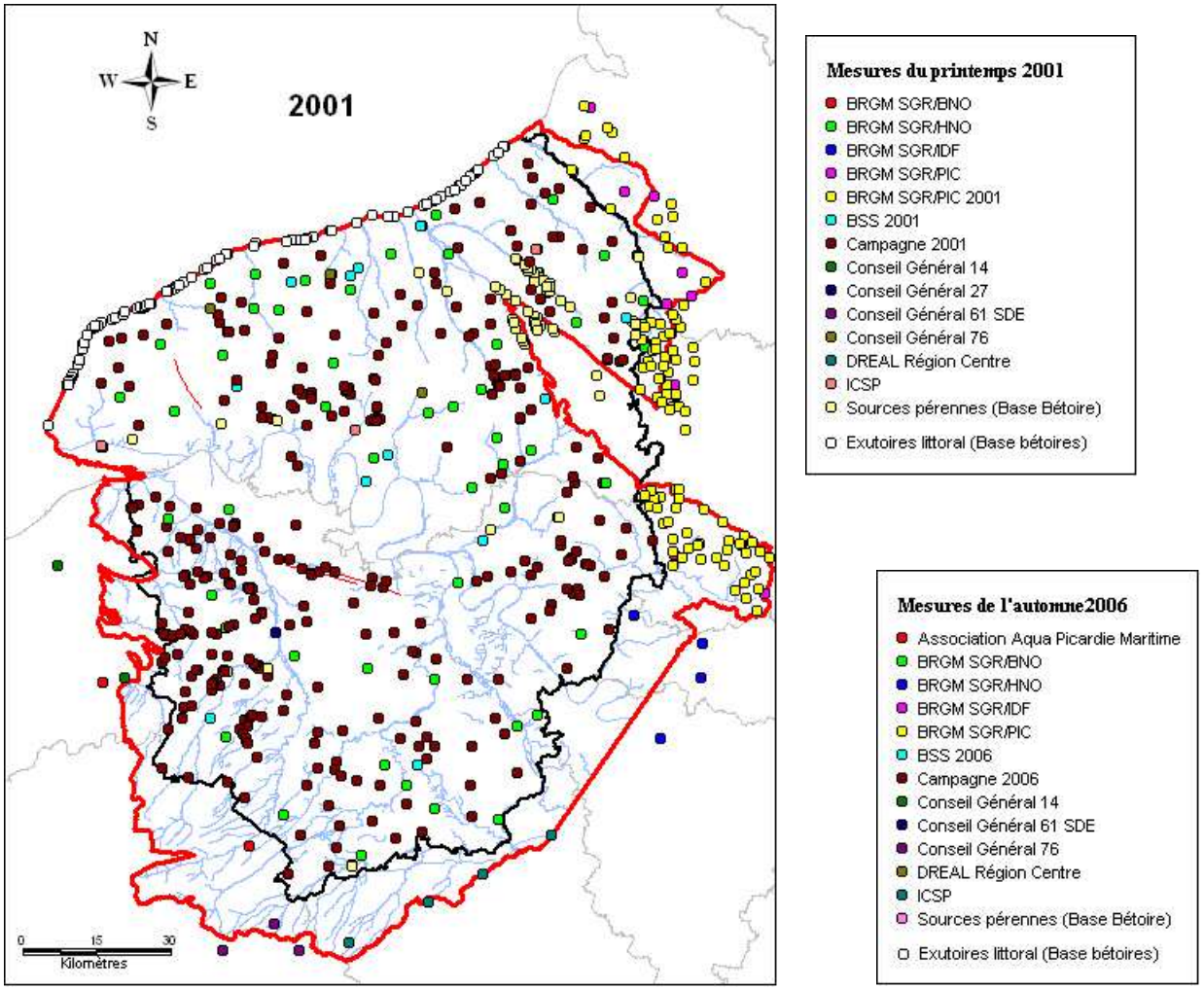


Illustration 10 - Mesures piézométriques disponibles au printemps 2001

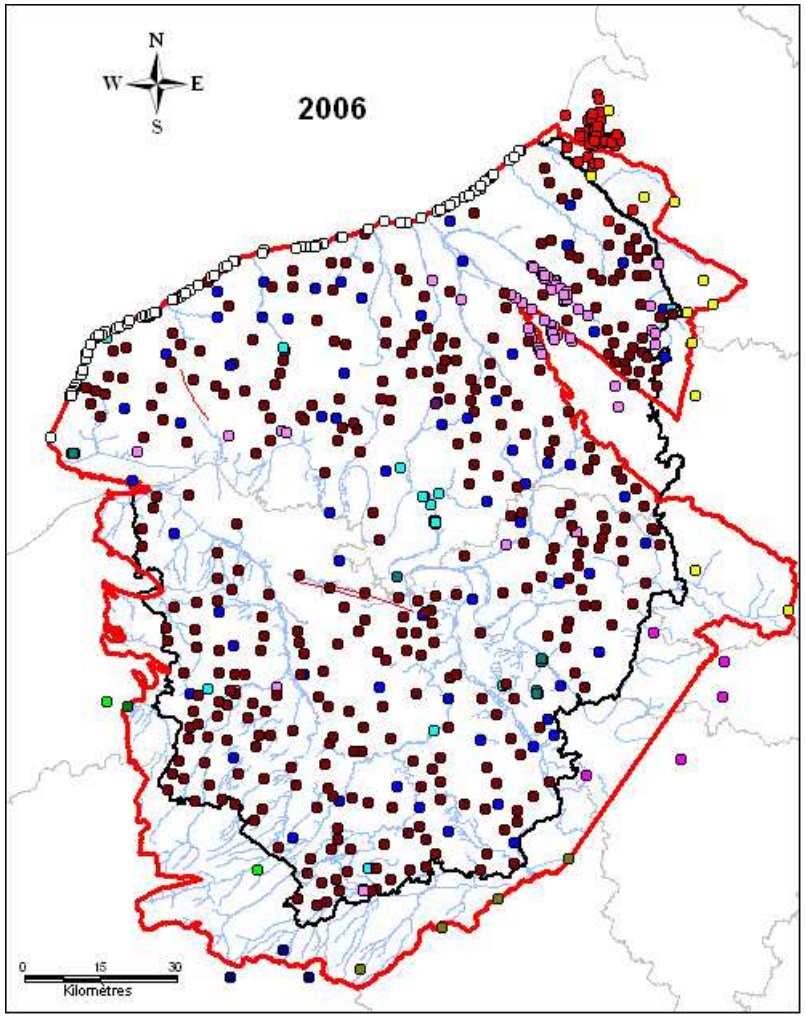


Illustration 11 - Mesures piézométriques disponibles à l'automne 2006

Pour chacune des cartes (2001 et 2006), le jeu de données final a été mis en forme sur un fichier Excel unique comprenant les champs d'information suivants :

- « CODE_BSS » du point de mesure ou nom du thalweg (campagne 2001) ;
- « NATURE » du point de mesure (forage, puits, source…) ;
- « COMMUNE » ;
- « DEPT », département ;
- « XL2E, YL2E, XL93, YL93 » coordonnées X et Y en Lambert 2 étendu et en Lambert 93 ;
- « Z_SOL », altitude sol en m NGF ;
- « DATE » de mesure du niveau piézométrique ;
- « NP_REP », profondeur du niveau d'eau (en m/repère) ;
- « Z_NP_NGF », altitude du niveau piézométrique (en m NGF) ;
- « Z_REP_NGF », altitude du repère (en m NGF) ;
- « ORIGINE » de la mesure avec nom du producteur de données ;
- « MESURE » effectuée (code M) ou déduite (code D).

Au final, les données piézométriques disponibles au printemps 2001 et en automne 2006 sont :

- des données réellement mesurées (code MESURE=M) : campagnes de terrain, réseaux piézométriques régionaux et départementaux, BSS, sources pérennes et littorales, données ADES ICSP, points des rivières drainantes ;
- données déduites (code MESURE=D) : points issus de corrélations inter-campagnes (cf. chapitre 3.1.5.), et des sections de rivières perchées (cf. chapitre 3.1.3.).

3.1.5. Utilisation de données complémentaires dans des zones pauvres en informations

Malgré le recueil de toutes les informations disponibles au printemps 2001 et en automne 2006, l'Illustration 10 et l'Illustration 11 indiquent que certaines zones présentaient de fortes lacunes d'informations :

- en 2001 : autour de la faille raccourcie de Fécamp- Lillebonne, à proximité de Tôtes en Seine-Maritime, entre Beaumont-le-Roger et Évreux dans l'Eure… ;
- en 2006 : entre Buchy et Saint-Saëns en Seine-Maritime, au Nord-Est de Gisors dans le département de l'Oise, autour de Pont-Audemer dans l'Eure…

Le constat a été fait que dans ces zones lacunaires, il existait des mesures effectuées durant l'autre période. Il a donc été recherché une relation entre la piézométrie de 2001 et celle de 2006.

Pour cela, un inventaire des points communs aux deux campagnes a été effectué par rapprochement des codes BSS. Sur les 170 points communs recensés, une bonne corrélation a été obtenue entre les cotes piézométriques 2006 (notée « Z NP 2006 » sur l'Illustration 12) et 2001 (notée « Z NP 2001 » sur l'Illustration 12). L'inverse fonctionne également (bonne corrélation entre altitude 2001 et 2006).

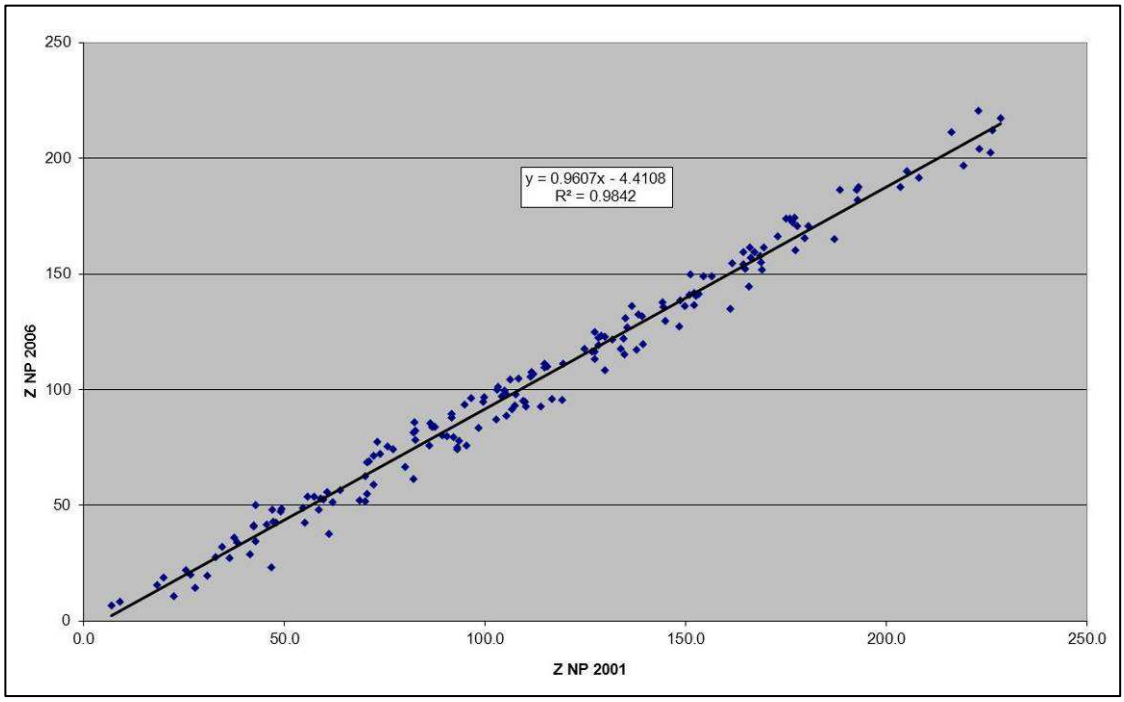


Illustration 12 - Corrélation entre cotes piézométriques de très hautes eaux 2001 et de basses eaux 2006

Les équations obtenues sont :

Z NP 2006 = 0.9607 x Z NP 2001 – 4.4108 (R^2=0.9842)

Z NP 2001 = 1.0245 x Z NP 2006 – 6.2877 (R^2=0.9842)

Dans les zones où très peu de points représentent les hautes eaux, des points ayant été mesurés en 2006 et traités via la formule de corrélation, ont été ajoutés au jeu de données 2001 (263 points, cf. Illustration 9 et Illustration 13). De la même façon, dans les zones où très peu de points représentent les basses eaux, des points ayant été mesurés en 2001 et traités via la formule de corrélation, ont été ajoutés au jeu de données 2006 (249 points, cf. Illustration 9 et Illustration 14).

Cette décision a été validée par les membres du comité de pilotage du projet.

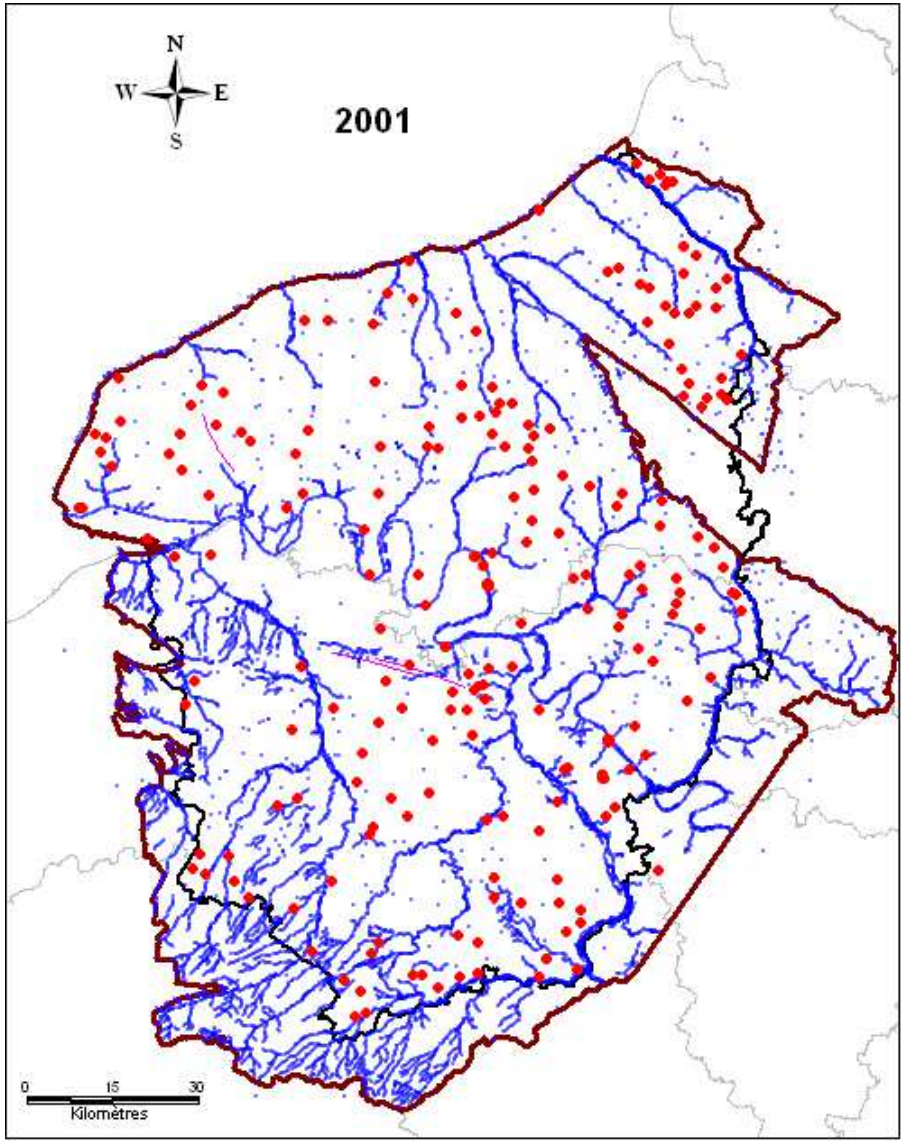


Illustration 13 - Points ajoutés (en rouge) au jeu de données du printemps 2001 (petits points bleus) à partir d'une mesure 2006

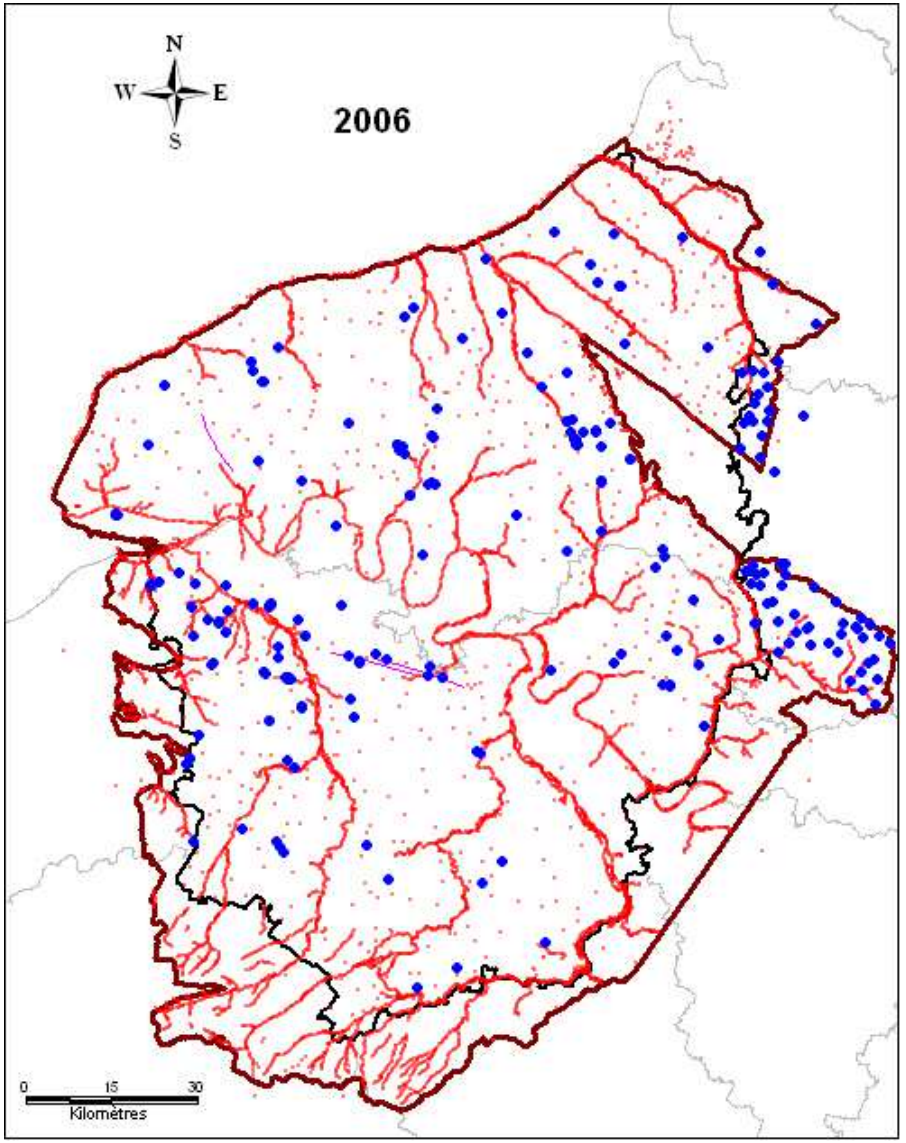


Illustration 14 - Points ajoutés (en bleu) au jeu de données de l'automne 2006 (petits points rouges) à partir d'une mesure 2001

3.1.6. Analyse critique des données

Cette analyse a permis de corriger certaines données et d'en supprimer d'autres (cf. chiffres en bleu dans le tableau de l'Illustration 9).

Données issues des campagnes de terrain

- **Campagne 2001**

Dans le rapport BRGM/RP-51153-FR, était mentionné un problème de géoréférencement des données en raison de l'utilisation de deux GPS différents. Ce problème a été analysé et résolu.

Par ailleurs, plusieurs corrections ont été effectuées :

- affectation d'une altitude Z par observation du fond à 1/25 000 scanné et géoréférencé de l'IGN (scan25 IGN) quand celle-ci manquait (coordonnées GPS manquantes en forêt) ;
- correction de l'altitude de points (mauvaise lecture du scan25 IGN avec courbe de niveau lue dans le mauvais sens, altitude inexacte, localisations GPS incertaines) ;
- modification des coordonnées X et Y (erreur de chiffre, localisations GPS incertaines). Au total, ce sont 67 points où X, Y, Z ont été vérifiés ;
- élimination des mesures de niveau dynamique (ouvrages pompés avant mesure) et des données provenant de la nappe superficielle du Tertiaire ;
- vérification des informations notées « niveau dynamique supposé » ;
- dans le cas où aucune date n'a été précisée par les opérateurs de terrain (29 cas), ce champ est noté « 00/00/0000 » dans le fichier Excel ;
- 5 dates imprécises (« 7 ou 10 ? » et « mars ») ont été corrigées grâce aux dates des mesures opérées sur des ouvrages voisins.

Les 6 forages secs (mesure d'un niveau de nappe impossible car l'ouvrage n'est pas assez profond) ont été isolés dans un fichier séparé destiné à tester la piézométrie interpolée.

La cohérence des mesures faites durant le mois et demi du printemps 2001 a été vérifiée. Aucun fort battement n'ayant été mesuré entre les dates de début et de fin des mesures de terrain, il n'a pas été nécessaire d'apporter de corrections supplémentaires.

- **Campagne 2006**

Le rapport BRGM/RP-55028-FR indiquait que la fiabilité de 11 données était douteuse (points influencés, présence d'une nappe perchée, puits effondré, …). Les mesures correctives suivantes ont été apportées :

- affectation d'une altitude Z par observation du scan25 IGN quand celle-ci manquait (dans ville d'Évreux) ;
- correction de l'altitude de points ;
- élimination du jeu de données 2006 des mesures piézométriques en double ou en triple (exemple : point du réseau piézométrique relevé lors de la campagne 2006, et information mise en BSS) ;
- correction de 4 valeurs où la profondeur du niveau piézométrique était supérieure à la profondeur de l'ouvrage.

Les 26 forages secs ont été isolés dans un fichier séparé destiné à tester la piézométrie 2006 interpolée. Pour ces ouvrages, il a été ajouté la profondeur des ouvrages (information manquante).

Autres données piézométriques

21 mesures piézométriques existant en double dans le jeu de données 2006 ont été supprimées (relevé de la campagne 2006, et information mise en BSS).

Quelques points du réseau piézométrique de la région Haute-Normandie avaient été mesurés lors des passages sur le terrain. Ces mesures en double ont été nettoyées.

5 mesures ICSP relevées en 2006 ont été enlevées car elles correspondaient à des niveaux dynamiques (ouvrages pompés avant mesure).

Les mesures effectuées en région Picardie comportaient des coordonnées en Lambert 1 qui ont été converties en Lambert 2 étendu.

Données du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique issu de BD-Carthage a dû être fortement retravaillé à la main (observation des linéaires sur les cartes IGN à 1/25 000) en raison : de biefs perchés, d'aqueduc canalisé (Avre), d'écoulement de rivières sur des terrains tertiaires (la rivière draine la nappe du Tertiaire), et de la présence de cours d'eau temporaires.

Les biefs, aqueduc et écoulements sur le Tertiaire ont été supprimés des campagnes 2001 et 2006, tandis que les points des cours d'eau temporaires n'ont été supprimés qu'en période de basses eaux (2006). Cela représente 480 points de moins dans le jeu de données 2001, et environ 3 750 points de moins dans le jeu de données 2006.

L'Illustration 14 tient compte de la suppression de ces points de rivières.

Valorisation, vérifications et corrections générales effectuées à tout type de données

Tous les points des deux jeux de données ont été valorisés par des informations complémentaires : commune SIG, Z_MNT IGN, géologie affleurante des cartes harmonisées à 1/50 000. La comparaison de ces informations avec les autres données a permis d'opérer plusieurs corrections.

Pour chaque point de mesure, les coordonnées X, Y et Z ainsi que la nature de l'aquifère capté ont fait l'objet d'un contrôle rigoureux (sélection des mesures effectuées dans la craie). Les données douteuses, comme les ouvrages captant plusieurs aquifères ou captant une nappe perchée, ont été écartées du jeu de données final. Dans le même ordre d'idée, seuls les exutoires de la nappe de la craie ont été conservés parmi les sources.

Enfin, les derniers contrôles ont consistés à : vérifier que les niveaux de 2001 étaient supérieurs à ceux de 2006, et regarder si les profondeurs de nappe étaient plus fortes sur plateaux que dans les thalwegs.

3.1.7. Travail d'interpolation et insertion des résultats dans un système d'information géographique (SIG)

À l'issue du travail d'analyse critique des données, 12 327 points ont été retenus pour le jeu de données 2001 et 9 315 pour 2006 (cf. Illustration 15).

Origine données	Nombre points 2001	Nombre points 2006
Campagne 2001 BRGM SGR/HNO	368	
Campagne 2006 BRGM SGR/HNO		367
Campagne 2001 BRGM SGR/PIC	96	
Camp. 2006 Association Aqua Picardie Maritime		45
BRGM SGR/BNO	2	2
Conseil Général 14	2	1
Conseil Général 61 SDE	3	3
BRGM SGR/HNO	49	65
Conseil Général 76	3	1
Conseil Général 27	1	0
BRGM SGR/PIC	11	11
BRGM SGR/IDF	4	4
DREAL Région Centre	4	4
BSS 2001	14	
BSS 2006		26
Artéfacts	9	10
Exutoires littoral BD bétoires	93	93
Sources pérennes BD bétoires	77	77
ADES ICSP	10	10
Point de rivière	11208	7941
Points de rivières perchées	110	406
Points issus de corrélation2006	263	
Points issus de corrélation2001		249
total	12327	9315

Illustration 15 - Origine des données retenues pour les piézométries 2001 et 2006

Compte-tenu de la superficie du secteur d'étude (15 100 km^2), la densité de points retenus est de 0.8 point/km^2 en 2001 et 0.6 point/km^2 en 2006.

Les altitudes piézométriques de 2001 et de 2006 ont été interpolées par krigeage (cf. description de la méthode en annexe 1) à l'aide du logiciel GDM du BRGM. Le traitement, réalisé par des spécialistes géostatisticiens du BRGM, a comporté plusieurs phases :

- Une analyse variographique a permis de mettre en évidence les corrélations spatiales des altitudes piézométriques et de les modéliser par un modèle de variogamme à deux composantes : gaussienne + linéaire sans effet de pépite (cf. fin d'annexe 1) ;
- Une analyse par « validation croisée » a permis de détecter plusieurs anomalies dans les données. Les points correspondants ont été revus et au besoin corrigés ou éliminés ;
- Une interpolation par krigeage a été effectuée pour chacune des deux années. Les failles ont été prises en compte pour interpoler à la maille 200 m l'altitude du niveau piézométrique (en m NGF) à l'intérieur du secteur d'étude (limite de krigeage). Outre l'altitude piézométrique, le krigeage a fourni également la grille des incertitudes associées à l'interpolation (écart-type de krigeage). Cet écart-

type de krigeage permet d'apprécier l'ordre de grandeur de l'erreur d'interpolation et facilite l'identification des zones mal connues.

Après le travail d'interpolation, des « stries » de direction Sud-Ouest – Nord-Est apparaissaient visuellement sur le premier rendu régional. Ces artefacts sont liés à un mauvais choix du voisinage d'interpolation par le logiciel, voire à des instabilités numériques, lorsque les données sont réparties de façon très hétérogènes (densité importante en certains endroits, avec de grands secteurs vides au milieu). Ces artéfacts ont été nettoyés en ajoutant une dizaine de points de contraintes (notés « artéfacts » dans l'Illustration 15). Ces points « forcent » le modèle à passer par certaines altitudes dans des zones dépourvues d'informations et permettent d'imposer une interprétation plus réaliste que celle proposée par le logiciel (cf. Illustration 16, où une « strie » Ouest-Est est visible au-dessus du cercle).

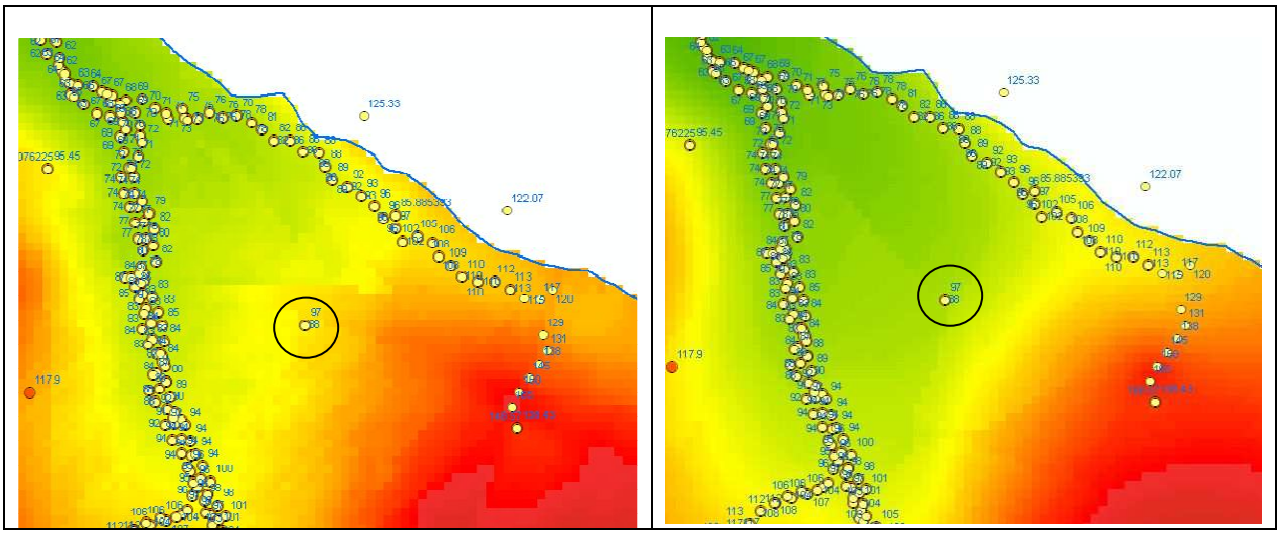


Illustration 16 - Impact d'un point de contrainte sur le rendu de la grille interpolée (image de gauche avant insertion du point, image de droite après insertion)

Les grilles obtenues sont présentées aux Illustration 17 et Illustration 18 (respectivement : altitude piézométrique de 2001 et incertitudes associées), et aux Illustration 19 et Illustration 20 (altitude piézométrique de 2006 et incertitudes associées).

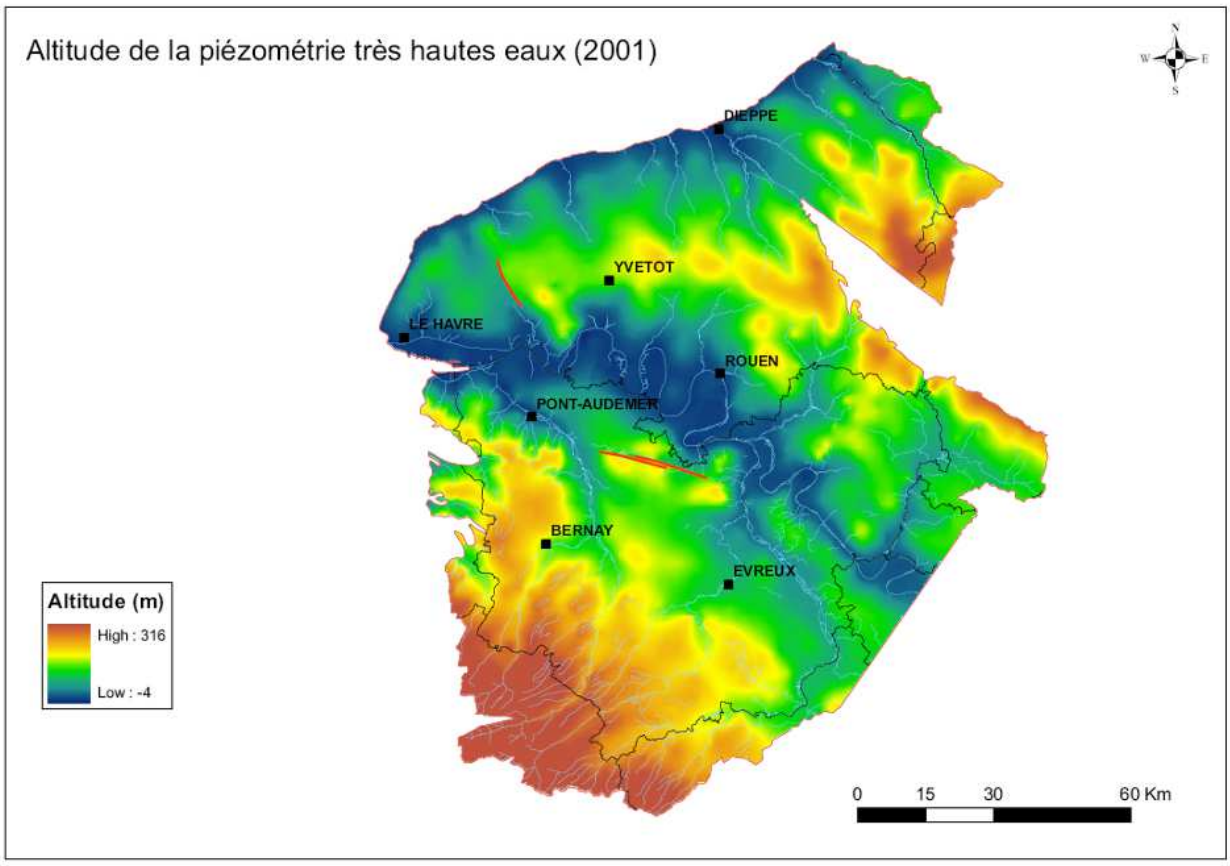


Illustration 17 - Altitude de la piézométrie de très hautes eaux (2001)

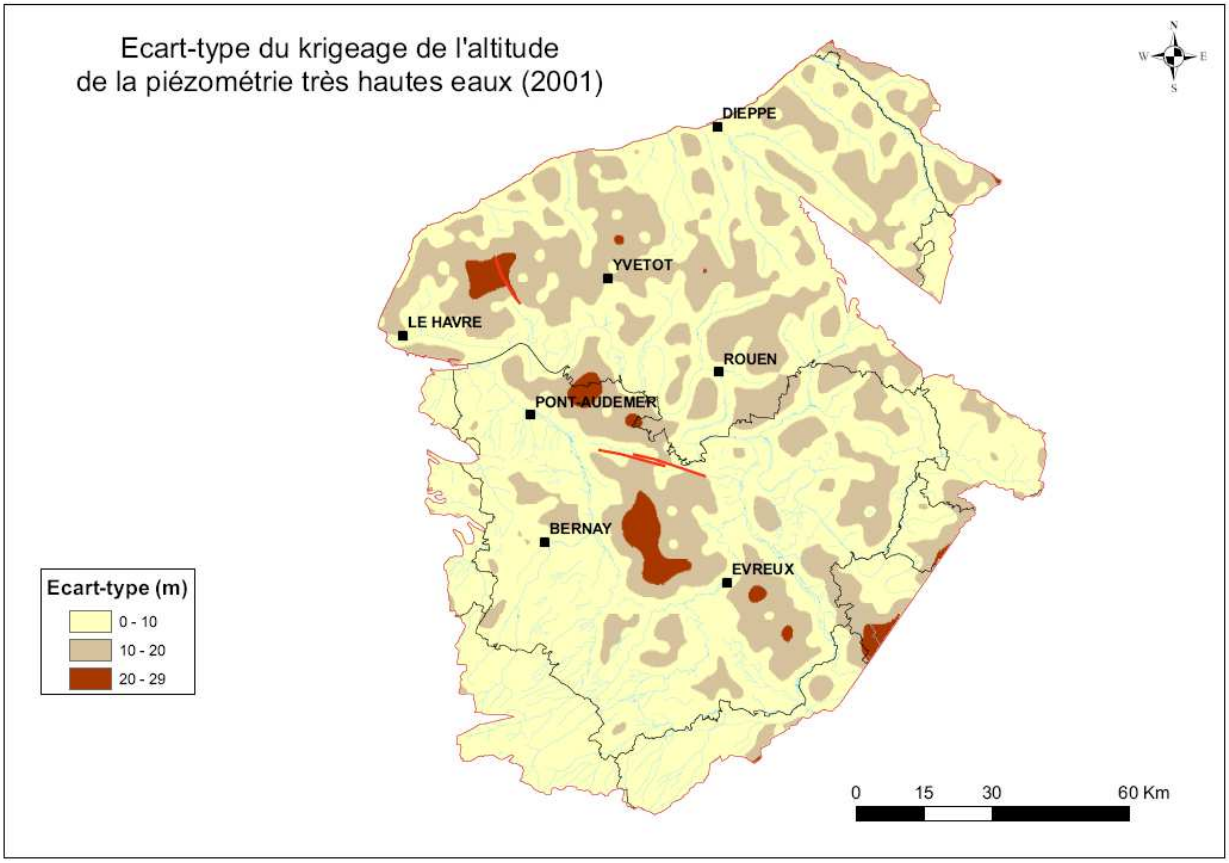


Illustration 18 - Écart-type du krigeage de l'altitude de la piézométrie de très hautes eaux (2001)

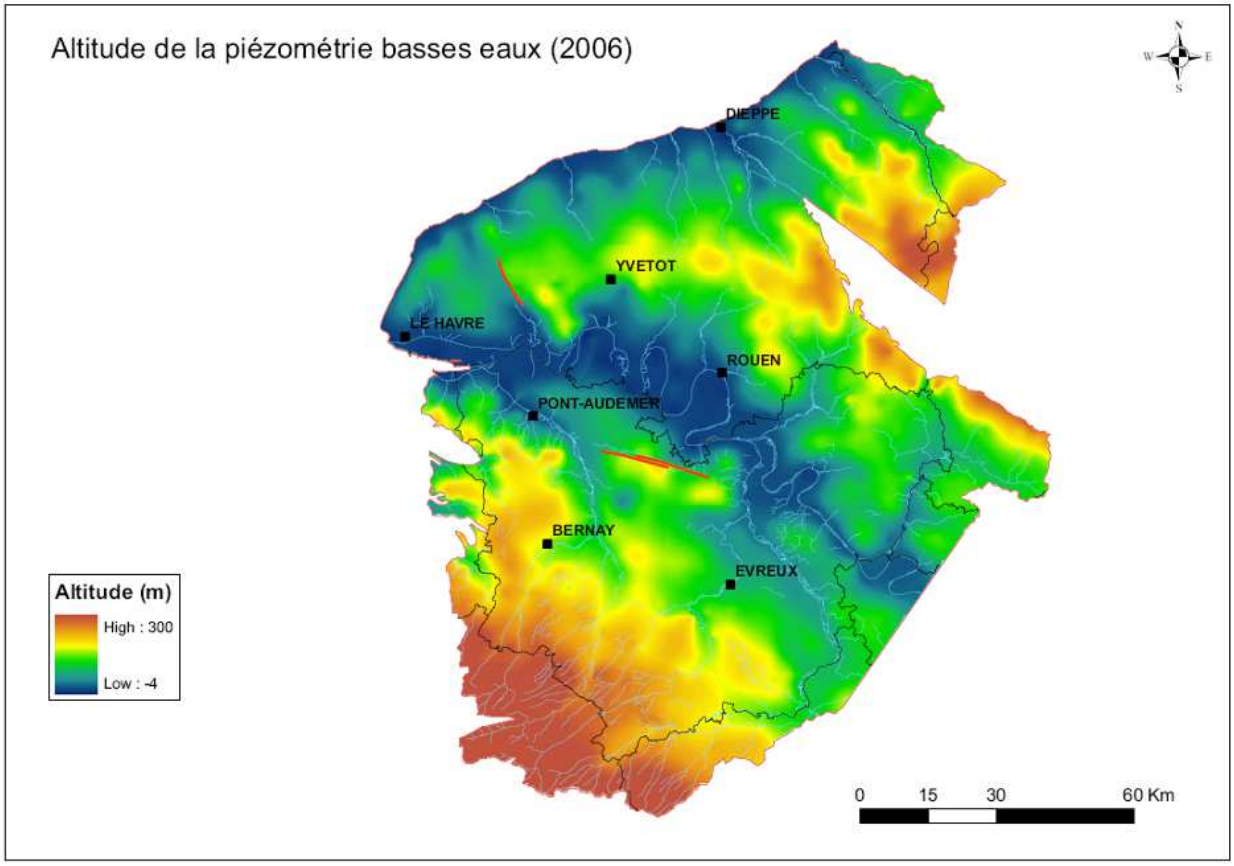


Illustration 19 - Altitude de la piézométrie de basses eaux (2006)

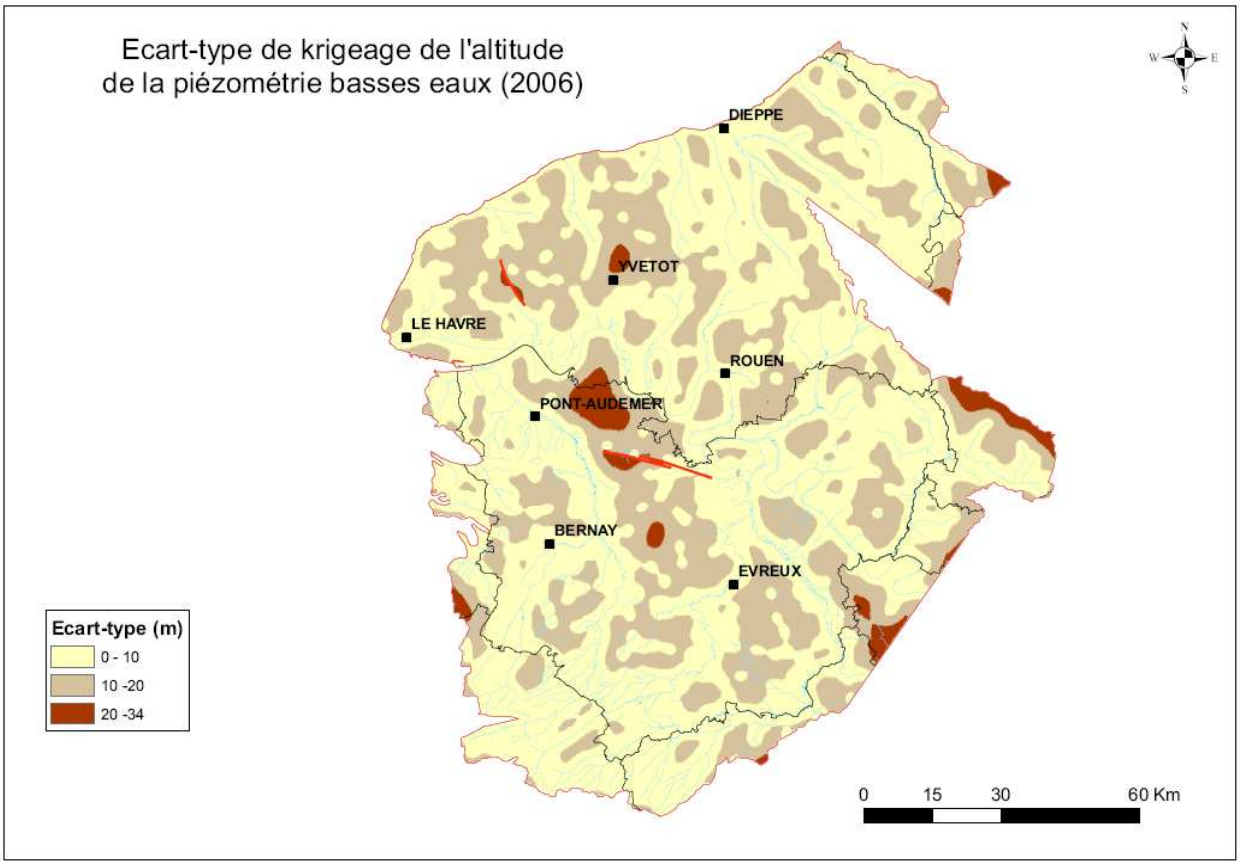


Illustration 20 - Écart-type de krigeage de l'altitude de la piézométrie de basses eaux (2006)

L'altitude de la surface piézométrique du printemps 2001 varie entre -4 et 316 m NGF, avec une moyenne à 97.3 m NGF. L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 0 et 29 m, avec une moyenne de 9.1 m.

L'altitude de la surface piézométrique de l'automne 2006 varie entre -4 et 300 m NGF, avec une moyenne à 89.9 m NGF (selon ces valeurs, la piézométrie de basses eaux semble bien être au-dessous de celle de très hautes eaux). L'écart-type de krigeage varie entre 0 et 34 m, avec une moyenne de 9.6 m.

Seules les données réellement mesurées (code MESURE=M, cf. chapitre 3.1.4.) ont servi à établir les cartes d'incertitudes associées aux altitudes piézométriques interpolées par krigeage. Ces cartes d'incertitude peuvent permettre de cibler les secteurs à mieux prospecter lors des prochaines campagnes piézométriques (cf. chapitre 3.3.).

En parallèle, le MNT (IGN au pas de 50 m) a été réinterpolé au pas de 200 m pour avoir une maille cohérente avec les grilles interpolées. L'altitude de la surface topographique du MNT obtenu varie entre -16 et 413 m NGF, avec une moyenne à 101.7 m NGF.

Les 5 grilles ont été exportées au format ArcGis (altitudes piézométriques de 2001 et de 2006, incertitudes associées, et MNT).

3.1.8. Contrôle des résultats

Travail préalable

De façon à vérifier, par différences de grilles, que les piézométries interpolées en 2001 et 2006 ne descendaient pas sous le mur de l'aquifère crayeux, il a été nécessaire de créer une grille de l'altitude du mur de la craie à la maille 200 m.

Grâce au travail réalisé dans le cadre du rapport de l'atlas hydrogéologique de l'Eure pour calculer l'altitude du toit de l'Albien (rapport BRGM/RP-52989-FR, 2004), des courbes isohypses (isoaltitude) du mur de la craie avaient été construites sur trois départements : l'Eure, la Seine-Maritime et l'Eure-et-Loir (cf. Illustration 21).

Les polylignes associées ont été transformées en points tous les 400 m, renseignés ensuite par la valeur de l'altitude du fichier d'origine. Une interpolation par krigeage a permis d'obtenir une grille à la maille 200 m renseignée sur une partie du secteur d'étude (cf. Illustration 22).

L'altitude du mur de la craie obtenu varie entre -260 et 181 m NGF, avec une moyenne à -18.2 m NGF.

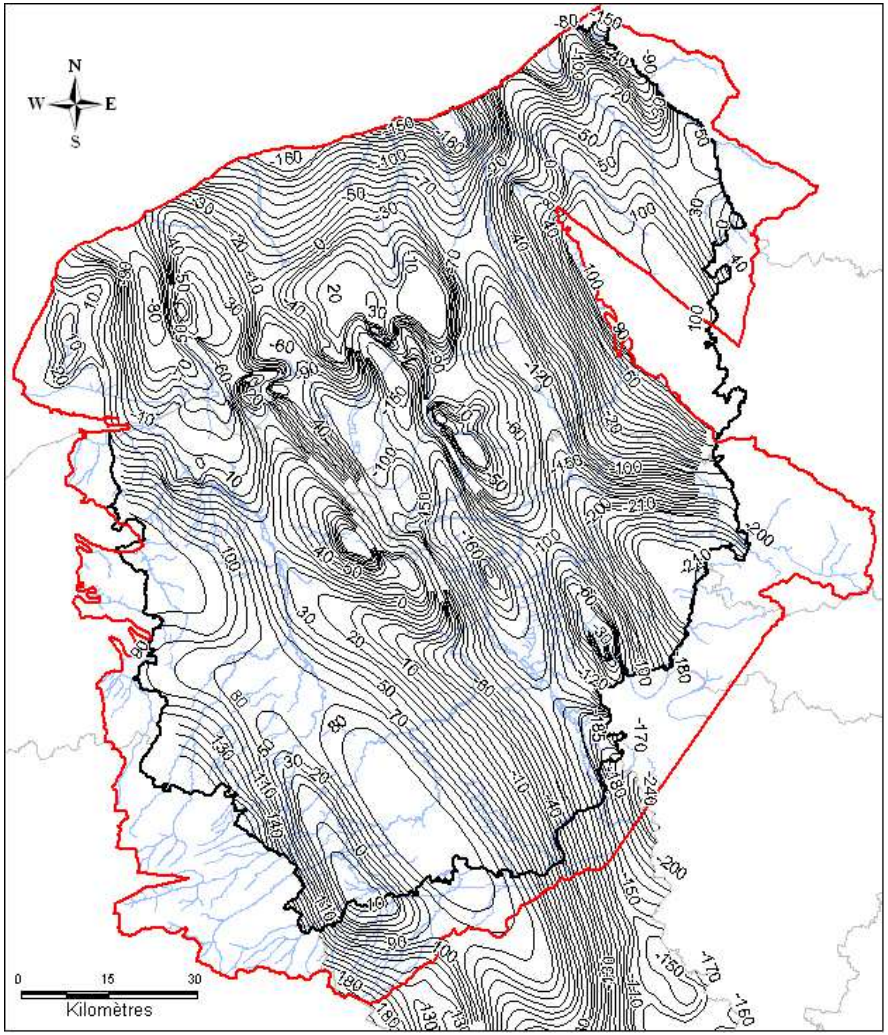


Illustration 21 - Courbes isohypses du mur de la craie (rapport BRGM/RP-52989-FR, 2004)

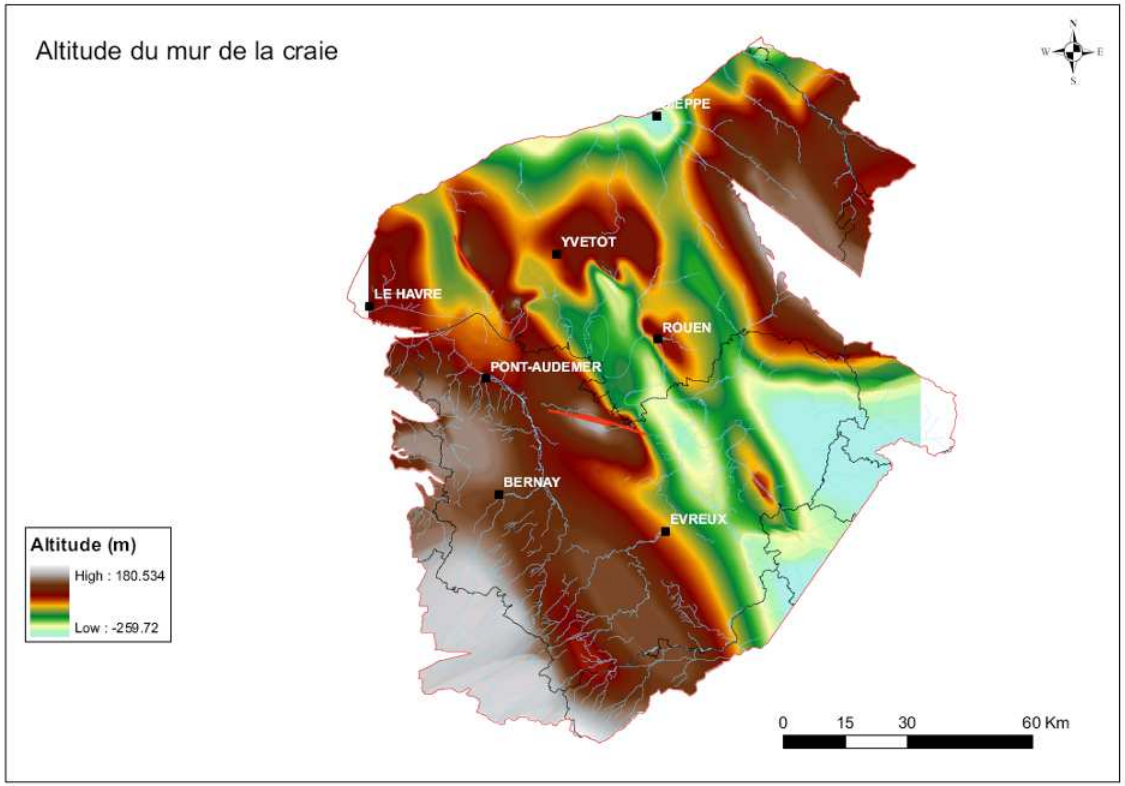


Illustration 22 - Altitude du mur de la craie interpolée sous forme d'une grille

Contrôles effectués

Dix contrôles ont été opérés sur les grilles de résultats « brutes » de la piézométrie 2001 et 2006 :

1) cohérence entre les valeurs calculées et celles des points de mesure expérimentaux (cohérence parfaite en raison du choix d'un interpolateur exact) ;
2) cohérence entre les surfaces piézométriques à l'interface des départements de l'Eure et de la Seine-Maritime au droit du fleuve Seine ;
3) cohérence des discontinuités piézométriques (contrôle de l'altitude des piézométries 2001 et 2006 de part et d'autre des failles), des dômes/dépressions piézométriques et des gradients hydrauliques ;
4) cohérence de la situation de la surface piézométrique vis-à-vis des cours d'eau drainant ou perchés (relations nappe-rivière) ;
5) cohérence entre les valeurs calculées et celles des 32 forages secs (6 en 2001 et 26 en 2006) ;
   a) les tests ont consisté à calculer la valeur de la piézométrie 2001 ou 2006 au droit de chaque forage sec et à comparer l'altitude de cette piézométrie avec celle du fond du forage ;
   b) les premiers tests ont montré que 3 forages étaient effectivement secs avec la piézométrie calculée en 2001, et 15 en 2006 ;
   c) les points qui ne « fonctionnaient » pas vis-à-vis du premier modèle (3 en 2001 et 11 en 2006) ont été ajoutés comme points de contrainte pour faire passer la piézométrie à au moins 0.5 m sous le fond du forage et un nouveau travail de krigeage a été relancé ;
6) cohérence entre la surface piézométrique de 2001 et celle de 2006 (différences de grilles, réalisées avec la calculatrice Raster de Spatial Analyst d'ArcGis 3.1.). La piézométrie de très hautes eaux doit être au-dessus de celle de basses eaux ;
   a) à l'issue du premier travail de krigeage, des secteurs où la piézométrie de basses eaux dépassait celle de hautes eaux ont été mis en évidence. Plusieurs corrections ont été effectuées (correction d'altitudes de repère différentes pour un même point entre 2001 et 2006, ajustement des coordonnées d'un même point entre 2001 et 2006, ajout d'un point mesuré dans une campagne et pas dans l'autre, contrôle d'altitudes des points sous recouvrement tertiaire, suppression de points captant le Tertiaire…) et un nouveau travail de krigeage a été relancé ;
   b) malgré toutes ces mises à jour, il restait des secteurs problématiques situés surtout à proximité des cours d'eau et notamment entre l'Eaulne et l'Arques en Seine-Maritime, et en amont du ruisseau de la Bigotière dans l'Eure (cf. Illustration 23). Ils sont liés : à l'impossibilité de choisir un variogramme identique pour 2001 et 2006, et à la prise en compte des cours d'eau temporaires en 2001 ;

c) l'Illustration 24 permet de mieux comprendre le problème rencontré : en réalisant une coupe hydrogéologique SW-NE avec les surfaces piézométriques de 2001 et de 2006, on s'aperçoit que la prise en compte en 2001 du cours d'eau temporaire (entouré sur l'illustration) fait « plonger » la piézométrie 2001 entre les deux cours d'eau (le point Z_{2001}=20 m NGF et Z_{2006}=32 n'est pas un point de mesure mais une visualisation des valeurs des grilles), tandis que la piézométrie 2006 remonte vers le NE. Ce problème ne se produirait pas si la cote de ce cours d'eau temporaire était connue en 2006.

d) pour résoudre ces difficultés, le BRGM et la DREAL ont choisi de corriger la piézométrie de 2001 en la remontant à la hauteur de celle de 2006 sur ces secteurs problématiques. Une nouvelle grille corrigée de la surface piézométrique de 2001 a été obtenue.

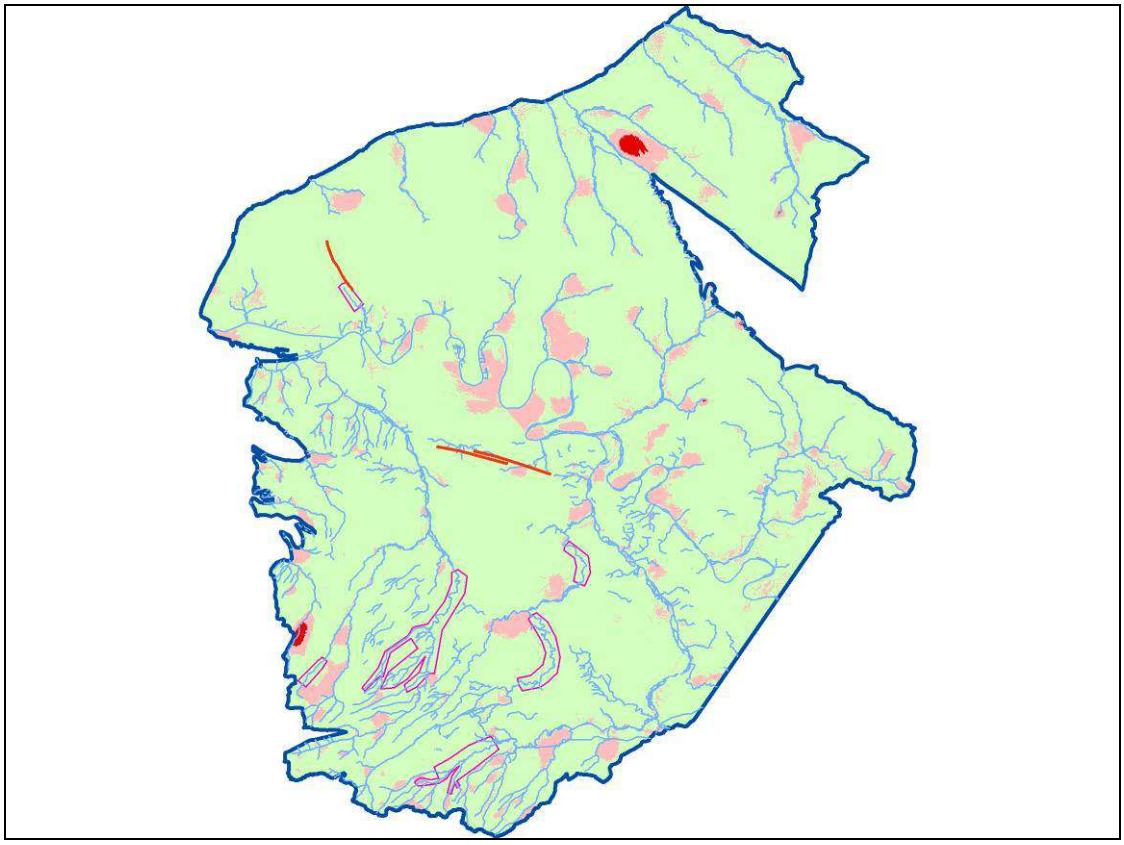


Illustration 23 - Secteurs problématiques où la surface piézométrique calculée pour 2001 est en-dessous de celle de 2006 (en rouge clair (la différence Z2001-Z2006 varie de -10 à 0 m) et en rouge foncé (-16 à 10 m)). Les secteurs en vert sont cohérents.

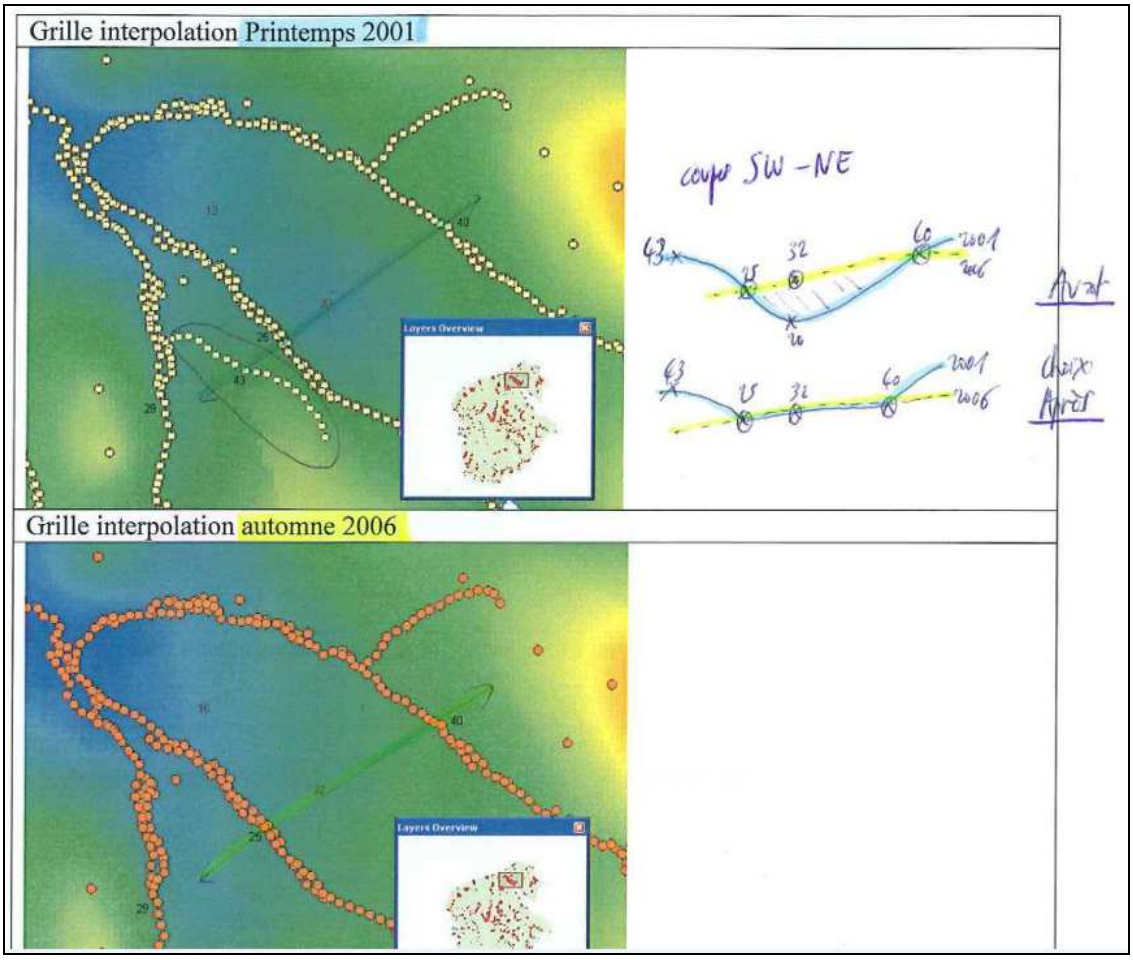


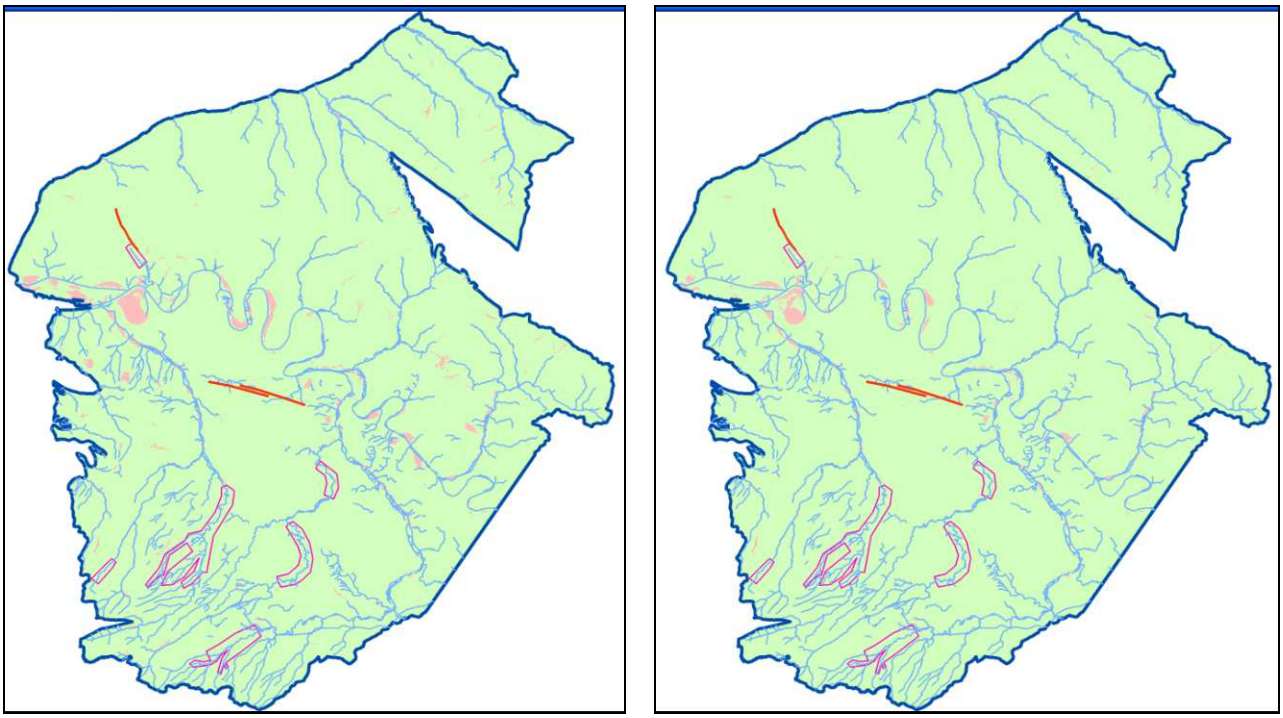
Illustration 24 - Zoom sur le secteur problématique entre les rivières de l'Eaulne et l'Arques en Seine-Maritime

7) cohérence entre les surfaces piézométriques et la topographie issue du MNT (différences de grilles) ;

   a) la différence entre la grille du MNT et celle de la piézométrie 2001 permet d'évaluer la profondeur de la nappe en période de très hautes eaux (on parle aussi d'épaisseur de la zone non saturée en très hautes eaux). Il en est de même pour la piézométrie 2006 (on parle d'épaisseur de la zone non saturée en basses eaux) ;

   b) des zones où la piézométrie interpolée dépassait la surface du sol ont été identifiées notamment à proximité de la Seine (cf. Illustration 25). Dans la suite de ce rapport on verra que ces zones permettront de travailler sur la nappe d'accompagnement des cours d'eau (cf. chapitre 4.2.) ;

c) dans les secteurs où la piézométrie dépassait la surface du sol, les épaisseurs non saturées ont été mises égales à zéro. Ce travail a permis de finaliser les grilles d'épaisseur des zones non saturées ;



2001 2006

Illustration 25 - Localisation des secteurs où la surface piézométrique calculée se situe au-dessus de la topographie (en rouge)

8) cohérence entre les surfaces piézométriques et la base de l'aquifère crayeux (différences de grilles) ;

   a) la piézométrie de 2001 reste au-dessus du mur de la craie ;

   b) la piézométrie de 2006 reste au-dessus du mur de la craie, hormis sur quelques secteurs (cf. Illustration 26) ;

   c) l'examen des secteurs douteux montre que ceux qui sont situés dans la partie occidentale de la zone d'étude s'expliquent par une méconnaissance de l'altitude de la craie (la comparaison n'a donc pas de signification). Sur les autres secteurs, aucun log géologique validé n'est disponible pour déterminer l'altitude du mur de la craie (les forages ne sont pas assez profonds). On ne peut donc exclure que les courbes isohypses du mur de la craie dessinées en 2004 soient partiellement erronées ;

d) sur la base de ce constat, la grille de l'altitude du mur de la craie a été corrigée en l'abaissant à la cote de la piézométrie calculée pour 2006 sur les secteurs problématiques ;

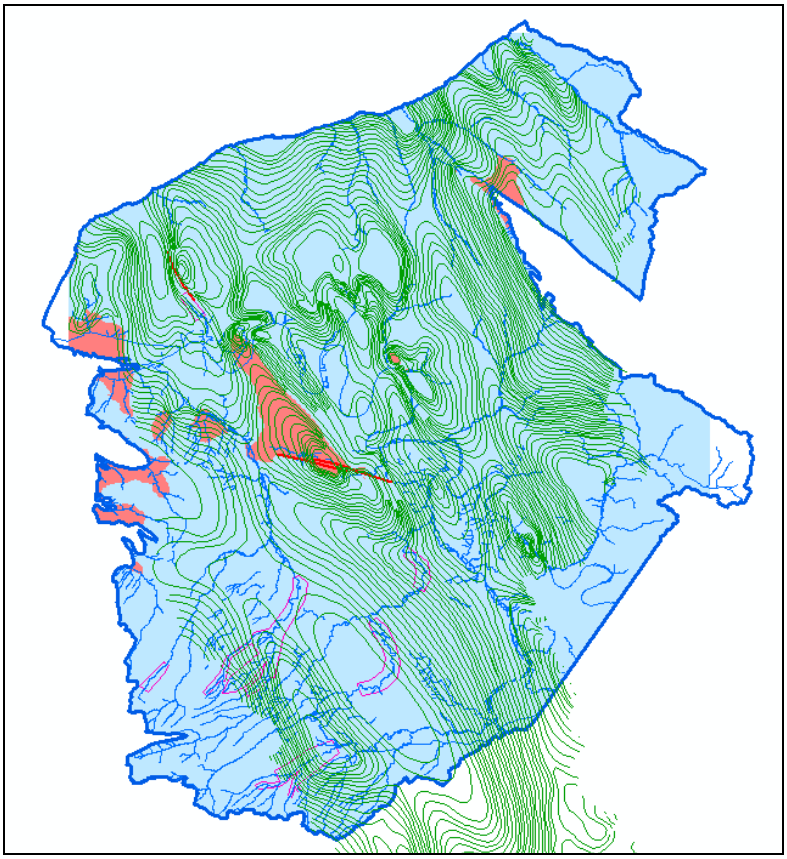


Illustration 26 - Secteurs problématiques où la surface piézométrique calculée pour 2006 se situe sous le mur de la craie (en rouge, la différence Z2006-Zmur varie de -74 à 0 m). Les secteurs en bleu sont cohérents. En vert, les courbes isohypses du mur de la craie.

9) comparaison critique de la carte piézométrique de « moyennes eaux » avec les cartes piézométriques moyennes eaux réalisées dans les régions voisines : département d'Eure-et-Loir (carte éditée en mars 2006,), département du Calvados (octobre 2007), départements de l'Oise et de la Somme (novembre 2007) ;

   a) la grille de la cote piézométrique de « moyennes eaux » a été créée en calculant la moyenne des grilles 2001 et 2006 validées suite aux tests de cohérence (cf. Illustration 27). L'altitude de la piézométrie de « moyennes eaux » résultante varie entre -4 et 304 m NGF, avec une moyenne à 93.6 m NGF ;

   b) le travail de comparaison a été réalisé en superposant les isopièzes obtenues (cf. méthodologie pour les obtenir au chapitre 3.1.9.) avec celles des régions voisines (cf. Illustration 28) ;

   c) pour la craie du département du Calvados, les isopièzes se superposent assez bien à 10 à 20 m NGF près et les mêmes sens d'écoulement sont identifiés

(même intervalle tous les 10 m), sauf au niveau de quelques rivières (gradient piézométrique plus élevé sur les isopièzes du Calvados) ;

d) dans le département d'Eure-et-Loir (intervalle tous les 5 m), les isopièzes se superposent assez bien à 5 à 10 m près et les mêmes sens d'écoulement sont identifiés ;

e) dans le département de l'Oise, les isopièzes se superposent bien (cotes altimétriques similaires) et les mêmes sens d'écoulement sont identifiés (même intervalle tous les 10 m) ;

f) dans le département de la Somme, les isopièzes se superposent bien et les mêmes sens d'écoulement sont identifiés (même intervalle tous les 10 m), cependant certains dômes piézométriques sont un peu décalés ;

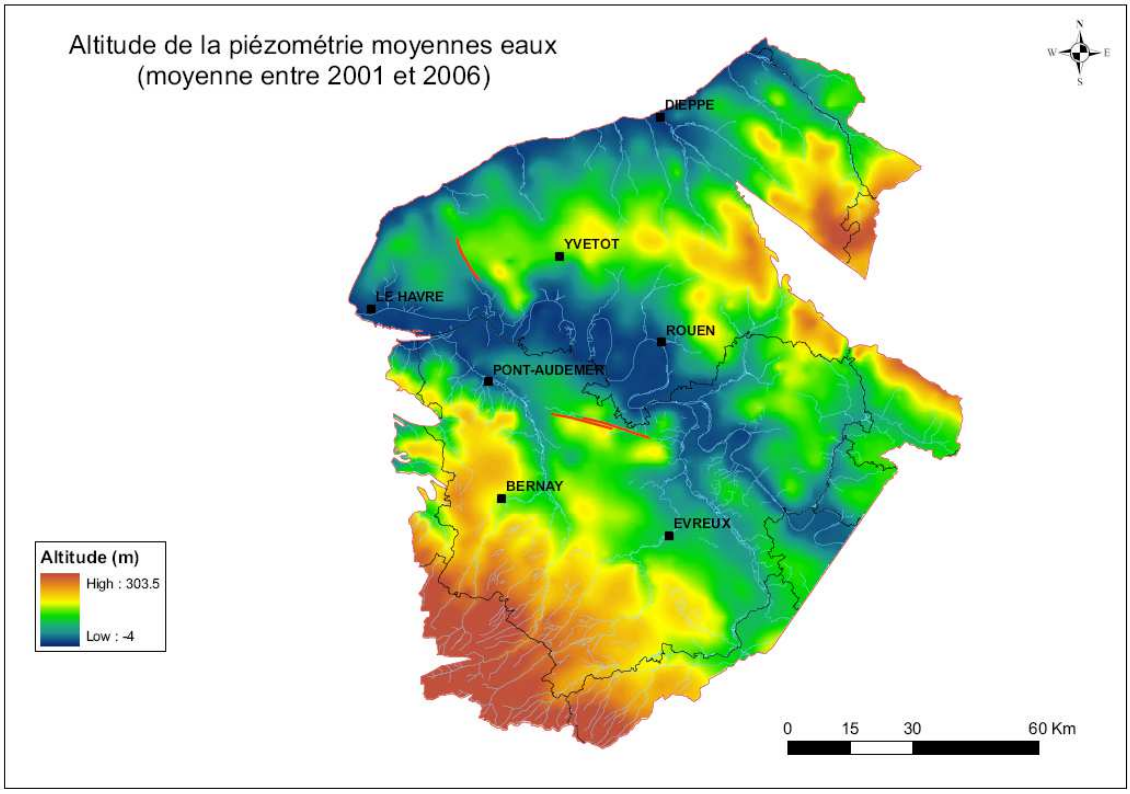


Illustration 27 - Piézométrie de « moyennes eaux » (moyenne entre 2001 et 2006)

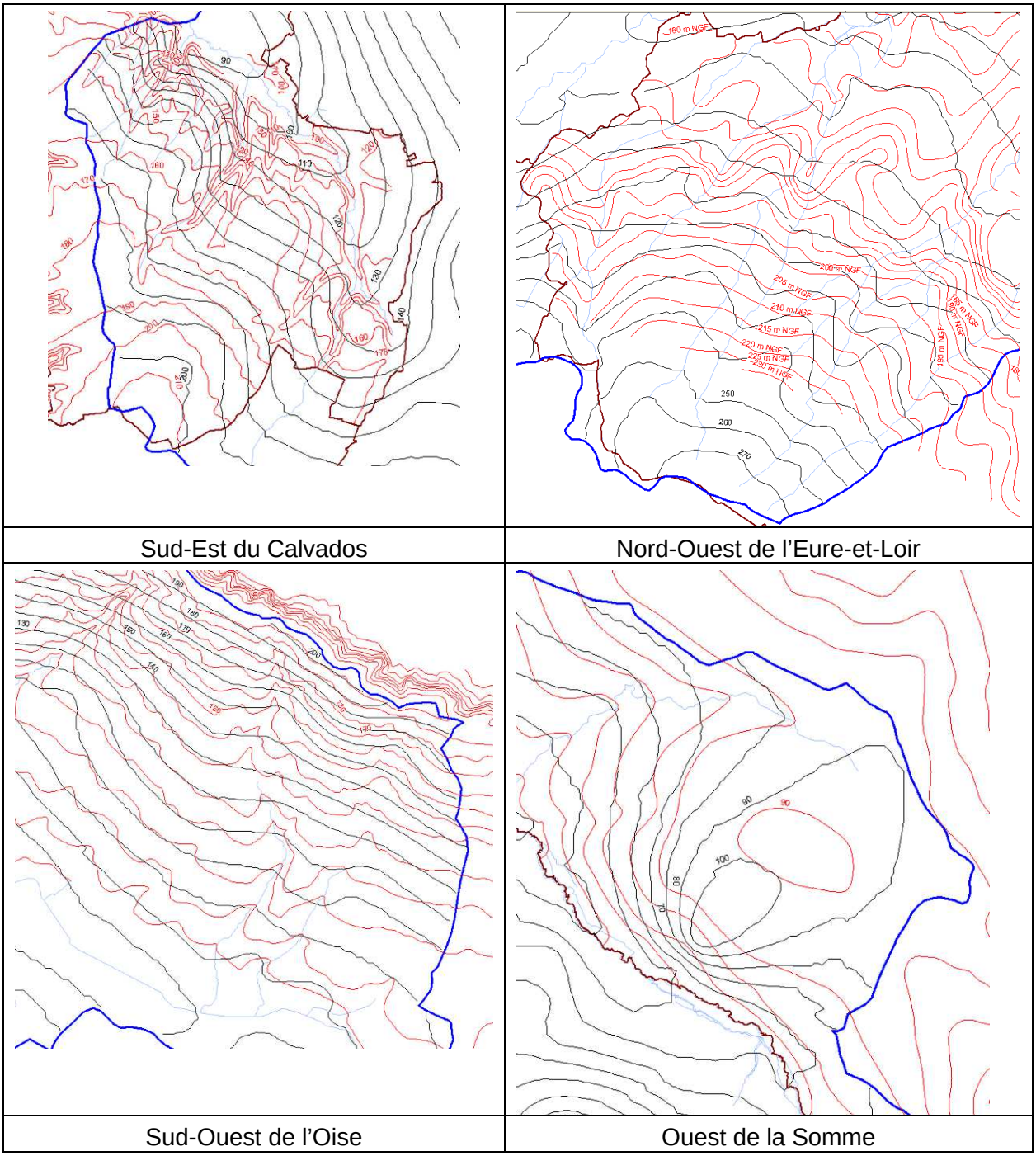


Illustration 28 - Superposition des anciennes isopièzes de moyennes eaux (en rouge) avec celles établies dans le cadre de cette étude (en noir). Les limites départementales sont en marron.

10) comparaison critique avec les cartes piézométriques précédemment réalisées dans le département de l'Eure (1989 et 2004) et dans celui de Seine-Maritime (1990 et 1998). Pour ces contrôles, les cartes de 1989-1990 ont été privilégiées (méthodes utilisées : différences de grilles et superposition des isopièzes) ;

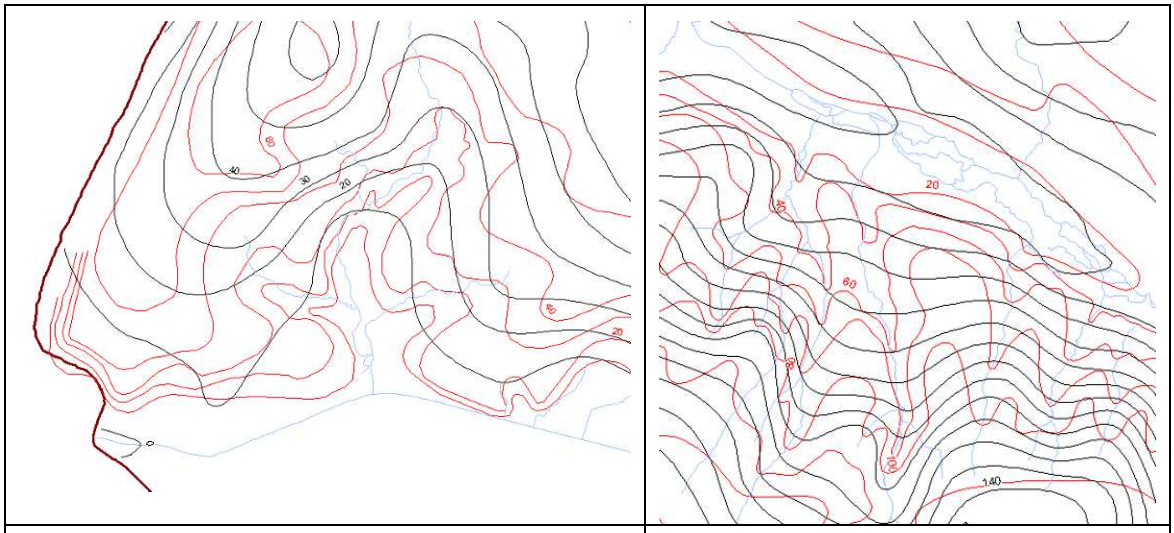
a) à l'issue du premier travail de krigeage, des secteurs très divergents ont été mis en évidence (dôme piézométrique en 2001-2006 non identifié en 1990, cuvette et dôme, courbes isopièzes perpendiculaires au littoral…). Plusieurs corrections ont été effectuées (correction d'altitudes, suppression de points de rivière drainant le Tertiaire, prise en compte de sources littorales…) et un nouveau travail de krigeage a été relancé ;

b) la seconde comparaison a fait apparaître quelques différences locales banales (les points de mesure 2001-2006 ne sont pas les mêmes que ceux relevés dans les années 90) ; elle a aussi soulevé d'autres questions : des différences au droit des petits thalwegs (voir notamment les deux secteurs de l'Illustration 29), et une différence importante dans l'allure des courbes piézométriques du secteur compris entre les rivières de l'Eaulne et de l'Arques ;

c) les courbures visibles à proximité des thalwegs sur les cartes de 1989-1990 semblent exagérées et/ou parfois fausses, sans doute du fait de dessins « à la main » pour bien indiquer que les cours d'eau sont drainants[4]. Le travail mené dans le cadre de la présente étude sur les rivières temporaires (points rivières utilisés en 2001 et enlevés en 2006) apporte un avantage par rapport aux anciennes cartes. Cependant, il existe des zones où les cartes de 1989-1990 semblent plus proches de la réalité que celle de 2011 car la piézométrie suit la géomorphologie (exemple : vallée sèche de Bosville et vallée du Dun…). Ceci vient de ce que les jeux de données 2001 et 2006 comportent très peu de points de mesure au voisinage des cours d'eau et des vallées sèches (manque de densité) ;

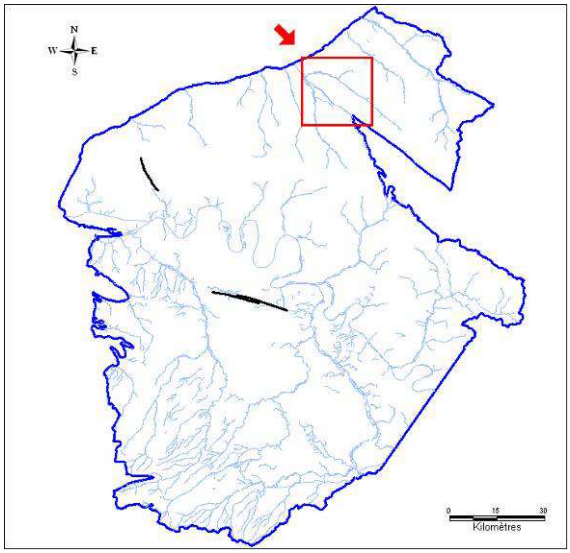
d) des corrections manuelles du tracé des isopièzes ont été effectuées entre les rivières de l'Eaulne et de l'Arques (cf. Illustration 30). Dans ce secteur, en effet, comme déjà indiqué, la piézométrie de 2001 descendait sous celle de 2006 (cf. Illustration 24). Les corrections apportées entraînaient sur la carte de 2011 une représentation de basses eaux affectées aux moyennes eaux. Pour remédier à cette erreur, la carte 2011 a été modifiée en recopiant celle de 1990 sur le secteur problématique (cf. Illustration 30).

[4] On peut également indiquer que la méthodologie d'établissement des cartes départementales de 1989 et 1990 n'est pas précisée dans les notices associées aux cartes. La notice de Seine-Maritime mentionne seulement « Bien qu'elle (carte piézométrique à 1/100 000) soit constituée par le raccordement des cartes à 1/50 000 élaborés sur plus de 10 ans, cette carte donne une image assez précise de la surface de la nappe et de l'organisation des écoulements ».

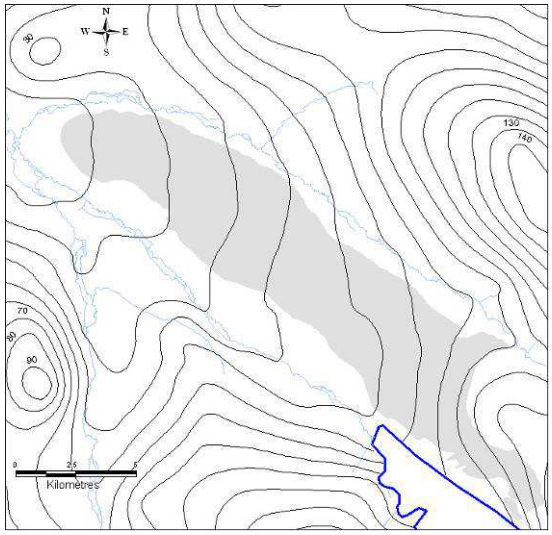


Rivière de la Lézarde (Seine-Maritime)	Sud immédiat de Pont-Audemer (Eure)

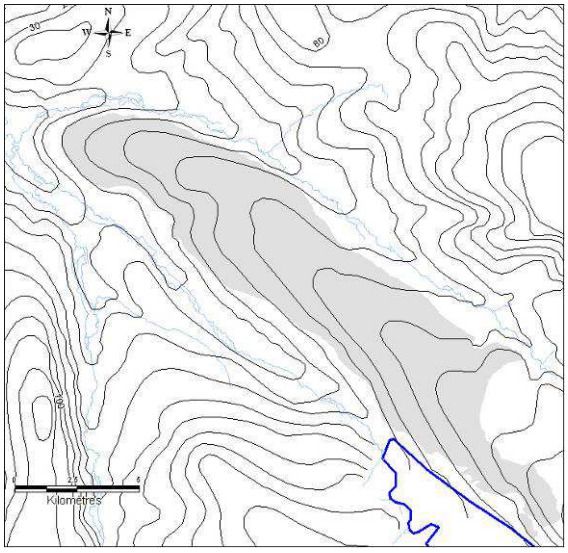
Illustration 29 - Exemples de courbure des isopièzes en 1990 (en rouge) à proximité des petits thalwegs (courbures moins marquées en 2011, en noir)



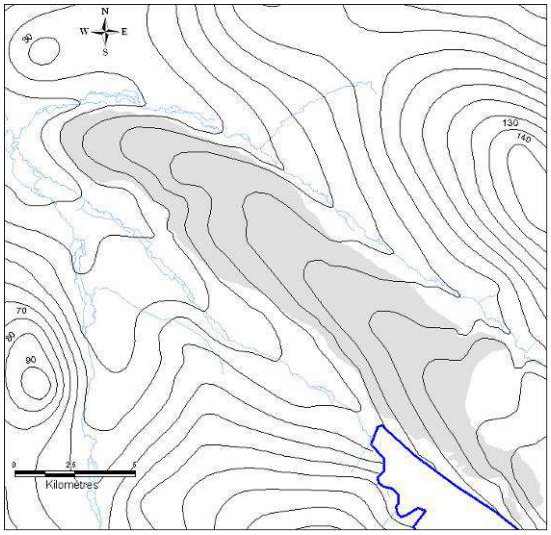
1) Secteur où la correction des isopièzes 2011 a été effectuée



2) Isopièzes 2011 avant correction (en grisé le secteur travaillé)



3) Isopièzes de 1990



4) Isopièzes 2011 après correction

Illustration 30 - Correction des isopièzes moyennes eaux dans le secteur Eaulne-Arques

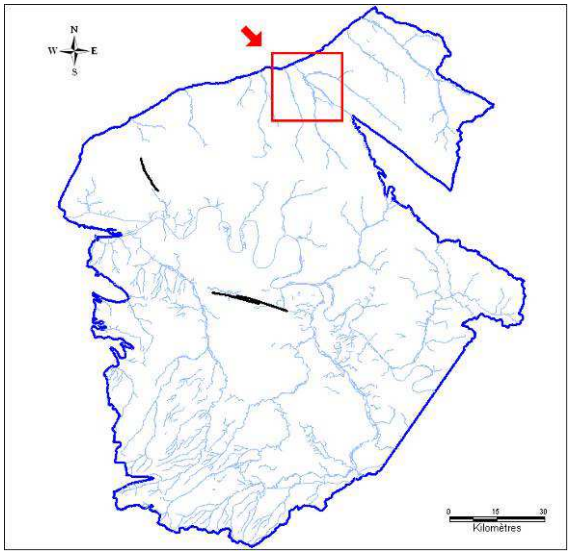
3.1.9. Nettoyage graphique

La grille de la surface piézométrique de moyennes eaux a permis de tracer des isolignes espacées tous les 10 m (utilisation des outils ArcGis et Spatial Analyst). Elles constituent les isopiézes « brutes », avant nettoyage et lissage.

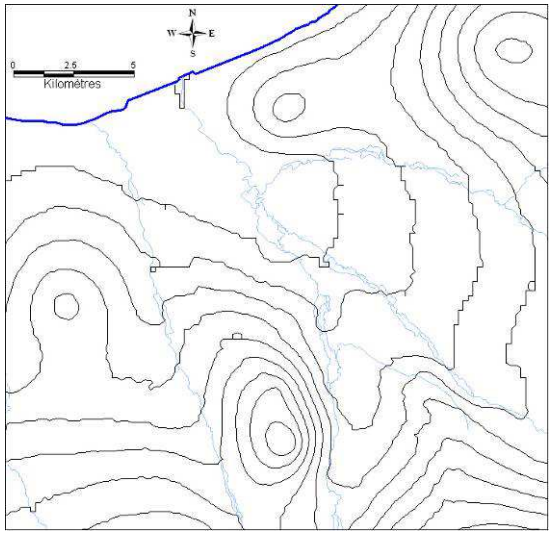
Le travail de nettoyage a consisté à (cf. Illustration 31) : supprimer les traits dont la longueur était inférieure à 0.4 km, éliminer les boucles / angles droits / pointes / marches d'escalier liées à la maille carrée, redessiner les isopiézes en marches d'escalier à proximité des failles, traiter les lignes en limite du secteur d'étude, enlever les cercles dont la superficie était inférieure à 0.46 km^2 (rayon de 0.38 km, périmètre < 2.4 km), rassembler les morceaux d'isopièzes côtières.

Les isopièzes nettoyées ont ensuite été lissées grâce à un outil ArcInfo utilisant la méthode PAEK[5] avec une tolérance de lissage de 1 km (cf. Illustration 31).

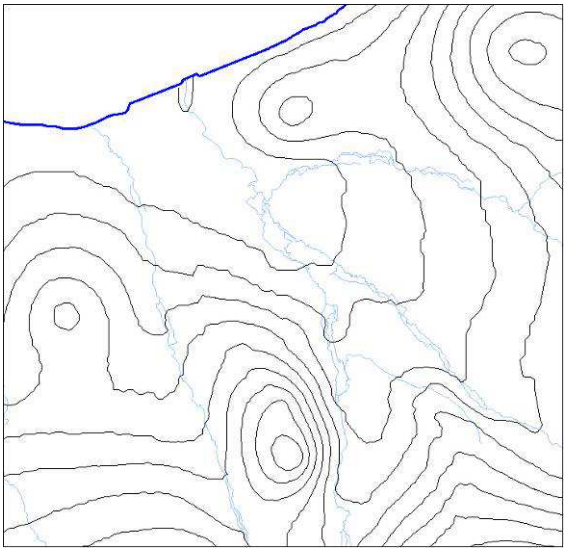
[5] PAEK signifie Polynomial Approximation with Exponential Kernel (approximation polynomiale avec noyau exponentiel). Il s'agit d'un algorithme de lissage.



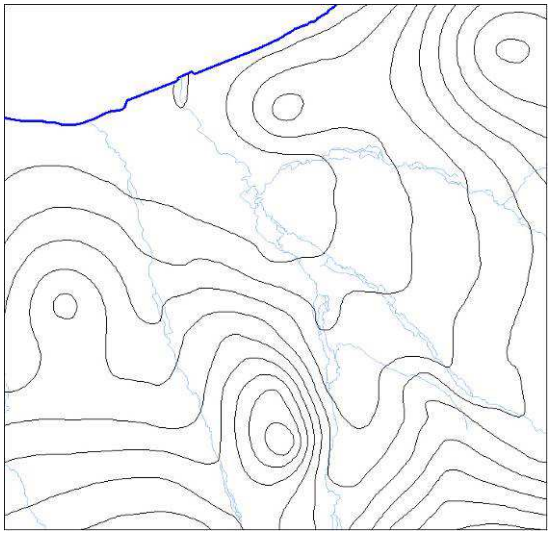
1) Secteur où se situe l'exemple du travail sur les isopièzes



2) Isopièzes avant nettoyage graphique



3) Isopièzes après nettoyage graphique



4) Isopièzes après nettoyage graphique et opération de lissage

Illustration 31 - Étapes du nettoyage graphique et du lissage des isopièzes moyennes eaux de la craie

3.2. CRÉATION DE L'ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL EN VERSION PAPIER (ÉCHELLE À 1/100 000)

3.2.1. Mise en page de l'atlas régional

L'objectif de cette mise en page était d'éditer une carte à 1/100 000 habillée autour des isopièzes de la surface piézométrique de moyennes eaux. Cette surface ayant été constituée en faisant la moyenne de la piézométrie de très hautes eaux 2001 et de basses eaux 2006, il était important d'encadrer sa validité par les incertitudes associées aux interpolations par krigeage. Il a été choisi de représenter le maximum des incertitudes associées à chaque interpolation (maximum des Illustrations 17 et 19). L'écart-type de krigeage (cf. Illustration 32), quantifiant l'erreur associée à la variable « piézométrie moyennes eaux », varie entre 0 et 34 m, avec une moyenne de 10.5 m.

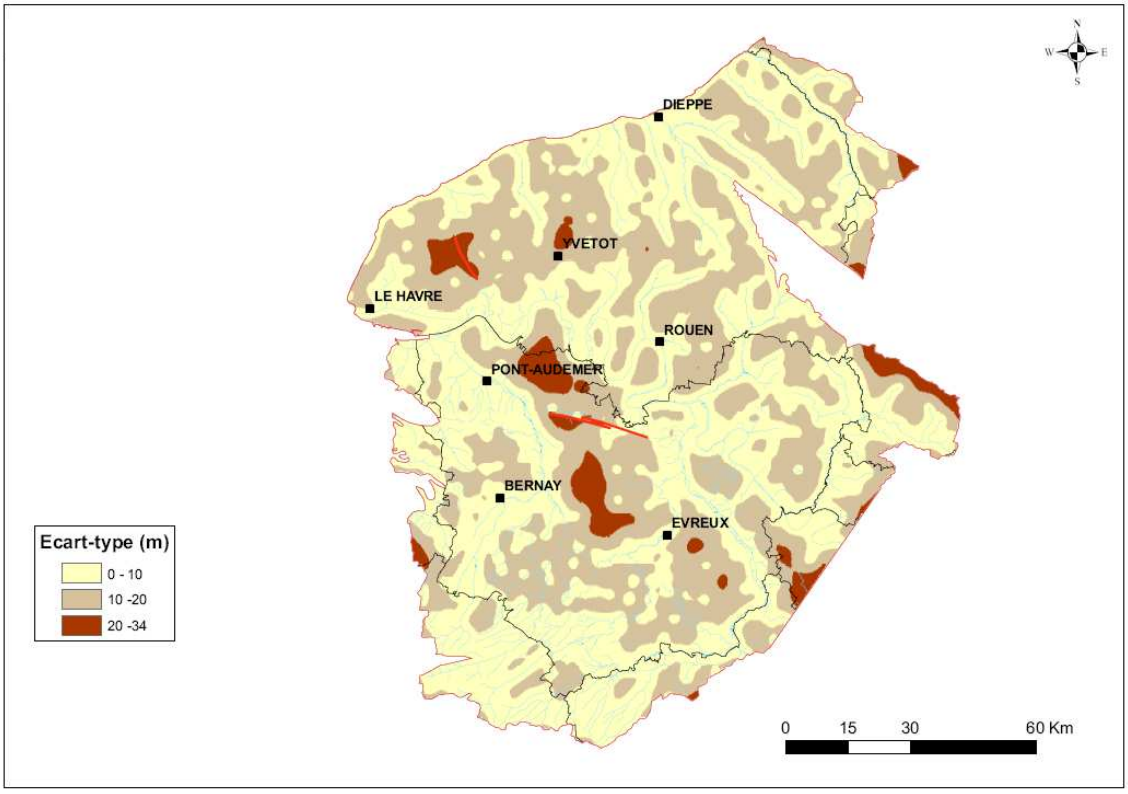


Illustration 32 - Écart-type de krigeage de la piézométrie de moyennes eaux (maxima de 2001 et 2006)

La liste des éléments cartographiques à représenter avec la piézométrie de moyennes eaux a été arrêtée par le Comité de pilotage du projet. Elle est composée de : l'écorché géologique (carte géologique BRGM à 1/1 000 000) avec failles et axes tectoniques, le secteur d'étude avec les failles décalant la piézométrie, le réseau hydrographique, les

sources, les bassins versants hydrologiques, les stations de jaugeage, les traçages positifs, les captages d'alimentation en eau potable (AEP), les forages industriels, les ouvrages du réseau piézométrique de Haute-Normandie, les bétoires, les bassins versants souterrains (voir paragraphe ci-dessous), et les masses d'eau souterraines.

Les bassins versants souterrains ont été tracés à la main sur une impression des isopièzes moyennes eaux de la nappe de la craie. Ce fichier a été scanné puis calé pour être géoréférencé, puis une digitalisation a été réalisée sous MapInfo à l'échelle du 1/100 000. En raison de la grande superficie de trois bassins versants souterrains (Avre-Iton-Eure, Risle-Charentonne et Eaulne-Arques-Béthune-Varenne) et de manière à faire une comparaison avec les bassins versants topographiques, un découpage en sous-bassins versants a été précisé. Le tracé finalisé comporte 70 entités (42 au Nord de la Seine et 28 au Sud). Il est quasi-systématiquement en cohérence avec les résultats des traçages positifs.

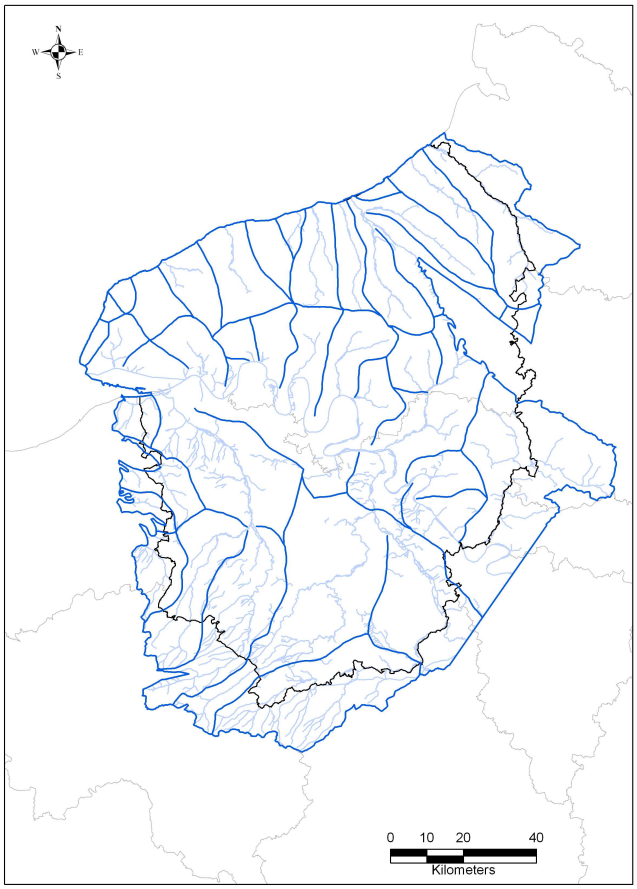


Illustration 33 - Localisation des bassins versants souterrains digitalisés)

Le fond IGN utilisé pour l'impression de cette carte correspond à celui du scan100 à 1/100 000 référencé ©IGN 2009 - SCAN 100®. Il a été mis en noir et blanc avec un certain degré de transparence pour rendre bien visibles les couches sus-jacentes.

La carte principale et sa légende sont associées à plusieurs encarts : incertitudes associées aux interpolations, masses d'eau souterraines, découpage des cartes géologiques à 1/50 000 (ceci permet de raccourcir l'écriture des numéros BSS sur la carte principale), et cartouche de titre (cf. Illustration 34).

Un travail appuyé a été effectué sur la mise en page de l'atlas régional à 1/100 000 de façon à visualiser toutes ces informations sur une carte lisible. Une carte provisoire a été présentée aux membres du Comité de pilotage et tous les avis et corrections ont été pris en compte pour éditer le document final (cf. extrait sur l'Illustration 34).

La carte a été validée par la DREAL le 05/04/2011.

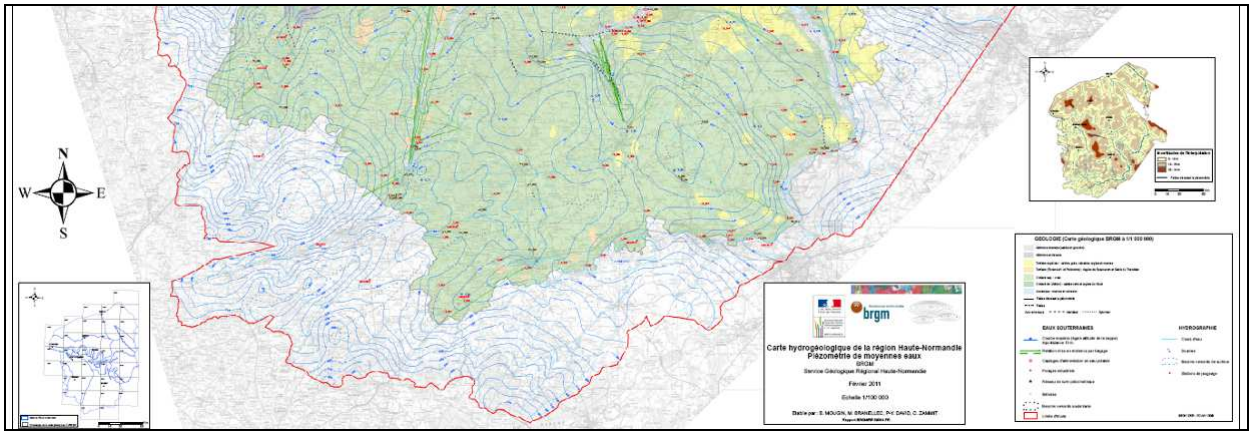


Illustration 34 - Extrait de la carte (échelle à 1/100 000) de l'atlas hydrogéologique régional

3.2.2. Édition en 200 exemplaires

La carte finalisée à l'échelle 1/100 000 avait une dimension de 152 x 172 cm (largeur x hauteur). Étant donné la taille importante de ce document, les membres du Comité de pilotage ont proposé : de couper le document en deux parties (une partie au Nord et l'autre au Sud), et de répartir les 200 exemplaires en 100 pliés et 100 roulés.

Ce découpage a été fait en conservant une zone de recoupement de 12 cm (soit donc 12 km), et chaque partie a été associée à tous les encarts.

L'édition de chaque carte, d'une dimension de 152 x 92 cm, a été réalisée au format PDF en résolution 600 dpi.

La reprographie a été réalisée en avril 2011 par la société TIREX sur du papier 110 grammes résistant à l'eau (dos bleu waterproof).

Les 200 exemplaires de la carte (400 documents en tout) ont été fournis à la DREAL.

3.2.3. Rédaction d'une notice

Une notice explicative accompagne l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie (cf. annexe 2), elle vise à présenter :

- les conditions d'usage des différents documents cartographiques (échelle de validité, etc.) ;
- les conditions climatiques de Haute-Normandie ;
- le contexte géologique de la région ;
- le contexte hydrogéologique (description des différents aquifères, exploitation des eaux souterraines, vulnérabilité des eaux souterraines, etc.).

3.3. PISTES D'AMÉLIORATION DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE

Pour la réalisation d'une future carte du même type, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être proposées :

- de façon à ce que la nappe de la craie suive mieux la géomorphologie, il faudrait concevoir des campagnes piézométriques qui incluraient des points de mesure encadrant les principales vallées sèches ou humides (cf. Illustration 29) :
    - vallée (humide) de la Lézarde à l'Ouest de la Seine-Maritime : prévoir des points de mesure intermédiaires en plateau entre chacun des cours d'eau ;
    - vallées sèches : de Bosville au Nord de la Seine-Maritime, de St-Symphorien - La Prémonderie au Sud-Ouest immédiat de Pont Audemer dans l'Eure. En effet les vallées sèches représentent des zones où la craie est fracturée, donc des zones de drainage pour l'aquifère ;
- pour mieux caractériser la piézométrie de la nappe de la craie, il faudrait ajouter des points de mesures, lors des campagnes piézométriques, dans les secteurs problématiques où la piézométrie de 2001 passait en-dessous de celle de 2006 (cf. Illustration 23) ;
- il serait intéressant de bénéficier d'une version de BD-Carthage plus précise mentionnant les rivières temporaires, les drains agricoles, et les fossés de route (distinction des rivières temporaires et des fossés de route). Cela permettrait d'affiner les jeux de points du réseau hydrographique ;

- dans ce même registre, l'utilisation des cartes de cours d'eau réalisées par les Services de la Police de l'Eau pourrait être pertinent ;
- enfin, de façon à diminuer les risques de croisement de la piézométrie de 2001 et de 2006, il faudrait créer un fichier unique comportant pour chaque point les mesures de hautes eaux et de basses eaux (en un point donné on peut avoir soit une mesure hautes eaux seulement, soit basses eaux seulement, soit les deux). Ceci permettrait de réaliser une interpolation bivariable (cokrigeage) qui par construction limite fortement les risques de croisement.

4. Traitements cartographiques

4.1. ÉLABORATION DES CARTES DÉRIVÉES

Suite aux travaux cartographiques énumérés, différentes cartes ont été obtenues par traitement SIG (sous forme de grilles ou de polygones) :

- une carte piézométrique régionale de moyennes eaux (évoquée au chapitre 3.1.8.) ;
- une carte de délimitation des bassins versants souterrains en conditions de moyennes eaux (évoquée au chapitre 3.2.1.) ;
- trois cartes d'épaisseur de la zone non saturée (différences de grilles) (hautes, moyennes et basses eaux, cf. Illustration 35, Illustration 36, et Illustration 37) ;
    - l'épaisseur de la zone non saturée en hautes eaux varie entre 0 et 150 m, avec une moyenne à 37.3 m ;
    - l'épaisseur de la zone non saturée en basses eaux varie entre 0 et 153 m, avec une moyenne à 44.5 m ;
    - l'épaisseur de la zone non saturée moyennes eaux varie entre 0 et 150 m, avec une moyenne à 40.9 m ;
    - la zone non saturée semble assez épaisse à l'exutoire de l'aquifère en vallée de Seine, comme c'est par exemple le cas dans le secteur de Bourg Achard/Moulineaux (Eure). Ce secteur est en effet situé sur une rive concave de la Seine (fort contraste de topographie entre le fond de la vallée de la Seine et le plateau du fait de la présence de falaises). La piézométrie est quant à elle contrôlée par le niveau de base que représente la Seine et fortement drainée sous les plateaux par une karstification intense dans ce secteur ;
- une carte du battement inter-annuel (différence de grilles : situation 2001 - situation 2006, cf. Illustration 38) ;
    - ce battement varie entre 0 et 89 m, avec une moyenne à 7.1 m.
- trois cartes d'épaisseur de la craie mouillée (différences de grilles) (hautes, moyennes et basses eaux, cf. Illustration 39, Illustration 40, et Illustration 41) ;
    - l'épaisseur de la craie mouillée en hautes eaux varie entre 0 et 364 m, avec une moyenne à 115.5 m ;
    - l'épaisseur de la craie mouillée en basses eaux varie entre 0 et 351 m, avec une moyenne à 108.3 m ;
    - l'épaisseur de la craie mouillée en moyennes eaux varie entre 0 et 354 m, avec une moyenne à 111.9 m ;

- les cartes d'épaisseurs de la craie mouillée font globalement apparaître la structure du mur de la craie avec, côté Eure, un monoclinal plongeant du SW vers le NE (l'épaisseur de craie mouillée augmente vers le Centre du Bassin Parisien), structuré par une succession d'ondulations synclinales (succession d'axes d'épaisseur de craie mouillée plus importante : axe Verneuil-sur-Avre/Bernay (synclinal de Piencourt-Verneuil), axe de la vallée de l'Eure (Synclinal de l'Eure), axe Dieppe/Blainville-Crevon) ;

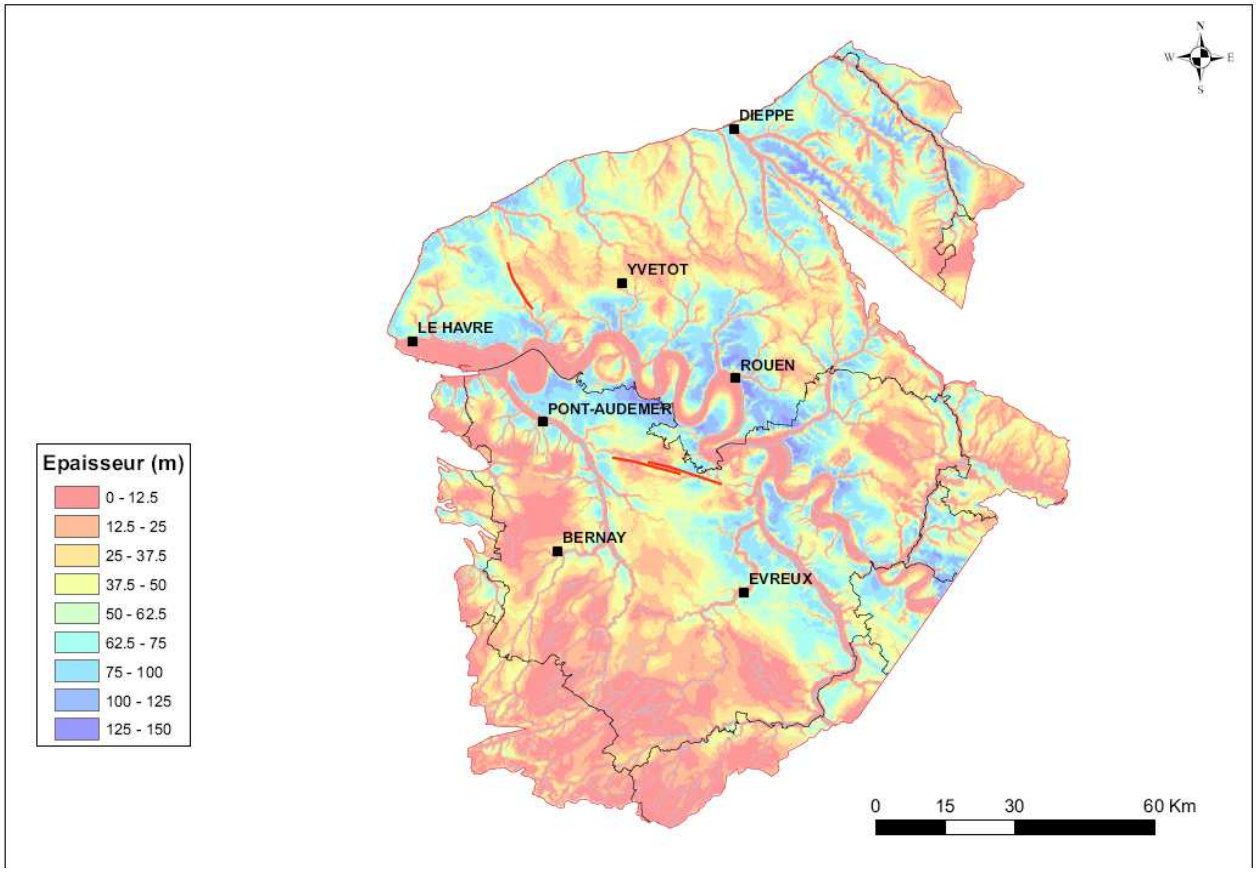


Illustration 35 - Épaisseur de la zone non saturée en période de très hautes eaux (2001)

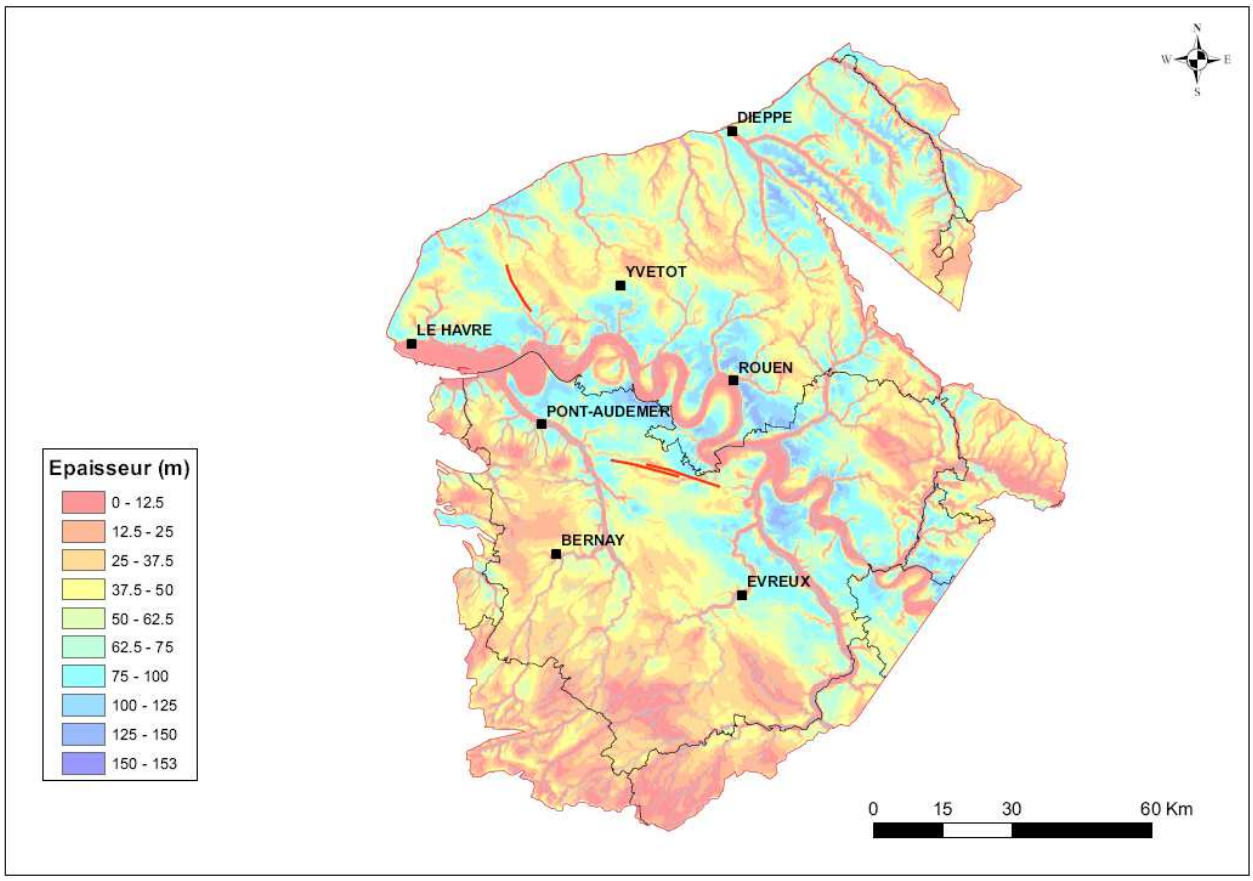


Illustration 36 - Épaisseur de la zone non saturée en période de basses eaux (2006)

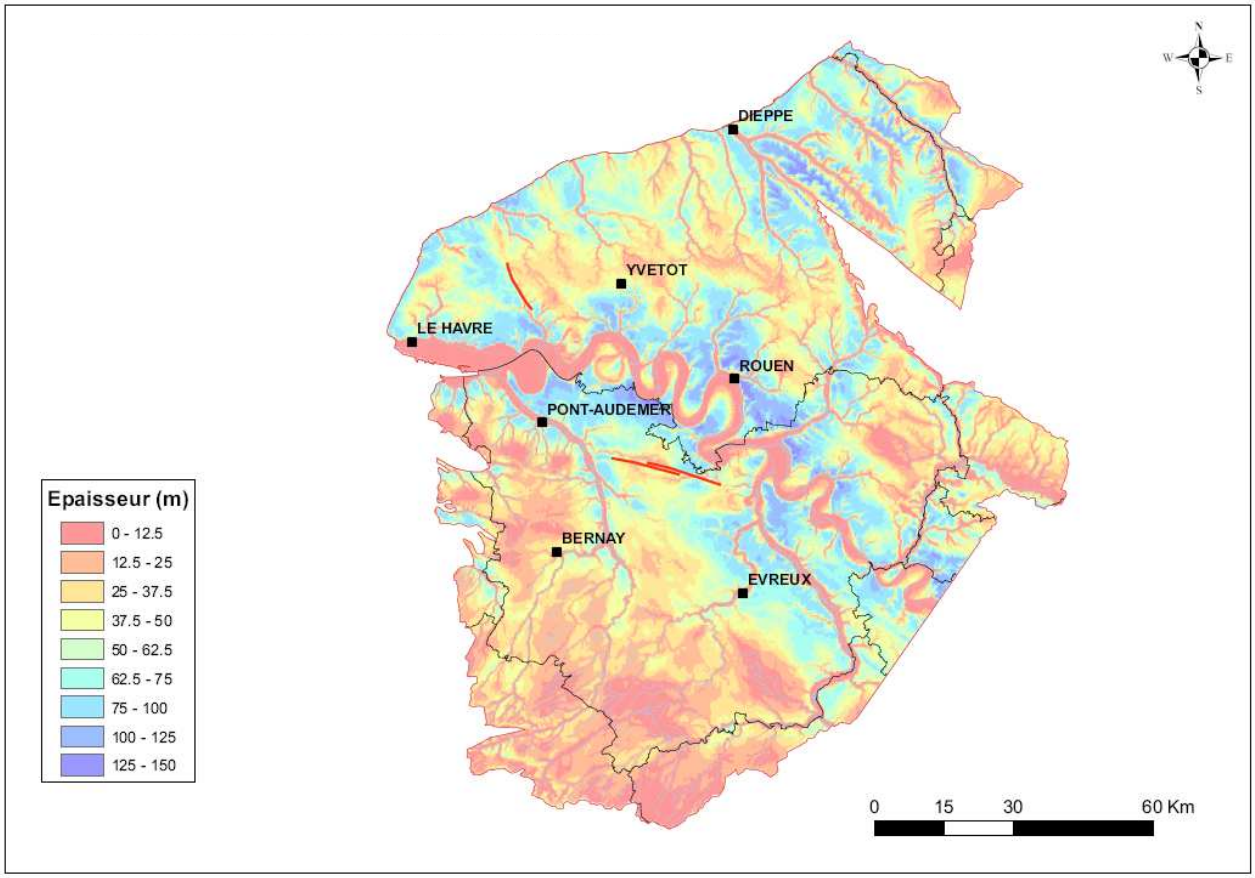


Illustration 37 - Épaisseur de la zone non saturée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)

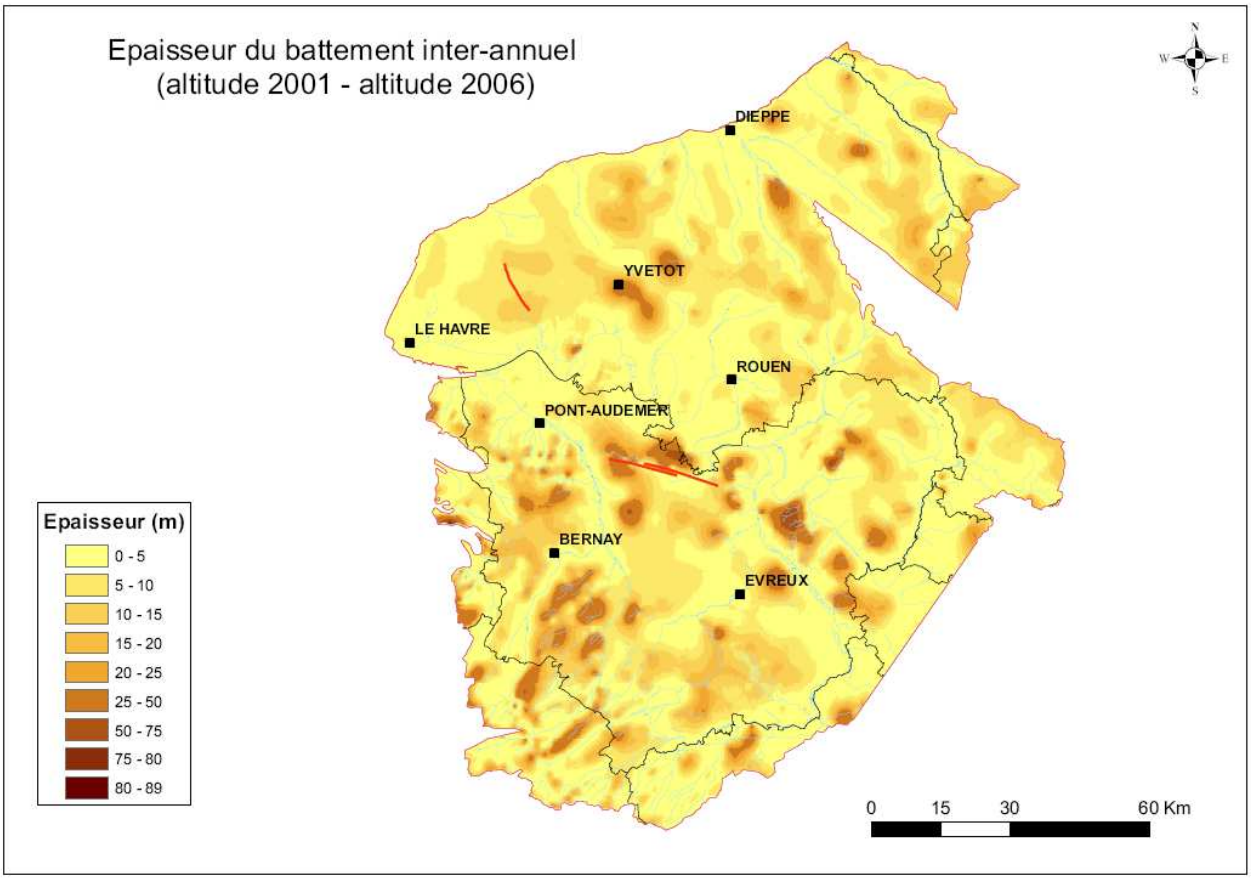


Illustration 38 - Épaisseur du battement inter-annuel (altitude 2001 - altitude 2006)

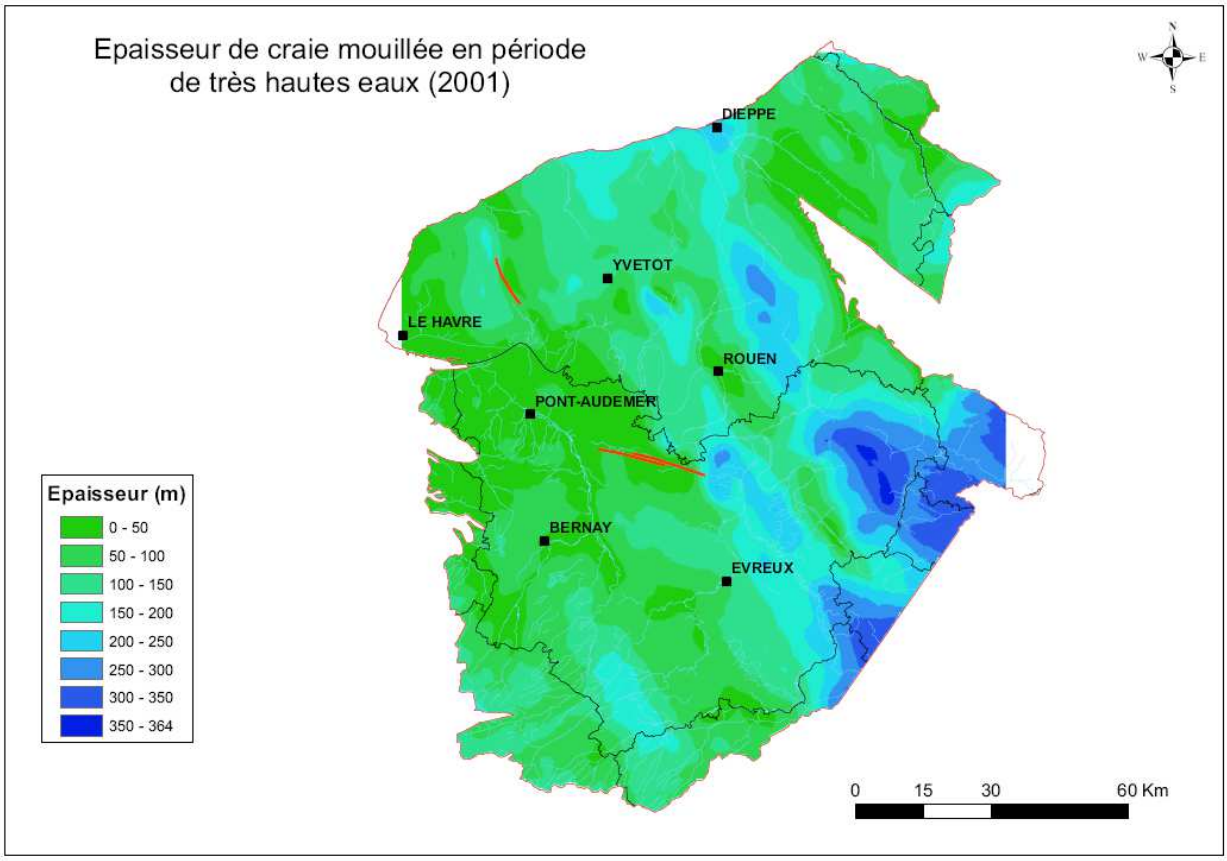


Illustration 39 - Épaisseur de craie mouillée en période de très hautes eaux (2001)

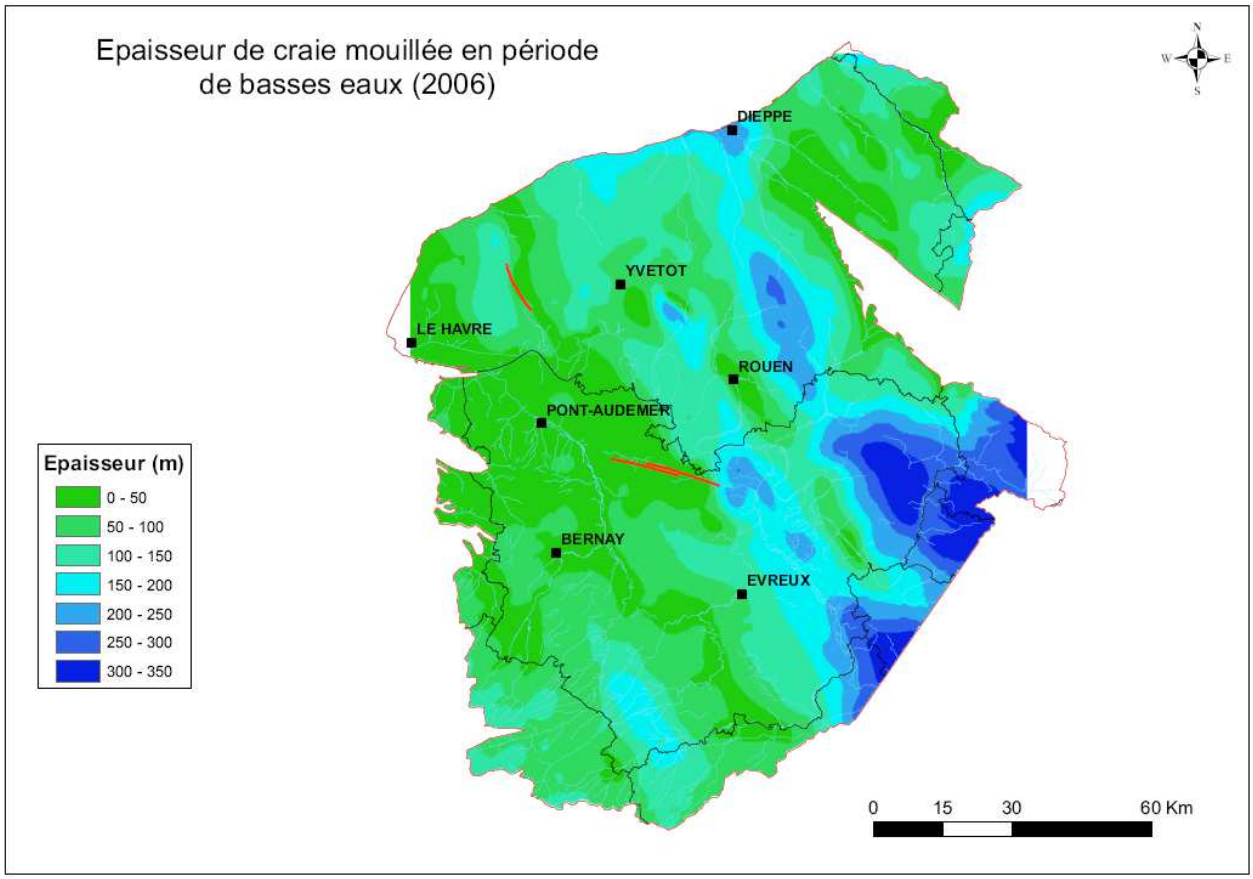


Illustration 40 - Épaisseur de craie mouillée en période de basses eaux (2006)

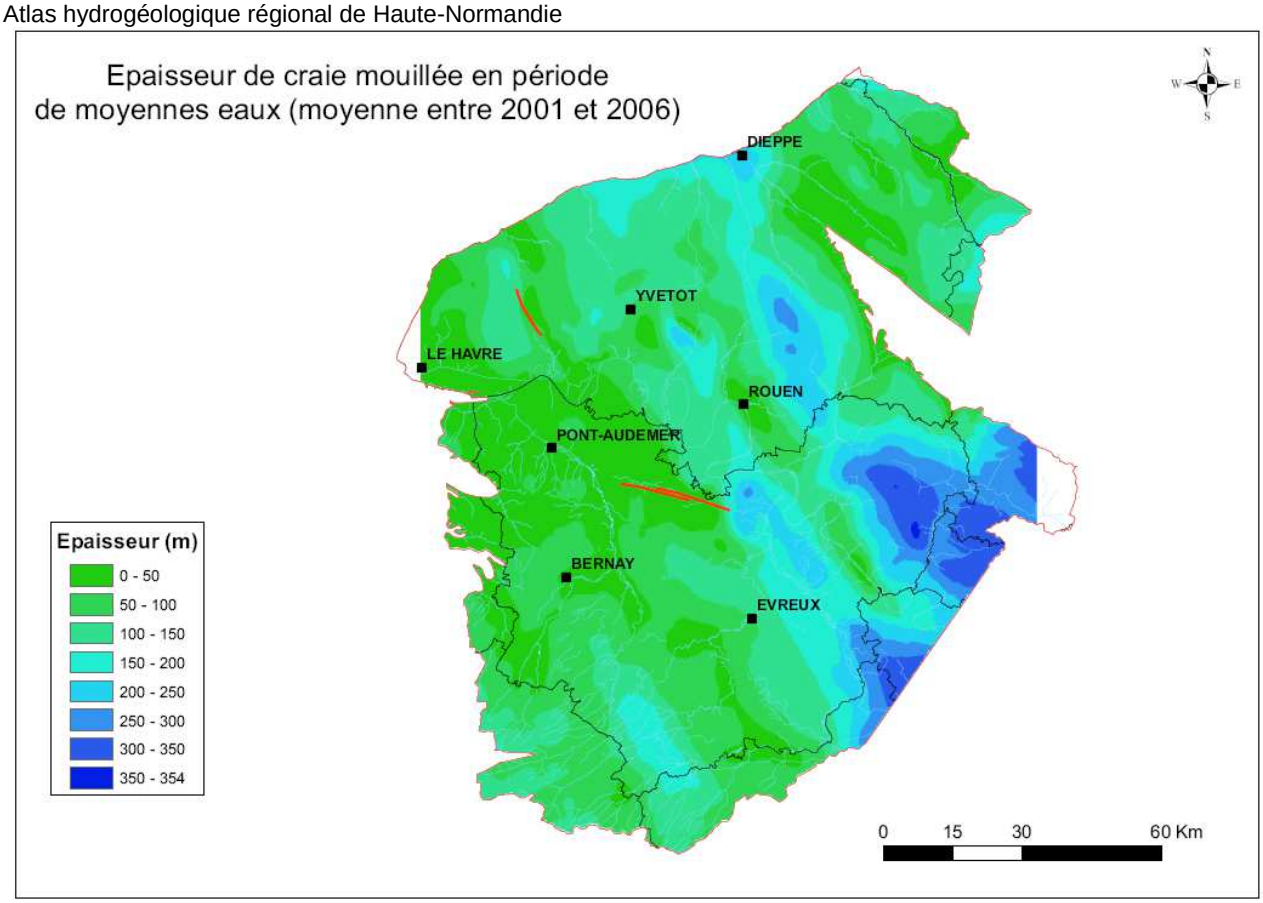
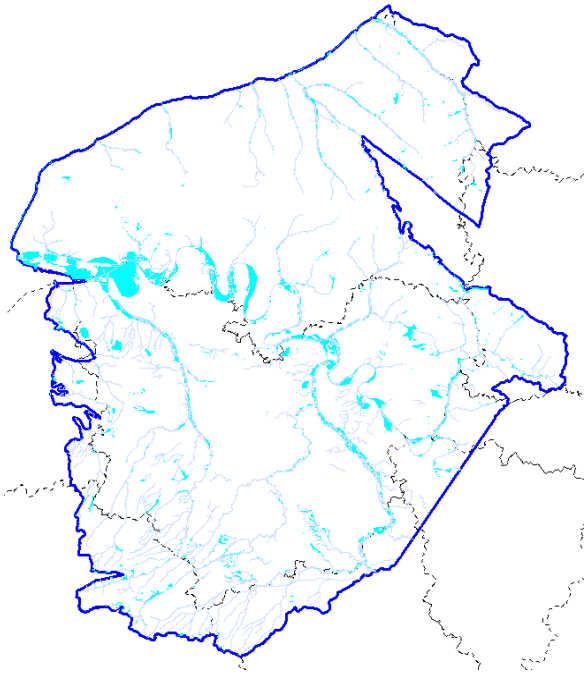


Illustration 41 - Épaisseur de craie mouillée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)

- une carte croisant la limite topographique et la nappe de hautes eaux afin de délimiter une zone dite « nappe d'accompagnement du cours d'eau » (secteurs où la nappe de hautes eaux affleure, c'est-à-dire où l'épaisseur de la zone non saturée est nulle en hautes eaux) ;
    - les pixels de la grille sur lesquels la surface piézométrique de 2001 était supérieure ou égale à la topographie ont été sélectionnés puis assemblés. Cet assemblage a été transformé en un polygone unique qui forme la zone dite « nappe d'accompagnement du cours d'eau » (cf. Illustration 42) ;
- une carte croisant la limite topographique et la nappe de basses eaux afin de délimiter une zone dite « limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau » (secteurs où la nappe de basses eaux affleure, c'est-à-dire où l'épaisseur de la zone non saturée est nulle en basses eaux) ;
    - les pixels de la grille sur lesquels la surface piézométrique de 2006 était supérieure ou égale à la topographie ont été sélectionnés puis assemblés. Cet assemblage a été transformé en un polygone unique qui forme la zone dite « limite d'assec de la nappe d'accompagnement de cours d'eau » (cf. Illustration 42).

De façon à disposer de document d'aide à la décision sur la limite nappe de la craie / nappe alluviale, qui constitue une notion administrative pour les Services en charge de la Police de l'Eau, la DREAL a demandé au BRGM de créer une carte complémentaire sur « la limite potentielle de la nappe alluviale ».

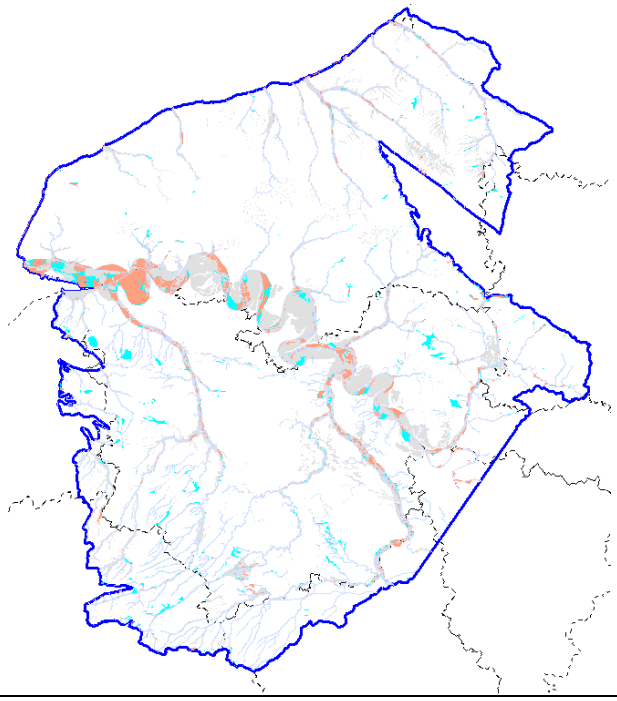
Cette limite a été établie en utilisant le travail réalisé sur les alluvions dans le Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA (Lereculey A. et al., 2010, Rapport BRGM/RP-57518-FR). Les affleurements d'alluvions des cartes géologiques départementales harmonisées à 1/50 000 du BRGM ont été isolés puis assemblés dans un polygone unique qui renseigne sur « la limite potentielle de la nappe alluviale » (cf. Illustration 42).



« nappe d'accompagnement du cours d'eau »

« limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau »

« la limite potentielle de la nappe alluviale »



Superposition des 3 limites

Illustration 42 - Localisation des zones dites « nappe d'accompagnement du cours d'eau » (en bleu) et « limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau » (en orange), sur fond d'alluvions (en gris)

4.2. ÉLABORATION DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES HUMIDES POTENTIELLES EN HAUTE-NORMANDIE

4.2.1. Apport de l'outil IDPR

L'Indice de Persistance et de Développement des « Réseaux » (IDPR) a été créé par le BRGM pour permettre notamment d'initier une carte nationale ou régionale de vulnérabilité des eaux souterraines.

Il permet d'approcher l'aptitude des formations du sous-sol à laisser s'infiltrer les eaux de surface vers le milieu souterrain et réciproquement. La vocation de l'IDPR n'est pas de se substituer aux cartes d'échelle infra départementales, la précision de la méthode ne le permet pas, mais il constitue un indicateur, à l'échelle régionale, d'un état général de vulnérabilité des premières eaux souterraines rencontrées. C'est à ce titre qu'il initie les analyses complémentaires à l'échelle départementale ou plus grande.

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle des observations suivantes : l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent. Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, seules la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. Or, dans le milieu naturel, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques. En effet, la nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement.

La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. À l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée.

L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (Indice de Développement ID), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de Persistance des Réseaux PR). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux (cf. Illustration 43).

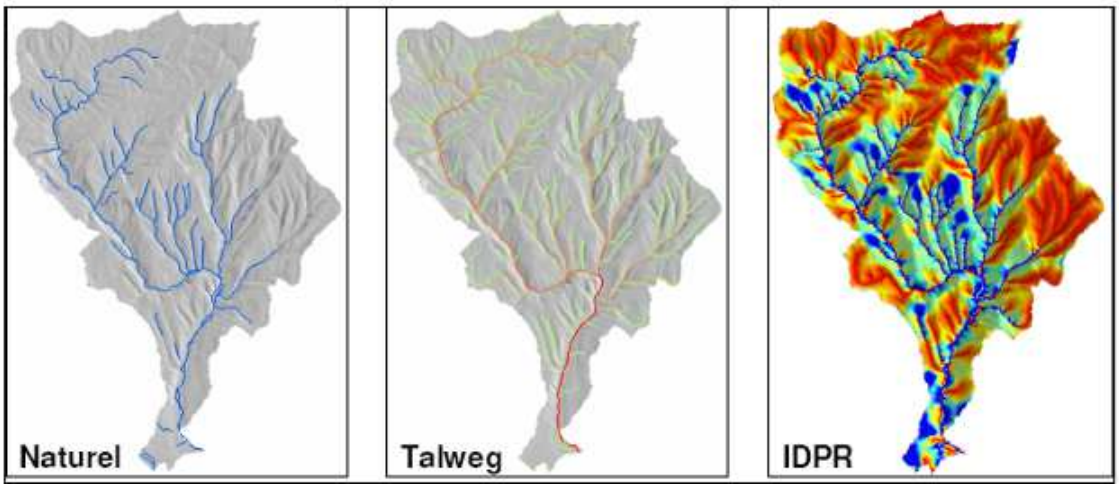


Illustration 43 - Principe de construction de l'IDPR

Sur le secteur d'étude, la carte de l'IDPR dans sa version 2007 (cf. Illustration 44) indique une prédominance du potentiel de l'infiltration (teintes rouges prédominantes, cf. légende sur l'Illustration 45) sur celui de ruissellement.

Les zones où le ruissellement est majoritaire par rapport à l'infiltration (teintes bleues foncées prédominantes) sont localisées à proximité des cours d'eau.

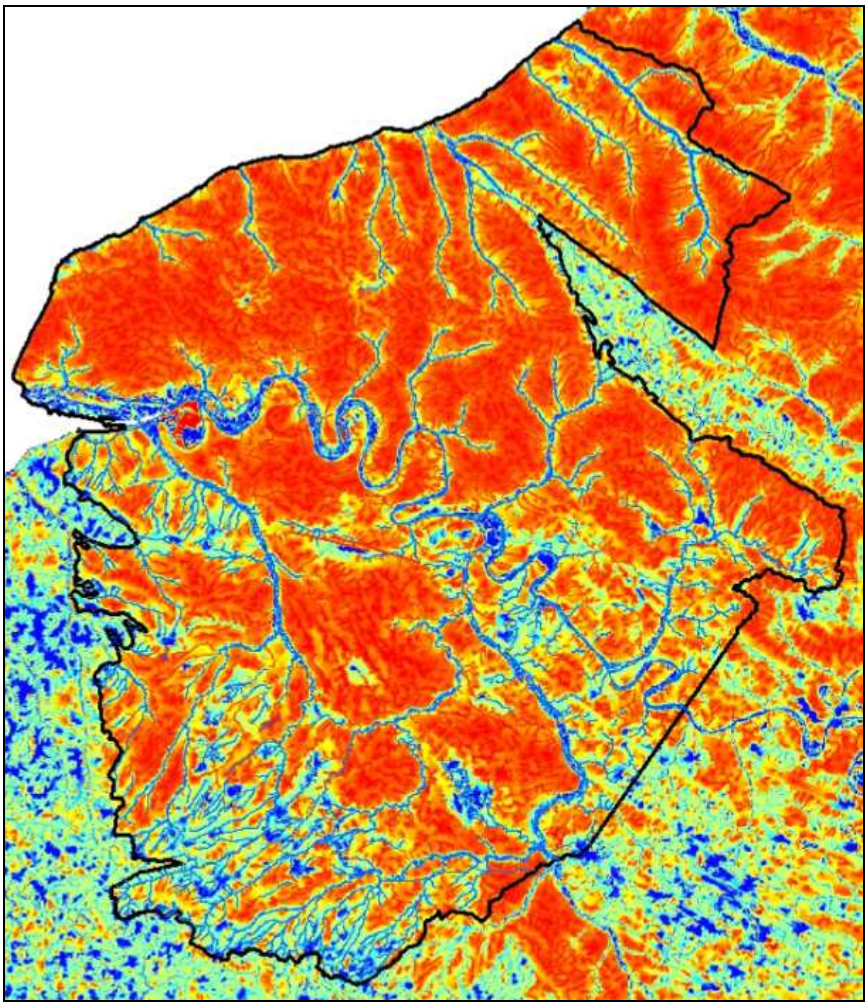


Illustration 44 - IDPR calculé sur le secteur d'étude (version 2007)

IDPR	Interprétation	
<1000	**Infiltration majoritaire Par rapport au Ruissellement superficiel**	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
=1000	**Infiltration et Ruissellement superficiel de même importance**	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place
>1000	**Ruissellement superficiel majoritaire Par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain**	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
> 2000	**Majoritairement assimilable à des milieux humides**	Un IDPR supérieur ou égal à 2000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltre pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides[2] induisant la possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Illustration 45 - Valeurs de l'IDPR

4.2.2. Cartographie des zones humides potentielles

Les secteurs où l'IDPR indique des valeurs supérieures à 2000 sont assimilables à des zones humides potentielles (zones très ruisselantes). Les pixels de la grille ont été sélectionnés puis assemblés. Cet assemblage a été transformé en un polygone unique qui forme la cartographie des zones humides potentielles situées sur le secteur d'étude (cf. Illustration 46).

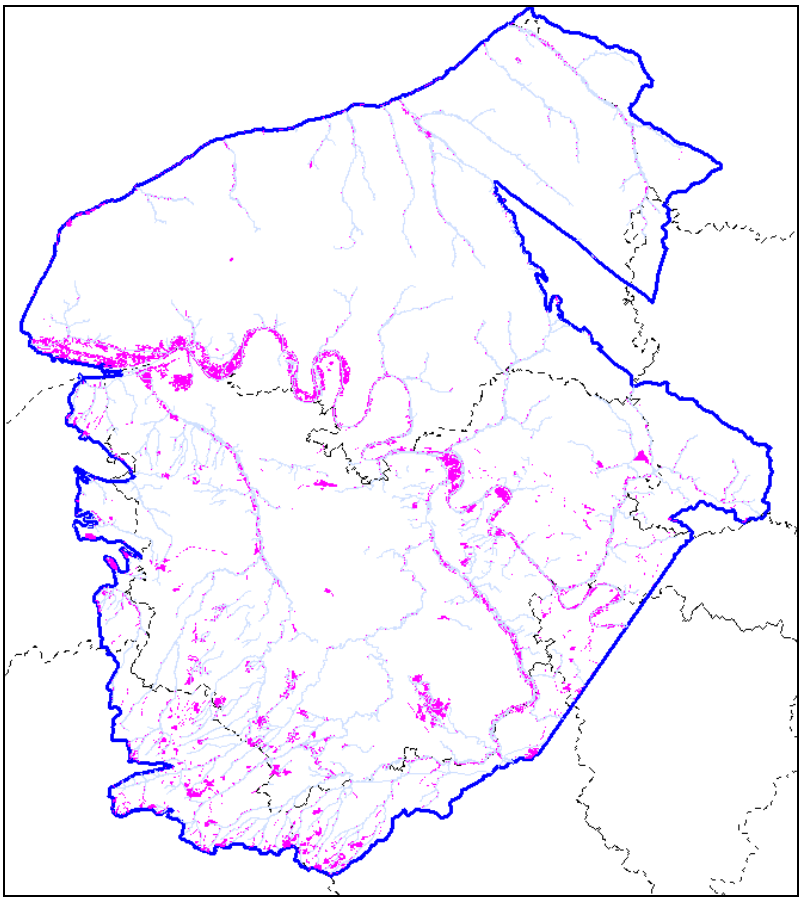


Illustration 46 - Cartographie des zones humides potentielles du secteur d'étude

Pour appréhender la problématique « zones humides », cette carte est avant tout un outil d'aide à la décision à l'échelle de la région Haute-Normandie, avec ces imprécisions. Cette carte ne remplace en aucun cas un inventaire rigoureux des zones humides avec des données de terrain (approche naturaliste).

La cartographie des zones humides de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) d'avril 2006 a été téléchargée sur le site Internet du SIGES Seine-Normandie (Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines, http://sigessn.brgm.fr/spip.php?rubrique10#zdh). L'échelle de précision est le 1/50 000 et 8 types de zones humides sont décrits (cf. Illustration 47).

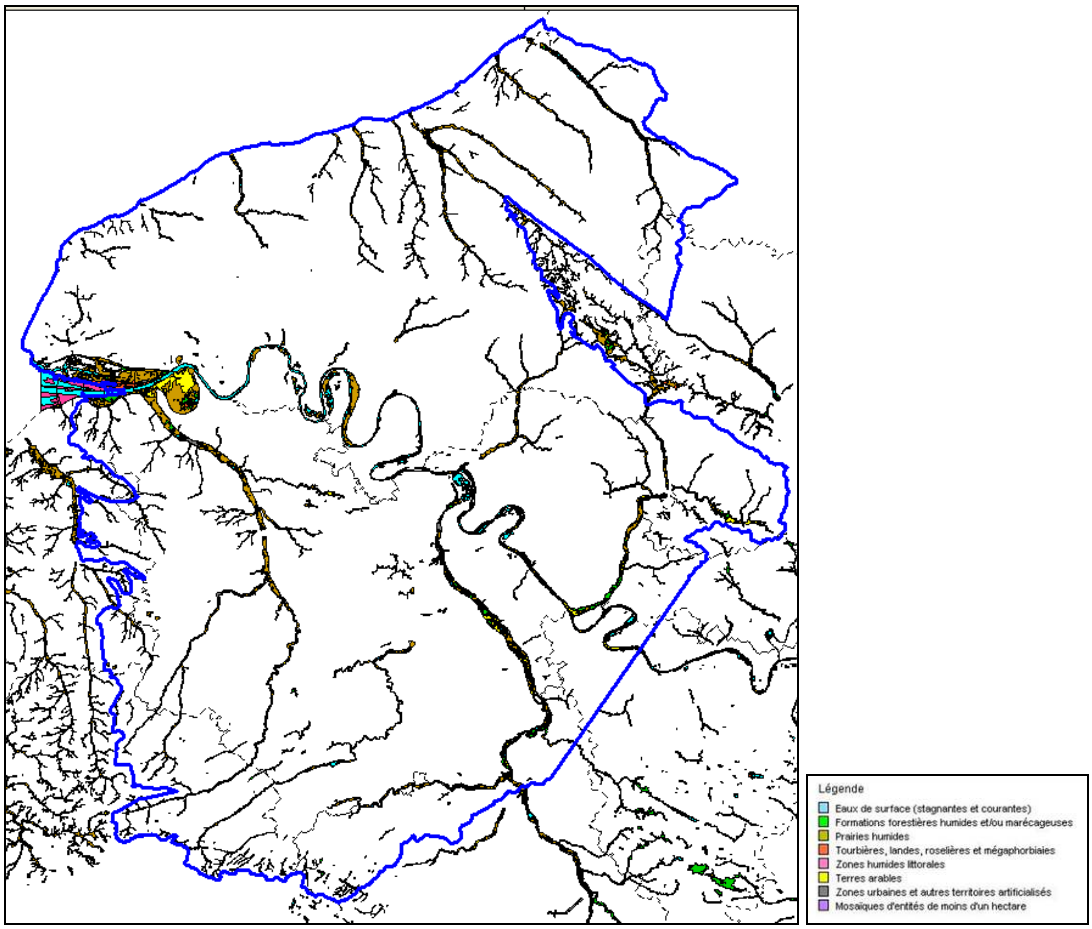


Illustration 47 - Cartographie des zones humides définies par l'AESN en avril 2006 sur le secteur d'étude

Le croisement entre les zones humides issues de l'outil IDPR et celles de l'AESN d'avril 2006 montre : un bon recoupement et une mise en évidence de zones supplémentaires (cf. secteurs en rose sur l'Illustration 48). Ces secteurs sont localisés dans l'Eure, à proximité des cours d'eau, et également dans certains méandres de la Seine.

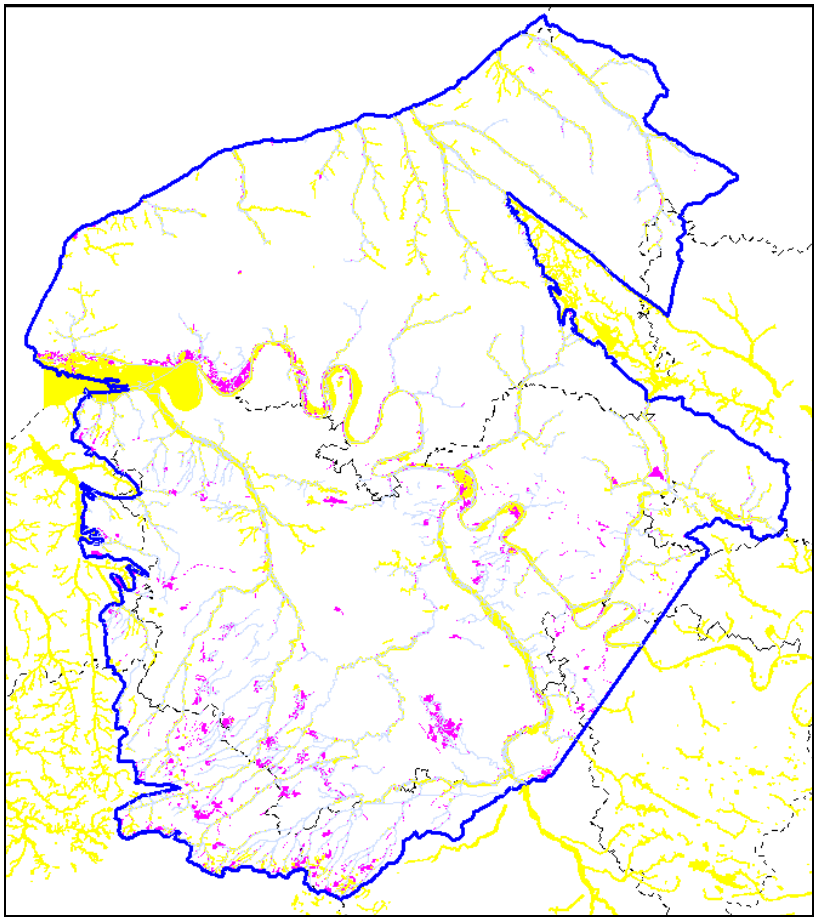


Illustration 48 - Superposition des zones humides de l'AESN d'avril 2006 (en jaune) sur celles issues de l'outil IDPR (en rose)

5. Constitution d'un jeu de données numériques

En complément des différents traitements cartographiques réalisés dans le cadre de la présente étude, le BRGM a rassemblé dans un CD-Rom (cf. annexe 3) différentes couches d'informations géoréférencées présentant un intérêt pour la gestion des eaux souterraines en Haute-Normandie (cf. Illustration 49 et Illustration 50).

Nom des fichiers ArcGis SHAPE	Type de données	Source(s)
CGMillHNO.shp	Contours des formations de la carte géologique à 1/1 000 000 (écorché géologique)	BRGM, 2010
Failles_krigeage_ok.shp	Linéaires de failles décalant la piézométrie et utilisées lors du krigeage	BRGM, 2011
L_struct27.shp	Failles et axes tectoniques (synclinal, anticlinal) de la carte géologique harmonisée de l'Eure	BRGM, 2003
L_struct_76.shp	Failles et axes tectoniques (synclinal, anticlinal) de la carte géologique harmonisée de Seine-Maritime	BRGM, 2009
courdeau_complet.shp	Linéaires du réseau hydrographique	BD-Carthage, Bassin Seine-Normandie version 2008 - © IGN, 2008
Exutoires.shp	Points mentionnant les sources du département de la Seine Maritime et de l'Eure	BRGM, AESN, Conseil Régional Haute Normandie, Conseil Général 27 et Conseil Général 76, 2010
BV_surf	Polygones des bassins versants de surface (sous-secteurs BD-Carthage)	BD-Carthage, Bassin Seine-Normandie version 2008 - © IGN, 2008
stationsjaugeage.shp	Points des stations de jaugeages	DREAL, 2010
FranceL2E.shp	Contour géographique de la France	IGN, 2006
Contours_HNO.shp	Polygone de la région Haute-Normandie	IGN, 2006
Villes_principales.shp	Principales villes de Haute-Normandie	BRGM, 2010
Departements_autourHNO_region.shp	Polygones des départements de Haute-Normandie et des régions voisines	IGN, 2006
Limite_krigeage_ok.shp	Polygone de la limite d'étude	BRGM, 2011
isopzME_corr_Smooth1k.shp	Courbes des isopièzes moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006), tous les 10 m	BRGM, 2011
tracages_ante_1925.shp	Linéaires des principaux traçages positifs de Haute-Normandie traçés avant 1925	BRGM, 2010
tracages_post_1949.shp	Linéaires des principaux traçages positifs de Haute-Normandie traçés après 1949	BRGM, 2010
industries27.shp	Forages industriels du département de l'Eure	BRGM, 2010
industries76.shp	Forages industriels du département de Seine-Maritime	BRGM, 2010
PiezosHNO.shp	Points du réseau piézométrique de Haute-Normandie	BRGM, 2010 (données ADES)
Betoires.shp	Points des bétoires de la craie en haute-Normandie	BRGM, AESN, Conseil Régional Haute Normandie, Conseil Général 27 et Conseil Général 76, 2010
BV_sout_hno_01-06.shp	Polygones des bassins versants souterrains	BRGM, 2011
Coupures_geol50.shp	Coupures de la carte géologique à 1/50 000	BRGM, 2005
ME27.shp	Polygones des masses d'eau souterraine du département de l'Eure	AESN, 2008
ME76.shp	Polygones des masses d'eau souterraine du département de Seine-Maritime	AESN, 2008
Masque_krigeage_ok.shp	Fichier qui masque les données visibles à l'extérieur de la limite de krigeage	BRGM, 2011
P_EFF_normale_MEDD.shp	Normales de pluies efficaces (mm) - Moyennes annuelles sur la période 1946-2001	MEEDDM, 2005
mcra2876.shp	Courbes des isoaltitudes du mur de la craie (harmonisé au niveau du 76, 27 et 28), tous les 10 m	BRGM, 2003
IDPR2000.shp	Polygones des zones humides potentielles de Haute-Normandie	BRGM, 2011
Alluvions_Clip.shp	Polygones des alluvions BD LISA en Haute et Basse-Normandie	BRGM, 2009
nappcourdeau.shp	Polygones de la nappe d'accompagnement du cours d'eau (topographie - altitude 2001)	BRGM, 2011
limiteassec.shp	Polygones d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau (topographie - altitude 2006)	BRGM, 2011

Illustration 49 - Liste des documents SIG (sous forme de polygones) mis à disposition dans le CD-Rom du projet

Nom des fichiers ArcGis GRILLE	Type de données	Source(s)
krig01_corr	Altitude de la piézométrie très hautes eaux (2001)	BRGM, 2011
sk_2001	Ecart-type du krigeage de l'altitude de la piézométrie très hautes eaux (2001)	BRGM, 2011
krig06_fin	Altitude de la piézométrie basses eaux (2006)	BRGM, 2011
sk_2006	Ecart-type de krigeage de l'altitude de la piézométrie basses eaux (2006)	BRGM, 2011
moy01c-06	Altitude de la piézométrie moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)	BRGM, 2011
sk01-06_max	Ecart-type de krigeage de l'altitude de la piézométrie moyennes eaux (maximums de 2001 et 2006)	BRGM, 2011
k2001c-2006	Epaisseur du battement inter-annuel (altitude 2001 - altitude 2006)	BRGM, 2011
znsc2001c	Epaisseur de la zone non saturée en période de très hautes eaux (2001)	BRGM, 2011
znsc2006	Epaisseur de la zone non saturée en période de basses eaux (2006)	BRGM, 2011
znsc01c-06	Epaisseur de la zone non saturée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)	BRGM, 2011
epcra_m2001	Epaisseur de craie mouillée en période de très hautes eaux (2001)	BRGM, 2011
epcra_m2006	Epaisseur de craie mouillée en période de basses eaux (2006)	BRGM, 2011
epcra_m01-06	Epaisseur de craie mouillée en période de moyennes eaux (moyenne entre 2001 et 2006)	BRGM, 2011
murcraiec	Altitude du mur de la craie	BRGM, 2011

Illustration 50 - Liste des documents SIG (sous forme de grilles) mis à disposition dans le CD-Rom du projet

Pour des questions de plan Vigipirate et de copyright, la DREAL Haute-Normandie a souhaité que les couches suivantes ne fassent pas partie du CD-Rom : captages AEP (source : Agence Régionale de Santé), modèle numérique de terrain au pas de 50 m et fonds IGN à 1/100 000 (©IGN).

Suite à un travail de conversion et de projection des données, ces fichiers existent dans le CD-Rom du projet : aux formats ArcGis et MapInfo, et sont projetés en Lambert 2 étendu ainsi qu'en Lambert 93.

Le CD-Rom complet du projet comprend :

- les fichiers texte du rapport et de la notice (au format PDF) ;
- la carte de synthèse à 1/100 000 (au format PDF) ;
- un fichier Excel des points de mesure 2001 et 2006 ;
- un fichier Excel de correspondance entre les noms des fichiers et leur contenu, ainsi que la source de la donnée (cf. tableaux dans le texte du rapport ci-dessus) ;
- les différentes couches numériques élaborées dans le cadre de l'étude (formats MapInfo, ArcGis et PDF) : piézométrie hautes eaux, moyennes eaux, basses eaux, battement inter-annuel, zone non saturée en condition de hautes eaux et de basses eaux, zones humides potentielles, nappes d'accompagnement, délimitation des bassins versants souterrains… ;
- les différentes couches numériques collectées et mises à disposition dans le cadre de l'étude (formats MapInfo, ArcGis et PDF) : sources, bétoires, traçages, limites de masses d'eau souterraine, réseau hydrographique, bassins versants hydrologiques, captages AEP…
- une version interactive de la carte de synthèse à 1/100 000, permettant de retirer ou de rendre visible chacune des couches de la carte (appelée « Carte calques2.pdf » au format PDF, cf. Illustration 51) ;

- les cartes des grilles établies (1 grille par page, au format PDF) ;

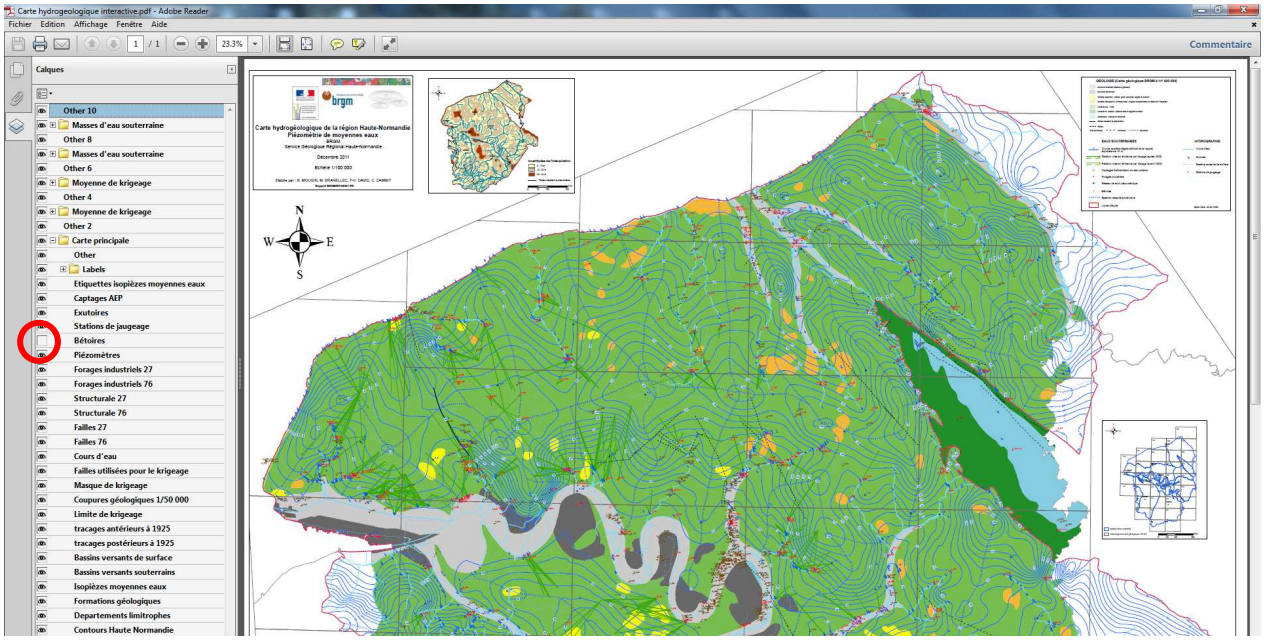


Illustration 51 - Visualisation de la version interactive de la carte de synthèse à 1/100 000. Enlèvement de l'affichage des bétoires sur la carte (on décoche l'œil sous le cercle rouge)

Pour rendre la carte interactive, il faut ouvrir le fichier PDF « Carte calques2.pdf » avec Adobe Acrobat Standard, puis aller dans le menu Affichage/Panneaux de navigation/Calques. Les calques apparaissent à gauche de l'écran. Il faut ensuite appuyer sur le signe « + » de « Carte principale ». En cliquant sur l'œil associé à chaque couche, on peut l'afficher ou l'enlever de l'affichage (cf. Illustration 51).

La diffusion de ces données a été limitée à la DREAL de Haute-Normandie (envoi de 15 exemplaires du CD-Rom).

La DREAL souhaite que ces données puissent être prochainement intégrées au SIGES Seine-Normandie (Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines, http://sigessn.brgm.fr/).

6. Conclusions

Dans le cadre contractuel de la convention de recherche et développement à coûts partagés DREAL de Haute-Normandie - BRGM du 1er octobre 2009, le BRGM a valorisé les informations des campagnes piézométriques de terrain réalisées sur le territoire de la région Haute-Normandie au printemps 2001 (conditions de très hautes eaux) et en automne 2006 (basses eaux) dans la nappe de la craie.

Suite à plusieurs étapes (assemblage-vérifications-traitements-interpolations-contrôles-calculs), plusieurs documents ont été réalisés :

- grille de la surface piézométrique de moyennes eaux,
- courbes isopèzes moyennes eaux de la nappe de la craie et tracé des bassins versants souterrains associés,
- atlas hydrogéologique régional papier à l'échelle 1/100 000 et sa notice explicative,
- grille de l'épaisseur de la zone non saturée (hautes, moyennes et basses eaux),
- grille du battement inter-annuel,
- grille de l'épaisseur de la craie mouillée (hautes, moyennes et basses eaux),
- carte des zones dites : « nappe d'accompagnement du cours d'eau », « limite d'assec de la nappe d'accompagnement du cours d'eau », « limite potentielle de la nappe alluviale », et « zones humides potentielles ».

Toutes ces couches d'informations numériques géoréférencées, présentant un intérêt pour la gestion des eaux souterraines en Haute-Normandie, ont été rassemblées dans un CD-Rom diffusé à la DREAL en 15 exemplaires.

La DREAL souhaite que ces données puissent être prochainement intégrées au SIGES Seine-Normandie (Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines, http://sigessn.brgm.fr/).

7. Bibliographie

Hole J.P., De la Quérière P., Pernel F., Peckre M. (1990) - Carte hydrogéologique du département de la Seine-Maritime. BRGM, carte à 1/100 000.
Chemin J., Hole J.P., Peckre M., Vidard I. (1992) – Notice de l'atlas hydrogéologique de la Seine-Maritime. BRGM, 66 p, 19 figures, 9 tableaux.

Chemin J., Hole J.P., Peckre M. (1989) - Carte hydrogéologique du département de l'Eure. BRGM, carte à 1/100 000.
Chemin J., Hole J.P., Pernel F., Peckre M. (1991 ?) – Notice de l'atlas hydrogéologique de l'Eure. BRGM, 72 p, 23 figures, 13 tableaux.

Arnaud L., Branellec M., Hugot V., Izac J.L. et J.P. Jegou (2006) – Campagne de mesures piézométriques en période de basses eaux en Haute-Normandie – Rapport final - BRGM/RP-55028-FR, 36 p., 1 fig., 1 ann.

Arnaud L., Mardhel V., Coueffë R, Tourlière B. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet cartographique. Rapport BRGM/RP-55670-FR, 150 p, 83 illustrations, 1 annexe.

Caous J.Y., Caudron M., Mardhel V., Nail C., Nicolas J., Batkowski D., Besançon S., Gaudefroy M.J., Kieffer Cl., Pinson S., Saint-Omer P., Brinon Ph. (2001) – Bassin Artois-Picardie. Nappe de la craie. Carte piézométrique «hautes eaux » 2001. BRGM/RP-51149-FR, 31 p., 2 ann.

Chrétien P. avec la collaboration de M.J. Féret, P. Guionie, J.L. Izac, J.P. Jegou, F. Joublin, C. Kiefer, C. Nail et C. Robelin (2006) – Picardie – Nappe libre de la craie – Campagne et carte piézométriques « basses eaux » 2005. Rapport final. BRGM/RP-54285-FR, 63 pages, 7 annexes.

De la Quérière P. – 1999 – L'aquifère crayeux en Normandie, 7 p.

Equilbey E., Lebret P. (2001) – Mesures piézométriques (hautes eaux exceptionnelles) de l'aquifère crayeux en Haute-Normandie, printemps 2001. BRGM/RP-51153-FR, 54 p., 2 ann.

Equilbey E., Arbonnier G., Hanot F., Mardhel V., Pointet T., Quesnel F., Robelin C., Schomburgk S., Tourlière B. (2004) - Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet cartographie de l'aquifère de la craie. Rap. BRGM/RP-52989-FR, 90 p., 38 fig., 2 tabl., 1 ann.

Hanot F. (1998) AESN : Géologie et géométrie de l'aquifère de la Craie. Département de Seine Maritime. Zone occidentales et orientales Rapport CGG n°01IMEOL03/04/97, 40 p. 16 pl.

Lereculey A., Arnaud L. avec la collaboration de V. Mardhel V. et Xu D. (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Année 4. Bassin Seine-Normandie. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveaux 1 et 2 en régions Haute-Normandie et Basse Normandie. Rapport d'étape. BRGM/RP-57518-FR.

Martin J.C., Lalleron A., avec la collaboration de Ceaux J.L., Izac J.L., Joseph B., Laporte P., Jegou J.P., Le Boucher E., Guignat S., Feret M.J., Hugot V., Brechenmacher P. (2009) – Carte piézométrique des basses eaux 2008 de la nappe de la Craie du Séno-Turonien dans le bassin Loire-Bretagne. Rapport final. BRGM/RP-57249-FR. 33 p., 21 ill., 1 pl. h.t.

Roux J.-C. (sous la direction de, 2006) - Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM éditions.

Annexe 1

Interpolation par la géostatistique - Description du krigeage

Annexe 1.1. : Interpolation par la géostatistique

Les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait partiellement modéliser par une approche déterministe. 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.

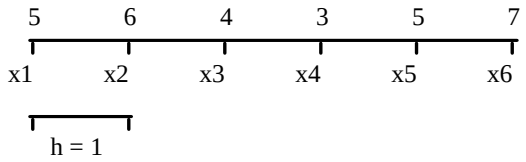
Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- 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(xo) 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, 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 ci-dessous illustre ce calcul.



<-- valeurs mesurées en xi: Z(xi)

<-- points de mesure xi (ici régulièrement espacés)

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

avec : h = distance ; Z(x) = valeur au point x

et : N(h) = nombre de couples de points distants de h

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

$\gamma(1)$ = 1/2 Moyenne$[Z(x_{i+1})-Z(x_i)]^2$

= 1/2 [$(Z(x_2)-Z(x_1))^2 + (Z(x_3)-Z(x_2))^2 + \ldots + (Z(x_6)-Z(x_5))^2$] / 5

= 1/10 . [$(6-5)^2 + (4-6)^2 + \ldots + (7-5)^2$] = 1.4

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

$\gamma(2)$ = 1/2 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 . [$(4-5)^2 + (3-6)^2 + (5-4)^2 + (7-3)^2$] = 3.375

etc…

Principe de calcul du variogramme

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

- **Continuité à l'origine.** En principe Z(x) et Z(x+h) sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépite.
- **Continuité spatiale au-delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
  - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure A (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). À partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,

- **anisotropie,**
- **imbrication d'échelles de variabilité,**
- **absence de portée finie** - figure A (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

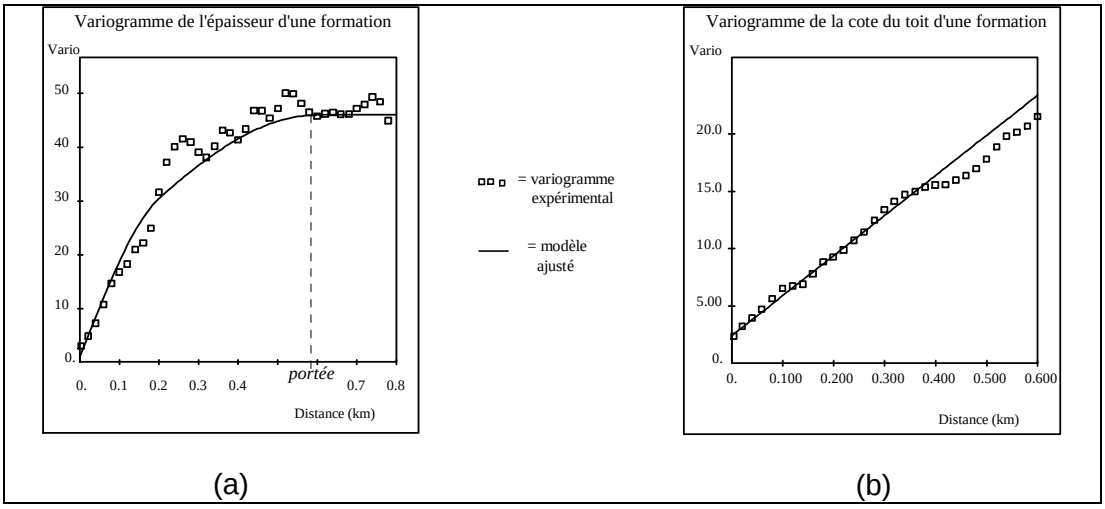


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

La méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique est le krigeage. 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 le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ». Il s'agit d'une interpolation par combinaison linéaire des données de base $Z(x_i)$. La valeur interpolée au point x, notée $Z^*(x)$, est donnée par :

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

Le non biais est assuré à la condition que la somme des poids ou pondérateurs λ_i soit égale à 1 :

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

Les pondérateurs sont alors choisis de façon à minimiser la variance d'estimation. Ceci conduit aux équations du krigeage ordinaire suivantes :

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

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

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_i et x_j,
$Z(x_i)$,$Z(x_j)$	=	valeurs mesurées en x_i et x_j,
x	=	volume à estimer (point ou bloc),
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,
$\gamma(x_i,x)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x, si x est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre x_i et ce volume.

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

$$S_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu$$

$\bar{\gamma}(x, x)$ est la valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au volume x. Si le volume se réduit à un point, la distance qui sépare ces points est nulle et on a $\bar{\gamma}(x, x) = 0$.

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

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

Annexe 1.2. : Analyse géostatistique des données piézométriques de Haute-Normandie

Modélisation du variogramme

Les variogrammes des niveaux piézométriques ont été calculés au pas de 1 km, pour chaque situation (2001 et 2006).

Les variogrammes des deux années étant relativement similaires, on a choisi de les modéliser par un même modèle, ceci afin de limiter les risques de croisement des deux surfaces piézométriques au moment de l'interpolation.

La figure B ci-dessous montre les deux variogrammes et leurs ajustements. Les distances mises en jeu lors de l'interpolation ne dépassant pas 20 km, le modèle a été choisi de façon à privilégier la qualité de l'ajustement pour les distances inférieures à 20 km, et principalement pour les « petites » distances (inférieures à 6 - 8 km).

Par ailleurs, on a considéré le modèle comme isotrope. Il faut signaler toutefois que les variogrammes directionnels montrent une anisotropie, en particulier aux grandes distances. Cette anisotropie est relativement modérée aux petites distances, et sa prise en compte introduit des artefacts dans les zones mal échantillonnées situées loin des données. Après quelques tests, on a préféré négliger l'anisotropie et considérer le variogramme moyen omnidirectionnel.

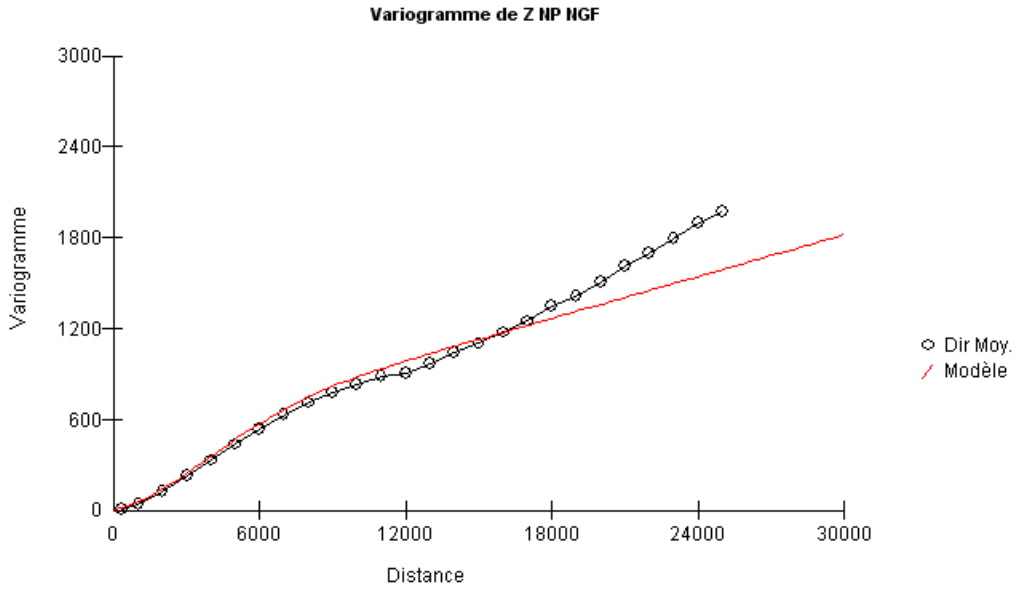
Validation du modèle de variogramme

Une validation croisée du modèle de variogramme a été réalisée. Cette validation a permis d'identifier un certain nombre d'anomalies dans les données, anomalies qui ont été corrigées. Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle de variogramme retenu est acceptable et compatible avec les données.

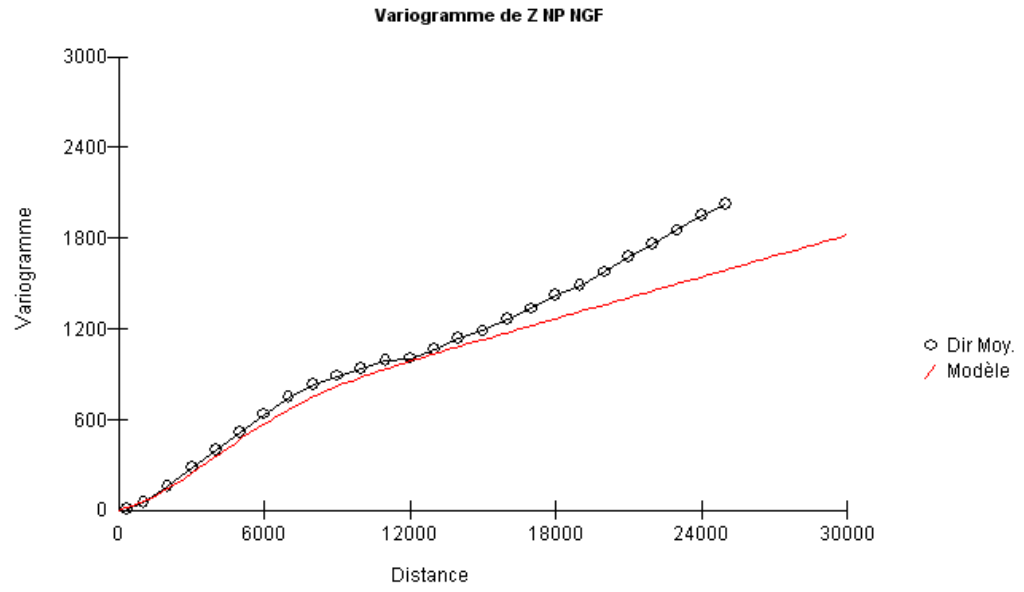
Interpolation

L'interpolation a été effectuée par krigeage, avec le modèle de variogramme représenté sur la figure suivante, et prise en compte de failles.

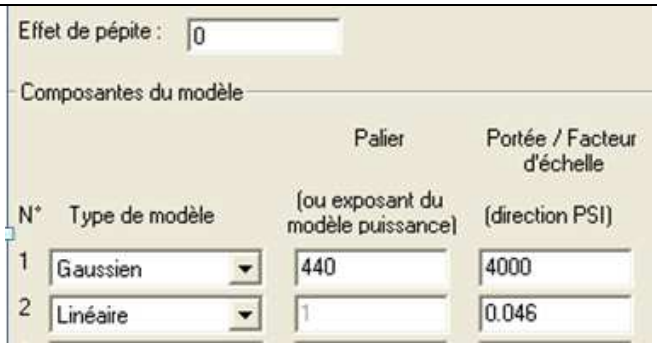
Le voisinage d'interpolation a été choisi carré, de taille 20km x 20km, et limité aux 100 points les plus proches. Pour éviter les problèmes d'instabilité numérique, les points distants de moins de 40 m ont été fusionnés en un point « moyen ».



Variogramme de la cote piézométrique de 2001, avec son ajustement
En abscisse : distance (m), en ordonnée : variogramme (m²)



Variogramme de la cote piézométrique de 2006, avec son ajustement
En abscisse : distance (m), en ordonnée : variogramme (m²)



Caractéristiques du modèle retenu

Fig. B : Variogrammes des cotes piézométriques de 2001 et 2006, et ajustement retenu

Annexe 2

Notice explicative de la carte poster à 1/100 000

ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL DE HAUTE-NORMANDIE

NOTICE D'UTILISATION
Piézométrie moyenne de la nappe de la craie

Description de la carte et mode de réalisation :

La piézométrie de moyennes eaux non influencées a été établie à partir des données piézométriques du printemps 2001 (conditions de très hautes eaux) et des données d'automne 2006 (conditions de basses eaux).

Les cartes piézométriques de l'aquifère crayeux en 2001 et en 2006 ont été réalisées par krigeage à l'aide du logiciel GDM© du BRGM (le krigeage est une méthode d'interpolation issue de la géostatistique). Une grille a été calculée en faisant la moyenne des grilles de 2001 et de 2006, puis cette grille a été représentée en isopièzes.

Il est recommandé de se référer au rapport public (rapport BRGM/RP-59301-FR, de février 2011) explicitant les conditions d'établissement de la carte piézométrique.

Clés de lecture :

Les courbes isopièzes (cotes du niveau piézométrique en m NGF) sont tracées à intervalle de 10 mètres.
Sur la carte piézométrique (format 152 x 174 cm), on retrouve également les tracés : du réseau hydrographique, du fond géologique à 1/1 000 000, des traçages, des sources, des bétoires recensés dans l'inventaire régional 2010…

Incertitudes et limites d'usage :

L'interpolation a été effectuée à l'échelle régionale et la carte est présentée à l'échelle du 1 / 100 000. Les principales incertitudes liées aux résultats sont :

- l'incertitude liée au Modèle Numérique de Terrain de l'IGN (au minimum +/- 5 m) ;
- l'incertitude liée à l'exploitation de données piézométriques d'origines variées : campagne de mesures sur le terrain, réseaux piézométriques, données de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM, sources, rivières, points issus de corrélations entre 2001 et 2006 ;
- l'incertitude liée à la faible densité locale des données piézométriques (information fournie sur la carte par les incertitudes d'interpolation : écart-type de krigeage) : absence de données particulièrement marquée à l'Est du département de l'Eure ;

- l'incertitude liée à une maille de calcul de 200 m et à une cartographie finale au pas de 100 m.

En définitive, la carte piézométrique calculée doit être utilisée comme un document d'orientation, éventuellement un outil d'aide à la décision à l'échelle maximale du 1/100 000. Elle est inadaptée pour une interprétation à des échelles plus précises.
La carte n'a donc pas pour objectif de souligner d'éventuelles dépressions piézométriques induites par pompages (captages d'alimentation en eau potable et forages industriels) ni d'être utilisée comme seul élément de délimitation des bassins d'alimentation de captages.

Limites de responsabilité :

Le BRGM n'apporte aucune garantie quant à l'exactitude et au caractère exhaustif des informations délivrées. La carte n'est que le reflet de l'état des connaissances disponibles au moment de son élaboration, de telle sorte que la responsabilité du BRGM ne saurait être engagée en cas où des investigations nouvelles amèneraient à revoir les résultats.

****

NB : les paragraphes exposés ci-après sont extraits de chapitres du rapport BRGM/RP-59301-FR, d'avril 2011. Ce rapport comporte des références bibliographiques.

Les conditions climatiques de Haute-Normandie :

Les précipitations moyennes interannuelles varient entre 574 et 1075 mm sur la région (source : Météo-France, moyenne 1971-2000, fichier AURELHY). Le secteur le plus arrosé est situé à l'Ouest de la Seine-Maritime sur le Pays de Caux vers Goderville et le secteur le moins arrosé est localisé au Sud-Est de l'Eure.
Les précipitations efficaces moyennes interannuelles suivent la même répartition géographique et évoluent entre 100 et 400 mm.
En général, la période de recharge des aquifères s'étend de novembre à mars et celle de la vidange d'avril à octobre.

Le contexte géologique :

La formation géologique concernée par la carte piézométrique est celle de la craie du Sénonien, Turonien et Cénomanien (du plus récent au plus ancien). La série stratigraphique appartient au système du Crétacé Supérieur et elle présente les trois faciès suivants : craie blanche riche en silex du Sénonien, craie marneuse pauvre en silex du Turonien, et craie du Cénomanien glauconieuse à la base puis blanche sur le reste de la formation.
Cette série, formée par une puissante assise crayeuse (> 100 mètres), repose sur les formations de l'Albien (Crétacé Inférieur : Sables verts, Argiles du Gault et Gaize affleurant dans le Pays de Bray).
Cette série crayeuse affleure très largement sur la région sauf au niveau de la boutonnière du Pays de Bray (Crétacé Inférieur et Jurassique Moyen).
Elle est recouverte par une formation résiduelle à Silex (Argiles à silex), produit de décalcification de la craie (altération lors de ses phases d'exondation), et par des sables Paléocène.

Les principaux accidents structuraux qui affectent le sous-sol crayeux sont : l'anticlinal de Bray, la faille de la Seine NW-SE (évènement important et ancien à l'échelle du Bassin de Paris), la faille de Lillebonne à Fécamp, l'anticlinal de Bourgtheroulde et son compartiment

axial effondré, et la faille de Pont-Authou à Cormeilles. Les assises du Vexin sont affectées par de nombreuses ondulations anticlinales et synclinales qui se prolongent vers le Nord-Ouest et provoquent une certaine fissuration du milieu.
Ces accidents tectoniques sont orientés selon la direction Armoricaine (NNW-SSE ou NW-SE). Les structures plissées témoignent du rejet de vieilles structures hercyniennes depuis la fin du Crétacé jusqu'au Quaternaire.

Le contexte hydrogéologique :

Description et caractéristiques de l'aquifère de la craie

Sur le plan hydrogéologique, la craie a une faible perméabilité intrinsèque. Elle ne contient de l'eau mobilisable que lorsqu'elle est fracturée, condition rencontrée le long des failles géologiques et sur les bombements anticlinaux, ou qu'elle est altérée sous les plaines alluviales des grands cours d'eau.
L'aquifère de la craie est caractérisé par l'existence d'une triple porosité (une porosité de matrice, de fracture et de conduits) telle que décrite ci-dessous :

- la porosité matricielle inter-granulaire a une fonction capacitive conséquente de 15 à 45% selon les horizons lithologiques et les auteurs ; cependant la porosité efficace reste faible ; les valeurs de conductivité hydraulique ou perméabilité sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6} m/s. Ces valeurs conduisent à des vitesses de transport dans le milieu souterrain de l'ordre du mètre par an ;
- la porosité de fracture, selon l'importance de la fracturation et des processus de dissolution qui peuvent les affecter, conduit à des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} m/s à 10^{-6} m/s soit des vitesses de transfert de l'ordre de quelques mètres par mois. Cette porosité est associée à la fonction de stockage temporaire dans les formations superficielles ; elle pourrait expliquer le retard de la recharge de l'aquifère comme l'atteste les variations piézométriques au cours d'un cycle hydrologique. Cette porosité peut ainsi jouer un rôle dans la fonction capacitive de l'aquifère, mais exerce surtout un rôle primordial dans la fonction transmissive de l'aquifère et dans l'organisation des gradients hydrauliques ;
- la porosité de conduits karstiques peut, localement (selon des connexions actives avec les bétoires), assurer des vitesses de transfert (depuis un point d'infiltration préférentiel à l'exutoire du système karstique) pouvant atteindre et dépasser 100 m/h. Les perméabilités associées sont de l'ordre de 10^{-1} m/s à 10^{-3} m/s. La porosité de conduits n'a qu'un rôle transmissif dans les transferts rapides. Ce rôle reste en partie contrôlé par les gradients hydrauliques hérités de la porosité de fracture et le contexte structural régional ; son importance et les vitesses de transfert qui en découlent exercent aussi un rôle primordial sur la vulnérabilité des ressources exploitées.

Partout où affleure le Crétacé Supérieur, la nappe est libre, l'alimentation s'effectue par les pluies efficaces que n'arrêtent pas les recouvrements limoneux et la couverture d'argiles à silex, lacunaire le long de thalwegs et percée en de multiples lieux (bétoires). La recharge de la nappe s'effectue donc en deux temps, presqu'immédiatement après les pluies en vallées et par le jeu des bétoires, plusieurs semaines ou mois plus tard sous les plateaux. Cet étalement amortit les alternances de périodes sèches et humides et régularise le débit de la nappe.
Après avoir atteint la zone non saturée de la craie, les eaux s'écoulent vers les exutoires de la nappe. La vitesse d'écoulement est très variable selon la perméabilité du réservoir. Contrairement au karst qui se développe dans la craie non saturée, le karst noyé n'est pas facilement explorable. Son étude est faite sur la base d'expériences de traçages. Plusieurs expériences se sont révélées positives et elles sont reportées sur la carte à 1/100 000.

Après avoir convergé des plateaux vers les vallées sèches et humides, les eaux de la nappe de la craie alimentent la nappe alluviale et le cours d'eau qui la draine.

La surface piézométrique de la nappe de la craie épouse fortement la morphologie du sol qui, elle, dépend en partie de la répartition de la fissuration de la craie. Elle forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère, peu fissuré, a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive (vallées humides et sèches, réseaux « karstiques »).
Les vallées qui entament les formations de surface constituent des axes de drainage de cette nappe, et la présence de nombreuses sources sur les flancs de ces vallées constituent les phénomènes visibles de cette drainance.
Les sources importantes sur le territoire régional (débit et répartition géographique) sont également l'indice de l'existence des réseaux karstiques. On peut citer les plus importantes : sources d'Yport (1.5 m^3/s), de Bonneville sur Iton (1250 l/s), de Hondouville (1180 l/s)…

Les fluctuations de la nappe sont de plusieurs types : elles comportent des variations annuelles et interannuelles du fait de la fonction à la fois capacitive et conductrice de l'aquifère selon les secteurs.

Exploitation des eaux souterraines

Du point de vue ressource, la nappe de la craie est fortement sollicitée pour tous les usages (agriculture, eau potable...), car elle constitue souvent l'unique ressource économiquement exploitable.
La quasi-totalité des besoins en eau potable de la région est satisfaite à partir des eaux souterraines prélevées dans la nappe de la craie. Les autres aquifères exploités (ou ayant été exploités) sont les Sables de l'Albien et les formations du Tertiaire (sables et calcaires). Les alluvions de la vallée de la Seine sont quant à elles très utilisées par l'industrie.

Vulnérabilité des eaux souterraines

Là où la nappe de la craie est libre, les puits traditionnels sont nombreux et, de par leur conception, ils peuvent contribuer au transfert des eaux superficielles polluées vers la nappe. Plusieurs captages d'eau potable ont ainsi été abandonnés en raison de la mauvaise qualité de l'eau et de l'impossibilité de les protéger efficacement.
Le karst haut normand[6] génère en surface des effondrements naturels[7] qui constituent des points d'engouffrement des eaux superficielles vers la nappe phréatique de la craie, sans filtration naturelle par le sol. Le karst de la craie est à l'origine de la turbidité : la qualité des eaux souterraines en Haute-Normandie est soumise à de fortes contraintes liées aux phénomènes d'érosion des sols sur les plateaux ainsi qu'au système d'écoulement souterrain des eaux de pluie qui s'engouffrent dans ces pertes karstiques (bétoires), traversent la craie en partie dans des conduits naturels à écoulement rapide (karst) avant de ressortir aux exutoires ou dans les forages (notamment AEP). Les données de l'inventaire du karst de Haute-Normandie sont consultables sur le SIGES Seine Normandie (http://sigessn.brgm.fr/).
La vulnérabilité de la nappe de la craie est donc très variable d'un point à un autre de la région ; elle doit être définie localement par la prise en compte de l'ensemble des conditions naturelles favorables (recouvrement, nappe profonde, terrains de surface peu perméables,

[6] le « karst de la craie » abrite des écoulements dans des fissures élargies au sein du calcaire, voire de véritables réseaux pénétrables par des spéléologues.

[7] différents par essence des effondrements de « marnières », d'origine anthropique.

vitesse d'écoulement lente, lit de cours d'eau colmaté…) et défavorables (bétoires, puits de marnières, nappe subaffleurante, craie fissurée, pertes en cours d'eau…).

Annexe 3

CD-Rom rassemblant les données du projet

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

Service géologique régional Haute-Normandie
Parc de la Vatine
10, rue Sakharov
76130 – Mont-Saint-Aignan – France
Tél. : 02 35 60 12 00