



Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise

Rapport final

BRGM/RP-63689-FR
Janvier 2015

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM PSP11NPC09

H. Bessière, J. Picot, G. Picot, M. Parmentier

Vérificateur :

Nom : Y. Barthélémy

Date : 07/12/2014

Signature :

Approbateur :

Nom : J.R. Mossmann

Directeur de DAT/GIR NE/NPC

Date : 09/03/2015

Signature :

Mots-clés : modèle hydrodynamique, Craie Séno-Turonienne, champs captants du Sud de Lille, champ captant de Pecquencourt, champ captant de Flers-en-Escrebieux, champ captant d'Hempempont

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

Bessière H., Picot J., Picot G., Parmentier M. (2015) – Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise. Rapport final. BRGM/RP-63689-FR, 295 p., 194 fig., 20 tabl., 4 ann.

Synthèse

La nappe de la Craie est le principal contributeur à l'alimentation en eau potable de la métropole lilloise (environ 60%) ; c'est également la plus vulnérable à la pollution. Pour faire face aux problèmes de qualité des eaux souterraines, la Métropole Européenne de Lille (MEL) souhaite disposer d'un outil de modélisation hydrodynamique adapté à l'échelle des champs captants de la nappe de la Craie qui alimentent la métropole.

C'est dans le cadre d'une convention de recherche partagée entre le BRGM et la MEL, qu'une modélisation hydrodynamique de la nappe de la Craie a été réalisée à l'échelle des territoires alimentant en eau potable la métropole lilloise. Ce modèle se base sur le modèle hydrodynamique régional de la nappe de la Craie, réalisé dans le projet SIGES (Buscarlet et Pickaert, 2011), en l'affinant dans la zone des champs captants.

Au droit des champs captants, la taille des mailles du modèle a été réduite de 500 m à 100 m dans la zone dite « affinée ». Afin d'améliorer la représentativité des écoulements, deux couches superficielles ont été ajoutées. La première couche regroupe les alluvions et les sables littoraux ; la seconde représente les limons. Le modèle géologique existant a été repris pour ajouter ces deux couches et pour améliorer la géométrie des formations dans la zone des champs captants. Au total, le modèle comprend 917 125 mailles.

Au Sud du modèle d'écoulement, la géométrie des couches crayeuses a été complétée avec le modèle hydrodynamique de la Somme ; au droit de la Belgique, la craie a été intégrée avec une épaisseur constante de 25 m.

Une méthodologie d'interfaçage avec le modèle Carbonifère, réalisé dans le cadre du projet ScaldWIN, a été utilisée dans le but d'injecter des charges imposées variables dans le temps dans la couche des calcaires carbonifères. Cette dernière couche du modèle est intégrée uniquement sur la partie française, avec une épaisseur constante de 50 m. Sur la frontière Est, les charges piézométriques annuelles des calcaires extraites du modèle Carbonifère sont imposées au modèle craie affiné. Initialement, les paramètres hydrodynamiques des couches Carbonifère et Dièves (perméabilité, coefficient d'emmagasinement et anisotropie) sont repris du modèle Carbonifère avant d'être ajustés au cours de la phase de calage.

Le réseau hydrographique a été développé au droit de la zone affinée, avec notamment la prise en compte de la Naviette. Les largeurs des rivières sont comprises entre 10 et 50 m et les longueurs sont issues d'un traitement SIG à partir de la BD Carthage et des vues aériennes.

Les zones relatives à la recharge des nappes sont identiques à celles du modèle régional de la Craie. Il est constaté une augmentation de 10% des débits prélevés dans le modèle affiné par rapport au modèle régional probablement liée à une prise en compte plus exhaustive des données disponibles dans cette étude. Les calculs de bilan hydroclimatique sont réalisés au pas de temps décadaire et ceux des bilans hydrodynamiques, au pas de temps mensuel.

Calage du modèle hydrodynamique

Le modèle a été calé en régime transitoire de 1982 à 2012, avec 372 pas de temps mensuel. Le calage a été mené en plusieurs étapes :

- d'abord avec des charges imposées dans toute la couche carbonifère :

- en désactivant la simulation des écoulements de surface (pas d'infiltration des cours d'eau dans la nappe),
- puis en couplant le réseau hydrographique avec la nappe et en ajustant les perméabilités de colmatage des rivières et les perméabilités de la nappe de la Craie,
- puis avec des charges variables dans la couche carbonifère, tirées du modèle ScaldWIN. À cette étape, les perméabilités et les coefficients d'anisotropie des Dièves ont été ajustés et les perméabilités de la Craie retouchées également.

De ce processus de calage, deux observations majeures sur le fonctionnement du modèle sont ressorties :

1. les cours d'eau semblent jouer un rôle important pour la masse d'eau 1003, en particulier le long du Canal de la Deûle et autour de Seclin où ils semblent contribuer à l'alimentation en eau de la nappe de la Craie ;
2. entre Lille et Villeneuve-d'Ascq, la nappe de la Craie semble influencée par les échanges avec celle du Carbonifère.

Il serait intéressant de poursuivre les investigations de terrain (analyses géochimiques par exemple) afin de valider ces observations.

Résultats du calage

La carte piézométrique des basses eaux 2009, dressée par le BRGM dans le cadre du projet SIGES, a été comparée avec les courbes isopièzes simulées. Il en ressort que le modèle reproduit bien le comportement de la nappe de la Craie dans sa partie libre et sous recouvrement quaternaire. Dans la zone affinée, les niveaux piézométriques sont impactés par les champs captants, et le nombre de points de mesure utilisés pour le tracé de la carte est parfois insuffisant pour garantir son tracé, notamment dans la partie captive de la Craie.

Sur le secteur Nord et centre de Lille, ainsi que sur le champ captant d'Hempempont, le couplage mis en place avec la nappe des calcaires du Carbonifère a permis d'améliorer le calage des niveaux piézométriques de la nappe de la Craie. Les niveaux piézométriques des différents ouvrages sont bien restitués par le modèle.

Dans les champs captants d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne, les résultats du calage sont très satisfaisants. A Emmerin, les valeurs de perméabilité de la nappe de la Craie productive apparaissent très élevées. Le calage de la zone du champ captant d'Houplin s'avère très sensible à la perméabilité assignée à l'aquifère, ce qui pourrait traduire une fragilité locale du modèle.

Dans le secteur des Ansereuilles, les puits de pompage sont très nombreux et rapprochés, ce qui complexifie le calage du modèle. Les différentes simulations ont montré que cette zone est particulièrement sensible à deux paramètres de calage : la perméabilité de la nappe de la Craie productive et la perméabilité des échanges nappe-rivière. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur l'ensemble du champ captant et, plus au Sud, la piézométrie est très bien reproduite.

Des difficultés de calage ont été rencontrées pour le champ captant de Pecquencourt. Il y a très probablement de forts contrastes de perméabilité dans ce secteur, dus à la présence de failles et de karsts (présence supposée de karsts associés à des effondrements d'âge Eocène). La distribution des perméabilités adoptée dans le modèle (linéament est-ouest très perméable) permet de restituer de manière satisfaisante les niveaux observés dans les puits et les

piézomètres au voisinage du champ captant. Pour valider ces hypothèses, il serait nécessaire d'approfondir les connaissances hydrogéologiques dans cette zone, par exemple par le biais de monitoring dans les Sables d'Ostricourt.

A proximité de ce secteur, autour des champs captants de Flers-en-Escrebieux et de Férin, la piézométrie simulée est correcte.

Hors des champs captants, pour les masses d'eau souterraines touchées par l'alimentation métropolitaine, le calage du modèle est globalement amélioré. En particulier, au droit de la masse d'eau 1006, les résultats sont très satisfaisants. Les modifications apportées au réseau hydrographique ont été très bénéfiques à la masse d'eau 1003. Pour la masse d'eau 1010, le calage est globalement meilleur, même si une extension de la géométrie du modèle (notamment des couches quaternaires) au-delà de la limite régionale apporterait des améliorations. Au sein de la masse d'eau 1007, le calage n'est pas encore tout à fait satisfaisant. Pour ce secteur, ainsi que pour l'Est de la masse d'eau 1018, il faudrait améliorer la prise en compte de la nappe de la Craie du côté belge. Pour la masse d'eau 1004, les résultats déjà corrects du modèle régional, restent quasiment identiques, même si sur certains piézomètres de ce secteur la distinction entre les couches craie du Sénonien, Turonien supérieur (Dièves) et Craie du Cénomanien n'est pas aisée.

Les débits des rivières semblent être bien restitués, sauf au droit du Canal de la Deûle où il est constaté un écart non négligeable, qui pourrait provenir de la non prise en compte des prélèvements de surface ou d'un autre facteur anthropique.

Trajectoires inverses

Le calcul des trajectoires inverses s'effectue en régime transitoire à un pas de temps donné. Il a été réalisé pour trois dates correspondant aux régimes des basses eaux 1997, des hautes eaux 2001, et d'un état intermédiaire en fin décembre 2012.

Les tracés obtenus permettent de matérialiser l'étendue approximative des aires d'alimentation et de cerner les venues d'eau au travers des couches géologiques encaissantes.

En période de hautes eaux, les trajectoires inverses s'avèrent nettement plus courtes qu'en basses eaux, et elles remontent presque systématiquement jusqu'aux couches quaternaires (limons et/ou alluvions). A l'inverse, en basses eaux, elles peuvent rester cantonnées à la couche craie, notamment pour les champs captants de Férin, des Ansereuilles, d'Emmerin et d'Houplin. Les plus grandes différences de trajectoires concernent les champs captants de Lille, et surtout de Flers-en-Escrebieux et de Férin. En basses eaux, les trajectoires parvenant à ces deux champs captants sont issues de la masse d'eau 1006, tout au sud.

Bilans hydrauliques du modèle

Des bilans hydrauliques ont été réalisés à l'échelle globale du modèle et pour chacune des couches hydrogéologiques.

Dans la couche des alluvions, une partie des débits apportés par la recharge pluviale déborde dans le réseau hydrographique, mais la majorité des flux sont acheminés par drainance verticale descendante vers la nappe de la Craie séno-turonienne productive.

Dans la couche de craie productive, les apports par drainance verticale sont presque aussi importants que la recharge pluviale. Ces apports sont drainés par les cours d'eau ou captés par les forages.

Les échanges nappe-rivière se font principalement au sein de la nappe de la Craie, avec essentiellement un drainage de la nappe par les rivières. Ces échanges sont inversés dans la zone des champs captants, les rivières alimentant la nappe, en particulier le long du Canal de la Deûle.

Des bilans hydrauliques par zones au droit des champs captants permettent d'évaluer les proportions des différents apports au sein d'une nappe : apports par drainance verticale provenant des couches encaissantes, apports des rivières (notamment pour les champs captants de Lille), et apports par la recharge lorsque la Craie est libre.

Sommaire

1	Introduction.....	21
2	Etat des lieux du modèle hydrodynamique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais	22
2.1	LE CODE DE CALCUL MARTHE	22
2.1.1	Exemples de modèles régionaux réalisés avec Marthe.....	22
2.1.2	Fonctionnalité	22
2.1.3	Paramètres et variables de modélisation	24
2.2	LE MODELE HYDRODYNAMIQUE REGIONAL	25
2.2.1	Rappel de la structure du modèle régional	25
2.2.2	Conditions aux limites	25
2.2.3	Paramètres de recharge	26
2.2.4	Prélèvements.....	26
2.2.5	Résultats.....	26
3	Définition et contexte de la zone à affiner.....	27
3.1	DEFINITION DE LA ZONE A AFFINER	27
3.2	CONTEXTE DE LA ZONE A AFFINER	29
3.2.1	Echanges nappe-rivière	29
3.2.2	Echanges avec les autres aquifères	29
3.3	HETEROGENEITE DE LA CRAIE	29
4	Analyse des prélèvements	31
4.1	CHAMP CAPTANT DES ANSEREUILLES	31
4.1.1	Forage de Sainghin en Weppes.....	33
4.2	CHAMPS CAPTANTS D'EMMERIN ET D'HOUPLIN-ANCOISNE.....	34
4.2.1	Forage de Seclin.....	35
4.3	CHAMP CAPTANT D'HEMPEMPONT.....	36
4.4	FORAGES DE PERENCHIES	37
4.5	FORAGES DES EAUX INDUSTRIELLES DE LILLE	38
4.6	FORAGES DU NORD DE LILLE.....	39
4.6.1	Forages de La Madeleine	39
4.6.2	Forages de Saint André	40
4.7	FORAGES DE LA CARNOY	40

4.8 FORAGES DE LA NEUVILLE.....	41
4.9 CHAMP CAPTANT DE FLERS-EN-ESCREBIEUX.....	42
4.10 CHAMP CAPTANT DE PECQUENCOURT.....	43
4.11 CHAMP CAPTANT DE FERIN	44
4.12 FORAGES AU CARBONIFERE	46
4.12.1 Forage Hem1.....	46
4.12.2 Forage Lannoy	47
4.12.3 Forages des Trois Ponts.....	48
4.12.4 Forages du Beck.....	48
4.12.5 Forages Sapin Vert.....	49
4.12.6 Forage Abattoir.....	50
4.12.7 Forage Les Francs.....	50
4.12.8 Forages de Roncq	50
4.13 PRELEVEMENTS A L'ECHELLE DU MODELE	51
4.14 SYNTHESE	52
5 Analyse des chroniques piézométriques	57
5.1 CHAMPS CAPTANTS DU NORD ET DU CENTRE DE LILLE.....	59
5.2 GRAND STADE ET LILLE SUD	64
5.3 CHAMP CAPTANT D'HEMPEMPONT	66
5.4 CHAMPS CAPTANTS D'EMMERIN-HOUPLIN	69
5.5 CHAMPS CAPTANTS DES ANSEREUILLES	72
5.6 CHAMP CAPTANT DE PECQUENCOURT	75
5.7 CHAMP CAPTANT DE FLERS-EN-ESCREBIEUX.....	77
5.8 CHAMP CAPTANT DE FERIN	78
5.9 FORAGES DE PERENCHIES.....	79
5.10 FORAGES DU CARBONIFERE	80
5.11 SYNTHESE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES RETENUES POUR LE CALAGE DU MODELE.....	82
6 Construction du modèle géologique.....	87
6.1 CONTEXTE.....	87
6.1.1 Les formations géologiques modélisées	87

6.1.2 La gestion de la transition entre la zone affinée et le modèle régional	90
6.2 LES ETAPES DE LA MODELISATION	91
6.2.1 Modélisation géologique avec MultiLayer.....	91
6.2.2 Paramètres de calculs	95
6.2.3 Les étapes de la construction du modèle	95
6.3 DONNEES UTILISEES	97
6.3.1 Les sondages	97
6.3.2 Carte géologique, failles et MNT	100
6.3.3 Limites d'extension des formations	102
6.4 RESULTATS.....	104
6.4.1 Description des géomorphologies	105
6.4.2 Améliorations de la précision par rapport au modèle régional	123
7 Construction du modèle hydrodynamique	125
7.1 GEOMETRIE DU MODELE	125
7.1.1 Choix de la taille des mailles de la zone affinée	125
7.1.2 Intégration des données du modèle géologique	126
7.1.3 Extension et conditions aux limites	129
7.1.4 Modifications apportées au modèle géologique	130
7.1.5 Synthèse des caractéristiques du modèle	135
7.2 PARAMETRES DE RECHARGE	139
7.2.1 Principe des calculs hydroclimatiques avec le logiciel MARTHE	139
7.2.2 Paramètres nécessaires à la modélisation.....	139
7.2.3 Paramètres climatiques	140
7.2.4 Paramètres de recharge	144
7.3 MODIFICATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	148
7.3.1 Principe d'intégration des relations nappe-rivière dans le modèle MARTHE	148
7.3.2 Modifications apportées au modèle régional	148
7.3.3 Paramètres pris en compte dans le modèle régional et affiné	149
7.4 POMPAGES	150
7.4.1 Prélèvements en nappe	150
7.4.2 Prélèvements en rivière	152
7.5 COUPLAGE AVEC LE MODELE DES CALCAIRES CARBONIFERES	152
7.5.1 La nappe des Calcaires carbonifères	152
7.5.2 Rappel des caractéristiques du modèle Carbonifère	153
7.5.3 Interfaçage avec le modèle de la Craie	159

7.6 DISTRIBUTION INITIALE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DANS LE MODELE CRAIE AFFINE	163
7.6.1 Perméabilités.....	163
7.6.2 Emmagasinements libres	167
7.6.3 Permeabilité de colmatage des rivières	168
7.6.4 Synthèse des paramètres hydrodynamiques initiaux	169
8 Calage du modèle hydrodynamique	170
8.1 MISE EN ŒUVRE DU CALAGE	170
8.1.1 Définition et objectifs du calage	170
8.1.2 Période de calage	170
8.1.3 Données de référence	170
8.1.4 Procédure de calage et déroulement du processus.....	176
8.1.5 Rôle du réseau hydrographique.....	176
8.1.6 Influence du couplage avec le modèle du Carbonifère	179
8.2 RESULTATS DU CALAGE	182
8.2.1 Paramètres hydrodynamiques déduits de la phase de calage	182
8.2.2 Distribution spatiale des perméabilités.....	183
8.2.3 Distribution spatiale des coefficients d'anisotropie	185
8.2.4 Distribution spatiale des perméabilités d'échange nappe-rivière	187
8.3 RESULTATS DU CALAGE SUR LA PIEZOMETRIE	189
8.3.1 Cartes piézométriques simulées.....	189
8.3.2 Chroniques piézométriques simulées sur l'ensemble du modèle	191
8.3.3 Vérification des débits simulés dans les rivières	225
9 Validation du modèle	230
9.1 CARTOGRAPHIE NATIONALE DES MILIEUX POTENTIELLEMENT HUMIDES	230
9.2 DEBITS DE DEBORDEMENT DU MODELE AFFINE.....	232
9.3 VALIDATION DU MODELE	233
10 Exploitation du modèle affiné.....	234
10.1 CALCULS DE TRAJECTOIRES « INVERSES »	234
10.2 BILAN HYDRAULIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE	244
10.2.1 Bilan hydroclimatique.....	244
10.2.2 Bilan global	245
10.2.3 Échanges nappe-rivières	247
10.2.4 Bilan de la nappe de la Craie sur l'ensemble du modèle.....	249
10.2.5 Bilan par zones autour des champs captants.....	249
11 Conclusions et recommandations	255

12 Bibliographie.....259

Liste des illustrations

Figure 1 : Exemple de discréétisation d'un modèle maillé multicouche.	23
Figure 2 : Paramètres et variables nécessaires à la modélisation hydrodynamique.	24
Figure 3 : Localisation de la zone affinée par rapport aux principaux champs captants, à partir des trajectoires inverses simulées avec le modèle régional.	28
Figure 4 : Evolution des prélèvements au forage de Sainghin-en-Weppes. Comparaison des données « producteur » et AEAP.	33
Figure 5 : Evolution modélisée des prélèvements sur les champs captant d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne. Ce dernier champ captant comptabilise également le forage de Seclin.	35
Figure 6 : Evolution modélisée des prélèvements dans le champ captant d'Hempempont.....	37
Figure 7 : Evolution des prélèvements des forages de Pérenchies. Comparaison des données « producteur » et AEAP.	37
Figure 8 : Prélèvements modélisés en volumes journaliers de 1982 à 2012 pour le champ captant de La Carnoy et Pérenchies et les forages du Nord de Lille (Saint André et La Madeleine) et des eaux industrielles de Lille.	38
Figure 9 : Evolution modélisée des prélèvements aux forages de La Neuville.	42
Figure 10 : Prélèvements modélisés en volume journalier pour les champs captants de Flers-en-Escrebieux, Pecquencourt, Férin et La Neuville.	45
Figure 11 : Evolution modélisée des prélèvements au Carbonifère en volume journalier.	46
Figure 12 : Evolution des prélèvements au forage de Hem. Comparaison des données « producteur » et de l'AEAP.....	47
Figure 13 : Evolution des prélèvements au forage de Lannoy (Carbonifère). Comparaison des données « producteur » et de l'AEAP.....	47
Figure 14 : Evolution des prélèvements sur les forages des Trois Ponts (Carbonifère). Comparaison des données « producteurs » et de l'AEAP.	48
Figure 15 : Evolution des prélèvements des forages de Roncq (Carbonifère) en volume journalier. Comparaison des données « producteur » et des données de l'AEAP.....	51
Figure 16 : Prélèvements AEAP à l'échelle du modèle.	52
Figure 17 : Evolution modélisée des prélèvements en volumes journaliers (a) et volumes cumulés (b) pour les principaux champs captants de la métropole lilloise.	55
Figure 18 : Localisation des différentes sources de données piézométriques (à gauche) et illustration du traitement statistique sur les données ADES (à droite).....	58
Figure 19 : Localisation des ouvrages au Nord et au centre de Lille.	59
Figure 20 : Chroniques piézométriques ADES au voisinage des champs captants du Nord de Lille.	60
Figure 21 : Présentation des données piézométriques au centre de Lille.	60
Figure 22 : Chroniques piézométriques des forages de Saint André et de La Madeleine.	61
Figure 23 : Chroniques piézométriques de quelques ouvrages peu profonds du vieux Lille et comparaison avec la piézométrie du forage N8.	62
Figure 24 : Chroniques piézométriques du Nord et du centre de Lille retenues pour le calage.	63
Figure 25 : Ouvrages de suivi piézométrique à Lille Sud et Grand Stade.	64
Figure 26 : Chroniques piézométriques ADES à Lille Sud et Lesquin.	64

Figure 27 : Chroniques piézométriques sur le site du Grand Stade et comparaison avec le piézomètre ADES 00147D0218/P1.	65
Figure 28 : Chroniques piézométriques de Lille Sud et Lesquin, retenues pour le calage.	65
Figure 29 : Ouvrages voisins du champ captant d'Hempempont.	66
Figure 30 : Longues chroniques piézométriques encadrant le champ captant d'Hempempont.	66
Figure 31 : Chroniques récentes de deux piézomètres de la commune de Tressin et comparaison avec les deux chroniques ADES les plus proches.	67
Figure 32 : Chroniques piézométriques des forages du champ captant d'Hempempont.	67
Figure 33 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour le champ captant d'Hempempont.	68
Figure 34 : Ouvrages des champs captants du Sud de Lille – Emmerin et Houplin-Ancoisne...	69
Figure 35 : Chroniques piézométriques des forages d'Houplin-Ancoisne.	69
Figure 36 : Chroniques piézométriques des forages d'Emmerin.	70
Figure 37 : Chroniques piézométriques autour des champs captants d'Emmerin-Houplin.	70
Figure 38 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour les champs captants du Sud de Lille.	71
Figure 39 : Ouvrages proches des champs captants des Ansereuilles.	72
Figure 40 : Chroniques piézométriques autour des champs captants des Ansereuilles.	73
Figure 41 : Piézomètres du site de la Blanchisserie de Don.	73
Figure 42 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour les champs captants des Ansereuilles.	74
Figure 43 : Localisation des ouvrages du champ captant de Pecquencourt.	75
Figure 44 : Chroniques piézométriques du champ captant de Pecquencourt et du piézomètre PZE1P situé dans le champ captant.	76
Figure 45 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour le champ captant de Pecquencourt.	76
Figure 46 : Localisation des ouvrages du champ captant de Flers-en-Escrebieux.	77
Figure 47 : Chroniques piézométriques autour du champ captant de Flers-en-Escrebieux.	77
Figure 48 : Localisation des ouvrages du champ captant de Férin.	78
Figure 49 : Chroniques piézométriques autour du champ captant de Férin.	78
Figure 50 : Localisation des forages de Pérenchies.	79
Figure 51 : Chroniques piézométriques des ouvrages de Pérenchies.	79
Figure 52 : Localisation des ouvrages dans le Carbonifère.	80
Figure 53 : Chroniques piézométriques du bloc Nord du Carbonifère.	81
Figure 54 : Chroniques piézométriques du bloc Sud de la nappe du Carbonifère.	81
Figure 55 : Ouvrages sélectionnés pour le calage du modèle hydrodynamique dans la zone affinée.	82
Figure 56 : Piézomètres utilisés pour le calage du modèle, et masses d'eau concernées.	86
Figure 57 : Formations retenues pour le modèle géologique.	88
Figure 58 : Pile hydrostratigraphique du modèle géologique.	89
Figure 59 : Localisation des limites choisies pour la modélisation.	90
Figure 60 : Schéma d'une jointure entre le modèle maillé de 500 m de côté (à gauche) et celui de 100 m de côté (à droite) avec indication des épaisseurs des alluvions.	91

Figure 61 : Localisation des sondages utilisés dans le modèle régional du SIGES.	98
Figure 62 : Aperçu de la densification des sondages utilisés dans le modèle affiné.	98
Figure 63 : Extrait du tableau Excel « SONDAGES ».	99
Figure 64 : Base de données des sondages dans GDM.	100
Figure 65 : Carte géologique et failles utilisées dans le modèle.	101
Figure 66 : Extension des Argiles des Flandres (Yprésien) dans l'emprise du modèle.	103
Figure 67 : Extension des Sables d'Ostricourt (Landénien supérieur) dans l'emprise du modèle.	103
Figure 68 : Extension de l'Argile de Louvil (Landénien inférieur) dans l'emprise du modèle.	104
Figure 69 : Extension des Craies et Marnes du Cénomanien dans l'emprise du modèle.	104
Figure 70 : Localisation de la coupe Nord-Sud illustrée dans la figure suivante, sur fond de carte géologique simplifiée.	107
Figure 71 : Coupe transversale montrant l'épaississement du Cénomanien vers le Sud (échelle verticale multipliée par 10).	108
Figure 72 : Localisation de la coupe Nord-Sud illustrée dans la figure suivante, sur fond de carte géologique simplifiée.	110
Figure 73 : Coupe transversale montrant la disparition de la craie séno-turonienne à Cysoing, au droit de l'anticlinal du Mélantois (échelle verticale multipliée par 10).	111
Figure 74 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune d'Ostricourt.	114
Figure 75 : Coupe transversale Sud-Ouest/Nord-Est recoupant un terril à Ostricourt (échelle verticale multipliée par 5).	115
Figure 76 : Localisation de la coupe transversale Nord/Sud passant par Mons-en-Pévèle.	116
Figure 77 : Coupe transversale Nord/Sud passant par Mons-en-Pévèle (échelle verticale multipliée par 5).	117
Figure 78 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune de Harnes.	118
Figure 79 : Coupe transversale Nord-Ouest/Sud-Est recoupant un terril à Harnes (échelle verticale multipliée par 2).	119
Figure 80 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune d'Allennes-les-Marais.	121
Figure 81 : Coupe transversale Nord-Ouest/Sud-Est recoupant un terril à Allennes-les-Marais.	122
Figure 82 : Comparaison de la représentation du toit de la Craie sénonienne entre le modèle régional réalisé dans le cadre du projet SIGES (à gauche) et le modèle affiné (à droite).	124
Figure 83 : Maillage du modèle (mailles carrées de 500 m et de 100 m de côté)	126
Figure 84 : Correspondance entre les couches du modèle géologique et les couches du modèle hydrogéologique.	128
Figure 85 : Localisation et extension des modèles de la Somme, de la Craie et des Calcaires du Carbonifère.	129
Figure 86 : Représentation de la couche des alluvions issue du modèle géologique (en haut), puis après un premier traitement dans le modèle hydrodynamique (au milieu), et enfin couche finale des alluvions prise en compte dans le modèle affiné (en bas).	132
Figure 87 : Diagraphies au micromoulinet réalisées dans la Craie séno-turonienne.	133
Figure 88 : Comparaison des épaisseurs de Craie productive entre l'ancien et le nouveau modèle.	134

Figure 89 : Comparaison des épaisseurs de la Craie compacte entre le modèle régional (en haut) et le modèle affiné (en bas).	135
Figure 90 : Représentation des épaisseurs de chaque couche du modèle affiné.	138
Figure 91 : Chroniques pluviométriques des stations sélectionnées.	140
Figure 92 : Corrélation des données pluviométriques décennales (de 1982 à 2011) entre les stations de Marconelle et de Saint-Pol.	142
Figure 93 : Répartition spatiale en zones de précipitations homogènes.	142
Figure 94 : Chroniques des stations ETP sélectionnées.	143
Figure 95 : Répartition spatiale en zones d'évapotranspiration potentielle homogène.	144
Figure 96 : Répartition spatiale des paramètres du bilan hydrique selon les « zones de sol », avec la numérotation adoptée dans le modèle Craie affiné.	145
Figure 97 : Modification du réseau hydrographique modélisé dans la zone affinée.	149
Figure 98 : Prélèvements par couche aquifère du modèle.	150
Figure 99 : Comparaison des prélèvements sur l'ensemble du modèle et dans les champs captants pour la nappe de la Craie du Séno-Turonien et celle des Calcaires du Carbonifère.	151
Figure 100 : Pourcentage d'augmentation des débits prélevés dans le modèle affiné par rapport au modèle régional.	152
Figure 101 : Situation des points de prélèvement et résultats de la datation des eaux des Calcaires carbonifères réalisée en 2011, sur fond de carte piézométrique d'octobre-novembre 2010 (Source : BRGM).	153
Figure 102 : Superposition des modèles de la Craie (en gris) et des Calcaires du Carbonifère (en rose) et localisation par rapport à la zone affinée.	154
Figure 103 : Valeurs du coefficient d'anisotropie verticale de la couche des Dièves dans le modèle Carbonifère.	156
Figure 104 : Perméabilités de la couche des Calcaires du Carbonifère dans le modèle Carbonifère.	157
Figure 105 : Zones de calcul des bilans hydrodynamiques de la couche 4 représentant l'aquifère des calcaires du Carbonifère.	158
Figure 106 : Evolution des échanges verticaux et latéraux calculés par zone de 1900 à 2010 pour la couche 4 des Calcaires du Carbonifère.	159
Figure 107 : Distribution du ratio des épaisseurs des Dièves entre le modèle Carbonifère et le modèle Craie.	160
Figure 108 : Variation du niveau piézométrique dans les mailles à potentiel imposé de la frontière Est du Carbonifère.	161
Figure 109 : Comparaison de niveaux simulés avec le modèle Carbonifère et le modèle Craie affiné.	162
Figure 110 : Distribution initiale des perméabilités dans la Craie séno-turonienne (m/s).	164
Figure 111 : Distribution initiale des perméabilités dans les Dièves (Turonien) (m/s).	165
Figure 112 : Influence de la perméabilité des Dièves sur deux chroniques piézométriques de la masse d'eau 1004.	166
Figure 113 : Distribution initiale des perméabilités (m/s) dans la Craie du Cénomanien.	166
Figure 114 : Distribution initiale des coefficients d'emmagasinement libre de la Craie du Séno-turonien.	167

Figure 115 : Distribution initiale des emmagasinements libres de la Craie du Cénomanien.	168
Figure 116 : Carte piézométrique de la nappe de la Craie (Basses eaux 2009).	171
Figure 117 : Points de calage des chroniques piézométriques.....	172
Figure 118 : Localisation des stations hydrométriques de référence.	175
Figure 119 : Passage du débit journalier au débit décadaire pour la station de l'Ecaillon à Thiant.	175
Figure 120 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés avec et sans couplage avec le réseau hydrographique	177
Figure 121 : Piézomètres utilisés (cadres rouges) pour illustrer l'influence du réseau hydrographique sur la masse d'eau 1003.....	178
Figure 122 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés dans le secteur de Flers avec et sans couplage avec le réseau hydrographique.	178
Figure 123 : Cartes piézométriques de la Craie (oct 2009) et du Carbonifère (oct.-nov. 2010) et localisation des points de calage influencés par le couplage avec le Carbonifère (ellipse rouge).	179
Figure 124 : Influence du couplage avec le modèle du Carbonifère sur quelques piézomètres de la Craie séno-turonienne.	180
Figure 125 : Différence de charges simulée entre la Craie séno-turonienne et les Calcaires du Carbonifère en octobre 2009 (carte du haut), et épaisseur des Dièves dans la même zone (carte du bas).	181
Figure 126 : Cartes des perméabilités obtenues après calage de la Craie séno-turonienne. Vue d'ensemble (carte du haut) et zoom sur la zone affinée (carte du bas).	184
Figure 127 : Carte de distribution spatiale des perméabilités obtenue après calage des Dièves.	185
Figure 128 : Coefficients d'anisotropie de perméabilité K_v/K_h dans les Dièves après calage.	186
Figure 129 : Perméabilité de colmatage du lit des cours d'eau (après calage) : Vue d'ensemble (en haut) et zoom sur la zone affinée (en bas).	188
Figure 130 : Comparaison de la piézométrie simulée de la nappe de la Craie en Octobre 2009 avec les isopièzes Basses Eaux 2009 – zoom sur la zone affinée.	189
Figure 131 : Comparaison de la piézométrie simulée de la nappe de la Craie en Octobre 2009 avec les isopièzes Basses Eaux 2009.	190
Figure 132 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées au Nord et centre de Lille.	192
Figure 133 : Comparaison de la chronique piézométrique simulée et de la chronique de prélèvement au point N8.	192
Figure 134 : Coefficient d'emmagasinement captif spécifique du modèle régional (à gauche) et du modèle affiné (à droite).	193
Figure 135 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Lille Sud et Grand Stade.	193
Figure 136 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Hempempont.	194
Figure 137 : Prélèvements totaux (en milliers de m^3 par jour) dans le champ captant d'Hempempont.	194
Figure 138 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Emmerin.	195
Figure 139 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Houplin-Ancoisne.	196

Figure 140 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées aux Ansereuilles.	197
Figure 141 : Valeurs de transmissivités issues du modèle de gestion du champ captant de Pecquencourt réalisé par SB ₂ O en 2009 (fortes valeurs en orange et rose, faibles valeurs en bleu et violet), avec localisation des piézomètres de calage et des failles de Marqueffles et Courchelettes.....	199
Figure 142 : Zoom sur la zone de Pecquencourt de la carte de distribution des perméabilités du modèle de la Craie affiné.....	200
Figure 143 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Pecquencourt.	201
Figure 144 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées autour de Pecquencourt – Données SIADO.....	201
Figure 145 : Topographie et carte piézométrique d'octobre 2009 de part et d'autre de la faille de Courchelettes.....	202
Figure 146 :Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Flers.....	203
Figure 147 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Férin. ...	203
Figure 148 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées aux piézomètres 00272X0026 du réseau SIADO et 00277X0137 du réseau Noréade.....	203
Figure 149 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données MEL) et simulées à Pérenchies (en haut), et chronique des volumes prélevés (en bas).	204
Figure 150 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données MEL) et simulées à Sainghin-en-Wéppes.	204
Figure 151 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1003.....	205
Figure 152 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1006.....	207
Figure 153 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1018.....	208
Figure 154 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées sur la masse d'eau 1018.	209
Figure 155 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées dans les Calcaires du Carbonifère.	210
Figure 156 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires présentées pour la masse d'eau 1006.....	211
Figure 157 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données ADES) et simulées dans la masse d'eau 1003.....	212
Figure 158 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées dans la masse d'eau 1003.	212
Figure 159 : Localisation des piézomètres ADES de la masse d'eau1006.	213
Figure 160 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées sur la ME 1006.	214
Figure 161 : Recouvrement des Sables d'Ostricourt sur la masse d'eau 1007.	215
Figure 162 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau1007.	216
Figure 163 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées sur la ME 1007.	216

Figure 164 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données producteurs) et simulées sur la masse d'eau 1007.....	217
Figure 165 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau 1010.	218
Figure 166 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1010.....	219
Figure 167 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données producteurs) et simulées sur la masse d'eau 1010.....	220
Figure 168 : Localisation des piézomètres ADES sur la masse d'eau 1004.....	222
Figure 169 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1004.....	222
Figure 170 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau 1018.	223
Figure 171 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1018.....	224
Figure 172 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées sur la masse d'eau 1018.....	224
Figure 173 : Comparaison des débits observés et simulés dans les cours d'eau.	229
Figure 174 : Cartographie à l'échelle du modèle des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance (d'après le MEDDE, GIS Sol. 2014).....	231
Figure 175 : Cartographie nationale des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance (d'après le MEDDE, GIS Sol. 2014).....	231
Figure 176 : Cartes des débits de débordement pour la couche des alluvions pendant la période des hautes eaux de 2001 (à gauche) et des moyennes eaux de 2009 (à droite). ..	232
Figure 177 : Cartes des débits de débordement pour la couche des limons pendant la période des hautes eaux de 2001 (à gauche) et des moyennes eaux de 2009 (à droite)..	233
Figure 178 : Visualisation des périodes de basses eaux 1997, hautes eaux 2001 et moyennes eaux 2012 sur la chronique du piézomètre 00147D0218/P1.	234
Figure 179 : Tracé des trajectoires inverses, en basses eaux 1997, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.	235
Figure 180 : Tracé des trajectoires inverses, en hautes eaux 2001, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.	236
Figure 181 : Tracé des trajectoires inverses, en moyennes eaux de décembre 2012, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.....	237
Figure 182 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (BE 1997, HE 2001, dec 2012) sur les champs captants de Lille.....	240
Figure 183 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (BE 1997, HE 2001, dec 2012) sur les champs captants d'Hempempont et du Carbonifère.	241
Figure 184 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (BE 1997, HE 2001, dec 2012) sur le champ captant de Pecquencourt.	242
Figure 185 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (HE 2001, BE 1997, dec 2012) sur les champs captants de Flers et de Fégin.....	243
Figure 186 : Chroniques hydroclimatiques appliquées à la nappe de la Craie.	244
Figure 187 : Comparaison des débits d'échange nappe-rivière entre la totalité du domaine modélisé et la couche de la Craie productive.....	247

Figure 188 : Sens des échanges simulés entre nappes et rivières en octobre 2009 sur l'ensemble du modèle (en haut) et dans la zone affinée (en bas).....	248
Figure 189 : Bilan des débits dans la nappe la Craie (en Mm ³ /an).....	249
Figure 190 : Délimitation des zones de bilan autour des champs captants : polygones rouges.	250
Figure 191 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 1 à 4 pour la couche des alluvions (à gauche) et celle des limons (à droite).....	251
Figure 192 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 61 à 64 pour la couche de la Craie séno-turonienne productive (à gauche) et de la Craie compacte (à droite).	251
Figure 193 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 101 et 102 pour la couche des Calcaires carbonifères.	251

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ouvrages de suivi piézométrique autour des champs captants utilisés pour le calage du modèle.	84
Tableau 2 : Ouvrages de suivi piézométrique ADES implantés dans les masses d'eau des territoires qui concourent à l'alimentation de la métropole lilloise.	85
Tableau 3 : Regroupement des formations du Crétacé supérieur (craies et marnes de la carte géologique harmonisée).	101
Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle affiné.	136
Tableau 5 : Epaisseurs maximales et moyennes de chaque couche du modèle affiné.	136
Tableau 6 : Liste des stations pluviométriques utilisées dans le modèle.	141
Tableau 7 : Valeurs des coefficients de corrélation par rapport à la station Marconelle.	141
Tableau 8 : Caractéristiques des stations ETP utilisées dans le modèle.	143
Tableau 9 : Paramètres de recharge pris en compte dans le modèle Craie régional.	146
Tableau 10 : Paramètres de recharge pris en compte dans le modèle Craie affiné.	147
Tableau 11 : Paramètres hydrogéologiques pris en compte dans le modèle Carbonifère.	156
Tableau 12 : Bilan des zones 403 et 405, et de l'ensemble de la couche 4 du modèle Carbonifère.	158
Tableau 13 : Comparaison des débits transitant dans la couche des Calcaires carbonifères dans le modèle Carbonifère et dans le modèle Craie affiné.	162
Tableau 14 : Détermination des classes de transmissivité de la Craie séno-turonienne.	164
Tableau 15 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques initiaux pris en compte dans le modèle affiné.	169
Tableau 16 : Stations hydrométriques utilisées comme références pour le modèle.	174
Tableau 17 : Paramètres hydodynamiques obtenus après calage du modèle.	182
Tableau 18 : Moyennes interannuelles des composantes hydroclimatiques sur l'ensemble du modèle.	244
Tableau 19 : Débits (en m ³ /s) et flux (en mm/an) intra- et inter-couches sur l'ensemble du domaine modélisé.	246
Tableau 20 : Débits (en m ³ /s) échangés par zone.	253

1 Introduction

La Métropole Européenne de Lille (MEL) est chargée d'assurer à plus d'un million de personnes une alimentation en eau de qualité et en quantité suffisante. Pour ce faire, elle dispose de plusieurs ressources :

- Les eaux de surfaces prélevées à Aire sur la Lys ;
- Les eaux souterraines prélevées dans la nappe du Carbonifère, principalement sur les champs captants de Roncq et Roubaix-Tourcoing-Wattrelos ;
- Les eaux souterraines prélevées dans la nappe de la Craie, principalement sur les champs captants du Sud de Lille, d'Hempempont, de Flers-en-Escrebieux et de Pecquencourt.

La nappe de la Craie est celle qui participe le plus à l'alimentation en eau potable de la métropole (environ 60%) et c'est également la plus vulnérable à la pollution.

Pour faire face à ces problèmes de qualité, il est important pour la MEL de se doter d'un outil de modélisation hydrodynamique adapté à l'échelle des champs captants de la nappe de la Craie alimentant la métropole.

Dans le cadre de la convention de recherche partagée entre le BRGM et la MEL, une modélisation hydrodynamique de la nappe de la Craie a été réalisée à l'échelle des territoires alimentant en eau potable la métropole lilloise. Ce modèle constitue un affinement du modèle hydrodynamique régional de la nappe de la Craie, réalisé dans le projet SIGES (Buscarlet et Pickaert, 2011).

L'affinement du modèle régional consiste en particulier à :

- affiner la discrétisation spatiale du modèle régional *via* un maillage gigogne emboîté ;
- utiliser une échelle temporelle plus fine permettant d'analyser les variations saisonnières ;
- actualiser les données à fin 2012 ;
- affiner le découpage vertical des niveaux géologiques supérieurs ;
- intégrer les avancées de connaissance, en particulier en ce qui concerne (1) les échanges avec la nappe du Carbonifère (projet ScaldWIN), et (2) les échanges nappe-rivière par une prise en compte des nappes alluviales et du réseau hydrographique secondaire.

2 Etat des lieux du modèle hydrodynamique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais

L'objectif du projet est l'affinement du modèle hydrodynamique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais (Buscarlet et Pickaert, 2011) autour des champs captants de la métropole lilloise. Avant de décrire les travaux réalisés dans le cadre de cette étude, ce chapitre synthétise les principales caractéristiques du modèle régional initial.

2.1 LE CODE DE CALCUL MARTHE

Le logiciel MARTHE (Thiéry, 1990) est développé au BRGM depuis plus de 25 ans.

2.1.1 Exemples de modèles régionaux réalisés avec Marthe

De nombreux modèles d'extension régionale ont été développés avec MARTHE pour la gestion des ressources en eau souterraine. En voici quelques exemples :

- modèle Nord-Aquitain (MONA) initié en 1993 et enrichi dans le cadre de plusieurs projets. Dans sa version actuelle, ce modèle simule les écoulements au sein de 15 aquifères du Nord du Bassin aquitain (Pétron et al., 2008) ;
- modèle du bassin versant de la Somme, réalisé en 2002 pour la prévision des crues de nappe ; ce modèle monocouche couvre l'ensemble du bassin crayeux de la Somme (Amraoui et al., 2002) ;
- modèle des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (Croiset et al., 2013) ;
- modèle des écoulements souterrains de la nappe des calcaires carbonifères réalisé dans le cadre du projet transfrontalier ScaldWIN (France – Belgique) (Picot et al., 2014).

2.1.2 Fonctionnalité

Le code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) permet le calcul des écoulements de fluides et de transfert de masse et d'énergie en milieux poreux tridimensionnels avec une approche en volumes finis (Différences Finies Intégrées) en établissant l'équation d'équilibre des débits entre la maille de calcul et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est et Ouest appartenant à la même couche, puis Haut et Bas des couches sus- et sous-jacentes).

Dans chaque maille l'équation suivante est respectée :

$$\sum_{i=1}^6 T_i \cdot (H_i - H_t) + Q + Rech.Surf = S.Surf \cdot \left(\frac{H_t - H_{(t-dt)}}{dt} \right)$$

Avec T_i le coefficient d'échange global (« transmissivité ») entre la maille de calcul et une maille voisine i , H_i la charge d'une maille voisine à la date t , H_t la charge de la maille de calcul à la date t , Q le débit prélevé ou injecté dans la maille, $Rech$ le flux de recharge, $Surf$ la surface horizontale de la maille, et S le coefficient d'emmagasinement.

Le modèle utilisé est de type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation, et la face inférieure au mur de la formation (Figure 1).

Pour une maille, les échanges peuvent se faire avec les mailles adjacentes appartenant à la même couche, ainsi qu'avec la maille inférieure et la maille supérieure.

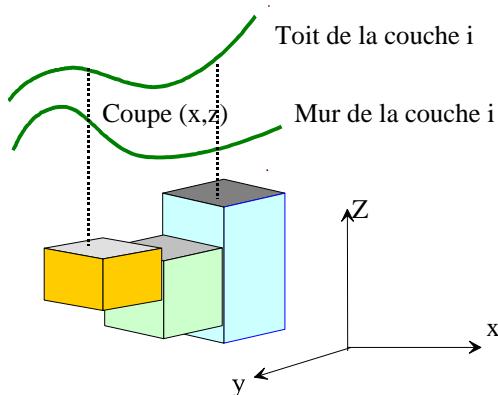


Figure 1 : Exemple de discréétisation d'un modèle maillé multicouche.

Chaque formation géologique modélisée (aquitifère ou éponte) est représentée par un assemblage de mailles parallélépipédiques (voir schéma ci-contre).

Dans chacune des mailles, le logiciel calcule une charge hydraulique (cote piézométrique) en fonction des données introduites (perméabilité, emmagasinement, débit de pompage, ...)

On obtient ainsi un système d'équations linéaires conduisant à une matrice creuse. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés pour résoudre ce système d'équations : gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat. Compte tenu de la non-linéarité due au fait que les coefficients T_i dépendent des charges, la résolution se fait de manière itérative, avec possibilité d'utiliser un coefficient de sur-relaxation ou de sous-relaxation. Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des mailles organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone non saturée, écoulement multiphasique, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction avec des cours d'eau, transferts d'énergie, etc.).

La convergence des calculs itératifs est contrôlée par plusieurs critères, principalement les écarts de charge moyens et maximaux entre deux itérations successives et les débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle et ponctuel dans chacune des mailles). En pratique, l'état de convergence d'un modèle est principalement évalué par des indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches, et plus particulièrement sur le déséquilibre de bilan dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle.

En régime transitoire, la modélisation fait intervenir deux coefficients d'emmagasinement : le coefficient d'emmagasinement en nappe libre (équivalent à la porosité efficace) lorsque la maille n'est pas entièrement saturée en eau, et le coefficient d'emmagasinement captif lorsque la maille est saturée en eau.

La nappe peut s'assécher localement et se re-saturer ultérieurement. Elle peut également déborder.

Le modèle permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes.

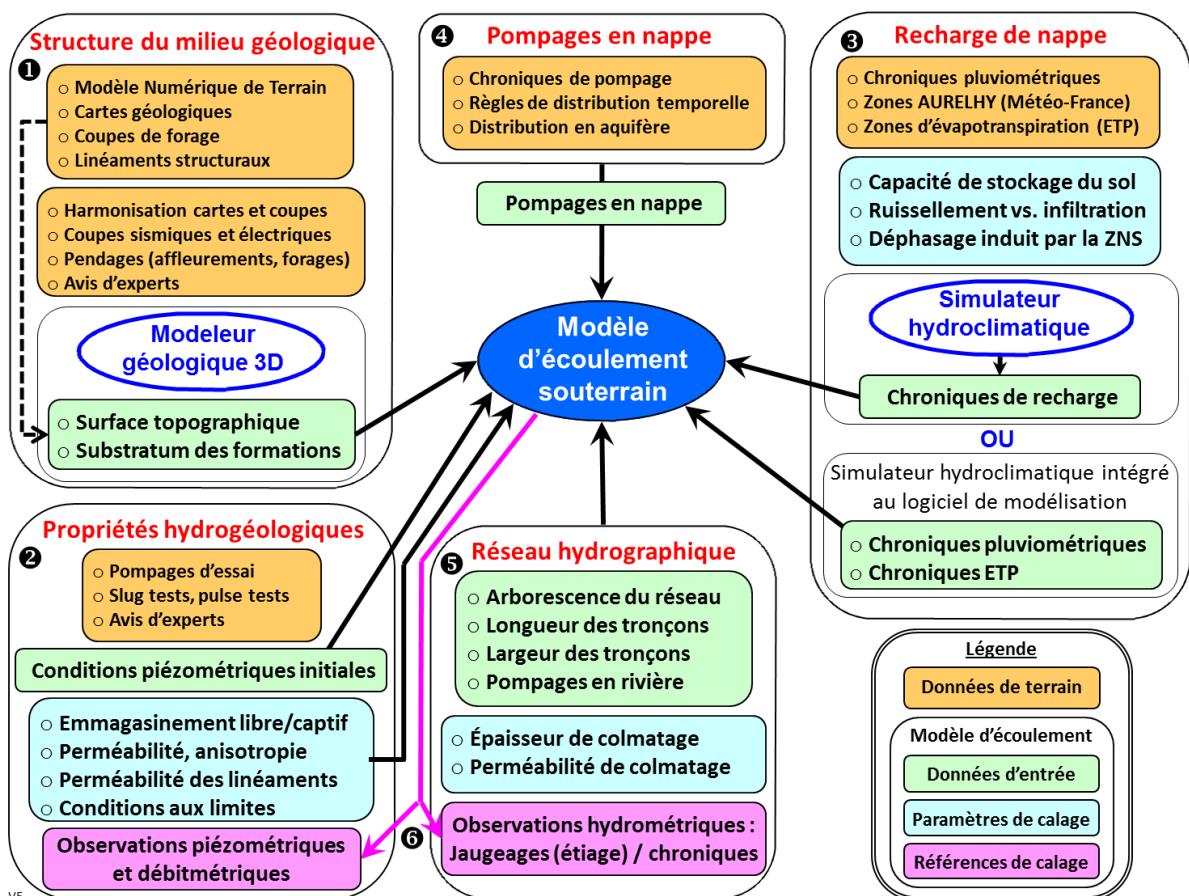
L'interface graphique Win-MARTHE est utilisée en pré- et post-processeur pour la préparation et la mise en forme des données, ainsi que pour la visualisation des données et des résultats.

Pour plus de détails sur le logiciel MARTHE, consulter les références suivantes : Thiéry (1990a et b, 1993, 1994, 1995a et b, 2004, 2006, 2007a, 2007b), Thiéry et Golaz (2002), Thiéry et al. (2002).

2.1.3 Paramètres et variables de modélisation

Les paramètres et variables nécessaires à la modélisation sont présentés à la Figure 2. On différencie les deux types de paramètres décrits ci-dessous.

- Les données d'entrée ou paramètres définis *a priori* (en vert sur la Figure 2) qui ont une valeur fixe pendant toute la durée de la simulation :
 - la structure du milieu géologique ;
 - la structure du réseau hydrographique ;
 - les pompages ;
 - les chroniques de pluie et d'ETP.
- Les variables ou paramètres de calage (en bleu cyan sur la Figure 2) qui, n'étant évalués que par interprétation de mesures ponctuelles ou n'étant pas accessibles aux mesures, doivent être ajustés ou déterminés au cours des phases de calage du modèle :
 - les propriétés hydrogéologiques des formations (emmagasinements, perméabilités...) ;
 - les propriétés du réseau hydrographique ;
 - les paramètres utilisés pour les calculs hydroclimatiques (capacité de stockage du sol, partition entre ruissellement et infiltration, déphasage induit par la zone non saturée).



2.2 LE MODELE HYDRODYNAMIQUE REGIONAL

2.2.1 Rappel de la structure du modèle régional

Les caractéristiques du modèle régional sont décrites dans deux précédents rapports rédigés par Buscarlet et Pickaert en 2001 : le premier détaille le modèle conceptuel, la construction du modèle d'écoulement, et son calage en régime permanent (BRGM/RP-59720-FR), le second expose le calage en régime transitoire (BRGM/RP-60217-FR).

Pour mémoire, le modèle régional de la Craie est constitué de :

- 8 couches :
 - les argiles des Flandres ;
 - les sables du Landénien ;
 - les argiles de Louvil ;
 - la craie productive, du Turonien supérieur au Sénonien ;
 - la craie compacte, du Turonien supérieur au Sénonien ;
 - les Dièves ;
 - les craies et marnes du Cénomanien ;
 - les Calcaires carbonifères.
- 208 000 mailles actives de 500 m (avec regroupement des prélèvements au centre de la maille) ;
- une couche Carbonifère à charges imposées ;
- un réseau hydrographique principal (de classe 1 à 2 dans la BD Carthage).

Les simulations en régime transitoire sont menées de 1982 à 2010 au pas de temps mensuel, le calcul de la recharge se faisant au pas de temps décadaire.

2.2.2 Conditions aux limites

Les alluvions et la craie ont été considérées comme une entité hydrogéologique unique aux endroits où ces deux formations sont en contact. En effet, sur le plan hydraulique, les niveaux piézométriques de la craie et des alluvions sont très proches et le contraste de perméabilité entre ces deux formations est faible.

Les limites de la craie sont définies de la manière suivante :

- Les limites Ouest et Est du réservoir correspondent aux limites du réservoir crayeux, en limite d'affleurement des formations sous-jacentes, respectivement le Boulonnais et l'Avesnois.
- Au Nord, la craie est captive et s'enfonce sous de puissants dépôts cénozoïques (Flandres et Bassin d'Orchies). Même si, géologiquement, la craie existe encore, le poids des terrains sus-jacents ferme les fissures et les joints de stratification de la formation, réduisant fortement son caractère aquifère.
- Le long de la mer du Nord et de la Manche, la charge est imposée au niveau de la mer à 0 m NGF.
- Au Sud, l'Authie, l'Ancre et la Somme constituent une limite de débordement.

L'extension de la couche Carbonifère est limitée à la zone de contact avec la nappe de la Craie dans la région de Lille. Les charges sont imposées en conformité avec la piézométrie mesurée au cours de la campagne d'octobre 2010.

2.2.3 Paramètres de recharge

Le bilan hydroclimatique de MARTHE est basé sur le schéma de calcul du logiciel GARDENIA. Dix modèles globaux ont été calés à l'aide de GARDENIA pour différents bassins versants sélectionnés dans l'emprise du modèle régional, et les résultats de simulation ont servi à définir un jeu de paramètres initiaux pour le calcul de la recharge sur l'ensemble du modèle régional.

2.2.4 Prélèvements

Lors de la phase de modélisation en régime transitoire du modèle régional, les chroniques de prélèvement s'arrêtaient en 2008. Pour les années 2009 et 2010, les prélèvements de 2008 avaient été reconduits à l'identique. Il est à noter que pour les principaux champs captants, les prélèvements relevés par l'Agence de l'Eau correspondent à des volumes globaux, affectés arbitrairement à un ouvrage du champ captant. Dans le modèle hydrodynamique régional, ces volumes ont été distribués de façon uniforme sur l'ensemble des ouvrages de chaque champ captant.

2.2.5 Résultats

Malgré la complexité du domaine modélisé et des caractéristiques spécifiques de l'aquifère crayeux, les résultats de la modélisation en régime transitoire étaient satisfaisants. Les niveaux moyens, les fluctuations annuelles, ainsi que les tendances étaient assez bien reproduits sur la majorité des chroniques. De surcroît, les chroniques de débit des rivières restituées par le modèle se superposaient de manière satisfaisante aux chroniques enregistrées aux stations hydrométriques disponibles, ce qui a permis de valider le travail réalisé sur la pluie efficace et la recharge.

Compte-tenu de la vaste étendue géographique du modèle et du manque local de connaissance, il demeurait cependant des zones où le calage du modèle se révélait médiocre ; en particulier :

- la zone sud de la Craie de la vallée de la Scarpe et de la Sensée ;
- la masse d'eau de la Craie du Cambrésis.

Dans ces secteurs, les niveaux piézométriques simulés étaient globalement trop hauts et les fluctuations calculées par le modèle peu représentatives des observations.

Inversement, d'autres zones se distinguaient par un calage très satisfaisant, notamment :

- la craie de l'Artois et de la vallée de la Lys,
- la craie de la vallée de la Deûle et les piézomètres représentatifs des grands champs captants de l'agglomération Lilloise (Emmerin, Houplin-Ancoisne, Ansereuilles...).

Les bilans hydrauliques calculés par le modèle semblaient par ailleurs tout à fait probants, aussi bien pour leurs composantes d'infiltration et d'échanges nappe-rivière que pour le rôle du Calcaire Carbonifère.

Plusieurs analyses de sensibilité ont été menées à l'aide du modèle régional, en particulier sur le rôle hydraulique de la faille de Courchelette, sur l'épaisseur productive de la Craie, et sur les données de précipitation. Elles ont mis en évidence l'impact majeur de l'hypothèse de l'épaisseur productive de la Craie choisie initialement. Celle-ci peut être très variable, et il était recommandé de la revoir dans des perspectives d'amélioration du modèle pour répondre à des problématiques locales.

3 Définition et contexte de la zone à affiner

3.1 DEFINITION DE LA ZONE A AFFINER

Les principaux champs captants alimentant en eau potable la métropole lilloise à partir de pompages dans la Craie sont :

- Les champs captants du Sud de Lille (Les Ansereuilles, Houplin-Ancoisne, Emmerin, Sainghin en Weppes et Seclin) ;
- Le champ captant de Flers-en-Escrebieux ;
- Le champ captant de Pecquencourt ;
- Le champ captant d'Hempempont.

Dans la mesure du possible, la zone affinée doit englober les principaux secteurs affectés par les pompages. Sa définition s'appuie sur les calculs de trajectoires inverses réalisés avec le modèle régional (Figure 3). Elle est définie par une emprise rectangulaire dont les sommets ont pour coordonnées en Lambert II étendu :

$$X_{\min} = 638\ 000 \text{ m} \quad Y_{\min} = 2\ 587\ 100 \text{ m}$$

$$X_{\max} = 668\ 500 \text{ m} \quad Y_{\max} = 2\ 631\ 100 \text{ m}$$

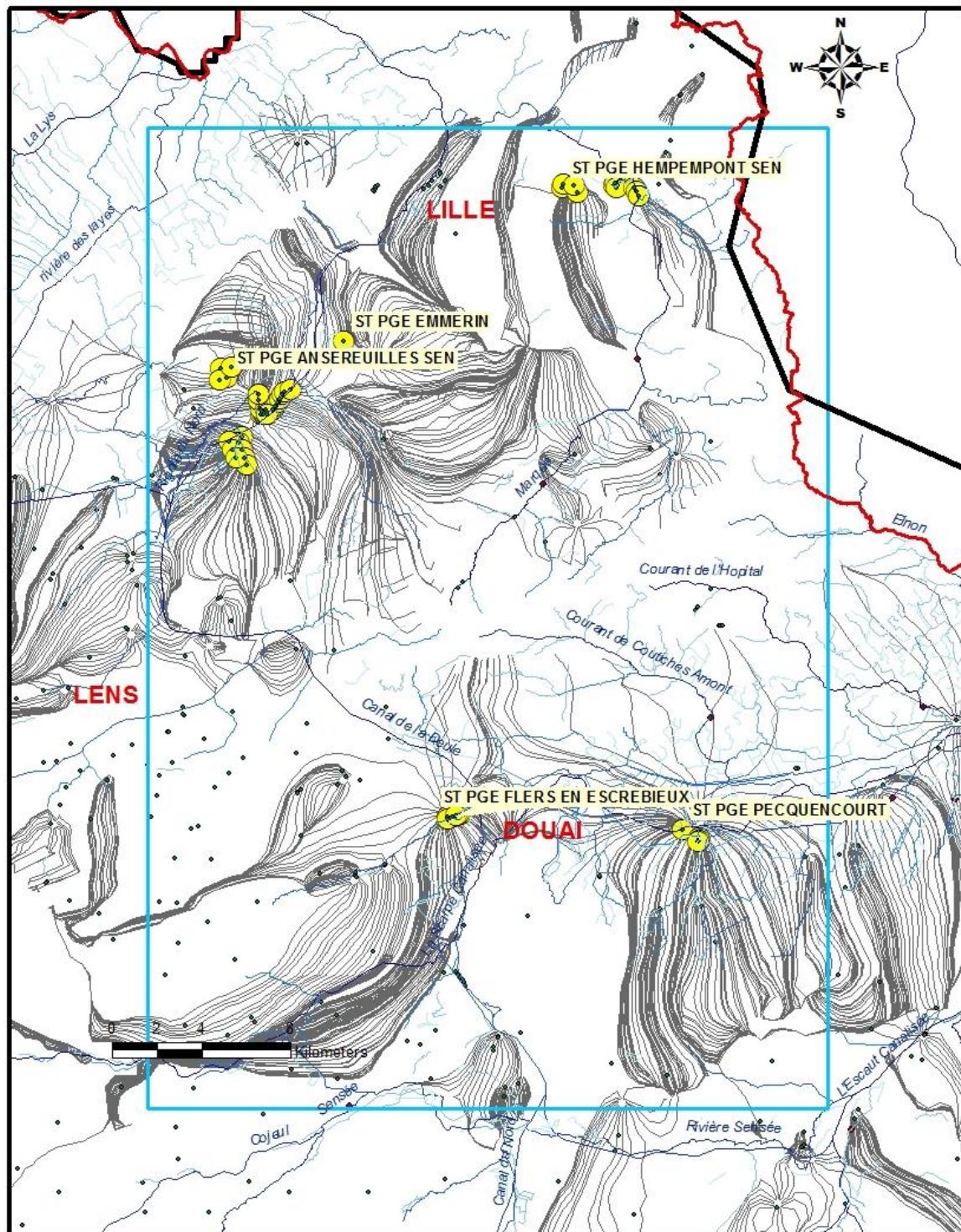


Figure 3 : Localisation de la zone affinée par rapport aux principaux champs captants, à partir des trajectoires inverses simulées avec le modèle régional.

3.2 CONTEXTE DE LA ZONE A AFFINER

3.2.1 Echanges nappe-rivière

D'après la synthèse sur les Aquifères et Eaux Souterraines de France (2006), l'ensemble de la nappe libre de la Craie contribuerait au débit des cours d'eau à hauteur de 56% en moyenne, ce taux pouvant aller de 24% pour la Hem jusqu'à 69% pour les affluents rive droite du cours inférieur de la Canche. Le drainage total de la nappe de la Craie s'élèverait ainsi à un peu plus de 1,1 milliard de m³/an.

En de nombreux endroits, cependant, les échanges sont inversés et les cours d'eau réalimenteraient la craie : la Hem à Clerques (56 l/s par km) et en amont de Tournehem (8 l/s), l'Aa en aval de Wizernes (18 l/s), la Deûle dans les champs captants du Sud de Lille (256 l/s, soit 14% des prélèvements), la Haute Sensée (70 l/s), l'Escaut en aval de Cambrai (226 l/s), les cours inférieurs de la Rhonelle et de l'Aunelle (93 l/s). Des pertes ont été également estimées à partir des canaux de Lens, de la Sensée, de la Scarpe et de la Deûle, totalisant 1 060 l/s.

3.2.2 Echanges avec les autres aquifères

Les alluvions

Les alluvions peuvent également alimenter la nappe de la Craie par drainance descendante, en particulier dans les champs captants du Sud de Lille où les alluvions de la Deûle contribuerait ainsi à 53% des prélèvements, avec une réalimentation de 949 l/s. Les alluvions de l'Escrebieux et de la Scarpe (en amont de Douai) fourniraient (avec les sables landéniens) un apport estimé à 161 l/s ou 10 l.s⁻¹.km⁻². Enfin, à l'aval de Valenciennes, les alluvions de l'Escaut apporteraient par drainance quelques 156 l/s à la nappe de la Craie; cette drainance étant bien mise en évidence à Fresnes-sur-Escaut où les niveaux piézométriques des deux nappes (différents de 1 à 2,5 m) fluctuent de manière similaire ; il en résulte localement une pollution des eaux captées dans la Craie.

Les Calcaires carbonifères

Les Calcaires carbonifères sont également soumis à des échanges avec la Craie, dans deux secteurs :

- à Saint-Amand, dans l'Est du bassin d'Orchies, où des eaux artésiennes, chaudes et fortement sulfatées, remontent des calcaires mississippiens et minéralisent localement la nappe de la Craie (les eaux minérales sont en grande partie prélevées dans la Craie) ; dans un secteur restreint où l'épaisseur des « Dièves » est réduite à quelques mètres (alimentation par drainance ascendante et par failles) ;
- dans la région de Lille-Tourcoing-Tournai, c'est au contraire la nappe de la Craie qui recharge les Calcaires carbonifères séparés par quelques dizaines de mètres seulement de marnes crayeuses turoniennes, par ailleurs faillées. La réalimentation, accentuée par la surexploitation de la nappe des Calcaires carbonifères, était estimée à 36,61.10⁶ m³/an en 1973.

3.3 HETEROGENEITE DE LA CRAIE

Rappelons que l'hypothèse majeure de la modélisation réalisée – présence d'une nappe continue dans les horizons crayeux – doit être replacée dans son contexte lorsqu'on s'intéresse

à une problématique locale (quelques mailles). Ce problème d'échelle est rappelé avec justesse par Crampon et al. (1993) :

« *À l'échelle régionale du système aquifère, on considère souvent que « la nappe de la craie » est une entité et son réservoir est homogène. Cependant, cette homogénéité n'est qu'apparente car à l'échelle plus locale, il existe plusieurs facteurs d'hétérogénéité :*

- *Superposition de plusieurs aquifères : ensemble d'assises crayeuses séparées par des intercalations marneuses ;*
- *Développement variable de la fissuration avec la profondeur, selon l'exposition aux agents climatiques : quelques mètres à une dizaine de mètres sous les plateaux, parfois plusieurs dizaines de mètres sous les vallées. Cette épaisseur efficace, très irrégulière et donc difficilement appréciable autrement que ponctuellement, est évidemment la seule à prendre en compte pour la gestion de l'aquifère ;*
- *Écoulements préférentiels au toit ou au mur de bancs de craie indurée ou phosphatée, ou de bancs de silex ;*
- *Existence de drains développés à la faveur de failles, de diaclases, ou de joints de stratification ;*
- *Karstification locale, allant de la simple poche de dissolution au réseau souterrain multi-kilométrique partiellement visitable, en passant par des dolines, des effondrements, des conduits d'ouverture décimétrique.*

Du fait de ces différents facteurs, les roches crayeuses, homogènes, isotropes, très poreuses mais peu perméables, constituent un ensemble aquifère complexe à double porosité, matricielle et fissurale, et à perméabilités multiples dans lequel se juxtaposent ou se superposent un écoulement lent, mais généralisé, et des écoulements rapides, très localisés. »

4 Analyse des prélèvements

L'objectif de cette analyse est la réalisation d'une modélisation hydrodynamique de 1982 à 2012, avec des pas de temps annuels de 1982 à 1999, et des pas de temps mensuels de janvier 2000 à décembre 2012. Dans ce chapitre, les données disponibles sont décrites et analysées afin de déterminer les prélèvements qui seront modélisés. Les données de prélèvements proviennent de deux types de sources documentaires :

- La base de données de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP) qui collecte les redevances liées à l'utilisation des ressources en eau de la région. En effet, tout utilisateur doit déclarer les volumes annuels prélevés auprès de l'AEAP afin de s'acquitter de la redevance. L'AEAP gère une base de données intégrant toutes les déclarations reçues depuis 1982. Les prélèvements agricoles ne sont pas soumis à déclaration obligatoire. Néanmoins, en région Nord-Pas-de-Calais, la plupart des déclarations des prélèvements agricoles sont faites et les données gérées par l'AEAP peuvent être considérées comme relativement exhaustives.
- Les producteurs d'eau, qui gèrent au quotidien les forages, possèdent leurs propres bases de données pour les débits sortant de leurs forages. Chaque année, ils déclarent leurs prélèvements à l'AEAP.

La présente étude se focalise plus particulièrement sur les champs captants du Nord de Lille, du Sud de Lille, de Pecquencourt, de Flers-en-Escrebieux et d'Hempempont. Chacun de ces champs captants est étudié dans les chapitres suivants. Les prélèvements au Carbonifère sont abordés en reprenant en grande partie l'analyse faite durant le projet ScaldWIN. Enfin, pour le reste des forages de la zone modélisée, seules les données de l'AEAP sont disponibles ; elles sont donc utilisées après une analyse critique générale.

4.1 CHAMP CAPTANT DES ANSEREUILLES

Ansereuilles : 28 forages de A1 à A28 captant la nappe de la Craie. Le forage A1 est à l'arrêt depuis 1992, et le forage A9 depuis 2003.

Données disponibles :

- Données AEAP : données annuelles de chacun des forages de 1982 à 2012
- Données « producteur » (EDN) : données mensuelles de chacun des forages de janvier 1957 à décembre 2013. Les données remontent bien avant 1982 puisque 4 forages ont des données dès 1957, 5 forages dès 1958, 13 forages dès 1960, 14 forages dès 1961, 16 forages dès 1963, 21 forages dès 1965 et 24 dès 1966. Les 4 forages les plus récents (A25 à A28) ont été mis en route en 1995.

Bon accord général entre les deux sources de données, excepté quelques écarts ponctuels. En général, les données « producteur » sont supérieures aux données déclarées à l'AEAP (sauf pour A27 en 1999). Seules les données « producteur » sont utilisées pour le modèle de la Craie affiné.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 17) :

- Données « producteur » annuelles de 1982 à 1999
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2000 à décembre 2012

Nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
A1	00201B0001/F1	643 097	2 618 205
A2	00201B0002/F2	643 208	2 618 245
A3	00201B0003/F3	643 157	2 618 341
A4	00201B0004/F4	643 077	2 618 416
A5	00201B0005/F5	642 987	2 618 847
A6BIS	00201B0406/F6BIS	642 982	2 619 127
A7	00201B0007/F7	643 268	2 618 416
A8	00201B0008/F8	643 368	2 618 315
A9	00201B0009/F9	643 598	2 618 426
A10	00201B0010/F10	643 719	2 618 606
A11	00201B0011/F11	643 829	2 618 766
A12	00201B0012/F12	643 919	2 618 936
A13	00201B0013/F13	644 009	2 619 117
A14	00201B0014/F14	644 150	2 619 227
A15	00201B0015/F15	644 380	2 619 347
A16	00201B0016/F16	643 368	2 618 205
A17	00201B0017/F17	642 215	2 617 214
A18	00201B0018/F18	642 095	2 616 943
A19	00201B0019/F19	642 235	2 616 622
A20	00201B0020/F20	642 345	2 616 282
A21	00201B0021/F21	642 465	2 615 951
A22	00201B0022/F22	641 644	2 617 013
A23	00201B0023/F23	641 824	2 616 653
A24	00201B0024/F24	641 984	2 616 262
A25	00201B0493/F25	641 765	2 620 330
A26	00201A0494/F26	641 528	2 619 861
A27	00201A0496/F27	641 264	2 620 300
A28	00201A0499/F28	641 234	2 619 779

4.1.1 Forage de Sainghin en Weppes

Le forage de Sainghin en Weppes (SW1) est proche du champ captant des Ansereuilles, avec lequel les prélèvements de ce forage seront comptabilisés (en particulier à la Figure 17). Ce forage capte la nappe de la Craie. La production de ce forage est sous la compétence de la MEL depuis le 1^{er} mai 2000 ; il était auparavant sous la compétence du SIDEN.

Noms	Numéro BSS	XL2E	YL2E
SW1	00201A0117/F1	639 641	2 619 319

Données disponibles (cf. Figure 4) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2012
- Données « producteur » (MEL) mensuelles de mai 2000 à décembre 2013

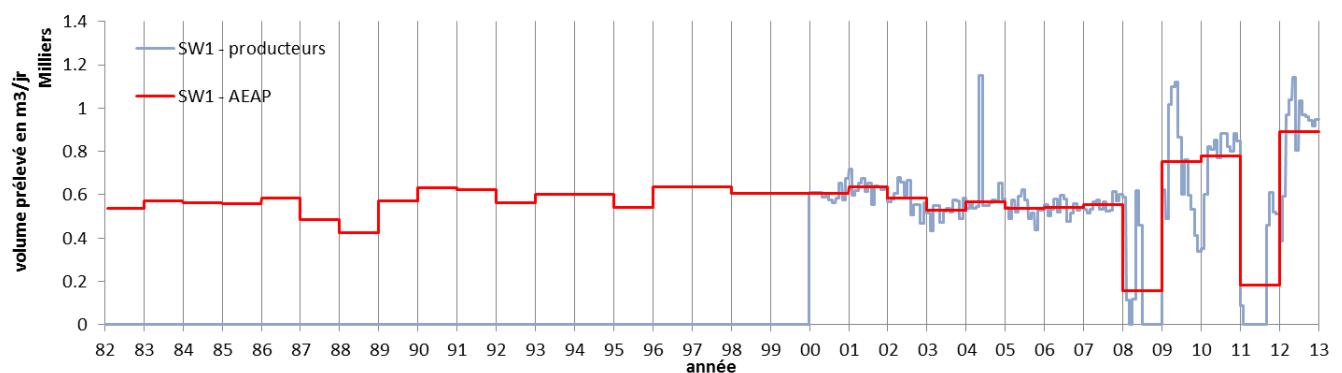


Figure 4 : Evolution des prélèvements au forage de Sainghin-en-Weppes.
Comparaison des données « producteur » et AEAP.

De 2001 à 2012, deux sources de données sont disponibles et peuvent être comparées. Une bonne cohérence entre les sources est observée, exception faite des années 2004 et 2009. Les volumes AEAP sont légèrement inférieurs en 2004 (respectivement légèrement supérieurs en 2009) aux volumes « producteur ». Les données « producteur » seront privilégiées. En 2009, des problèmes de qualité conduisent à mettre en décharge quasiment tous les débits. En 2010 et 2011, l'usine est à l'arrêt pour cause de travaux, les débits pompés partent en décharge. Actuellement les débits partent toujours en décharge, à cause de la mauvaise qualité de l'eau prélevée.

Données utilisées pour la modélisation :

- Données AEAP annuelles, de 1982 à 1999 ;
- De janvier à avril 2000, il n'y a pas de données mensuelles disponibles. Celles-ci sont reconstruites par équirépartition sur ces quatre mois de la différence de volumes entre la valeur annuelle AEAP pour l'année 2000 et la somme des valeurs mensuelles « producteur » de mai à décembre 2000 ;
- Données mensuelles « producteur » de mai 2000 à décembre 2012.

4.2 CHAMPS CAPTANTS D'EMMERIN ET D'HOUPLIN-ANCOISNE

22 ouvrages en comptant le réservoir d'Emmerin (E0) qui draine la nappe. Ces ouvrages captent la nappe de la Craie. Les prélèvements attribués à E0 correspondent à une pompe placée dans ce réservoir. 21 forages, dont 10 constituant le champ captant d'Emmerin (E1 à E10) et 11 constituant le champ captant d'Houplin-Ancoisne (H1 à H11). Les prélèvements de l'ensemble de ces forages alimentent l'usine d'Emmerin.

Nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
E0	-	647 711	2 621 609
E1	00146C0001/F1	646 796	2 621 521
E2	00146C0002/F2	646 766	2 621 170
E3	00146C0003/F3	647 177	2 621 110
E4	00146D0004/F4	648 008	2 621 069
E5	00146D0073/F5	648 359	2 620 969
E6	00146D0074/F6	648 579	2 620 929
E7	00146C0072/F7	647 207	2 620 869
E8	00146C0075/F8	646 606	2 621 721
E9	00146D0076/F9W	648 207	2 621 243
E10	00146C0077/F10	647 608	2 621 120
H1	00202A0122/F1	647 797	2 617 933
H2	00202A0123/F2	647 559	2 618 134
H3	00202A0124/F3	647 316	2 618 304
H4	00202A0125/F4	646 996	2 618 463
H5	00202A0126/F5	646 745	2 618 605
H6	00202A0127/F6	646 474	2 618 755
H7	00202A0128/F7	646 264	2 619 036
H8	00202A0129/F8	645 973	2 619 196
H9	00202A0130/F9	645 763	2 619 417
H10	00202A0131/F10	645 553	2 619 627
H11	00202A0407/F11	646 815	2 618 144

Données disponibles :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2012. Les prélèvements annuels de l'AEAP sont attribués à E1 mais correspondent à la somme des prélèvements de l'ensemble des forages d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne.
- Données « producteur » (MEL) annuelles sur chacun des 11 ouvrages d'Emmerin de 1974 à 1992.
- Données « producteur » (MEL) des prélèvements mensuels sur chacun des 11 ouvrages d'Emmerin de janvier 1993 à décembre 2013.
- Données « producteur » (MEL) des prélèvements mensuels sur chacun des 11 forages d'Houplin-Ancoisne de janvier 1992 à décembre 2013.
- Données « producteur » (MEL) des volumes annuels sortant de l'usine d'Emmerin de 1974 à 2013.

Jusqu'en 2010, les données AEAP annuelles correspondent parfaitement aux volumes sortant de l'usine d'Emmerin. À partir de 2011, les volumes sortant de l'usine incluent également les volumes prélevés au forage de Seclin, alors que les données de l'AEAP distinguent les volumes de E1 et S1. De 1993 à 2012, les prélèvements mensuels sur chacun des forages sont comparés aux volumes annuels sortant de l'usine d'Emmerin. Les volumes prélevés sont régulièrement supérieurs aux volumes sortant de l'usine car ils comptabilisent également les eaux mises à l'exhaure pour diverses raisons (qualité impropre à la consommation, purge des circuits, essais de pompage, ...). Pour Houplin-Ancoisne, de 1982 à 1991, les prélèvements par forage ne sont pas connus et seuls les volumes totaux des forages actifs à cette période sont connus. Ces données sont reconstruites en répartissant de façon égale le volume total entre les forages. Les forages E1, E8, E9 et H8 sont à l'arrêt sur toute la période de 1982 à 2012. Ils ne sont donc pas pris en compte dans la modélisation.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 5) :

- Données annuelles reconstruites de 1982 à 1991 pour Houplin-Ancoisne
- Données « producteur » annuelles par forage de 1992 (ou de 1982 pour Emmerin) à 1999
- Données mensuelles « producteur » de janvier 2000 à décembre 2012.

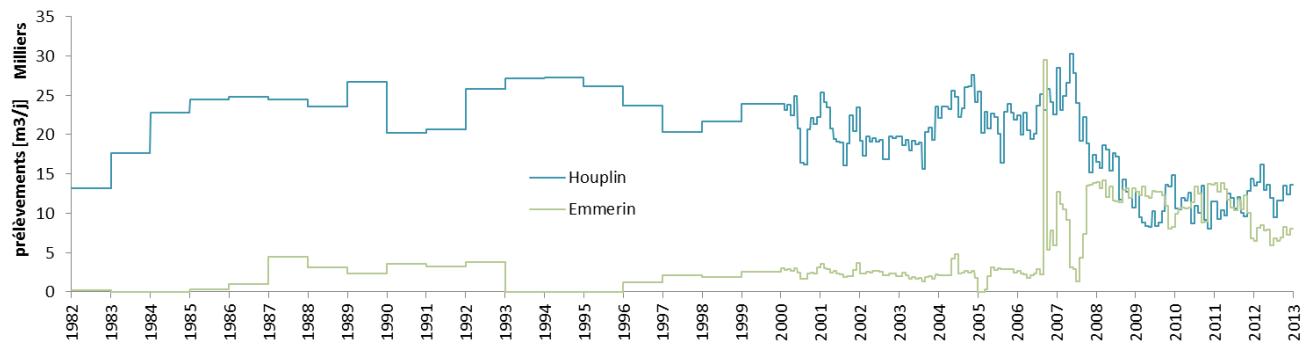


Figure 5 : Evolution modélisée des prélèvements sur les champs captant d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne. Ce dernier champ captant compta également le forage de Seclin.

4.2.1 Forage de Seclin

Le forage de Seclin (S1) est proche du champ captant d'Houplin-Ancoisne, avec lequel il est comptabilisé dans la Figure 5. Il capte la nappe de la Craie.

Noms	Numéro BSS	XL2E	YL2E
S1	00202B0059/F1	648 578	2 617 111

Données disponibles :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2012
- Données « producteur » (EDN) mensuelles de janvier 2007 à décembre 2013

De 2007 à 2012, les deux sources de données sont en bon accord.

Données utilisées pour la modélisation :

- Données annuelles AEAP de 1982 à 1999
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) de janvier 2000 à décembre 2006
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012

4.3 CHAMP CAPTANT D'HEMPEMPONT

15 forages HE1 à HE11, BULL1 et BULL2, PRES1 et PRES2, captant actuellement la nappe de la Craie. Les forages HE5 et HE10 ont été rebouchés (en 1987 pour HE10) car ils captaient à la fois la Craie et le Carbonifère. Le forage HE1 a été abandonné. Depuis 2009, du chlorure de vinyle est présent sur ce champ captant. Seuls les forages de BULL et les PRES alimentent le réseau en eau potable. Les autres forages sont mis en décharge.

Noms	Numéro BSS	XL2E	YL2E
HE2	00148A0004/F2	659 064	2 628 580
HE3	00148A0005/F3	659 094	2 628 470
HE4	00148A0006/F4	659 155	2 628 691
HE5	00148A0007/F5	658 924	2 628 470
HE6	00148A0008/F6	658 974	2 628 600
HE7	00148A0009/F7	659 034	2 628 410
HE8	00148A0010/F8	659 836	2 628 410
HE9	00148A0011/F9	659 926	2 628 229
HE10	00148A0012/F10	659 997	2 628 023
HE11	00148A0024/F11	660 006	2 628 009
BULL1	00147B2958/F1	657 260	2 628 180
BULL2	00147B3049/F2BULL	657 100	2 628 521
PRES1	00147B2850/F1	656 559	2 628 391
PRES2	00147B2876/F2	656 619	2 628 541

Données disponibles:

- Données AEAP : volumes annuels de 1982 à 2012 pour chacun des forages
- Données « producteur » (EDN) : prélèvements mensuels sur chacun des forages de janvier 2007 à décembre 2013

Pour le forage HE11, des désaccords entre les deux sources de données sont observés de 2008 à 2010. En 2009, pas de débits déclarés pour HE11 auprès de l'AEAP et en 2010, les débits sont supérieurs à ceux déclarés, mais ce forage sert de barrière hydraulique et l'eau va en décharge et non dans le réseau d'eau potable. Les données mensuelles seront privilégiées.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 6) :

- Données annuelles AEAP entre 1982 et 1999
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) entre janvier 2000 et décembre 2006
- Données producteurs de janvier 2007 à décembre 2012

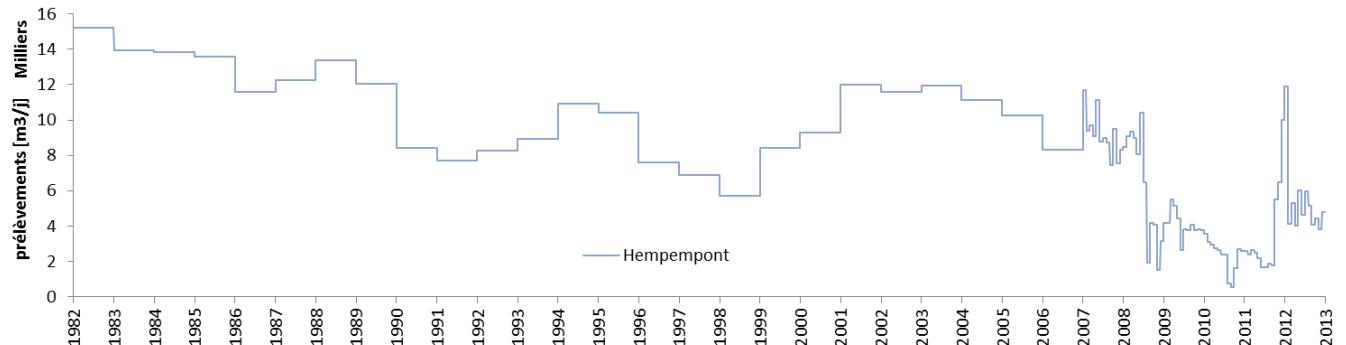


Figure 6 : Evolution modélisée des prélevements dans le champ captant d'Hempempont.

4.4 FORAGES DE PERENCHIES

2 forages PE1 et PE2 (EDN) captant la nappe de la Craie.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
PE1	00146A0619/F4	644 745	2 630 340
PE2	00146A0620/F5	645 149	2 630 410

Données disponibles (cf Figure 7) :

- Données « AEAP » : prélevements annuels de 1982 à 2012.
- Données « producteur » (EDN) : prélevements mensuels dans chacun des forages de janvier 2007 à décembre 2013.

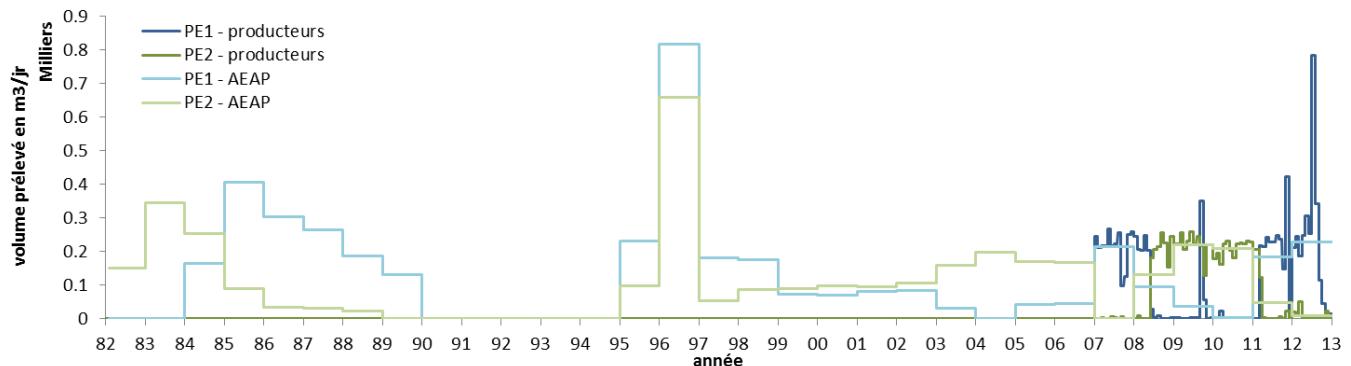


Figure 7 : Evolution des prélevements des forages de Pérenchies. Comparaison des données « producteur » et AEAP.

Entre 2007 et 2012, les deux sources de données (« producteur » et « AEAP ») ne s'accordent pas. Néanmoins, on remarque que les prélevements annuels attribués à PE1 dans les données « producteur », correspondent à ceux attribués à PE2 dans les données « AEAP », et réciproquement. Les deux forages ne sont pas dans les mêmes mailles (ni de 500 m ni de 100 m) et une mise en cohérence est donc nécessaire. Les données « producteur » sont considérées comme prioritaires et les données AEAP sont inversées en conséquence, c'est-à-dire que les prélevements attribués à PE1 (respectivement PE2) dans les données « AEAP » sont réattribués à PE2 (respectivement PE1) pour notre étude. Cette inversion des données « AEAP » est réalisée sur l'ensemble de la période 1982 à 2012, même si aucune information

en ce sens n'existe avant 2007. Les données présentées dans la Figure 7 intègrent ces modifications.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 8) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1999 (avec inversion des deux forages)
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) entre janvier 2000 et décembre 2006 (avec inversion des deux forages)
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012

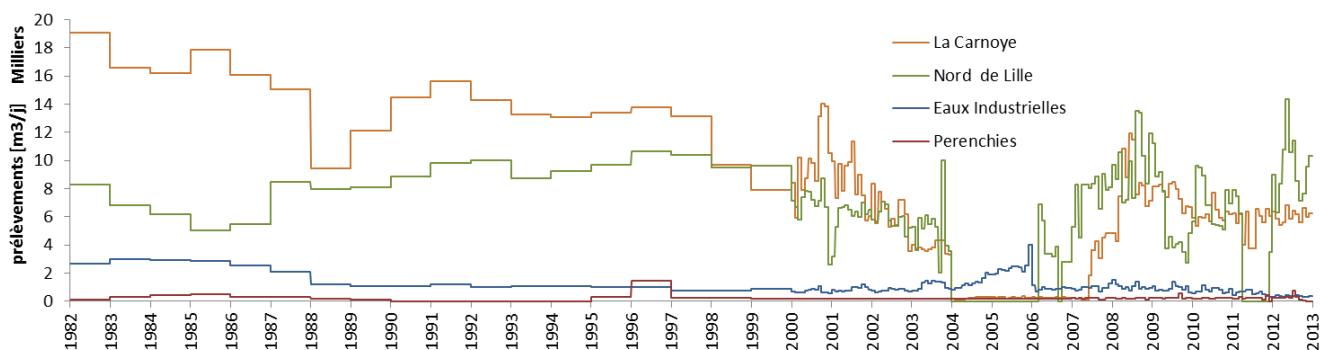


Figure 8 : Prélevements modélisés en volumes journaliers de 1982 à 2012 pour le champ captant de La Carnoye et Pérenchies et les forages du Nord de Lille (Saint André et La Madeleine) et des eaux industrielles de Lille.

4.5 FORAGES DES EAUX INDUSTRIELLES DE LILLE

5 forages (MEL) captant la nappe de la Craie : PR (Palais Rameau), HC (Halle Centrale), BA (Beaux Art), PDG (Philippe de Girard), JE (Jardin d'Enfant). PDG, JE et BA s'arrêtent respectivement en 1985, 1987 et 1991. Le forage PDG a été rebouché en 2009.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
PR	00146B0027/F1	650 587	2 626 858
HC	00146B0028/F1	650 836	2 626 679
BA	00147A0013/F1	651 538	2 626 509
JE	00146B0061/F1	650533	2627426
PDG	00146B0030/F1	650395	2626384

Données disponibles :

- Données AEAP annuelles de PDG et JE de 1982 à 1987. Ces forages s'arrêtent en 1985 et 1987 respectivement.
- Données AEAP : annuelles BA de 1982 à 1991. Ce forage a été rebouché et est hors service depuis 1992.
- Données AEAP : annuelles PR et HC de 1982 à 2012.
- Données « producteur » (MEL) : PR et HC données mensuelles de janvier 1988 à décembre 2013.
- Données « producteur » (MEL) : BA données mensuelles de janvier 1988 à décembre 1991.

Quelques incohérences identifiées entre les deux sources de données : PR en 1991. Une erreur de saisie identifiée dans la base AEAP ; PR en 1996, donnée « producteur » beaucoup

plus haute que la donnée AEAP ; BA en 1990, donnée « producteur » légèrement supérieure à la donnée AEAP. Chaque fois, la donnée « producteur » est privilégiée.

Données utilisées pour la modélisation (cf Figure 8) :

- Données AEAP annuelles utilisées pour PDG et JE de 1983 à 1985 et de 1982 à 1987 respectivement
- Données AEAP annuelles utilisées pour BA, PR et HC de 1982 à 1987
- Données « producteur » annuelles de 1988 à 1999 pour BA, PR et HC
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2000 à décembre 2012 pour PR et HC

4.6 FORAGES DU NORD DE LILLE

Comptent les deux forages de la Madeleine (LAMA1 et LAMA2) et les 5 forages de Saint André (N1, N3, N5, N7 et N8). Ces forages captent la nappe de la Craie. En 2003, en raison de la mauvaise qualité des eaux prélevées, les forages du Nord de Lille et de La Carnoy sont mis à l'arrêt. En 2005, suite à des inondations de caves sur Lomme-Lambersart, une étude (Coulon, 2007) propose d'abaisser le niveau de la nappe par la remise en service de certains forages dont les débits seront rejetés dans la Deûle. Ainsi en 2006, les forages LAMA1 et LAMA2 sont remis en service, suivis en 2007 par certains des forages de La Carnoy. À partir de 2007, un système de télégestion est mis en place reliant la mise en route d'1 à 4 forages (LAMA1, LAMA2, N3 et N8) suivant le niveau du piézomètre PZ1L.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
LAMA1	00147A0350/F1	651 068	2 629 115
LAMA2	00147A0351/F2	651 148	2 629 005
N1	00146B0688/F1	651 028	2 628 925
N3	00146B0018/F3	650 619	2 628 517
N5	00146B0019/F5	650 732	2 628 713
N7	00147A0012/F7	651 339	2 628 702
N8	00146B0020/F8	650 408	2 628 352

4.6.1 Forages de La Madeleine

Données à disposition :

- Données AEAP de chacun des deux forages de 1982 à 2007. Pas de données AEAP à partir de 2008 ;
- Données « producteur » (MEL) : mensuelles de la somme des deux forages entre janvier 1990 et décembre 2003 ;
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles de chacun des forages entre janvier 2004 et décembre 2013.

Les deux forages ne sont pas dans la même maille du modèle (ni de 500 m, ni de 100 m) ; il convient donc de décrire au mieux les prélèvements dans chacun des forages. Ces forages sont à l'arrêt de janvier 2004 à janvier 2006. En 1990, 1991, 1992, les débits LAMA1+LAM2 de la MEL sont inférieurs aux débits de l'AEAP. L'eau d'exhaure ne serait pas prise en compte dans les débits de la MEL. Cela est rectifié dès 1993. Par conséquent, de 1990 à 1992, les débits AEAP sont exacts. À partir de 2006, les prélèvements ne sont plus destinés à l'eau

potable et sont mis à l'exhaure. En 2008, la MEL demande l'autorisation de pomper et de rejeter les eaux dans la Deûle. Un arrêté provisoire de 6 mois est accordé. Depuis, les eaux sont toujours pompées, mais ne sont plus déclarées à l'AEAP.

De 2000 à 2003, les prélèvements mensuels par forage sont calculés en se basant sur les données annuelles par forages (AEAP) et les données mensuelles pour la somme des deux forages. Ainsi, le prélèvement P_{ij} pour le mois i et le forage j est calculé par :

$$P_{ij} = \frac{(\sum_j P_{e_{ij}})(\sum_j P_{ij})}{\sum_i (\sum_j P_{e_{ij}})} \quad (1)$$

Avec $(\sum_i P_{e_{ij}})$ prélèvement annuel pour le forage j (donnée AEAP) et $(\sum_j P_{e_{ij}})$ prélèvement mensuel pour le mois i de la somme des deux forages (donnée MEL). Un tel calcul ne donne pas les prélèvements réels car il ne rend pas compte de l'évolution au cours de l'année de la répartition des débits entre les forages. En effet, cette répartition des débits est fixée par les données annuelles par forage.

Données utilisées pour la modélisation (cf Figure 8) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1999
- Données « producteur » reconstruites de janvier 2000 à décembre 2003
- Données « producteur » mensuelles pour chacun des forages de janvier 2004 à décembre 2012

4.6.2 Forages de Saint André

Données disponibles :

- Données AEAP à partir de 1991, sauf pour N1 dont les données commencent en 1982. Pas de données AEAP après 2007 pour N3 et N8, et après 2009 pour N1, N5 et N7.
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles à partir de janvier 1991 pour l'ensemble des forages.

Les données AEAP les plus récentes sont absentes car les eaux sont mises à l'exhaure. Aucune donnée n'est disponible avant 1991, mis à part pour N1. Des prélèvements nuls sont alors considérés pour les autres forages. En 1991 sur N1, la donnée « producteur » est beaucoup plus faible que la donnée AEAP. La valeur AEAP est privilégiée.

Données utilisées pour la modélisation (cf Figure 8) :

- Données AEAP annuelles pour N1 de 1982 à 1990. Prélèvements nuls sur les autres forages pendant cette période
- Données AEAP annuelles de 1991 à 1999
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2000 à décembre 2012

4.7 FORAGES DE LA CARNOY

5 forages L1 à L5 (Lambersart, EDN) captant la nappe de la Craie.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
L1	00146B0085/F1	648 149	2 628 207
L2	00146B0086/F2	648 121	2 628 274
L3	00146B0119/F3	648 231	2 628 354
L4	00146B0120/F4	648 191	2 628 445
L5	00146B0121/F5	648 302	2 628 485

Données disponibles :

- Données AEAP : prélèvements annuels de chacun des forages de 1982 à 2007. Pas de données annuelles de 2008 à 2012 car pas d'utilisation pour l'eau potable.
- Données « producteur » (EDN) : prélèvements mensuels en sortie usine (i.e. rassemblant les prélèvements des 5 forages) entre 1993 et 2006.
- Données « producteur » (EDN) : prélèvements mensuels de chacun des forages entre janvier 2007 et décembre 2013.

Les 5 forages sont dans la même maille de 500 m mais seront dans des mailles différentes après affinement en mailles de 100 m. Les données mensuelles sur la somme des 5 forages entre 1993 et 2006 sont légèrement inférieures aux données de l'AEAP. Elles négligent probablement les eaux d'exhaure.

Données utilisées pour la modélisation (cf Figure 8) :

- Données AEAP de 1982 à 1999
- Entre janvier 2000 et décembre 2006, les prélèvements mensuels pour chacun des forages sont reconstruits par équirépartition à partir des données mensuelles en sortie usine et des données annuelles sur chacun des forages (méthode similaire à celle présentée pour les forages de La Madeleine, équation 1).
- Données mensuelles de janvier 2007 à 2012.

4.8 FORAGES DE LA NEUVILLE

2 forages LANE3 et LANE4 captant la nappe de la Craie. Ces forages ne sont pas dans les mêmes mailles (ni de 500 m, ni de 100 m).

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
LANE3	00207X0217/F3	652 153	2 610 717
LANE4	00207X0218/F4	651 917	2 610 437

Données disponibles :

- Données AEAP : données annuelles de 1982 à 2012
- Données « producteur » (EDN) : prélèvements mensuels de janvier 2007 à décembre 2013

Les deux sources de données ne sont pas en accord. Comme pour les forages de Pérenchies, on remarque que les prélèvements annuels attribués à LANE3 dans les données « producteur » correspondent à ceux attribués à LANE4 dans les données AEAP, et réciproquement. Les données « producteur » sont considérées comme prioritaires et les données AEAP sont inversées en conséquence sur l'ensemble de la période 1982-2012.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 9) :

- Données AEAP annuel de 1982 à 1999 (avec inversion des deux forages)
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) entre janvier 2000 et décembre 2006 (avec inversion des deux forages)
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012

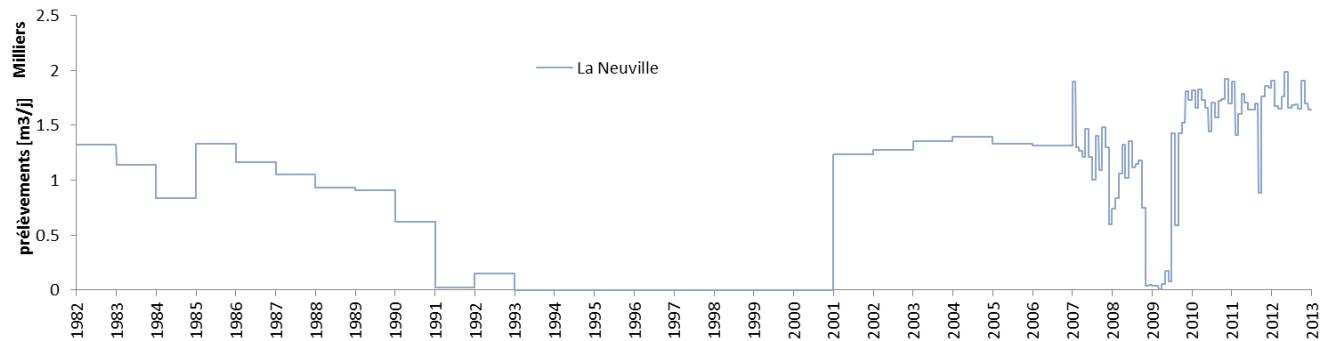


Figure 9 : Evolution modélisée des prélèvements aux forages de La Neuville.

4.9 CHAMP CAPTANT DE FLERS-EN-ESCREBIEUX

9 forages (FL1 à FL9) captant la nappe de la Craie. Le forage 4 est à l'arrêt et sert de piézomètre. L'ensemble des forages est géré par les EDN mais les forages FL8 et FL9 sont destinés à la CAD. Depuis septembre 2012, des perchlorates ont été détectés en fortes teneurs sur ce champ captant, entraînant la fermeture de plusieurs forages.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
FL1	00273X0051/F1	651 718	2 600 187
FL2	00273X0052/F2	651 647	2 600 147
FL3	00273X0053/F3	651 557	2 600 127
FL5	00273X0055/F5	651 437	2 600 157
FL6	00273X0056/F6	651 427	2 600 087
FL7	00273X0057/F7	652 038	2 600 277
FL8	00273X0058/F2	651 811	2 600 257
FL9	00273X0059/F1	651 891	2 600 246

Données disponibles :

- Données AEAP : prélèvements annuels de 1982 à 2012
- Données « producteur » (EDN) : prélèvements mensuels de janvier 2004 à décembre 2013

Pour les forages FL8 et FL9, les deux sources de données (« producteur » et « AEAP ») ne sont pas en accord. Comme pour les forages de Pérenchies, on remarque que les prélèvements annuels attribués à FL8 dans les données « producteur », correspondent à ceux attribués à FL9 dans les données « AEAP », et réciproquement. Ces deux forages sont dans la même maille de 500 m mais dans des mailles de 100 m différentes. Une telle inversion peut donc avoir un impact non négligeable sur le fonctionnement hydrogéologique général du champ captant modélisé. L'erreur a été identifiée dans la base de données AEAP dont les coordonnées géographiques de ces deux forages ne sont pas correctes. Les coordonnées géographiques les plus récentes (rapport Maillot, 2011) sont utilisées ici (et corrigées dans la

BSS). Les données AEAP sont inversées en conséquence. Cette inversion est appliquée à toute la période (de 1982 à 2012) même si les incohérences ne peuvent être observées qu'à partir de 2004. Quelques désaccords entre les sources de données ont permis d'identifier des erreurs dans chacune des bases (erreurs de saisie, soustraction au lieu d'addition, ...).

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 10) :

- Données AEAP annuelles entre 1982 et 1999 (avec inversion des forages FL8 et FL9)
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) entre janvier 2000 et décembre 2003 (avec inversion des forages FL8 et FL9)
- Données « producteur » de janvier 2004 à décembre 2012

4.10 CHAMP CAPTANT DE PECQUENCOURT

13 forages (MEL) de P1 à P13 datent de 1930 et captent la nappe de la Craie. En 1965-1969, les forages P1, P2 et P6 à P8 sont remplacés par les forages P1N, P2N et P6N à P8N respectivement. En décembre 1989, les forages P3N, P4N et P5N remplacent les forages P3, P4 et P5 respectivement. En octobre 1990, P9N remplace P9. Le forage P13 est à l'arrêt depuis 1984 ; il devrait prochainement être rebouché et remplacé par un nouveau P13N. Les forages PXN sont dans les mêmes mailles de 100 m que les forages PX qu'ils remplacent (distance de 10 à 15 m entre les forages en moyenne). Les prélèvements PX et PXN peuvent donc être additionnés pour la modélisation.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
P1N	00274X0188/F1N	661 987	2 599 611
P2N	00274X0220/F2N	662 077	2 599 651
P3	00274X0003/F3	662 167	2 599 731
P3N	00274X0221/F3N	662 177	2 599 721
P4	00274X0004/F4	662 277	2 599 751
P4N	00274X0222/F4N	662 287	2 599 741
P5	00274X0005/F5	662 388	2 599 761
P5N	00274X0223/F5N	662 398	2 599 751
P6N	00274X0189/F6N	662 498	2 599 761
P7N	00274X0190/F7N	662 618	2 599 751
P8N	00274X0191/F8N	662 818	2 599 671
P9	00274X0009/F9	663 309	2 599 741
P9N	00274X0224/F9N	663 309	2 599 751
P10	00274X0010/F10	662 708	2 599 631
P11	00274X0011/F11	662 778	2 599 761
P12	00274X0012/F12	662 929	2 599 751
P13	00274X0013/F13	663 069	2 599 751

Données disponibles :

- Données AEAP : prélèvements annuels de 1982 à 2012. Ces prélèvements sont attribués au forage P1N mais correspondent à la somme des prélèvements sur l'ensemble des forages du champ captant
- Données « producteur » (MEL) : débits mensuels à l'usine (somme de tous les forages) de janvier 1988 à décembre 2013.

- Données « producteur » (MEL) : estimation mensuelle des prélèvements dans chaque forage de février 1975 à décembre 2013 (l'estimation consiste à multiplier le débit nominal de la pompe par le décompte horaire de cette dernière).

Les débits mesurés à l'usine sont équivalents à ceux déclarés à l'AEAP. En revanche, ces données sont supérieures à la somme des débits estimés par forage. Les estimations des débits par forage sont peu fiables mais permettent néanmoins d'estimer la répartition du prélèvement total entre chacun des forages. Ainsi, pour chaque forage i du champ captant, les données de prélèvements P_i sont reconstruites comme suit :

$$P_i = Q \frac{Pe_i}{\sum_i Pe_i} i \quad (2)$$

Avec Q débit mesuré à l'usine ou déclaré à l'AEAP (regroupant l'ensemble du champ captant), Pe prélèvement estimé sur le forage i .

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 10) :

- Données annuelles reconstruites de 1982 à 1999
- Données mensuelles reconstruites de janvier 2000 à décembre 2012

4.11 CHAMP CAPTANT DE FERIN

6 forages (F1 à F6) captant la nappe de la Craie. Le forage F6 est à l'arrêt depuis 1982 (60 m^3 prélevé en 1982) et n'est donc pas intégré dans les données mensuelles.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
F1	00273X0001/F1	652 236	2 592 593
F2	00273X0002/F2	652 165	2 592 733
F3	00273X0003/F3	652 115	2 592 853
F4	00273X0004/F4	652 025	2 592 953
F5	00273X0005/F5	651 905	2 593 064
F6	00273X0006/F6	651 825	2 593 244

Données disponibles :

- Données AEAP : données annuelles de 1982 à 2012 pour chacun des forages ;
- Données « producteur » (EDN) : données mensuelles par forage de janvier 2007 à décembre 2013.

Quelques manques de données dans la base AEAP : pour F1 en 1982 et 1983 ; pour F2 en 1982, 1983 et de 1988 à 1996. Pour F3, en 1982 ; pour F4 en 1988 et 1989. Lorsqu'il n'y a pas de données, on suppose qu'il n'y a pas eu de prélèvements.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 10) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1999
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) entre janvier 2000 et décembre 2006
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012

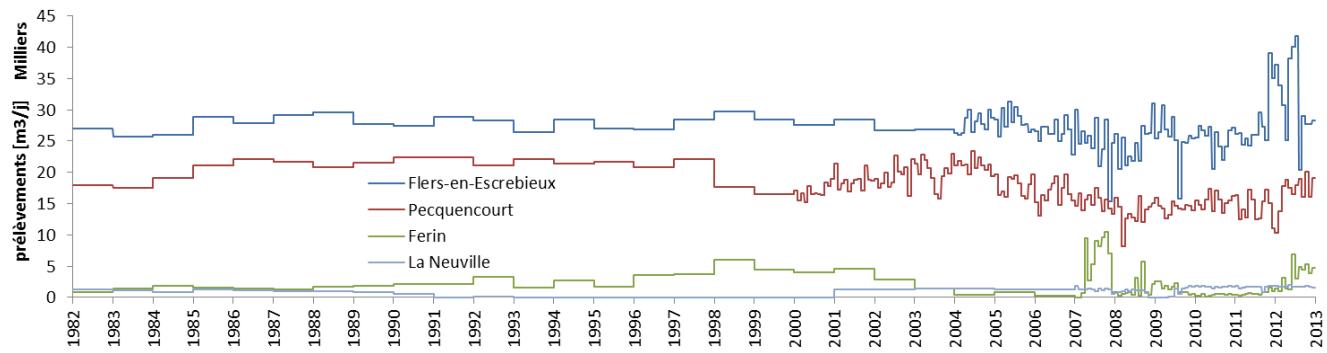


Figure 10 : Prélèvements modélisés en volume journalier pour les champs captants de Flers-en-Escrebieux, Pecquencourt, Férin et La Neuville.

4.12 FORAGES AU CARBONIFERE

19 forages captant la nappe du Carbonifère sont analysés.

nom	Numéro BSS	XL2E	YL2E
HEM1	00148B0085/F1	661 250	2 629 992
Lannoy	00148B0691/F2	661 460	2 630 483
3PTS1	00144D0002/F1	661 870	2 632 526
3PTS2	00144X1277/F2	661 920	2 632 550
B1	00144D0200/F1	662 901	2 633 447
B2	00144D0003/F2	662 785	2 633 327
B3	00144D0004/F3	662 772	2 633 320
B4	00144D1082/F4	662 895	2 633 449
B5	00144D1083/F5	662 905	2 633 459
B6	00144D1166/F6	662 784	2 633 319
B7	00144D1167/F7	662 404	2 633 329
SV	00144C1075/F3	659 909	2 635 735
SV1	00144C0005/F1	659 886	2 635 756
SV2	00144C0196/F2	659 898	2 635 734
ABAT	00144D0208/F1	662 398	2 634 750
FRCS	00143B0102/F1	657 286	2 636 964
R1	00143B0027/F1	655 502	2 639 576
R2	00143B0026/F2	655 608	2 639 486
R3	00143B0007/F2	655 411	2 639 415

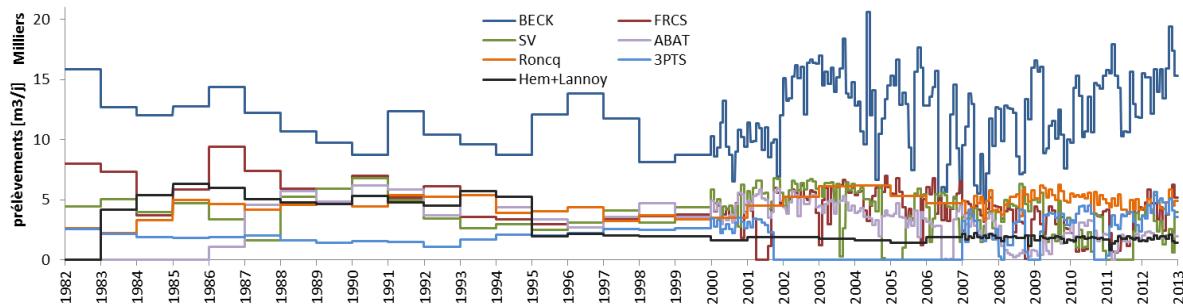


Figure 11 : Evolution modélisée des prélevements au Carbonifère en volume journalier.

4.12.1 Forage Hem1

Données disponibles (cf. Figure 12) :

- Données AEAP : 1984 à 2012
- Données « producteur » (EDN) : mensuelles de janvier 2007 à décembre 2013

De 2007 à 2012, les deux sources de données sont cohérentes. La base de l'AEAP ne contient pas de données pour ce forage en 1981 et 1982 ; on considère qu'il n'y a pas de prélevements.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Prélèvements nuls en 1982 et 1983
- Données AEAP annuelles de 1984 à 1999
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) de janvier 2000 à décembre 2006
- Données producteurs mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012

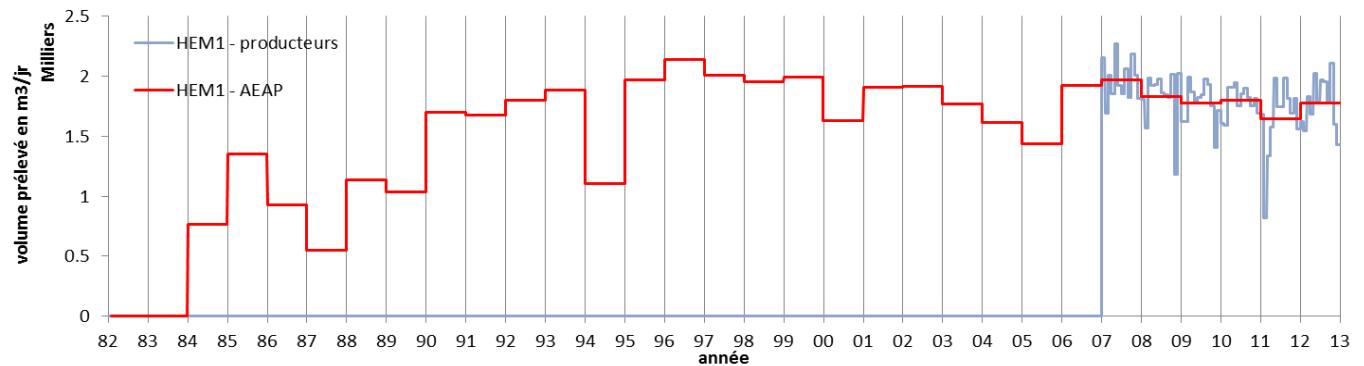


Figure 12 : Evolution des prélèvements au forage de Hem.
Comparaison des données « producteur » et de l'AEAP.

4.12.2 Forage Lannoy

Les prélèvements au forage de Lannoy (près de Hem) se sont arrêtés en décembre 1994.

Données disponibles (cf. Figure 13) :

- Données AEAP : annuelles de 1983 à 1995.
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles de janvier 1988 à décembre 1994.

Pas de données en 1982 : on considère qu'il n'y a pas eu de prélèvements. Les données « producteur » indiquent des prélèvements nuls en 1988 et 1989, alors que les données AEAP indiquent des prélèvements. De très légères différences sont également observées entre les deux sources de données de 1990 à 1992. Les données « producteur » sont privilégiées afin d'être en accord avec le modèle du Carbonifère du projet ScaldWIN.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Prélèvement nuls en 1982
- Données AEAP annuelles de 1983 à 1994 sauf de 1990 à 1992 où les données « producteur » sont utilisées
- Prélèvements nuls à partir de 1995

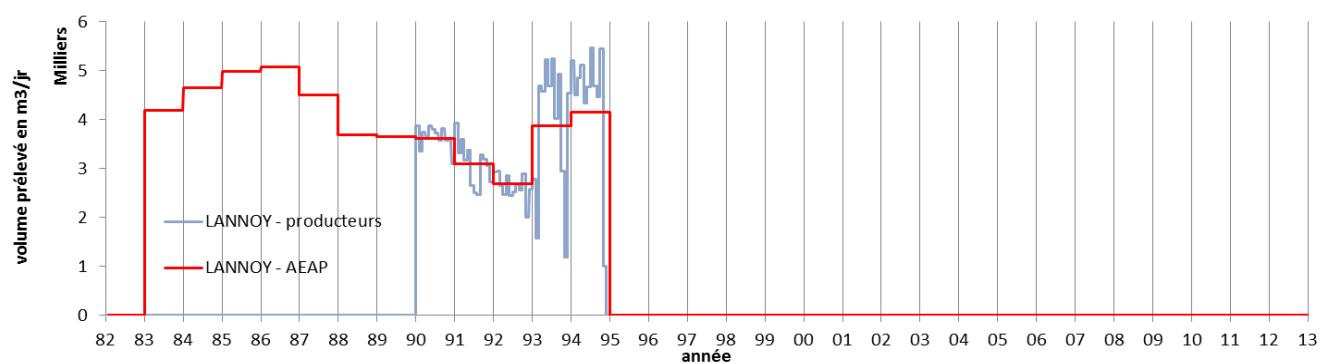


Figure 13 : Evolution des prélèvements au forage de Lannoy (Carbonifère).
Comparaison des données « producteur » et de l'AEAP.

4.12.3 Forages des Trois Ponts

2 forages au Carbonifère : 3PTS1 et 3PTS2. En 2001, arrêt du forage 3PTS1 et, fin 2006, mise en route du forage 3PTS2 en remplacement du 3PTS1. Une distance de 55 m sépare les deux forages. Ils sont dans la même maille de 500 m et hors de la zone affinée (pas de maillages à 100 m). Leurs prélèvements seront donc sommés dans le modèle.

Données disponibles (cf Figure 14) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2004 pour 3PTS1, et de 2006 à 2012 pour 3PTS2
- Données « producteur » (MEL) : prélèvements journaliers moyens de septembre 2006 à décembre 2006
- Données « producteur » : prélèvements mensuels de janvier 1988 à décembre 2013

Les deux sources de données sont en accord. En 2006, en multipliant les prélèvements journaliers par 28, 29, 28 et 22 jours de septembre à décembre respectivement, les prélèvements annuels obtenus s'approchent du prélèvement annuel de l'Agence de l'Eau (339 ou 336 milliers de m³ en 2006).

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1988
- Données « producteur » annuelles de 1988 à 1999
- Données « "producteur" mensuelles de 2000 à 2012 (avec, de septembre à décembre 2006, des débits mensuels estimés à partir des débits journaliers moyens)

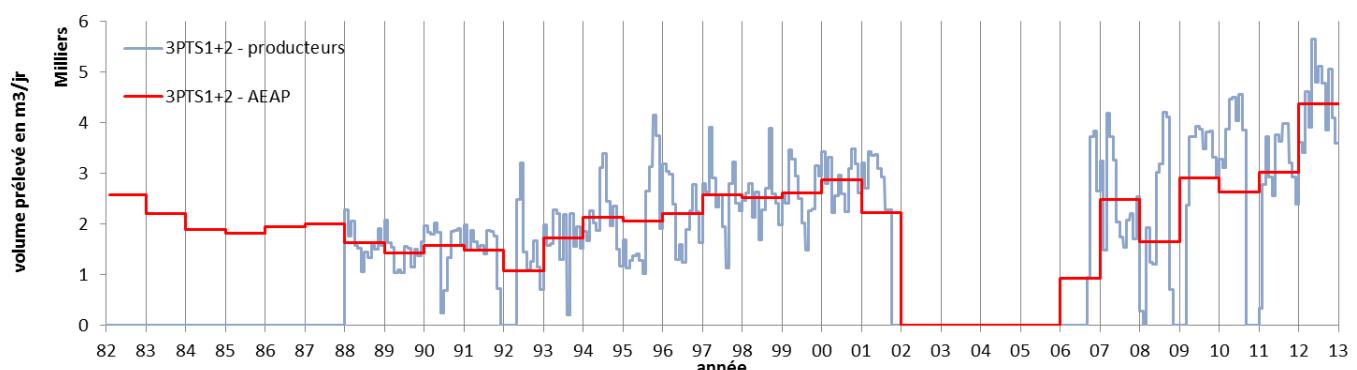


Figure 14 : Evolution des prélèvements sur les forages des Trois Ponts (Carbonifère). Comparaison des données « producteurs » et de l'AEAP.

4.12.4 Forages du Beck

7 forages de B1 à B7 (MEL). B1, B2 et B3 ont été rebouchés en 1991. Les forages B4 à B7 ont été construits entre 1988 et 1990.

De 1983 (voire avant) à 1995, il y a une inversion entre les débits AEAP du Beck (forage B1) et du Sapin Vert (forage SV2). Les débits du Beck ont été déclarés sur celui du Sapin Vert et vice-versa. Le Beck produit plus que Sapin Vert. Les données AEAP ont donc été inversées en conséquence. Cette inversion a été faite sur l'ensemble de la période de 1982 à 1995, bien qu'aucune information d'inversion ne soit disponible en 1982.

Données disponibles :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2012, attribuées à B1 mais correspondant à la somme des prélèvements de l'ensemble du champ captant du Beck ;
- Données « producteur » (MEL) : données annuelles pour la somme des prélèvements du Beck de 1983 à 1987 ;
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles pour la somme des prélèvements du Beck de janvier 1988 à décembre 2013.

Les forages du Beck sont hors de la zone affinée. Les forages B1 à B6 sont dans la même maille de 500 m tandis que B7 est dans la maille de 500 m voisine. Dans le modèle, l'ensemble des prélèvements est attribué à la maille de 500 m contenant B1 à B6. L'approximation consiste à attribuer à cette maille les prélèvements du forage B7 qui débute en 1991 mais dont les prélèvements individuels ne sont pas connus. Cette hypothèse est parfaitement en accord avec les choix fait dans le projet ScaldWIN sur la nappe du Carbonifère.

Les deux sources de données sont en bon accord sauf pour les années 2009 à 2012 où les données « producteur » sont inférieures aux données déclarées à l'AEAP. On privilégie les données « producteur » car des données mensuelles sont nécessaires pour ces années-là.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1999 (avec prise en compte de l'inversion des débits avec Sapin Vert entre 1982 à 1995)
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2000 à décembre 2012

4.12.5 Forages Sapin Vert

3 forages (SV, SV2 et SV1). Les forages SV1 et SV2 datent de 1950 et ont été rebouchés en 1991. Le forage SV date de 1987 et est aujourd'hui le seul actif. Les trois forages sont hors de la zone affinée et dans la même maille de 500 m.

Données disponibles :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 2012, attribuées à SV2 mais correspondant à la somme des trois forages de Sapin Vert
- Données « producteur » (MEL) : données annuelles de la somme des forages SV1 et SV2, de 1983 à 1987
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles de la somme des forages SV1 et SV2 de janvier 1988 à décembre 1990 et données mensuelles du forage SV de janvier 1991 à décembre 2013

Des écarts sont identifiés entre les sources de données entre 2009 et 2012. Les données « producteur » sont inférieures aux données déclarées à l'AEAP. Les données « producteur » sont privilégiées car des données mensuelles sont nécessaires pour ces années-là.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Données annuelles AEAP de 1982 à 1999 (avec prise en compte de l'inversion des débits avec les forages du Beck entre 1982 à 1995)
- Données mensuelles « producteur » de janvier 2000 à décembre 2012

4.12.6 Forage Abattoir

Ce forage (ABAT) date de 1914 mais aucune donnée n'est disponible avant 1984. Dans le projet ScaldWIN, les prélèvements sont considérés comme nuls entre 1970 et 1985.

Données disponibles :

- Données AEAP : données annuelles de 1984 à 2012. Pas de données AEAP en 1982 et 1983, prélèvements nuls en 1984 et 1985.
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles de janvier 1988 à décembre 2013

Des écarts entre les deux sources de données sont observés de 2009 à 2012. Les données « producteur » sont inférieures aux données déclarées à l'AEAP. Les données « producteur » sont utilisées car des données mensuelles sont nécessaires pour ces années-là.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Données annuelles AEAP de 1982 à 1999
- Données mensuelles « producteur » de janvier 2000 à décembre 2012

4.12.7 Forage Les Francs

Données disponibles :

- Données AEAP : données annuelles de 1982 à 2012
- Données « producteur » (MEL) : données mensuelles de janvier 1988 à décembre 2013

Des écarts sont identifiés entre les sources de données entre 2009 et 2011. Les données « producteur » sont inférieures aux données déclarées à l'AEAP. Les données « producteur » sont privilégiées car des données mensuelles sont nécessaires pour ces années-là.

Données utilisées pour la modélisation (cf. Figure 11) :

- Données annuelles AEAP de 1982 à 1999
- Données mensuelles « producteur » de janvier 2000 à décembre 2012

4.12.8 Forages de Roncq

3 forages (R1, R2 et R3). Ces forages sont hors de la zone affinée. Les distances entre ces forages sont de 184, 209 et 139 mètres. R1 et R2 sont dans la même maille de 500 m mais très proches de la maille voisine contenant R3. Pour la modélisation, les trois forages seront regroupés dans la même maille (celle contenant R1 et R2).

Données disponibles (cf. Figure 15) :

- Données AEAP : données annuelles pour chacun des forages de 1982 à 2012
- Données « producteur » (EDN) : données mensuelles pour chacun des forages de janvier 2007 à décembre 2013

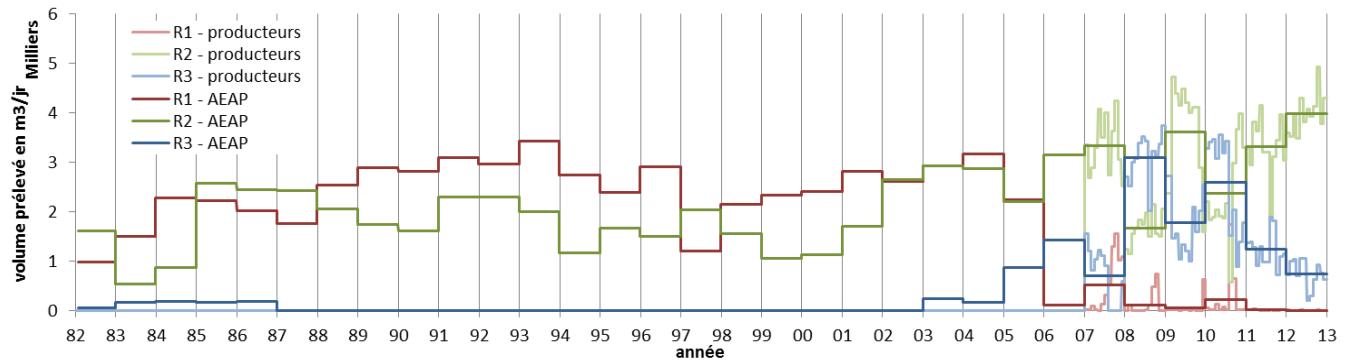


Figure 15 : Evolution des prélevements des forages de Roncq (Carbonifère) en volume journalier.
Comparaison des données « producteur » et des données de l'AEAP.

Les deux sources de données sont cohérentes.

Données utilisées en modélisation (cf. Figure 11) :

- Données AEAP annuelles de 1982 à 1999 (somme des trois forages)
- Données AEAP mensualisées (divisées par 12) de janvier 2000 à décembre 2006 (somme des trois forages)
- Données « producteur » mensuelles de janvier 2007 à décembre 2012 (somme des trois forages)

4.13 PRELEVEMENTS A L'ECHELLE DU MODELE

Le modèle couvre la région Nord-Pas-de-Calais sans le Boulonnais ni l'Avesnois, et avec en plus une partie du bassin de Mons en Belgique et une partie de l'Aisne et de la Somme. Les prélevements sont issus des données de l'AEAP découpés sur le domaine d'extension du modèle. Les prélevements du côté belge sont négligés.

La base de l'AEAP distingue les prélevements en eaux de surface et en eaux souterraines, ainsi que, dans le cas des eaux souterraines, les nappes dans lesquelles sont faits les prélevements. Cette information a été en grande partie reprise dans le modèle. Néanmoins, la distinction entre la nappe de la Craie et la nappe du Cénomanien, nécessaire pour notre modèle, n'est pas faite dans la base de l'AEAP. Cette distinction a été réalisée en croisant la base AEAP avec l'information de profondeur des forages située dans la BSS et avec la géométrie du modèle géologique. Une profondeur de forage peut être récupérée pour environ 70% des prélevements d'eau souterraine dans la base de données AEAP.

Les 30% restant correspondent soit à des prélevements de l'AEAP avec un numéro BSS erroné, soit à une information de profondeur manquante dans la BSS. Ainsi, 129 forages ont été attribués au Cénomanien dans notre modèle. 3 de ces forages ont des prélevements très faibles (< 158 m³/an) et ne sont pas pris en compte dans le modèle.

Finalement, sans compter les forages des champs captants qui ont fait l'objet d'un travail particulier, le traitement de la base de l'AEAP aboutit à 2849 points de prélevements répartis comme suit :

- 102 dans la nappe du Carbonifère
- 126 dans la nappe du Cénomanien
- 2214 dans la nappe de la Craie
- 192 dans la nappe des sables du Landénien

- 215 en eau de surface

La Figure 16 montre l'évolution des prélèvements dans chacune des couches du modèle. On remarque que dans la base de l'AEAP, il n'y a pas de prélèvements en eaux de surface avant 1992. À l'échelle régionale, les prélèvements en eaux de surface représentent de 60 à 40% environ des prélèvements à la Craie, avec une tendance à la baisse de 1992 à 2012. Les prélèvements de surface ne sont pas utilisés dans le modèle, hormis le prélèvement d'Aire-sur-la-Lys, destiné à l'eau potable.

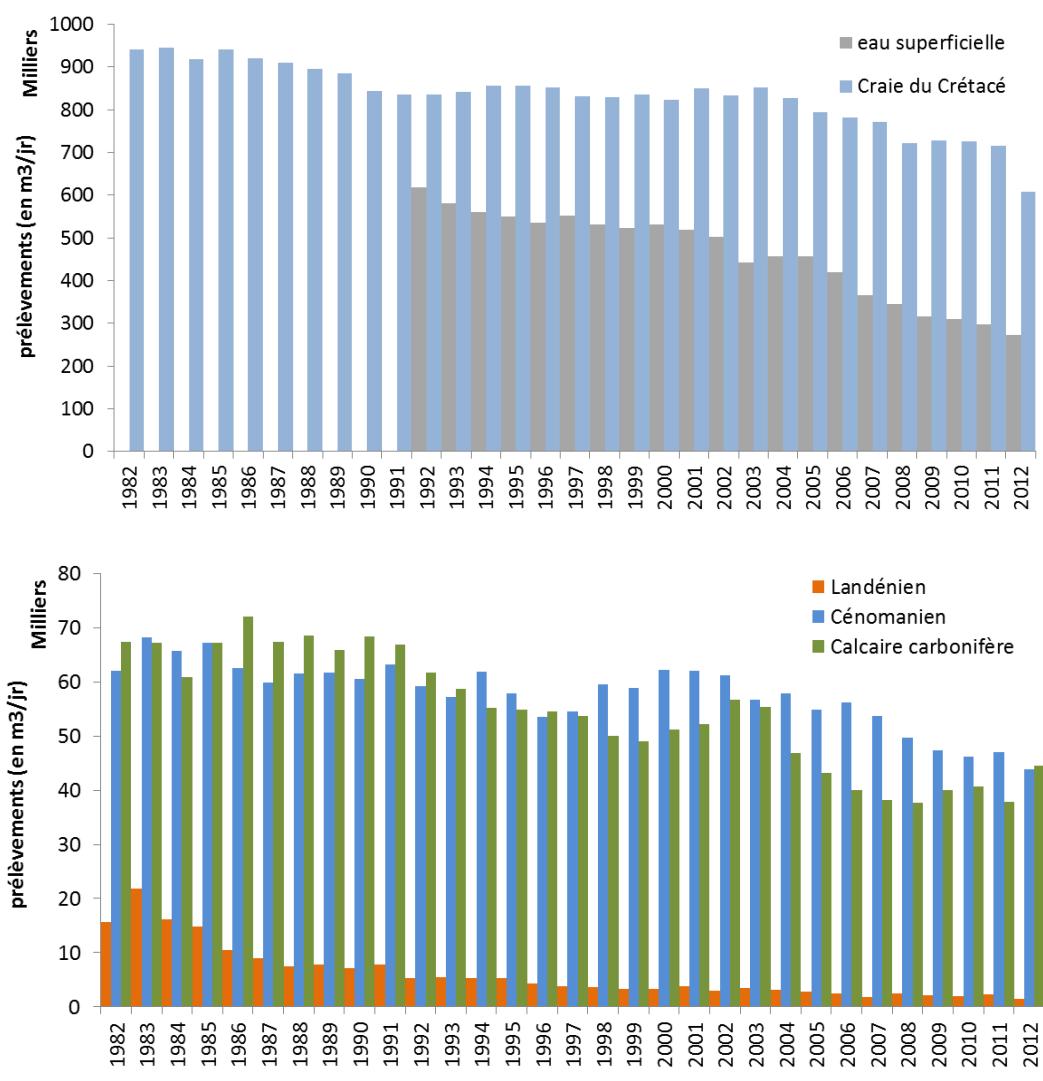


Figure 16 : Prélèvements AEAP à l'échelle du modèle.

4.14 SYNTHESE

Sur les champs captants étudiés, le croisement des données issues de plusieurs sources (AEAP et producteurs) a permis d'identifier des incohérences dans les prélèvements. Cela a conduit soit à corriger l'erreur sous-jacente, soit à choisir la donnée qui paraissait la plus fiable. De façon générale, les données « producteur » sont privilégiées par rapport aux données de l'AEAP. À l'issue de cette analyse, les données récoltées permettent de déterminer de façon relativement fiable l'évolution des prélèvements sur chaque forage ou groupe de forage entre 1982 et 2012 (cf. Figure 17). Finalement, l'ensemble des champs captants étudiés est intégré

au modèle par 118 points de prélèvements dont 8 au Carbonifère. Les analyses et les choix ci-dessus concernant le Carbonifère sont conformes à ceux réalisés dans le projet ScaldWIN, spécifique à la nappe du Carbonifère.

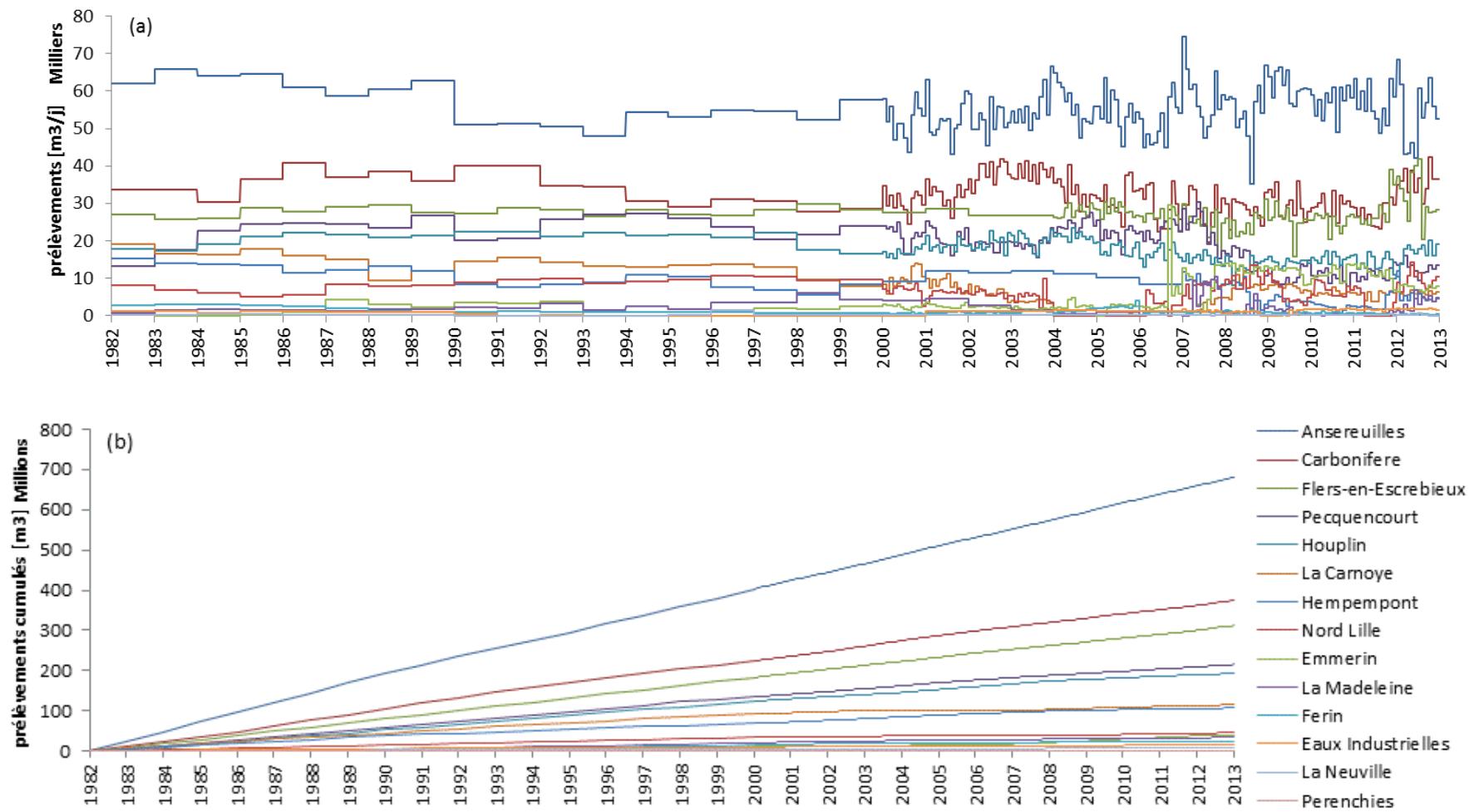


Figure 17 : Evolution modélisée des prélevements en volumes journaliers (a) et volumes cumulés (b) pour les principaux champs captants de la métropole lilloise.

5 Analyse des chroniques piézométriques

L'objectif de cette analyse est de sélectionner des chroniques piézométriques pour affiner le calage du modèle autour des champs captants de la MEL.

Les différentes sources de données piézométriques sont le Portail national ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) et les données issues des producteurs d'eau. La Figure 18 présente la localisation des ouvrages de suivi piézométrique dans la zone de maillage affiné. Les chroniques piézométriques sont à pas de temps journalier ou mensuel. Parmi les chroniques ADES, seules celles qui contiennent plus de 100 mesures ont été sélectionnées. Parmi les autres chroniques, une sélection moins sévère a été effectuée en abaissant ce seuil à 50 mesures environ. Lorsqu'il s'agit de forages équipés de pompes, les niveaux dynamiques sont systématiquement écartés et seuls les niveaux statiques sont considérés.

Chaque partie de ce chapitre présente les données piézométriques relatives à un site, un champ captant, ou un groupe de champs captants ; elle donne les éléments suivants :

- une carte de localisation des ouvrages et, éventuellement, un zoom si les points sont très rapprochés,
- un texte décrivant les données et expliquant la sélection effectuée ;
- des graphiques montrant les chroniques sélectionnées.

Il est à noter que les données piézométriques des champs captants de La Neuville et de Hem sont trop incomplètes pour être utilisées pour le calage ; elles ne sont pas présentées dans ce document.

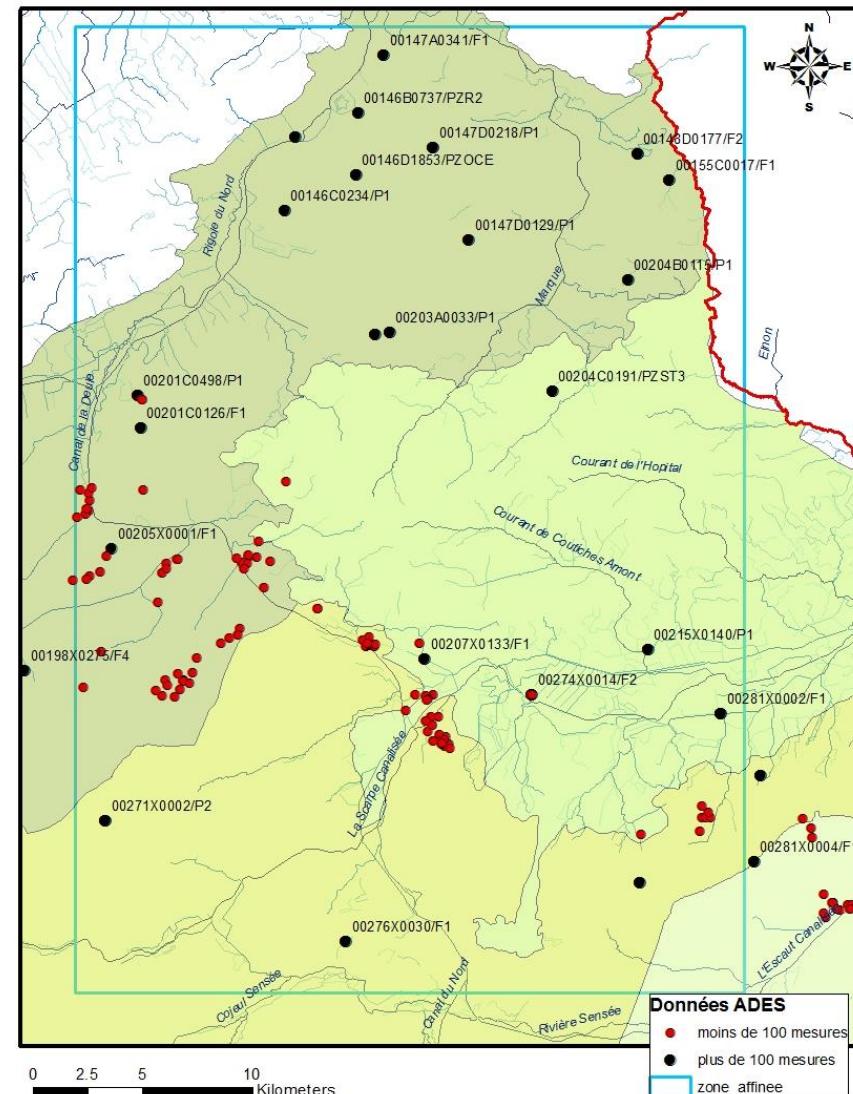
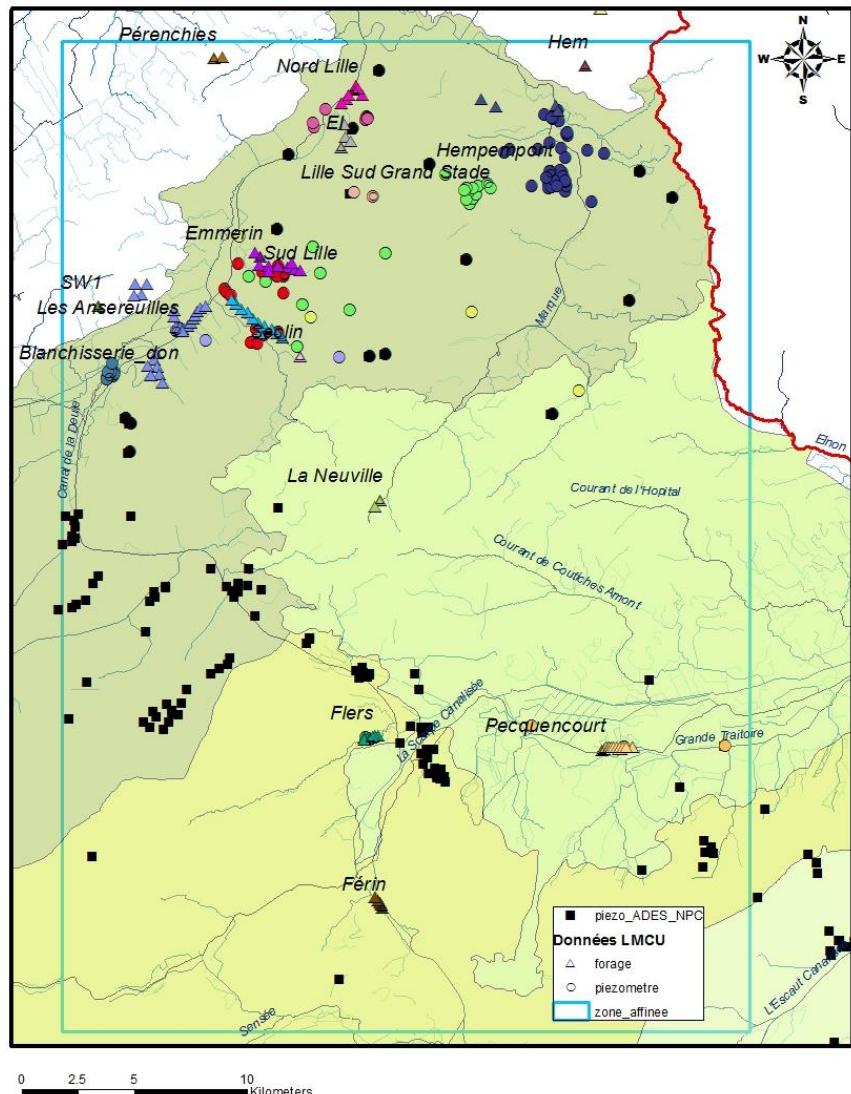


Figure 18 : Localisation des différentes sources de données piézométriques (à gauche) et illustration du traitement statistique sur les données ADES (à droite).

5.1 CHAMPS CAPTANTS DU NORD ET DU CENTRE DE LILLE

La Figure 19 présente la localisation des champs captants du Nord et du centre de Lille (EI : eaux industrielles).

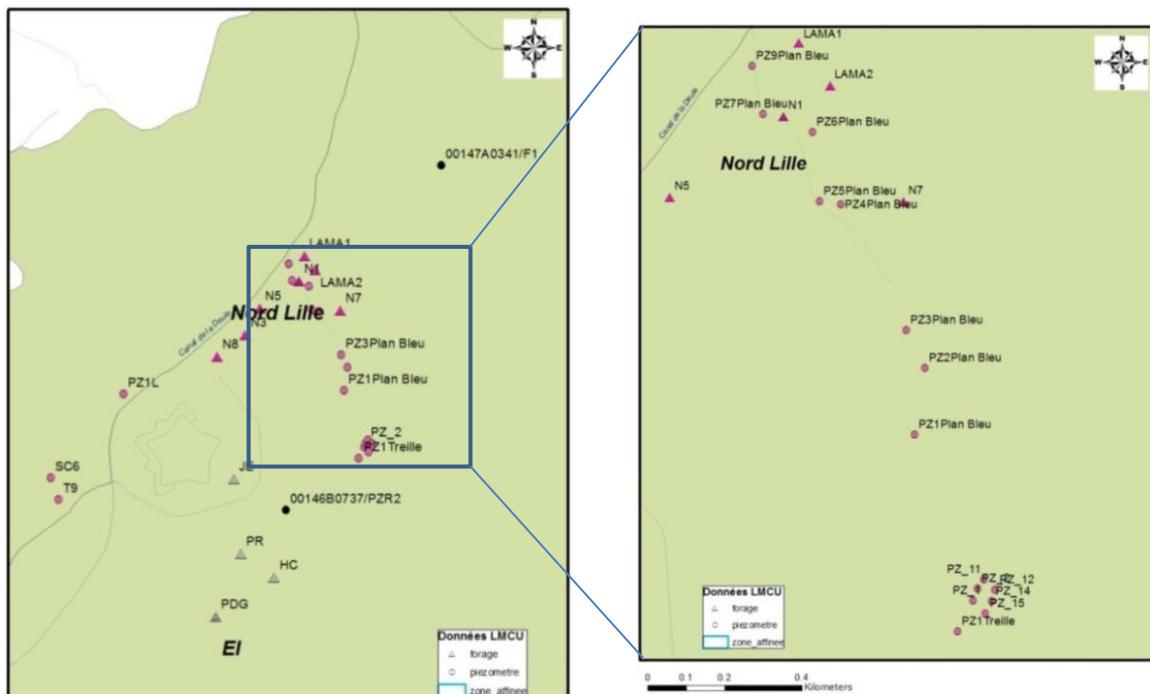


Figure 19 : Localisation des ouvrages au Nord et au centre de Lille.

Situé au Nord-Est de la zone, le piézomètre ADES 00147A0341/F1 possède une longue chronique de 1970 à 2006 (Figure 20). Cette dernière montre une faible saisonnalité qui laisse présager une faible corrélation avec la pluviométrie. Ce piézomètre semble en revanche fortement influencé par les pompages du Nord et du centre de Lille, situé à environ 1.5 kilomètre au Sud-Est (Figure 19).

Le second piézomètre ADES, 00146B0737/PZR2 (quai du Wault), situé entre les forages du Nord de Lille et ceux des eaux industrielles (EI) possède également une longue chronique débutant en 1971 (Figure 20). Globalement, ce piézomètre semble subir les mêmes influences que le piézomètre 00147A0341/F1 mais avec une moindre amplitude. Malgré l'absence de données entre septembre 2003 et avril 2005, on observe un changement de comportement piézométrique : avant 2001, le niveau présente des fluctuations de 3 à 4 m autour d'une valeur moyenne de 11 m NGF, alors qu'après 2001 le niveau fluctue beaucoup moins et semble se stabiliser autour de 12.5-13 m NGF.

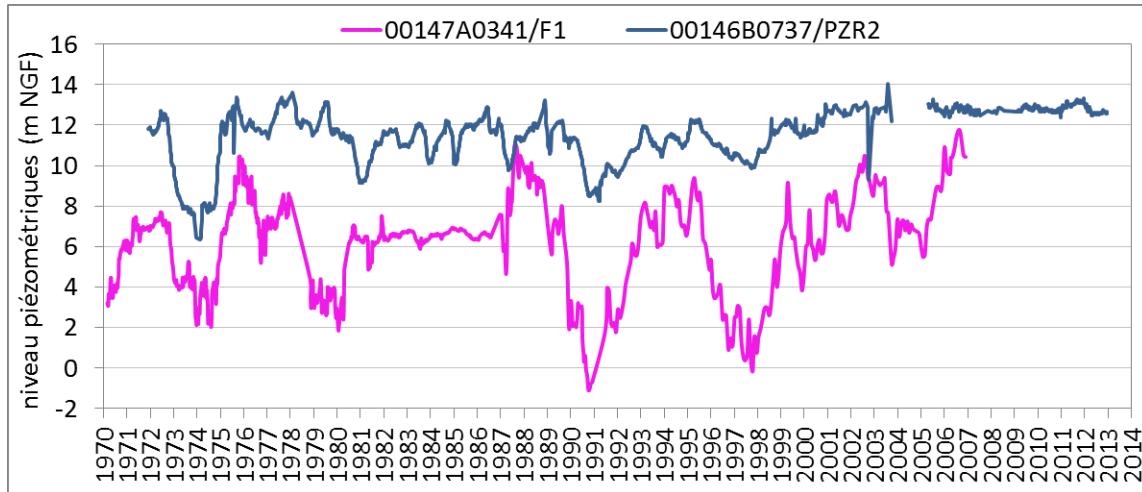


Figure 20 : Chroniques piézométriques ADES au voisinage des champs captants du Nord de Lille.

Les forages du centre de Lille (JE, PR, HC, PDG) ont des chroniques piézométriques moins longues. Elles présentent globalement le même comportement que le piézomètre 00146B0737/PZR2 mais avec un niveau moyen supérieur d'un ou deux mètres (Figure 21). L'ouvrage PDG possédant la plus longue chronique, il est sélectionné pour le calage.

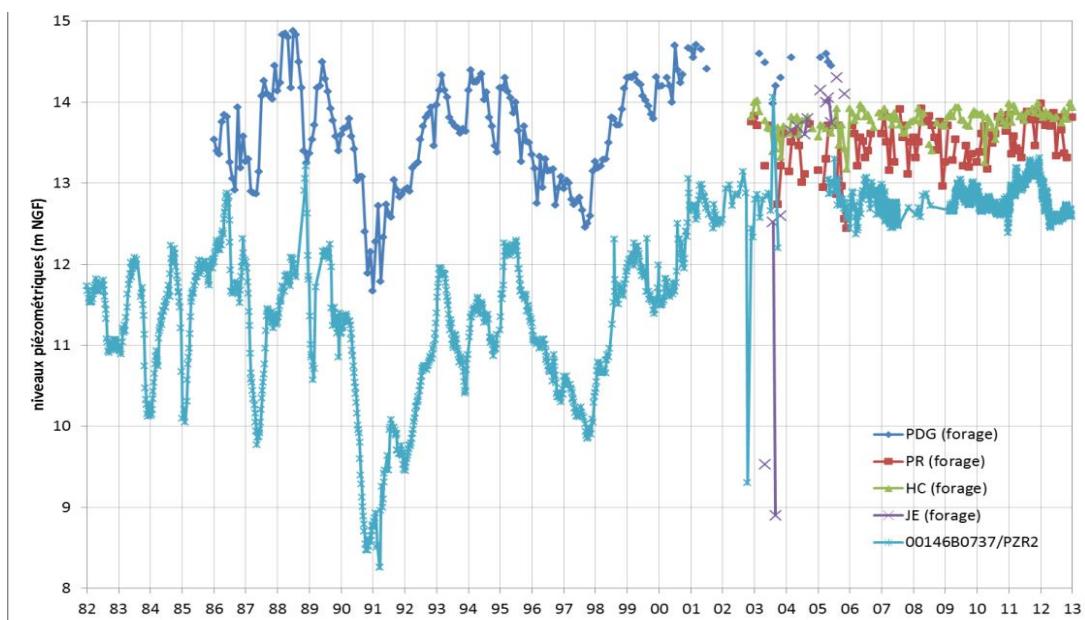


Figure 21 : Présentation des données piézométriques au centre de Lille.

Les chroniques piézométriques des forages de Saint André (N1 à N8) et des deux forages de La Madeleine (LMA1 et LAMA2) sont relativement concordantes (Figure 22). Le forage N8 ayant la plus longue chronique (depuis 1985), il est sélectionné pour le calage.

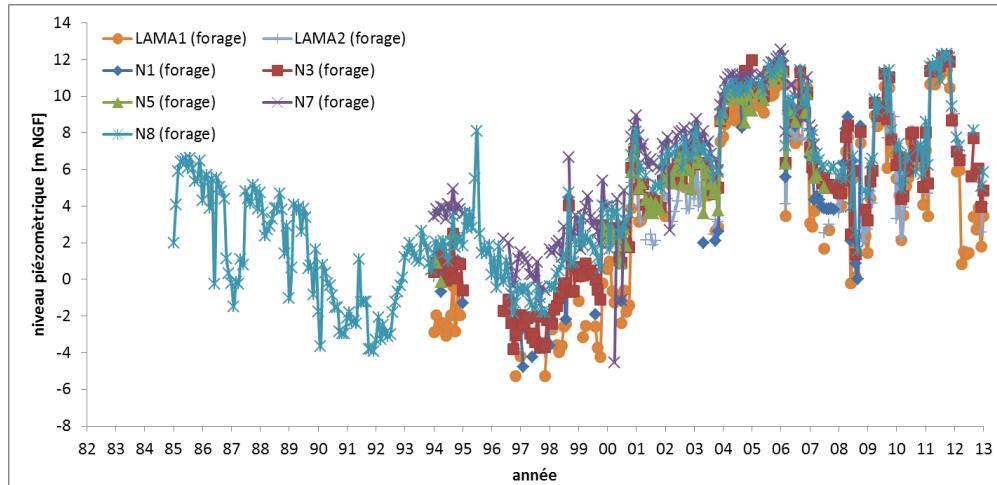


Figure 22 : Chroniques piézométriques des forages de Saint André et de La Madeleine.

Quelques chroniques piézométriques sur le secteur lillois ont pu être récupérées auprès des producteurs d'eau (en particulier PZ1Treille, PZ_1, PZ_2, PZ_11, PZ_12, PZ_14, PZ_15, PZ1 Plan Bleu à PZ9 Plan Bleu). Ces données sont souvent récentes et assez courtes (de 11 à 41 points par chronique). Certains piézomètres (en particulier PZ1L¹, T9, SC6², PZ1 Plan Bleu à PZ9 Plan Bleu) montrent un niveau d'eau particulièrement élevé (de 14 à 18 m NGF), ce qui laisse penser qu'ils correspondent probablement à une nappe superficielle. En effet, dans ce secteur, outre les alluvions dont l'épaisseur peut être importante, les argiles tertiaires recouvrent progressivement la craie du Sud vers le Nord. Cette hypothèse ne peut être vérifiée faute de connaître la coupe géologique de ces ouvrages (non déclarés à la BSS).

Néanmoins, certains piézomètres (en particulier PZ_1, PZ_2, PZ_11, PZ_12, PZ_14 et PZ_15) ont des chroniques globalement en accord avec celle enregistrée au forage N8 d'avril à novembre 2011 (Figure 23). Compte tenu du peu d'informations sur ces piézomètres (pas toujours de dossier BSS, pas toujours d'information sur la profondeur du forage et de la crépine, peu de données piézométriques), leurs données ne sont pas retenues pour le calage.

¹ Le PZ1L a été créé par le CETE et recoupe les nappes alluviale et de la craie. Profond de 40 m, réalisé en 2006.

² T9 et SC6 créés en 2005 par SOLEN. T9 est crépiné en face de la nappe alluviale et profond de 12m. SC6 est crépiné en face de la craie et profond de 30m. Néanmoins ces 2 piézomètres ont le même niveau. Il y a donc communication entre les 2 nappes.

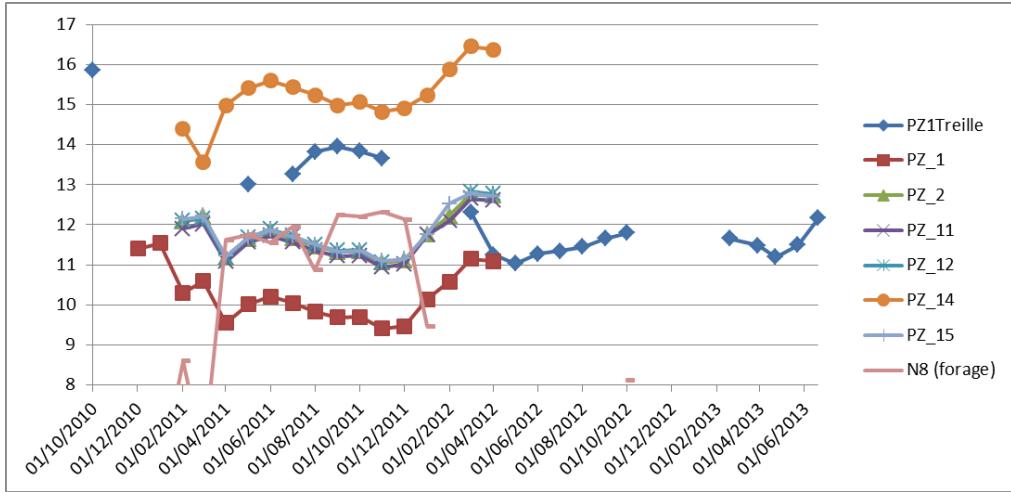


Figure 23 : Chroniques piézométriques de quelques ouvrages peu profonds du vieux Lille et comparaison avec la piézométrie du forage N8.

Au final, les chroniques piézométriques retenues pour les champs captants du Nord et du centre de Lille sont présentées à la Figure 24. Les piézomètres 00146B0737/PZR2 et 00147A0341/F1 sont influencés par les prélèvements AEP et AEI du Nord de Lille, ces derniers étant environ quatre fois moins importants que les prélèvements AEP. Le piézomètre 00146B0737/PZR2, situé au Sud en amont des forages du Nord de Lille, présente des fluctuations peu importantes, de l'ordre de 5 mètres d'amplitude, tandis que la chronique du piézomètre 00147A0341/F1, implanté au Nord-Est et en aval des forages, atteint plus de 10 mètres d'amplitude.

Ces évolutions, enregistrées dans un secteur très urbanisé, semblent peu corrélées à la pluviométrie, et ce en raison : (1) de l'imperméabilisation des sols, (2) de prélèvements saisonniers en nappe permettant d'éviter l'ennoiement des caves et parkings souterrains, (3) des éventuelles connexions avec le Canal de la Deûle, et (4) des éventuelles fuites des réseaux d'eaux. Compte tenu de la complexité hydrodynamique locale, le calage du modèle cherchera prioritairement à bien restituer le fonctionnement des champs captants AEP.

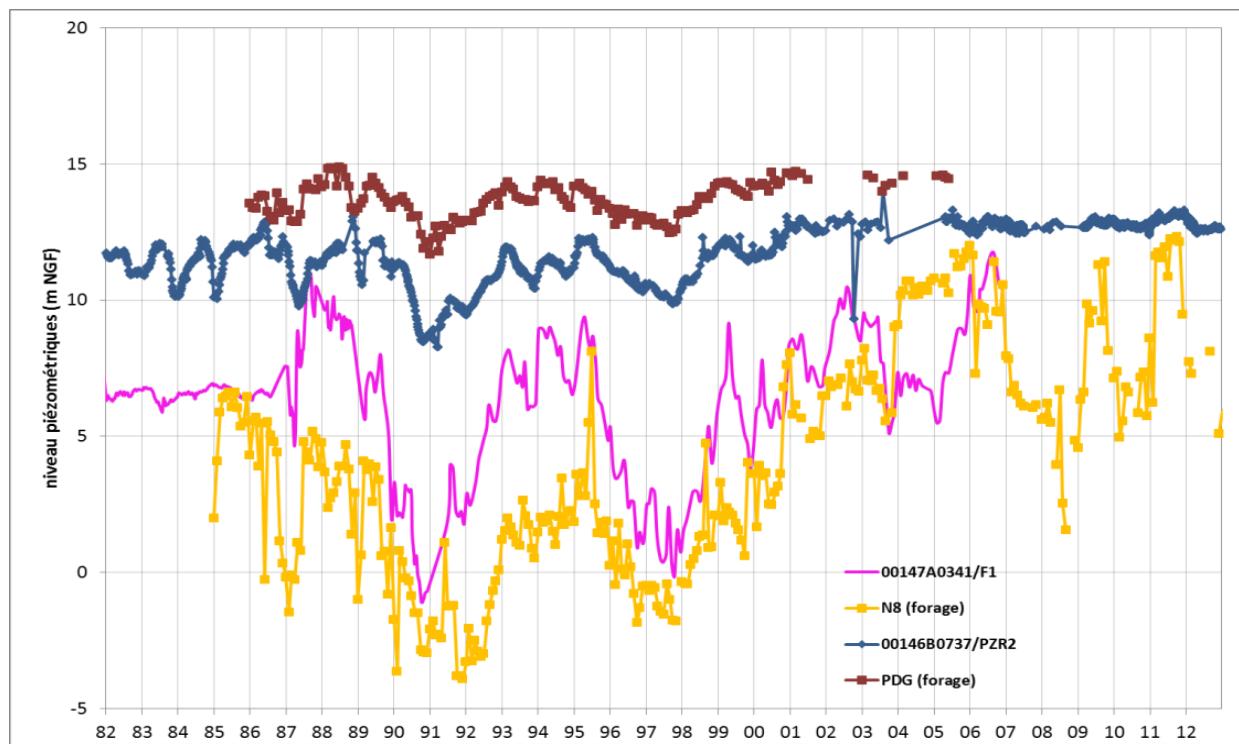


Figure 24 : Chroniques piézométriques du Nord et du centre de Lille retenues pour le calage.

5.2 GRAND STADE ET LILLE SUD

Un premier groupe de piézomètres, nommé Lille Sud, se situe à l'Ouest de la Figure 25 (points roses) et un second groupe, Grand stade, à l'Est (points verts).

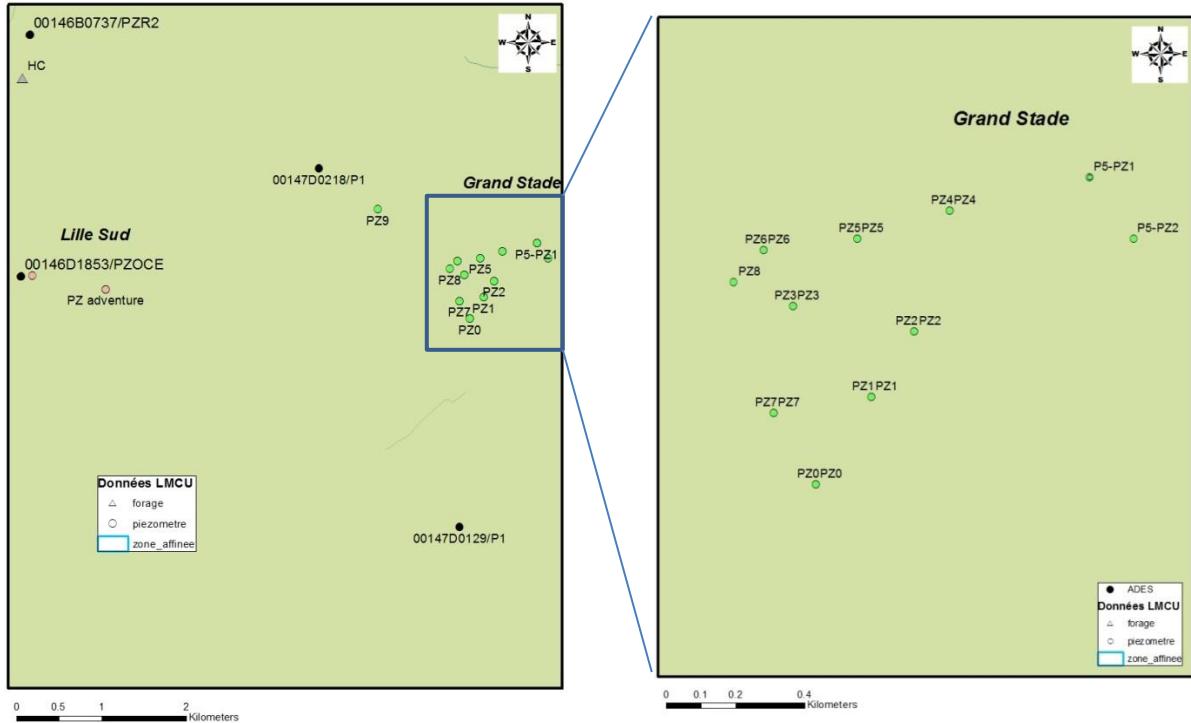


Figure 25 : Ouvrages de suivi piézométrique à Lille Sud et Grand Stade.

Le piézomètre ADES 00146D1853/PZOCE, Lille Sud, possède des données de 1986 à mai 2010 (Figure 26). Le piézomètre 00147D0218/P1, situé entre Lille Sud et Grand Stade, a enregistré une très longue chronique depuis 1900. Le piézomètre ADES 00147D0129/P1, au Sud du Grand Stade, dispose d'une chronique discontinue entre 1970 et 2006. Ce dernier piézomètre a un niveau d'eau moyen environ 20 m plus haut que les piézomètres 00146D1853/PZOCE et 00147D0218/P1 (situé environ 6 kilomètres au Nord-Ouest). Cet écart pourrait s'expliquer par le modèle topographique qui montre une amplitude du même ordre de grandeur.

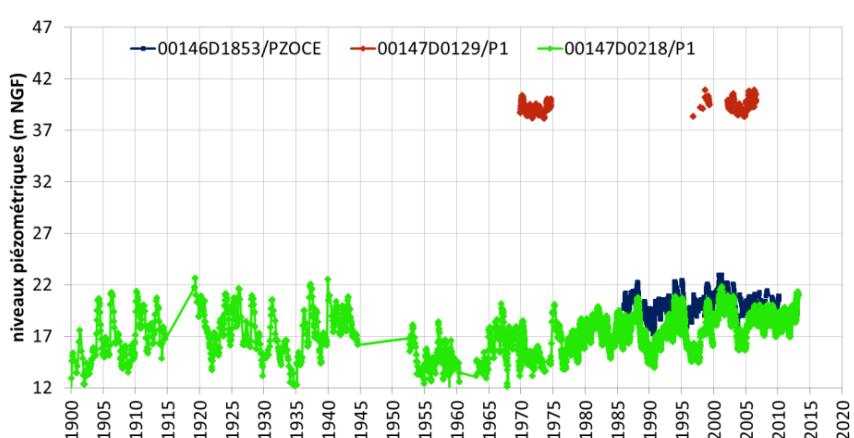


Figure 26 : Chroniques piézométriques ADES à Lille Sud et Lesquin.

Quelques piézomètres, PZ0 à PZ9, enregistrent des données à partir de juin 2011 en lien avec la construction du Grand Stade (Figure 27). Leurs niveaux piézométriques se situent à environ 10 mètres au-dessus du piézomètre 00147D0218/P1 situé à 2 kilomètres au Nord-Ouest. Le piézomètre P5-PZ2 possède la chronique la plus longue et la plus représentative de ce site. Il sera utilisé pour le calage.

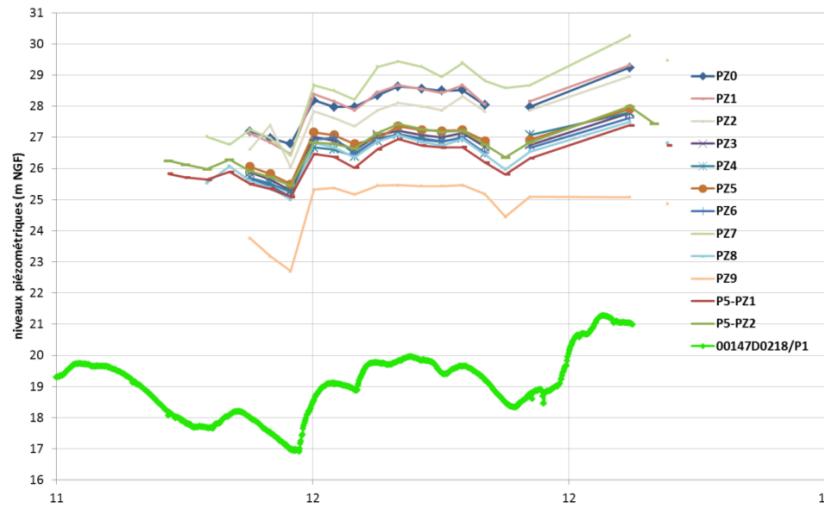


Figure 27 : Chroniques piézométriques sur le site du Grand Stade et comparaison avec le piézomètre ADES 00147D0218/P1.

La Figure 28 synthétise les données qui seront utilisées pour le calage du modèle sur le secteur de Lille Sud et Lesquin.

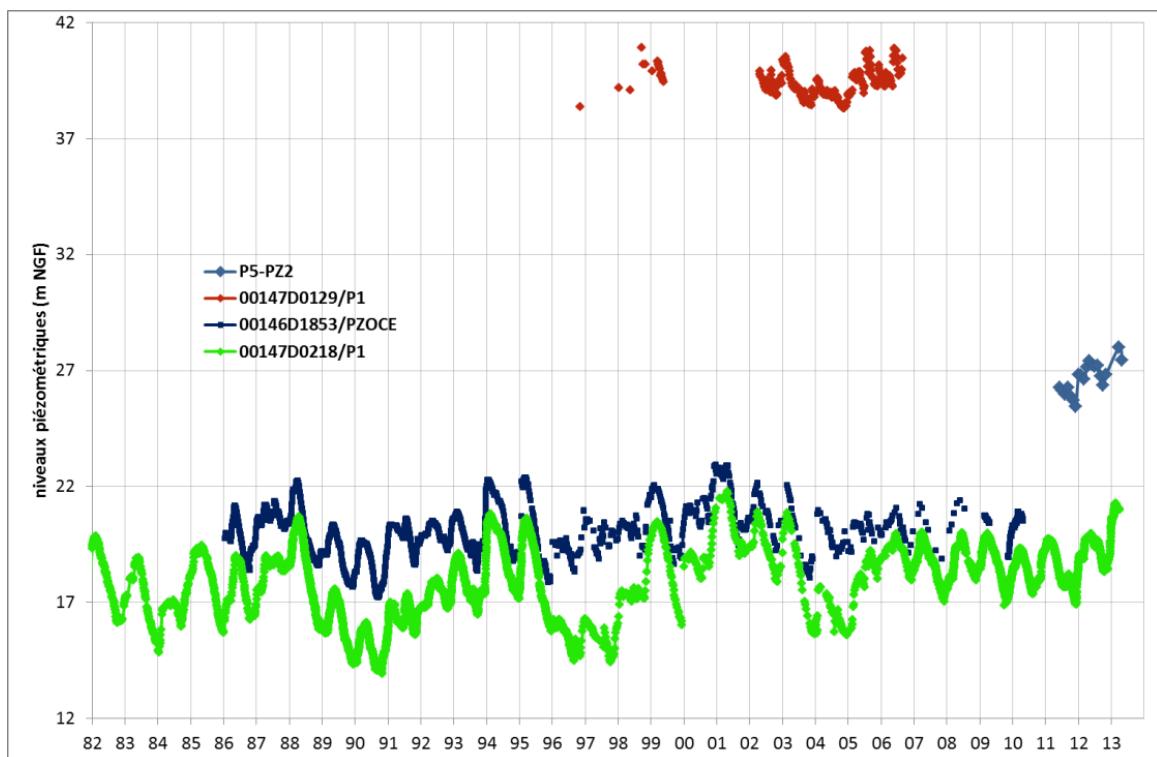


Figure 28 : Chroniques piézométriques de Lille Sud et Lesquin, retenues pour le calage.

5.3 CHAMP CAPTANT D'HEMPEMPONT

La localisation des ouvrages du champ captant d'Hempempont est présentée à la Figure 29.

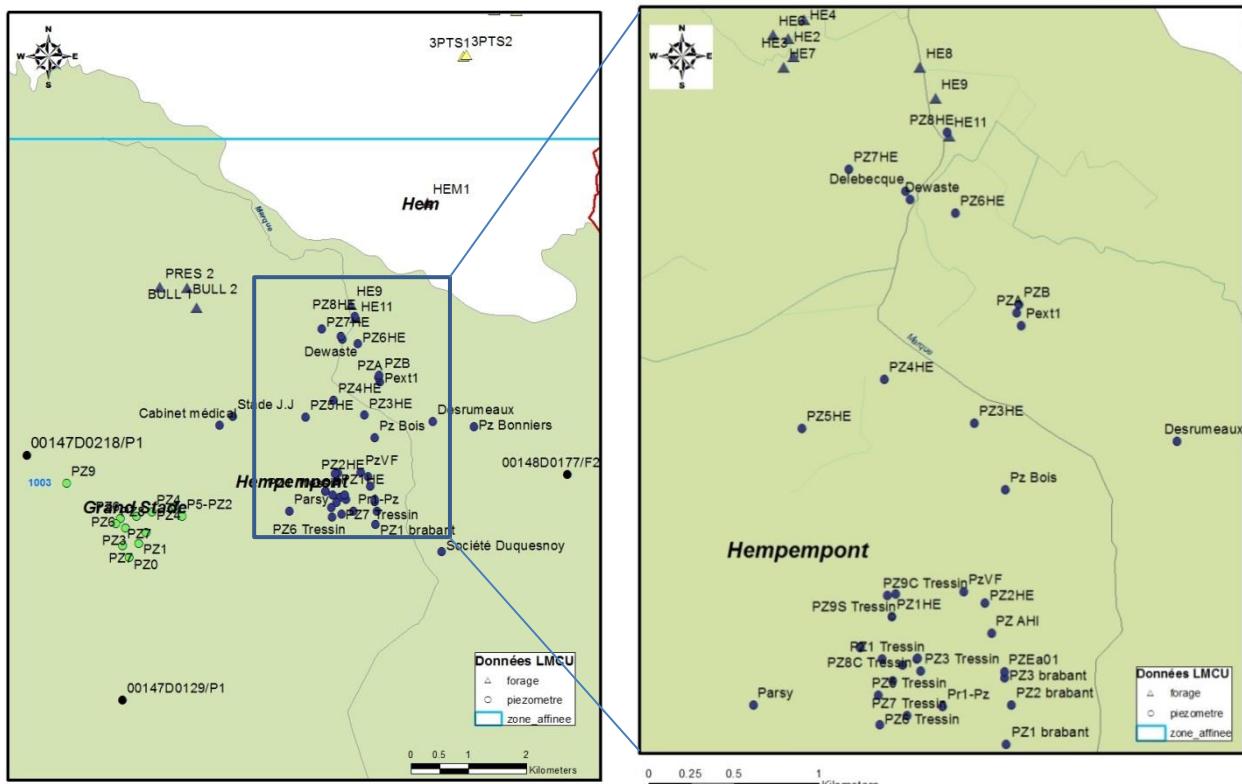


Figure 29 : Ouvrages voisins du champ captant d'Hempempont.

Le champ captant d'Hempempont est encadré par deux piézomètres ADES possédant des chroniques très longues (Figure 30) : 00147D0218/P1 à environ 6 kilomètres au Sud-Ouest et 00148D0177/F2 à environ 4 kilomètres au Sud-Est. Le niveau d'eau moyen du piézomètre 00148D0177/F2 est supérieur d'environ 5 mètres à celui du piézomètre 00147D0218/P1, ce qui oriente vers un écoulement général de la nappe du Sud-Est vers le Nord-Ouest.

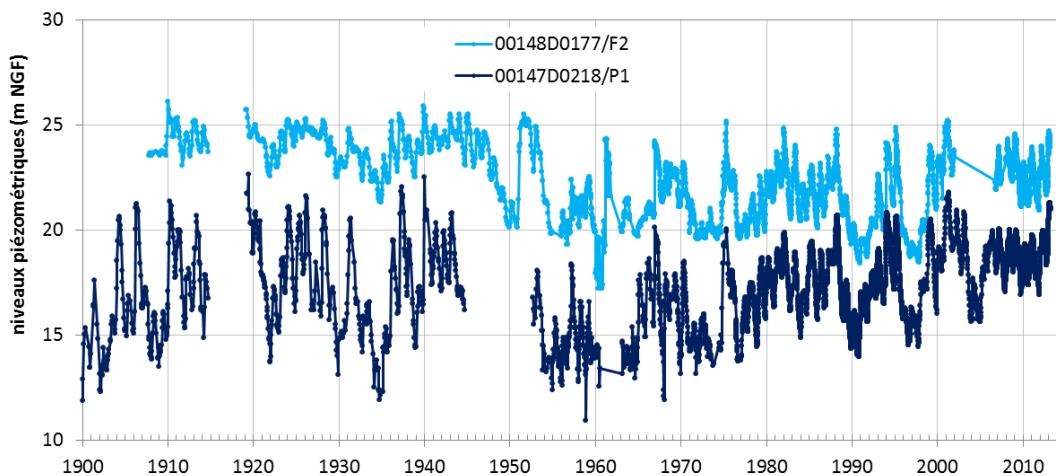


Figure 30 : Longues chroniques piézométriques encadrant le champ captant d'Hempempont.

Deux piézomètres sur la commune de Tressin, à environ 3 kilomètres au Sud du champ captant d'Hempempont, possèdent des chroniques récentes et discontinues : PZEa01 (54 points débutant en 2004) et PZ AHI (45 points débutant en 2009). Ces deux chroniques sont très semblables et la plus complète est celle de PZEa01 (Figure 31). Cette dernière chronique sera utilisée pour le calage. On retrouve la même évolution avec la même amplitude que sur les piézomètres ADES. Le niveau moyen est environ 2 mètres au-dessus du niveau moyen du piézomètre 00148D0177/F2 qui se situe à environ 3 kilomètres à l'Est. Toutes les autres chroniques de ce secteur possèdent peu de points (1 à 14 points) et ne sont donc pas présentées dans ce document.

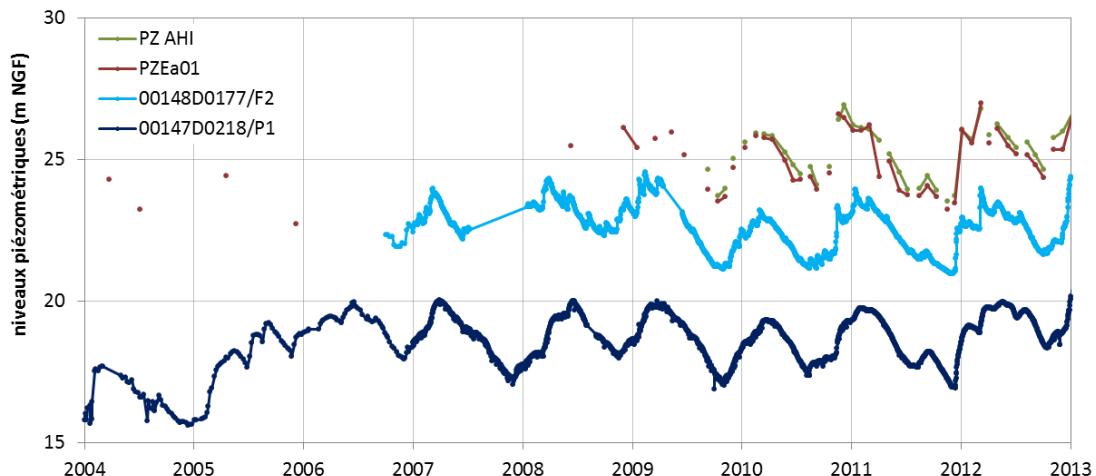


Figure 31 : Chroniques récentes de deux piézomètres de la commune de Tressin et comparaison avec les deux chroniques ADES les plus proches.

Les données piézométriques des forages du champ captant d'Hempempont s'arrêtent début 2010. Parallèlement à la diminution des prélèvements à partir de 2008 sur ce champ captant, on observe une hausse des niveaux piézométriques dans les forages (Figure 32). Les chroniques retenues pour le modèle sont celles des forages HE3 et HE9 car elles sont les plus continues et les plus représentatives du champ captant sur la période 1982-2010.

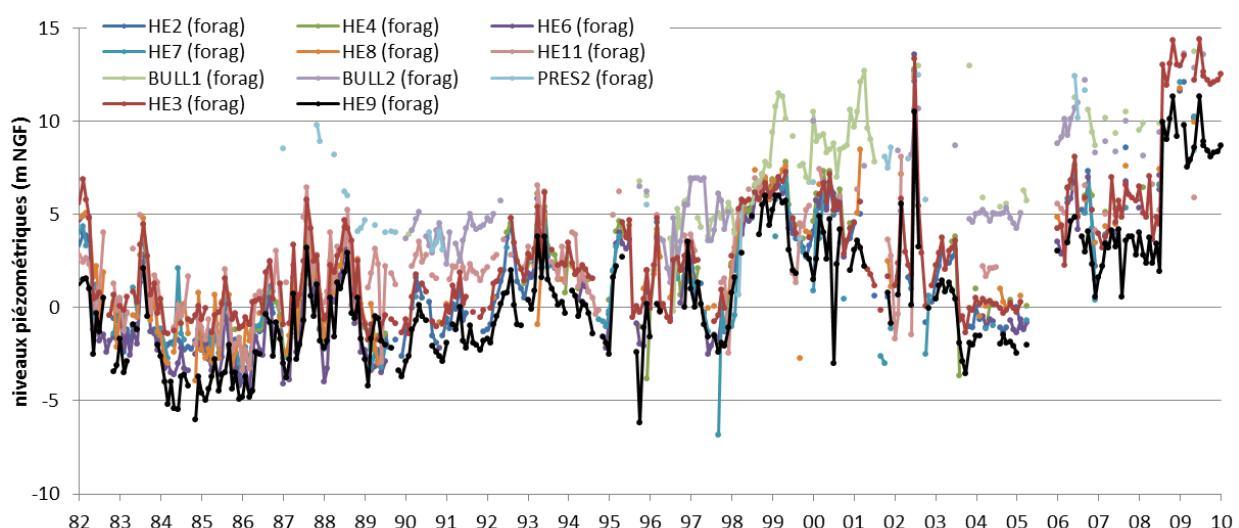


Figure 32 : Chroniques piézométriques des forages du champ captant d'Hempempont.

La Figure 33 synthétise les données sélectionnées pour le calage du modèle affiné dans le secteur d'Hempempont. Avant 2009, les niveaux piézométriques des forages sont inférieurs d'environ 20 mètres à ceux du piézomètre 00148D0177/F2, situé à 4 kilomètres au Sud-Est, et d'environ 15 mètres par rapport au piézomètre 00147D0218/P1, 6 kilomètres au Sud-Ouest. Cette différence est probablement due à l'exploitation du champ captant. Cependant, ces pompages ne semblent pas impacter les piézomètres au Sud-Est du champ captant, représentés par le piézomètre PZEa01 sur la Figure 33.

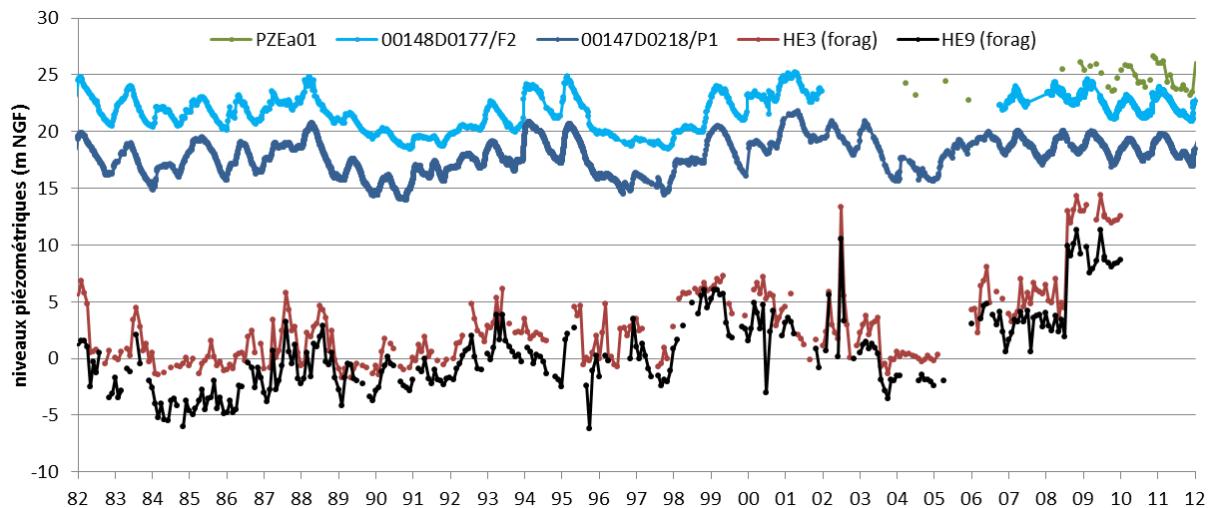


Figure 33 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour le champ captant d'Hempempont.

5.4 CHAMPS CAPTANTS D'EMMERIN-HOUPLIN

Sur la Figure 34, on distingue les ouvrages des champs captants d'Emmerin E1 à E10 (triangles violettes) au Nord, et les forages d'Houplin H1 à H11 (triangles bleus) au Sud.

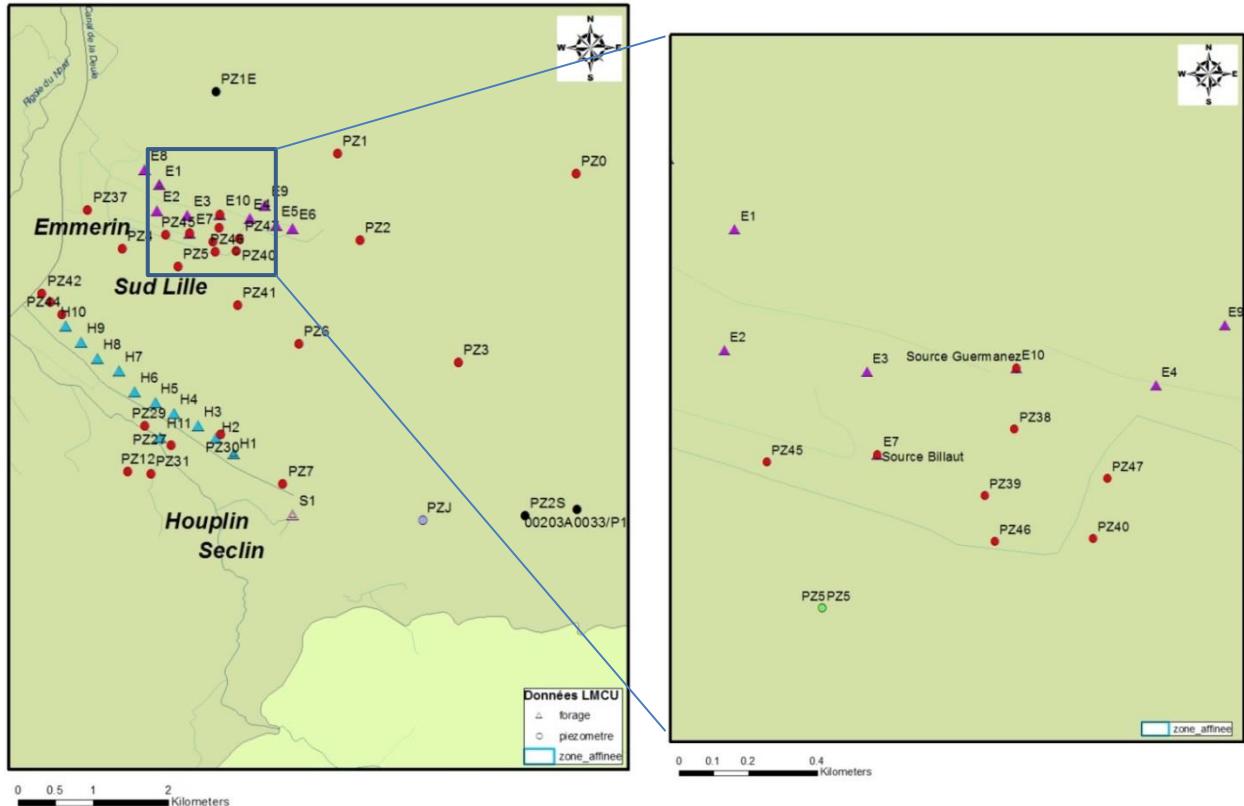


Figure 34 : Ouvrages des champs captants du Sud de Lille – Emmerin et Houplin-Ancoisne.

La Figure 35 présente les chroniques piézométriques des forages d'Houplin. Ceux-ci sont probablement impactés par les pompages proches. A l'exception de H8 et H10, les données démarrent en mai 2003. Il est à noter que le forage H8 n'a pas été pompé pendant toute la période d'acquisition.

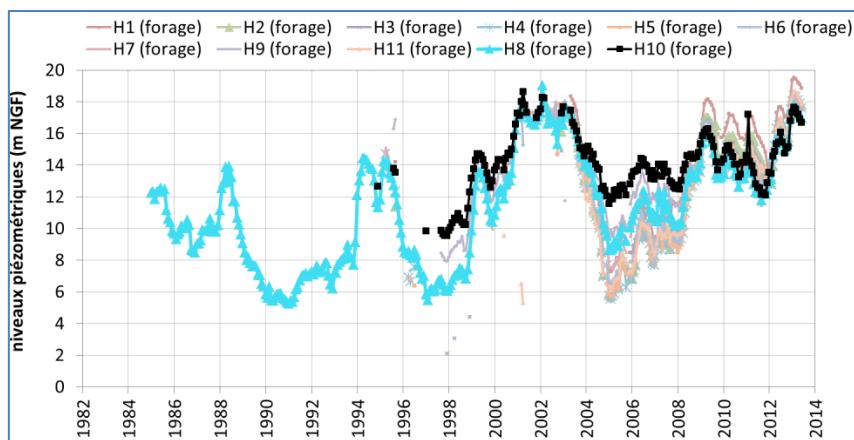


Figure 35 : Chroniques piézométriques des forages d'Houplin-Ancoisne.

Les chroniques piézométriques des forages d'Emmerin E1 à E10 sont très semblables (Figure 36). Les niveaux sont mesurés à partir de 1994, sauf pour E8 dont la chronique débute en 1985. Les chroniques les plus complètes sont celles d'E8, E3 et E6. Par ailleurs, étant donné qu'aucun débit n'est pompé dans les forages E1 et E8, et que les chroniques d'E1 et E3 sont quasi identiques, la chronique du forage E1 est préférée à celle du forage E3.

Le piézomètre PZ1E se situe à 1.5 km au Nord du champ captant d'Emmerin et montre des fluctuations similaires à celles des forages d'Emmerin.

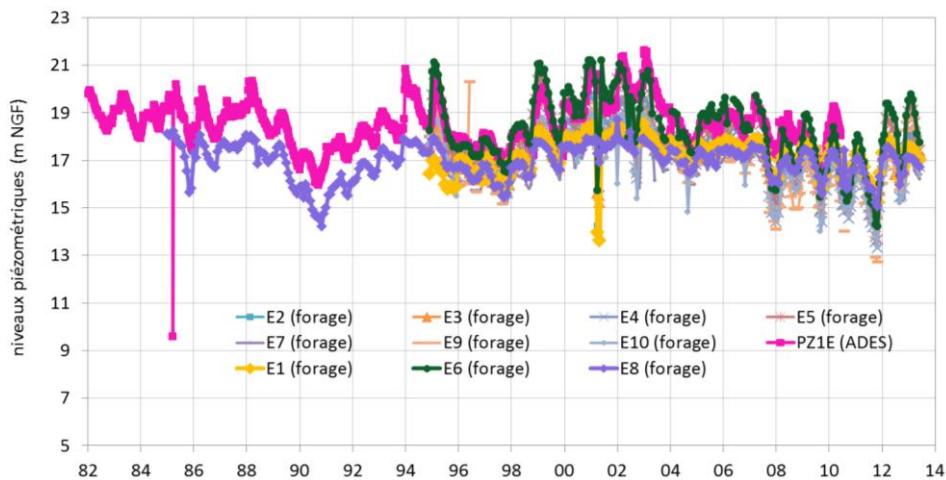


Figure 36 : Chroniques piézométriques des forages d'Emmerin.

Les piézomètres PZ2S et 00203A0033/P1 sont très proches l'un de l'autre et situés à quelques kilomètres au Sud-Ouest des champs captants. Les données de PZ2S démarrent fin 2002 et s'accordent avec celles de 00203A0033/P1 qui s'arrêtent en août 2004 (Figure 37).

Les chroniques des piézomètres PZ0 à PZ12 débutent fin 1998 et celles des piézomètres PZ37 à PZ47 fin 2007. Elles sont très discontinues pour être retenues. Il en est de même pour celles des piézomètres PZ29, 30 et 31 (Figure 37).

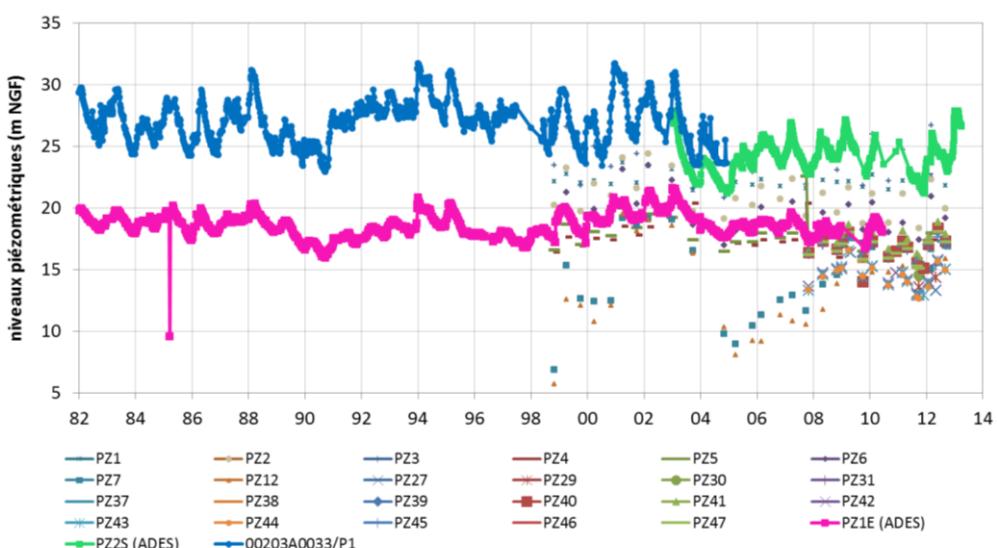


Figure 37 : Chroniques piézométriques autour des champs captants d'Emmerin-Houplin.

La synthèse de ces informations aboutit à la sélection des ouvrages suivants pour la modélisation : les forages E1, E6, E8, H8, H10, et les piézomètres PZ1E, PZ2S et 00203A0033.

La Figure 38 présente les chroniques sélectionnées pour les champs captants d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne. Les niveaux piézométriques des forages d'Emmerin sont supérieurs à ceux des forages d'Houplin, et leurs amplitudes sont plus faibles, avec un battement d'environ 5 m contre 15 m pour les forages d'Houplin.

D'après les chroniques de débit disponibles sur les champs captants, les débits prélevés ont tendance à augmenter pour le champ captant d'Emmerin à partir de 2007, alors qu'ils diminuent pour le champ captant d'Houplin à partir de 2008³. Ces tendances s'observent également sur les niveaux piézométriques : courbes à la baisse pour Emmerin (E8 en violet, E6 en vert foncé, E1 en jaune) et courbes à la hausse pour Houplin (H10 en noir, H8 en cyan).

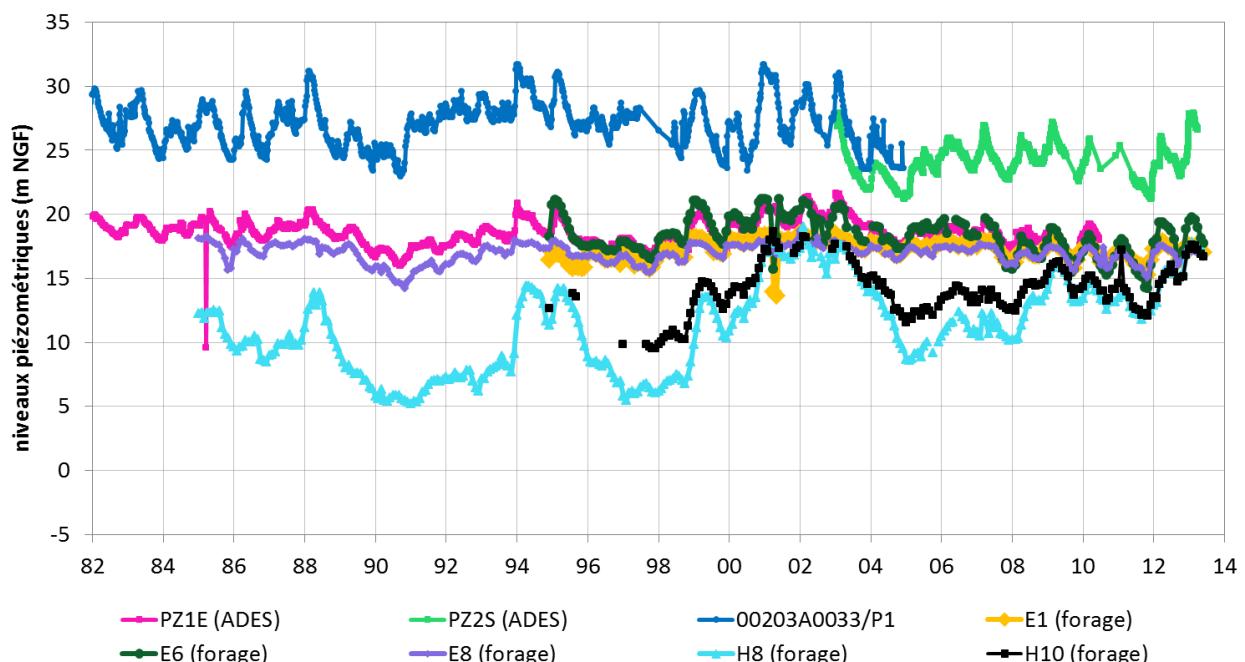


Figure 38 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour les champs captants du Sud de Lille.

³ Les débits prélevés sont distribués à Emmerin à partir de 2007. De 1993 à 2006, ils allaient en décharge à cause de teneurs excessives en nitrates.

Les débits pompés à Houplin diminuent en conséquence, de façon à respecter le seuil attribué au débit global pompé dans les deux champs captants.

5.5 CHAMPS CAPTANTS DES ANSEREUILLES

Le champ captant des Ansereuilles recense 28 forages, numérotés A1 à A28. Sur la Figure 39, on différencie trois champs captants : un premier, au Nord, le long du Canal de la Deûle, regroupant 15 forages (A1 à A15), avec les piézomètres PZ1A et PZ9A à l'Est ; un deuxième, au Sud, constitué des forages A17 à A24 ; un troisième, au Nord-Ouest, formé des forages A25 à A28. Le forage A1 est à l'arrêt depuis 1992 et sert de piézomètre. Un quatrième piézomètre, PZ9A, se trouve à environ 1 km au Sud-Est du premier groupement.

A quelques kilomètres au Sud-Ouest du champ captant des Ansereuilles se situe le site de la Blanchisserie qui compta 15 piézomètres : PZi Blanchisserie.

Enfin, trois piézomètres de suivi ADES se trouvent au Sud-Est du site de la Blanchisserie : PZ1P et PZC-P à plus de 2 km, et PZ2P à 3.5 km (Figure 39).

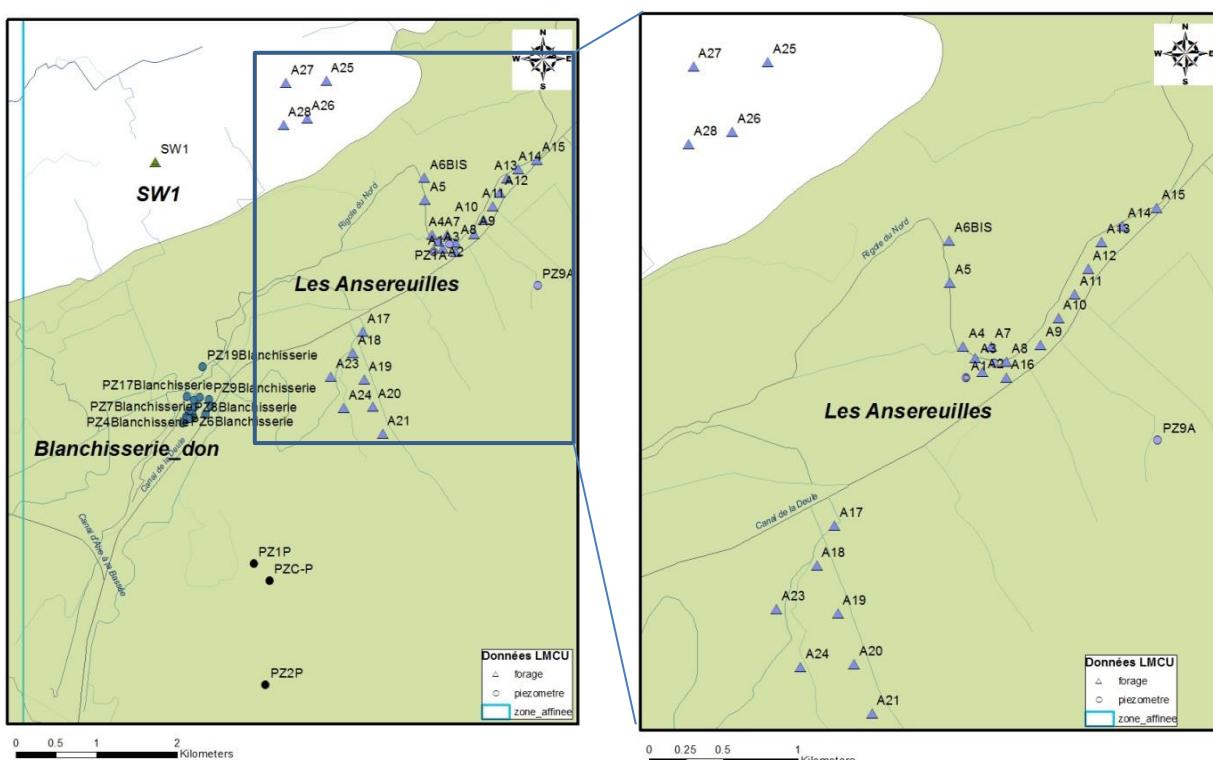


Figure 39 : Ouvrages proches des champs captants des Ansereuilles.

Pour les ouvrages des champs captants des Ansereuilles, la similitude des chroniques piézométriques montre que les variations des niveaux sont homogènes (Figure 40). Les données sont pratiquement comprises entre deux courbes enveloppes : courbe rouge -A1- pour le niveau inférieur, et courbe verte -A23- pour le niveau supérieur. Elles oscillent à +/- 5 m autour d'un niveau moyen. Les niveaux du piézomètre A1 et du forage A3 sont quasi identiques (courbes noire et rouge sur la Figure 40). Ainsi, pour pallier la discontinuité de la chronique A1, les données du forage A3 sont privilégiées. Par ailleurs, ces deux ouvrages n'enregistrent plus de données après 2001, il est souhaitable de prendre aussi en compte les données du piézomètre PZ1A, même si sa période d'acquisition est courte : début 2009 à fin 2011.

Afin de représenter le comportement de la nappe au Sud de la zone affinée, les données du forage A23 et du piézomètre PZ9A sont sélectionnées car ce sont les plus complètes. Leurs niveaux sont au-dessus des niveaux piézométriques des ouvrages du champ captant du Nord.

Les données des forages du champ captant du Nord-Ouest sont discontinues et ne débutent qu'à partir de janvier 1994. Elles ne sont pas sélectionnées pour le calage. Les ouvrages de suivi retenus pour le calage du modèle autour de ces champs captants sont donc : les forages A3, A10 et A23, ainsi que les piézomètres A1, PZ9A et PZ1A.

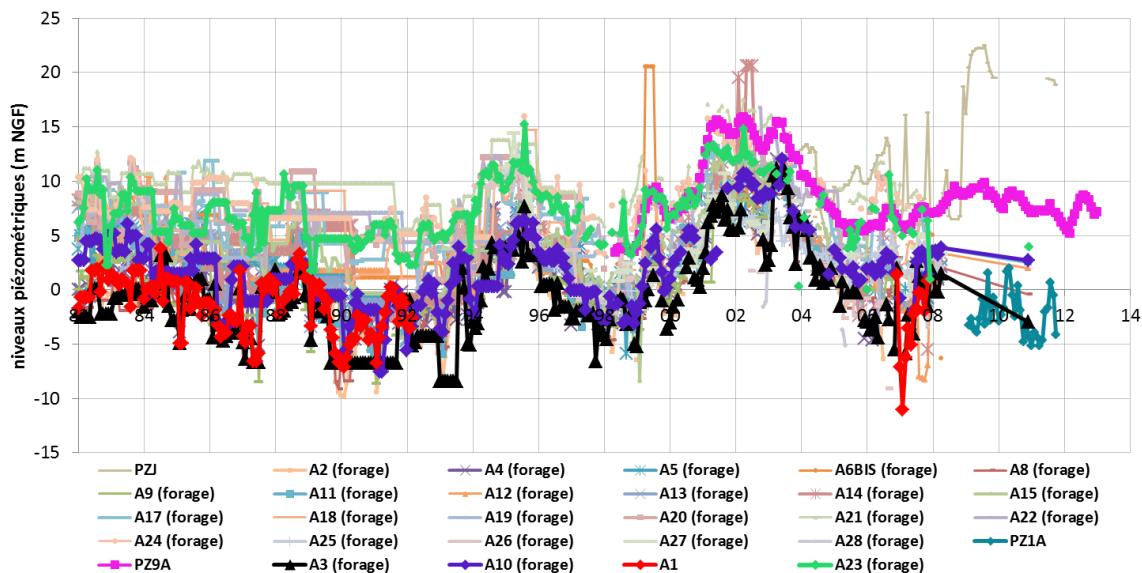


Figure 40 : Chroniques piézométriques autour des champs captants des Anseureilles.

Les relevés des piézomètres de la Blanchisserie de Don ne sont réalisés qu'à partir de janvier 2005. Les chroniques sont relativement semblables (Figure 41). Certains piézomètres (PZ1, PZ7, PZ9, PZ10 et PZ11 Blanchisserie) n'ont que très peu de mesures. Par ailleurs, certains piézomètres sont référencés comme captant la nappe « superficielle » : PZ1, PZ2, PZ4, PZ6, PZ7 et PZ8. Ils ont un niveau piézométrique légèrement supérieur et plus fluctuant. Ces piézomètres ne sont pas pris en compte pour le calage. Les autres piézomètres (PZ9, PZ10, PZ11, PZ12, PZ13, PZ15, PZ16, PZ17 et PZ19) captent la nappe de la Craie. On se propose de conserver la chronique la plus complète, celle de PZ12 Blanchisserie.

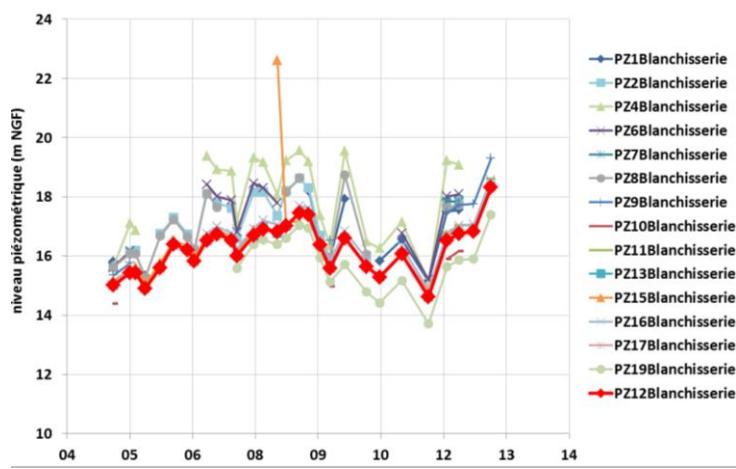
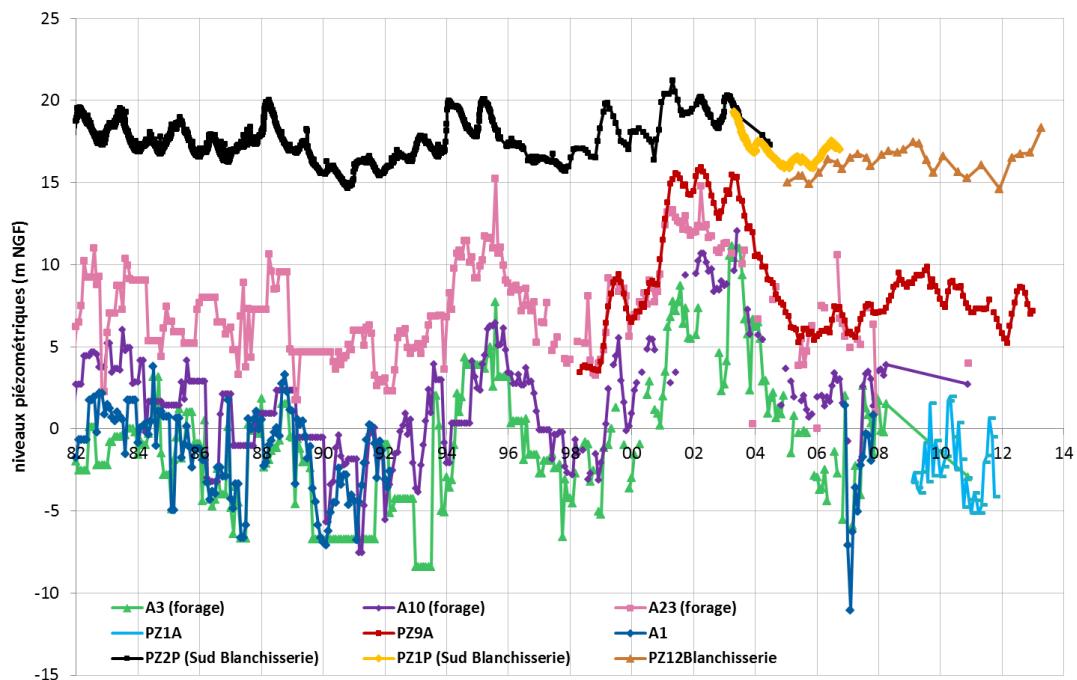


Figure 41 : Piézomètres du site de la Blanchisserie de Don.

Parmi les trois piézomètres de suivi ADES se trouvant au Sud-Est du site de la Blanchisserie, c'est le piézomètre PZ2P qui possède la plus longue chronique, avec un niveau d'eau sensiblement supérieur à celui du site de la Blanchisserie (Figure 42). Cette chronique sera retenue pour la modélisation. Bien que la période d'acquisition des données du piézomètre

PZ1P soit courte (entre avril 2003 et septembre 2006), elle correspond à une période de transition entre la fin des données de PZ2P et le début des données des piézomètres de la Blanchisserie. Le piézomètre PZ1P sera donc sélectionné.

La synthèse des données piézométriques sélectionnées pour les champs captants des Ansereuilles et le site de la Blanchisserie est présentée sur la Figure 42.



5.6 CHAMP CAPTANT DE PECQUENCOURT

Sur ce champ captant sont recensés 13 forages, P1 à P13, datant de 1930 et trois piézomètres (PZ2A, PZ1R et PZE1P). Au cours du temps, certains forages Pi ont été rebouchés et remplacés par des forages notés PiN. Les forages PiN sont distants de moins de 15 m des forages Pi qu'ils remplacent. Chaque couple de forage Pi(N) se situe dans la même maille du modèle. Leurs chroniques sont donc concaténées afin de n'en former qu'une. Dans les paragraphes suivants, les chroniques, même concaténées, sont notées Pi. Les forages sont proches les uns des autres : environ 1.5 km sépare les deux forages les plus espacés (Figure 43).

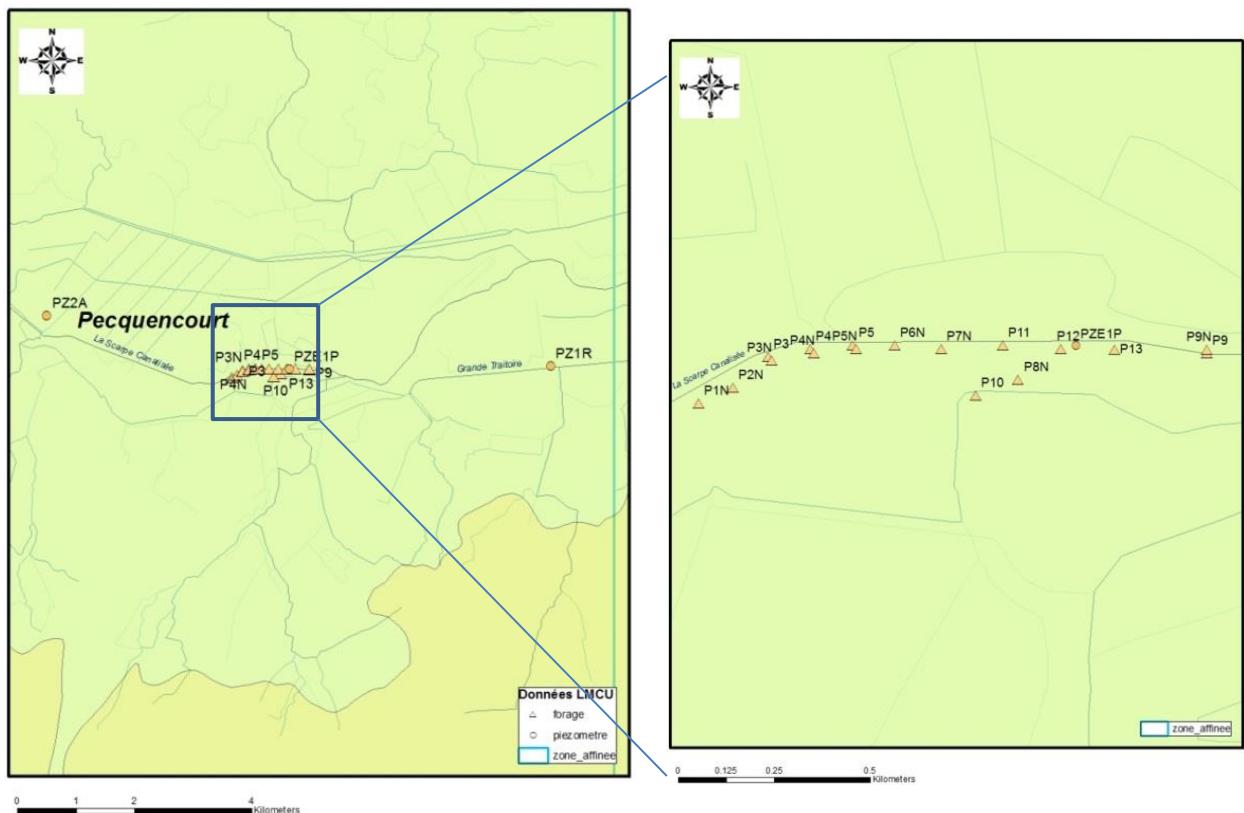


Figure 43 : Localisation des ouvrages du champ captant de Pecquencourt.

Le piézomètre PZE1P se situe à moins de 50 m du forage P12, et leurs niveaux piézométriques sont similaires. Les données du forage sont préférées car elles couvrent la période 1982-2013, tandis que la chronique du piézomètre s'arrête en 2008. La chronique la plus complète a été enregistrée sur le forage P13 (365 points, de 1982 à 2012). Cette chronique étant en outre bien représentative de l'ensemble des chroniques du champ captant (Figure 44), elle est sélectionnée pour le calage du modèle. Cependant, ce forage se situant à l'extrême Est du champ captant, la chronique du forage P2N lui est associée (298 points, de 1982 à 2012, ouvrage situé à l'extrême Ouest du champ captant et à environ 1 kilomètre du forage P13).

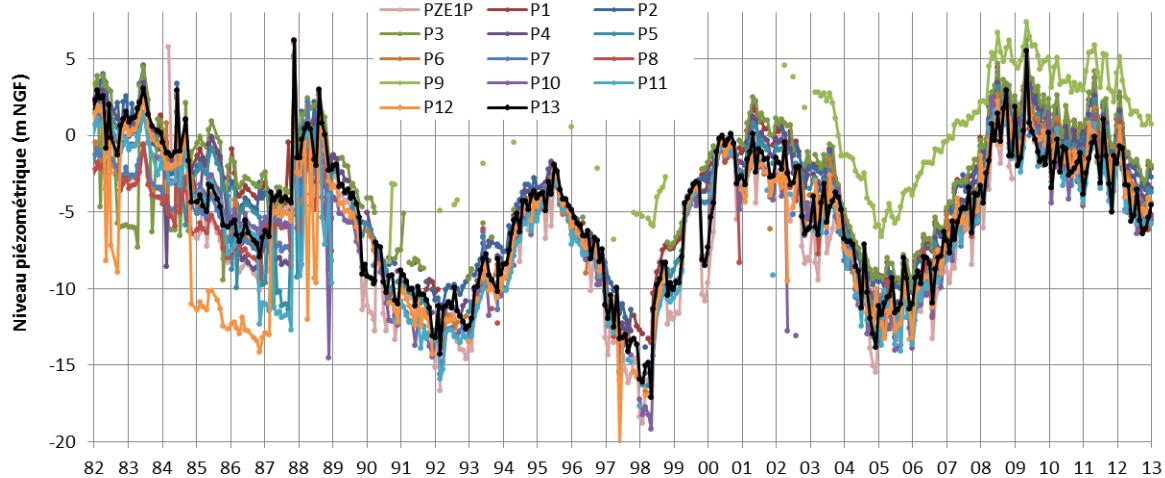


Figure 44 : Chroniques piézométriques du champ captant de Pecquencourt et du piézomètre PZE1P situé dans le champ captant.

Le piézomètre PZ2A est implanté à 3.5 km à l'Ouest des forages, et le piézomètre PZ1R à 4.5 km à l'Est. Ces deux piézomètres ont des chroniques très riches entre 1982 et 2012, très utiles pour le calage du modèle. Par conséquent, les chroniques des piézomètres PZ1R et PZ2A et des forages P2 et P13 sont retenues pour le calage (Figure 45). Les niveaux piézométriques des deux piézomètres se situent de 10 à 15 m au-dessus des niveaux des forages du champ captant mais leurs variations d'amplitude sont globalement assez semblables. Les prélèvements du champ captant semblent donc bien impacter ces deux piézomètres.

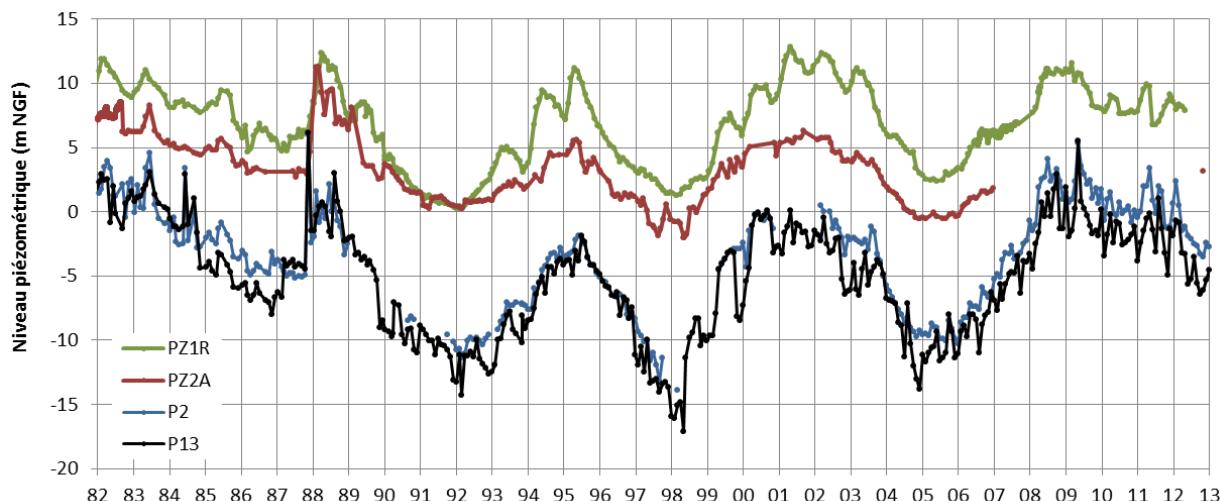


Figure 45 : Chroniques piézométriques sélectionnées pour le champ captant de Pecquencourt.

5.7 CHAMP CAPTANT DE FLERS-EN-ESCREBIEUX

Ce champ captant regroupait à l'origine 9 forages, FL1 à FL9. Le forage FL4 est aujourd'hui à l'arrêt et sert de piézomètre (Figure 46).

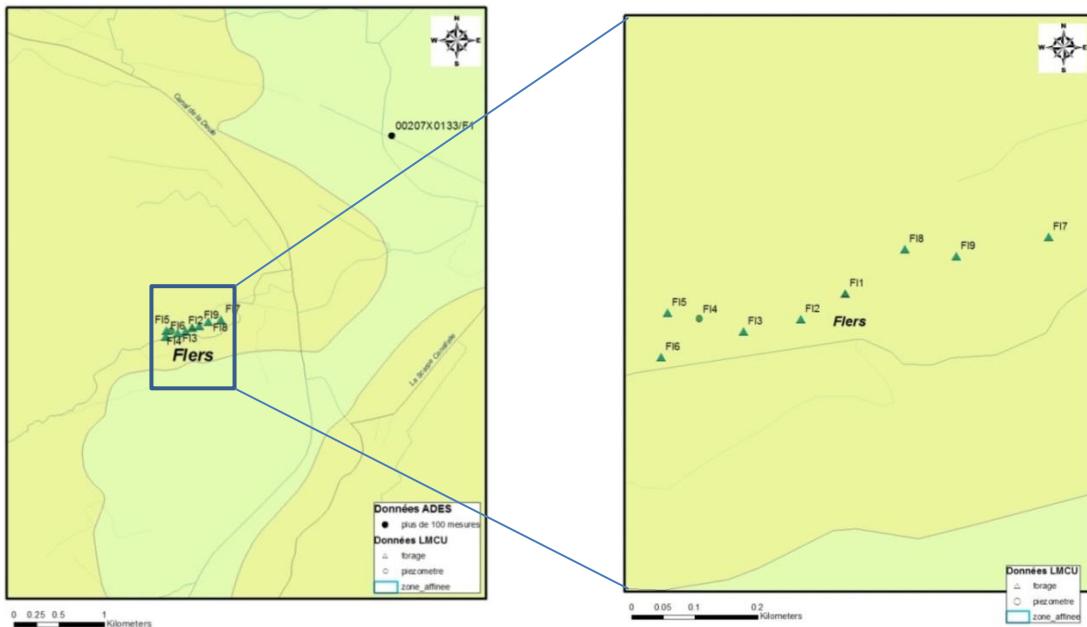


Figure 46 : Localisation des ouvrages du champ captant de Flers-en-Escrebieux.

Le piézomètre ADES 00207X0133/F1, situé à 3 km au Nord-Est du champ captant, est suivi depuis janvier 1970. Sa chronique présente des fluctuations de l'ordre de trois mètres et les niveaux ont tendance à augmenter ces dernières années (Figure 47) : ils dépassent les 16 m NGF depuis 2007 alors qu'ils se situaient plutôt autour de 14.5 m NGF entre 1970 et 2000. Les niveaux des forages ont été suivis ponctuellement entre avril 2006 et juin 2009 ; leurs données ne sont pas retenues pour la modélisation, au profit de celles des piézomètres FL4 et 00207X0133/F1 qui sont retenues pour le calage du modèle. Le piézomètre FL4 est très influencé par les pompages (Figure 47). Les variations d'amplitude de FL4 sont plus fortes que celles du piézomètre ADES : en particulier, les niveaux piézométriques s'élèvent au-dessus de 20 m NGF, contre 18 m NGF pour le piézomètre 00207X0133/F1.

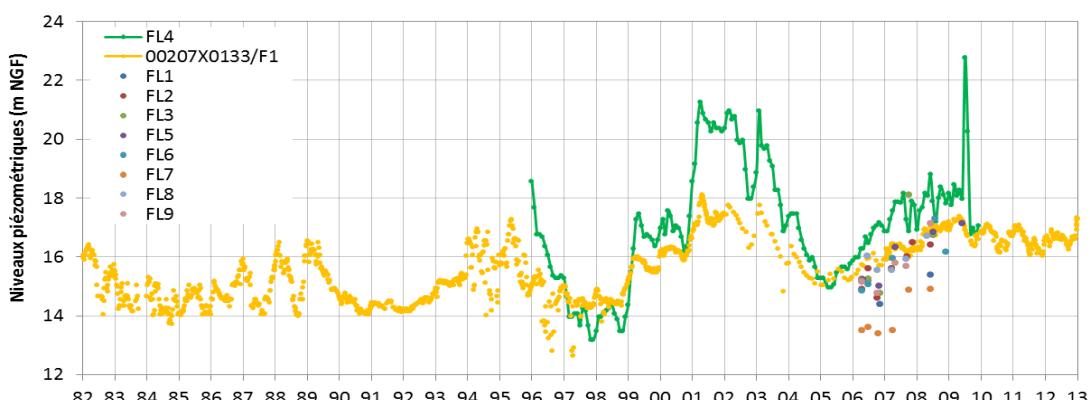


Figure 47 : Chroniques piézométriques autour du champ captant de Flers-en-Escrebieux.

5.8 CHAMP CAPTANT DE FERIN

Le champ captant de Férin est constitué de 5 forages, notés F1 à F5 (Figure 48).



Figure 48 : Localisation des ouvrages du champ captant de Férin.

Seul le forage F1 dispose d'une chronique piézométrique plus ou moins continue de 1996 à fin 2009 (Figure 49). Le piézomètre ADES 00276X0030/F1, situé à environ 4 km au Sud-Ouest, possède une longue chronique depuis octobre 1961. Ces deux chroniques sont sélectionnées pour le calage du modèle. Sur la période de mesure commune, les deux chroniques fluctuent de manière quasi synchrone jusqu'en 2005, autour de 26 m NGF pour F1 et de 34 m NGF pour 00276X0030/F1, avec une amplitude de battement de l'ordre de 3 m. Après 2005, les niveaux du piézomètre ADES ont plutôt tendance à baisser.

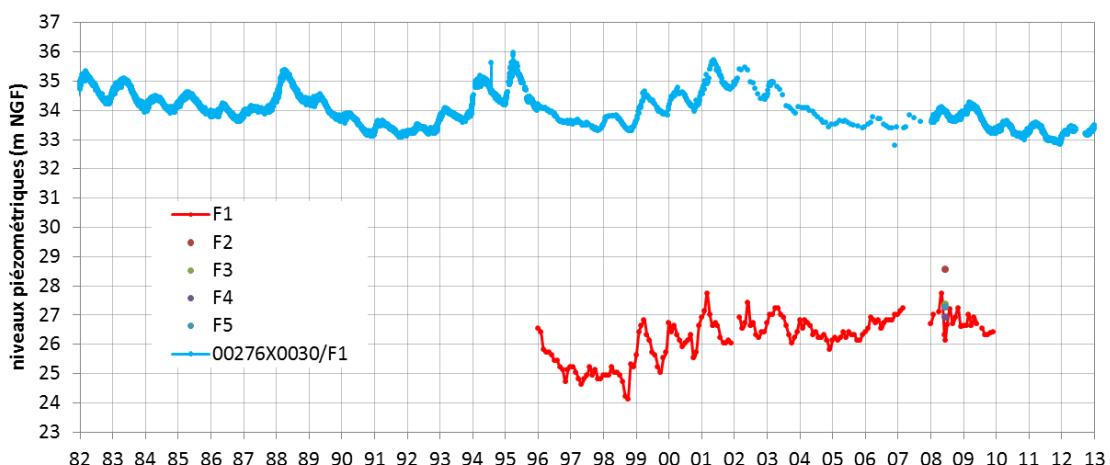


Figure 49 : Chroniques piézométriques autour du champ captant de Férin.

5.9 FORAGES DE PERENCHIES

Deux forages, PE1 et PE2, sont identifiés (Figure 50).

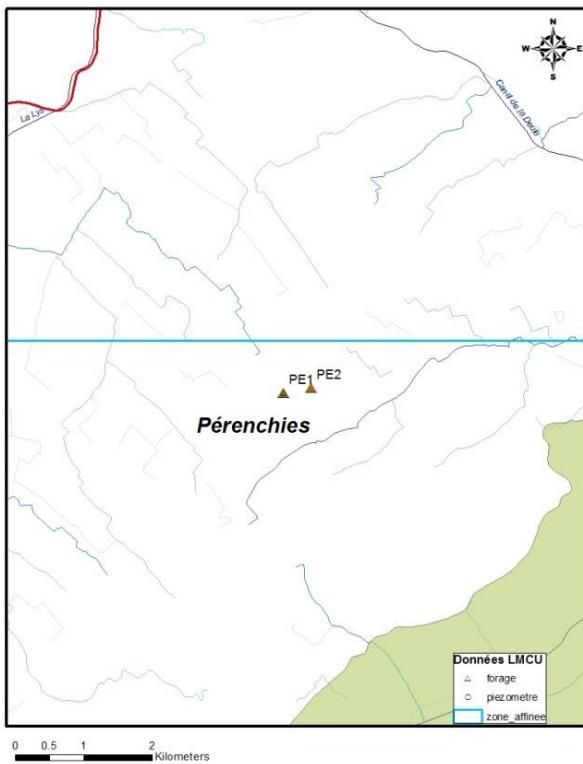


Figure 50 : Localisation des forages de Pérenchies.

Le forage PE1 ne possédant que des données piézométriques éparse, de 2006 à 2009 (Figure 51), il n'est pas retenu pour le calage du modèle. Le forage PE2 présente une chronique plus complète de 1996 à début 2010. Les niveaux de PE2 sont très influencés et ont une tendance générale à la hausse, passant de -10 m NGF à 5 m NGF. Les prélèvements sont assez faibles, de l'ordre de 200 m³/j à l'exception de l'année 1996 où ils ont atteint environ 900 m³/j.



Figure 51 : Chroniques piézométriques des ouvrages de Pérenchies.

5.10 FORAGES DU CARBONIFERE

On observe sur la Figure 52 un groupe d'ouvrages au Nord et d'autres piézomètres plus dispersés au Sud.

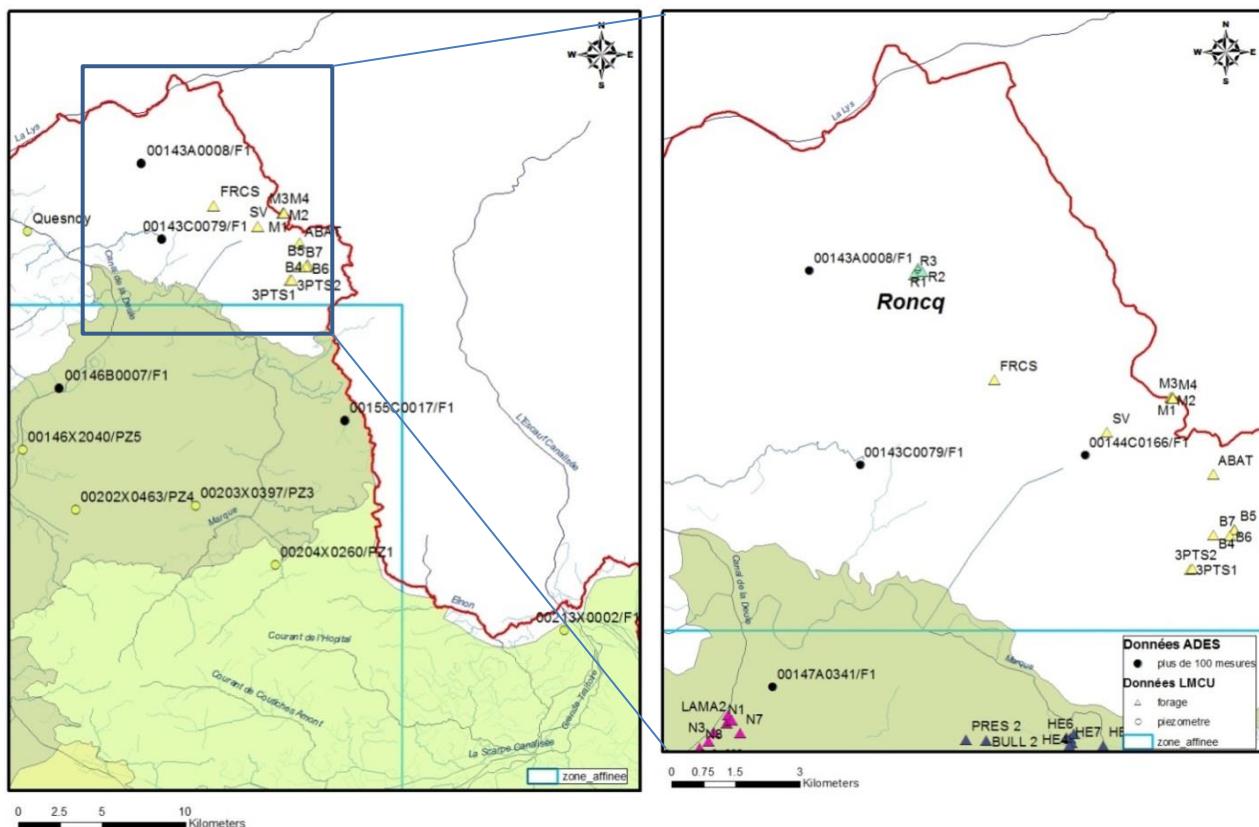


Figure 52 : Localisation des ouvrages dans le Carbonifère.

Dans cette étude, l'analyse des chroniques piézométriques s'appuie en grande partie sur le travail réalisé dans le cadre du projet ScaldWIN, lequel s'intéresse spécifiquement à la nappe du Carbonifère.

On observe différents types de comportement de la nappe du Carbonifère. Au Nord, les ouvrages enregistrent des niveaux piézométriques négatifs et une chute depuis le début du XX^{ème} siècle jusqu'aux années 2000 ainsi que l'onde piézométrique de la perte de l'Escaut à Kain (Figure 53). L'allure des chroniques est homogène pour ces piézomètres situés au Nord de la zone affinée.

Plus au Sud, les autres ouvrages, dont les chroniques sont tracées sur la Figure 54, ont des niveaux piézométriques positifs assez stables ces dernières années. Parmi ce deuxième groupe, le piézomètre 00146B0007/F1 présente une augmentation depuis 1992, avant de se stabiliser à partir de 2009 autour de 15 m NGF. Les données des autres piézomètres ne sont disponibles qu'après 2010. Enfin, le piézomètre 00155C0017/F1, dont les données commencent en 1998, oscille autour de 30 m NGF avec un battement d'environ 5 mètres d'amplitude.

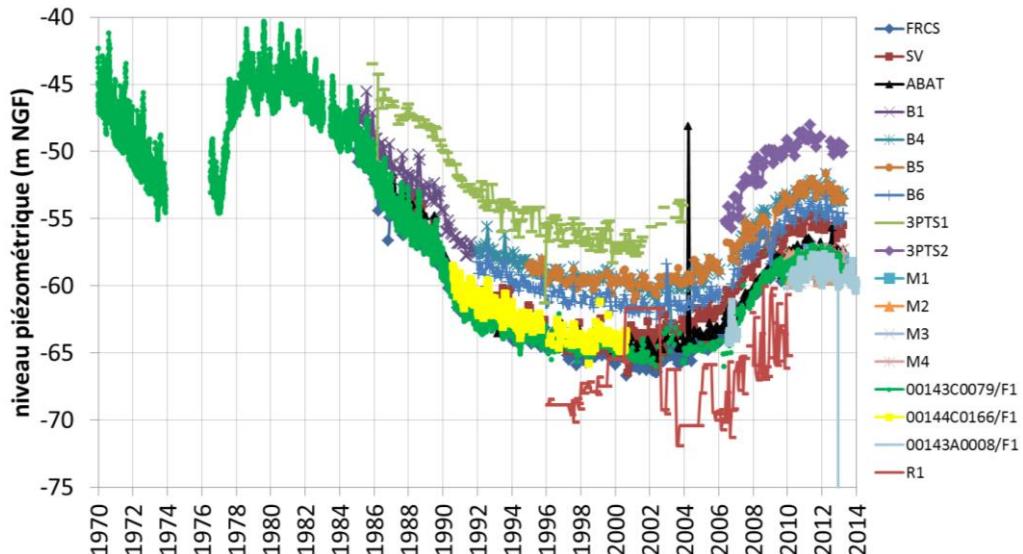


Figure 53 : Chroniques piézométriques du bloc Nord du Carbonifère.

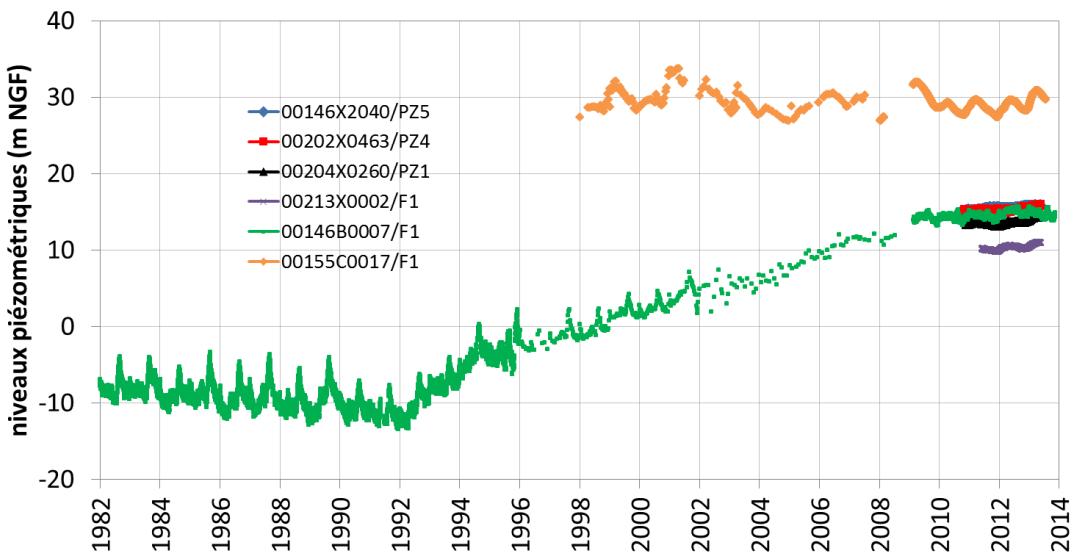


Figure 54 : Chroniques piézométriques du bloc Sud de la nappe du Carbonifère.

Les chroniques piézométriques des forages du bloc Nord de la zone affinée sont similaires à celle du piézomètre 00143C0079/F1. Les données du forage B4 succèdent à celles du forage B1. Les données des forages M1 à M4 ne débutent qu'à partir de janvier 2010. De même, les données des forages B7 et des Trois Ponts sont discontinues. Ces données ne sont pas retenues.

Les données sélectionnées sont celles utilisées pour le calage du modèle Carbonifère, à savoir les chroniques enregistrées dans les ouvrages FRCS, SV, ABAT, B1, B4, B6, R1, 00143C0079/F1 et 00146B0007/F1.

5.11 SYNTHESE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES RETENUES POUR LE CALAGE DU MODELE

Dans la zone affinée, deux sources de données sont utilisées pour le calage (Figure 55) :

- les chroniques piézométriques des 50 ouvrages sélectionnés dans et autour des champs captants, listés dans le Tableau 1 ;
- les piézomètres ADES situés en dehors des champs captants et possédant un minimum de points de mesure sur la période de calage.

En dehors de la zone affinée, tous les piézomètres ADES des six masses d'eau des territoires qui concourent à l'alimentation de la métropole lilloise - la Vallée de la Deûle (1003), l'Artois et la Vallée de la Lys (1004), la Scarpe et la Sensée (1006), le Valenciennois (1007), le Cambrésis (1010) et la bordure du Hainaut (1017) – sont utilisés (Tableau 2 et Figure 56).

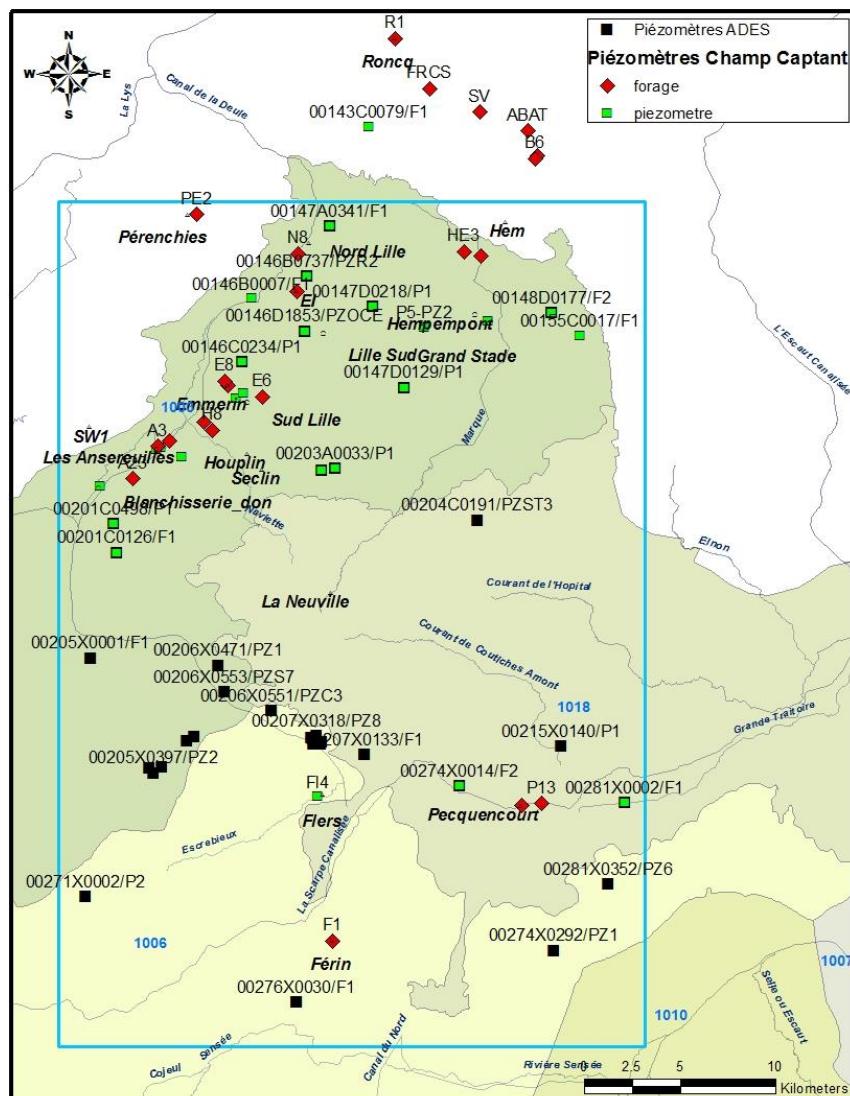


Figure 55 : Ouvrages sélectionnés pour le calage du modèle hydrodynamique dans la zone affinée.

Code_BSS	Type	Nom	X	Y	Champ captant	Nappe	Données	Commune
00155C0017/F1	piezometre		665114	2624128	Carbonifère	Carbonifère	ADES	Baisieux
00143C0079/F1	piezometre		654146	2634988	Carbonifère	Carbonifère	ADES	Bondues
00146B0007/F1	piezometre		648059	2626068	Carbonifère	Carbonifère	ADES	Lomme
00144D0200/F1	forage	B1	662901	2633447	Carbonifère	Carbonifère	MEL	Wattrelos
00146C0001/F1	forage	E1	646796	2621521	Emmerin	Craie	MEL	Emmerin
00146D0074/F6	forage	E6	648579	2620929	Emmerin	Craie	MEL	Wattignies
00146C0075/F8	forage	E8	646606	2621721	Emmerin	Craie	MEL	Emmerin
00276X0030/F1	piezometre		650369	2589426	Férim	Craie	ADES	
00273X0001/F1	forage	F1	652236	2592593	Férim	Craie	EDN	Férim
00207X0133/F1	piezometre		653920	2602309	Flers-en-Escrebieux	Craie	ADES	
00273X0054/F4	piezometre	Fl4	651487	2600147	Flers-en-Escrebieux	Craie	EDN	Flers-en-Escrebieux
00148D0177/F2	piezometre		663660	2625299	Hempempont	Craie	ADES	Baisieux
00148A0011/F9	forage	HE9	659926	2628229	Hempempont	Craie	EDN	Villeneuve d'Ascq
-	piezometre	PZEA01	660329	2624867	Hempempont	Craie	Brabant	Tressin
00148A0005/F3	forage	HE3	659094	2628470	Hempempont	Craie	EDN	Villeneuve d'Ascq
00202A0129/F8	forage	H8	645973	2619196	Houplin-Ancoisne	Craie	MEL	Houplin-Ancoisne
00202A0131/F10	forage	H10	645553	2619627	Houplin-Ancoisne	Craie	MEL	Houplin-Ancoisne
00201B0001/F1	piezometre	A1	643097	2618205	Les Ansereuilles	Craie	EDN	Allennes-les-Marais
00201B0003/F3	forage	A3	643157	2618341	Les Ansereuilles	Craie	EDN	Allennes-les-Marais
00201B0010/F10	forage	A10	643719	2618606	Les Ansereuilles	Craie	EDN	Wavrin
00201B0023/F23	forage	A23	641824	2616653	Les Ansereuilles	Craie	EDN	Annoeullin
00146D1853/PZOCE	piezometre		650817	2624355	Lille Sud	Craie	ADES	Lille
00147D0218/P1	piezometre		654323	2625626	Lille Sud	Craie	ADES	Lille
00147D0129/P1	piezometre		655971	2621406	Lille Sud	Craie	ADES	Lesquin
-	piezometre	P5-PZ2	657010	2624569	Lille Sud	Craie	MEL	Villeneuve d'Ascq
00147A0341/F1	piezometre		652099	2629799	Nord de Lille	Craie	ADES	La Madeleine
00146B0030/F1	forage	PDG	650395	2626384	Nord de Lille	Craie	MEL	Lille

Code_BSS	Type	Nom	X	Y	Champ captant	Nappe	Données	Commune
00146B0737/PZR2	piezometre		650923	2627194	Nord de Lille	Craie	ADES	Lille
00146B0020/F8	forage	N8	650408	2628352	Nord de Lille	Craie	MEL	Lille
00274X0014/F2	piezometre	PZ2A	658831	2600675	Pecquencourt	Craie	MEL	Anhiers
00281X0002/F1	piezometre	PZ1R	667427	2599809	Pecquencourt	Craie	MEL	Rieulay
00274X0220/F2N	forage	P2N	662077	2599651	Pecquencourt	Craie	MEL	Pecquencourt
00274X0013/F13	forage	P13	663069	2599751	Pecquencourt	Craie	MEL	Pecquencourt
00146A0620/F5	forage	PE2	645149	2630410	Pérenchies	Craie	EDN	Pérenchies
00143B0027/F1	forage	R1	655502	2639576	Roncq	Carbonifère	EDN	Roncq
00146C0234/P1	piezometre	PZ1E	647554	2622757	Sud de Lille	Craie	ADES	Emmerin
00201C0126/F1	piezometre	PZ2P	641011	2612835	Sud de Lille	Craie	ADES	Provin
00201C0498/P1	piezometre	PZ1P	640862	2614333	Sud de Lille	Craie	ADES	Provin
00203A0033/P1	piezometre		652365	2617189	Sud de Lille	Craie	ADES	Avelin
00203A0359/PZ2	piezometre	PZ2S	651674	2617100	Sud de Lille	Craie	ADES	Seclin
00201A0550/PZ12	piezometre	PZ12Blanchi	640134	2616287	Sud de Lille	Craie	MEL	Don
00201B0529/PZ9	piezometre	PZ9A	644386	2617787	Sud de Lille	Craie	EDN	Gondécourt
00201B0362/FEX1	piezometre	PZ1A	643288	2618305	Sud de Lille	Craie	EDN	Allennes les Marais
00143B0102/F1	forage	FRCS	657286	2636964	Tourcoing	Carbonifère	MEL	Tourcoing
00144C1075/F3	forage	SV	659909	2635735	Wattrelos	Carbonifère	MEL	Wattrelos
00144D0208/F1	forage	ABAT	662398	2634750	Wattrelos	Carbonifère	MEL	Wattrelos
00144D1082/F4	forage	B4	662890	2633451	Wattrelos	Carbonifère	MEL	Wattrelos
00144D1166/F6	forage	B6	662784	2633319	Wattrelos	Carbonifère	MEL	Wattrelos

Tableau 1 : Ouvrages de suivi piézométrique autour des champs captants utilisés pour le calage du modèle.

Piézomètres ME 1003	Piézomètres ME 1004	Piézomètres ME 1006	Piézomètres ME 1007
00146B0737/PZR2	00122X0064/P1	00206X0519/PZ1	00284X0701/PZ1
00146C0234/P1	00125X0080/P1	00206X0520/PZ7	00291X0031/P1
00146D1853/PZOCE	00173X0083/PZ13A	00206X0550/PZS2	00296X0158/P1
00147A0341/F1	00174X0014/P1	00206X0551/PZC3	
00147D0129/P1	00174X0026/P1	00207X0313/PZ2	Piézomètres ME 1010
00147D0218/P1	00181X0125/PZT1	00207X0314/PZ3	00281X0004/F1
00148D0177/F2	00181X0134/PZ15A	00207X0315/PZ4	00286X0037/P1
00197X0042/P1	00181X0136/PZ15B	00207X0316/PZ5	00286X0405/PZST2
00197X0049/F2	00182X0031/P	00207X0317/PZ6	00367X0006/P1
00197X0279/PZ2	00182X0039/P	00207X0318/PZ8	00368X0045/P1
00198X0087/P	00182X0063/P	00207X0325/PZ10	00373X0042/S1
00198X0123/P1	00182X0079/PZC-L	00207X0326/PZ11	00375X0105/S1
00198X0275/F4	00183X0002/S1	00207X0389/PZS12	00376X0160/P1
00198X0473/PZ3	00184X0133/P1	00254X0003/P1	00376X0210/PZ1
00201C0126/F1	00191X0281/PZ2	00254X0037/PZ1	00377X0051/S1
00201C0498/P1	00191X0297/PZ5BIS	00263X0129/PZASA4	00378X0162/PZCAT4
00203A0033/P1	00191X0308/PZ3	00266X0030/P1	00484X0018/S1
00203A0359/PZ2	00191X0309/PZ4	00271X0002/P2	00491X0013/P
00204B0115/P1	00191X0367/PZ1BIS	00274X0292/PZ1	00493X0061/S1
00205X0001/F1	00195X0087/P2	00275X0005/P1	
00205X0396/PZ1	00196X0053/P1	00276X0030/F1	Piézomètres ME 1018
00205X0397/PZ2	00196X0294/PZ1	00276X0057/PZSP1	00204C0191/PZST3
00205X0465/PZ2BIS	00196X0316/PZ4	00281X0076/F1	00207X0133/F1
00205X0498/PZCVI	00196X0334/PZC5	00281X0352/PZ6	00215X0140/P1
00206X0471/PZ1	00196X0335/PZC6	00282X0046/F1	00216X0073/PZ3
00206X0516/PZ2	00196X0336/PZC7	00353X0073/P	00217X0068/P1
00206X0553/PZS7	00196X0337/PZC8	00354X0058/S1	00218X0479/PZC26
00263X0006/P1		00362X0012/P1	00218X0480/PZC27
		00363X0006/S1	00225X0077/FC2
		00365X0003/P1	00274X0014/F2
		00367X0026/P1	00281X0002/F1

Tableau 2 : Ouvrages de suivi piézométrique ADES implantés dans les masses d'eau des territoires qui concourent à l'alimentation de la métropole lilloise.

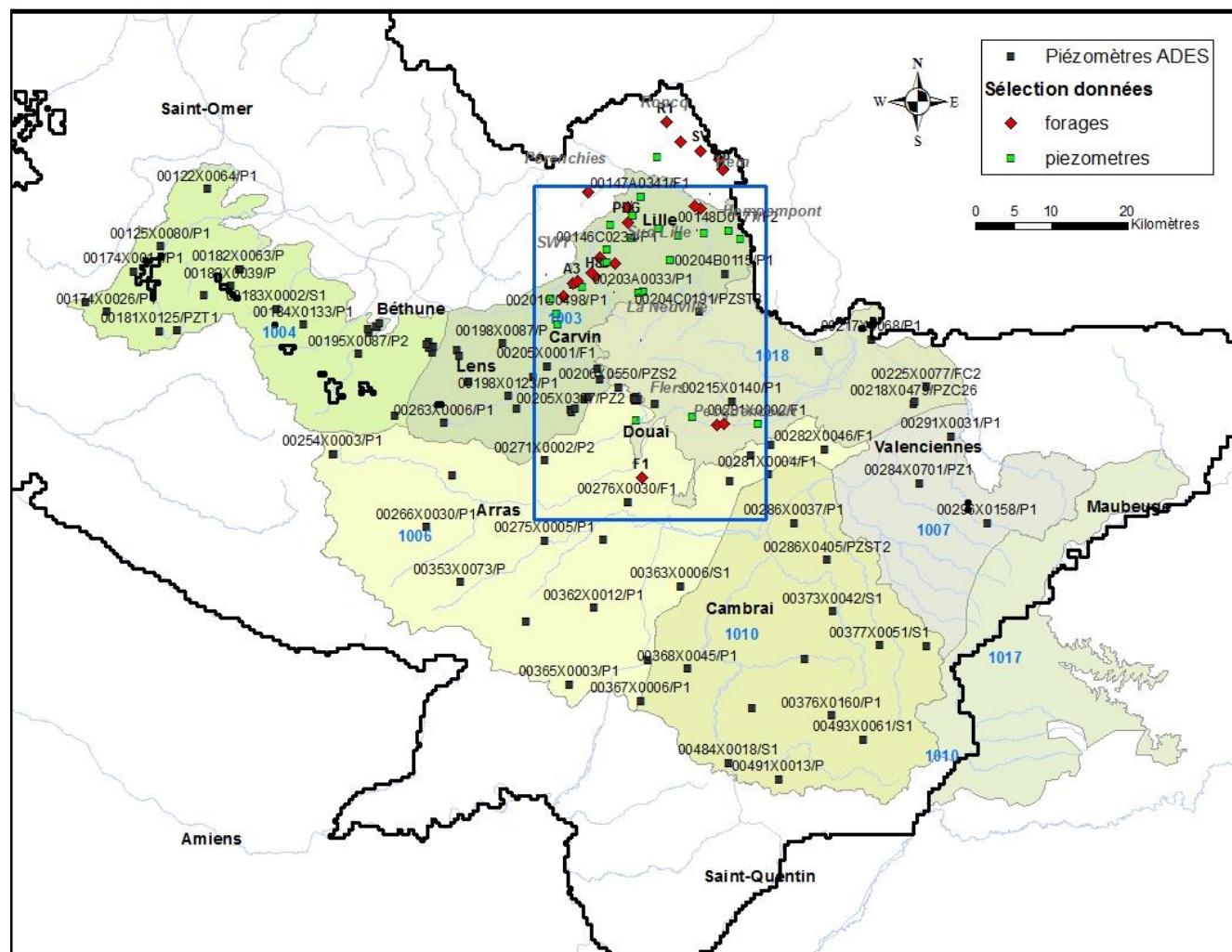


Figure 56 : Piézomètres utilisés pour le calage du modèle, et masses d'eau concernées.

6 Construction du modèle géologique

6.1 CONTEXTE

Cette reprise de la modélisation hydrodynamique s'appuie sur un nouveau modèle géologique centré sur les champs captants du Sud de Lille (Emmerin, Houplin-Ancoisne et les Ansereuilles), de Pecquencourt, de Flers-en-Escrebieux et d'Hempempont. Cette modélisation géologique reprend le travail déjà réalisé dans le cadre du projet SIGES (Picot, 2010), le complète et améliore sa précision.

La démarche de création d'un modèle géologique affiné a pour objectif principal de construire une géométrie plus précise des formations géologiques utilisée pour le modèle hydrodynamique, à l'aide de données supplémentaires, d'un maillage plus serré et d'interprétation plus poussées, afin de construire une géométrie plus précise des formations utilisées par le modèle hydrodynamique.

Un second objectif est de restituer les formations superficielles quaternaires (alluvions, limons et formations littorales) avec une précision accrue sur l'ensemble de la région, pour une meilleure représentativité du modèle hydrodynamique.

Un important travail d'ajustement a en outre été réalisé sur les bordures de la zone affinée afin d'harmoniser la transition entre la géométrie du modèle affiné et celle du modèle régional.

Une attention particulière a été apportée à la couche des craies blanches et grises à silex du Turonien supérieur-Sénonien qui renferment la nappe de la Craie afin que sa géométrie soit la plus précise possible.

Les formations aquifères renfermant une nappe ayant une quelconque interaction avec celle de la Craie ont également été modélisées, ce qui conduit à un total de 10 formations géologiques modélisées.

6.1.1 Les formations géologiques modélisées

Les formations géologiques sélectionnées pour le modèle sont identiques à celles du modèle géologique régional du SIGES. Elles se distinguent par leur capacité à renfermer une nappe productive :

- Des aquifères⁴ :
 - la Craie blanche à silex qui renferme la nappe de la craie ;
 - et toutes les couches géologiques renfermant une nappe ayant une interaction avec celle de la Craie, à savoir : la nappe des alluvions, la nappe des Sables d'Ostricourt, la nappe des craies cénomanianes et la nappe des calcaires carbonifères.

⁴ Aquifères : Corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée – ensemble du milieu solide et de l'eau contenue -, suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère peut comporter une zone non saturée. (Castany et Margat, 1987)

- Des aquiclude⁵ :

- o les ensembles non aquifères intercalés entre les nappes précédemment citées, c'est-à-dire : les limons des plateaux, les argiles tertiaires, les marnes crétacées, les schistes et grès du Paléozoïque.

Ainsi, la pile hydro-stratigraphique⁶ du modèle regroupe les 9 formations ou groupements de formations retenus pour la modélisation et qui sont listés ci-après (par ordre chronologique).

QUATERNaire	Alluvions anciennes et modernes	Aquifère
	Limons des plateaux	Aquiclude
TERTIAIRE	Argiles des Flandres (Argiles d'Orchies et de Roubaix) de l'Yprésien	Aquiclude
	Sables d'Ostricourt, du Quesnoy, de Grandglise et de Bracheux du Thanétien supérieur (aussi appelé Landénien supérieur)	Aquifère
	Argile de Louvil du Thanétien inférieur (aussi appelé Landénien inférieur)	Aquiclude
Crétacé supérieur (partie supérieure du secondaire)	Craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien	Aquifère
	Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen	Aquiclude
	Craies et marnes du Cénomanien	Aquifère/aquiclude
PRIMAIRE, Jurassique et Crétacé inférieur	Sables et argiles de l'Aptien, Albien et Wealdien Calcaires, grès et argiles du Jurassique Ensemble des formations géologiques d'âge primaire (appelé « substratum »), regroupant entre autres les terrains houillers, le calcaire carbonifère, les schistes, dolomies et grès dévoniens....	Aquifère/aquiclude

Figure 57 : Formations retenues pour le modèle géologique.

Ce sont les interfaces entre couches géologiques qui sont interpolées : à savoir, les murs ou les toits des couches. Le choix de l'interface à interpoler (toit ou mur) se fait en fonction de la géométrie des couches géologiques, des phases érosives et des données disponibles.

⁵ Aquiclude : Corps (couche, massif) de roches saturées, très faiblement conducteur d'eau souterraine, dans lequel le captage de quantités d'eau appréciables n'est pas possible dans des conditions économiques acceptables, et à travers lequel aucun flux de drainage significatif ne peut passer (Castany et Margat, 1987)

⁶ Pile hydro-stratigraphique : Division fondée sur le caractère aquifère ou non aquifère d'une couche géologique, indépendamment de sa nature et de son âge.

Dans le cas où les formations géologiques sont érodées, les toits observés à l'affleurement et/ou mesurés en forage ne sont plus les toits d'origine : l'épaisseur de la couche a été modifiée par érosion des matériaux. Dans ce cas particulier, on peut choisir de modéliser la base de la formation.

Pour les formations superficielles (exemple des limons et des alluvions), les données de forage donnent des informations sur la base de la formation géologique, le toit mesuré étant la topographie. Dans ce cas, il est aussi plus judicieux de choisir d'interpoler la base des formations.

Dans la pile hydro-stratigraphique, il a été choisi d'interpoler 6 formations par leur base selon les critères définis précédemment et afin d'être en cohérence avec le modèle régional du SIGES (identifiée « base érosive » dans la Figure 58).

Description	n° FORM	Formation	Type Surf.	Nom Surf.
Alluvions anciennes et moderne	F09	ALLU		
Limons, remblais	F08	LIMO	EROD	B09
Argile des Flandres	F07	YPRE	EROD	B08
Sables d'Ostricourt Landénien	F06	LAND		T06
Argile de Louvil	F05	LOUV	EROD	T05
Craie sénonienne aquifère	F04	CRAI	EROD	B05
Dièves bleues et vertes	F03	DIEV	EROD	B04
Craies et marnes cénomaniennes	F02	CENO	EROD	B03
Socle anté-Crétacé supérieur	F01	PALE	EROD	B02

Figure 58 : Pile hydrostratigraphique du modèle géologique.

La première colonne reprend l'intitulé de la formation géologique.

La colonne « *n° FORM* » permet de définir l'ordre chronostratigraphique des formations, de la plus ancienne à la plus récente.

La colonne « *Formation* » est le code à 4 lettres associé à chaque formation géologique. Ce code est un identifiant : il permet au logiciel de faire le lien entre toutes les sources de données, après un travail préliminaire de codage des données d'entrée du modèle (sondages, carte géologique, etc...).

La colonne « *Type Surf.* » désigne la surface qui va être interpolée. « EROD » indique qu'il est choisi d'interpoler la base de la formation géologique. Un champ laissé vide indique qu'il a été choisi par défaut d'interpoler le toit de la formation géologique.

La dernière colonne « *Nom Surf.* » combine les types de surface interpolée (B pour base et T pour toit) et les numéros des formations. Par exemple T06 signifie que c'est le toit des Sables d'Ostricourt qui est interpolé.

6.1.2 La gestion de la transition entre la zone affinée et le modèle régional

Le modèle géologique affiné à maille carrée de 100 m de côté (en rouge sur la Figure 59) a été étendu au périmètre d'influence supposé des champs captants (en vert sur la Figure 59). Ce périmètre fait environ 1 300 km².

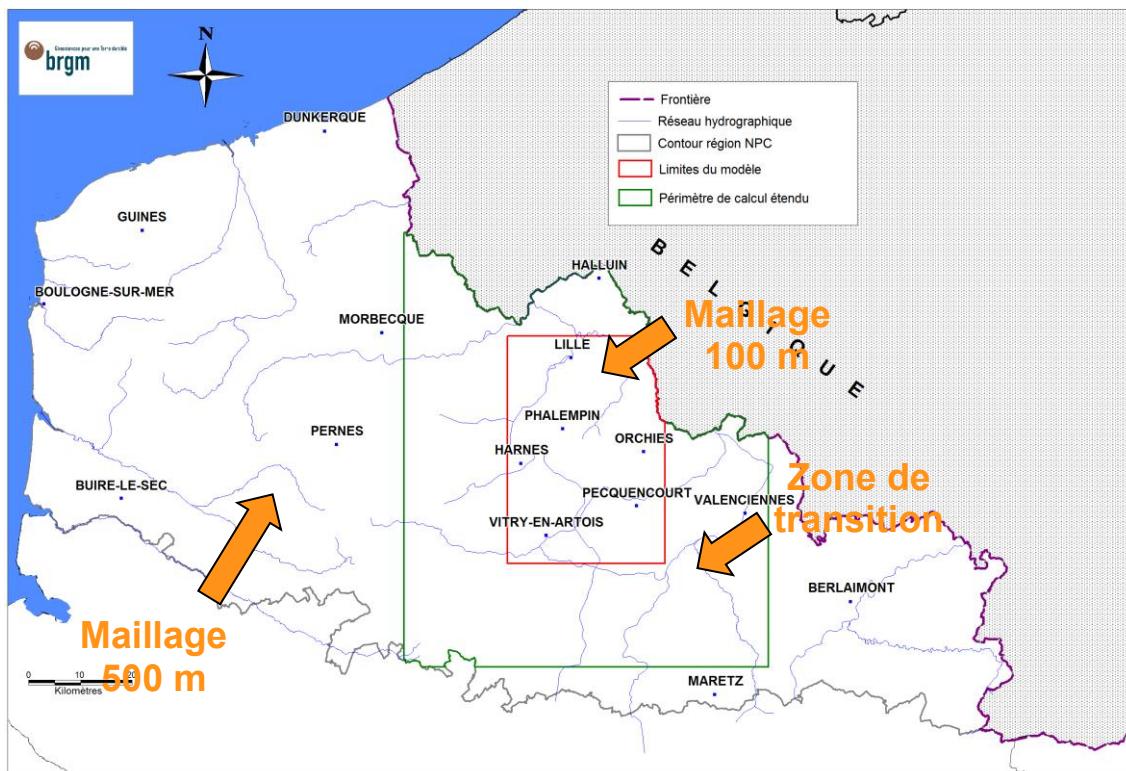


Figure 59 : Localisation des limites choisies pour la modélisation.

Incorporer le modèle géologique affiné dans le modèle géologique régional du SIGES a mis en évidence des décalages plus ou moins importants des interfaces géologiques aux bordures. Ces décalages ont pour origines :

- la différence de taille des mailles (une maille régionale de 500 m x 500 m jouxte cinq mailles du modèle affiné de 100 m x 100 m) ;
- et les effets de bordures du modèle affiné.

Pour harmoniser ces bordures, deux calculs ont été réalisés, puis combinés pour obtenir une transition plus douce entre les deux modèles à mailles de 500 m et de 100 m :

- un premier calcul sur le périmètre étendu (en vert sur la Figure 59), sur une maille carrée de 100 m de côté, avec les données détaillées dans le périmètre rouge et les données régionales du modèle SIGES dans la zone comprise entre le périmètre vert et le périmètre rouge (correspondant à une bande de 20 km).
- un deuxième calcul sur une maille carrée de 500 m de côté, sur l'ensemble de la région avec les données détaillées dans le périmètre rouge et les données régionales du SIGES pour le reste de la région.

La combinaison de ces deux calculs à différente taille de maille a grandement limité les écarts sur le périmètre de jointure.

Il existe toutefois des secteurs qui ne sont pas parfaitement jointifs pour certaines couches géologiques. Ces secteurs ne peuvent pas être corrigés à cause d'objets géologiques petits dont la géométrie varie rapidement dans l'espace (exemple ci-dessous d'alluvions peu étendues ou peu épaisses).

Prenons comme exemple un cours d'eau associé à ses alluvions traversant la jointure entre nos deux modèles. Dans la maille carrée de 500 m de côté (à gauche), l'épaisseur moyenne des alluvions est de 5 m. Dans les mailles carrées de 100 m de côté, situées à droite, chacune comporte une épaisseur moyenne relative aux données présentes sur son emprise. Quand les alluvions sont absentes : l'épaisseur est nulle. Ainsi pour les petits objets géologiques, une maille de 500 m de côté peut ne pas parfaitement coïncider avec les 5 mailles de 100 m qui la bordent.

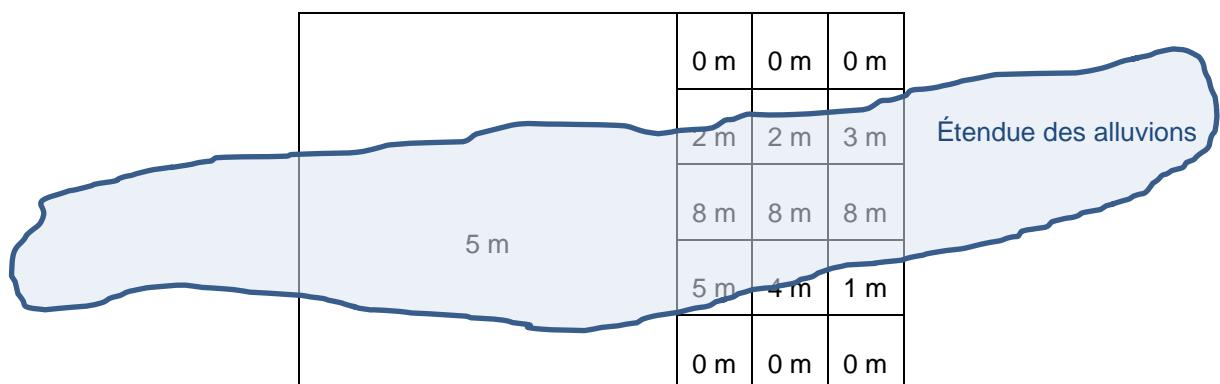


Figure 60 : Schéma d'une jointure entre le modèle maillé de 500 m de côté (à gauche) et celui de 100 m de côté (à droite) avec indication des épaisseurs des alluvions.

6.2 LES ETAPES DE LA MODELISATION

6.2.1 Modélisation géologique avec MultiLayer

Outils et principes

Le modèle géologique a été réalisé en utilisant le logiciel **GDM** (Geological Data Management) et son composant **Multilayer** (Bourgine, 2007 ; Bourgine *et al.*, 2008), développés tous deux par le BRGM. Ces outils permettent d'interpoler les toits et les murs des formations considérées, puis de combiner ces surfaces en contrôlant leur cohérence par rapport aux données d'entrée (log de forages, contacts géologiques à l'affleurement, coupes, etc...).

Les formations modélisées sont décrites par une "pile stratigraphique" qui spécifie la logique de dépôt et le choix d'interpolation d'un toit ou d'une base (cas des bases érosives).

Les données pouvant être prises en compte sont de nature variée :

- forages avec codage stratigraphique des formations traversées,

- modèle numérique de terrain (MNT),
- carte géologique vectorisée,
- coupes géologiques interprétées,
- observations ponctuelles (présence d'un contact Formation A / Formation B en un point donné, valeur de la cote du toit, du mur ou de l'épaisseur d'une formation en un certain point),
- limites d'extension maximale des formations géologiques,
- failles,
- points ou forages de contrainte permettant de contraindre le modèle.

Toutes ces données d'entrées sont détaillées dans le paragraphe 6.3.

L'outil permet de vérifier en amont la cohérence des données entre elles :

- cohérence entre cote altimétrique de départ des sondages et MNT,
- cohérence entre sondages et carte géologique, ainsi qu'entre sondages et limites d'extension maximales des formations géologiques,
- cohérence de la carte géologique vis-à-vis des limites maximales d'extension,
- cohérence générale des données proches (comparaison des formations recoupées, des épaisseurs, des cotes des interfaces).

L'outil permet de réaliser une analyse statistique et géostatistique des épaisseurs, cotes du toit et cotes de la base de chacune des formations, afin d'en optimiser la compréhension puis l'interpolation.

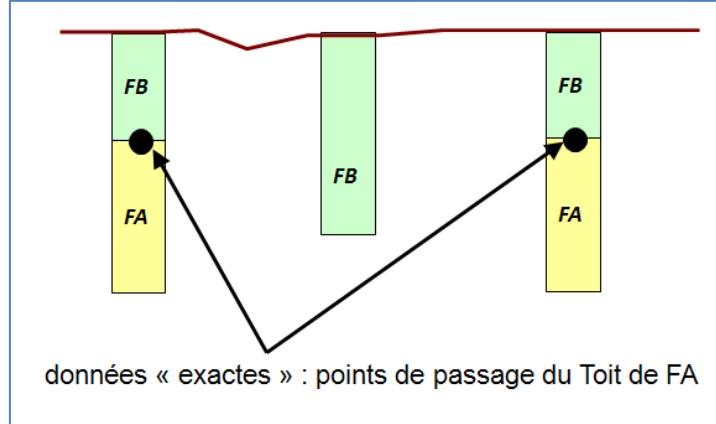
Principe général de modélisation

La construction du modèle géologique est basée sur trois principes :

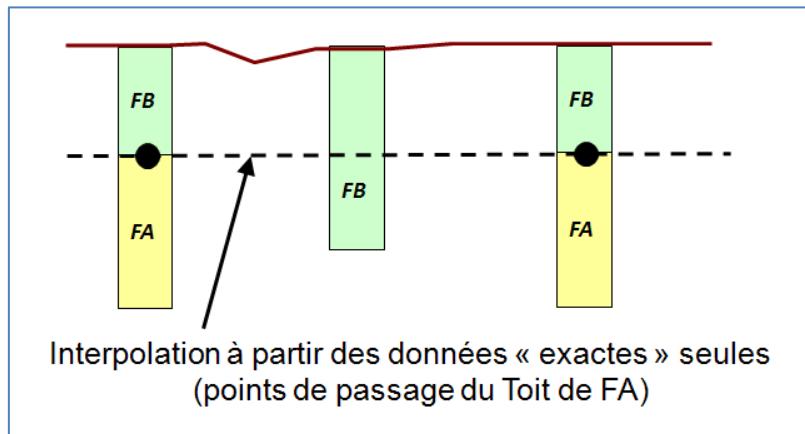
- la définition d'une pile stratigraphique décrivant la succession des formations et les relations entre deux formations successives,
- l'interprétation des données (leur « codage ») selon le cadre fourni par cette pile,
- l'interpolation des surfaces (les interfaces entre formations) et leur combinaison en fonction des données et de la logique induite par la pile stratigraphique.

Le modèle est construit selon le processus itératif suivant :

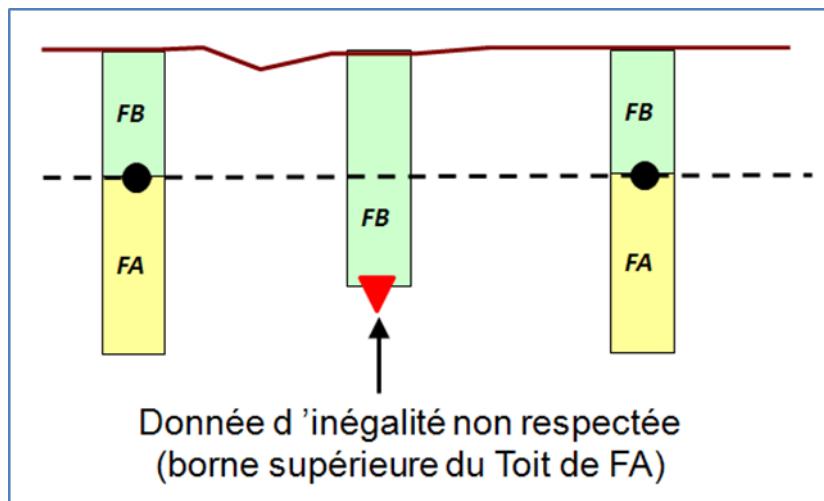
- en partant des données « exactes » où le toit et/ou le mur d'une formation ont été reconnus (forages, contacts géologiques, coupes interprétées, ...). Par exemple ci-dessous, avec une pile stratigraphique comprenant 2 formations FA et FB s'étant déposées l'une sur l'autre (d'abord FA, puis FB, sans érosion entre les deux) :



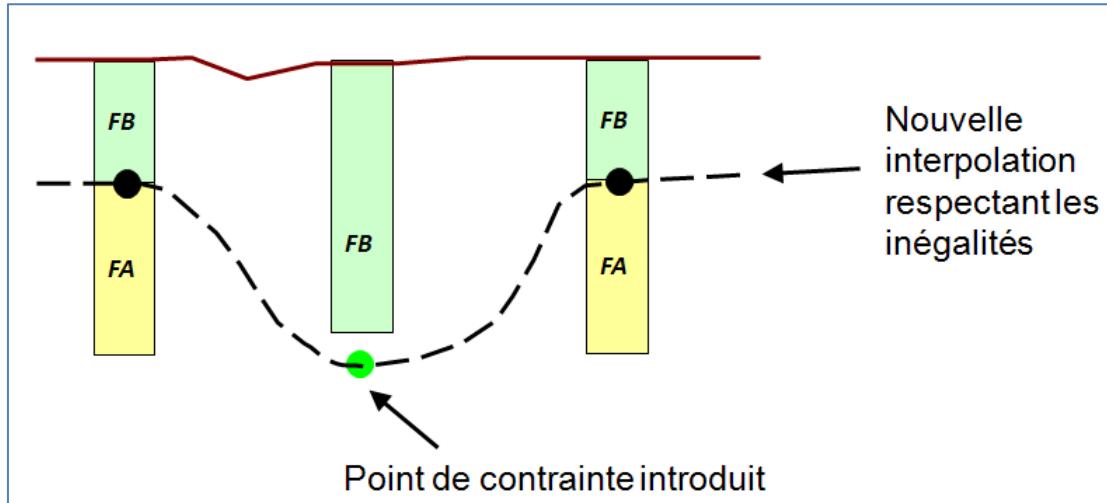
- à partir de ces données exactes, une interpolation est réalisée au droit de chaque point et/ou sur une grille :



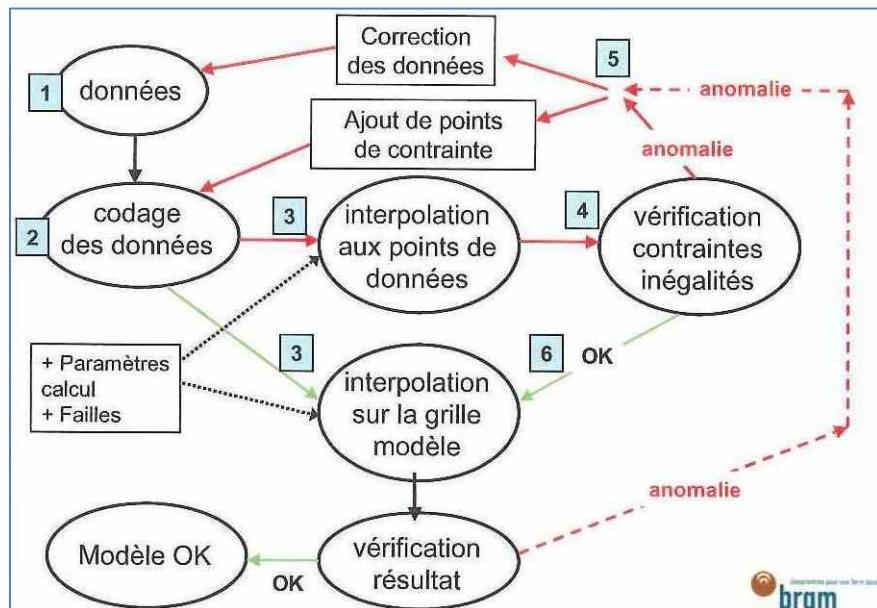
- cette première interpolation est comparée aux données d'inégalités pour vérifier si les contraintes d'inégalité sont respectées. Dans l'exemple ci-dessus, le forage central se terminant dans la formation FB indique que la formation FA doit être rencontrée plus bas que la fin de forage, sous hypothèse qu'il n'y ait pas d'érosion entre le dépôt de FA et celui de FB. Dans notre exemple, FB s'est déposé sur FA sans érosion. La base du forage central est une donnée d'inégalité pour le toit de FA : Toit FA \leq Z fin de forage :



- lorsque qu'une inégalité n'est pas respectée, il convient de vérifier si cela peut être imputable à une erreur dans les données (erreur de localisation, de saisie, d'interprétation ...), ou s'il convient d'introduire des points de contrainte de façon à respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations. Ce travail se fait à partir de l'expertise du géologue et de visualisations en plan et en coupe sur lesquelles sont reportés les éléments connus : logs des forages, épaisseurs et cote des formations, coupes interpolées. Le travail se fait ainsi pas à pas, interface par interface. Ci-après, l'exemple d'un point de contrainte qui pourrait être introduit si les informations du forage central s'avéraient exactes. Ce point permettrait de respecter la contrainte d'inégalité fournie par le forage central.



- ce processus itératif peut être répété une multitude de fois jusqu'à ce que le modélisateur et/ou le géologue soit satisfait du résultat (boucle rouge sur l'image suivante).



- Une fois toutes les contraintes d'inégalité respectées, les différentes surfaces modélisées sont combinées (découpées) automatiquement entre elles en fonction de leur caractère « érosif » ou « déposant ». Cette combinaison permet d'obtenir un modèle

multicouche cohérent. La topographie intervient comme une surface d'érosion venant découper toutes les formations présentes.

- L'ensemble du modèle est ensuite contrôlé de façon plus naturaliste en représentant les résultats cartographiquement. Le géologue repère les erreurs et invraisemblances qu'il peut corriger grâce à l'ajout de points de contraintes manuellement ou grâce à la correction de données s'avérant erronées.
- À noter que les paramètres d'interpolation de chaque surface sont ajustés initialement en fonction du jeu de données correspondant.

Une fois le modèle calculé, GDM offre de nombreuses possibilités de représentation : cartes, coupes, profils et vues 3D. Le modèle peut être exporté *via* différents formats vers le modèle hydrogéologique.

6.2.2 Paramètres de calculs

La modélisation a été réalisée par krigage (avec variogramme linéaire sans dérive) dans une grille à maille carrée de 100 mètres de côté sur l'ensemble de la zone affinée.

La grille du périmètre affiné englobant les champs captants (en rouge sur la Figure 59) a pour emprise (Lambert II étendu) :

$$\begin{array}{ll} \text{Xmin} = 638\,000 \text{ m} & \text{Ymin} = 2\,587\,100 \text{ m} \\ \text{Xmax} = 668\,500 \text{ m} & \text{Ymax} = 2\,631\,100 \text{ m} \end{array}$$

La grille du périmètre étendu, calculée pour s'harmoniser au modèle régional du SIGES (en vert sur la Figure 59) a pour emprise (Lambert II étendu) :

$$\begin{array}{ll} \text{Xmin} = 618\,000 \text{ m} & \text{Ymin} = 2\,567\,100 \text{ m} \\ \text{Xmax} = 688\,500 \text{ m} & \text{Ymax} = 2\,651\,100 \text{ m} \end{array}$$

6.2.3 Les étapes de la construction du modèle

Une fois l'ensemble des données sélectionnées et codées (MNT, sondages, extension des formations géologiques, isohypsies, failles et coupes transversales), celles-ci sont importées dans GDM.

Avant la modélisation, le contrôle et la mise en cohérence des données sont nécessaires. Cette étape permet de comparer deux types d'informations, d'évaluer leur cohérence et de corriger les éventuelles erreurs.

Ainsi, un **contrôle de détection des points doubles** a été réalisé. Ce contrôle a permis d'écartier quelques sondages en doublons.

Une **comparaison entre l'altitude de la tête des sondages et le Modèle Numérique de Terrain** (MNT) a été réalisée. Cette comparaison a permis de mettre en évidence des sondages dont l'altitude était trop éloignée du MNT. L'altitude de la tête des sondages les plus éloignés du MNT a été corrigée par la valeur du MNT.

Une **comparaison entre les sondages et les limites d'extension maximale des formations géologiques** a été faite dans le but de s'assurer que tous les forages rencontrant la formation « X » sont bien tous situés à l'intérieur de la limite d'extension de cette formation « X ». Ce contrôle a permis de mettre en évidence des passes de sondages mal décrites ou incomplètes, et les limites d'extension ont été redéfinies dans certains secteurs.

Enfin, une **comparaison générale entre les données proches** (épaisseurs, cotes des toits et des murs) a achevé la phase de contrôle des données. Ce travail de comparaison permet de détecter des incohérences entre deux données proches : par exemple, entre deux forages proches, ou entre un forage et une limite d'affleurement proche. Le modélisateur estime la différence acceptable entre deux cotes du toit (par exemple) d'une formation géologique X à une distance D donnée en fonction du contexte géologique (pendage, érosion des surfaces, etc...). Les points ne respectant pas ce critère sont identifiés dans un tableau. Il reste alors à vérifier les coupes des forages et à les corriger au besoin. En tout état de cause, il est indispensable de ne pas avoir de données proches fournissant des informations différentes (sauf si ces données sont séparées par une faille), car cela risque de provoquer des anomalies lors de l'interpolation ou lors du contrôle des contraintes d'inégalités.

Une fois le contrôle et la mise en cohérence des données réalisés, chaque surface est interpolée à partir des données codées, puis elles sont combinées en fonction de la logique induite par la pile stratigraphique (couche géologique jeune reposant sur les couches géologiques anciennes, et découpage des surfaces selon leur caractère érosif ou déposant). À la suite de la première interpolation, le modèle n'est pas parfait et nécessite des vérifications. Le contrôle des inégalités permet de vérifier le modèle et de corriger les données ou d'ajouter des points de contrainte. Cette étape, en général itérative et assez longue, nécessite une bonne connaissance du contexte géologique régional. Plusieurs vues en plan et en coupes, localement et régionalement, sont tracées pour repérer les éventuelles erreurs. Chaque surface géologique est contrôlée une à une, puis chaque épaisseur. Au total, 3379 points de contrainte ont été créés.

6.3 DONNEES UTILISEES

6.3.1 Les sondages

Le modèle fait appel aux données utilisées lors de la construction du modèle régional de la nappe de la Craie du **SIGES** (qui inclut les sondages interprétés par Minguely, 2007) complétées par des données provenant de la BSS du **BRGM** (log validés et autres sondages ayant une coupe géologique).

Certaines données brutes, moins détaillées, n'utilisant pas le lexique géologique pour décrire les formations rencontrées, ont nécessité un travail conséquent de validation par les géologues régionaux. Ces données ont permis de densifier le nombre de points utilisés pour les calculs de modélisation.

Ce travail de masse a été réalisé en plusieurs étapes :

- Vérification de la présence de coupe géologique ;
- Vérification de la topologie (altitude) ;
- Vérification de la cohérence de la première passe décrite avec la carte géologique ;
- Critique de la plausibilité des épaisseurs indiquées sur les coupes pour chaque formation traversée ;
- Comparaison des cotes avec les cartes isohypses existantes.

Ainsi, 3 375 sondages ont été sélectionnés sur 12 259 extraits de la BSS dans la zone affinée. Alors que pour le modèle régional SIGES, seulement 214 sondages avaient été sélectionnés dans ce secteur.

Dans le secteur des champs captants, la densité moyenne de sondage au km² est de 2,53, à comparer aux 0,16 sondage/km² du modèle régional.

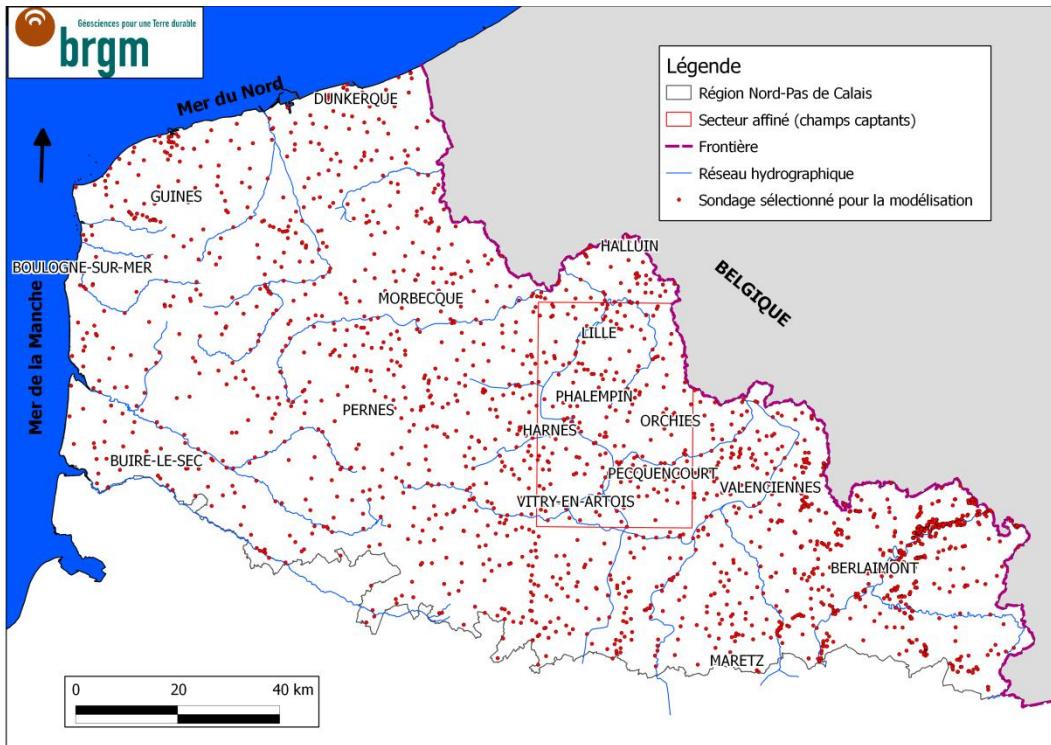


Figure 61 : Localisation des sondages utilisés dans le modèle régional du SIGES.

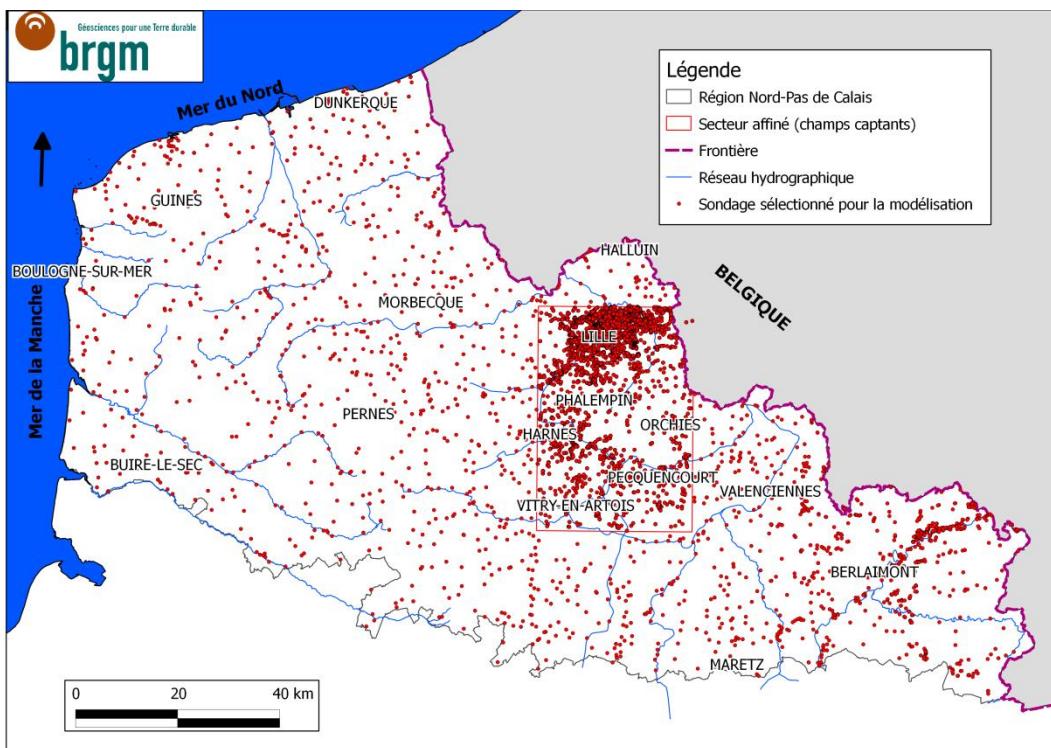


Figure 62 : Aperçu de la densification des sondages utilisés dans le modèle affiné.

Ces données de sondages ont été mises en forme dans un tableau Excel afin qu'elles puissent être importées dans GDM.

Dans ce tableau Excel, chaque ligne correspond à une passe de sondage. En d'autres termes, un sondage est décomposé en autant de lignes qu'il possède de passes descriptives. La Figure 63 est un extrait de ce tableau. Le sondage 00147A0435, par exemple, est décomposé en 14 passes, donc 14 lignes. Chaque colonne du tableau reprend les caractéristiques principales du sondage, à savoir : l'indice BSS, les coordonnées X et Y en Lambert 2 étendu, la cote altimétrique Z en NGF, et les caractéristiques de la passe de sondage (profondeur de début, profondeur de fin, lithologie, âge de la formation et code GDM).

BASE_20120316.xls [Mode de compatibilité]

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Compléments

Police

Alignement

Nombre

A11002 00147A0435

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	INDC	validation	XL2	YL2	Z	PROF_DE	PROF_FI	Code_LMC	SOURCE	KEEP
10997	00147A0434		652146	2626638	22	0.7	1.8	LIMO	BSS	1
10998	00147A0434		652146	2626638	22	1.8	2.4	LIMO	BSS	1
10999	00147A0434		652146	2626638	22	2.4	4.2	LIMO	BSS	1
11000	00147A0434		652146	2626638	22	4.2	5	LIMO	BSS	1
11001	00147A0434		652146	2626638	22	5	12	CRAI	BSS	1
11002	00147A0435		652082	2630751	20	0	4	LIMO	BSS	1
11003	00147A0435		652082	2630751	20	4	6	LIMO	BSS	1
11004	00147A0435		652082	2630751	20	6	7	LIMO	BSS	1
11005	00147A0435		652082	2630751	20	7	8	LIMO	BSS	1
11006	00147A0435		652082	2630751	20	8	9	LIMO	BSS	1
11007	00147A0435		652082	2630751	20	9	11	LAND	BSS	1
11008	00147A0435		652082	2630751	20	11	15	LAND	BSS	1
11009	00147A0435		652082	2630751	20	15	25	LOUV	BSS	1
11010	00147A0435		652082	2630751	20	25	30	LOUV	BSS	1
11011	00147A0435		652082	2630751	20	30	40	LOUV	BSS	1
11012	00147A0435		652082	2630751	20	40	61.5	CRAI	BSS	1
11013	00147A0435		652082	2630751	20	61.5	80	CRAI	BSS	1
11014	00147A0435		652082	2630751	20	80	110	DIEV	BSS	1
11015	00147A0435		652082	2630751	20	110	111	CARB	BSS	1
11016	00147A0436		651609	2630386	20	0	0.6	ALLU	BSS	1
11017	00147A0436		651609	2630386	20	0.6	6.1	ALLU	BSS	1
11018	00147A0436		651609	2630386	20	6.1	7.5	ALLU	BSS	1
11019	00147A0436		651609	2630386	20	7.5	10	ALLU	BSS	1
11020	00147A0436		651609	2630386	20	10	10.4	ALLU	BSS	1
11021	00147A0436		651609	2630386	20	10.4	13.8	ALLU	BSS	1
11022	00147A0436		651609	2630386	20	13.8	14.2	ALLU	BSS	1
11023	00147A0436		651609	2630386	20	14.2	17	ALLU	BSS	1
11024	00147A0436		651609	2630386	20	17	17.4	ALLU	BSS	1
11025	00147A0436		651609	2630386	20	17.4	17.6	ALLU	BSS	1
11026	00147A0436		651609	2630386	20	17.6	27.2	LAND	BSS	1
11027	00147A0436		651609	2630386	20	27.2	30	LOUV	BSS	1

Feuil1 Feuil2 Feuil3

Prêt 22755 enregistrement(s) trouvé(s) sur 26219

Figure 63 : Extrait du tableau Excel « SONDAGES ».

Le code GDM est un identifiant pour chaque ensemble géologique qui est listé et enregistré dans la pile stratigraphique (Figure 63). Ces codes ne sont pas définis dans la BSS. Un travail de codage, s'apparentant à un travail d'identification des horizons géologiques, a été réalisé sur tous les sondages.

Une fois ce codage terminé, le tableau Excel a été chargé dans *GDM* pour réorganiser les données par sondages et par passes associées. Dans la Figure 64, la base de données des sondages est organisée en deux fenêtres : une fenêtre supérieure listant les sondages avec leurs coordonnées géographiques, et une fenêtre inférieure listant les passes de chaque sondage.

Sondages BASE_20120316-Feuil1					
	INDC	KEEP	XL2	YL2	Z
1207	00147A0434	1.000	652146.0	2626638	22.00000
1208	00147A0435	1.000	652082.0	2630751	20.00000
1209	00147A0436	1.000	651609.0	2630386	20.00000
1210	00147A0438	1.000	652376.0	2630839	17.00000
1211	00147A0445	1.000	651214.0	2630581	15.00000
1212	00147A0448	1.000	653019.0	2628837	39.00000
1213	00147A0449	1.000	653011.0	2628923	38.30000
			!!!		

Passes de 00147A0435						
	PROF_DEB	PROF_FIN	Code_LMCU	XXXX	YYYY	ZZZZ
1	0.000	4.000	LIMO	652082.0	2630751	16.00000
2	4.000	6.000	LIMO	652082.0	2630751	14.00000
3	6.000	7.000	LIMO	652082.0	2630751	13.00000
4	7.000	8.000	LIMO	652082.0	2630751	12.00000
5	8.000	9.000	LIMO	652082.0	2630751	11.00000
6	9.000	11.000	LAND	652082.0	2630751	9.00000
7	11.000	15.000	LAND	652082.0	2630751	5.00000
8	15.000	25.000	LOUV	652082.0	2630751	-5.00000
9	25.000	30.000	LOUV	652082.0	2630751	-10.00000
10	30.000	40.000	LOUV	652082.0	2630751	-20.00000
11	40.000	61.500	CRAI	652082.0	2630751	-41.50000
12	61.500	80.000	CRAI	652082.0	2630751	-60.00000
13	80.000	110.000	DIEV	652082.0	2630751	-90.00000
14	110.000	111.000	CARB	652082.0	2630751	-91.00000

Figure 64 : Base de données des sondages dans GDM.

6.3.2 Carte géologique, failles et MNT

La carte géologique harmonisée de la région Nord-Pas-de-Calais à l'échelle 1/50 000 a été adaptée pour être utilisable dans GDM.

Un premier travail d'assemblage des couches a été nécessaire sur MapInfo© (version 8.5.1B). La carte géologique harmonisée comprend 149 couches géologiques. Or notre modèle compte une pile hydro-stratigraphique de 9 systèmes aquifères ou aquiclude. Pour obtenir la carte de la Figure 65, toutes les couches géologiques appartenant à un système aquifère ou aquiclude ont été fusionnées entre elles. Par exemple, l'ensemble « craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien » regroupe 6 formations géologiques détaillées dans la carte géologique harmonisée du Nord-Pas-de-Calais (Tableau 3).

Il n'y a pas de différences entre la carte géologique utilisée pour le modèle régional du SIGES et celle utilisée pour l'affinement.

Ensemble géologique du modèle affiné des champs captants	Notation	Intitulé géologique de la carte géologique harmonisée
Craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien	c5CrPh	Craie phosphatée, Campanien
	c4aCr	Craie blanche à silex, Santonien inférieur
	c4Cr	Craie blanche, Santonien
	c3-4Cr	Craie du Coniacien moyen à supérieur - Santonien ?
	c2c-3Cr	Craie Turonien supérieur - Coniacien inférieur
	c2b-cCr	Craie à silex et bancs marneux, Turonien moyen à supérieur
Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen	c2Cr	Craie du Turonien supérieur, Marnes du Turonien moyen et inf.
	c2bCr	Marnes à <i>Terebratulina rigida</i> , Turonien moyen
	c2b-aCr	Marnes blanc verdâtre ("Dièves"), Turonien moyen et inférieur
	c2aCr	Marnes à <i>Inoceramus labiatus</i> , Turonien inférieur
	c1-2baCr	Marnes, Cénomanien-Turonien
Craies et marnes du Cénomanien	c1cCr	Craie marneuse à <i>Actinocamax plenus</i> , Cénomanien supérieur
	c1aCrgI	Marnes sableuses et glauconieuses, Cénomanien inférieur et moyen
	c1Cr	Craie marneuse et tourtia, Cénomanien

Tableau 3 : Regroupement des formations du Crétacé supérieur (craies et marnes de la carte géologique harmonisée).

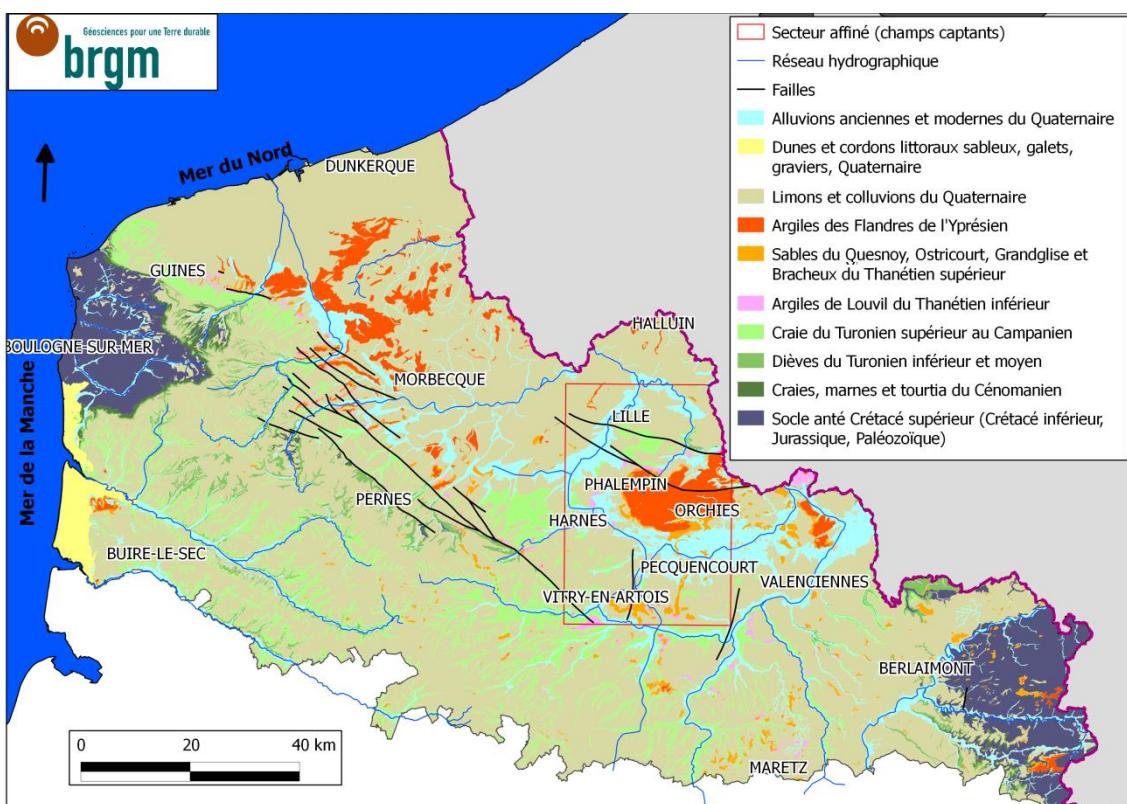


Figure 65 : Carte géologique et failles utilisées dans le modèle.

Cette carte a été codifiée : chaque surface s'est vue attribuer un code GDM afin d'être reliée à la pile stratigraphique. Puis, dans un second temps, la structure de la carte a été scindée en deux :

- une carte constituée des **polygones codés**,

- une autre carte constituée des **lignes des contours des polygones**. Chaque ligne est renseignée par les deux codes de polygones de part et d'autres de cette ligne. Ces lignes représentent un contact géologique entre une base et un toit de deux formations géologiques. C'est cette information qui est utilisée dans *Multilayer* pour les calculs de modélisation.

Une fois ces transformations effectuées, les deux cartes sont importées dans GDM, qui traduit les informations comme suit :

- un polygone correspond à une surface du MNT où la formation codée affleure ;
- une ligne correspond à un contact entre deux formations, à l'altitude du MNT. La ligne correspond alors à une base ou à un toit d'une formation géologique.

L'objectif premier étant de modéliser le toit et le mur de la Craie, ce sont les failles affectant la Craie qui ont été sélectionnées. Elles proviennent de la carte géologique harmonisée régionale et des cartes de P. Caulier (Caulier, 1974 ; Leprêtre et Blanchin, 1999). Ces failles affectent aussi les terrains tertiaires.

Dans *GDM* et *MultiLayer*, les failles sont modélisées sans pendage ; c'est pourquoi les sorties graphiques montrent des failles verticales. Cette particularité du logiciel n'est pas gênante car la plupart des grandes failles régionales sont subverticales.

Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) utilisé pour représenter la topographie est celui de la région au pas de 50 m (MNT SRTM version 4.1).

6.3.3 Limites d'extension des formations

La carte géologique apporte une information en surface mais, dans *MultiLayer*, il est possible d'introduire également des limites d'extension en profondeur. Cette information supplémentaire permet de limiter les calculs de *MultiLayer* et de confiner l'extension d'une formation dans un périmètre précis.

Les limites d'extension proviennent de la BDLisa Artois-Picardie (Dufrenoy et al., 2010). Elles ont été simplifiées et parfois modifiées tout en respectant l'échelle de travail qui est régionale. Les zones se trouvant en dehors des limites du modèle ont également été supprimées afin de ne pas alourdir les calculs.

Des limites d'extension ont été appliquées aux calculs des formations du Tertiaire et du Crétacé supérieur (Figure 66, Figure 67, Figure 68, Figure 69).

Aucune limite d'extension n'a été appliquée à la craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien car cette craie est présente sur quasiment tout le périmètre d'étude, hormis sur le dôme du Mélantois (Bouvinnes, Cysoing et à l'est l'Est de Baisieux) où son épaisseur diminue jusqu'à la disparition de cette couche géologique.

Les Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen, et le substratum paléozoïque sont présents sur l'ensemble du périmètre d'étude et n'ont donc pas été indexés d'une limite d'extension.

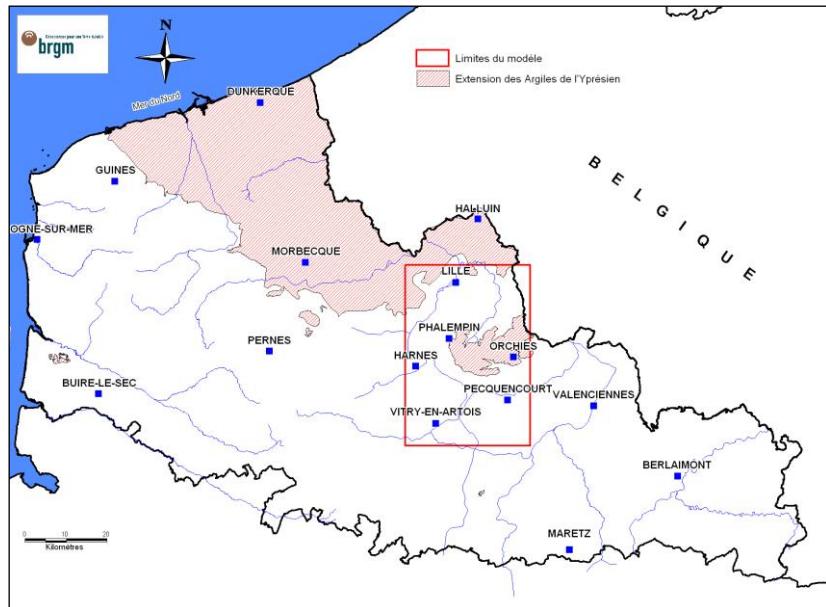


Figure 66 : Extension des Argiles des Flandres (Yprésien) dans l'emprise du modèle.

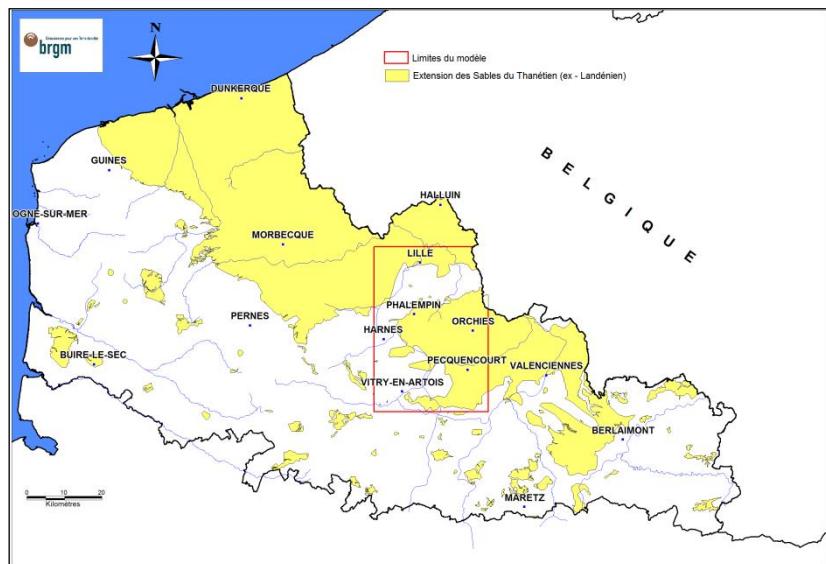


Figure 67 : Extension des Sables d'Ostricourt (Landénien supérieur) dans l'emprise du modèle.

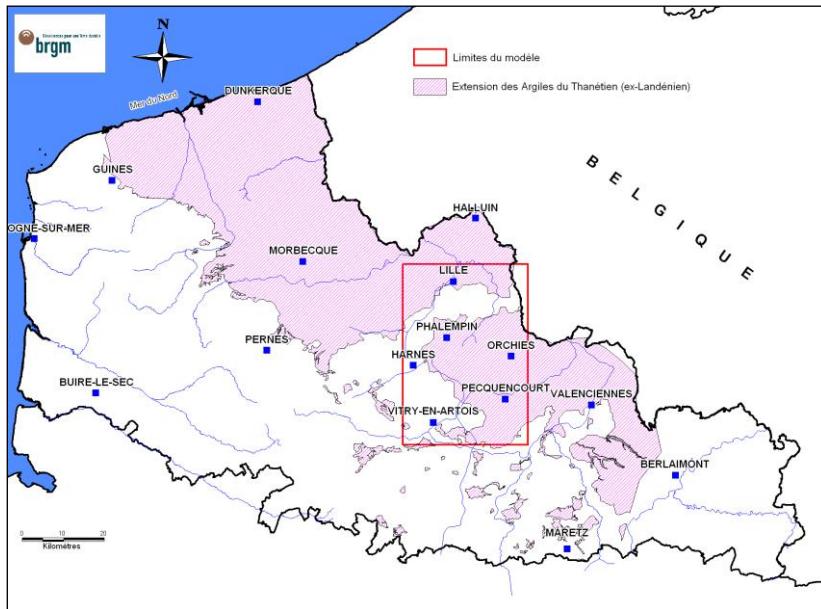


Figure 68 : Extension de l'Argile de Louvil (Landénien inférieur) dans l'emprise du modèle.

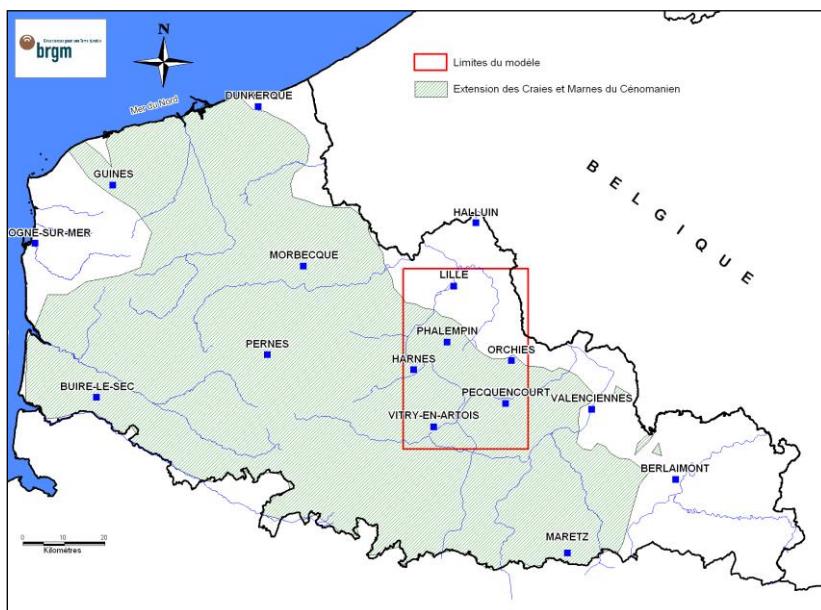


Figure 69 : Extension des Craies et Marnes du Cénomanien dans l'emprise du modèle.

6.4 RESULTATS

La modélisation géologique dans le secteur des champs captants a permis d'obtenir une grille de données géoréférencées contenant, pour chaque maille, l'altitude du toit et de la base de chaque formation ainsi que son épaisseur. Par la suite, cette grille est utilisée comme structure géologique du modèle hydrodynamique.

Le logiciel GDM permet de visualiser les résultats de la modélisation sous forme de cartes, de coupes transversales et de vues en 3D :

- Les distributions spatiales des toits et épaisseurs de chaque formation sont présentées à l'Annexe 1.
- Des coupes transversales caractéristiques sont présentées aux paragraphes suivants pour décrire des structures géologiques ou des points d'intérêt particuliers.

6.4.1 Description des géomorphologies

Le socle anté-Crétacé supérieur

Dans le secteur des champs captants, le socle anté-Crétacé supérieur est constitué des calcaires et des assises houillères carbonifères, de grès et de schistes dévoiens, d'argiles, de grès et de schistes siluriens, ainsi que d'argiles et sables du Wealdien, de l'Aptien et de l'Albien (les formations jurassiques sont absentes dans cette région). Ces formations ont été regroupées dans le modèle géologique, sans distinction lithologique, en un seul ensemble afin d'en modéliser uniquement le toit.

Cette modélisation a pour intérêt de comprendre la structure sur laquelle les formations du Crétacé supérieur se sont déposées.

Dans la moitié Nord du secteur modélisé, l'anticlinal du Mélantois crée un bombement du socle.

Le socle est découpé par une série de failles de direction WNW-ESE (faille d'Haubourdin au Nord et faille de Seclin au Sud). La faille d'Haubourdin, qui coupe l'anticlinal du Mélantois sur son flanc Sud, a surélevé le bloc Nord. Cette faille a été active jusqu'à l'Yprésien. La faille de Seclin a également permis le relèvement du bloc Nord et a influencé la sédimentation crétacée et tertiaire.

Entre Orchies et Douai, le substratum paléozoïque forme une paléo-dépression où se sont déposés les sédiments crétacés et tertiaires du bassin d'Orchies.

Les formations du Crétacé supérieur

Les marnes et tourtia⁷ – Cénomanien

Au Cénomanien, la transgression marine s'est arrêtée le long d'une ligne Nord-Ouest/Sud-Est, de Fournes-en-Weppes à Orchies.

La morphologie du toit des marnes et du tourtia cénomanien est similaire à celle du substratum paléozoïque. Une cuvette ayant pour centre Douai se dessine sur la représentation du toit des marnes et tourtia en annexe 1.

L'épaisseur des dépôts cénomaniens est faible, en moyenne entre 5 et 20 m. Deux zones se distinguent au Sud par un épaississement notable des formations cénomaniennes (sur les communes de Masny et de Roeux). À Masny, le sondage 00274X0145 des Houillères du

⁷ Tourtia : terme de mineur désignant dans le Nord-Pas-de-Calais le conglomérat glauconifère de base du Cénomanien transgressif.

bassin du Nord et du Pas-de-Calais traverse les marnes cénomaniennes entre 162 et 207 m de profondeur (soit 45 m d'épaisseur, Figure 66). À Roeux, le sondage des Houillères, identifié 00275X0031 dans la BSS, décrit des marnes cénomaniennes de 84 à 139,5 m de profondeur, puis du tourtia de 139,5 à 145 m de profondeur, ce qui donne près de 61 m d'épaisseur pour l'étage du Cénomanien.

La tendance générale est à l'épaississement des dépôts cénomaniens vers le Sud (Figure 70 et Figure 71).

Dans le secteur de Douai, le toit du Cénomanien forme un creux sans qu'aucun épaississement de la formation n'y soit observé. Le mouvement de subsidence du bassin d'Orchies est donc postérieur aux dépôts sédimentaires cénomaniens.

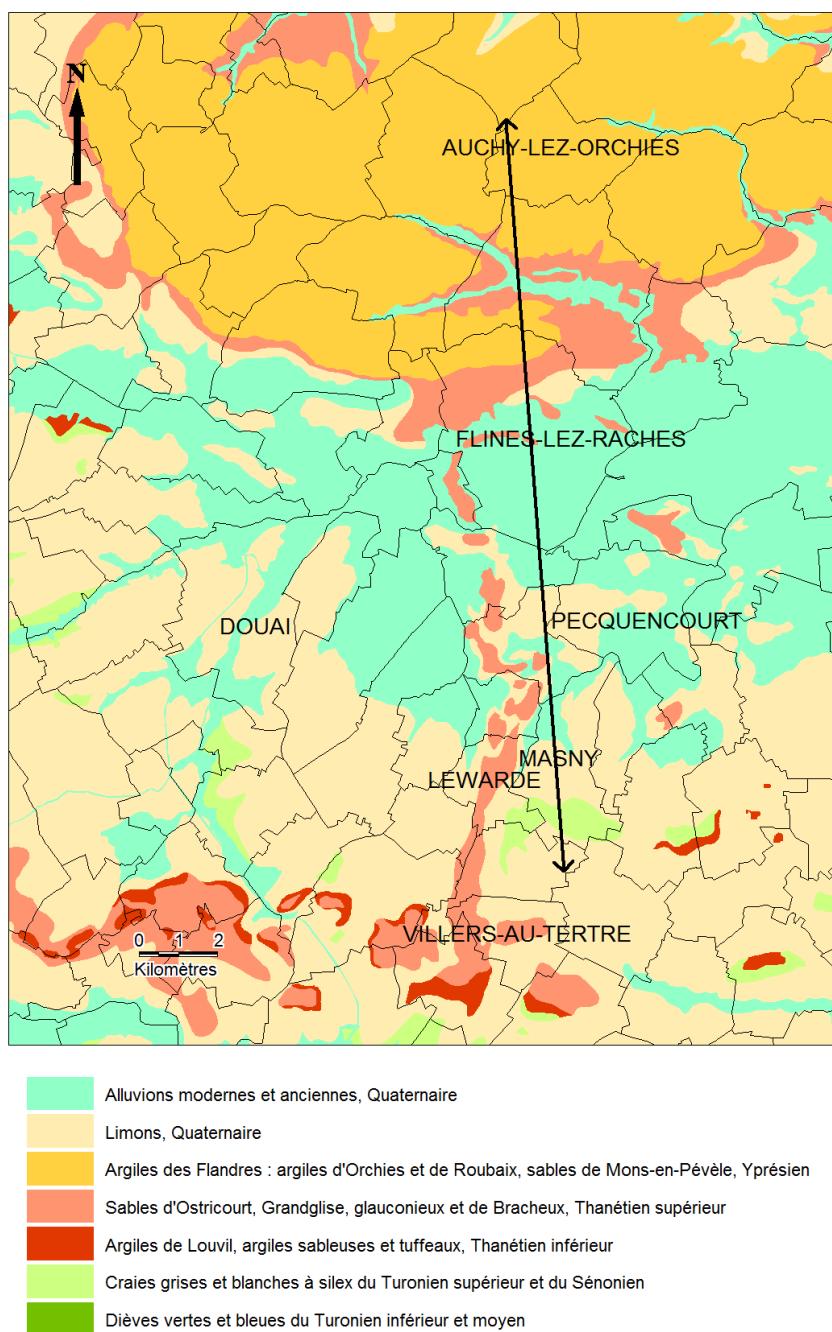


Figure 70 : Localisation de la coupe Nord-Sud illustrée dans la figure suivante, sur fond de carte géologique simplifiée.

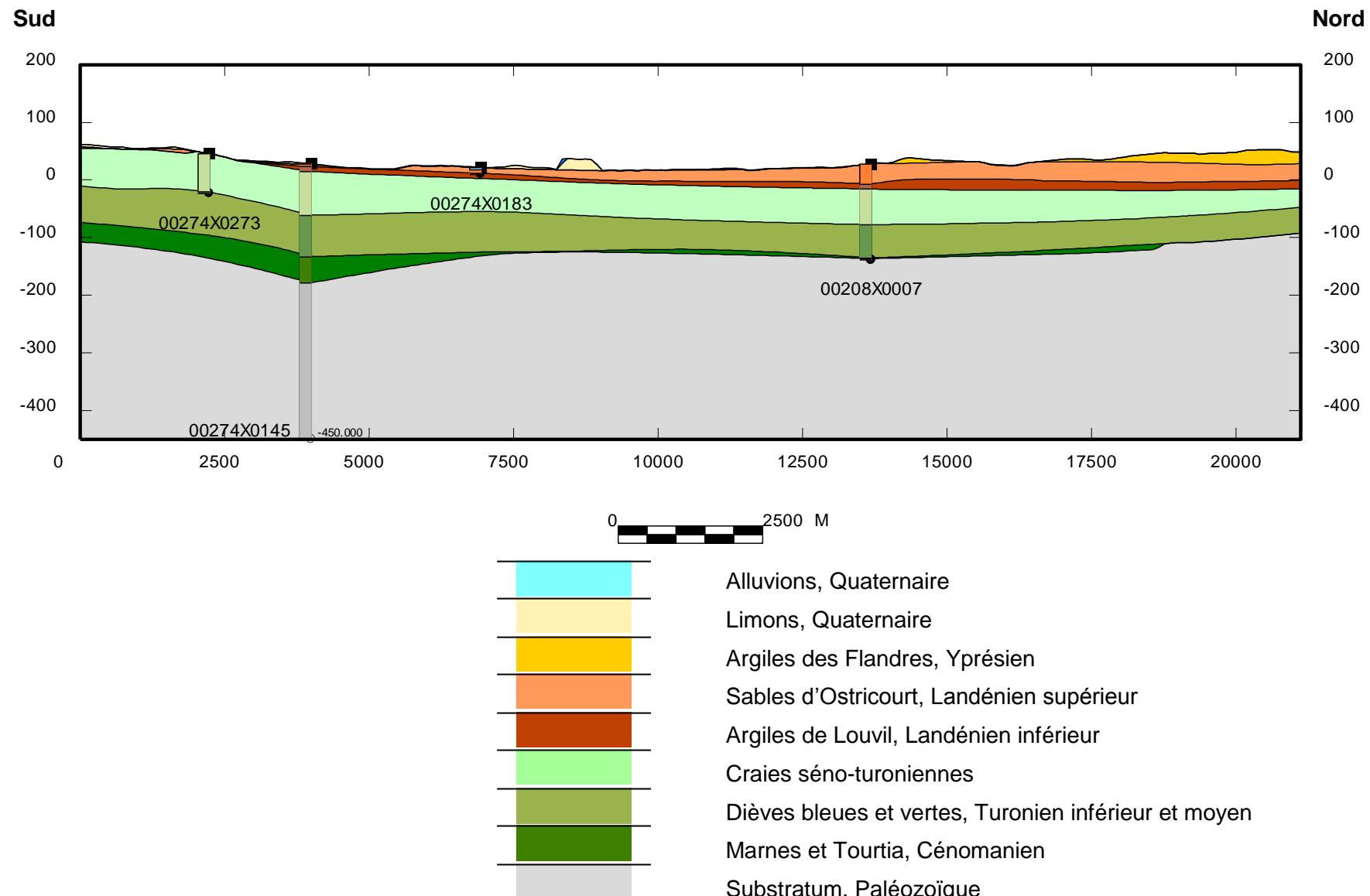


Figure 71 : Coupe transversale montrant l'épaissement du Cénomanien vers le Sud (échelle verticale multipliée par 10).

Les Dièves vertes et bleues – Turonien inférieur à moyen

Au Turonien inférieur et moyen, la mer crétacée recouvre l'ensemble du secteur des champs captants. Les Dièves bleues et vertes sont plus épaisses dans la moitié Sud du secteur modélisé, où elles peuvent atteindre jusqu'à 104 m d'épaisseur (au Nord de Douai). Au Nord des failles de Seclin et d'Haubourdin, ces dépôts marneux sont moins épais, entre 20 et 40 m d'épaisseur en moyenne.

D'un point de vue morphologique, le toit des Dièves illustre bien la structuration régionale :

- Au Sud de la faille de Seclin : le toit s'enfonce jusqu'à -75 m NGF d'altitude dans le cœur du synclinal d'Orchies, entre Douai, Pecquencourt et Orchies.
- À l'extrémité Sud-Ouest du secteur modélisé, le toit se relève : c'est le début des collines de l'Artois.
- Au Nord de la faille de Seclin : les Dièves sont plissées dans l'anticlinal du Mélantois et forment un dôme atteignant plus de 40 m NGF d'altitude, affleurant même à Bouvines et Cysoing.

Dans le Mélantois, le mouvement de surrection de l'anticlinal semble synchrone des dépôts du Turonien inférieur et moyen car un amincissement des couches sédimentaires est associé à une surélévation du toit. La montée de ce dôme est accélérée par la présence des failles de Seclin et d'Haubourdin.

La Craie blanche à silex – Turonien supérieur et Sénonien

Au Turonien supérieur et au Sénonien, la mer crétacée, présente sur l'ensemble du secteur des champs captants, permet la sédimentation de craies grises et blanches contenant parfois des silex.

Dans le secteur de Phalempin, Orchies, Douai et Pecquencourt, le toit de cette formation crayeuse dessine une cuvette (bassin d'Orchies) qui accueillera les sédiments argilo-sableux du tertiaire. Le toit descend jusqu'à -25 m NGF d'altitude au Nord d'Orchies.

À l'extrémité Sud-Ouest du secteur affiné, c'est-à-dire en limite avec l'Artois, le toit de cette formation se redresse jusqu'à 95 m NGF d'altitude.

Dans la région du Mélantois, l'anticlinal est toujours souligné par les courbes isohypses du toit de la formation crayeuse. Cette dernière a même été complètement érodée dans la partie la plus haute (Bouvines et Cysoing, Figure 72 et Figure 73).

Au Nord et au Nord-Ouest, le toit s'enfonce sous les dépôts tertiaires de la plaine des Flandres. Dans la zone affinée, le minimum est atteint à La Chapelle-d'Armentières (-44 m NGF d'altitude). Plus au Nord, le toit de la craie s'approfondit encore plus sous la plaine des Flandres.

La représentation graphique de l'épaisseur des craies grises et blanches du Turonien supérieur et du Sénonien fait apparaître deux zones différentes de part et d'autre de la faille de Seclin. Au Nord de la faille de Seclin, l'épaisseur des craies est plus faible. Elle atteint au maximum 45 m vers l'Ouest, lorsque les craies plongent sous la plaine des Flandres. Au droit du dôme du Mélantois, l'épaisseur diminue nettement et oscille entre 5 et 25 m. Au Sud de la faille de Seclin, l'épaisseur moyenne des craies est plus importante et atteint plus de 90 m à l'Ouest et au Sud de Douai.

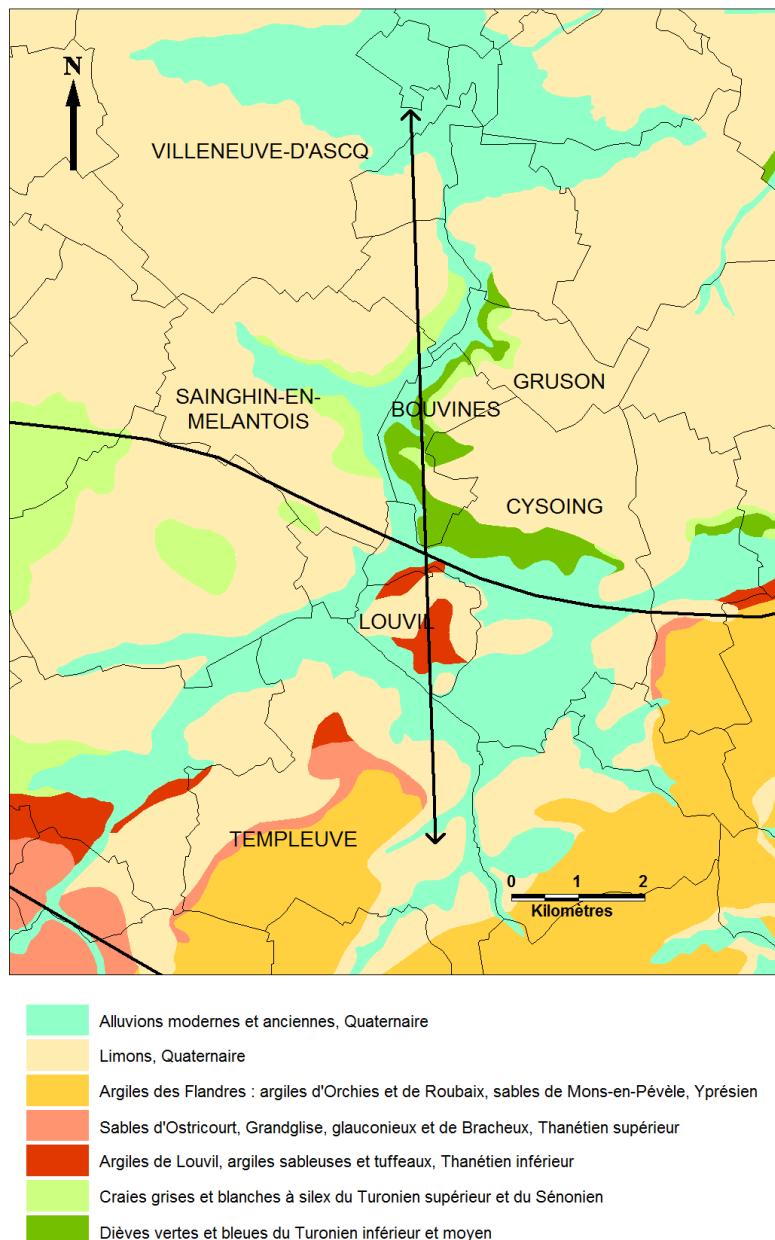


Figure 72 : Localisation de la coupe Nord-Sud illustrée dans la figure suivante, sur fond de carte géologique simplifiée.

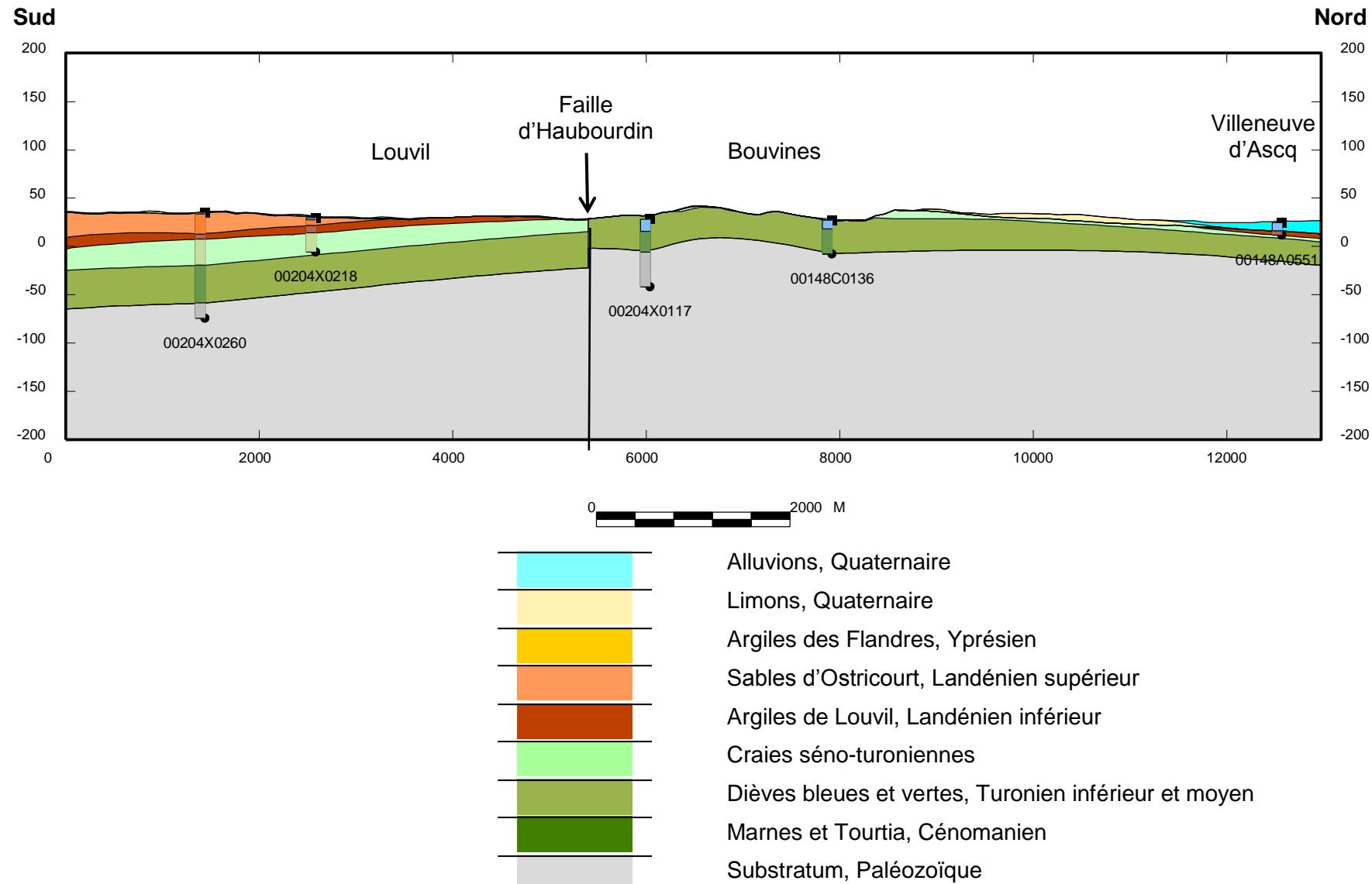


Figure 73 : Coupe transversale montrant la disparition de la craie séno-turonienne à Cysoing, au droit de l'anticlinal du Mélantois (échelle verticale multipliée par 10).

Les formations tertiaires

Les formations tertiaires, représentées par l'argile et les sables landéniens à la base et par l'argile et les sables yprésiens au sommet, occupent une vaste dépression synclinale de la craie au centre du secteur des champs captants (Bassin d'Orchies) et la partie sud du bassin tertiaire des Flandres au Nord de ce secteur, tandis qu'au Sud, elles ne sont présentes que de façon sporadique.

L'Argile de Louvil – Landénien inférieur

Au Nord du secteur des champs captants, c'est-à-dire dans la bordure sud du bassin tertiaire des Flandres, l'Argile de Louvil s'approfondit progressivement vers le Nord. En effet, l'altitude de son toit varie de 25 m NGF sur les bords du bassin à -25 m NGF dans le coin Nord-Ouest du secteur modélisé.

Au centre du secteur modélisé, c'est-à-dire dans le bassin tertiaire d'Orchies, le toit de l'Argile de Louvil s'approfondit régulièrement vers le centre du bassin, atteignant une altitude de -10 m NGF.

Au Sud, les dépôts argileux landéniens sont plus épars.

L'Argile de Louvil est en général moins épaisse sur les bordures des bassins tertiaires qu'en leurs centres. Les dépôts sporadiques du secteur sud sont en moyenne peu épais (5 à 20 m).

D'après la notice de la carte géologique de Lille, l'épaisseur totale du Landénien est estimée à 40 m environ. Les épaisseurs du faciès sableux (décris dans le paragraphe suivant) et du faciès argileux sont variables. Des différences notables ont d'ailleurs été constatées sur les coupes de forages voisins. Ceci est sans doute dû au fait que le passage d'un faciès à l'autre se fait de manière progressive, et qu'il est alors difficile de faire des distinctions entre argile sableuse et sable argileux dans les forages. Par ailleurs, sur les cartes géologiques, certains secteurs identifient à l'affleurement ou sous faible couverture limoneuse quaternaire des formations du Landénien mais sans différencier les parties inférieures et supérieures.

Au vu du passage progressif de faciès entre les formations de l'Argile de Louvil et des Sables d'Ostricourt, il arrive parfois que l'épaisseur de ces formations soit mal estimée. Cependant, ces incertitudes ne peuvent être quantifiées car les descriptions des forages sont le plus souvent succinctes.

Les Sables d'Ostricourt – Landénien supérieur

Dans la bordure Sud du bassin tertiaire des Flandres, les Sables d'Ostricourt s'approfondissent et s'épaissent vers le Nord, c'est-à-dire vers le centre du bassin sédimentaire. Alors que sur la bordure du bassin, ces sables sont affleurants ou sous une faible couverture de limons quaternaires, leur toit atteint jusqu'à -15 m NGF d'altitude au Nord-Ouest du secteur modélisé.

Dans le bassin d'Orchies, les dépôts sableux montrent un épaissement vers le centre. Un point situé sur la commune d'Ostricourt indique une épaisseur anormale de sables de 75 m. Cette épaisseur anormale calculée dans le modèle s'explique par le fait que les terrils et les buttes de remblais ne constituent pas un ensemble dans notre pile stratigraphique de modélisation alors que le Modèle Numérique de Terrain intègre ces reliefs. Le modèle géologique ne pouvant laisser de « vide », les remblais et terrils sont alors incorporés par défaut à la formation géologique sous-jacente. C'est le cas à Ostricourt où un terril est situé sur

des Sables d'Ostricourt (Figure 74). Au droit du terril, ce sont les Sables d'Ostricourt qui sont la formation géologique modélisée la plus récente. Le modèle calcule alors une épaisseur de Sables d'Ostricourt jusqu'au niveau du sol, représenté par le MNT (Figure 75).

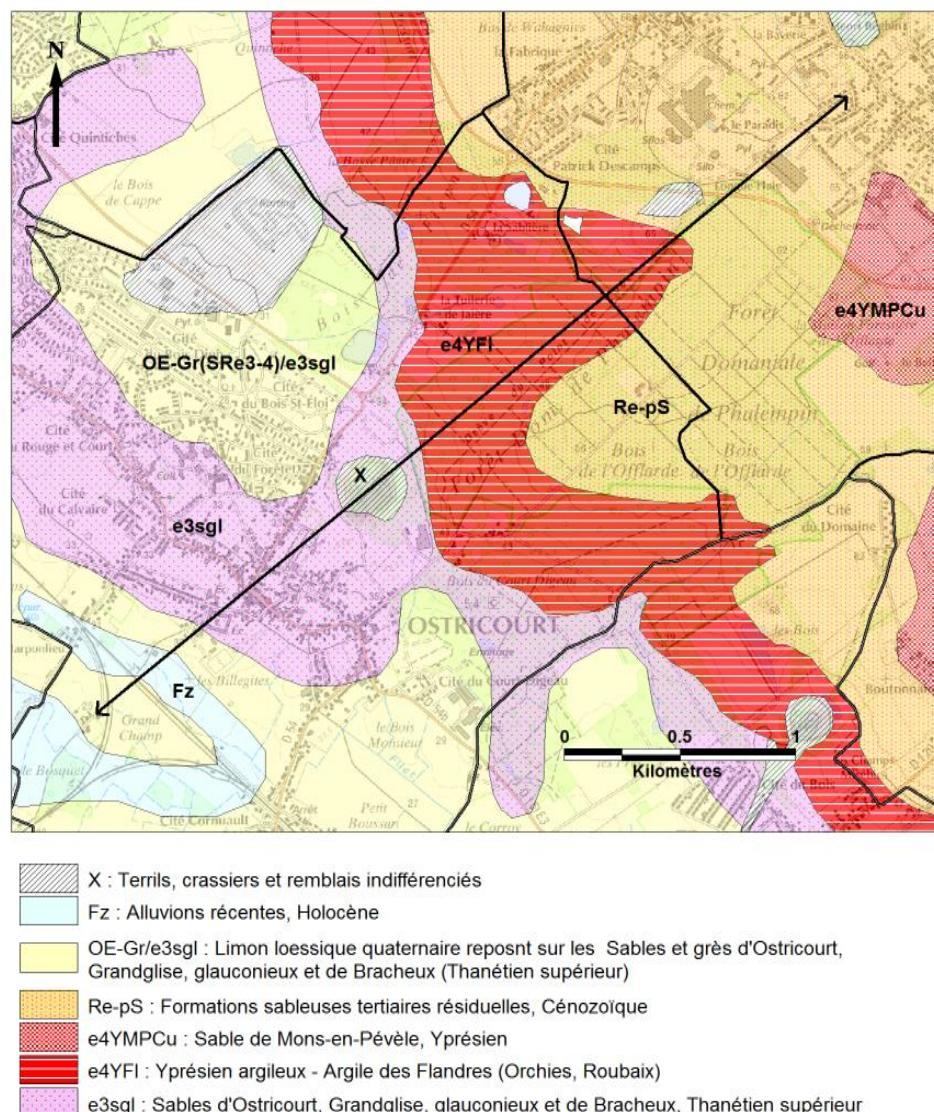


Figure 74 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune d'Ostricourt.

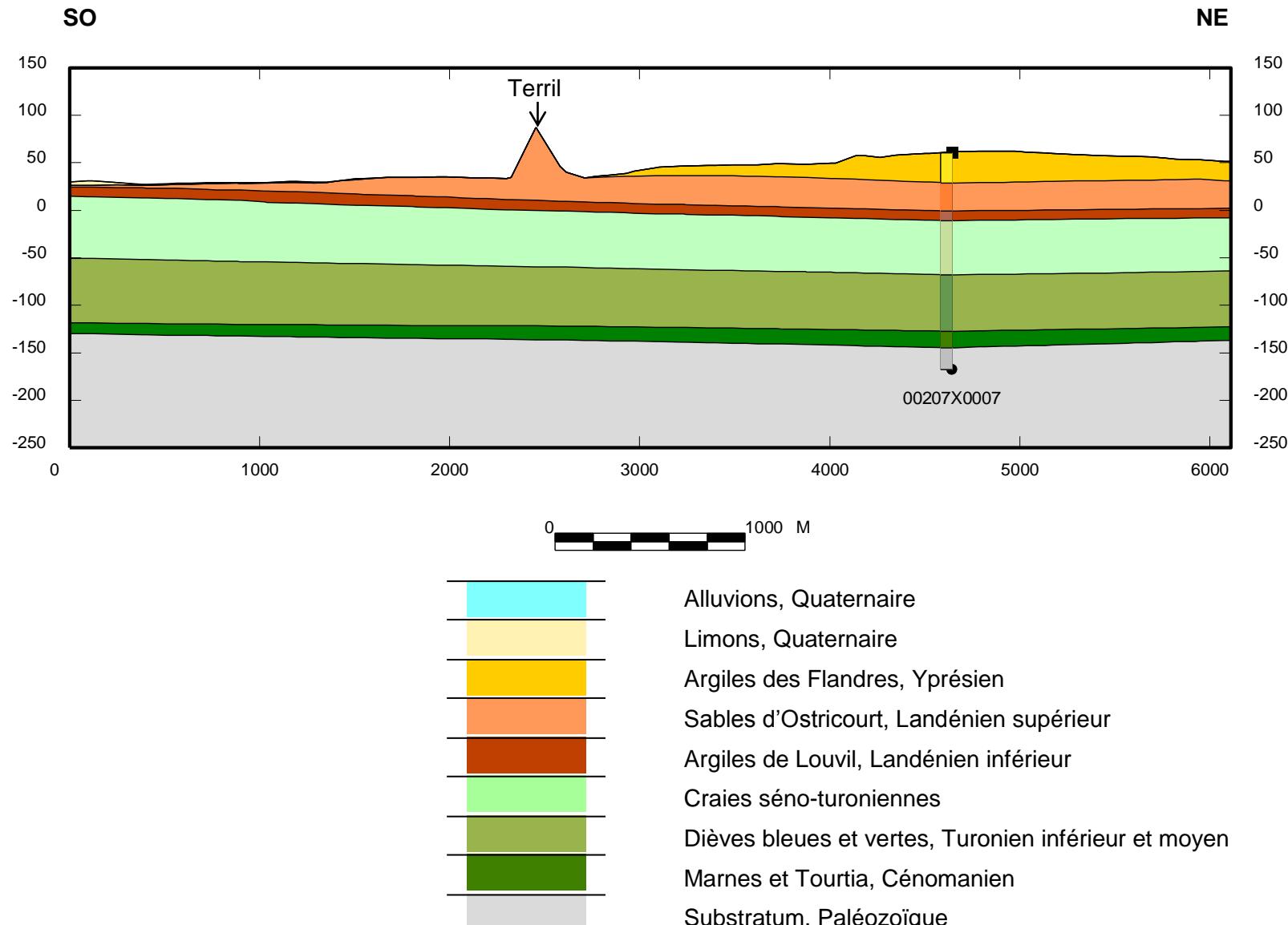


Figure 75 : Coupe transversale Sud-Ouest/Nord-Est recoupant un terril à Ostricourt (échelle verticale multipliée par 5).

Les Argiles des Flandres – Yprésien

Les Argiles des Flandres sont essentiellement localisées dans le bassin d'Orchies et la Plaine des Flandres. La représentation modélisée de cet ensemble géologique, qui, rappelons-le, comprend les Argiles d'Orchies, les Argiles de Roubaix et les Sables de Mons-en-Pévèle, atteint jusqu'à 74 m d'épaisseur sur la commune de Mons-en-Pévèle (Figure 76 et Figure 77). L'épaisseur de cet ensemble géologique décroît progressivement jusqu'aux bordures du bassin d'Orchies et de la Plaine des Flandres.

L'altitude du toit des Argiles des Flandres varie dans ce secteur de 8 à 106 m NGF. Le point le plus haut est localisé sur la commune de Mons-en-Pévèle.

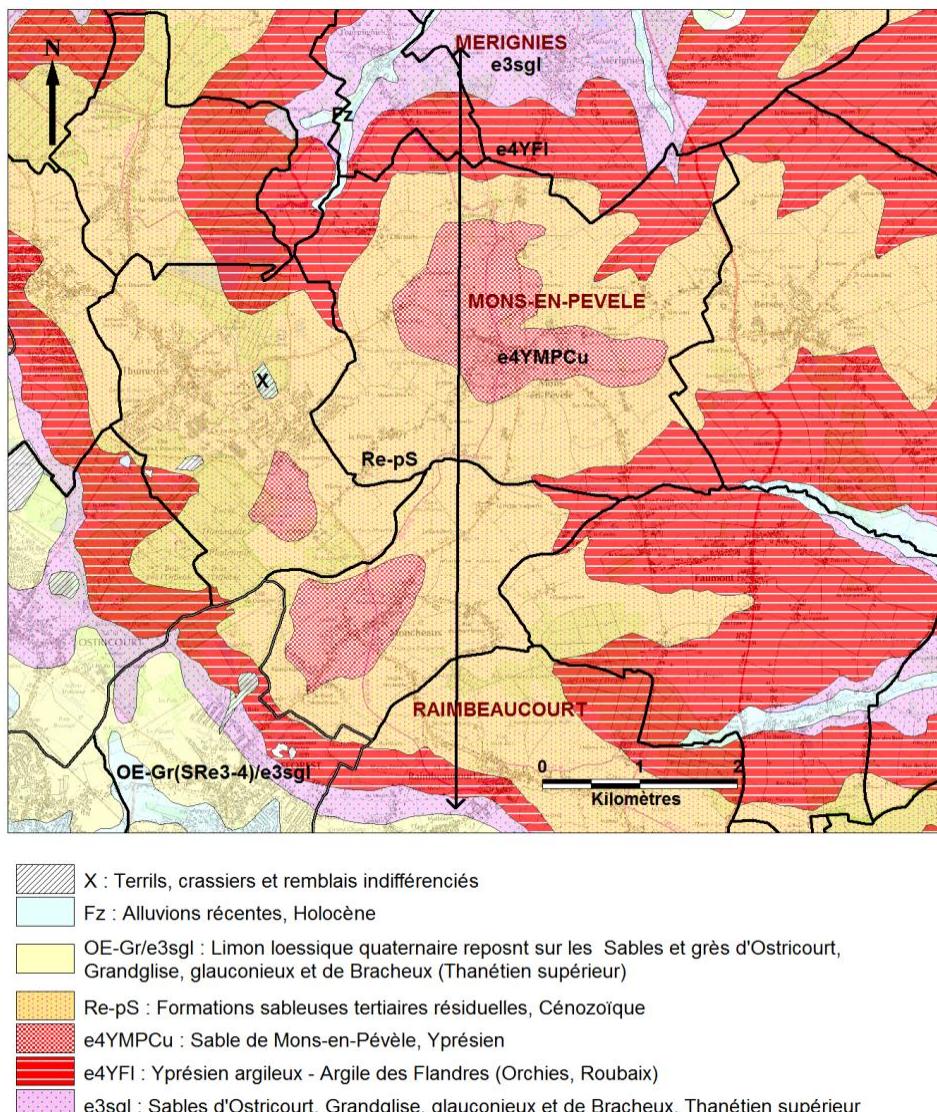


Figure 76 : Localisation de la coupe transversale Nord/Sud passant par Mons-en-Pévèle.

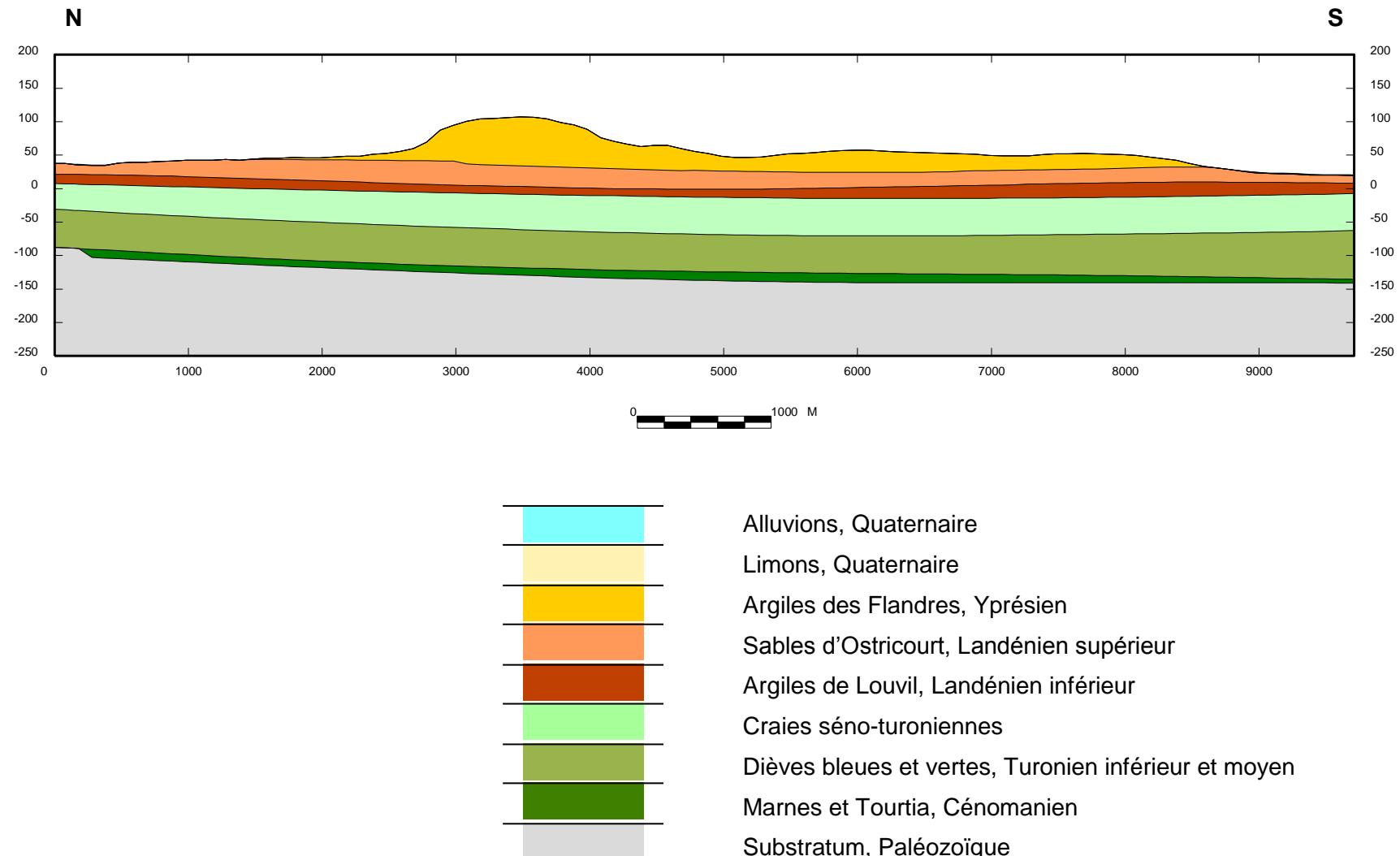


Figure 77 : Coupe transversale Nord/Sud passant par Mons-en-Pévèle (échelle verticale multipliée par 5).

Les formations quaternaires

Les limons quaternaires

L'épaisseur des limons et lœss quaternaires varie en moyenne entre 5 et 20 m (annexe 1). Localement, l'épaisseur peut atteindre plus de 75 m. Ces épaisseurs anormales calculées par le modèle s'expliquent par le fait que les terrils et les buttes de remblais ne constituent pas un ensemble dans la pile stratigraphique retenue pour la modélisation, alors que le Modèle Numérique de Terrain intègre ces reliefs. Le modèle géologique ne pouvant laisser de « vide », les remblais et terrils sont alors incorporés à la formation géologique sous-jacente.

Par exemple, sur la commune de Harnes, le terril repose sur des limons quaternaires (Figure 78). Au droit du terril, ce sont les limons qui sont la formation géologique modélisée la plus récente. Le modèle indique alors des limons jusqu'au niveau du sol (Figure 79).

Aucune représentation cartographique n'a été réalisée pour le toit des limons car il correspond à la surface topographique du MNT.

La formation des limons a également été recalculée sur l'ensemble de la région pour le bon fonctionnement du modèle hydrodynamique (Annexe 1).

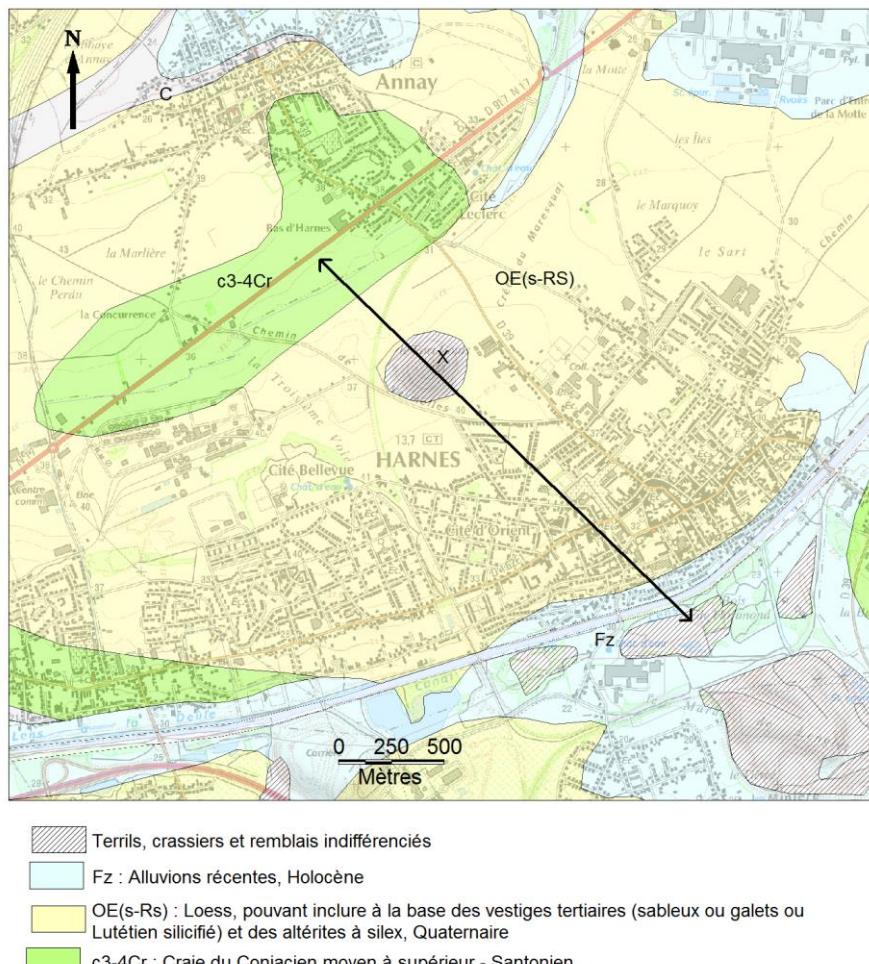


Figure 78 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune de Harnes.

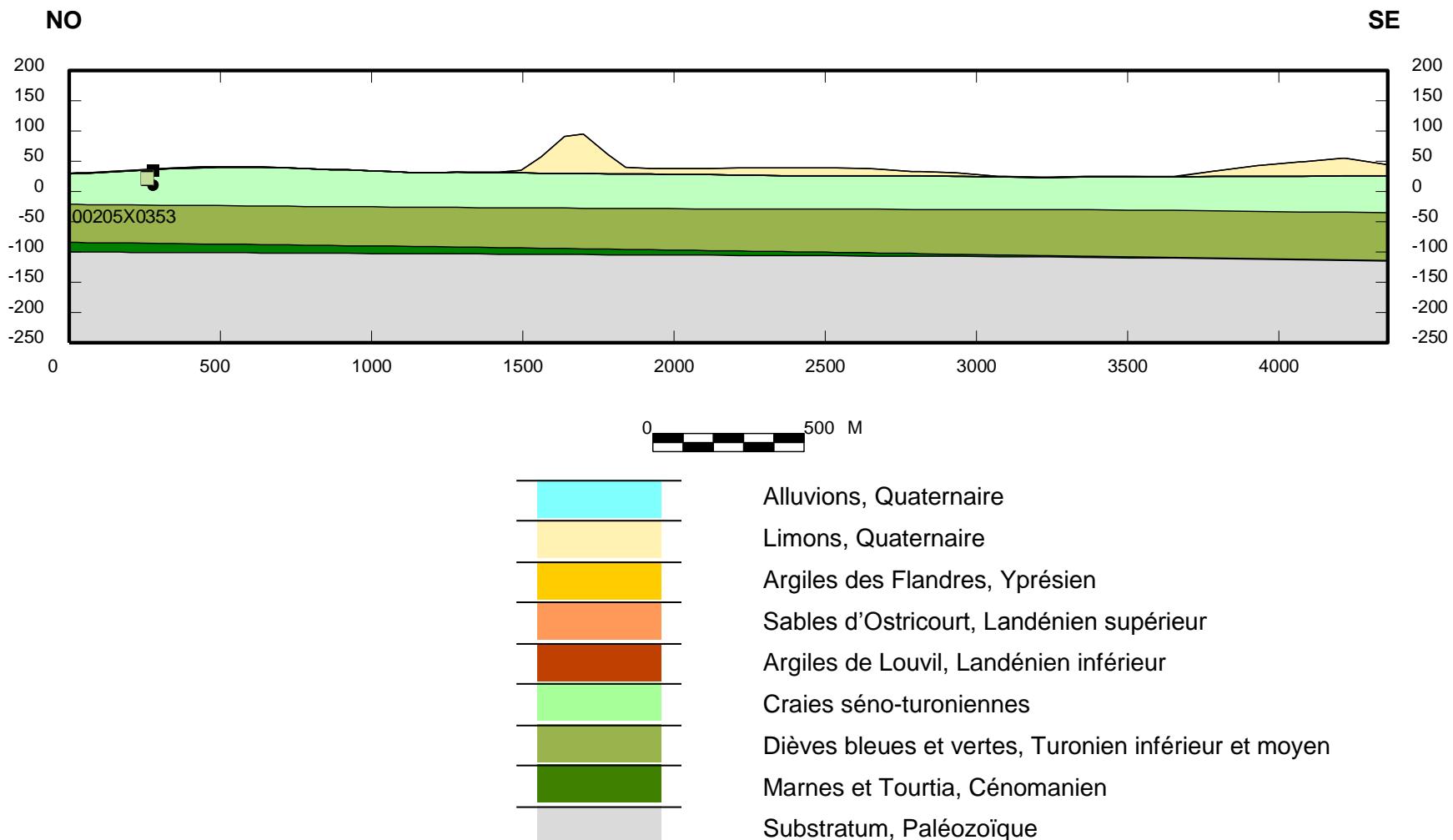


Figure 79 : Coupe transversale Nord-Ouest/Sud-Est recoupant un terril à Harnes (échelle verticale multipliée par 2).

Les alluvions quaternaires

L'affinement du modèle géologique a permis d'améliorer nettement le tracé de l'ensemble des alluvions quaternaires car la maille est plus petite (carré de 100 m de côté) et plus adaptée à la modélisation de petits éléments. La cartographie des alluvions obtenue par modélisation est à présent continue.

Les épaisseurs modélisées des alluvions de la Deûle, de la Marque et de la Scarpe sont comprises entre 0 et 25 m (Annexe 1).

Lorsque les alluvions reposent sur des sables ou des argiles tertiaires, il est plus difficile de distinguer la base des alluvions dans les sondages. C'est le cas dans les secteurs de la Scarpe, du Nord de la Deûle et d'une partie des alluvions de la Marque.

Les zones présentant une épaisseur locale très élevée (supérieur à 30 m) correspondent aux buttes de remblais ou aux terrils, pour les raisons déjà exposées ci-avant.

Les figures suivantes explicitent cette situation pour un terril situé à Allennes-les-Marais. Ce terril repose sur des alluvions quaternaires (Figure 80). Le terril forme une butte dans le relief. La coupe transversale de la Figure 81 (localisée sur le plan en Figure 80), est issue des résultats de modélisation. Comme aucun ensemble n'existe dans la pile stratigraphique pour les remblais et terrils, ces formations anthropiques ont été fusionnées avec les formations géologiques sous-jacentes, en l'occurrence les alluvions dans cet exemple.

Aucune représentation cartographique n'a été réalisée pour le toit des alluvions car il correspond à la surface topographique du MNT.

La formation des alluvions a également été recalculée sur l'ensemble de la région pour le bon fonctionnement du modèle hydrodynamique (Annexe 1).

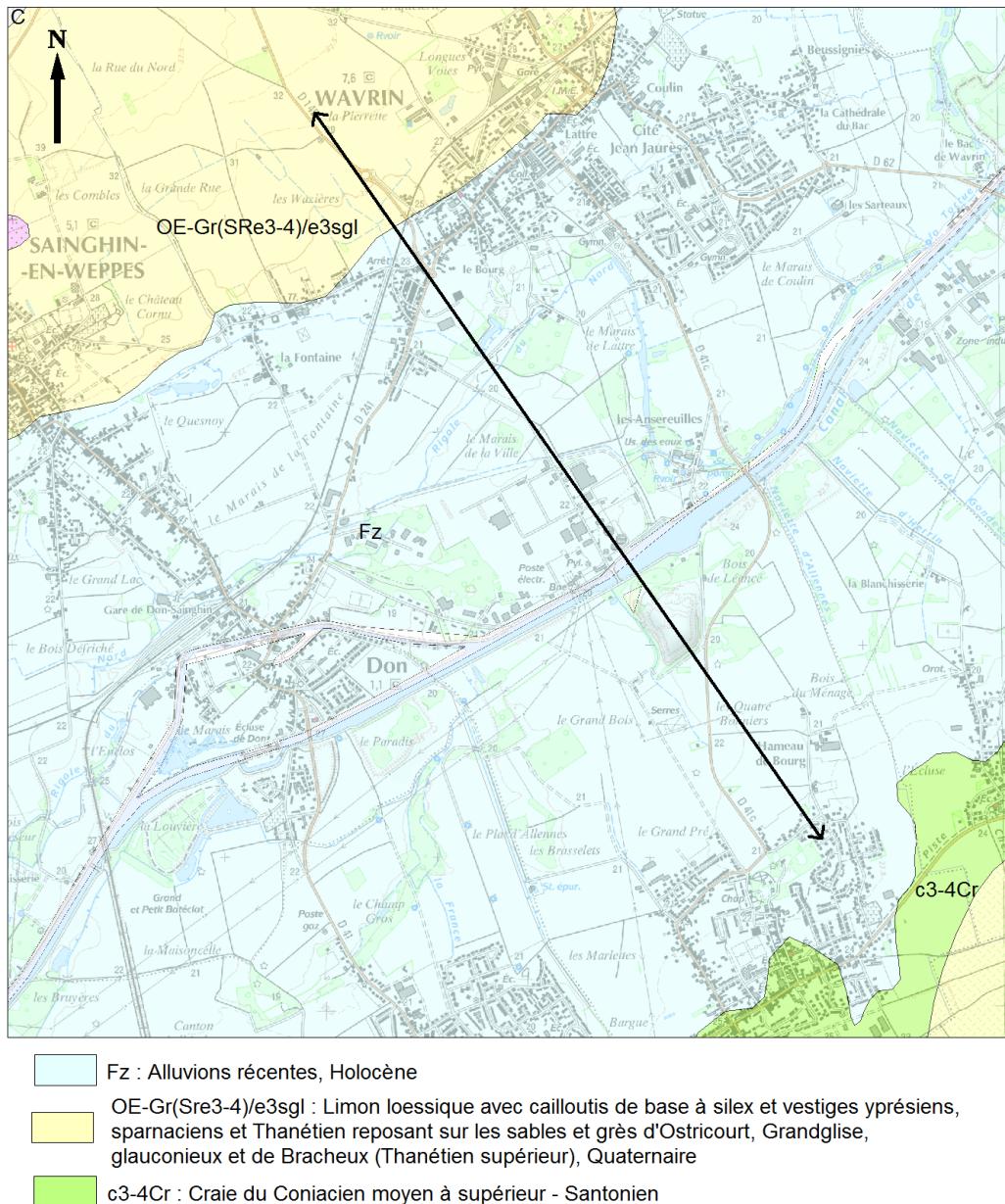


Figure 80 : Localisation du terril et de la coupe transversale sur la commune d'Allennes-les-Marais.

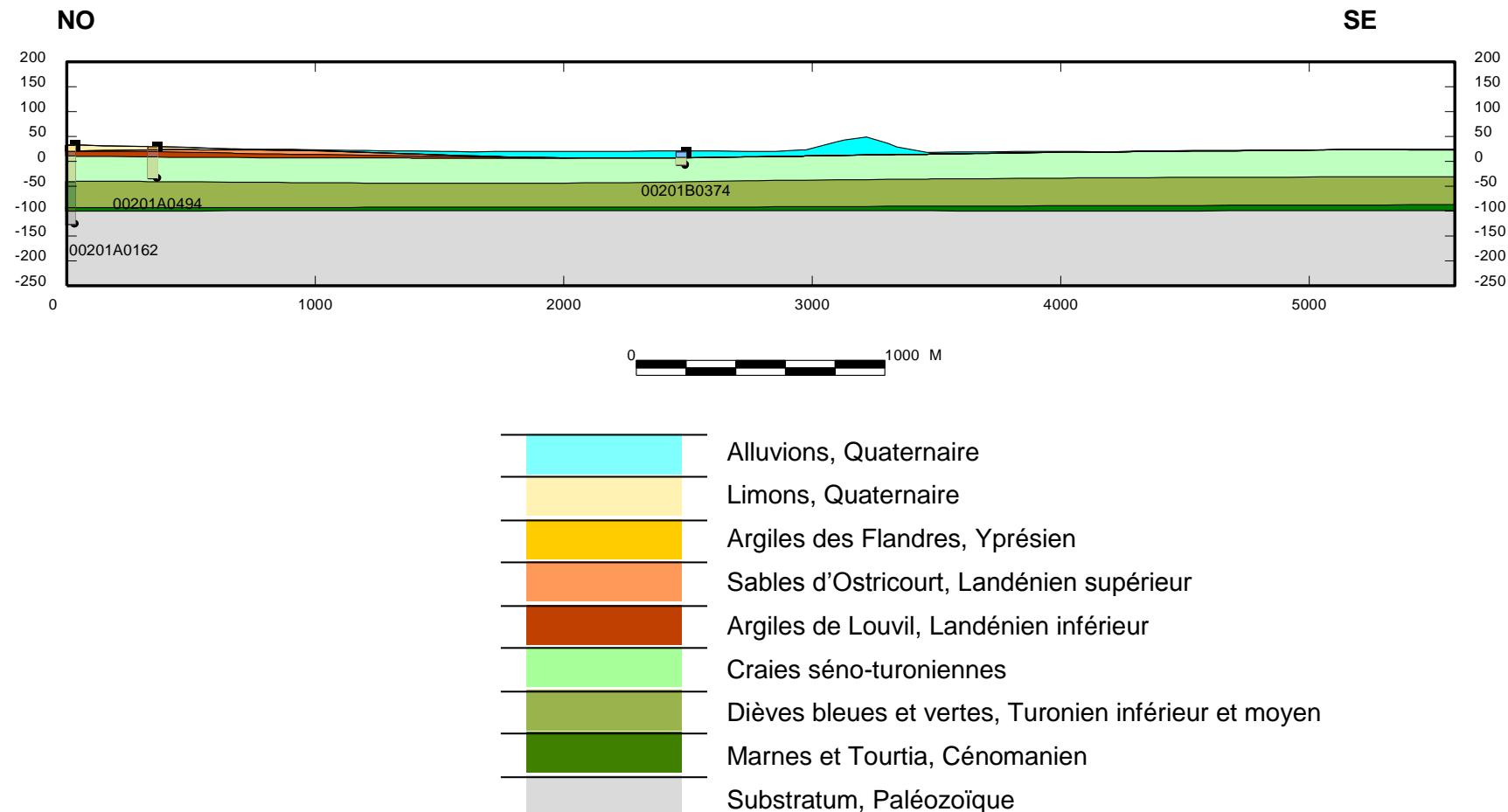


Figure 81 : Coupe transversale Nord-Ouest/Sud-Est recoupant un terril à Allennes-les-Marais.

6.4.2 Améliorations de la précision par rapport au modèle régional

D'un point de vue général, la modélisation géologique réalisée ici dans le secteur des champs captants de la MEL est beaucoup plus précise que celle réalisée sur toute la région Nord-Pas-de-Calais dans le cadre du projet SIGES (exemple pour le toit de la craie séno-turonienne en Figure 82) :

- La taille des mailles de calcul est de 100 m x 100 m pour le présent modèle, contre 500 m x 500 m pour le modèle SIGES. Les calculs des interfaces entre couches géologiques sont de ce fait plus précis et plus détaillés. Les petits objets géologiques, tels que les alluvions, sont aussi mieux interpolés.
- La zone affinée est cependant restreinte : le secteur modélisé des champs captants de Lille s'étend sur 1 332 km² alors que le secteur modélisé du projet SIGES couvre 10 350 km². Les contrôles sur les erreurs de modélisation sont donc plus ciblés et plus denses.
- La densité des sondages utilisés pour la modélisation géologique du secteur des champs captants de la MEL est plus importante : 3 375 sondages ont été utilisés pour le modèle des champs captants. Rapporté à l'emprise des modèles, cela représente 2,53 sondages/km² pour le modèle géologique des champs captants contre 0,16 sondages/km² pour le modèle régional du SIGES.

Par ailleurs, les formations quaternaires ont été individualisées sur la région afin de mieux contraindre la modélisation hydrodynamique.

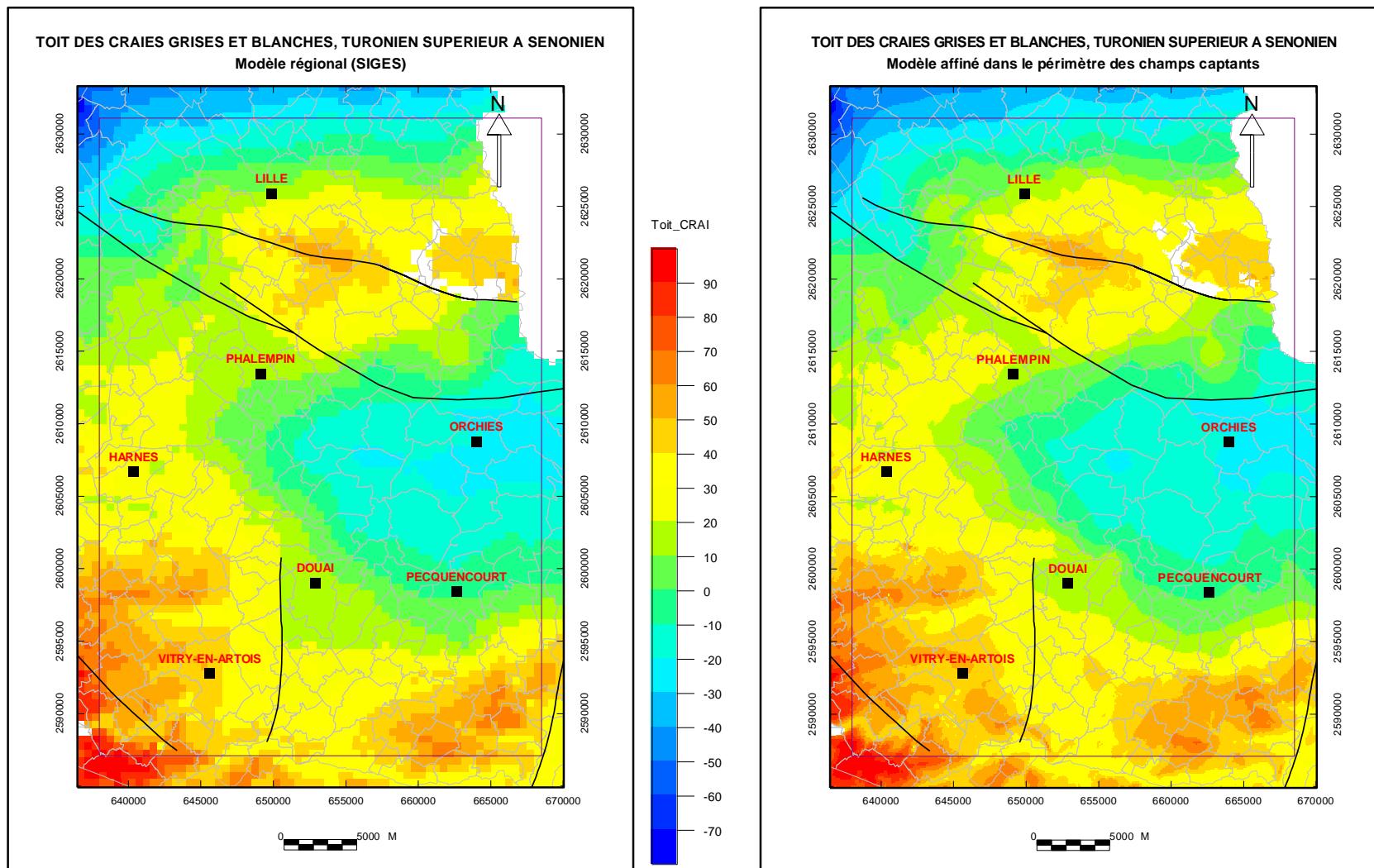


Figure 82 : Comparaison de la représentation du toit de la Craie sénonienne entre le modèle régional réalisé dans le cadre du projet SIGES (à gauche) et le modèle affiné (à droite).

7 Construction du modèle hydrodynamique

Plusieurs étapes sont nécessaires à la construction d'un modèle hydrodynamique maillé. La Figure 2 regroupe en cinq grands blocs les paramètres et variables nécessaires à un modèle d'écoulement souterrain :

- Structure du milieu géologique (cf. paragraphe 7.1), intégrant la délimitation du domaine à modéliser, la construction du maillage, la définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et mur à chaque formation. Lorsqu'un modèle géologique a été construit au préalable, comme c'est le cas ici, la structure du modèle géologique est directement transposée dans le modèle hydrogéologique.
- Affectation des chroniques de pompage aux mailles concernées (cf. chapitre 4 et paragraphe 7.4).
- Affectation des propriétés hydrogéologiques (T, S) à chacune des mailles (cf. 7.6).
- Définition du réseau hydrographique et des échanges nappe-rivière (cf. paragraphe 7.3.).
- Définition des flux de recharge de la nappe et de ruissellement vers le réseau hydrographique (cf. paragraphe 7.2.).

7.1 GEOMETRIE DU MODELE

7.1.1 Choix de la taille des mailles de la zone affinée

La zone affinée est caractérisée par une taille de maille plus petite que celle des mailles du modèle régional (500 m x 500 m). Pour ce faire, la fonctionnalité de Marthe permettant d'introduire un maillage gigogne a été utilisée. Les dimensions affectées aux mailles sont le fruit d'un compromis entre :

- la précision de calcul recherchée,
- le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles,
- la taille et la complexité géométrique / hydrogéologique des aménagements à simuler,
- le respect des critères numériques assurant la représentativité des calculs,
- un nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable » sur un micro-ordinateur courant.

A titre indicatif, on utilise en général des mailles de 500 à 1000 m de côté pour les modèles régionaux, affinées à 200-250 m dans les zones d'un intérêt particulier.

Une taille de maille de 250 m x 250 m pour la zone à affiner semblait bien adaptée à la précision des connaissances hydrogéologiques et à la variabilité spatiale moyenne des données de terrain. Un maillage carré uniforme de 100 m x 100 m a cependant été utilisé dans la zone affinée pour permettre de différencier les forages au sein de chaque champ captant et pour pouvoir être juxtaposé avec le modèle du Carbonifère, qui lui possède des mailles de 100 m x 100 m de côté, par la suite. L'augmentation du temps de calcul qui en est résulté a allongé significativement la durée du calage mais ne pénalise pas outre mesure l'exploitation du modèle pour la simulation de scénarios prévisionnels.

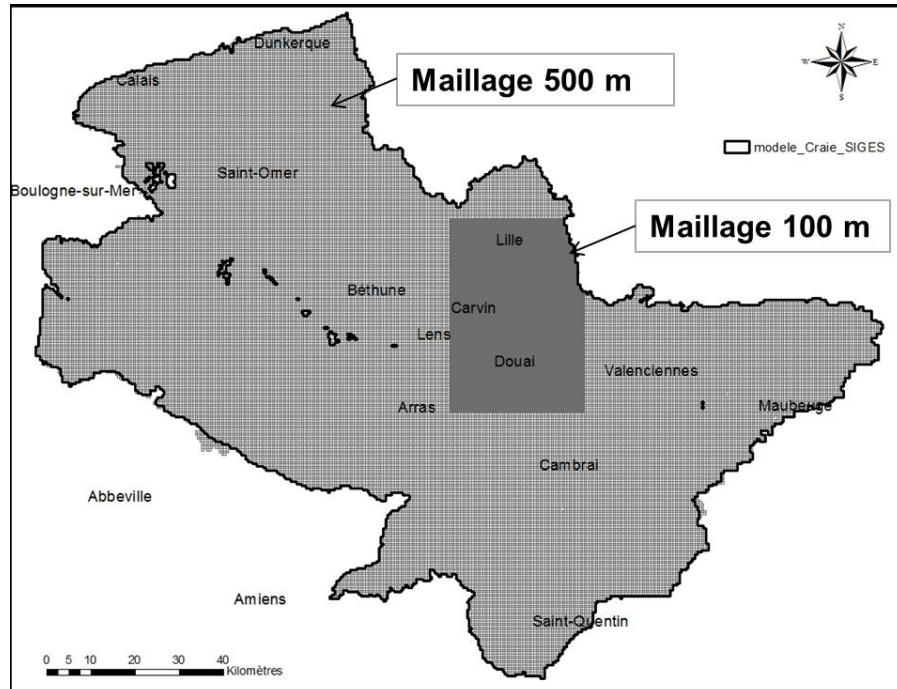


Figure 83 : Maillage du modèle (mailles carrées de 500 m et de 100 m de côté)

7.1.2 Intégration des données du modèle géologique

Les maillages utilisés pour le modèle géologique et pour le modèle hydrodynamique étant identiques, la structure géométrique du premier a été transférée directement au second, sans aucune interpolation additionnelle.

Par rapport au modèle hydrodynamique régional initialement construit, les couches quaternaires (alluvions, limons et sables littoraux) ont été différencieres afin de pouvoir restituer la mise en charge de la nappe de la Craie sous ces formations et d'améliorer la prise en compte des échanges entre le réseau hydrographique et la nappe de la Craie, *via* la nappe alluviale.

En effet, les couches superficielles d'alluvions et de limons peuvent jouer un rôle important pour la recharge parvenant aux couches inférieures, des limons argileux pouvant freiner l'infiltration, tandis que des dépôts plus sableux peuvent contribuer à une recharge plus importante des formations sous-jacentes. La couche des alluvions et celle des sables littoraux ont cependant été regroupées en une seule couche de modèle. Ce regroupement permet d'économiser une couche de mailles, sans impacter la modélisation hydrodynamique de la zone affinée, parce que les sables littoraux sont très éloignés de la zone affinée.

En pratique, le mur effectif du réservoir aquifère productif de la Craie ne correspond que rarement au toit des marnes du Turonien moyen. En effet, la capacité aquifère de la Craie tient à sa fissuration et à ses joints de stratification plus ou moins ouverts. Ceux-ci se fermant en profondeur avec le poids des terrains sus-jacents, il en résulte une diminution très sensible de la perméabilité de la Craie avec la profondeur. La couche crayeuse a donc été scindée en deux couches de perméabilités contrastées : la Craie séno-turonienne « productive » et la Craie « non productive » ou Craie « compacte ». La méthodologie utilisée pour individualiser ces deux couches de Craie est décrite au paragraphe 7.1.4.

Ainsi, dans le modèle affiné, dix couches de mailles sont prises en compte (Figure 84) :

- les alluvions et les sables littoraux quaternaires,

- les Limons des Plateaux quaternaires,
- les Argiles des Flandres yprésiennes,
- les Sables d'Ostricourt du Landénien supérieur,
- les Argiles de Louvil du Landénien inférieur,
- la Craie blanche à silex séno-turonienne productive,
- la Craie blanche à silex séno-turonienne non productive,
- les Dièves vertes et bleues du Turonien moyen et inférieur,
- les Craies et marnes cénonmaniennes,
- le « socle » âgé du Crétacé inférieur, Jurassique et Paléozoïque.

Les 10 couches du modèle géologique
Les 10 couches du modèle hydrogéologique

Formation	Type Surf.	Description
ALLU	EROD	Alluvions anciennes et moderne
LIMO		Limos, remblais
LITT		Sables, tourbes littoraux
YPRE		Argile des Flandres
LAND		Sables d'Ostricourt Landénien
LOUV		Argile de Louvil
CRAI		Craie sénonienne aquifère
DIEV		Dièves bleues et vertes
CENO		Craies et marnes cénomanianes
PALE		Socle anté-Crétacé supérieur

Couche 1	Alluvions + sables littoraux	Aquifère
Couche 2	Limos	Semi-perméable
Couche 3	Argiles des flandres – Yprésien	Aquitard
Couche 4	Sables d'Ostricourt – Landénien	Aquifère
Couche 5	Argiles de Louvil	Aquitard, aquifère dans les horizonts sableux indurés
Couche 6	Craie du Séno-Turonien productive	Aquifère
Couche 7	Craie du Séno-Turonien non productive	Aquitard
Couche 8	Dièves	Aquitard
Couche 9	Cénomanien	Aquitard et aquifère dans le Cénomanien riche en craie
Couche 10	Carbonifère	Aquifère

Figure 84 : Correspondance entre les couches du modèle géologique et les couches du modèle hydrogéologique.

7.1.3 Extension et conditions aux limites

Extension

Dans un premier temps, les extensions des couches du modèle hydrodynamique ont été directement héritées du modèle géologique, donc inscrites dans les limites de la Région Nord-Pas-de-Calais. Dans un deuxième temps, et de façon similaire à la démarche suivie pour le modèle hydrodynamique régional, la couche de la Craie a été étendue au Sud (extension dans le département de la Somme) et à l'Est (extension en Belgique), afin d'assigner à cette couche des conditions aux limites plus hydrauliques.

De ce fait, d'autres sources de données ont été nécessaires pour compléter la géométrie de l'aquifère crayeux du modèle (Figure 85) :

- La géométrie de la formation des craies à silex a été complétée au Sud par la géométrie du modèle de la Somme (Amraoui et al., 2002).
- Les zones d'affleurement de la craie en Belgique ont été digitalisées et intégrées dans le modèle. Peu de données sont disponibles pour déterminer le substratum de la craie dans cette zone. Une épaisseur de 25 m sous la topographie a été choisie comme mur hydraulique de la Craie dans ce secteur.
- L'extension de la nappe des Calcaires du Carbonifère prise en compte correspond à la partie française de la nappe. La géométrie de cette couche a été extraite de celle du modèle Carbonifère (Picot et Dufrenoy, 2012) où une épaisseur productive moyenne de 50 m est considérée sous le toit de cette formation.

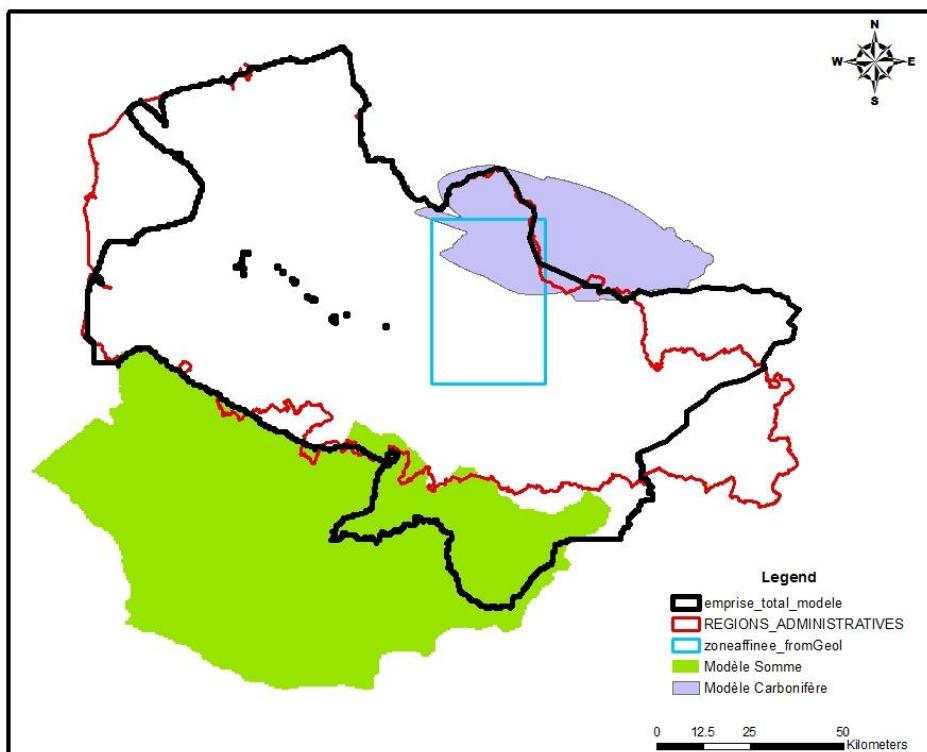


Figure 85 : Localisation et extension des modèles de la Somme, de la Craie et des Calcaires du Carbonifère.

Conditions aux limites

La plupart des hypothèses sur les conditions aux limites restent inchangées par rapport au modèle régional.

Les conditions aux limites des couches 1 (alluvions + sables littoraux), 2 (limons), 3 (argiles des Flandres), 4 (Sables d'Ostricourt), 5 (argiles de Louvil), 6 (Craie du sénonien productive) et 7 (Craie du sénonien non productive) sont généralement à flux nul, hormis le long de la Manche et de la Mer du Nord. Pour les couches aquifères superficielles (alluvions, sables du Landénien et Craie), les mailles en contact avec la Mer du Nord et la Manche ont une charge piézométrique imposée à 0 m NGF. Pour les couches aquifères plus profondes comme la Craie du Cénomanien, les limites sont supposées étanches.

Les limites de la Craie sont définies de la manière suivante :

- les limites Ouest et Est du réservoir constituent des limites à flux nul ;
- au Nord, la Craie est captive. La frontière avec la Belgique constitue une limite à flux nul ;
- le long de la Mer du Nord et de la Manche, la Craie est considérée à l'équilibre hydrostatique avec la mer et la charge est donc imposée à 0 m NGF ;
- au Sud, l'Authie, l'Ancre et la Somme drainent largement la nappe de la Craie et constituent autant de limites de débordement, contrôlées par les cotes de ligne d'eau des cours d'eau.

Pour la couche des Calcaires du Carbonifère, des charges piézométriques issues du modèle Carbonifère sont imposées sur la frontière orientale de la couche. La méthode de couplage des deux modèles est expliquée au paragraphe 7.5.3.

7.1.4 Modifications apportées au modèle géologique

Pour un bon fonctionnement du modèle hydrodynamique, quelques modifications ont été apportées aux données du modèle géologique.

Homogénéisation des couches

Pour les formations aquifères (telles que les alluvions par exemple), les mailles ou petits groupes de mailles isolés ne jouant pas un rôle aquifère significatif ont été supprimées.

Pour les formations peu perméables les mailles isolées ont été supprimées. Cependant, pour la couche des limons, les petits groupes de mailles mettant en charge la nappe sous-jacente ont été conservés.

Couche des alluvions

Dans un premier temps, pour la couche des alluvions, des mailles manquantes ont été ajoutées afin de restituer la continuité de l'écoulement. L'épaisseur de ces nouvelles mailles est définie par la moyenne des épaisseurs des mailles adjacentes. Ce premier traitement sur la couche des alluvions a abouti à une couche alluvionnaire présente essentiellement autour du réseau hydrographique (Figure 86). Dans un second temps, la prise en compte des écoulements de surface a nécessité la suppression des mailles ayant des épaisseurs inférieures à 1 m. En effet, l'épaisseur de la tranche d'eau a été supposée uniforme et égale à 1 m dans les cours d'eau pour simuler les écoulements de surface.

Ainsi, dans le modèle hydrogéologique, les alluvions ne sont conservées que lorsqu'elles constituent un ensemble de mailles conséquent, c'est-à-dire dans les zones aval des principaux cours d'eau (Figure 86), le long du Canal de la Deûle (essentiellement en aval de Don), au Nord de la Marque et le long de la Scarpe canalisée.

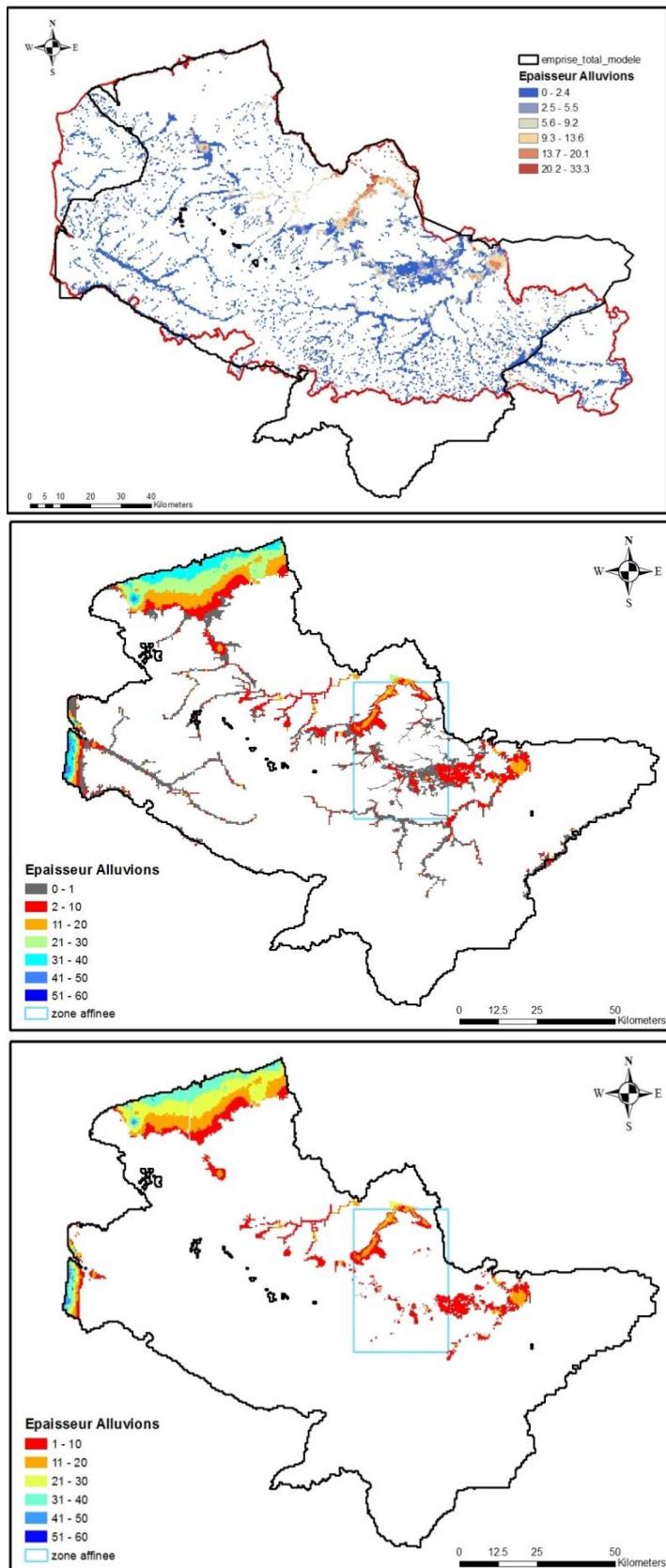


Figure 86 : Représentation de la couche des alluvions issue du modèle géologique (en haut), puis après un premier traitement dans le modèle hydrodynamique (au milieu), et enfin couche finale des alluvions prise en compte dans le modèle affiné (en bas).

Calcul de la base de la Craie productive

L'horizon séno-turonien est subdivisé en deux formations pour différencier verticalement deux zones de perméabilité dans la Craie :

- une tranche supérieure, perméable, résultant du développement de la fissuration et de l'ouverture des joints de stratification ;
- une tranche inférieure, peu perméable, où la craie est plus compacte et les fissures moins ouvertes.

Les diagraphies au micro-moulinet de 151 forages à la Craie dans le Nord-Pas-de-Calais montrent que cette épaisseur productive peut varier entre 1,5 et 60 m, avec une moyenne aux alentours de 25 m (Figure 87).

En pratique, seule la partie fissurée de la craie constitue l'aquifère, tandis que la craie sous-jacente, compacte, forme le substratum hydraulique. Dans le modèle hydrogéologique, le mur de la formation crayeuse aquifère est modifié par rapport au mur géologique de la manière suivante :

- le substratum a été calculé à partir de la carte piézométrique de 1997, en supposant une épaisseur productive de 25 m sous la surface piézométrique ;
- ce substratum a ensuite été corrigé lorsque le toit des Dièves turoniennes sous-jacentes réduit localement cette épaisseur.

Dans le modèle de la Somme (Amraoui et al., 2002), l'épaisseur productive des formations crayeuses du Séno-Turonien a également été considérée égale à 25 m de zone saturée.

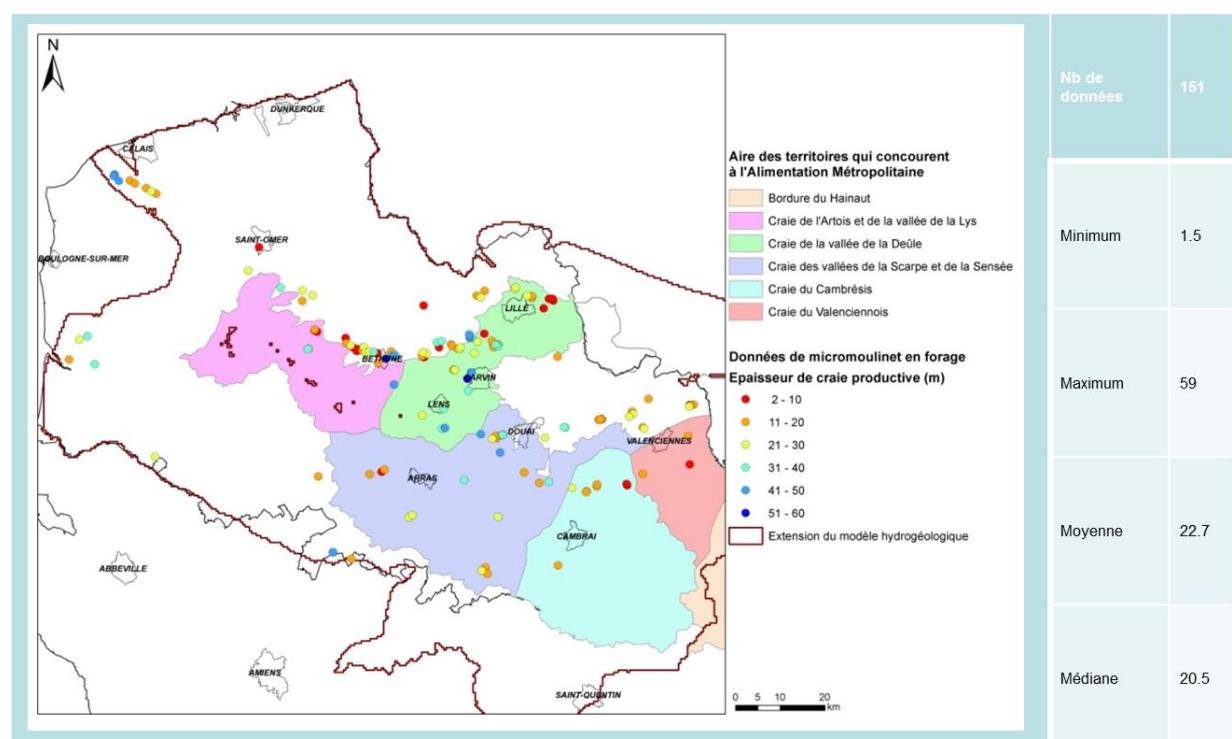


Figure 87 : Diagraphies au micromoulinet réalisées dans la Craie séno-turonienne.

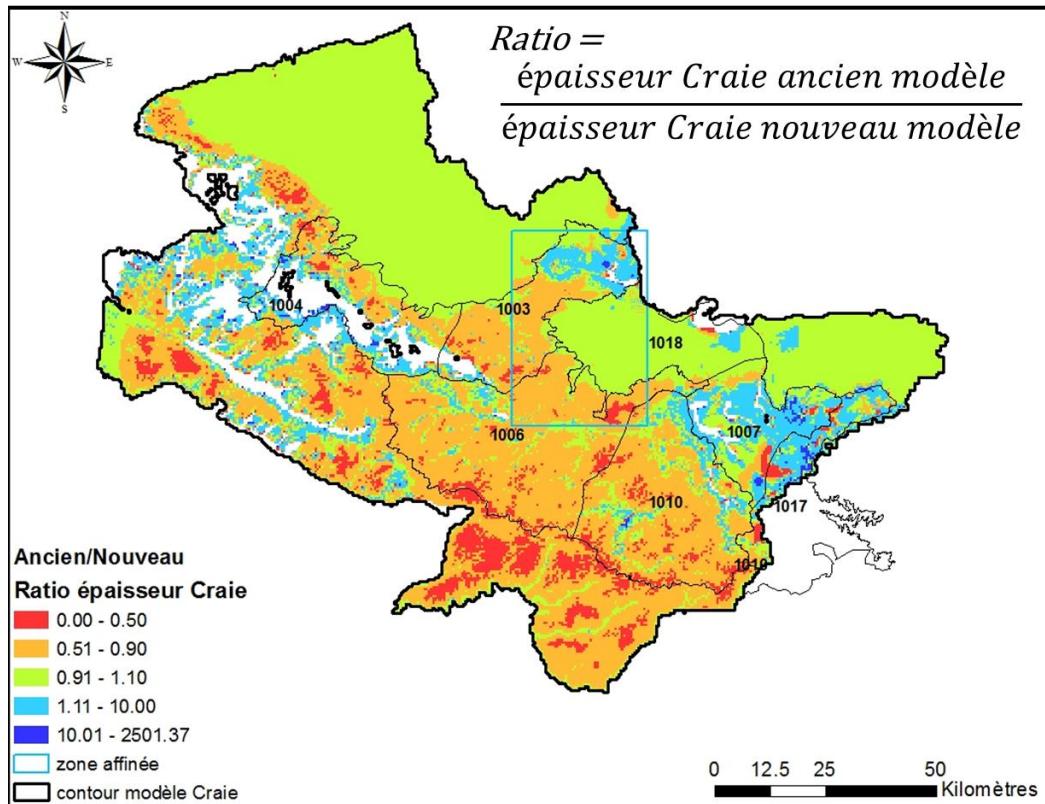


Figure 88 : Comparaison des épaisseurs de Craie productive entre l'ancien et le nouveau modèle.

Une comparaison des épaisseurs de Craie productive a été faite entre le modèle régional et le modèle affiné. La Figure 88 présente la distribution spatiale du ratio des épaisseurs de Craie productive entre l'ancien et le nouveau modèle. En dehors de la partie captive de la nappe où une épaisseur standard et identique de 25 m a été prise en compte dans l'ancien et le nouveau modèle, l'épaisseur de la Craie productive est généralement plus importante dans le modèle affiné que dans le précédent. Elle est toutefois moins importante sur quelques zones : en bordure de formation, dans les vallées, au niveau de la masse d'eau 1007 (AG007), dans le secteur de Lille, ainsi qu'au Nord-Est de la zone affinée.

Afin d'avoir des valeurs de transmissivités équivalentes, la distribution initiale des perméabilités a été corrigée en multipliant dans chaque maille les perméabilités de la Craie productive par la valeur du ratio des épaisseurs.

Cette modification de géométrie de la couche Craie productive a impacté l'extension de la couche Craie « compacte ». La Figure 89 présente la différence des extensions et épaisseurs de la couche Craie « compacte » ; on constate qu'elle disparaît au Sud de l'axe NO-SE.

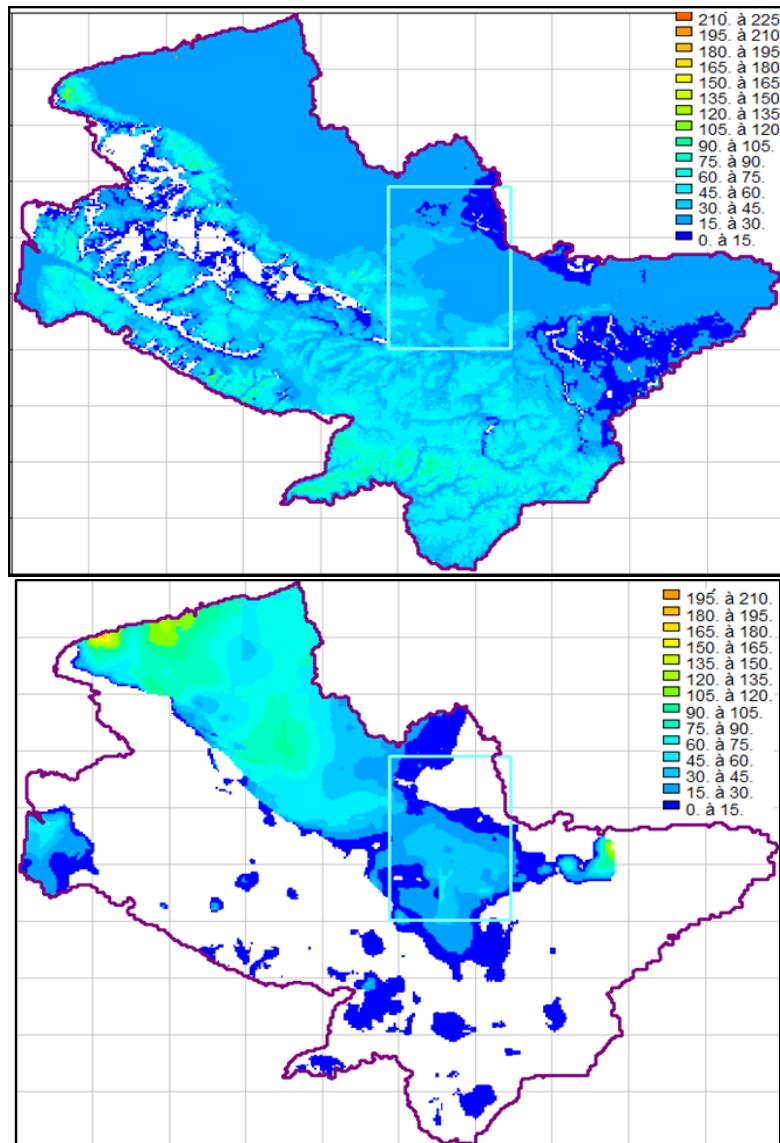


Figure 89 : Comparaison des épaisseurs de la Craie compacte entre le modèle régional (en haut) et le modèle affiné (en bas).

7.1.5 Synthèse des caractéristiques du modèle

Le modèle couvre une superficie d'environ 12 464 km². Le nombre de mailles est de 2 533 420, dont 917 125 sont actives. Parmi ces mailles actives, 231 411 se trouvent dans le maillage principal de 500 m de côté et 685 714 sont comptabilisées dans le maillage gigogne de 100 m.

En outre, dans le maillage principal de 500 m x 500 m, on dénombre 387 colonnes, 304 lignes pour un total de 10 couches. Dans le maillage gigogne de 100 m x 100 m, il y a 307 colonnes et 442 lignes.

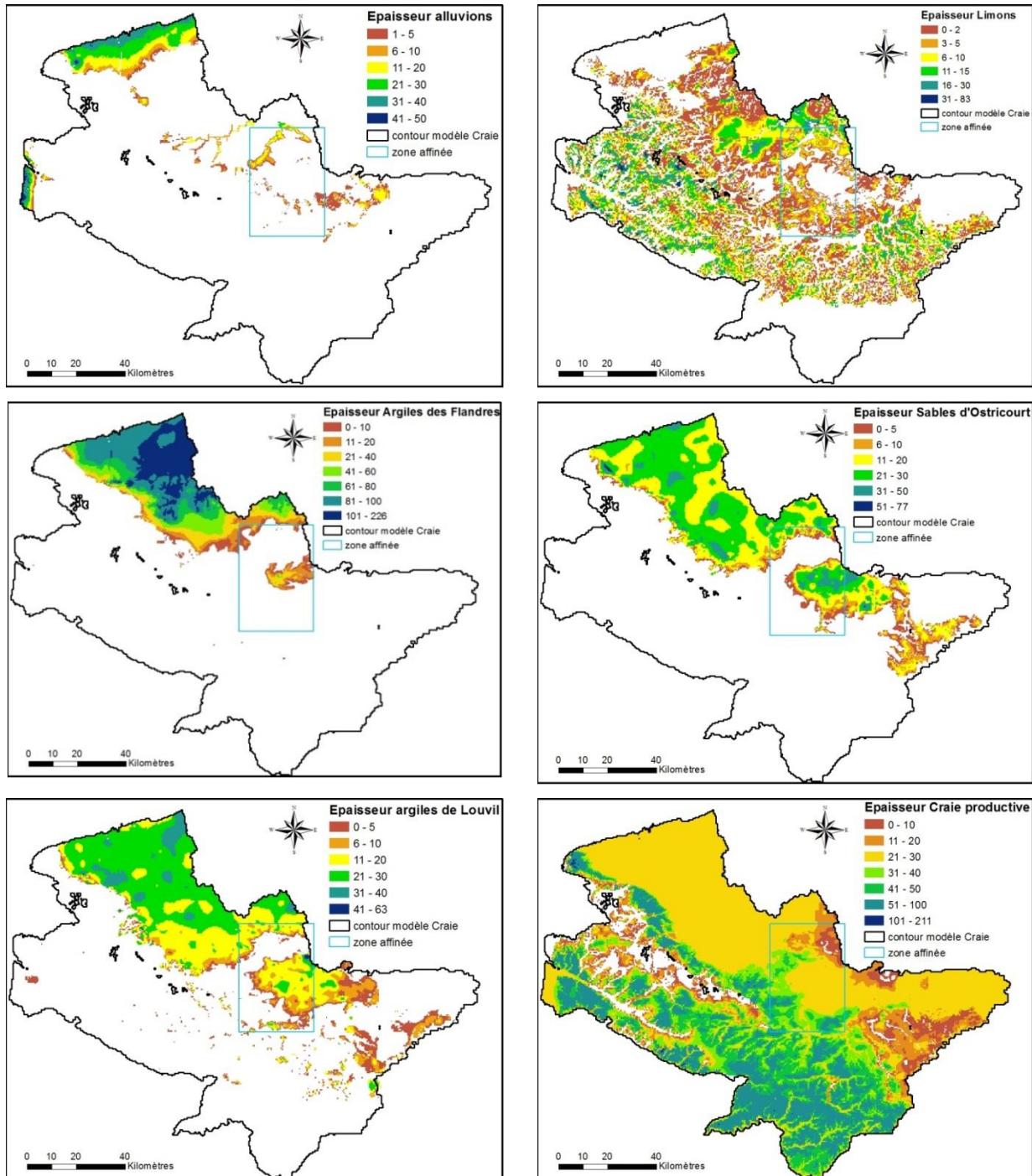
Le Tableau 4 synthétise les caractéristiques de chaque couche du modèle en termes de superficie et de nombre de mailles. Le Tableau 5 indique les épaisseurs maximales et moyennes de chaque couche, et la Figure 90 présente leurs extensions et la distribution spatiale des épaisseurs par maille.

Formation	Superficie de la couche (km ²)	Nombre de mailles		
		total	dans le maillage principal	dans le maillage gigogne
Alluvions + sables littoraux	1181	17356	4196	13160
Limons	6470	100722	22762	77960
Argiles des Flandres – Yprésien	2446	30275	8930	21345
Sables d'Ostricourt – Landénien	3962	72906	13470	59436
Argiles de Louvil	4281	86775	14223	72552
Craie du Séno-Turonien productive	12464	174334	44669	129665
Craie du Séno-Turonien non productive	5311	113232	17412	95820
Dièves	10760	168023	37833	130190
Cénomanien	8808	116341	31854	84487
Carbonifère	9026	37161	36062	1099
Ensemble du modèle	12464	917125	231411	685714

Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle affiné.

Formation	Epaisseurs			
	dans le maillage principal		dans le maillage gigogne	
	Max	Moyenne	Max	Moyenne
Alluvions + sables littoraux	55.7	9.6	40.5	2.3
Limons	83	4.6	83	4.2
Argiles des Flandres – Yprésien	225.6	30	73.2	12.3
Sables d'Ostricourt – Landénien	77	16.6	65	18.6
Argiles de Louvil	63	12.6	56.8	11.4
Craie du Séno-Turonien productive	126	30	91	28.8
Craie du Séno-Turonien non productive	201	26.4	50.6	23.2
Dièves	183.9	53.9	104.1	53.8
Cénomanien	118	18.9	61.2	13.3
Carbonifère	50		50	

Tableau 5 : Epaisseurs maximales et moyennes de chaque couche du modèle affiné.



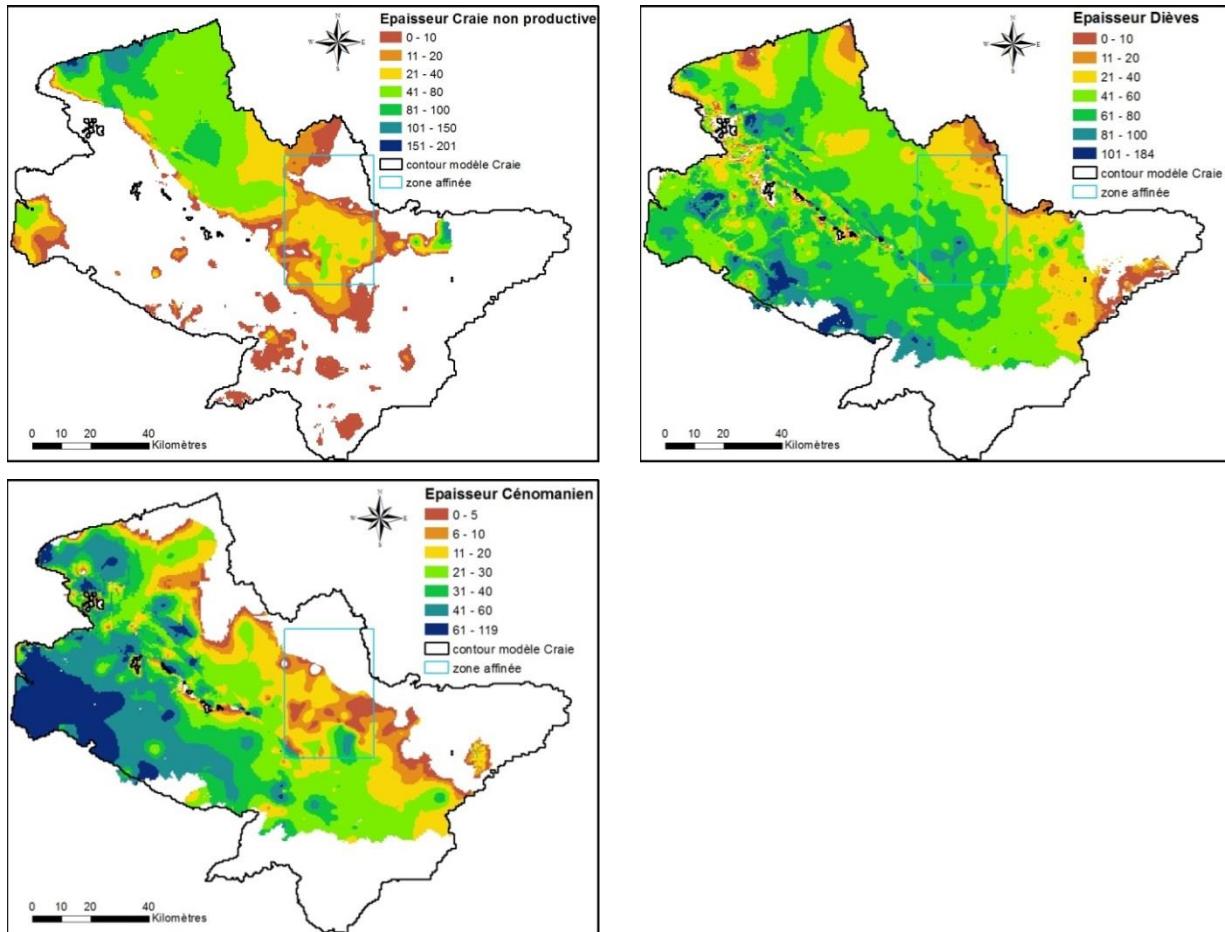


Figure 90 : Représentation des épaisseurs de chaque couche du modèle affiné.

7.2 PARAMETRES DE RECHARGE

7.2.1 Principe des calculs hydroclimatiques avec le logiciel MARTHE

Avec MARTHE, les calculs hydroclimatiques (Pluie, ETP, fonte de neige, ruissellement vers les cours d'eau, infiltration) peuvent être totalement couplés avec les écoulements souterrains. Ils suivent la même logique que celle qui est mise en œuvre dans GARDENIA (Thiéry, 2003, 2013), avec des réservoirs « sol » et « zone non saturée ». En revanche, il n'y a pas de réservoir « zone saturée » puisque les écoulements souterrains sont directement simulés dans les différentes couches du modèle.

À chaque pas de temps, un bilan entre la pluie et l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) est réalisé dans chaque « zone hydroclimatique » du modèle. Ces zones sont des « zones de sol » dans lesquelles est calculée une pluie efficace à partir d'un bilan hydrologique faisant intervenir une capacité du sol. La pluie efficace se décompose en :

- une infiltration, introduite dans la première couche de la nappe correspondant aux mailles constituant les « zones de sol ». Si aucune maille de la verticale n'est aquifère (perméabilité nulle), l'infiltration est transformée en ruissellement,
- un ruissellement, transféré au cours du même pas de temps vers le tronçon de rivière du réseau hydrographique :
 - situé en aval si on dispose des directions de ruissellement calculées à partir du MNT,
 - le plus proche, si on ne dispose pas des directions de ruissellement.
- En l'absence de réseau hydrographique, le ruissellement est infiltré dans la nappe.

Couplage avec le calcul hydrodynamique de la nappe :

Les calculs de bilan hydroclimatique sont réalisés à chaque pas de temps. Dans un but d'efficacité en temps de calcul, les calculs hydrodynamiques de l'aquifère peuvent ne pas être réactualisés à chaque pas de temps. Pendant les pas de temps intermédiaires, sans calcul hydrodynamique de nappe, les niveaux de nappe sont considérés comme inchangés et les éventuels débits de débordement de la nappe vers les rivières restent constants. La somme des échanges est appliquée à la nappe lors du prochain pas de calcul hydrodynamique.

Le modèle affiné reprend le principe de couplage entre les calculs hydroclimatiques et les calculs hydrodynamiques, à savoir que les calculs hydroclimatiques s'effectuent au pas de temps décadaire et les calculs hydrodynamiques au pas de temps mensuel.

7.2.2 Paramètres nécessaires à la modélisation

Pour estimer les flux de recharge des nappes et les flux de ruissellement, plusieurs paramètres ou variables sont nécessaires :

- la pluviométrie ;
- l'évapotranspiration potentielle ;
- des paramètres associés au processus de recharge qui permettent, à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, i) de calculer la pluie efficace, ii) de définir la distribution de la pluie efficace entre écoulements de surface et écoulements souterrains, et iii) de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, induit par la traversée de la zone non saturée.

Les flux de pluie et les flux d'ETP sont renseignés par « zone météo », dans des fichiers séparés pour faciliter l'introduction et la mise à jour des données. Ainsi, pour chaque « zone météo », la pluie et l'évapotranspiration sont extraites des chroniques météorologiques locales. Ces chroniques proviennent des données collectées par Météo-France aux différentes stations météorologiques de la zone d'étude.

Les paramètres caractérisant le processus de recharge (capacité de stockage du sol, partition de la pluie efficace entre ruissellement et infiltration, temps de demi-percolation) sont assignés par « zone de sol ». Comme ces jeux de paramètres de recharge ne peuvent être déduits de mesures de terrain, ils doivent être évalués au cours de la phase de calage du modèle. Un jeu de paramètres initial peut aussi être évalué à partir de simulations préalables effectuées à l'aide du logiciel GARDENIA ; cette option a été mise en œuvre pour le modèle affiné.

Les paramètres de recharge utilisés pour le modèle affiné ont été modifiés par rapport à ceux du modèle régional. Les principes méthodologiques et les paramètres caractéristiques relatifs au calcul de la recharge sont rappelés dans les paragraphes suivants. Les données nécessaires ont été actualisées jusqu'à fin 2012.

7.2.3 Paramètres climatiques

Stations pluviométriques utilisées

Seize stations météorologiques ont été retenues pour la zone modélisée (Figure 91). Le choix des stations météorologiques de référence a été discuté dans les rapports précédents (Buscarlet et Pickaert, 2011), sur la base des données disponibles et de leur fiabilité. Les données ont été actualisées jusqu'à fin 2012 à partir de la base de données de Météo-France (« la publithèque »).

Le Tableau 6 présente la liste des stations pluviométriques utilisées ainsi que leur moyenne annuelle interannuelle sur la période de modélisation. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 680 mm (station Escaudoeuvres) à 1000 mm (Attin, Marconelle).

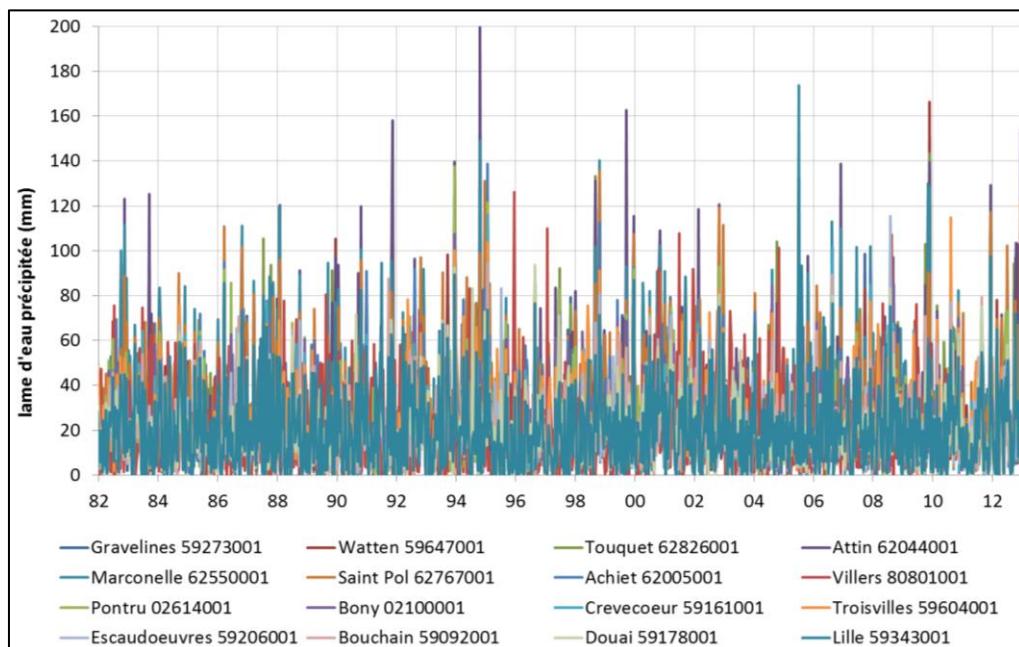


Figure 91 : Chroniques pluviométriques des stations sélectionnées.

Nom	Code Station	Pluviométrie moyenne annuelle (mm/an) (1982-2012)
Gravelines	59273001	752.6
Watten	59647001	796.4
Touquet	62826001	875.1
Attin	62044001	998.4
Marconelle	62550001	1003.4 [*]
Saint Pol	62767001	957.0
Achiet	62005001	793.2
Villers	80801001	735.8
Pontru	2614001	740.9
Bony	2100001	744.7
Crevecoeur	59161001	720.7
Troisvilles	59604001	781.7
Escaudoeuvres	59206001	682.9
Bouchain	59092001	698.9
Douai	59178001	718.4
Lille	59343001	739.9

* : moyenne 1982-2011 pour la station de la Marconelle

Tableau 6 : Liste des stations pluviométriques utilisées dans le modèle.

La station pluviométrique de Marconelle étant arrêtée depuis le 05/01/2011, une analyse corrélatoire a été effectuée pour compléter les données manquantes. Comme le montrent les coefficients de corrélation entre stations indiqués au Tableau 7, la station la mieux corrélée avec Marconelle est la station de Saint-Pol. Les données de Marconelle ont donc été complétées en utilisant les données de la station Saint-Pol, affectées d'un facteur correctif 1.04 (Figure 92).

Gravelines	Watten	Touquet	Attin	Saint Pol	Achiet	Villers	Pontru	Bony	Crevecoeur	Troisvilles	Escaudoeuvres	Bouchain	Douai	Lille
0.58	0.67	0.72	0.80	0.88	0.68	0.47	0.53	0.56	0.53	0.56	0.52	0.52	0.59	0.63

Tableau 7 : Valeurs des coefficients de corrélation par rapport à la station Marconelle.

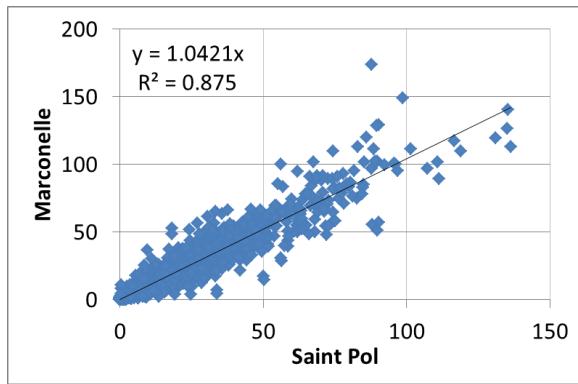


Figure 92 : Corrélation des données pluviométriques décennales (de 1982 à 2011) entre les stations de Marconelle et de Saint-Pol.

En s'appuyant sur l'adéquation des normales annuelles avec les isohyètes, et en complétant les zones d'influence des stations météorologiques avec la méthode des polygones de Thiessen, le modèle a été découpé en 16 zones météorologiques (Figure 93). Dans une zone météorologique, toutes les mailles reçoivent les mêmes précipitations.

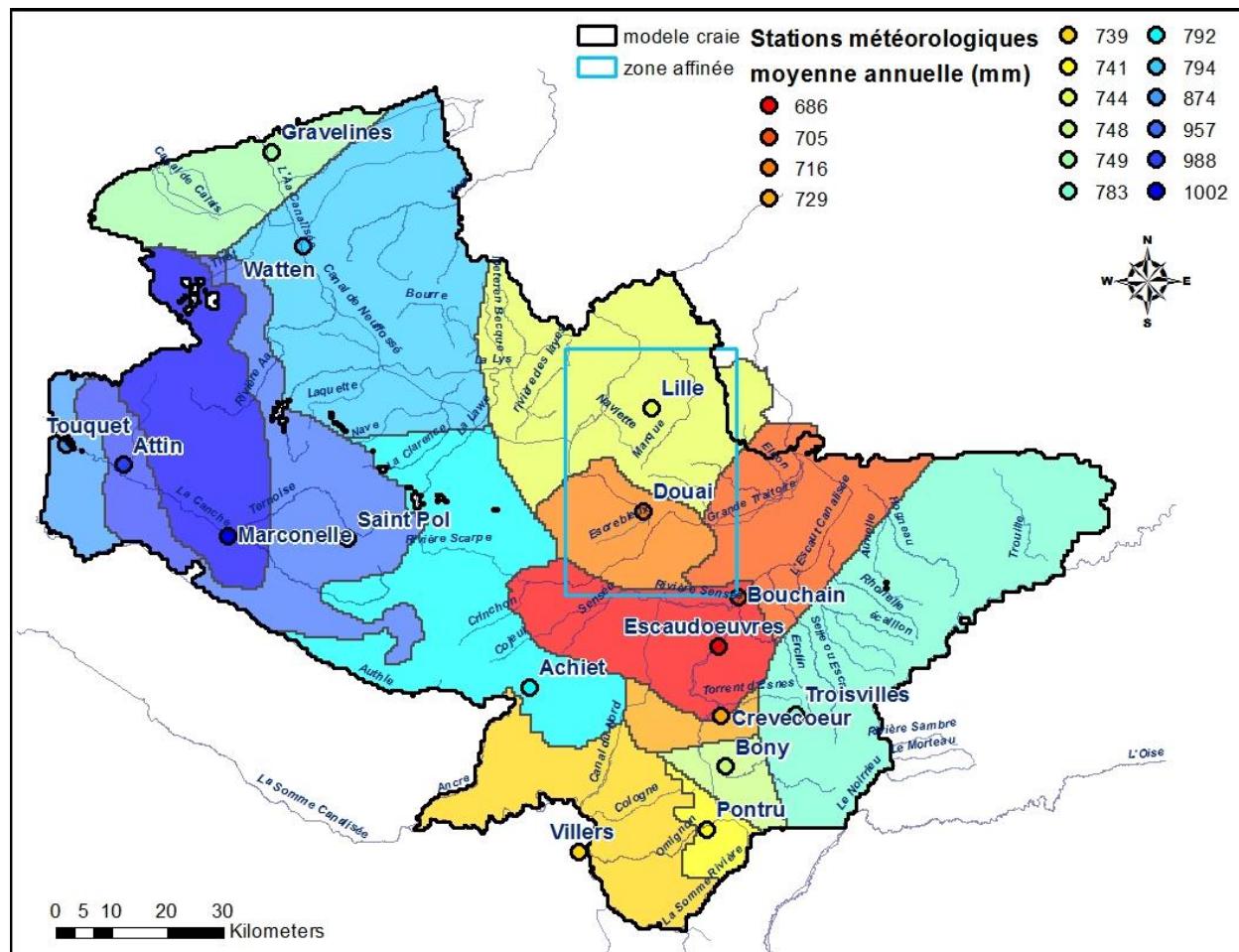


Figure 93 : Répartition spatiale en zones de précipitations homogènes.

Stations d'évapotranspiration potentielle utilisées

Quatre stations ont été retenues pour fournir les chroniques d'évapotranspiration potentielle (ETP) décennales du domaine modélisé : Le Touquet, Abbeville, Saint-Quentin et Lille (Figure 94). Le Tableau 8 donne les valeurs moyennes interannuelles des stations ETP sur la période de simulation.

Par rapport au modèle régional, les données ont été corrigées de 2008 à 2010 et actualisées de 2010 à 2012 d'après la publithèque de Météo-France.

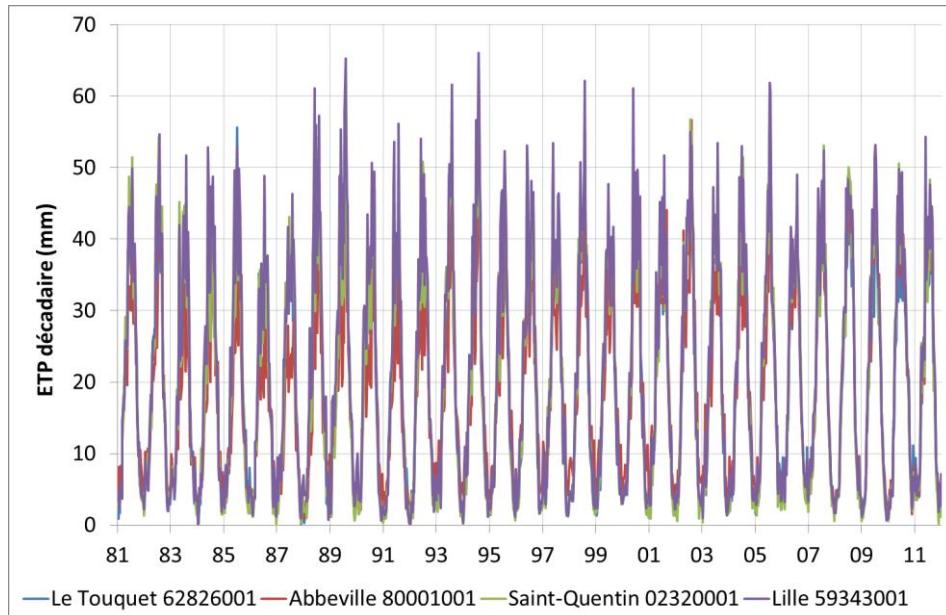


Figure 94 : Chroniques des stations ETP sélectionnées.

Nom	Code Station	ETP annuelle moyenne en mm (1982-2012)
Le Touquet	62826001	689.6
Abbeville	80001001	668.5
Saint-Quentin	2320001	717.1
Lille	59343001	761.3

Tableau 8 : Caractéristiques des stations ETP utilisées dans le modèle.

Les données ETP ont été ventilées en fonction de leur localisation géographique dans les mêmes zones météorologiques que les précipitations, selon la distribution indiquée à la Figure 95.

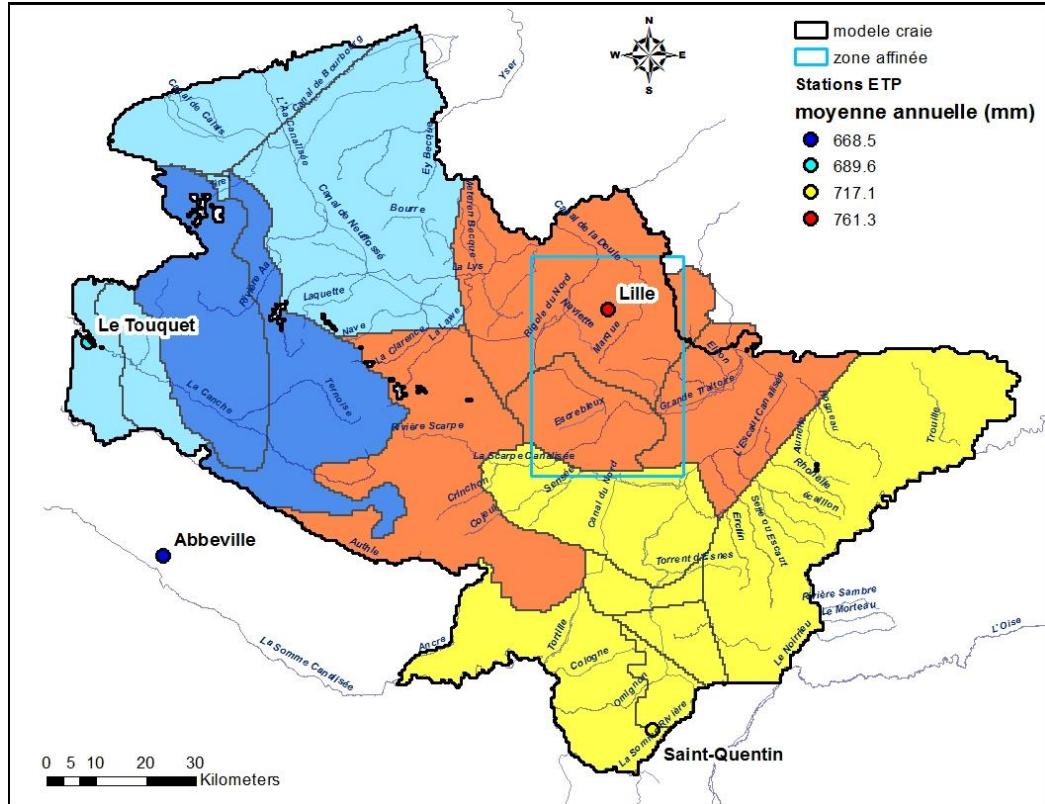


Figure 95 : Répartition spatiale en zones d'évapotranspiration potentielle homogène.

7.2.4 Paramètres de recharge

Le bilan hydroclimatique de MARTHE est basé sur le schéma GARDÉNIA, avec les mêmes paramètres de sol. Ceux-ci dépendent de la nature du recouvrement de surface et des possibilités plus ou moins importantes de stockage de l'eau dans le sol.

Les caractéristiques du sol sont définies par « zone de sol » dans le modèle MARTHE, de la façon suivante :

- Capacité du réservoir « sol » progressif du bilan GARDÉNIA :
CAP_SOL_PROG ;
- Coefficient Correcteur global d'ETP (%) :
CORR_ETP ;
- Coefficient Correcteur global de la pluie (%) :
CORREC_PLUIE ;
- Niveau d'Équi-Ruisseau/Percolation :
EQU_RUIS_PERC (= *RUIPER*) ;
- Temps de $\frac{1}{2}$ Percolation = temps nécessaire pour une $\frac{1}{2}$ vidange du réservoir « zone non saturée » vers la nappe, exprimé en unité de durée hydroclimatique :
T_DEMI_PERCOL (= *THG*) .

La Figure 96 montre la délimitation des zones de sol utilisées pour le calcul du bilan hydrique dans le modèle Craie affiné.

À partir des résultats de la modélisation des bassins versants à l'aide de GARDENIA, présentés dans le Tableau 9, les paramètres de sol ont été étendus à l'ensemble de la zone d'étude en fonction de la nature des sols. Ces paramètres ont toutefois été modifiés dans le modèle affiné afin de réduire les vastes zones de débordement du modèle. L'idée est donc de favoriser le ruissellement pour diminuer la recharge dans les couches superficielles (alluvions et limons) sur les zones concernées : zones de sol 4, 114, 107, 1, 3, 5 et 118. Cette opération a été possible en augmentant les valeurs *CAP_SOL_PROG* et en diminuant les valeurs *RUIPER*.

Le Tableau 10 synthétise les paramètres de sol utilisé dans le modèle affiné.

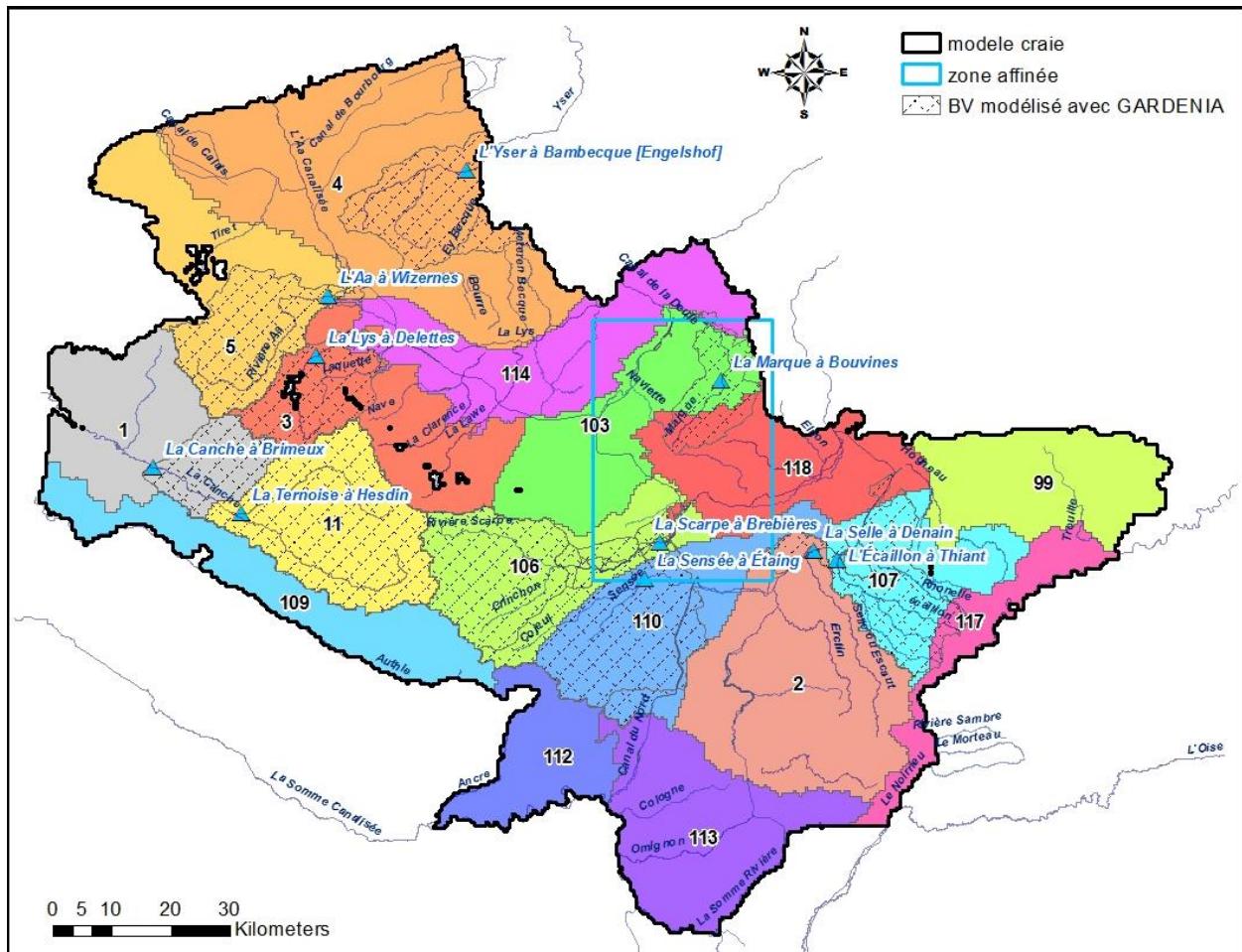


Figure 96 : Répartition spatiale des paramètres du bilan hydrique selon les « zones de sol », avec la numérotation adoptée dans le modèle Craie affiné.

Zones de sol (modèle MARTHE)	Caractéristiques du bassin versant modélisé avec GARDENIA					Paramètres de recharge				
	Station hydrométrique	Piézomètre	Pluie	ETP	Surface du bassin (km ²)	Correction de la pluie (%)	CORR_ETP (%)	CAP_SOI_PROG (mm)	EQU_RUIS_PERC (mm)	T_DEMI_PERCOL (mois)
106 110	E2071105 La Scarpe à Brébières	00263X0129	Saint Pol	Lille	473	0	0	236	9500	1.14
112	E1566010 La Sensée à Etaing	00275X0005	Achiet	Lille	299	0	0	239	3186	0.32
107 117 118	E1727510 L'Ecaillon à Thiant	00284X0701/PZ1	Troisvilles	Lille	173	0	0	157	130	0.30
11 113	E5406510 La Ternoise à Hesdin	00251X0013	Saint Pol	Abbeville	342	0	0	30	5500	0.05
2	E1726020 La Selle à Denain	00286X0405/PZS T2	Achiet	Saint Quentin	252	11.6	6.4	125	408	19.3
3	E3511220 La Lys à Delettes	00125X0080	Saint Pol	Lille	158	0*	0*	125	126	1.7
4 114 99	E4905710 L'Yser à Bambecque	-	Watten	Abbeville	342	0*	0*	347	13	0.7
5	E4035710 L'Aa à Wizernes	00113X0002	Saint Pol	Abbeville	392	-3.7	-15	44	226	2.8
103	E3346010 La Marque à Bouvines	00204B0115/P1	Lille	Lille	135	-1.5	-6.3	109	37	1.6
1 109	E5400310 La Canche à Brimeux	00175X0014/S1	Saint Pol	Abbeville	894	0	0	32	9000	0.03

* modifié par rapport aux résultats des modélisations Gardénia

Tableau 9 : Paramètres de recharge pris en compte dans le modèle Craie régional.

Zones de sol (modèle MARTHE)	Caractéristiques du bassin versant modélisé avec GARDENIA					Paramètres de recharge				
	Station hydrométrique	Piézomètre	Pluie	ETP	Surface du bassin (km ²)	Correction de la pluie (%)	CORR_ETP (%)	CAP_SOI_PROG (mm)	EQU_RUIS_PERC (mm)	T_DEMI_PERCOL (mois)
106 110	E2071105 La Scarpe à Brébières	00263X0129	Saint Pol	Lille	473	0	0	236	9500	1.14
112	E1566010 La Sensée à Etaing	00275X0005	Achiet	Lille	299	0	0	239	3186	0.32
107	E1727510 L'Ecaillon à Thiant	00284X0701/PZ1	Troisvilles	Lille	173	0	0	400*	10*	0.30
117	E1727510 L'Ecaillon à Thiant	00284X0701/PZ1	Troisvilles	Lille	173	0	0	157	130	0.30
118	E1727510 L'Ecaillon à Thiant	00284X0701/PZ1	Troisvilles	Lille	173	0	0	200*	50*	0.30
11 113	E5406510 La Ternoise à Hesdin	00251X0013	Saint Pol	Abbeville	342	0	0	30	5500	0.05
2	E1726020 La Selle à Denain	00286X0405/PZS T2	Achiet	Saint Quentin	252	11.6	6.4	125	408	19.3
3	E3511220 La Lys à Delettes	00125X0080	Saint Pol	Lille	158	0	0	200*	50*	1.7
4 114	E4905710 L'Yser à Bambecque	-	Watten	Abbeville	342	0	0	500*	0.3*	14*
99	E4905710 L'Yser à Bambecque	-	Watten	Abbeville	342	0	0	347	13	0.7
5	E4035710 L'Aa à Wizernes	00113X0002	Saint Pol	Abbeville	392	-3.7	-15	100*	100*	2.8
103	E3346010 La Marque à Bouvines	00204B0115/P1	Lille	Lille	135	-1.5	-6.3	109	37	1.6
109	E5400310 La Canche à Brimeux	00175X0014/S1	Saint Pol	Abbeville	894	0	0	32	9000	0.03
1	E5400310 La Canche à Brimeux	00175X0014/S1	Saint Pol	Abbeville	894	0	0	60*	900*	0.03

* modifié par rapport au modèle régional

Tableau 10 : Paramètres de recharge pris en compte dans le modèle Craie affiné.

7.3 MODIFICATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

7.3.1 Principe d'intégration des relations nappe-rivière dans le modèle MARTHE

Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents. Un tronçon constitue en fait une « maille rivière » en relation avec une maille du modèle d'écoulement souterrain.

L'ensemble du réseau hydrographique est pris en compte dans le modèle pour permettre l'évacuation des eaux de ruissellement (les eaux qui ruissellent sont transférées à la maille rivière la plus proche) et de débordement, avec la possibilité d'être réinfiltrées dans la nappe *via* les échanges nappe-rivière. Le réseau hydrographique est totalement couplé avec les aquifères.

Dans chaque affluent, les données de rivière sont définies par tronçon. L'arbre de branchement agence les affluents entre eux pour former le réseau hydrographique. Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par ses propriétés physiques (rugosité du lit, pente du lit, épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes sources (pompages ou injections) et par son état (hauteur d'eau dans la rivière).

Le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre de tous les termes de débits : amont, aval, échanges avec l'aquifère, ruissellement, termes sources et, lorsque le routage est pris en compte, terme de stockage. De cette manière, le débit aval dans la rivière résulte de la somme des termes de débit moins le stockage. Le débit dans tout le réseau hydrographique est alors obtenu par un processus itératif de manière optimale. Par défaut, les calculs des débits des cours d'eau sont réalisés aux mêmes pas de temps que les calculs de nappe. Les éventuels débits de débordement de nappe, calculés en dehors du réseau hydrographique, sont transférés au premier tronçon de rivière rencontré en aval de ce débordement, ou à défaut de directions de ruissellement, au tronçon le plus proche. (NB : en l'absence de réseau hydrographique, le débit de débordement de nappe quitterait l'hydrosystème et n'aurait plus la possibilité d'être échangé avec l'aquifère).

Selon la position relative de la ligne d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

7.3.2 Modifications apportées au modèle régional

Le réseau hydrographique a été mieux décrit dans la zone affinée afin de favoriser les échanges nappe-rivière dans cette zone d'intérêt. La Figure 97 illustre les modifications apportées dans la zone à affiner. L'ancien réseau hydrographique est représenté en vert sur la Figure 97, et le réseau hydrographique du modèle affiné en bleu. Les cours d'eau suivants ont été ajoutés :

- la Becque du Corbeau,
- la Naviette,
- le Zecart,
- le courant de Coutiches,
- la Souchez,
- le canal de Lens,
- les tronçons amont et aval du Canal de la Deûle.

Le réseau hydrographique a été totalement reconstruit après l'introduction du maillage gigogne (avec des mailles de 100 m x 100 m) dans la zone affinée. Ces modifications ont conduit à redéfinir l'arbre de branchement permettant de connecter les différents cours d'eau entre eux, et à reprendre la numérotation des affluents et des tronçons décrivant le réseau hydrographique.

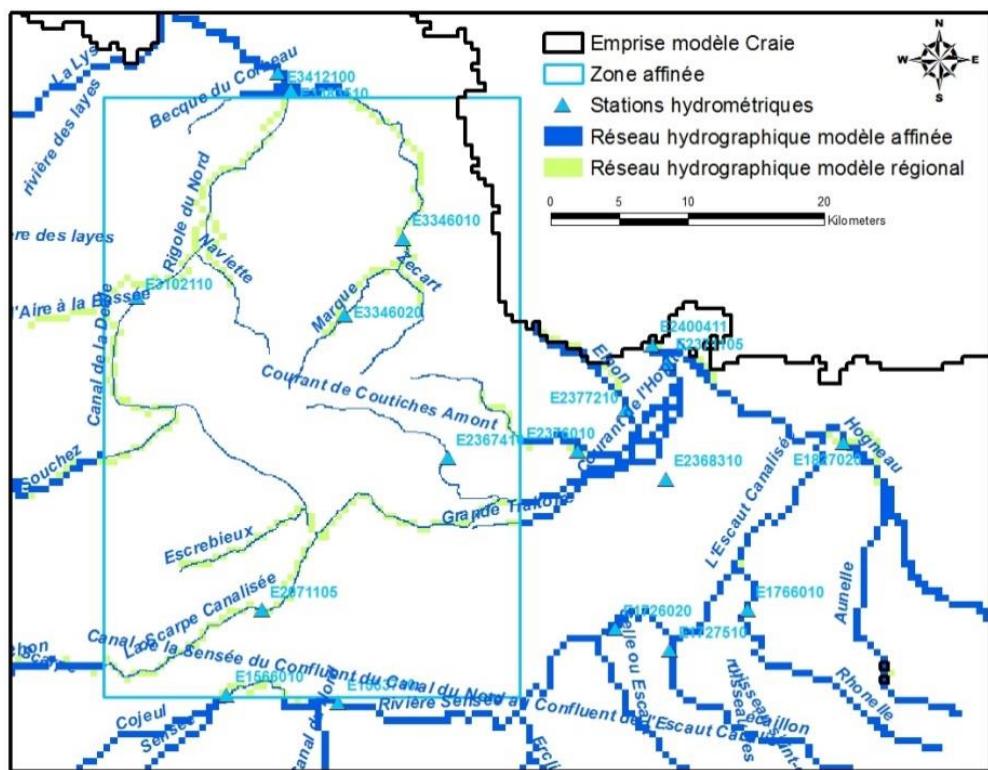


Figure 97 : Modification du réseau hydrographique modélisé dans la zone affinée.

7.3.3 Paramètres pris en compte dans le modèle régional et affiné

Chaque tronçon est défini par les paramètres suivants :

- la longueur de chaque tronçon a été calculée par intersection du segment de la ligne d'eau avec la maille du modèle ;
 - la largeur des tronçons varie entre 10 et 50 m suivant l'importance de la rivière ;
 - la cote absolue du fil de l'eau dans la rivière est définie comme le point le plus bas du MNT au pas de 50 m (BD ALTI) ;
 - la cote du fond de la rivière est déterminée à partir de la cote du fil de l'eau déduite de 1 m. En régime transitoire, la hauteur d'eau dans la rivière est recalculée à chaque pas de temps ;
 - Peu d'informations sont disponibles sur l'épaisseur du lit, arbitrairement fixée à 0,5 m, ni sur la perméabilité des berges, que l'on choisit initialement à 10^{-5} m/s. Ce paramètre est utilisé par la suite comme paramètre de calage pour reproduire les débits observés dans les rivières.

7.4 POMPAGES

7.4.1 Prélèvements en nappe

Les prélèvements ont déjà été décrits au chapitre 4 de ce rapport.

Quelques graphiques complémentaires sont fournis ici pour comparer les ordres de grandeur des prélèvements dans les différentes couches aquifères (Figure 98). On observe que les prélèvements dans la nappe de la Craie sont largement supérieurs (de 7 à 10 fois) à ceux des autres couches du modèle.

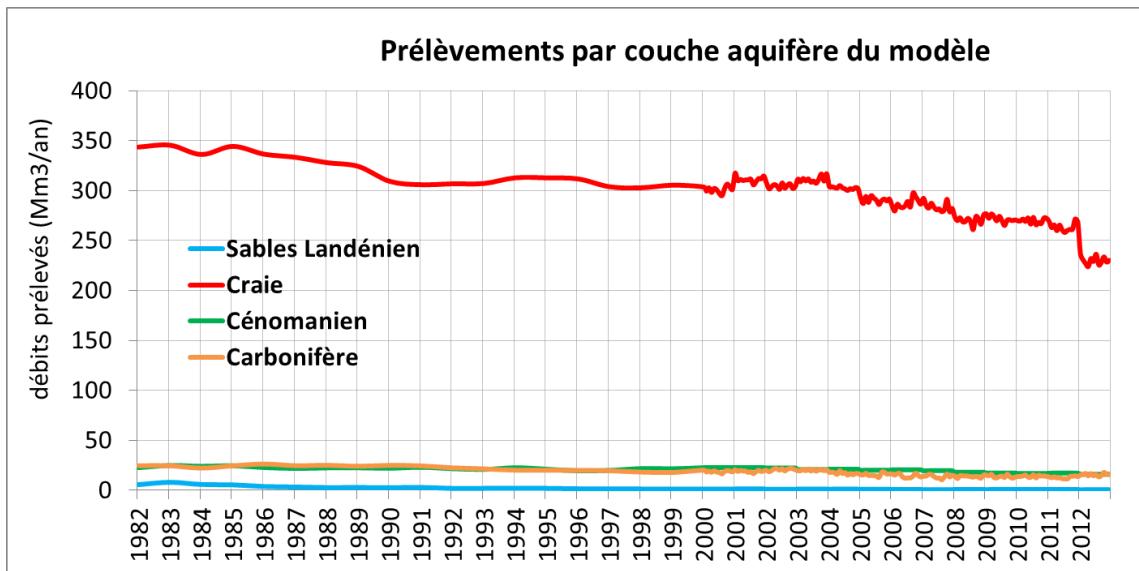


Figure 98 : Prélèvements par couche aquifère du modèle.

La Figure 99 compare la somme des prélèvements dans les nappes de la Craie du Séno-Turonien et des Calcaires du Carbonifère sur l'ensemble du modèle (graphique du haut), puis, uniquement dans la zone des champs captants (graphique du bas).

La somme des prélèvements dans la nappe de la Craie sur la zone des champs captants est relativement constante (autour de 50 Mm³/an) alors qu'il y a une tendance à la baisse sur l'ensemble du modèle (de 350 Mm³/an en 1982 à 230 Mm³/an en 2012).

De même, pour la nappe des Calcaires du Carbonifère, la somme des prélèvements pris en compte sur l'ensemble du modèle présente une large tendance à la baisse : les prélèvements diminuent pratiquement de moitié entre 1982 et 2011 (de 25 Mm³/an à moins de 15 Mm³/an), puis semblent augmenter après 2011. Cependant, les prélèvements dans les champs captants ne montrent pas vraiment de diminution mais oscillent plutôt autour de 12 Mm³/an. Pour cette nappe, l'écart des prélèvements sur l'ensemble du modèle et dans les champs captants se réduit fortement entre 1982 et 2012.

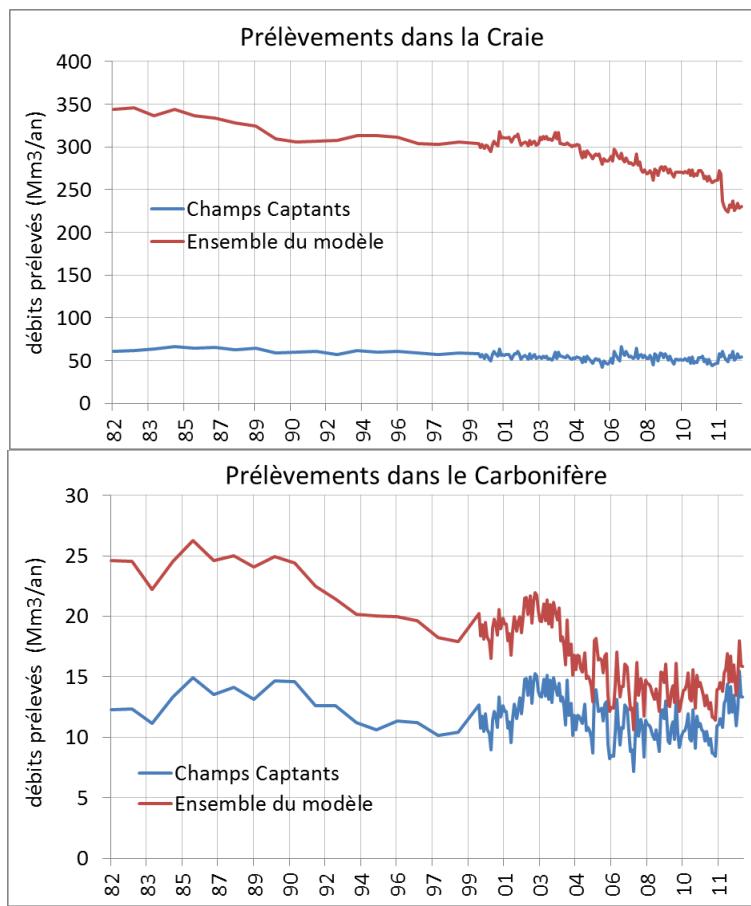


Figure 99 : Comparaison des prélèvements sur l'ensemble du modèle et dans les champs captants pour la nappe de la Craie du Séno-Turonien et celle des Calcaires du Carbonifère.

Dans le modèle affiné, on peut noter un accroissement des prélèvements totaux pris en compte par rapport au modèle régional. En moyenne sur le modèle, la hausse s'élève environ à 10% des prélèvements totaux comme le montre la Figure 100. Les différences se situent essentiellement au niveau des champs captants d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne. Ces écarts sont probablement liés à une prise en compte plus exhaustive des données de prélèvements dans cette étude.

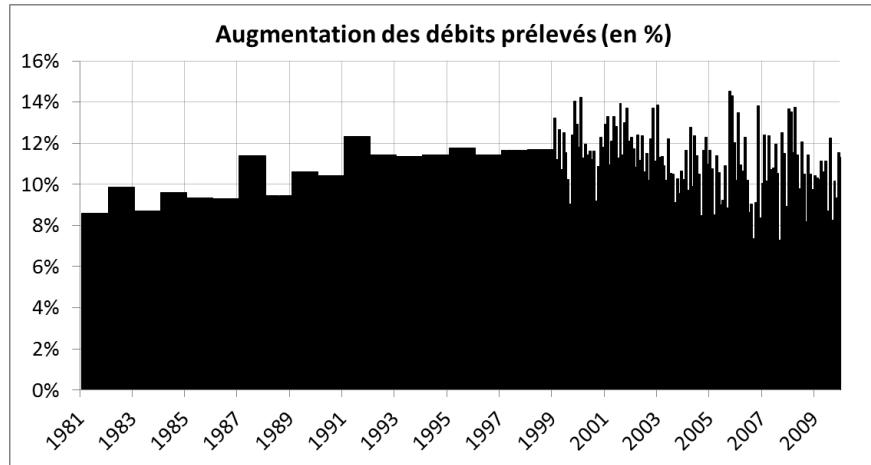


Figure 100 : Pourcentage d'augmentation des débits prélevés dans le modèle affiné par rapport au modèle régional.

7.4.2 Prélèvements en rivière

Le modèle affiné reprend les mêmes hypothèses que le modèle régional concernant les prélèvements en rivière. A savoir qu'à l'exception de la prise d'eau de la Lys, seul captage AEP d'eau superficielle de la zone modélisée, les prélèvements en rivière seront négligés. Ils sont faibles en ordre de grandeur par rapport aux débits des rivières sollicitées, et de ce fait, leurs impacts sur l'hydrodynamique de la nappe de la Craie sont considérés comme nuls.

7.5 COUPLAGE AVEC LE MODELE DES CALCAIRES CARBONIFERES

7.5.1 La nappe des Calcaires carbonifères

Ecoulements

L'écoulement de la nappe des Calcaires du Carbonifère peut être différencié en plusieurs zones. Une zone Nord-Ouest où la nappe est fortement rabattue, une zone centrale Sud où un dôme piézométrique marqué est observé, une zone centrale Sud-Nord où la nappe est drainée par l'Escaut, une zone de carrière où les rabattements sont importants, une zone d'écoulement Sud-Est – Nord-Ouest de la Dendre Orientale vers la zone des carrières.

- la majorité des écoulements s'effectue suivant un sens Est-Ouest, depuis la Belgique où la nappe est libre jusqu'en France où elle devient captive et particulièrement productive ;
- la forte dépression engendrée par les pompages carriers à hauteur de Tournai ne semble pas remettre en cause cette orientation générale au-delà d'un rayon de 5 km autour des carrières ;
- au Sud de Lille, un compartiment du Carbonifère présente une faible productivité et apparaît comme faiblement connecté au reste de l'aquifère, en raison de la présence d'une formation peu perméable : les calcschistes de l'Orient (Figure 101) ;
- les zones d'exploitation (carrières du Tournaisis, forages de Roubaix et Mouscron) correspondent actuellement aux points bas de la nappe.

Incertitudes

Les flux dans la partie Sud-Ouest du Carbonifère sont inconnus. Il y a très peu de piézomètres dans cette zone. L'arrêt des prélèvements dans tout le bassin houiller a probablement dû faire remonter les niveaux dans ce secteur.

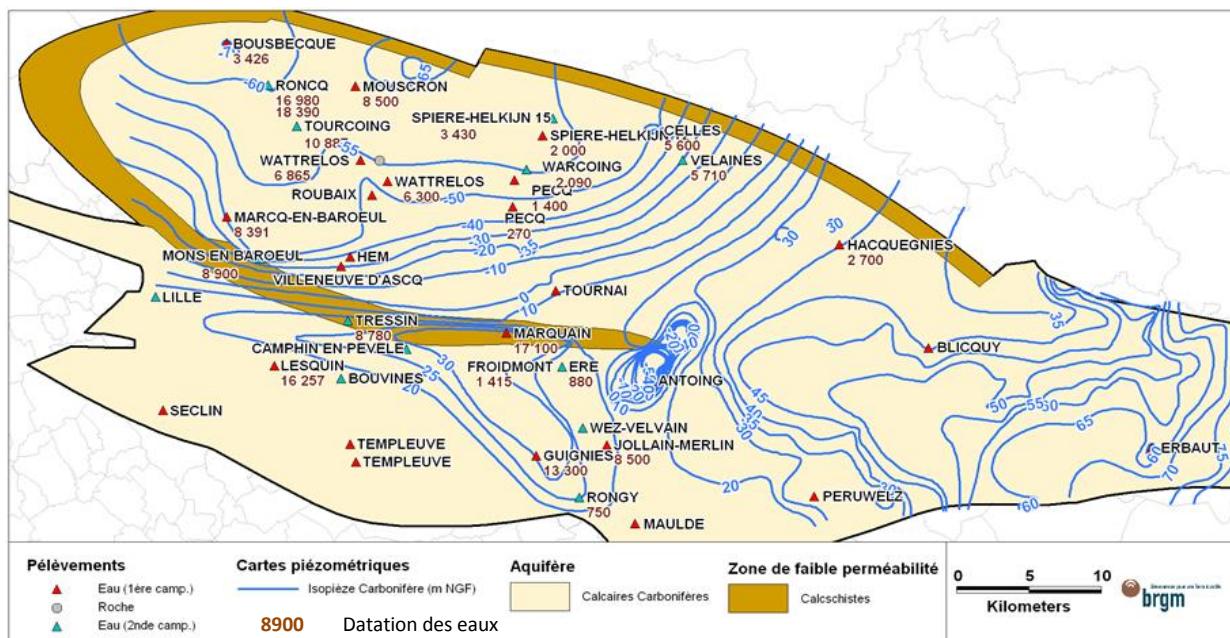


Figure 101 : Situation des points de prélèvement et résultats de la datation des eaux des Calcaires carbonifères réalisée en 2011, sur fond de carte piézométrique d'octobre-novembre 2010 (Source : BRGM).

7.5.2 Rappel des caractéristiques du modèle Carbonifère

Localisation

La Figure 102 montre la zone de contact entre les aquifères de la Craie du Séno-Turonien et des Calcaires du Carbonifère.

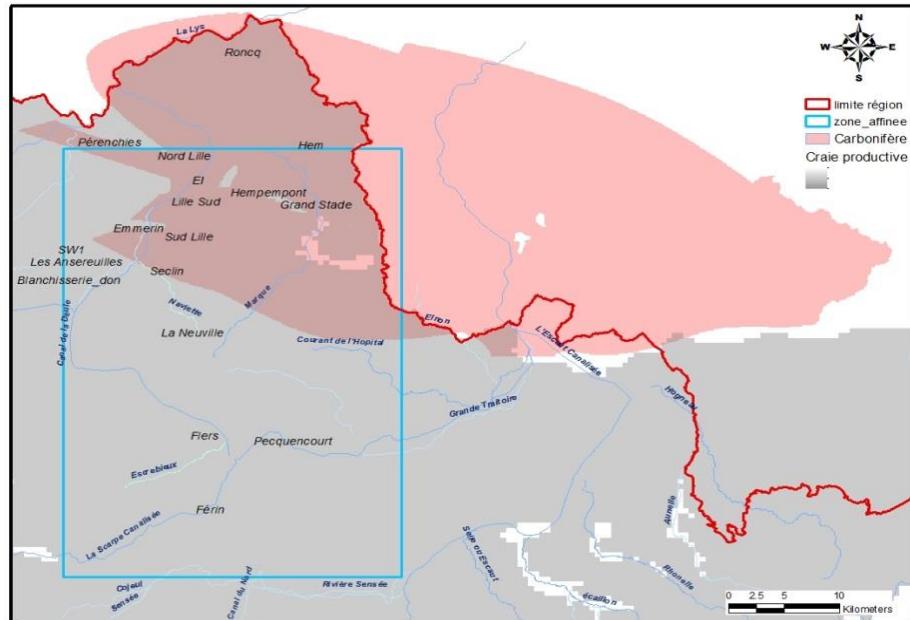


Figure 102 : Superposition des modèles de la Craie (en gris) et des Calcaires du Carbonifère (en rose) et localisation par rapport à la zone affinée.

Géométrie du modèle Carbonifère

Horizontalement, le modèle s'étend sur 84.2 km selon la direction E-W et sur 35.3 km selon la direction N-S. Le modèle est discrétré horizontalement par des mailles carrées de 100 m de côté. Le modèle Carbonifère est discrétré verticalement en 4 couches à partir du modèle géologique (Picot, 2012) :

- la première couche rassemble les terrains tertiaires et quaternaires plus ou moins perméables et pouvant localement être aquifères ;
- la deuxième couche représente les terrains secondaires crayeux aquifères ;
- la troisième couche symbolise les terrains marneux secondaires aquiclades, connus sous le terme de « Dièves » ;
- la quatrième couche forme la partie aquifère des Calcaires carbonifères (d'une épaisseur considérée de 50 m).

Conditions aux limites du modèle Carbonifère

Représentation de la nappe de la Craie séno-turonienne dans le modèle Carbonifère

La piézométrie de la nappe de la Craie a été considérée invariante pendant la période modélisée (1900-2010). Cela permet de respecter une piézométrie réaliste pour cet aquifère pendant la période actuelle, sans devoir prendre en compte, d'une part, l'ensemble des prélèvements dans l'aquifère de la Craie, d'autre part, l'extension globale du bassin hydrogéologique, ou des conditions de flux imposées sur des limites artificielles. La nappe de la Craie est donc représentée par une couche de mailles à potentiel imposé.

La piézométrie choisie pour la nappe de la Craie (appliquée ici à la couche 2 du modèle) est issue des calculs du modèle régional de la Craie en période de hautes eaux pour l'année 2001. Comme le modèle de la Craie utilise des mailles de 500 m x 500 m, une interpolation a été réalisée afin de fournir une valeur de piézométrie en chacune des mailles de 100 m x 100 m du modèle Carbonifère. Les calculs issus du modèle régional de la Craie couvrant uniquement la partie française du domaine modélisé, une extrapolation a été réalisée sur le reste de l'extension de la couche crayeuse afin de définir des valeurs de piézométrie sur les autres mailles du modèle.

Conditions aux limites de la nappe des Calcaires du Carbonifère dans le modèle Carbonifère

Au Nord et à l'Ouest, le modèle suit les limites hydrogéologiques naturelles, à savoir les schistes, grès et calcaires du Dévonien – considérés comme nettement moins perméables que les Calcaires du Carbonifère.

Au Sud, le secteur modélisé est limité par la faille de Seclin et l'enfoncement des terrains calcaires sous les schistes du Silurien en direction du Sud. En Belgique, cette limite se prolonge le long du bord septentrional du bassin houiller.

A l'Est, la Dendre orientale a été considérée comme une limite à charge imposée. Ceci revient à considérer que tout phénomène de recharge ou de prélèvement situé plus à l'Est de cette limite n'apporte aucune influence sur la piézométrie. Les charges ont été imposées en fonction de la topographie.

Paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle Carbonifère

Le Tableau 11 récapitule les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle Carbonifère. Par rapport au modèle régional de la Craie, la perméabilité des Dièves est plus faible (7.10^{-9} m/s comparativement à 10^{-7} m/s). En outre, dans cette couche, les valeurs du coefficient d'anisotropie vertical sont distribuées spatialement alors qu'il était pris constant à 0.01 dans le modèle de la Craie (Figure 103). Dans la couche des calcaires carbonifères, les perméabilités varient de 8.10^{-3} m/s au Nord-Est à 2.10^{-6} m/s au Sud (Figure 104).

Formation	Propriété	Perméabilité (m/s)	Anisotropie verticale	Emmag libre	Emmag captif spécifique
Craie du Séno-Turonien	Aquifère	10^{-4}	0.1	10^{-2}	10^{-6}
Dièves	Aquitard	7.10^{-9}	de 5.10^{-3} à 0.5	10^{-2}	10^{-5}
Carbonifère	Aquifère	de 8.10^{-3} à 5.10^{-6}	0.1	0.15	10^{-4}

Tableau 11 : Paramètres hydrogéologiques pris en compte dans le modèle Carbonifère.

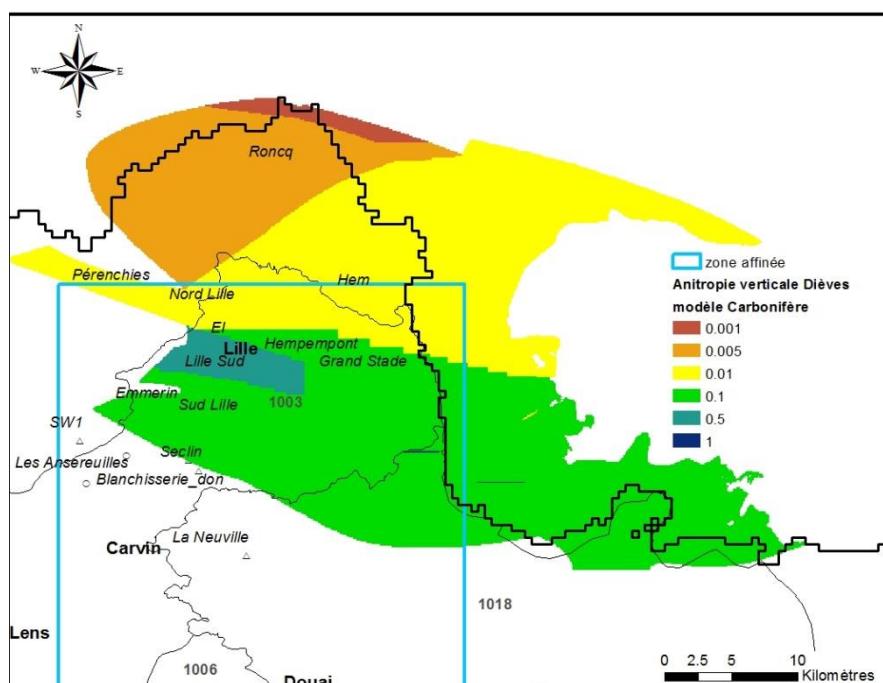


Figure 103 : Valeurs du coefficient d'anisotropie verticale de la couche des Dièves dans le modèle Carbonifère.

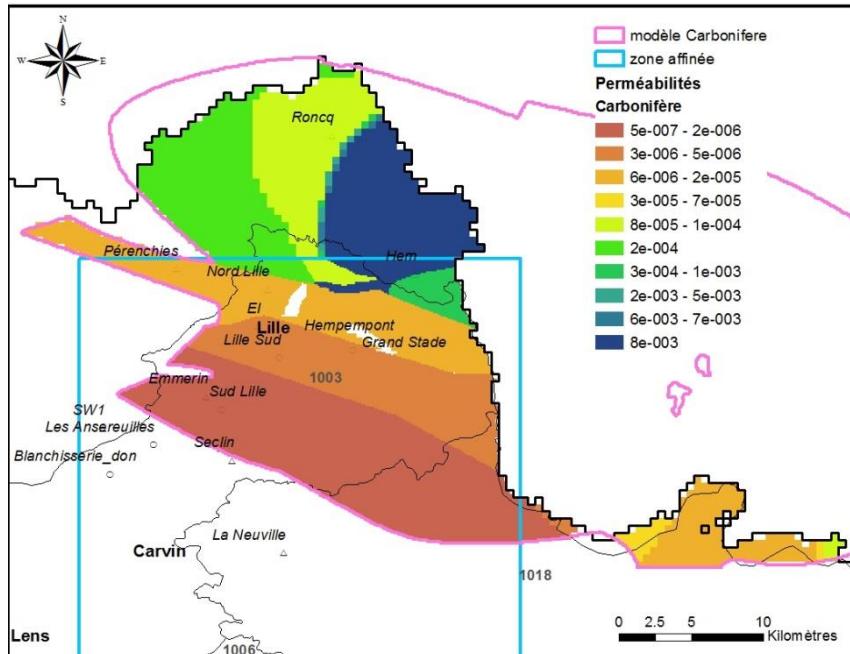


Figure 104 : Perméabilités de la couche des Calcaires du Carbonifère dans le modèle Carbonifère.

Afin d'identifier le comportement des eaux souterraines dans la nappe des Calcaires du Carbonifère, des bilans hydrodynamiques ont été calculés dans la couche 4 qui représente l'aquifère. Ces bilans ont été déterminés en différentes localisations définies comme suit (Figure 105) :

- la zone 401, essentiellement sous recouvrement de la couche 1 argileuse yprésienne peu perméable ;
- la zone 402, essentiellement sous recouvrement de la couche 1 sableuse des terrains du Tertiaire-Quaternaire ;
- la zone 403, exploitée et productive essentiellement sous recouvrement de la couche 3 imperméable des terrains secondaires des Dièves ;
- la zone 404, essentiellement sous recouvrement de la couche 3 perméable des terrains secondaires des Dièves ;
- la zone 405, représentant le bloc sud méconnu, essentiellement sous recouvrement de la couche 3 imperméable des terrains secondaires des Dièves ;
- la zone 777, représentant la zone des carrières où la couche 4 affleure dans le modèle.

L'analyse du modèle montre des comportements différents entre les différentes zones aquifères des Calcaires carbonifères. Ce sont les zones 403 et 405 qui sont principalement en interaction avec la nappe de la Craie. La restitution des résultats, présentés au Tableau 12 et à la Figure 106, se concentre essentiellement sur ces zones.

La drainance verticale n'est pas négligeable pour la zone 403 sous recouvrement des Dièves plus imperméables, mais ce sont les apports d'eau latéraux en provenance de la zone 402 qui alimentent en majorité cette partie captive de l'aquifère (apports 5 fois plus importants que les flux verticaux).

Dans la zone 405, les flux échangés sont largement moins importants que ceux de la zone 403. Ce sont les flux verticaux qui sont prépondérants dans cette zone, même s'ils restent faibles (environ 2% des flux verticaux sur l'ensemble de la couche, pour 12% de la superficie totale).

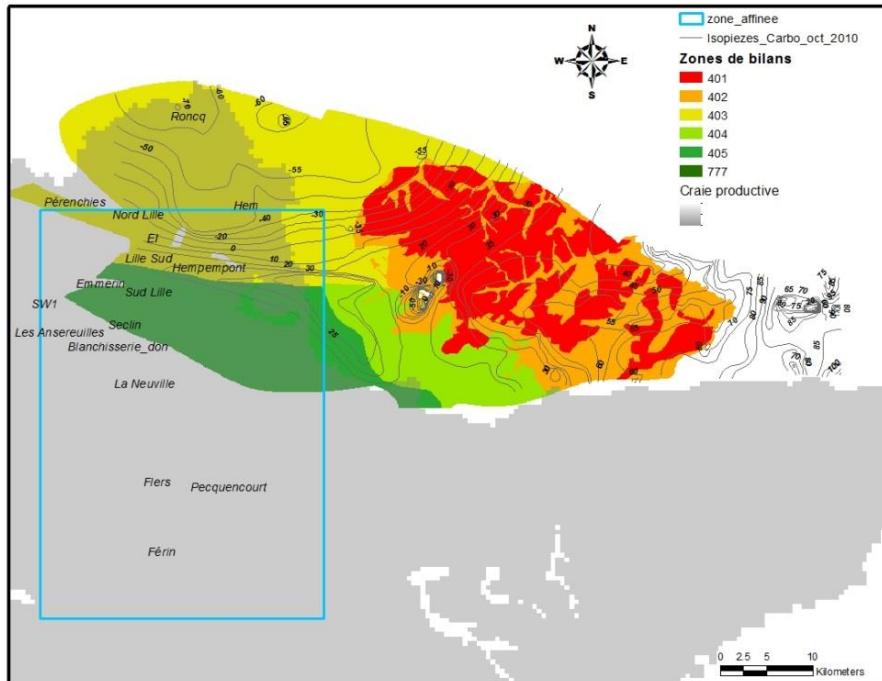


Figure 105 : Zones de calcul des bilans hydrodynamiques de la couche 4 représentant l'aquifère des calcaires du Carbonifère.

Zone 401 sous recouvrement argileux yprésien,
 Zone 402 sous recouvrement tertiaire-quaternaire sableux,
 Zone 403 sous recouvrement secondaire imperméable (Dièves),
 Zone 404 sous recouvrement secondaire perméable,
 Zone 405 représentant le bloc Sud méconnu,
 Zone 777 représentant la zone des carrières.

Zone 403 - Carbonifère surface = 650 km ²	Débits par la limite à potentiel imposé (mm/an)	Prélèvements (mm/an)	Recharge (mm/an)	Débordement (mm/an)	Echanges verticaux (mm/an)	Echanges latéraux (mm/an)	Stockage (mm/an)	Echanges Nappe-Rivière (mm/an)
année sèche - 1997	-	-30.06	-	-	5.06	24.55	-0.46	-
année moyenne - 2003	-	-27.25	-	-	4.92	24.96	2.56	-
année humide - 2008	-	-20.00	-	-	4.29	23.51	7.52	-

Zone 405 - Carbonifère surface = 280 km ²	Débits par la limite à potentiel imposé (mm/an)	Prélèvements (mm/an)	Recharge (mm/an)	Débordement (mm/an)	Echanges verticaux (mm/an)	Echanges latéraux (mm/an)	Stockage (mm/an)	Echanges Nappe-Rivière (mm/an)
année sèche - 1997	-	-0.389	-	-	1.216	-0.838	-0.010	-
année moyenne - 2003	-	-0.433	-	-	1.216	-0.824	-0.017	-
année humide - 2008	-	-0.213	-	-	1.109	-0.900	-0.004	-

Couche 4 - Carbonifère surface = 1672 km ²	Débits par la limite à potentiel imposé (mm/an)	Prélèvements (mm/an)	Recharge (mm/an)	Débordement (mm/an)	Echanges verticaux (mm/an)	Echanges latéraux (mm/an)	Stockage (mm/an)	Echanges Nappe-Rivière (mm/an)
année sèche 1997	3.82	-49.85	4.47	-13.36	45.27	-	-2.01	5.85
année moyenne 2003	2.62	-50.16	6.33	-15.56	49.56	-	-0.57	5.19
année humide 2008	2.04	-42.64	10.81	-17.26	53.09	-	11.96	4.73

Tableau 12 : Bilan des zones 403 et 405, et de l'ensemble de la couche 4 du modèle Carbonifère.

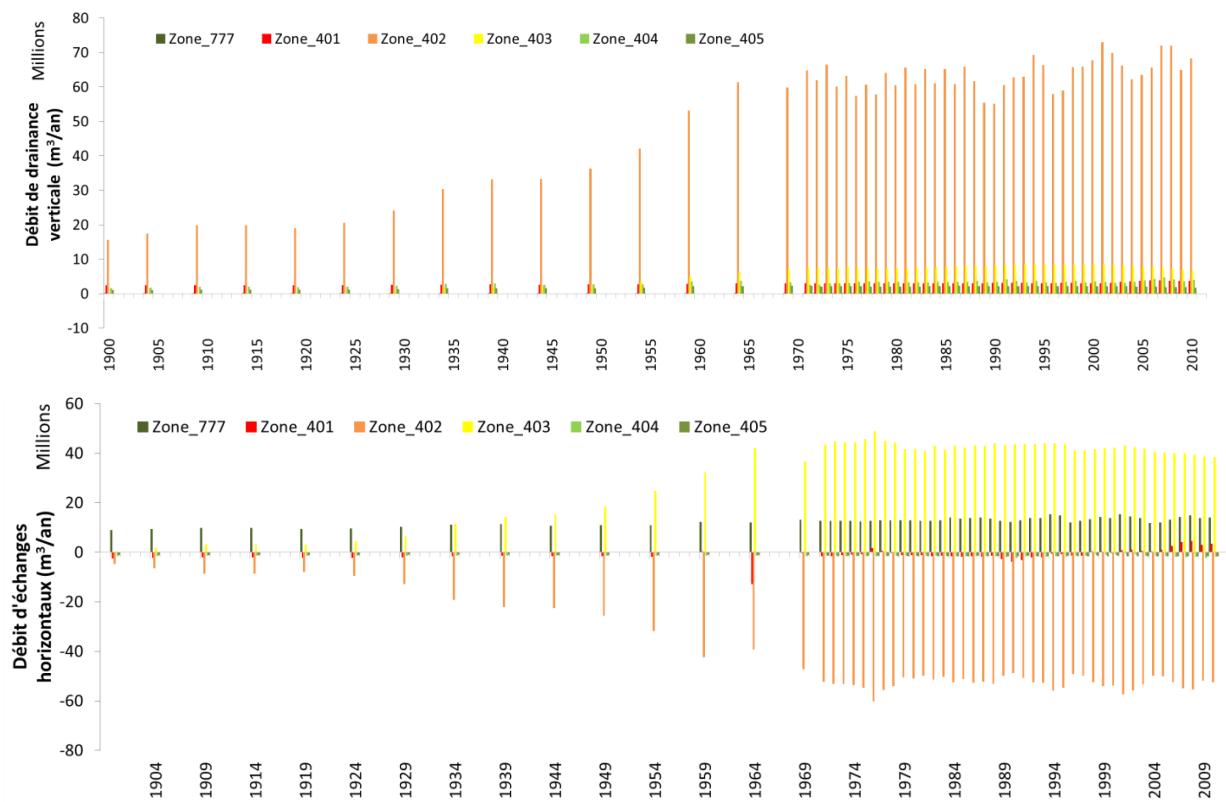


Figure 106 : Evolution des échanges verticaux et latéraux calculés par zone de 1900 à 2010 pour la couche 4 des Calcaires du Carbonifère.

7.5.3 Interfaçage avec le modèle de la Craie

Au regard des enseignements apportés par le modèle Carbonifère, une méthodologie de couplage avec le modèle Craie affiné a été choisie.

Principe du couplage

La démarche adoptée est présentée ci-dessous :

- > *représentation des Calcaires du Carbonifère uniquement sur la partie française,*
- > *charges imposées sur la limite artificielle fermant à l'Est la partie modélisée des Calcaires du Carbonifère*

Il s'agit d'une limite artificielle qui comptabilise environ 280 mailles au total. Les charges calculées directement à partir du modèle Carbonifère sont imposées dans le modèle Craie sur la frontière Est. Compte tenu des variations lentes des charges piézométriques et de la faible inertie de la nappe des Calcaires carbonifères, les charges sont lues une fois par an (au mois de janvier de chaque année) de 1982 à 2011. Pour l'année 2012, les charges sont supposées identiques à l'année 2011.

- > *prise en compte des débits prélevés dans la couche Carbonifère du modèle Craie (couche 10),*
- > *transposition du modèle Carbonifère vers le modèle Craie affiné des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement libre et captif spécifique, anisotropie) de la couche des Dièves et de celle des Calcaires carbonifères.*

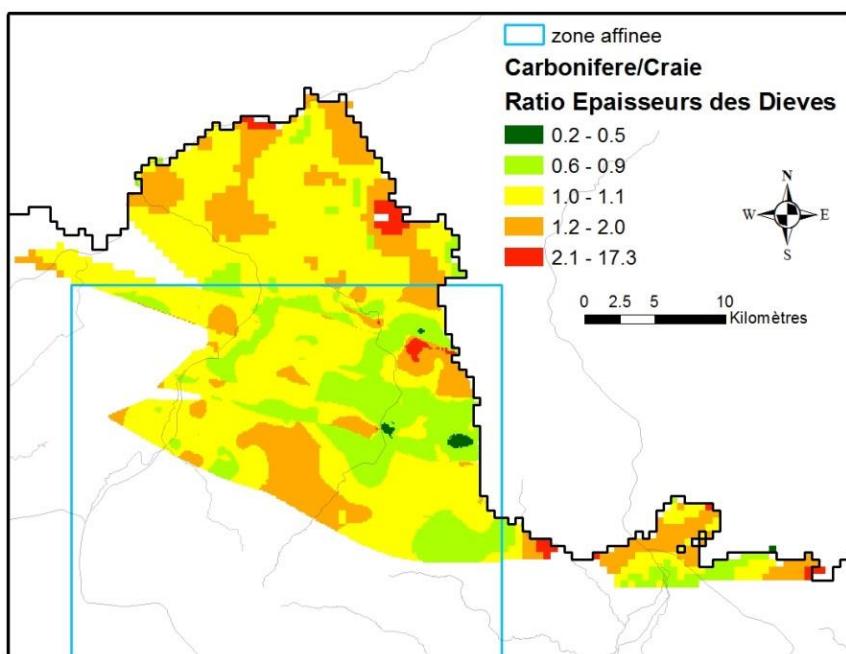
Vérification des hypothèses

Pour valider la méthodologie de couplage, plusieurs contrôles ont été effectués.

Vérification de l'homogénéité de la géométrie entre les deux modèles

Une comparaison des épaisseurs des Dièves prises en compte dans le modèle Carbonifère et dans le modèle Craie affiné a été effectuée afin de vérifier la cohérence de géométrie entre les deux modèles (Figure 107). Le ratio des épaisseurs calculé est proche de 1 sur la majeure partie du domaine d'étude. Dans le modèle Carbonifère, les Dièves sont un peu plus épaisses sur la frontière franco-belge au Nord, hors de la zone affinée (mailles colorées en orange sur la Figure 107). Elles sont moins épaisses sur la partie Nord-Est de la zone affinée (zones vertes).

Dans un premier temps, les valeurs de perméabilité et d'anisotropie verticale ont été transposées au modèle Craie affiné. Des ajustements de ces valeurs ont ensuite été réalisés au cours de la phase de calage.



Vérification des évolutions de la piézométrie des Calcaires du Carbonifère à l'aplomb de la frontière Est

La Figure 108 illustre le tracé de l'évolution des niveaux piézométriques dans chacune des mailles de la frontière Est du Carbonifère (mailles à potentiel imposé). Les niveaux les plus bas se trouvent au Nord et les plus hauts au Sud. Ces niveaux sont relativement stables.

Les niveaux dans les mailles de la moitié nord (niveaux les plus faibles) présentent une baisse lente et progressive de 20 m environ de 1982 à 1997 (15 ans), puis ils remontent de manière quasi-symétrique jusqu'aux dernières années. Une lecture annuelle des niveaux du Carbonifère dans les mailles à potentiel imposé paraît donc satisfaisante pour représenter correctement leur variation dans le modèle de la Craie affiné.

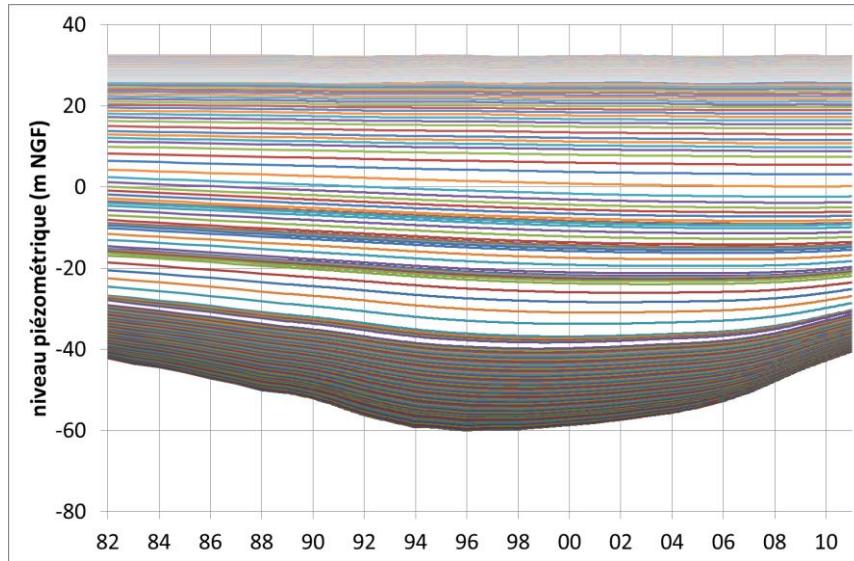
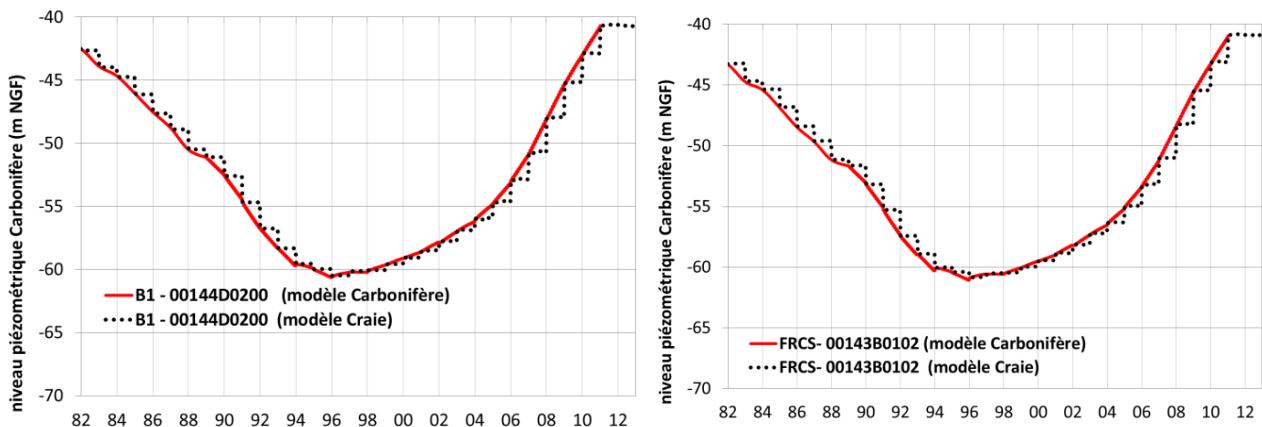


Figure 108 : Variation du niveau piézométrique dans les mailles à potentiel imposé de la frontière Est du Carbonifère.

La Figure 109 compare en deux points les niveaux simulés par le modèle Carbonifère et ceux du modèle de la Craie affiné intégrant les calcaires carbonifères. On vérifie que les niveaux piézométriques simulés sont très similaires, ce qui valide l'hypothèse d'une prise en compte annuelle des niveaux piézométriques sur la frontière orientale pour la représentativité des écoulements dans la nappe du Carbonifère.



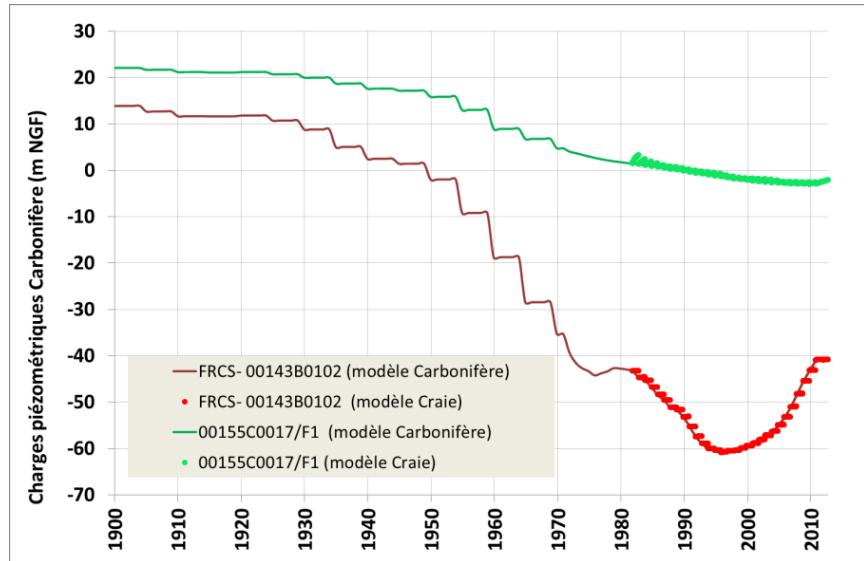


Figure 109 : Comparaison de niveaux simulés avec le modèle Carbonifère et le modèle Craie affiné.

Vérification des ordres de grandeurs des différents flux entre le modèle Carbonifère et le modèle Craie affiné

Une comparaison des débits transitant dans la couche des Calcaires carbonifères a été effectuée entre le modèle Carbonifère et le modèle Craie affiné. Elle est présentée dans le Tableau 13. La somme des débits prélevés ainsi que les débits entrant par la frontière Est sont bien du même ordre de grandeur dans les deux modèles. Il est intéressant également de noter que le débit vertical global (somme des débits entrant et sortant par le haut de la couche) est du même ordre de grandeur pour les deux modèles, entre 6 et 9 Mm³/an ; bien que dans le modèle Carbonifère la couche de la Craie soit à potentiel imposé.

Une équation-bilan antérieure au projet ScaldWIN (Youssof, 1973) avait estimé que la réalimentation, accentuée par la surexploitation de la nappe des Calcaires carbonifères, était équivalente à 30 Mm³/an en 1973 pour une perméabilité verticale de l'ordre de 10⁻⁹ m/s, chiffre à prendre avec précaution puisqu'il dépend des hypothèses de calcul considérées dans l'étude.

Débits (m ³ /s)	Prélèvements	Débit transitant par la frontière	Débit vertical entrant	Débit vertical sortant	Débit vertical global
Modèle Carbonifère	-0.61	0.59	0.20	0.00	0.19
Modèle Craie couplé	-0.62	0.55	0.58	-0.30	0.28
Débits (Mm ³ /an)	Prélèvements	Débit transitant par la frontière	Débit vertical entrant	Débit vertical sortant	Débit vertical global
Modèle Carbonifère	-19.3	18.7	6.2	-0.1	6.1
Modèle Craie couplé	-19.7	17.4	18.3	-9.3	9.0

Tableau 13 : Comparaison des débits transitant dans la couche des Calcaires carbonifères dans le modèle Carbonifère et dans le modèle Craie affiné.

7.6 DISTRIBUTION INITIALE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DANS LE MODELE CRAIE AFFINE

La distribution initiale des paramètres hydrodynamiques affectés au modèle Craie affiné est identique à celle qui a été retenue à l'issue du calage du modèle régional.

Les grandes lignes de la démarche utilisée pour l'ajustement des paramètres hydrodynamiques lors du calage du modèle régional sont rappelées aux paragraphes ci-après.

7.6.1 Perméabilités

Argiles de Louvil

La qualification hydrogéologique des Argiles de Louvil peut être sujette à caution car sa base contient un niveau plus sableux, perméable et parfois induré, appelé « tuffeau de base ». Cette caractéristique n'apparaît pas sur la carte géologique au 1/50 000 qui intègre le Landénien inférieur dans son ensemble. C'est pourquoi, la perméabilité assignée aux Argiles de Louvil est parfois élevée (10^{-5} m/s) dans le modèle.

Craie séno-turonienne productive

La capacité aquifère de la craie dépend essentiellement de sa fissuration et de l'ouverture de ses joints de stratification. Ainsi, au-delà d'une certaine pression imposée par les terrains sus-jacents, la craie se tasse, les fissures se ferment et la craie devient moins perméable. La transmissivité de la craie diminue donc en fonction de l'épaisseur de la zone non-saturée située au-dessus de la nappe.

En première approche, l'épaisseur de zone non-saturée a été déterminée pour chaque maille par différence entre la surface topographique et la surface piézométrique de référence (1997). Cinq classes ont été déterminées : nulle, inférieure à 20 m, comprise entre 20 et 40 m, comprise entre 40 et 60 m, supérieure à 60 m. Puis, pour chacune de ces classes⁸, une transmissivité caractéristique a été attribuée conformément aux valeurs indiquées dans le Tableau 14. Enfin, la perméabilité par maille a été déterminée en divisant la transmissivité caractéristique par l'épaisseur saturée.

Dans les zones où les mesures sont suffisamment nombreuses, notamment dans les principaux champs captants de la métropole Lilloise, la perméabilité a été calculée directement à partir des valeurs de transmissivité obtenues par pompages d'essai.

Cette distribution initiale des perméabilités de la Craie a ensuite été ajustée au cours du calage du modèle régional.

⁸ Cette méthodologie a été appliquée avec succès pour la modélisation de la Somme.

Epaisseur de zone non-saturée (m)	Nombre de mesures	Transmissivité mesurée (m^2/s)			
		minimale	maximale	moyenne	médiane
nulle	76	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,2	$2 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
$E_{ZNS} < 20$	319	$8 \cdot 10^{-6}$	0,7	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
$20 < E_{ZNS} < 40$	120	$6 \cdot 10^{-5}$	0,2	$1 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$40 < E_{ZNS} < 60$	14	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$60 < E_{ZNS}$	4	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$

Tableau 14 : Détermination des classes de transmissivité de la Craie séno-turonienne.

Au final, les zones les plus perméables correspondent principalement aux vallées, tandis que la Craie est moins perméable sur les zones de plateau. Peu d'informations sont disponibles pour évaluer la perméabilité de la craie dans la partie captive au Nord ; une valeur plausible de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ lui a été attribuée.

La carte de distribution initiale des perméabilités de la Craie du séno-turonien productif est présentée à la Figure 110.

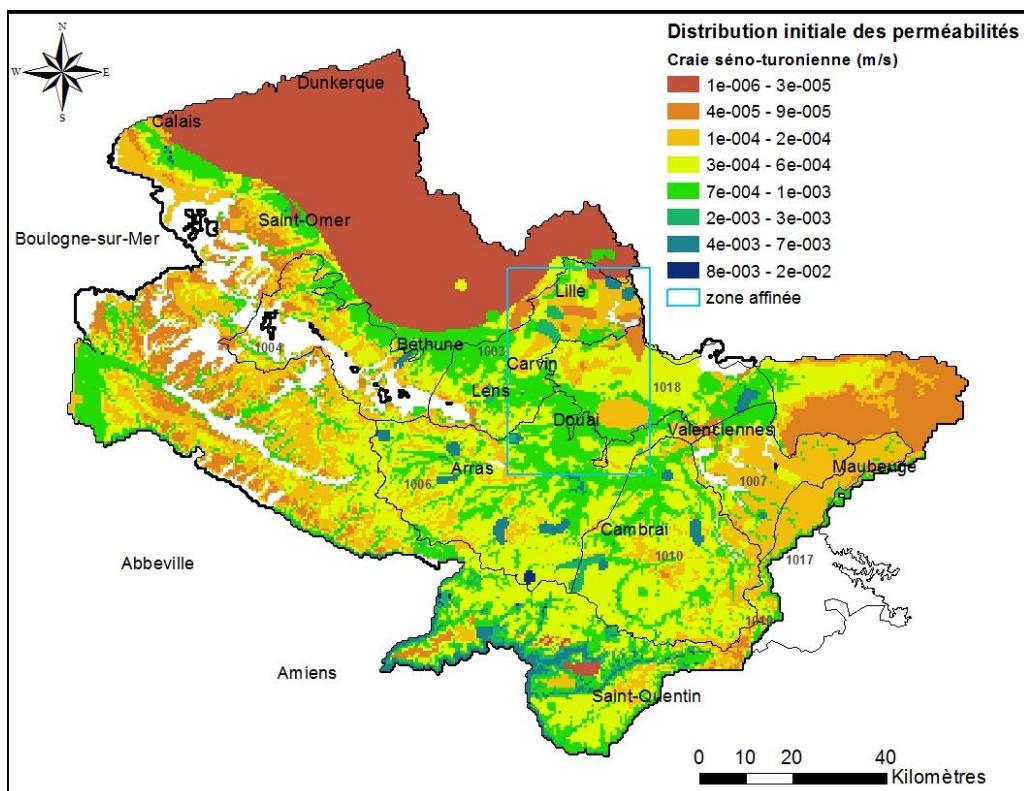


Figure 110 : Distribution initiale des perméabilités dans la Craie séno-turonienne (m/s).

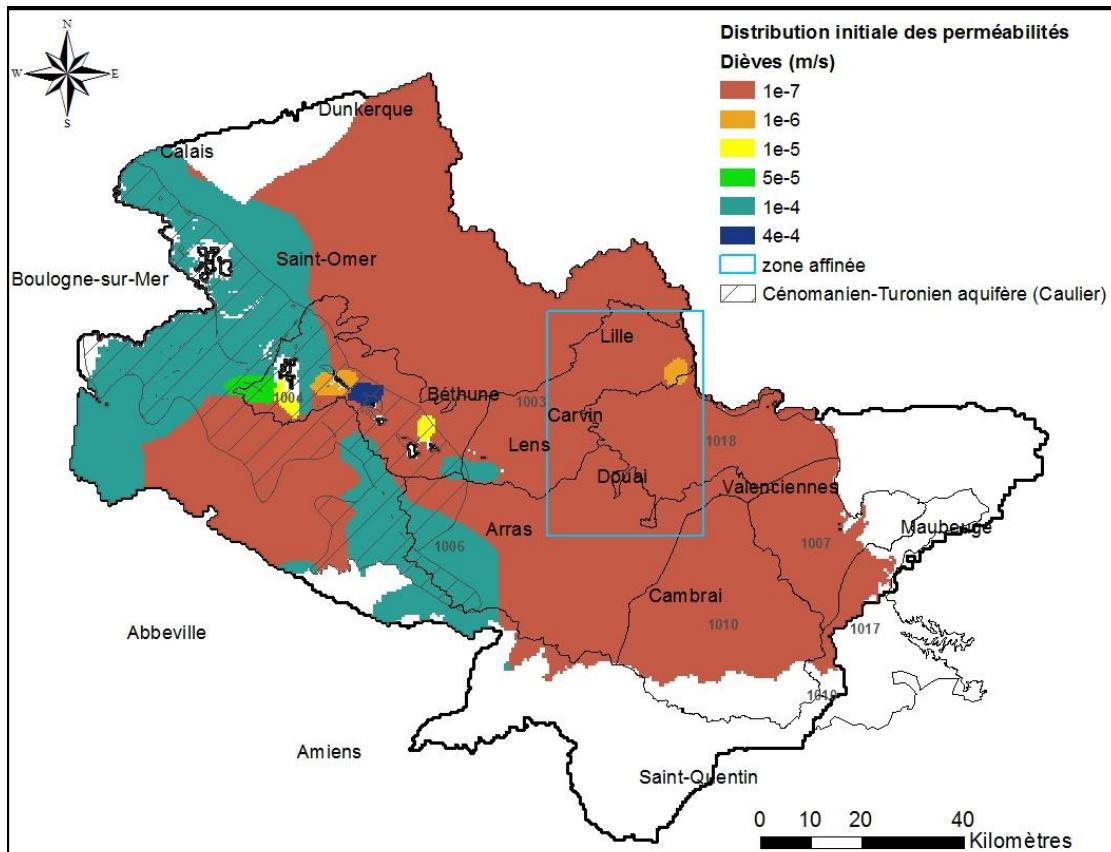
Craie séno-turonienne compacte

De façon similaire au modèle du SIGES, les valeurs de perméabilité de la craie productive ont été transposées à la couche de craie compacte sur des zones restreintes à proximité des champs captants de Lille. Hors de ces zones, une perméabilité uniforme de 10^{-7} m/s a été adoptée.

Dièves

La zonation régionale provient de la carte de résistivité du Turonien moyen, présentée dans la thèse de P. Caulier, suggérant que les zones de forte résistivité correspondent généralement à des zones de forte perméabilité. Les perméabilités sont globalement homogènes et faibles, en dehors de quelques zones plus perméables associées aux piézomètres de calage ; ce qui peut être dû à la présence de zones karstifiées dont les extensions sont mal connues (Figure 111).

Par ailleurs, les Dièves ont été considérées anisotropes, avec une perméabilité verticale 100 fois plus faible que la perméabilité horizontale.



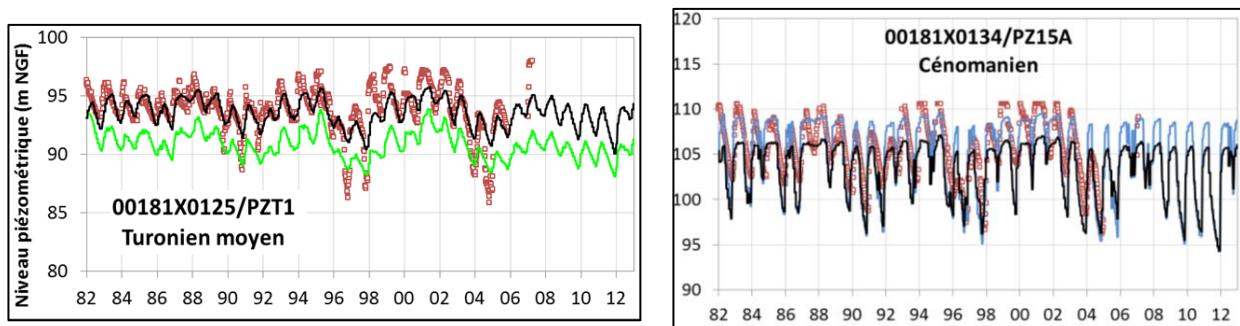


Figure 112 : Influence de la perméabilité des Dièves sur deux chroniques piézométriques de la masse d'eau 1004.

Craie cénomanienne

Dans la partie Ouest du domaine d'étude, les faciès du Cénomanien et du Turonien inférieur et moyen deviennent plus crayeux. Dans cette zone, des fortes valeurs de perméabilité ont été attribuées : 1.10^{-4} m/s. Ailleurs, la craie du Cénomanien est relativement peu perméable dans l'ensemble, avec une perméabilité de l'ordre de 1.10^{-7} m/s.

La Figure 113 présente la distribution initiale des perméabilités de la craie du Cénomanien, ainsi que la délimitation du Cénomanien aquifère selon Caulier.

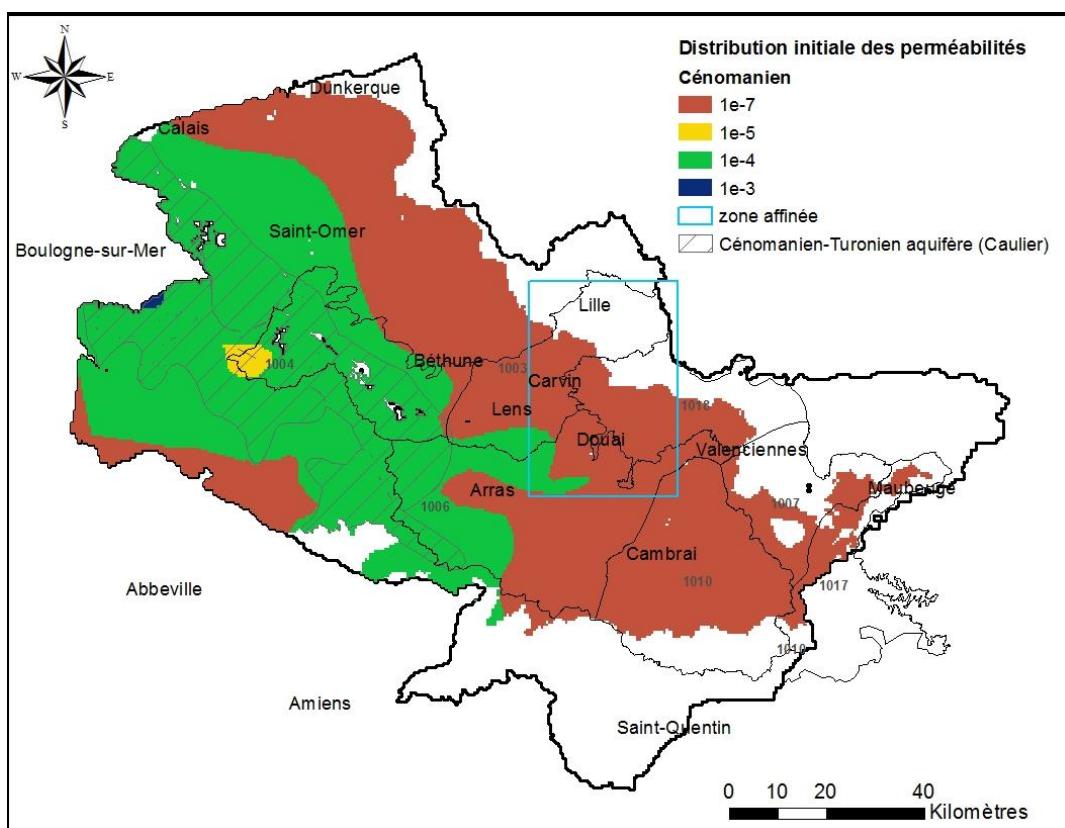


Figure 113 : Distribution initiale des perméabilités (m/s) dans la Craie du Cénomanien.

7.6.2 Emmagasinements libres

Craie séno-turonienne productive

La porosité totale de la craie peut être élevée (jusqu'à 40%), mais la porosité efficace reste faible, souvent inférieure à 5%. Les interprétations des pompages d'essai effectués dans le Nord-Pas-de-Calais donnent une valeur moyenne de la porosité efficace de l'ordre de 2%.

De la même manière que pour la transmissivité, l'expérience de terrain montre que l'emmagasinement libre (noté S) de la craie est conditionné par l'épaisseur de zone non-saturée (E_{ZNS}). Les ordres de grandeur ont été attribués, de manière analogue à la transmissivité, en fonction de cette épaisseur :

- $E_{ZNS} < 20 \text{ m} \Rightarrow 5\% < S < 9\%$
- $20 \text{ m} < E_{ZNS} < 40 \text{ m} \Rightarrow 2\% < S < 5\%$
- $40 \text{ m} < E_{ZNS} < 60 \text{ m} \Rightarrow 1\% < S < 2\%$
- $E_{ZNS} > 60 \text{ m} \Rightarrow S < 1\%$

La carte de répartition des emmagasinements libres de la Craie séno-turonienne productive est présentée à la Figure 114.

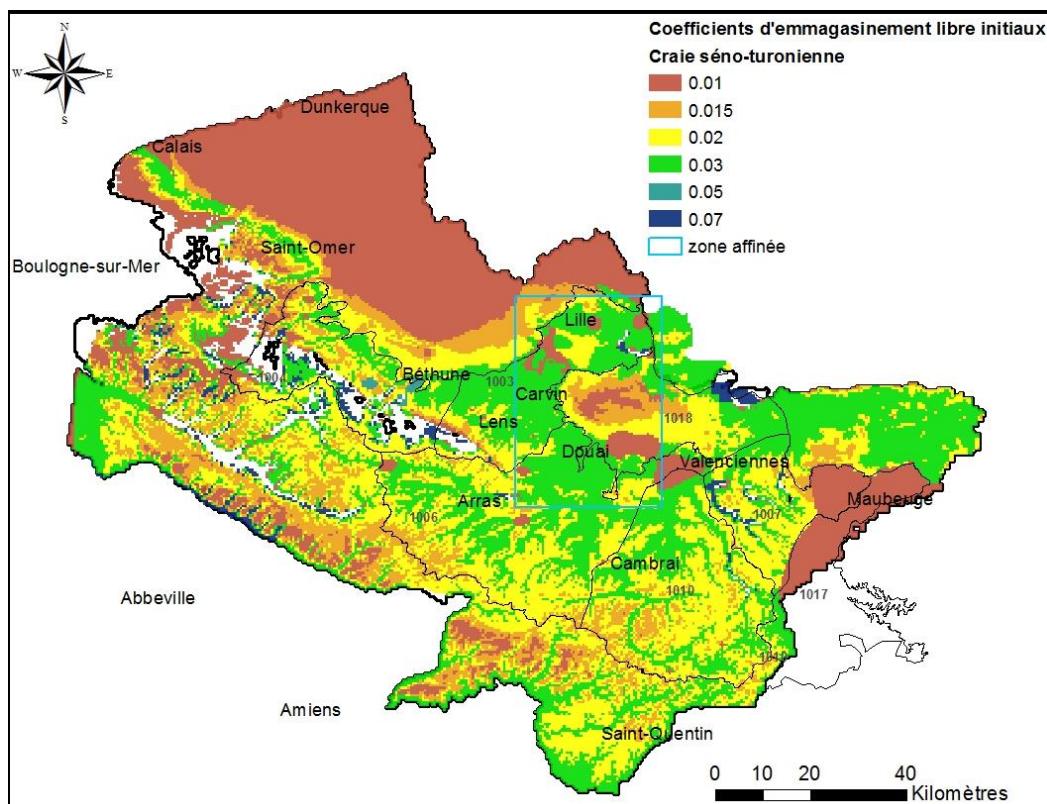


Figure 114 : Distribution initiale des coefficients d'emmagasinement libre de la Craie du Séno-turonien.

Craie séno-turonienne compacte

De façon similaire au modèle du SIGES, pour la couche de craie compacte, les valeurs d'emmagasinement libre de la craie productive ont été transposées autour des champs captants de Lille ; ailleurs, elles sont uniformément calées à 1%.

Cénomanien

Dans la partie aquifère du Cénomanien, les coefficients d'emmagasinement libre sont supposés être deux fois plus élevés qu'ailleurs : 2% contre 1% ailleurs (Figure 115).

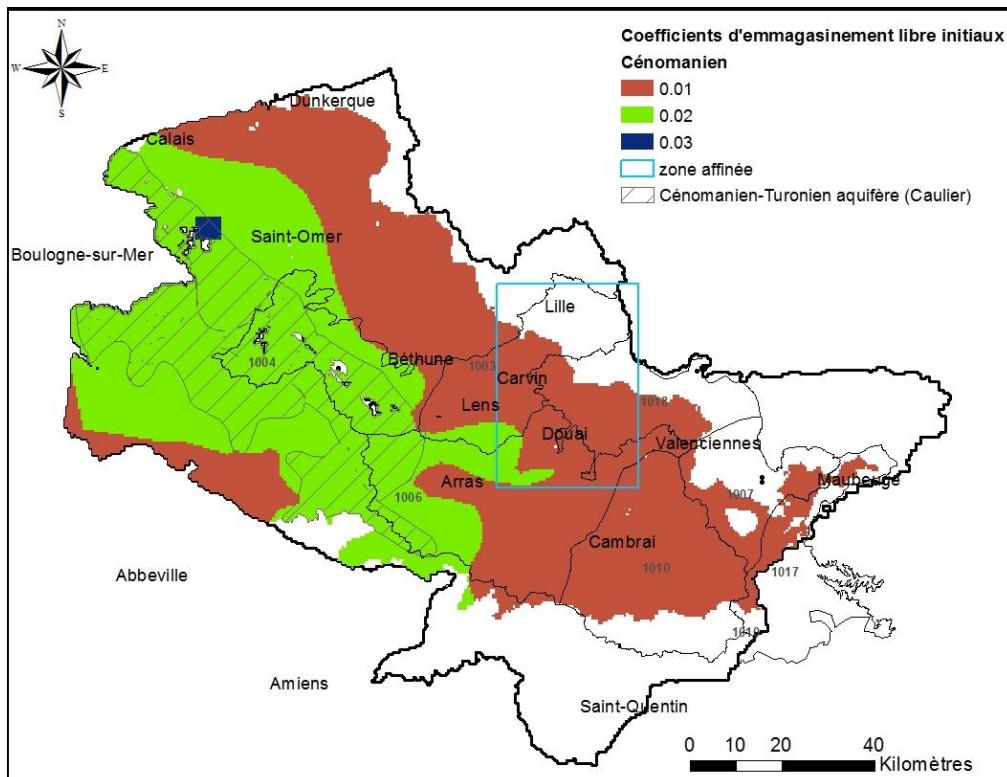


Figure 115 : Distribution initiale des emmagasinements libres de la Craie du Cénomanien.

Emmagasinements captifs spécifiques

Craie séno-turonienne

En régime hydraulique captif, le coefficient d'emmagasinement de la Craie est de l'ordre de 10^{-4} . En considérant une épaisseur saturée de 25 m, la valeur du coefficient d'emmagasinement captif spécifique se situe autour de 4.10^{-6} m^{-1} .

Une valeur de 2.10^{-6} m^{-1} a été prise en compte sur la majeure partie du modèle régional, à l'exception de la partie Nord de la zone affinée où un coefficient d'emmagasinement captif spécifique de 2.10^{-5} m^{-1} a été retenu. Une valeur de 10^{-2} m^{-1} a même été affectée à quelques mailles du modèle au Nord de Lille. Ces hypothèses sont issues du modèle régional du SIGES.

7.6.3 Perméabilité de colmatage des rivières

Les perméabilités de colmatage des rivières, paramètres qui régulent les échanges entre la nappe et les rivières, ont été initialisées aux valeurs obtenues à l'issue du calage du modèle régional pour les cours d'eau communs aux deux modèles.

Pour les rivières ajoutées, notamment dans la zone affinée, la perméabilité de colmatage a été fixée à :

- 10^{-5} m/s pour les cours d'eau naturels,
- et 10^{-9} m/s pour les rivières canalisées où la faible vitesse d'écoulement favorise la décantation des matières en suspension.

7.6.4 Synthèse des paramètres hydrodynamiques initiaux

Le Tableau 15 synthétise les valeurs des paramètres hydrodynamiques initiaux assignés au modèle de la Craie affiné.

Numéro Couche	Formation	Propriété	Perméabilité (m/s)	Anisotropie verticale	Emmagasinement libre	Emmagasinement captif spécifique (1)
Couche 1	Alluvions + sables littoraux	Aquifère	10^{-5}	0	10^{-2}	10^{-4}
Couche 2	Limons	Semi-perméable	10^{-8}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-4}
Couche 3	Argiles des Flandres – Yprésien	Aquitard	10^{-9}	0	10^{-2}	10^{-4}
Couche 4	Sables d'Ostricourt – Landénien	Aquifère	2.10^{-5}	0	10^{-1}	10^{-5}
Couche 5	Argiles de Louvil	Aquitard, aquifère dans les horizons sableux indurés	10^{-9} localement 10^{-5}	0	10^{-2}	10^{-5}
Couche 6	Craie du Séno-Turonien productive	Aquifère	De 10^{-5} à 10^{-3}	0	De 10^{-2} à 7.10^{-2}	De 2.10^{-6} à 10^{-2}
Couche 7	Craie du Séno-Turonien non productive	Aquitard	10^{-7} localement 10^{-3}	0	10^{-2}	10^{-6}
Couche 8	Dièves	Aquitard	De 10^{-4} à 7.10^{-9}	De 5.10^{-3} à 0.5	10^{-2}	10^{-5}
Couche 9	Cénomanien	Aquitard et aquifère dans le Cénomanien riche en craie	De 10^{-7} à 10^{-4}	0	10^{-2}	10^{-6}
Couche 10	Carbonifère	Aquifère	5.10^{-4}	0.1	0.15	10^{-4}

Tableau 15 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques initiaux pris en compte dans le modèle affiné.

- (1) Les valeurs d'emmagasinement captifs spécifiques inférieures à 10^{-5} m⁻¹ sont douteuses car hors de la plage généralement admise (de 10^{-7} m⁻¹ à 10^{-5} m⁻¹).

8 Calage du modèle hydrodynamique

8.1 MISE EN ŒUVRE DU CALAGE

8.1.1 Définition et objectifs du calage

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte que celui-ci simule des débits et des niveaux piézométriques aussi proches que possible des observations de terrain. Pour les modèles d'écoulement souterrain, les paramètres de calage sont la perméabilité, l'anisotropie verticale qui lui est attachée, les coefficients d'emmagasinement libre et captif de l'aquifère en matière de paramètres hydrodynamiques du système aquifère, ainsi que l'épaisseur de colmatage et la perméabilité de colmatage du lit de rivière pour les échanges avec le réseau hydrographique. Les paramètres hydroclimatiques peuvent également faire l'objet de calage pour ajuster les flux de recharge et de ruissellement.

8.1.2 Période de calage

Le modèle a été calé en régime transitoire sur la période 1982-2012 (31 années). L'échelle de temps est découpée entre le modèle hydroclimatique, pour lequel le pas de temps est décadaire, et le modèle hydrodynamique qui fonctionne avec un pas de temps mensuel. Par conséquent, pour une maille et un pas de temps mensuel donné, l'infiltration pluviale prise en compte par le modèle correspond au cumul de l'infiltration calculée sur trois pas de temps décennaux. En pratique, les calculs hydrodynamiques s'effectuent sur 372 pas de temps (31 x 12 mois) et durent environ 14h avec un ordinateur standard.

8.1.3 Données de référence

Le calage a été repris sur les six masses d'eau de l'aire des territoires qui concourent à l'alimentation métropolitaine - la Vallée de la Deûle (1003), l'Artois et la Vallée de la Lys (1004), la Scarpe et la Sensée (1006), le Valenciennois (1007), le Cambrésis (1010) et la bordure du Hainaut (1017) - mais plus particulièrement sur la zone affinée.

La zone affinée intersecte trois de ces masses d'eau : ME 1003, 1006 plus la masse d'eau 1018.

Carte piézométrique de référence

La carte piézométrique Basses-eaux 2009 (Figure 116) est utilisée comme référence pour vérifier la cohérence régionale des écoulements dans la nappe de la Craie séno-turonienne. Elle a été élaborée à partir de mesures du niveau d'eau collectées sur 362 ouvrages, suite à la campagne piézométrique réalisée par le BRGM fin septembre/début octobre dans le cadre du projet SIGES (BRGM RP- 58542-FR).

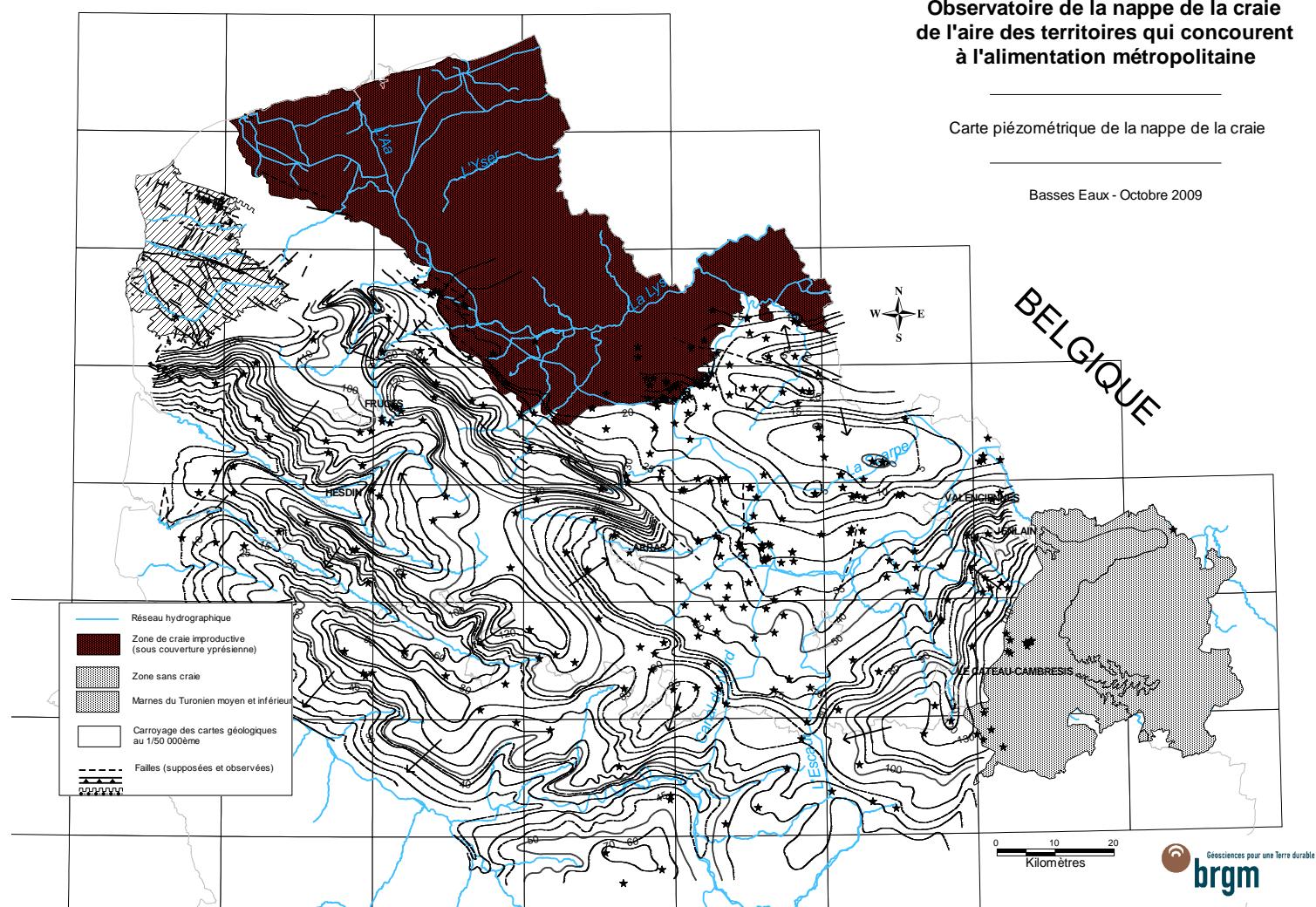


Figure 116 : Carte piézométrique de la nappe de la Craie (Basses eaux 2009).

Chroniques piézométriques

Les piézomètres de calage de la zone affinée sont décrits au chapitre 5 (page 57). Ils sont environ soixante, ouvrages ADES et ouvrages MEL.

En dehors de la zone affinée, les piézomètres retenus pour le calage sont les piézomètres ADES (réseau piézométrique du département du Pas-de-Calais et du réseau piézométrique UTAM Nord), bien répartis spatialement sur l'ensemble du territoire comme on peut le voir sur la Figure 117. Il y a environ 123 points, dont 87 pour la Craie séno-turonienne.

Les mesures provenant du réseau piézométrique AEAP peuvent également être utilisées comme données complémentaires de calage dans des secteurs où peu de données sont disponibles. Ces données n'ont pu être actualisées entre 2009 et 2012.

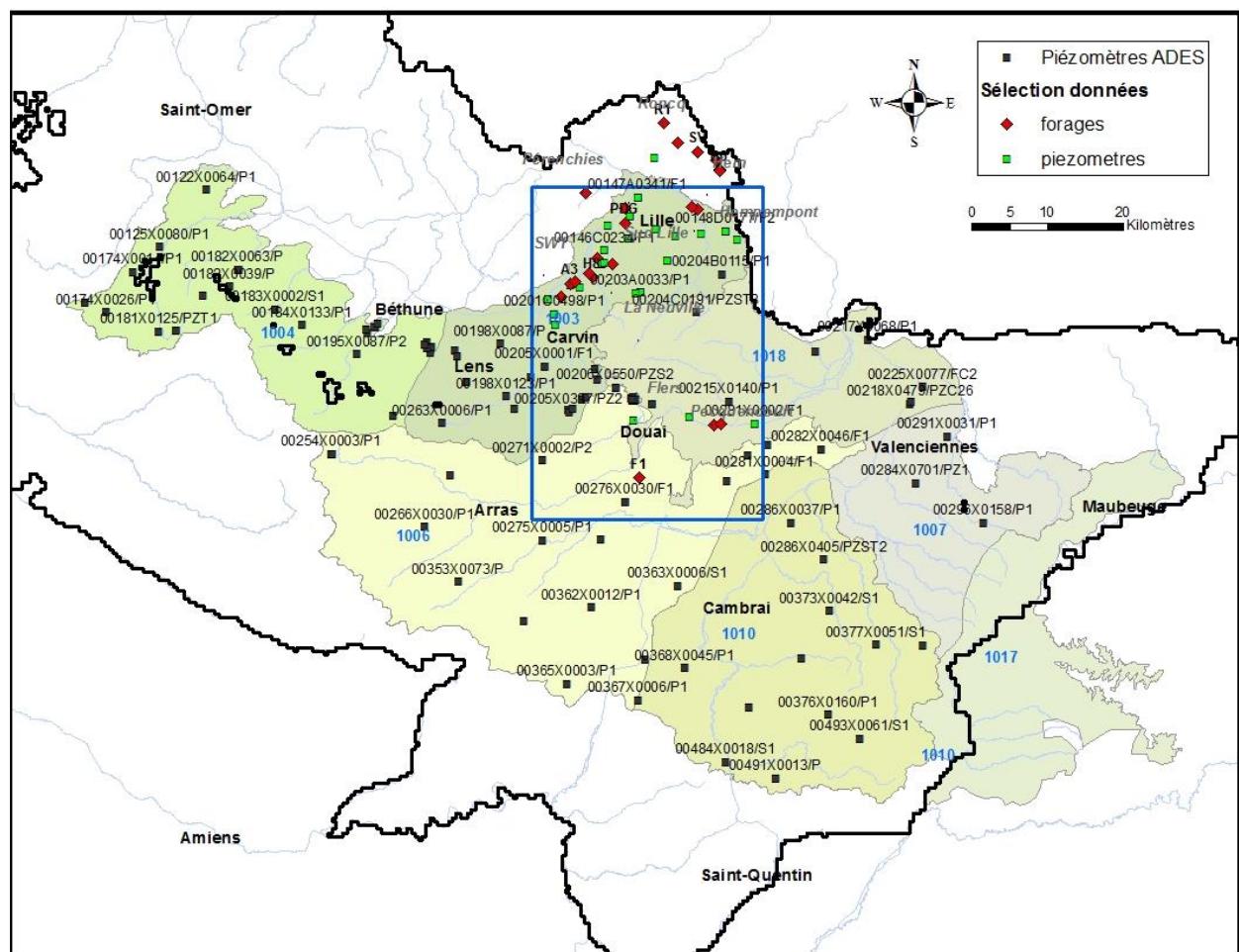


Figure 117 : Points de calage des chroniques piézométriques.

Chroniques de débits des cours d'eau

La comparaison entre débits observés et débits simulés dans les principales rivières du secteur d'étude permet de vérifier la cohérence de la pluie efficace globale. Sont contrôlés par ce biais :

la distribution spatiale et la répartition de la pluie efficace entre ruissellement et recharge de nappe, ainsi que la bonne prise en compte des échanges nappe-rivière.

En pratique, MARTHE™ simule trois types d'apports aux rivières :

- Le ruissellement, issu du bilan hydrologique calculé dans chaque maille et à chaque pas de temps avec l'algorithme mis en œuvre dans GARDENIA™. Le débit de ruissellement est transmis au réseau hydrographique selon la ligne de plus grande pente topographique calculé à partir du MNT dans chacune des mailles du modèle.
- Les débordements des mailles affleurantes. Quand ils existent, ils sont traités de la même façon et sont dirigés vers le cours d'eau voisin selon la ligne de plus grande pente topographique.
- Les échanges nappe-rivière. Ils augmentent ou diminuent les débits des cours d'eau en fonction des différentiels de niveaux hydrauliques entre nappe et rivière.

Les chroniques de débit de 35 stations hydrométriques (données de la Banque Hydro, Tableau 16 et Figure 118) ont servi de référence pour le calage du modèle, après avoir transformé les débits journaliers en débits décadiques pour permettre des comparaisons avec les débits simulés par le modèle dans les rivières. La Figure 119 présente un exemple de cette transformation pour la station de l'Ecaillon à Thiant.

CODE		X (m L2E)	Y (m L2E)
E1563710	Le Canal du Nord à Arleux	655231	2586653
E1566010	La Sensée à Étaing	647051	2587221
E1726020	La Selle à Denain	675516	2592099
E1727510	L'Écaillon à Thiant	679569	2590488
E1766010	La Rhonelle à Aulnoy-lez-Valenciennes	685235	2593470
E1827020	L'Hogneau à Thivencelle	692279	2605719
E2071105	La Scarpe à Brebières	649613	2593474
E2367410	Le courant de Coutiches à Flines-lez-Raches	663260	2604612
E2368310	La Balle de la Tillière à Saint-Amand-les-Eaux	679248	2603082
E2371105	La Scarpe (canalisée) à Mortagne-du-Nord	679373	2611622
E2376010	Le courant de l'Hospital à Bousignies	672782	2605098
E2377210	L'Elnon à Lecelles	676299	2608139
E2400411	L'Escaut à Maulde	678211	2612924
E3102110	La Deûle à Don	640493	2616425
E3346010	La Marque à Bouvines	659994	2620707
E3346020	La Marque à Pont-à-Marcq	655722	2615099
E3383510	Le Canal de Roubaix à Marquette-lez-Lille	651793	2631663
E3412100	La Deûle à Wambrechies	650831	2632921
E3511210	La Lys à Lugy	588390	2614248
E3511220	La Lys à Delettes	591347	2624935
E3518510	La Laquette à Witternesse	601430	2624146
E3611210	La Lys à Aire-sur-la-Lys	606992	2628041
E3646210	La Clarence à Robecq	616241	2622277
E3660600	La Lawe à Bruay-la-Buissière	614792	2610238
E3811265	La Lys (canalisée) à Bousbecque	652129	2642698
E4035710	L'Aa à Wizernes	593477	2634984
E4035720	L'Aa à Fauquembergues	583046	2623392
E4035730	L'Aa à Lumbres	585160	2634701
E4036530	Le Bléquin à Lumbres	584591	2634332
E4306010	La Hem à Tournehem-sur-la-Hem [Guémy]	578343	2645254
E4905710	L'Yser à Bambecque [Engelshof]	616849	2656391
E4905711	L'Yser à Bollezeele [Erkelsbrug]	600805	2652523
E4907005	La Peene-Becque à Ochtezeele	604590	2647013
E4909405	L'Ey-Becque à Steenvoorde	617542	2646473
E5400310	La Canche à Brimeux	563939	2606012
E5406510	La Ternoise à Hesdin	578644	2598318

Tableau 16 : Stations hydrométriques utilisées comme références pour le modèle.

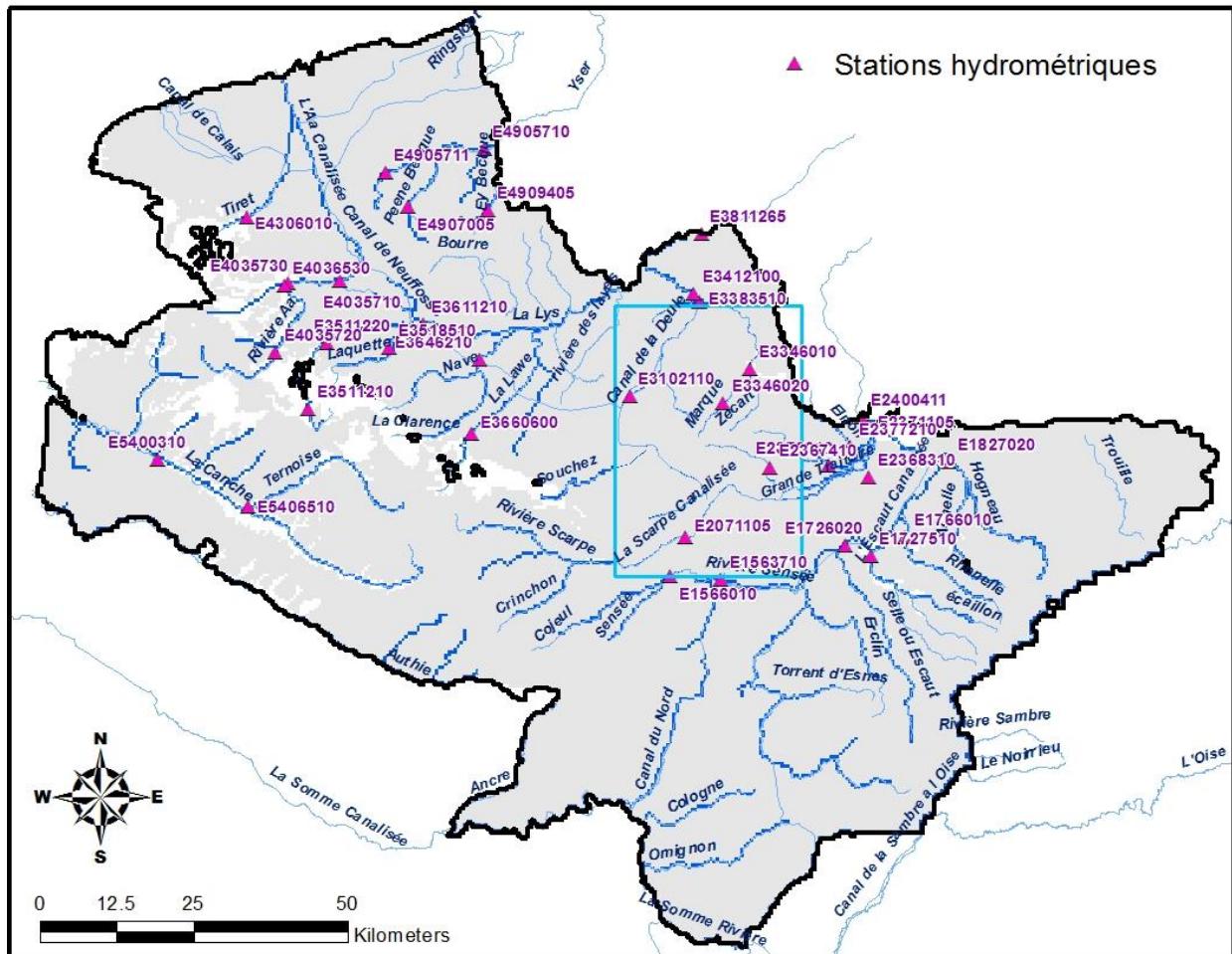


Figure 118 : Localisation des stations hydrométriques de référence.

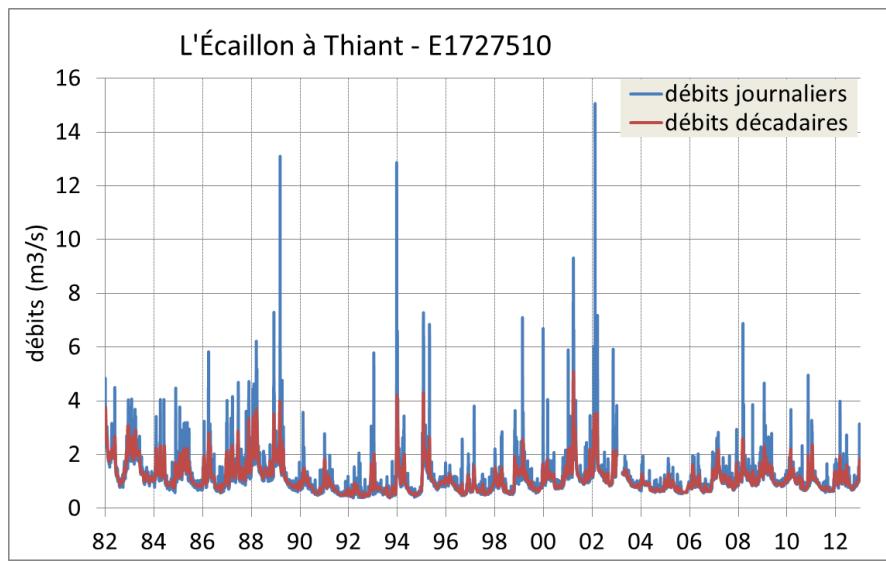


Figure 119 : Passage du débit journalier au débit décadaire pour la station de l'Ecaillon à Thiant.

8.1.4 Procédure de calage et déroulement du processus

Le calage du modèle s'est essentiellement déroulé en deux temps :

- Dans un premier temps, l'objectif était de retrouver les résultats de l'ancien modèle après introduction de la nouvelle géométrie et des deux couches superficielles d'alluvions et de limons. Durant cette première phase, les charges hydrauliques sont restées imposées dans la couche des Calcaires carbonifères, comme pour le modèle précédent.
 - Cette configuration a d'abord été simulée sans modéliser le réseau hydrographique comme une entité hydraulique individualisée, disposition où la nappe peut déborder dans les cours d'eau, sans que ceux-ci puissent la réalimenter.
 - Ensuite, le réseau hydrographique a été simulé en tant que composante hydraulique à part entière connecté à la nappe. Ce couplage a permis de démontrer le rôle essentiel des échanges nappe-rivière dans certains secteurs. Par exemple, les débits apportés à la nappe par les rivières permettent de relever le niveau piézométrique de plus de 10 m sur une grande partie de la masse d'eau 1003 et sur les champs captants proches de Lille et des Ansereuilles. Au cours de cette première phase de calage, deux paramètres ont principalement été ajustés : la perméabilité des échanges nappe-rivière (perméabilité de colmatage) et la perméabilité de la nappe de la Craie productive. La perméabilité des échanges nappe-rivière a été modifiée par affluent, ou de manière plus fine par tronçons de rivière lorsque nécessaire.

Cette première étape de calage est décrite au chapitre 8.1.5.

- Dans un second temps, le couplage avec le modèle du Carbonifère a été réalisé. Les niveaux piézométriques simulés dans la nappe des Calcaires carbonifères ont été contrôlés et comparés aux résultats du modèle du Carbonifère. Une fois ces niveaux validés, la perméabilité et le coefficient d'anisotropie des Dièves ont été calés pour réajuster les niveaux piézométriques dans la nappe de la Craie. L'option retenue a consisté à fixer la perméabilité des Dièves à une valeur constante (Figure 127) sur la partie en contact avec les Calcaires carbonifères et à utiliser des coefficients d'anisotropie verticaux dans cette zone (Figure 128). Cette seconde étape est décrite au chapitre 8.1.6.

8.1.5 Rôle du réseau hydrographique

ME – 1003

La masse d'eau 1003 est traversée par le Canal de la Deûle et par la Marque à l'Est. Elle couvre la majorité des champs captants (Figure 121).

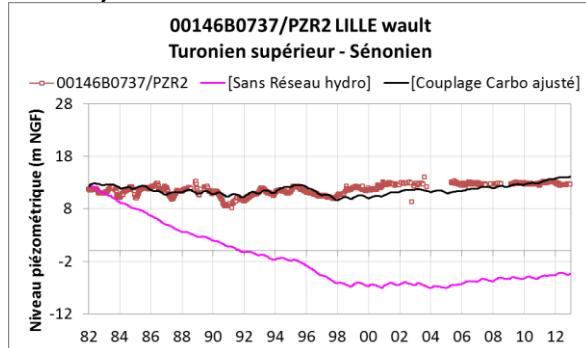
Les graphiques de la Figure 120 comparent les simulations des niveaux piézométriques avec et sans couplage avec le réseau hydrographique sur un certain nombre de points localisés sur la Figure 121.

On constate que le réseau hydrographique joue un rôle important sur l'ensemble de la masse d'eau 1003, essentiellement le long du Canal de la Deûle et vers Seclin (graphiques a, b, c, d). Sans le réseau hydrographique, le niveau de la nappe est bien inférieur aux observations, et un

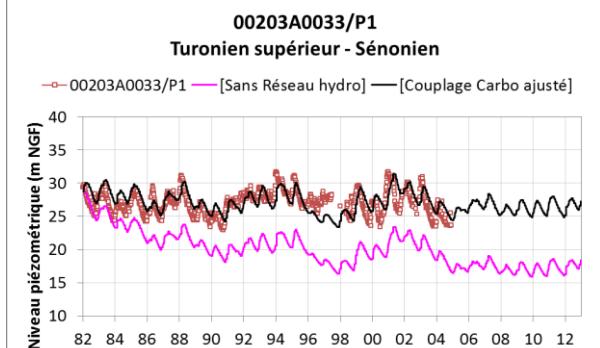
écart de plus de dix mètres est observé par endroit. Par conséquent, dans cette zone, les rivières contribuent largement à l'alimentation de la nappe de la Craie.

Le rôle du réseau hydrographique est un peu moins prépondérant dans la partie Nord-Est de la masse d'eau drainée par la Marque (graphique e) et au Sud-Ouest (graphique f).

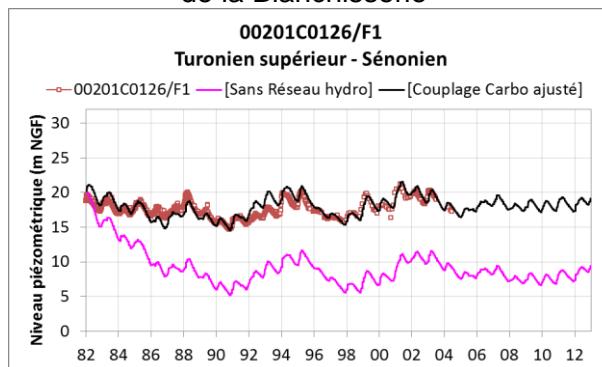
a) au nord du Canal de la Deûle



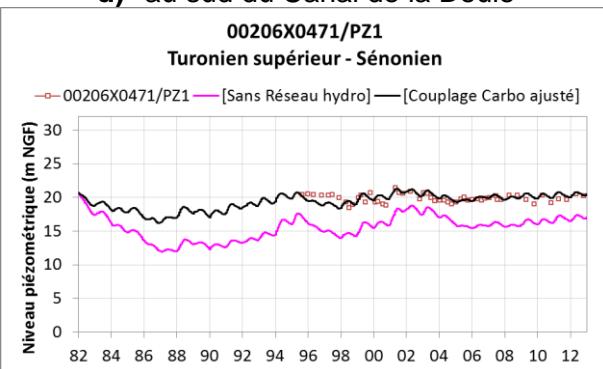
b) vers Seclin



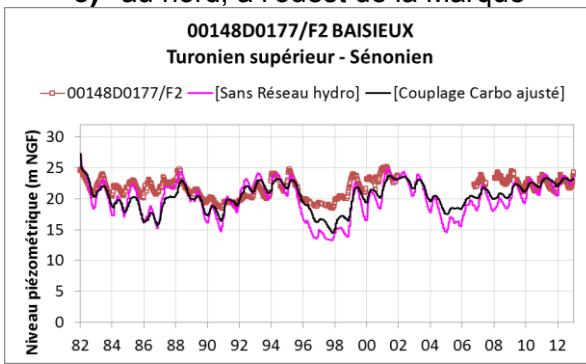
c) au sud des Ansereuilles et du site de la Blanchisserie



d) au sud du Canal de la Deûle



e) au nord, à l'ouest de la Marque



f) au Sud de la masse d'eau

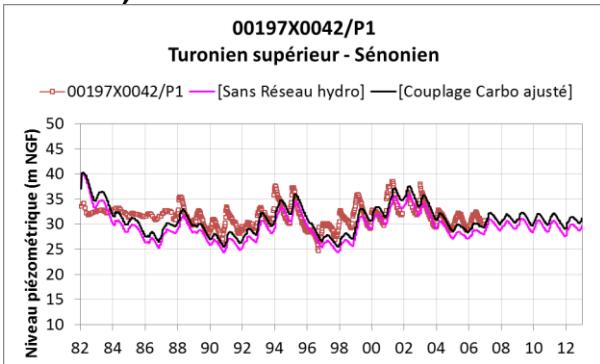


Figure 120 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés avec et sans couplage avec le réseau hydrographique

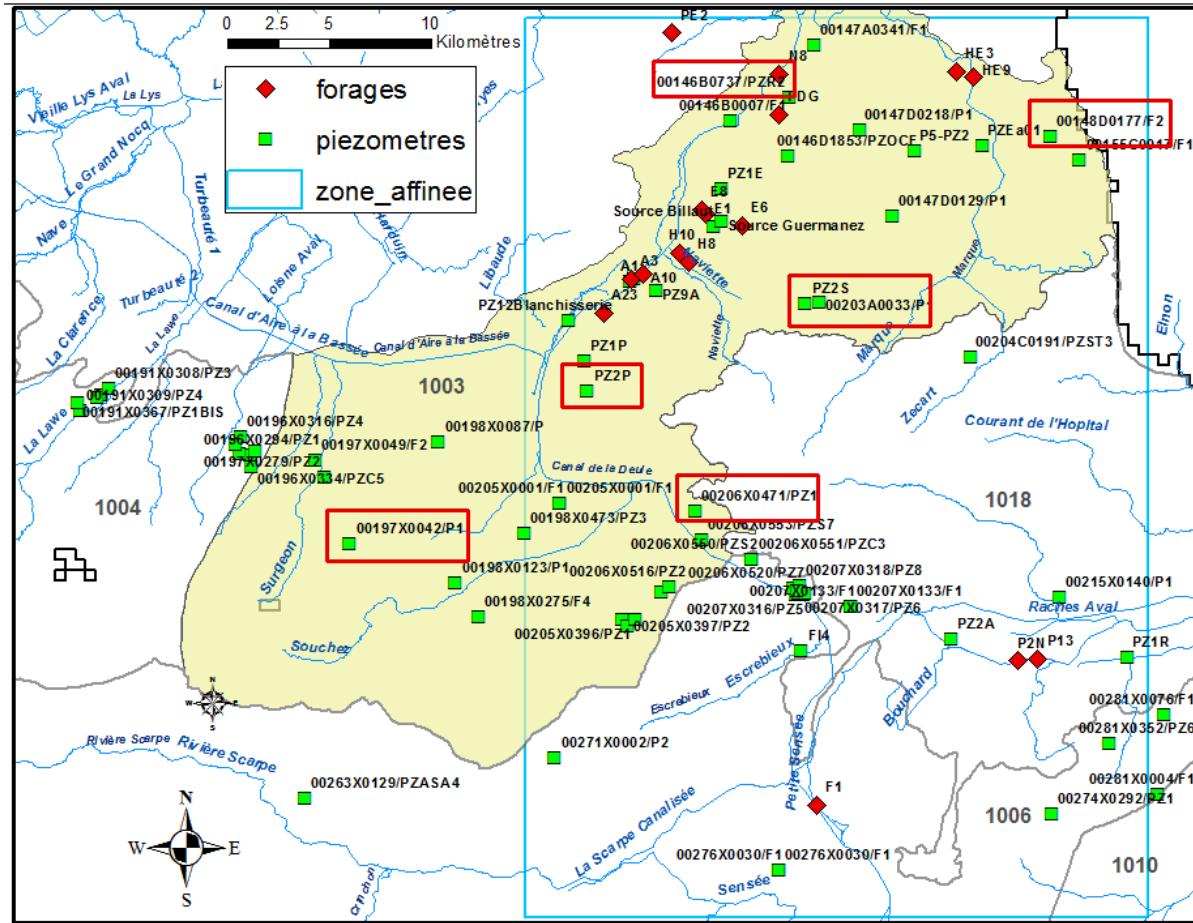


Figure 121 : Piézomètres utilisés (cadres rouges) pour illustrer l'influence du réseau hydrographique sur la masse d'eau 1003.

Champ captant de Flers

Le réseau hydrographique a un rôle non négligeable également au niveau du champ captant de Flers (Figure 122).

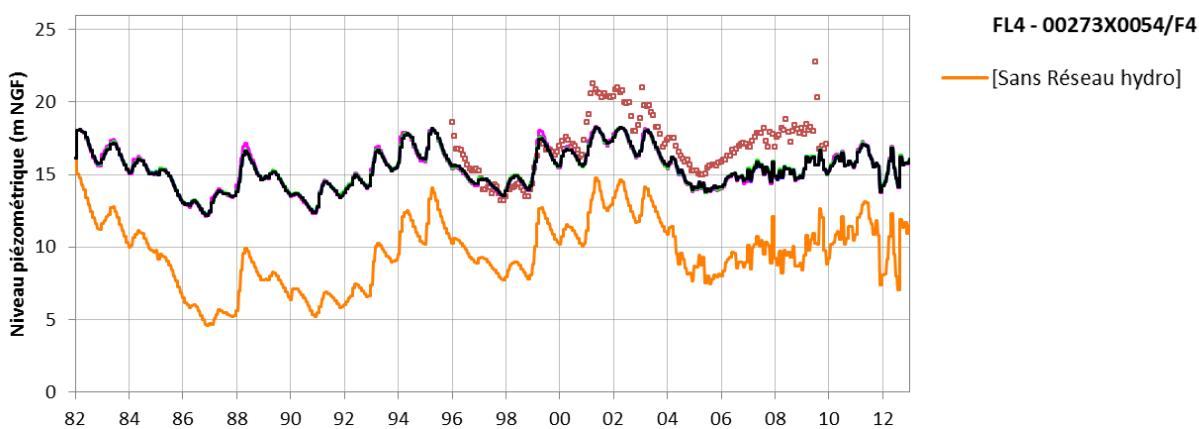


Figure 122 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés dans le secteur de Flers avec et sans couplage avec le réseau hydrographique.

8.1.6 Influence du couplage avec le modèle du Carbonifère

Les nappes de la Craie séno-turonienne et des Calcaires carbonifères sont séparées par quelques dizaines de mètres de marnes crayeuses (Dièves), souvent considérées comme peu perméables même si elles peuvent être localement faillées.

La Figure 123 présente les cartes piézométriques de la Craie (oct. 2009) et du Carbonifère (oct.-nov. 2010). On observe, d'après ces cartes, que les isopièzes de la Craie et des Calcaires ont des valeurs proches (de 20 à 30 m NGF) sur une bande d'environ 10 km, sans pour autant présenter un tracé similaire.

Le fait de coupler le modèle du Carbonifère (paragraphe 7.5) et le modèle de la Craie affiné impacte la piézométrie simulée dans la nappe de la Craie. L'ellipse rouge sur la Figure 123 cerne les points de calage influencés par le couplage avec le Carbonifère. Ces modifications sont visibles sur les chroniques simulées des piézomètres situés dans la partie nord de la zone affinée : Lille Sud, Nord et centre de Lille, Grand Stade et Hempempont. Dans cette zone, les isopièzes du Carbonifère sont resserrées et la différence de charge entre la Craie et le Carbonifère est très variable, de très faible à plus de cinquante mètres.

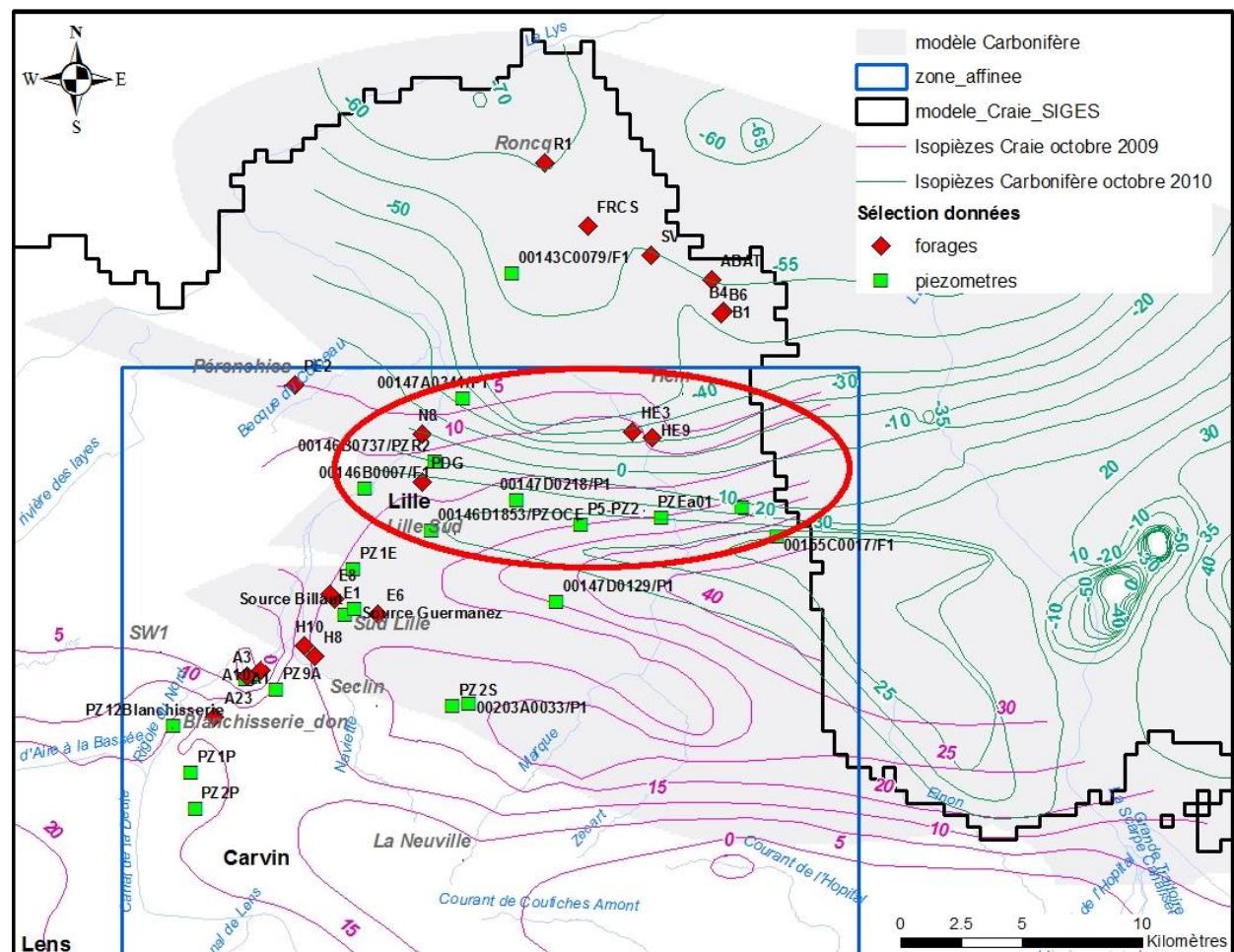


Figure 123 : Cartes piézométriques de la Craie (oct 2009) et du Carbonifère (oct.-nov. 2010) et localisation des points de calage influencés par le couplage avec le Carbonifère (ellipse rouge).

La Figure 124 présente les résultats de plusieurs simulations conduites avec différentes valeurs de perméabilité et/ou de coefficients d'anisotropie verticale dans les Dièves.

Pour corriger les niveaux des piézomètres captant la nappe de la Craie, la perméabilité de la couche des Dièves a été modifiée au droit de la zone de contact entre la Craie et le Carbonifère. Elle a été augmentée de 7.10^{-9} m/s (modèle Carbonifère) à 3.10^{-8} m/s dans cette zone pour abaisser les niveaux piézométriques. Enfin, le calage a été affiné en ajustant la distribution spatiale des coefficients d'anisotropie verticale des Dièves.

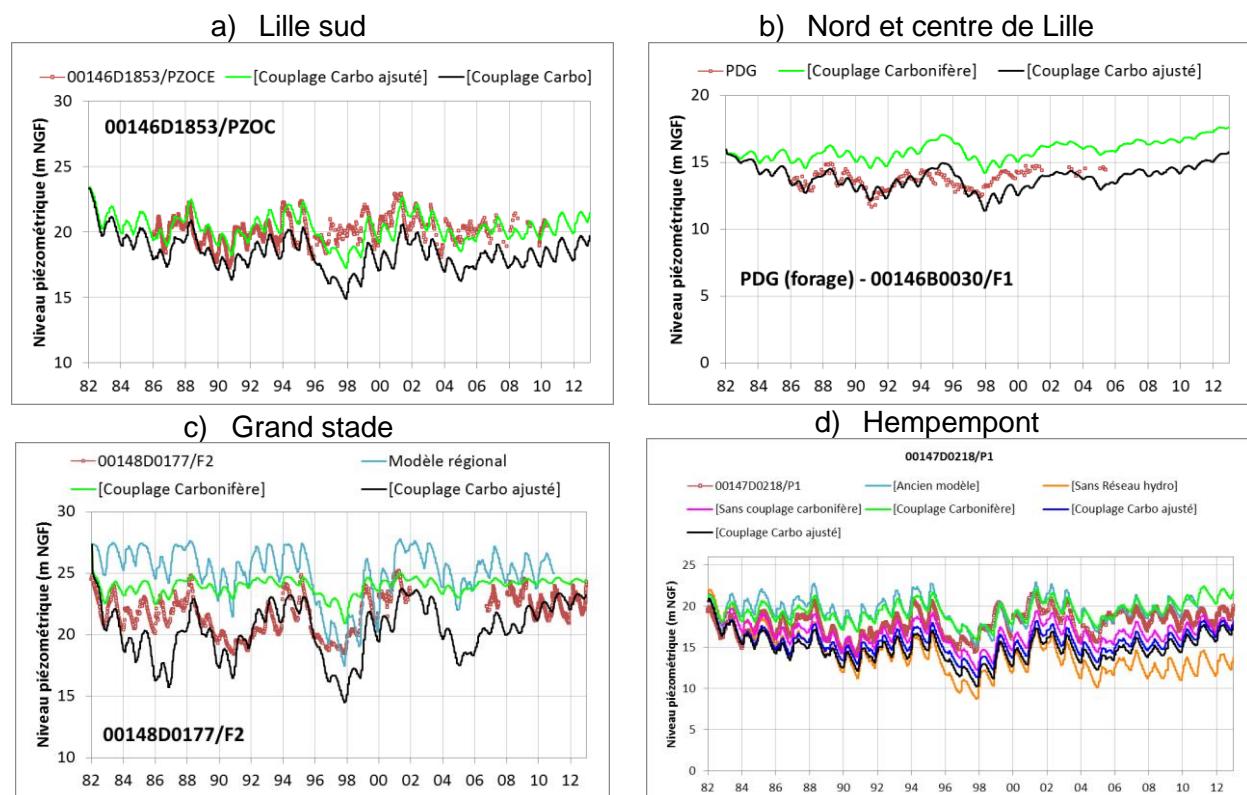


Figure 124 : Influence du couplage avec le modèle du Carbonifère sur quelques piézomètres de la Craie séno-turonienne.

La Figure 125 montre que la différence de charge simulée entre les deux aquifères décroît du Nord au Sud à l'intérieur de l'ellipse rouge, tandis que l'épaisseur des Dièves est relativement variable, plus mince à l'est qu'à l'ouest.

Il est à noter qu'une partie des forages au Carbonifère était crépinée au droit de chaque aquifère (Craie et Calcaires) pour améliorer la productivité des ouvrages. Plusieurs forages ont été retubés durant la 2^{nde} moitié du XX^{ème} siècle ; pour autant, le BRGM ne dispose pas d'une liste exhaustive des modifications apportées aux puits et forages.

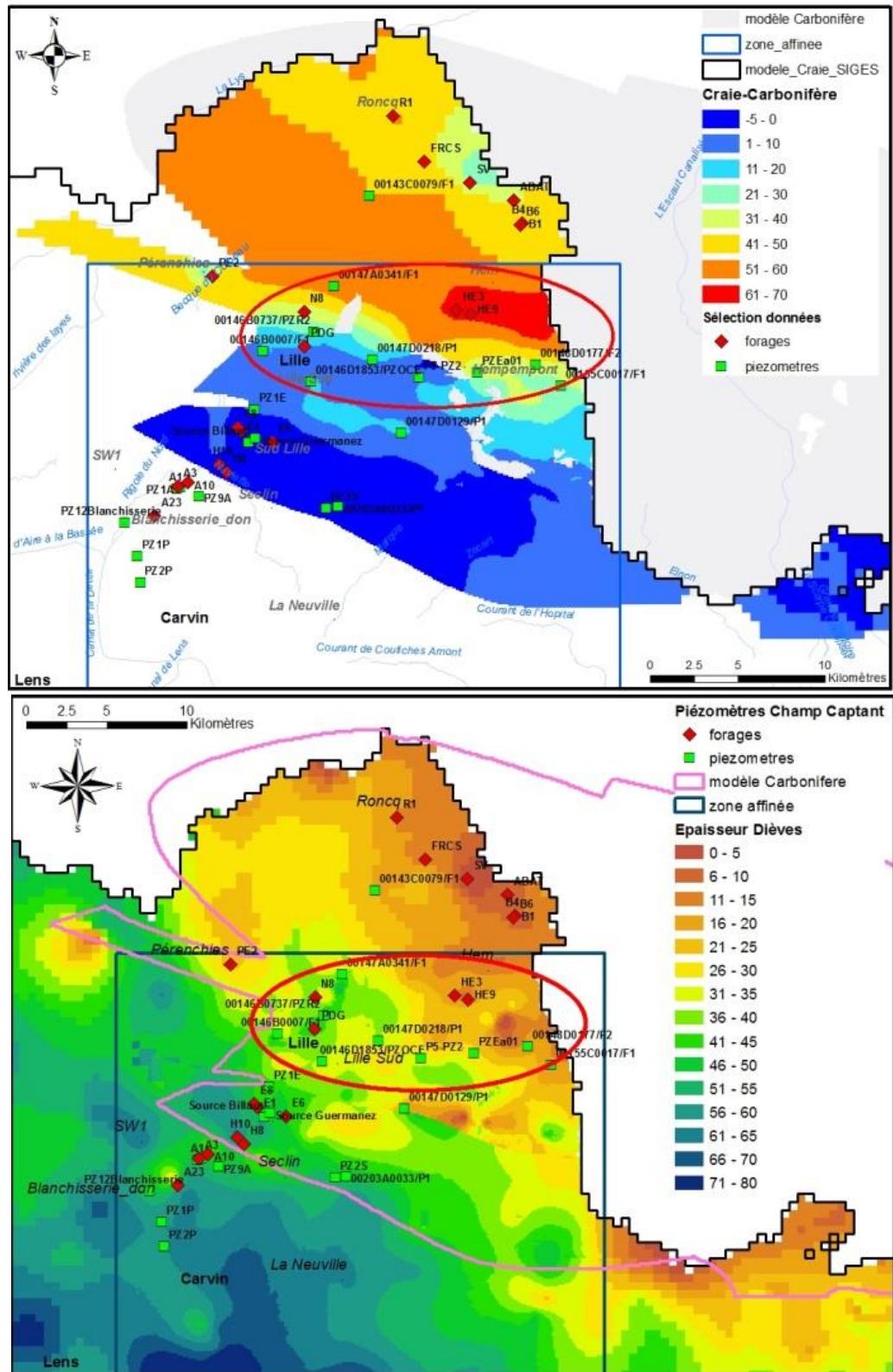


Figure 125 : Différence de charges simulée entre la Craie séno-turonienne et les Calcaires du Carbonifère en octobre 2009 (carte du haut), et épaisseur des Dièves dans la même zone (carte du bas).

8.2 RESULTATS DU CALAGE

8.2.1 Paramètres hydrodynamiques déduits de la phase de calage

Le Tableau 17 résume les valeurs des paramètres hydrodynamiques obtenues après calage en régime transitoire. Pour les paramètres dont les valeurs sont spatialement distribuées, des cartes sont présentées et commentées dans les paragraphes ci-après.

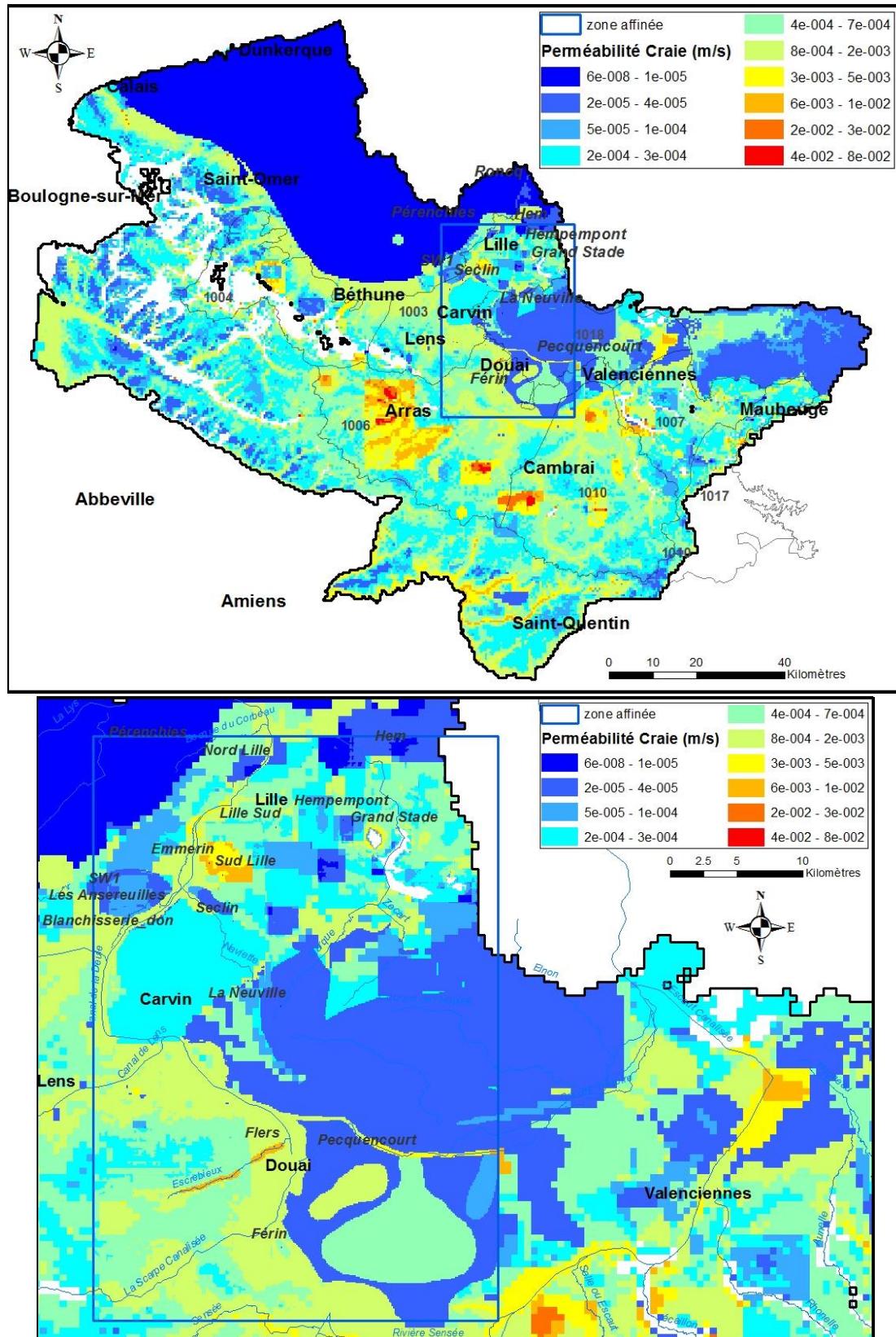
Numéro Couche	Formation	Propriété	Perméabilité (m/s)	Anisotropie verticale	Emmagasinement libre	Emmagasinement captif spécifique
Couche 1	Alluvions + sables littoraux	Aquifère	De 10^{-5} à 10^{-3}		10^{-1}	10^{-6}
Couche 2	Limons	Semi-perméable	10^{-6}	10^{-2}	2.10^{-1}	10^{-6}
Couche 3	Argiles des Flandres – Yprésien	Aquitard	10^{-9}		10^{-2}	10^{-6}
Couche 4	Sables d'Ostricourt – Landénien	Aquifère	De 2.10^{-5} à 5.10^{-5}		10^{-1}	10^{-6}
Couche 5	Argiles de Louvil	Aquitard, aquifère dans les horizons sableux indurés	10^{-9} 2.10^{-5} (partie Est) 5.10^{-5} (craie en charge)		10^{-2}	10^{-6}
Couche 6	Craie du Séno-Turonien productive	Aquifère	De 10^{-6} à 5.10^{-2}		De 10^{-2} à 7.10^{-2}	De 1.10^{-8} à 2.10^{-4}
Couche 7	Craie du Séno-Turonien non productive	Aquitard	10^{-7}		10^{-2}	10^{-6}
Couche 8	Dièves	Aquitard	De 3.10^{-8} à 4.10^{-4}	De 10^{-6} à 1	10^{-2}	10^{-5}
Couche 9	Cénomanien	Aquitard, aquifère dans le Cénomanien riche en craie	De 10^{-7} à $2.5.10^{-3}$		10^{-2}	10^{-6}
Couche 10	Carbonifère	Aquifère	De 5.10^{-7} à 8.10^{-3}	0.1	0.15	10^{-6}

Tableau 17 : Paramètres hydrodynamiques obtenus après calage du modèle.

8.2.2 Distribution spatiale des perméabilités

Les figures ci-après présentent les distributions spatiales des perméabilités dans les couches de la Craie séno-turonienne (Figure 126) et des Dièves (Figure 127).

Sur la Figure 126, on retrouve en bleu une perméabilité autour de 10^{-5} m/s dans les parties captives. Dans les parties libres, les perméabilités sont plus fortes le long des cours d'eau et aussi en tête de bassins versants, ce qui est conforme aux observations de terrain. On observe une zone de plus forte perméabilité, vers Arras, sur la masse d'eau 1006, qui sera expliquée dans le chapitre 8.3.2 relatif au calage du modèle, comme sera expliquée également la distribution singulière des perméabilités dans le secteur de Pecquencourt.



Sur la couche des Dièves, les perméabilités n'ont pas tellement évolué par rapport au modèle régional. Cependant, la perméabilité a une valeur constante de 3.10^{-8} m/s sur la zone de contact avec les Calcaires carbonifères dans le modèle affiné.

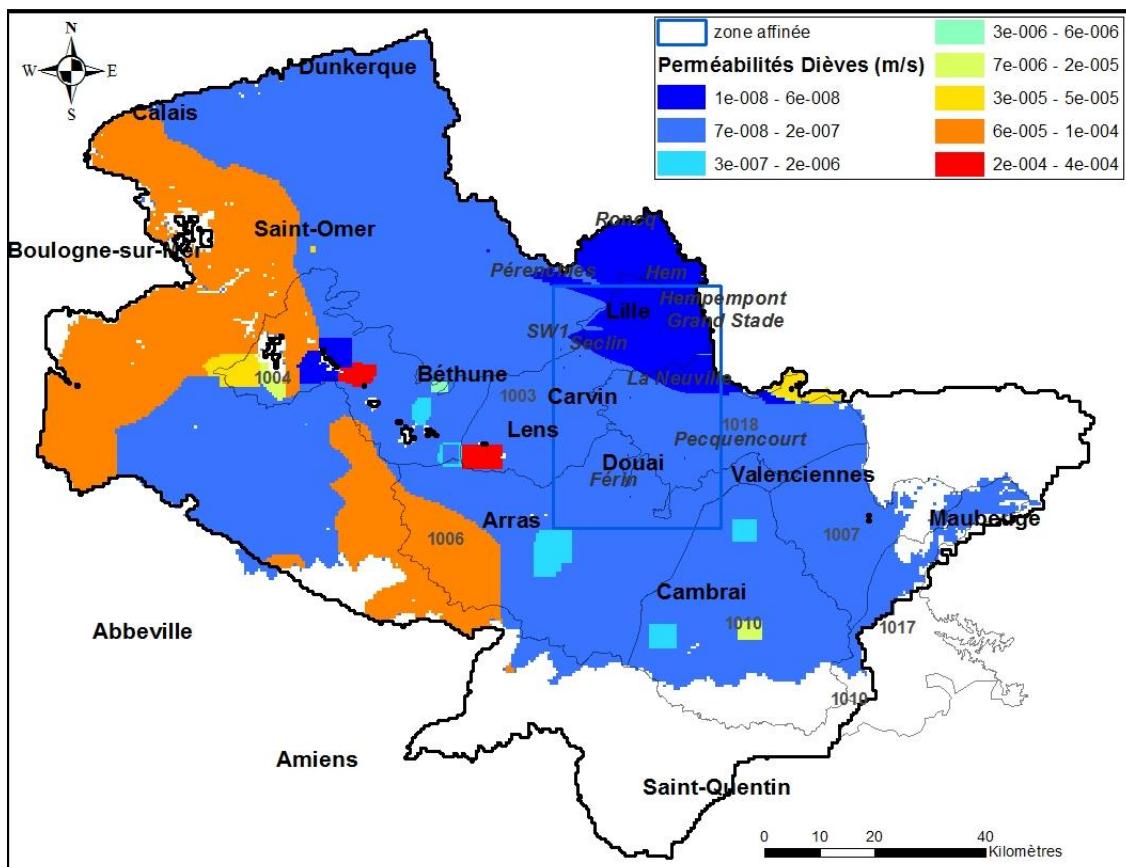


Figure 127 : Carte de distribution spatiale des perméabilités obtenue après calage des Dièves.

8.2.3 Distribution spatiale des coefficients d'anisotropie

La répartition spatiale obtenue après calage de l'anisotropie de perméabilité K_v/K_h dans les Dièves est illustrée sur la Figure 127. Elle a d'abord repris la distribution spatiale des coefficients d'anisotropie des Dièves du modèle du Carbonifère, puis a été ajustée aux différents points de calage identifiés dans la zone d'influence du couplage entre les deux modèles (8.1.6).

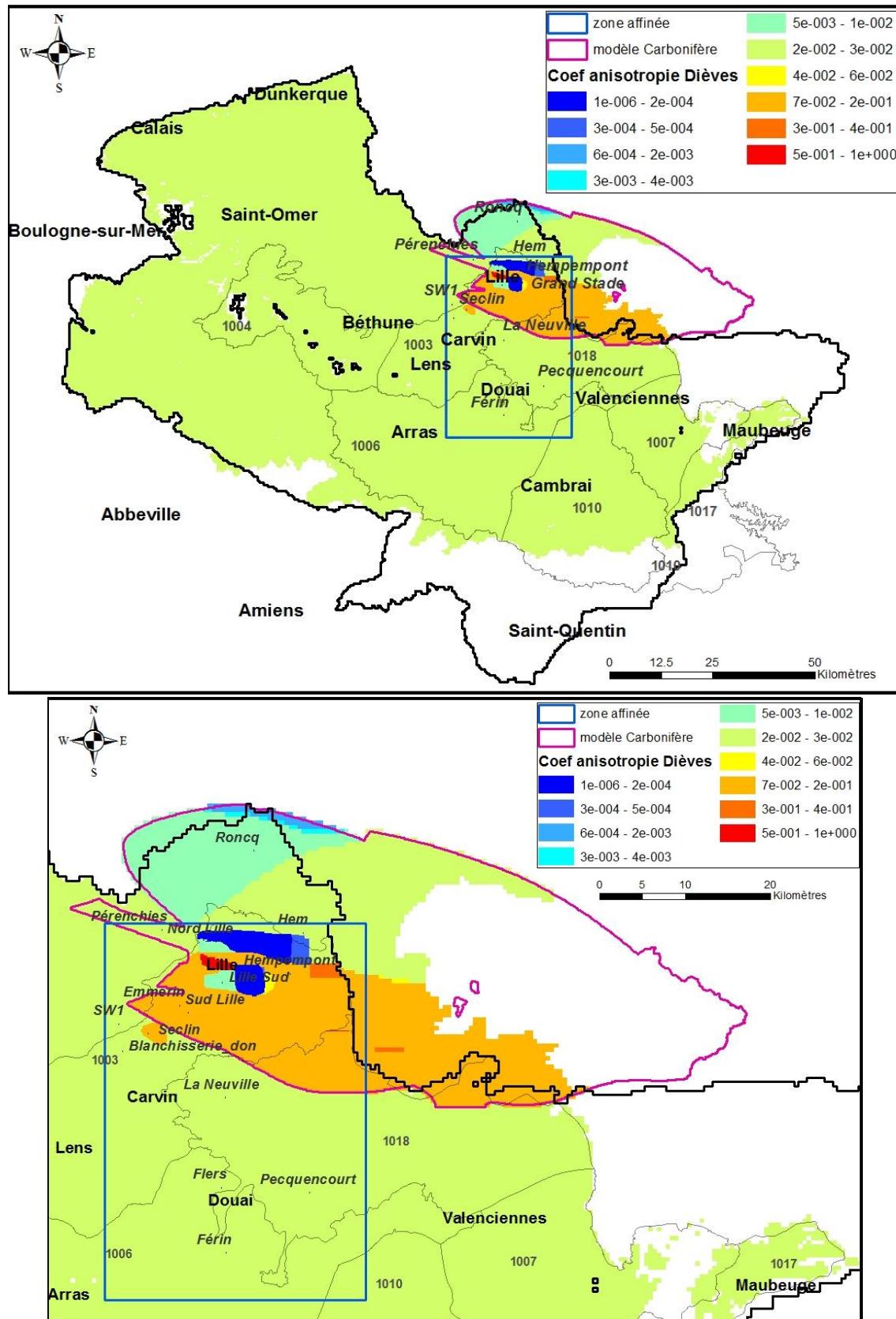


Figure 128 : Coefficients d'anisotropie de perméabilité K_v/K_h dans les Dièves après calage.

8.2.4 Distribution spatiale des perméabilités d'échange nappe-rivière

Sur la Figure 129 sont représentées les valeurs des « perméabilités de colmatage » des rivières pour la caractérisation des échanges nappe-rivière à l'issue du calage.

En dehors de la zone affinée, la perméabilité d'échange nappe-rivière est relativement homogène autour 10^{-5} m/s, ce qui témoigne de rivières très peu colmatées, configuration courante en contexte de faibles prélèvements en nappe où les rivières drainent le milieu souterrain. Elle a été diminuée au Sud sur la masse d'eau 1010 autour de Cambrai.

Dans la zone affinée, les valeurs sont plus faibles sur la plupart des cours d'eau et notamment sur les canaux et rivières canalisées. Les valeurs sont autour de 10^{-7} m/s sur le Canal de la Deûle, 10^{-8} m/s sur la Scarpe canalisée en amont du champ captant de Féerin, et 10^{-10} m/s autour du champ captant de Pecquencourt ce qui correspond à un canal quasi étanche.

Les faibles valeurs des « perméabilités de colmatage » affectées aux rivières de la zone affinée traduisent un colmatage accentué des cours d'eau dans ce secteur. Ceci s'explique vraisemblablement par le fait que les forts prélèvements concentrés dans cette zone y abaissent significativement les niveaux piézométriques, d'où découlent les phénomènes habituellement constatés lorsque les niveaux de rivière sont supérieurs à ceux des nappes : 1) inversion du sens des échanges hydrauliques entre nappe et rivières, ceux-ci se faisant alors des rivières vers la nappe plutôt que de la nappe vers les rivières comme c'est le cas général en contexte naturel, 2) recharge continue des nappes par les rivières, 3) colmatage du lit des cours d'eau lorsque les aquifères sont poreux car les matières en suspension transportées par les écoulements de surface sont retenues par le lit et les berges des rivières qu'elles colmatent progressivement.

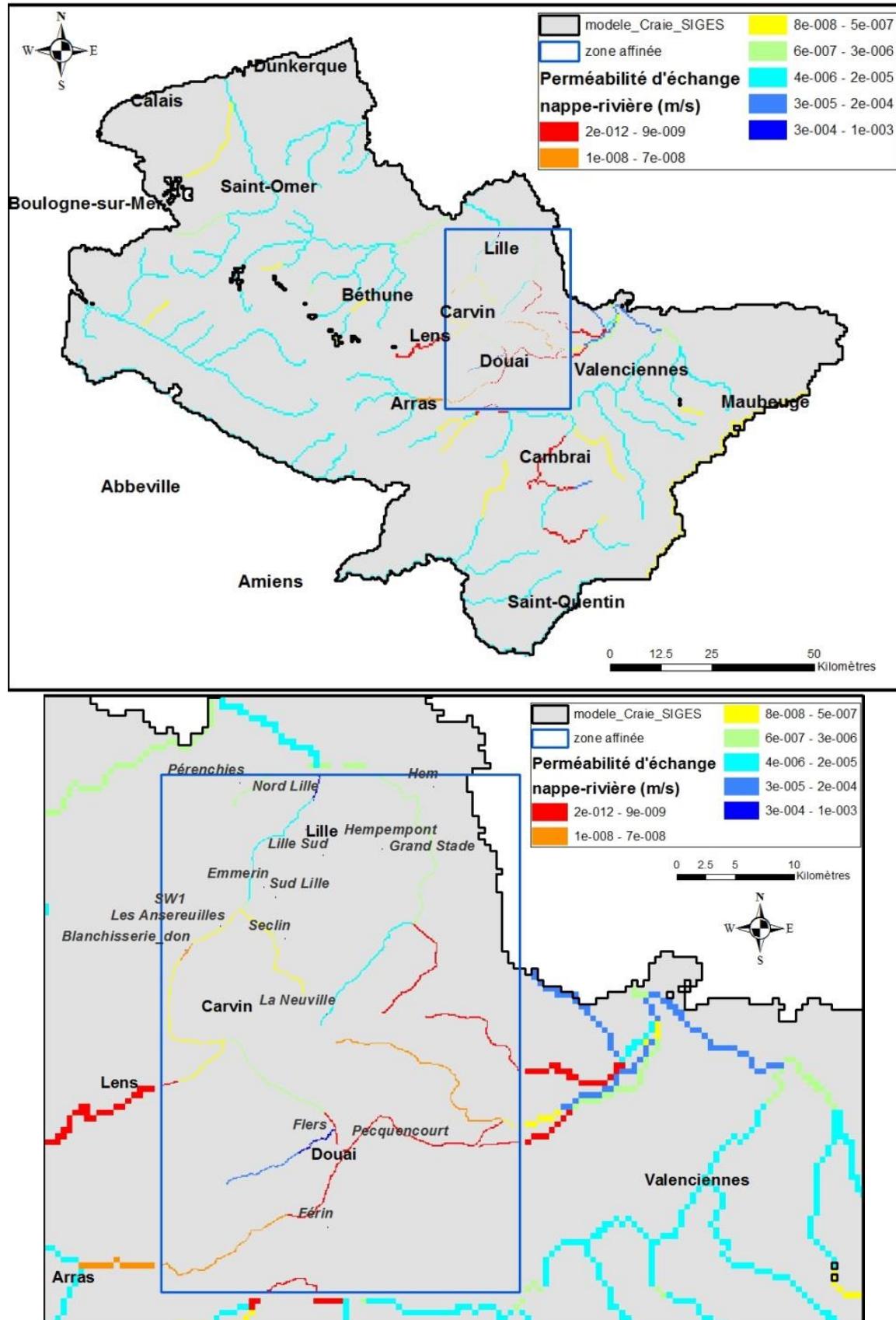


Figure 129 : Perméabilité de colmatage du lit des cours d'eau (après calage) :
Vue d'ensemble (en haut) et zoom sur la zone affinée (en bas).

8.3 RESULTATS DU CALAGE SUR LA PIEZOMETRIE

8.3.1 Cartes piézométriques simulées

La carte piézométrique Basses-eaux 2009 de la nappe de la Craie et le tracé des isopièzes simulées par le modèle à la même période sont présentés à la Figure 130 pour la zone affinée, et à la Figure 131 pour l'ensemble de la zone modélisée.

Le modèle restitue bien l'allure de la nappe de la Craie dans sa partie libre et sous recouvrement quaternaire (zone au Sud du modèle), en particulier dans les secteurs aux reliefs bien marqués (collines de l'Artois, bordures de l'Avesnois) où les isopièzes suivent en général la surface topographique. Dans la zone affinée (Figure 130), où la piézométrie est nettement influencée par les pompages, on note en revanche de forts écarts entre courbes piézométriques simulées et « observées ». Ces écarts sont toutefois à relativiser car le tracé des isopièzes « observées » est entaché de réelles incertitudes lorsque la nappe de la Craie se trouve sous recouvrement des sables du Landénien, faute de mesures suffisantes pour étayer le tracé de la carte piézométrique.

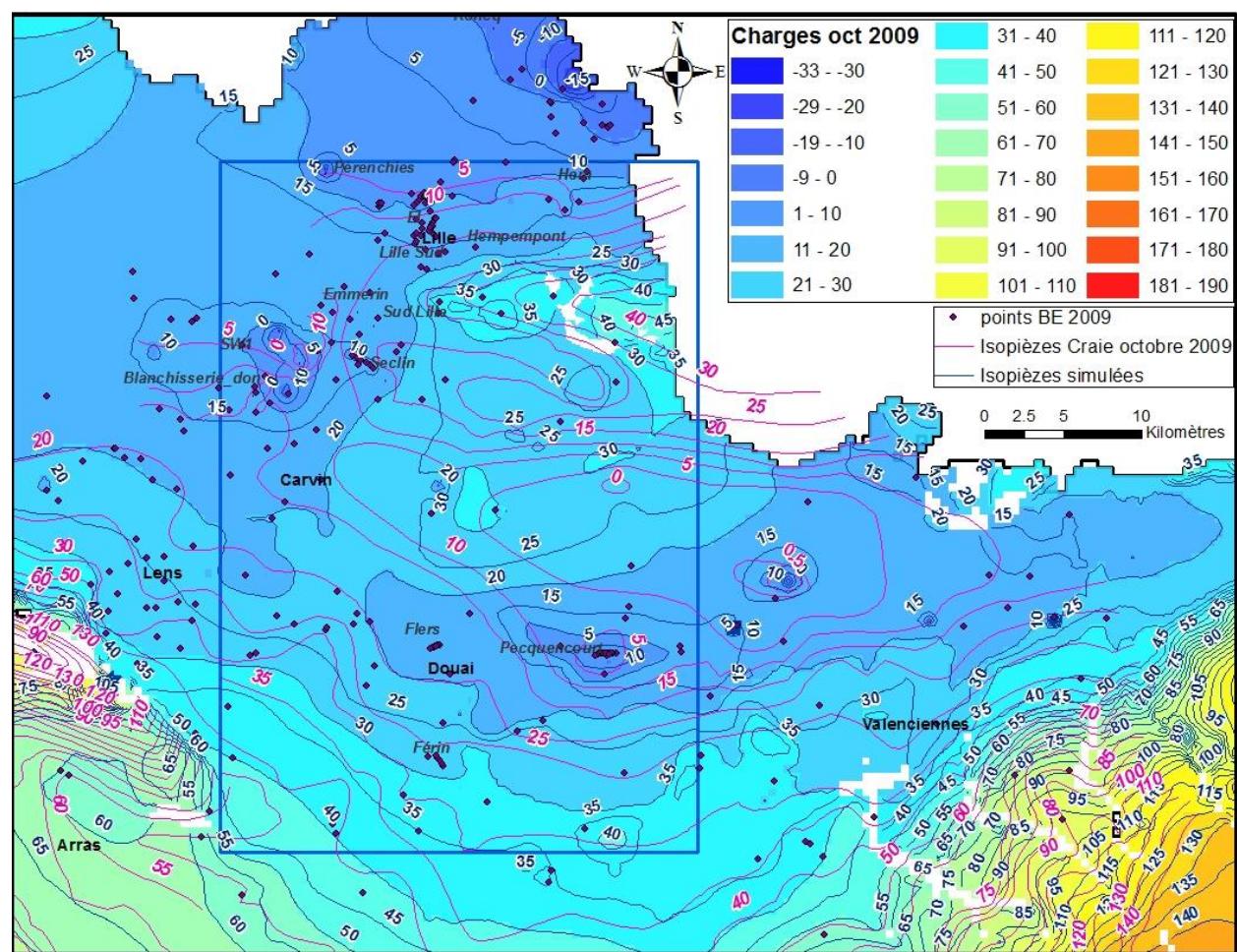


Figure 130 : Comparaison de la piézométrie simulée de la nappe de la Craie en Octobre 2009 avec les isopièzes Basses Eaux 2009 – zoom sur la zone affinée.

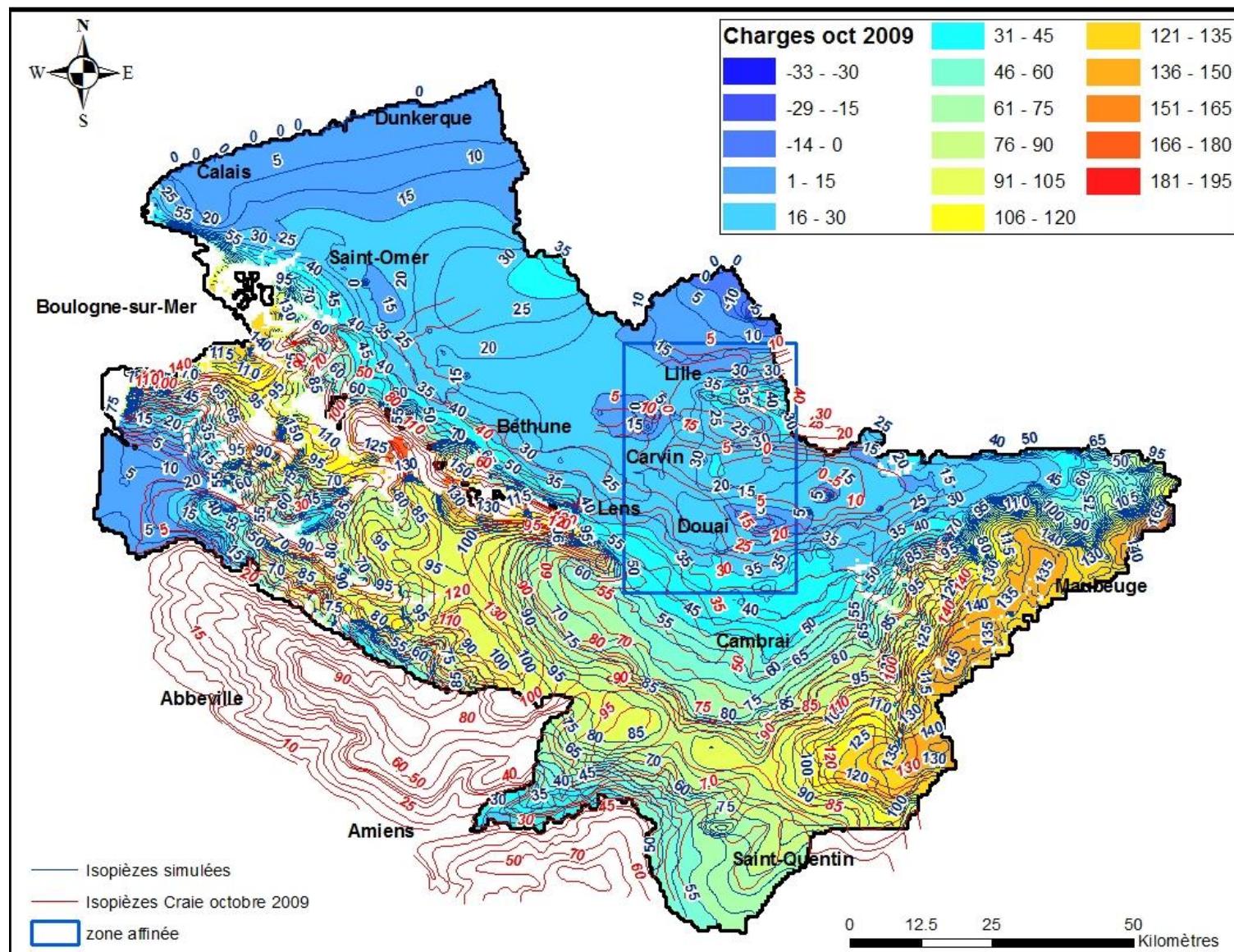


Figure 131 : Comparaison de la piézométrie simulée de la nappe de la Craie en Octobre 2009 avec les isopiez Basses Eaux 2009.

8.3.2 Chroniques piézométriques simulées sur l'ensemble du modèle

Globalement, le modèle affiné apporte de sensibles améliorations par rapport au modèle régional, même s'il reste des secteurs où le calage pourrait être amélioré (ceux-ci sont toutefois situés hors de la zone cible de cette étude, celle des champs captants).

Dans un premier temps, la comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées est effectuée sur la zone affinée : au droit des champs captants, puis par masse d'eau hors de la zone d'influence des champs captants. Dans un second temps, la comparaison est faite par masse d'eau pour les piézomètres ADES situés hors de la zone affinée (lorsque des améliorations ont été apportées par rapport au modèle régional).

Zone affinée

Nord et centre de Lille

Ce secteur est l'un des plus aménagés de la région et les chroniques piézométriques y sont significativement influencées par les prélèvements d'eau souterraine et par divers aménagements souterrains (structures enterrées, aménagements nécessitant des pompages pérennes, ...). Dans ce secteur, le couplage avec la nappe des Calcaires du Carbonifère a permis d'améliorer le calage des niveaux piézométriques de la Craie par rapport au modèle régional.

La comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées au Nord et au centre de Lille est illustrée à la Figure 132.

Les amplitudes de fluctuation sont bien restituées sur les points les plus au Nord de la zone affinée (N8, 00147A0341). Le niveau est correctement simulé en N8 mais il est trop bas au piézomètre 00147A0341. Par ailleurs, la comparaison de la chronique piézométrique simulée et de la chronique de prélèvement au point N8 (Figure 133) explique bien le changement de comportement observé en 2008.

Pour les points situés au Sud de la zone (forage PDG et piézomètre 00146B0737), les amplitudes simulées sont surévaluées mais les niveaux moyens sont conformes.

Dans le modèle régional, les niveaux simulés présentaient moins d'amplitude. Pour les points au Sud de la zone, les simulations étaient conformes aux observations mais les niveaux simulés dans les forages et piézomètres implantés au Nord étaient beaucoup trop amortis. C'est pourquoi il a été décidé de diminuer les coefficients d'emmagasinement captifs spécifiques de cette zone et de les harmoniser à une valeur de 2.10^{-5} m^{-1} dans le modèle affiné. Dans le modèle régional, autour des champs captants du Nord de Lille, les coefficients d'emmagasinement captifs spécifiques avaient des valeurs très élevées, jusqu'à 10^{-2} m^{-1} (Figure 134).

On observe sur le piézomètre 00146B0737 l'effet de la régulation forcée des niveaux piézométriques depuis 2006. Celle-ci n'a pas été simulée avec le modèle affiné car un travail de localisation précise des ouvrages reste à entreprendre.

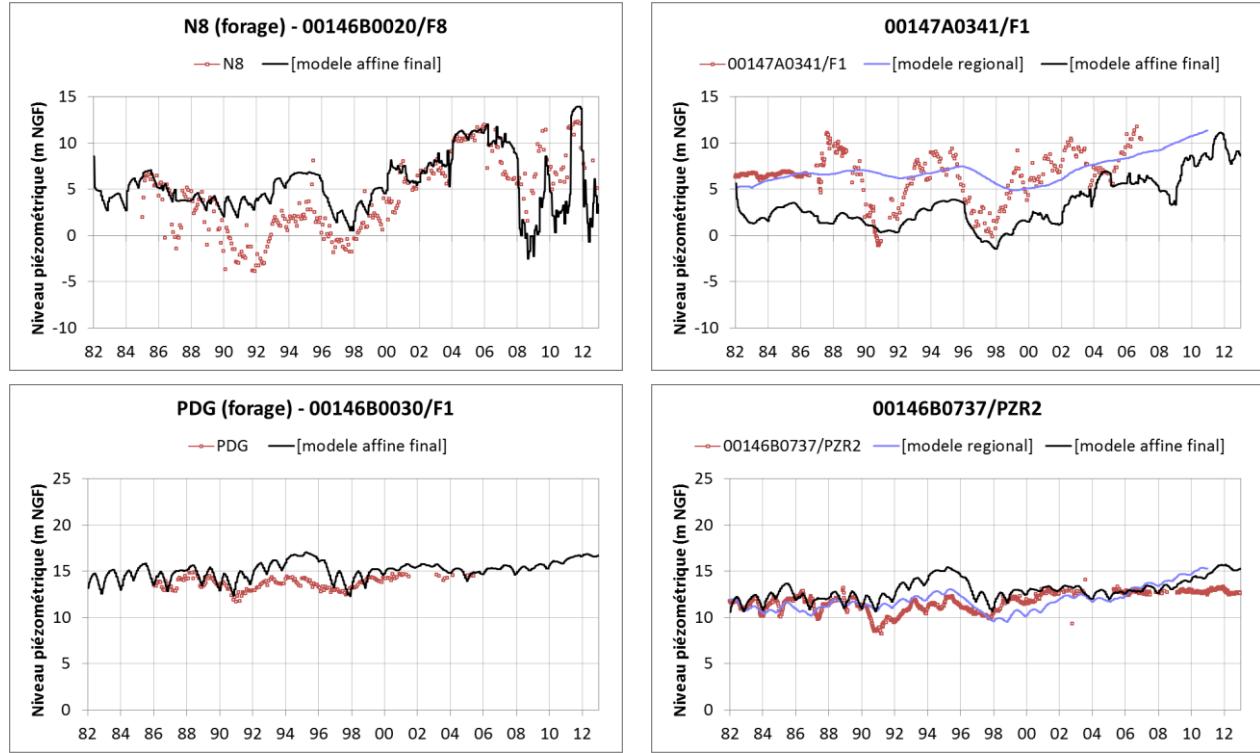


Figure 132 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées au Nord et centre de Lille.

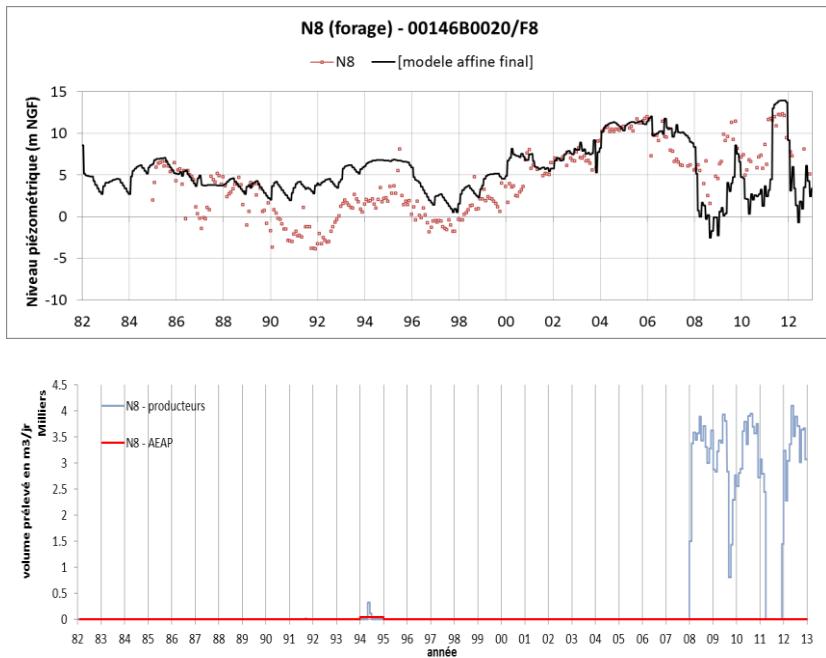


Figure 133 : Comparaison de la chronique piézométrique simulée et de la chronique de prélèvement au point N8.

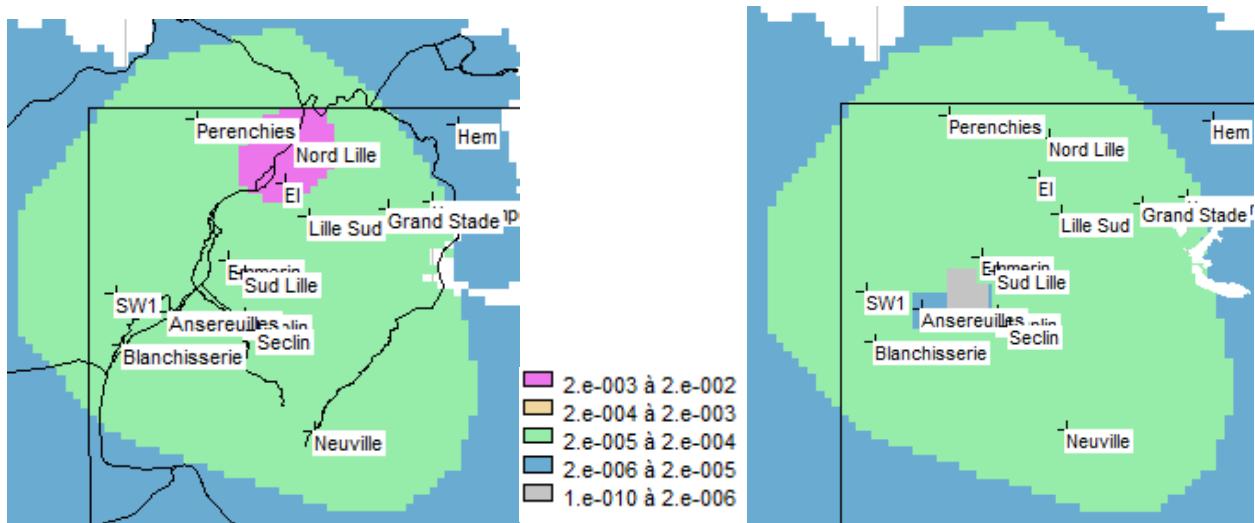


Figure 134 : Coefficient d'emmagasinement captif spécifique du modèle régional (à gauche) et du modèle affiné (à droite).

Lille Sud et Grand Stade

Dans ce secteur, les niveaux piézométriques simulés sont proches des niveaux observés (Figure 135). Le calage a pu être amélioré grâce au couplage avec les Calcaires du Carbonifère et à l'ajustement des perméabilités et des coefficients d'anisotropie verticaux dans les Dièves.

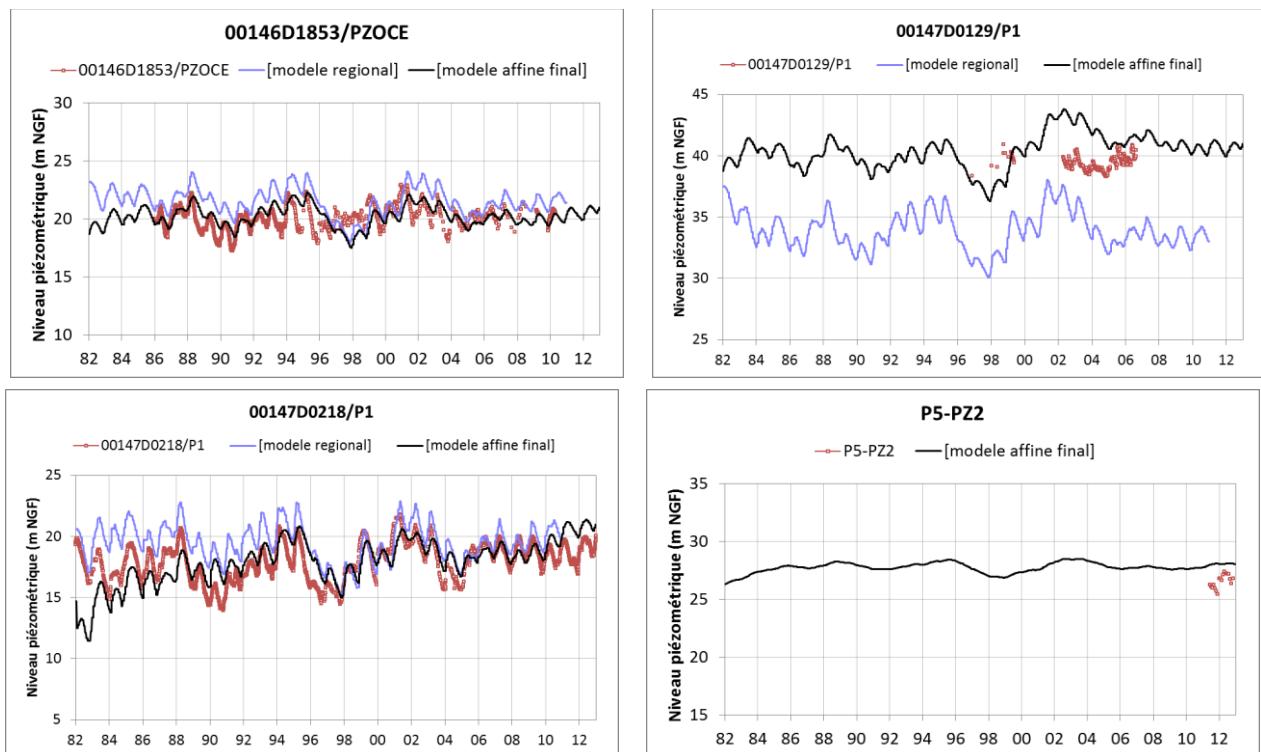


Figure 135 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Lille Sud et Grand Stade.

Hempempont

Pour le champ captant d'Hempempont, les niveaux piézométriques sont bien restitués dans les piézomètres 00148D0177 et PZEa01 (Figure 136).

Dans les forages HE3 et HE9, bien que les niveaux simulés soient trop faibles au début de la simulation, les chroniques simulées sont à peu près conformes aux observations après 1991. Les niveaux bas observés avant 1991 sont probablement associés à des prélèvements importants, non retranscrits dans les chroniques de prélèvement. Les chroniques observées s'arrêtent en 2010 mais il est possible d'observer la hausse des niveaux après 2008, due à la diminution des volumes prélevés (Figure 137). La chute brutale des niveaux simulée en 2012 correspond à un pic de prélèvement à la même date.

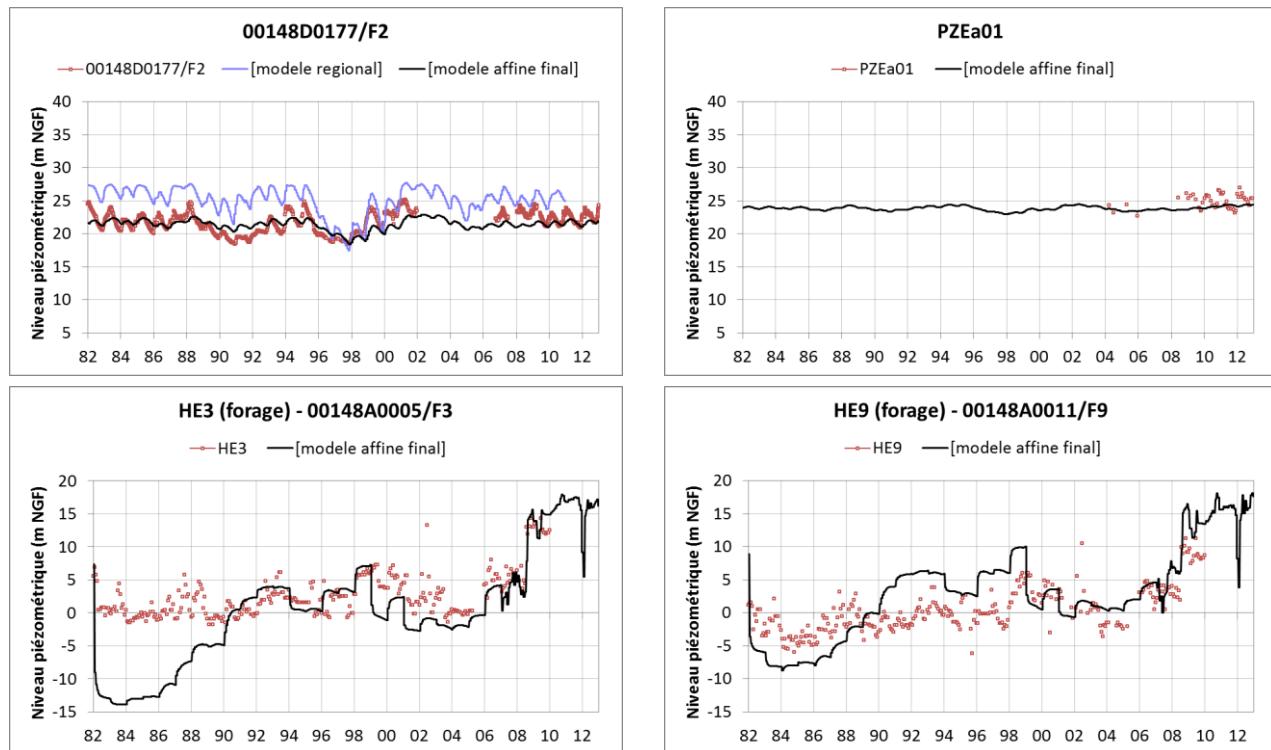


Figure 136 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Hempempont.

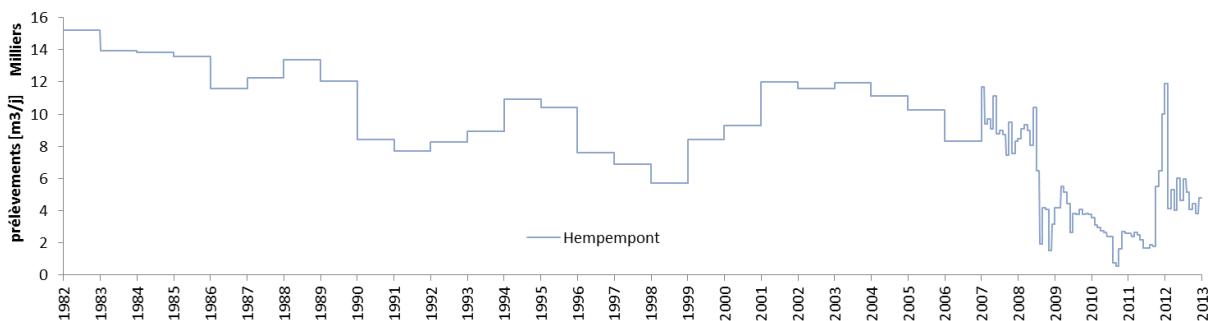


Figure 137 : Prélèvements totaux (en milliers de m^3 par jour) dans le champ captant d'Hempempont.

Emmerin – Houplin

Dans les champs captants d'Emmerin et d'Houplin, les niveaux et les tendances simulés par les piézomètres et les forages sont conformes aux observations (Figure 138 et Figure 139).

Les valeurs de perméabilité de la nappe de la Craie à Emmerin sont très élevées, de l'ordre de 10^{-3} m/s le long du canal et jusqu'à 5.10^{-3} m/s au droit du champ captant.

La zone du champ captant de Houplin est très sensible à la perméabilité attribuée à la nappe. Ses valeurs sont un peu moins élevées que sur Emmerin, mais elles restent fortes, jusqu'à 5.10^{-3} m/s.

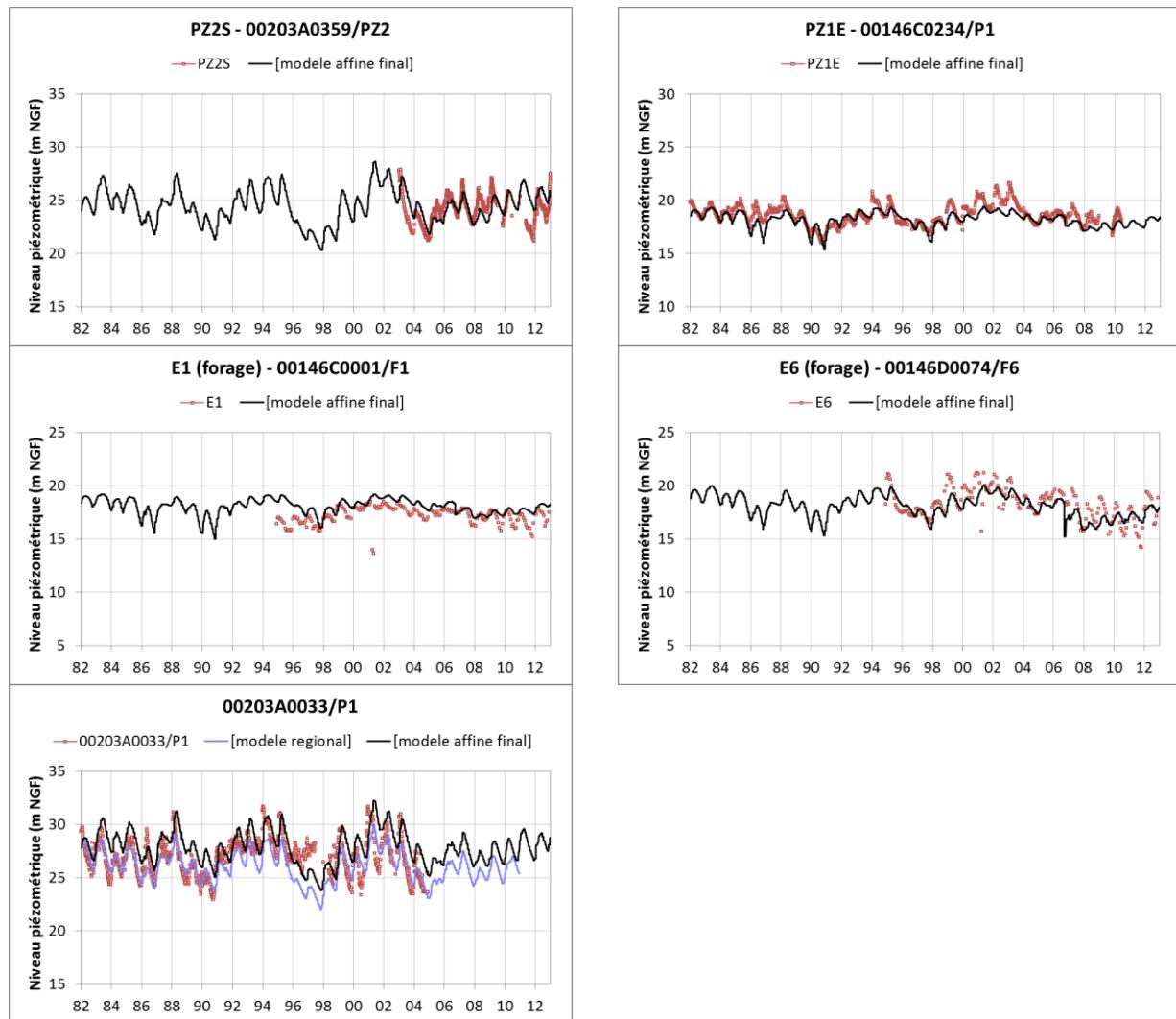


Figure 138 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Emmerin.

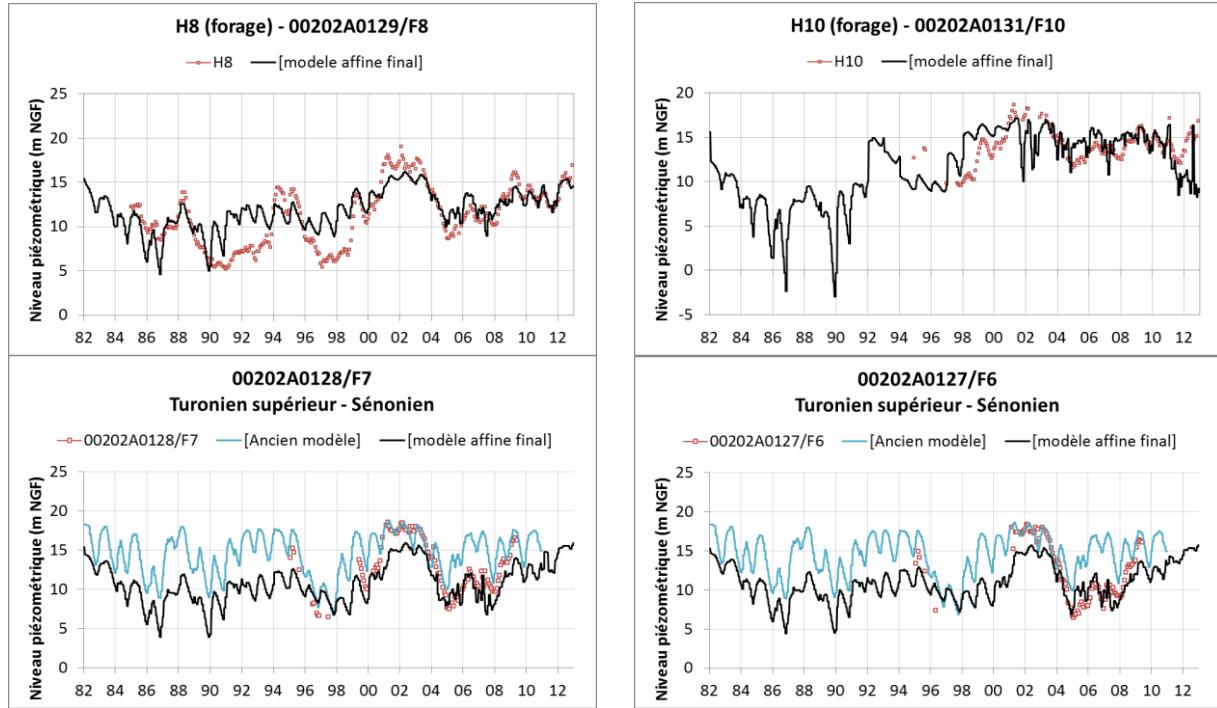


Figure 139 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Houplin-Ancoisne.

Les Ansereuilles

Dans ce secteur, les puits de pompage sont très nombreux et rapprochés ; ce qui complique le calage du modèle. Les nombreuses simulations réalisées ont montré que cette zone est très sensible à deux paramètres de calage : la perméabilité de la nappe de la Craie productive et la perméabilité d'échange nappe-rivière. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur l'ensemble du champ captant et, plus au Sud, la piézométrie est très bien reproduite au piézomètre PZ2P/00201C0126 (Figure 140).

La perméabilité de la Craie compacte a été homogénéisée à une valeur uniforme de 10^{-7} m/s. Sur une bande couvrant le Canal de la Deûle et encerclant les puits de pompage, les valeurs de perméabilité de la Craie productive sont les plus élevées, de 4.10^{-4} m/s à 8.10^{-4} m/s. Au Sud de la zone, la perméabilité est homogène à 2.10^{-4} m/s, et au Nord elle est plus faible, autour de 5.10^{-5} m/s.

Rappelons que les niveaux mesurés dans les puits sont des niveaux statiques, relevés dans les ouvrages de pompage lorsque ceux-ci sont en arrêt de production. La représentativité des niveaux mesurés reste donc incertaine dans la mesure où il n'est pas sûr que les effets dynamiques du pompage aient été totalement résorbés au moment de la mesure.

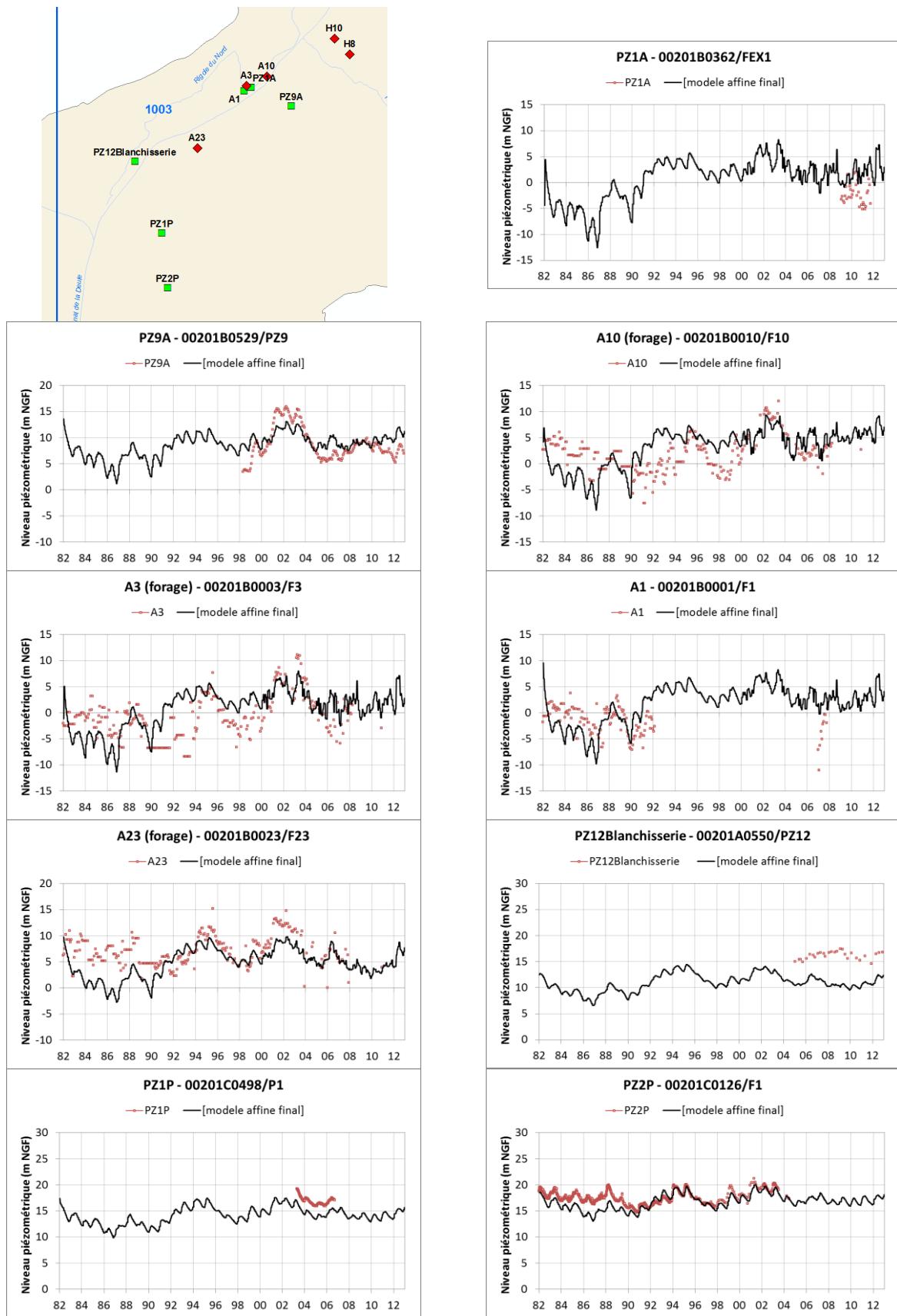


Figure 140 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées aux Ansereuilles.

Pecquencourt

Cette zone s'est avérée particulièrement difficile à caler parce que les piézomètres alignés sur une ligne Est-Ouest passant par le champ captant sont très réactifs aux fluctuations des prélèvements, tandis que les piézomètres situés au Nord et au Sud montrent des réactions très amorties. Ces réactions contrastées témoignent d'une très forte anisotropie directionnelle des transmissivités, que rien ne permet de délimiter spatialement. Dans le modèle régional, les niveaux d'eau des forages du champ captant sont bien simulés mais les deux piézomètres situés à proximité présentent des niveaux simulés bien supérieurs aux observations (de plus d'une dizaine de mètres).

Les chroniques piézométriques observées montrent que les piézomètres ont des comportements similaires aux puits de pompage, ce qui augure d'une zone de forte perméabilité entre les puits et les piézomètres.

Plusieurs tests de calage, non concluants, ont abouti soit à une bonne restitution des puits mais pas des piézomètres alentour, soit, à l'inverse, à une simulation correcte des deux piézomètres proches des pompages mais avec des niveaux piézométriques trop bas dans le champ captant. Le comportement hydrogéologique de ce secteur est donc complexe.

En effet, au Sud-Est de la haute vallée de la Lys, la piézométrie est fortement influencée par une série de failles longitudinales du horst de l'Artois, qui peuvent engendrer des écarts de plusieurs dizaines de mètres par compartimentage de l'aquifère.

Au Sud-Ouest de la faille de Marqueffles, la craie aquifère a été érodée et l'aquifère de la Craie est donc moins épais et moins productif. Les écoulements bloqués vers le nord créent des sources de débordement dans la vallée de la Scarpe. Les courbes piézométriques sont nettement déviées dans la partie Sud.

Le comportement singulier de ce secteur pourrait alors s'expliquer par le système de failles proches et par la présence de karsts, mais les informations disponibles sont rares. Concrètement, l'analyse des cartes de transmissivités calées par SB_2O pour la construction d'un modèle de gestion du champ captant de Pecquencourt (Figure 141) a pu apporter d'utiles pistes de réflexion.

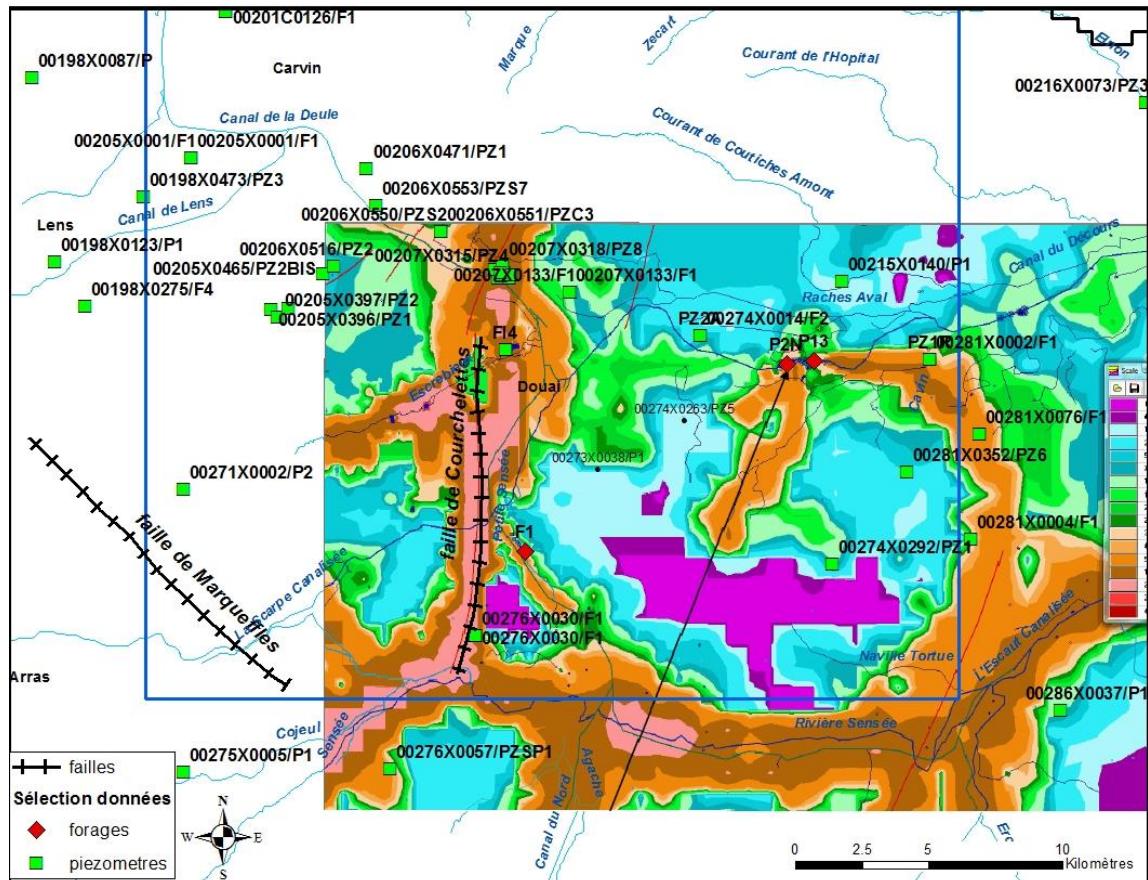


Figure 141 : Valeurs de transmissibilités issues du modèle de gestion du champ captant de Pecquencourt réalisé par SB₂O en 2009 (fortes valeurs en orange et rose, faibles valeurs en bleu et violet), avec localisation des piézomètres de calage et des failles de Marqueffles et Courchelettes.

La Figure 142 présente la distribution finale des perméabilités résultant du calage sur ce secteur. Les modifications majeures effectuées pour améliorer le calage ont été les suivantes :

- Ajout d'une zone très perméable joignant les deux puits de Pecquencourt (P2N et P13, losanges rouges) aux deux piézomètres situés à l'Est et à l'Ouest. Ces 4 ouvrages réagissent de façon semblable ; cette zone très perméable correspondrait à une zone faillée sur le tracé du cours d'eau.
- Diminution de la perméabilité au Sud (même valeur qu'au Nord). Le piézomètre 00274X0292 situé au Sud-Est des forages réagissant de manière similaire aux puits, il faut donc maintenir une zone assez perméable au Sud-Sud-Est et ajuster sa perméabilité en fonction de la différence de niveau piézométrique entre les puits de Pecquencourt et ce piézomètre.
- Ajout d'une zone plus perméable le long du cours d'eau le Cavin, au Sud-Est du champ captant, jusqu'au piézomètre 00281X0352.
- Ajout d'une zone plus perméable au Sud-Ouest du champ captant, le long des deux piézomètres 00273X0038 et 00274X0263 (données SIADO).

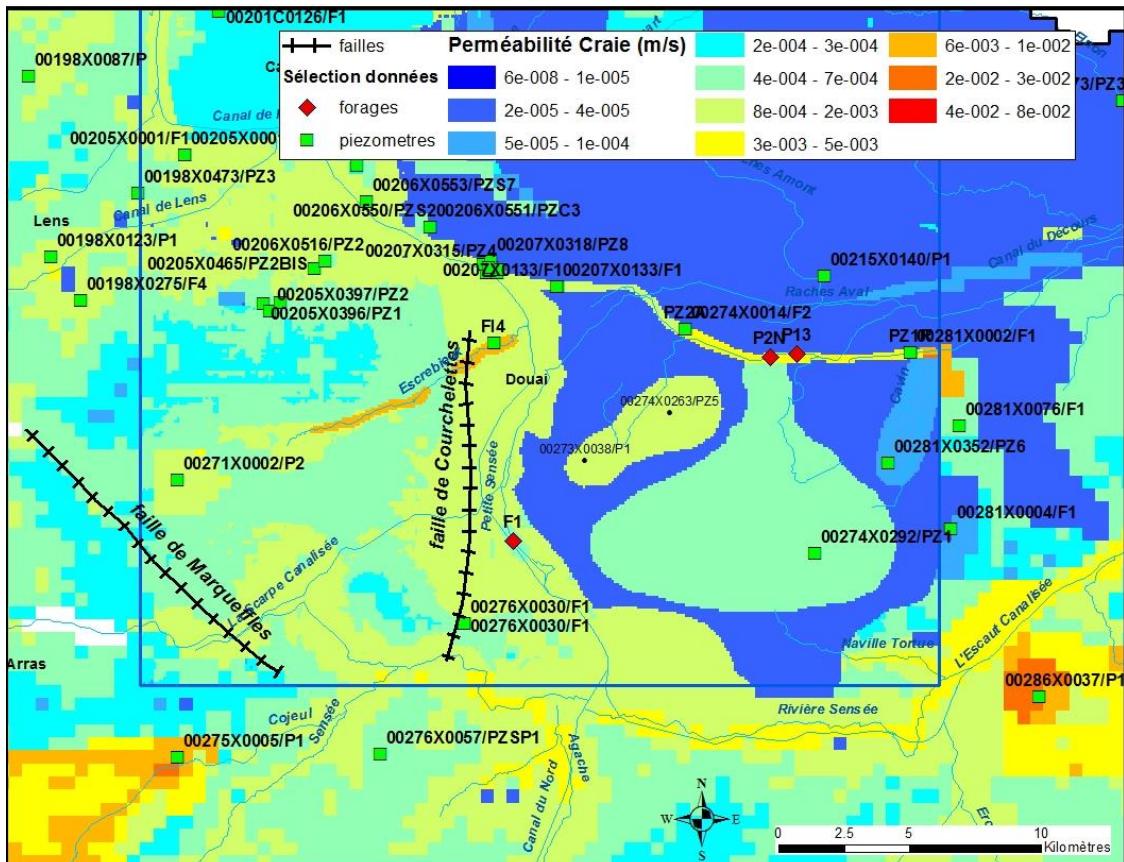


Figure 142 : Zoom sur la zone de Pecquencourt de la carte de distribution des perméabilités du modèle de la Craie affiné.

Les figures ci-dessous présentent les chroniques piézométriques simulées et observées dans les puits et piézomètres du champ captant de Pecquencourt (Figure 143) à l'issue du calage. Des données complémentaires comme celles du réseau SIADO ont également été utilisées pour affiner le calage dans ce secteur (Figure 144).

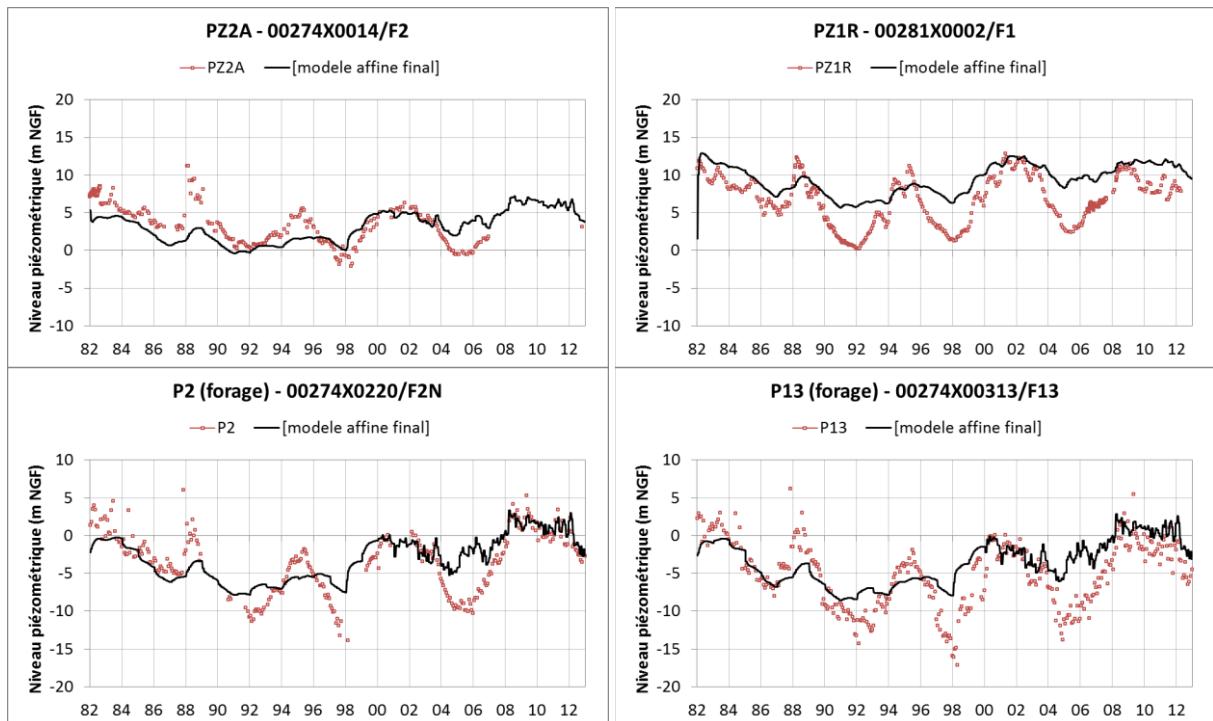


Figure 143 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Pecquencourt.

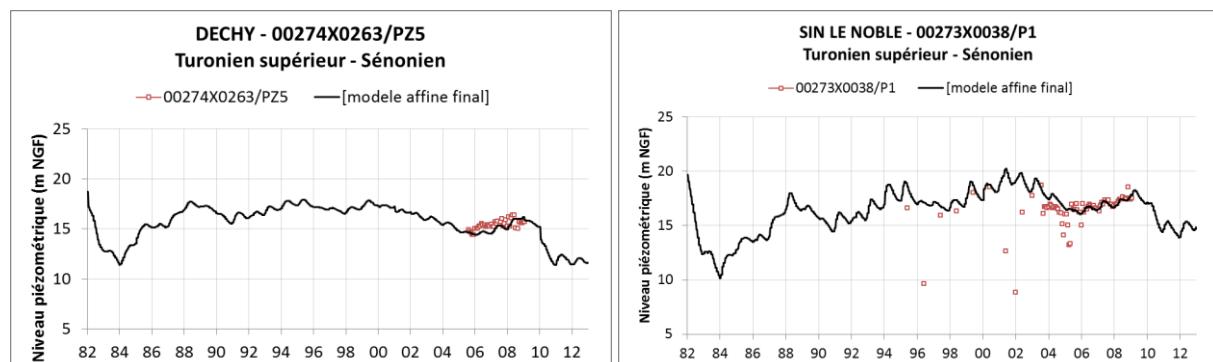


Figure 144 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées autour de Pecquencourt – Données SIADO.

Flers et Féerin

La faille dite de Courchelettes, de direction Sud-Nord s'étend de la Sensée à Auby jusqu'à l'Ouest de Flers-en-Escrebieux. On constate de part et d'autre de cette faille, une cassure de la topographie et une chute de la piézométrie (Figure 145).

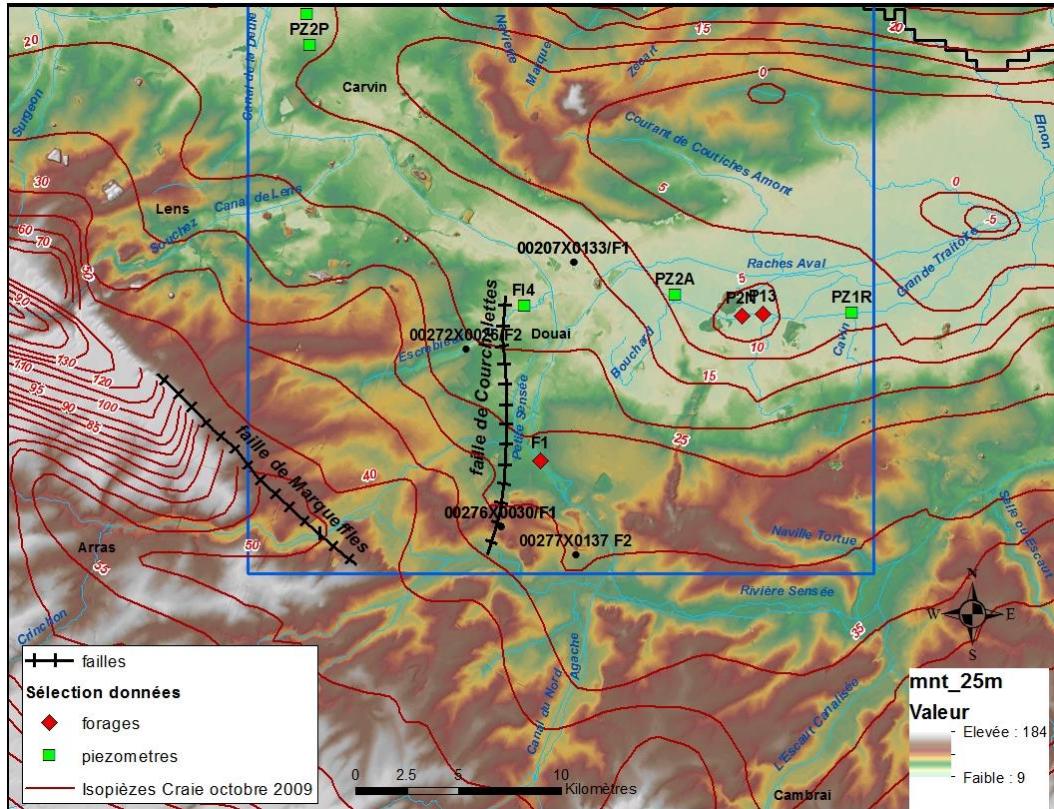


Figure 145 : Topographie et carte piézométrique d'octobre 2009 de part et d'autre de la faille de Courchelettes.

Dans ce secteur, les perméabilités de la Craie sont plus élevées le long des cours d'eau : l'Escrebieux et le Canal de la Deûle (Figure 142). Elles diminuent lorsque la nappe de la Craie devient captive à l'Est du canal.

La comparaison des chroniques observées et simulées montre une nette amélioration par rapport au modèle régional. Les niveaux simulés sur les deux piézomètres 00207X0133 et 00273X0054 du champ captant de Flers (Figure 146), ainsi que sur le piézomètre 00276X0030 (Figure 147) du champ captant de Féerin sont conformes aux observations. En revanche, dans le forage F1 situé sur le canal, les niveaux simulés sont trop élevés. Ils sont probablement contrôlés par le niveau d'eau constant imposé dans le modèle au canal.

La vérification des niveaux simulés sur deux ouvrages complémentaires des réseaux SIADO et Noréade confirme la bonne représentativité du calage (Figure 148).

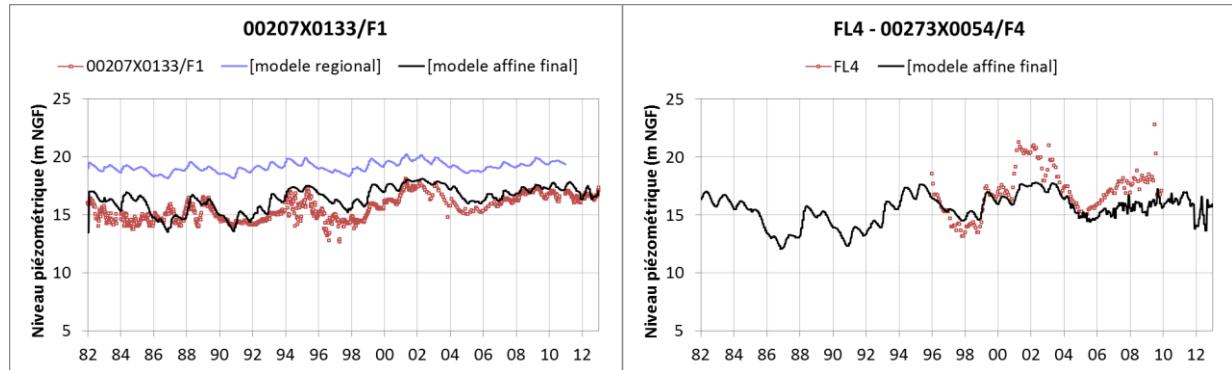


Figure 146 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Flers.

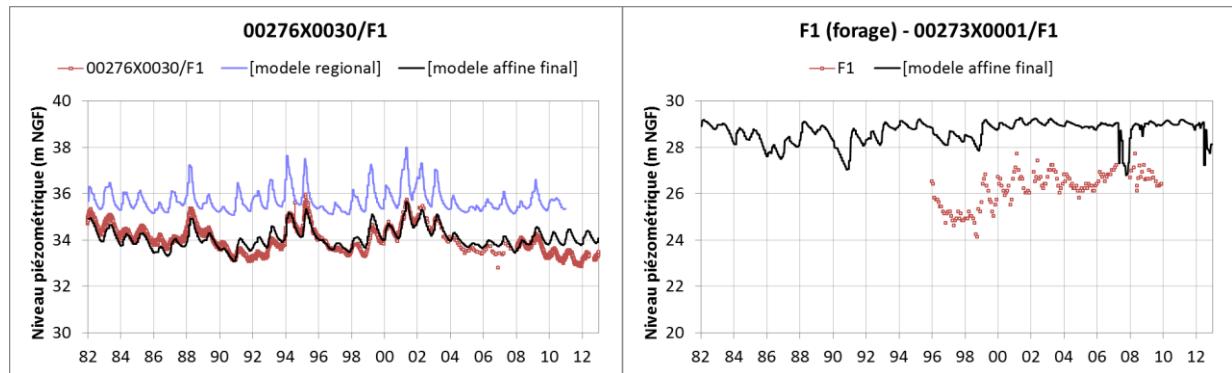


Figure 147 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées à Féerin.

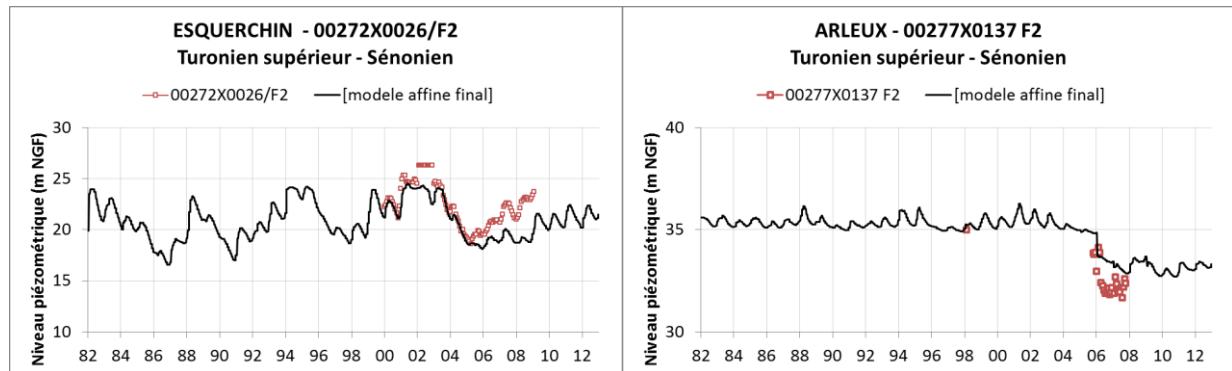


Figure 148 : Comparaison des chroniques piézométriques simulées et observées aux piézomètres 00272X0026 du réseau SIADO et 00277X0137 du réseau Noréade.

Pérenchies

Les niveaux piézométriques observés sont mesurés dans un forage, ils sont donc fortement influencés. Ils ne sont disponibles qu'après 1996 mais il est possible d'observer une tendance à la hausse à partir de 1997. Les niveaux piézométriques simulés oscillent entre 0 m NGF et 7 m NGF entre 1982 et 1995 puis diminuent en 1996, et enfin présentent une tendance à la hausse après 1997. Les niveaux simulés sont trop hauts (de 5 à 10 m NGF) mais les tendances sont correctes. La corrélation avec les données de prélèvement explique la baisse des niveaux en 1996, un pic de débit prélevé étant observé à la même date.

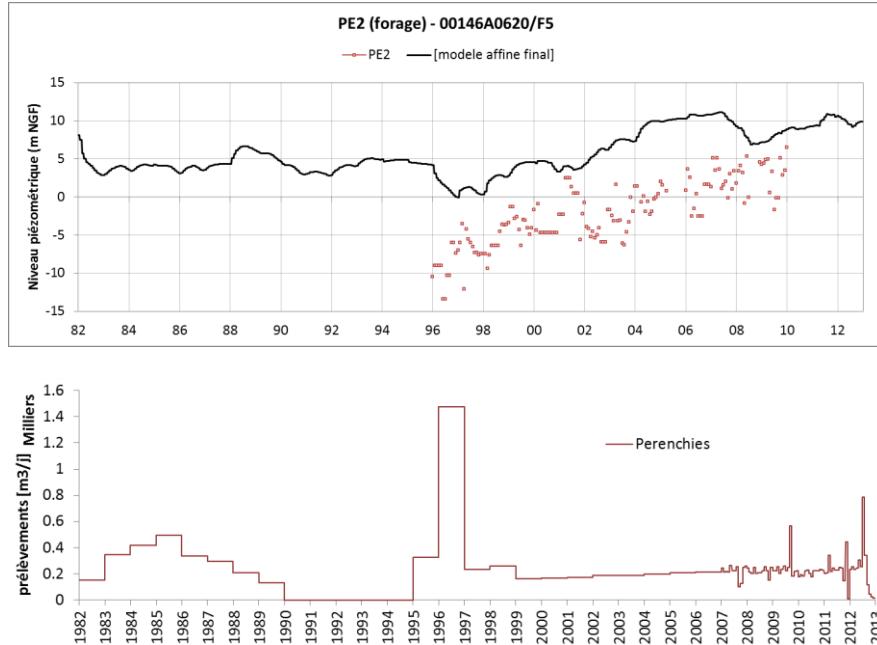


Figure 149 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données MEL) et simulées à Pérenchies (en haut), et chronique des volumes prélevés (en bas).

Sainghin-en-Weppes

Les niveaux simulés au piézomètre 00201A00117 sont bien conformes aux observations, lesquelles prennent fin en 2000 (Figure 150). Etant proche des champs captants des Ansereuilles, ce secteur est également sensible aux variations de perméabilité de la nappe de la Craie.

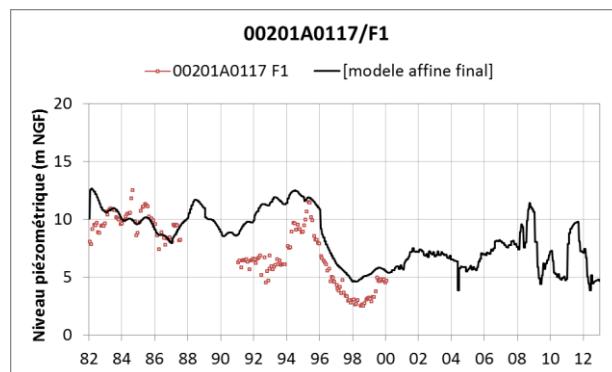


Figure 150 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données MEL) et simulées à Sainghin-en-Weppes.

Zone affinée – ME 1003

Dans ce secteur, situé au centre Ouest de la zone affinée, entre les champs captants des Ansereuilles et de Férin, la piézométrie est bien reproduite et le modèle affiné apporte des améliorations par rapport au modèle régional.

Nous avons vu précédemment que le réseau hydrographique joue un rôle important pour l'ensemble de la masse d'eau 1003, essentiellement le long du Canal de la Deûle et vers Seclin. La rivière contribue à alimenter la nappe de la Craie dans cette zone.

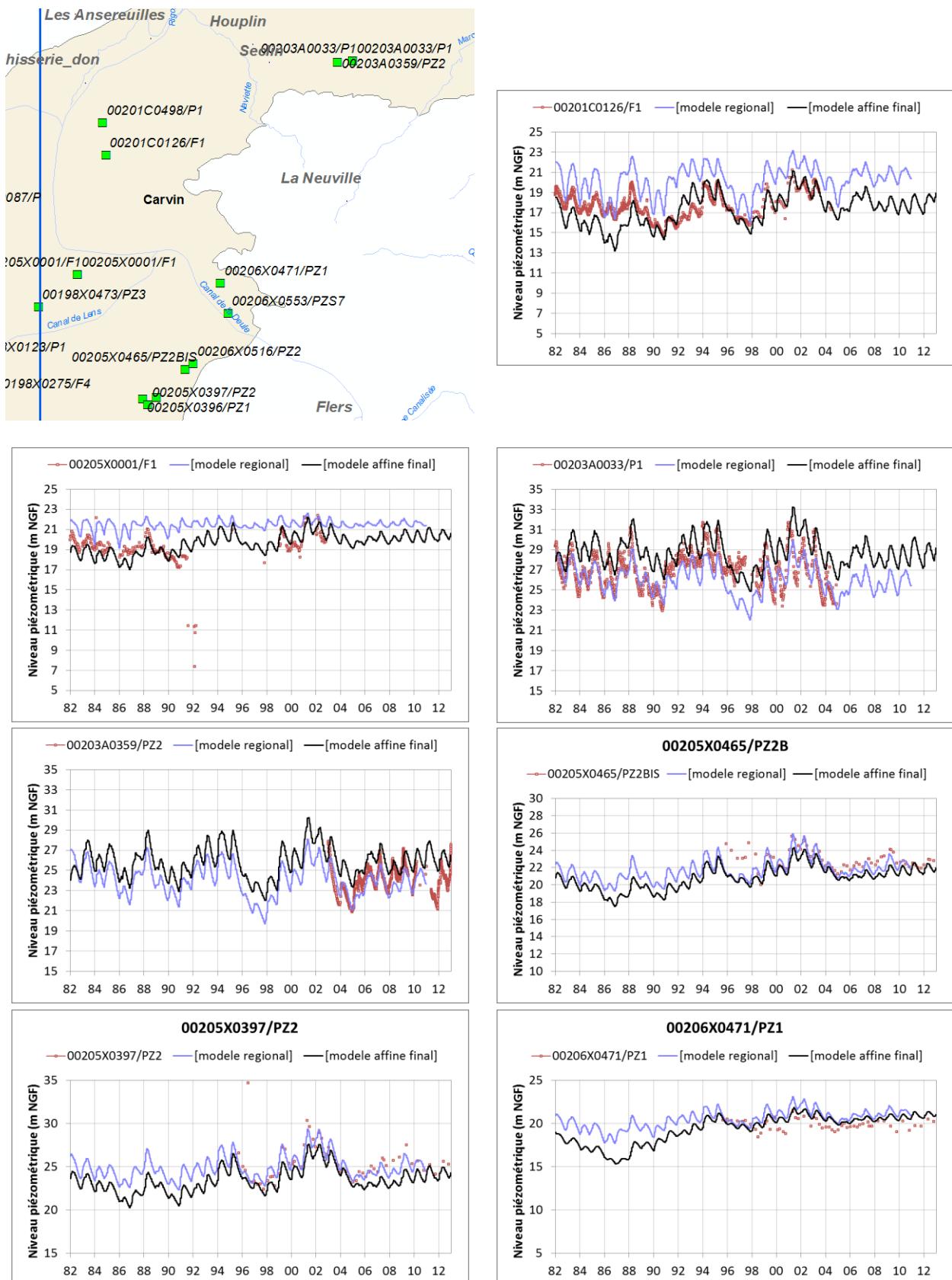
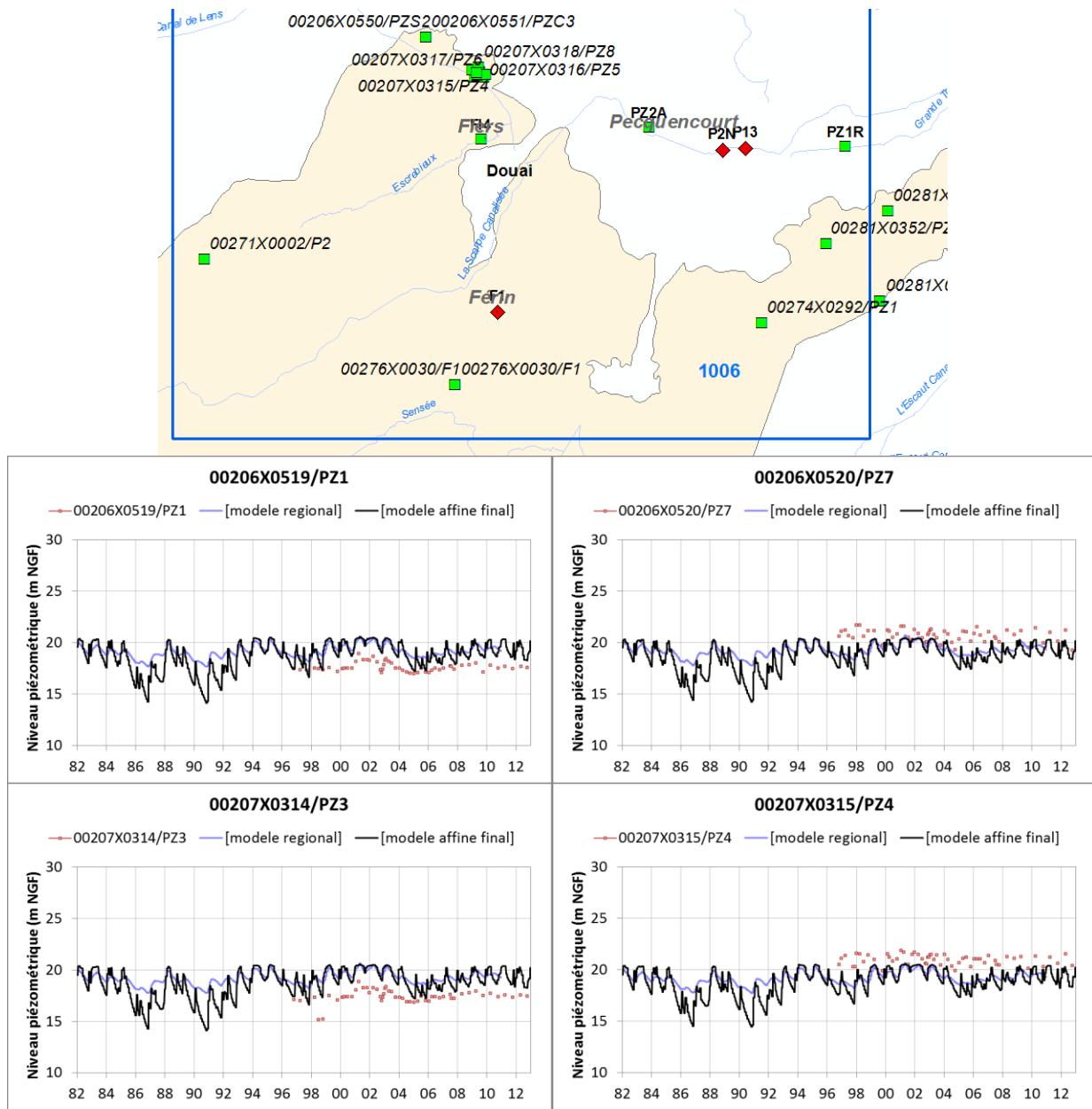


Figure 151 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1003.

Zone affinée – ME 1006

De même, sur le reste de la masse d'eau 1006 située dans la zone affinée et hors des champs captants, la piézométrie est bien reproduite et le modèle affiné apporte des améliorations par rapport au modèle régional. Ce constat est vrai de manière générale sur toute la masse d'eau 1006.



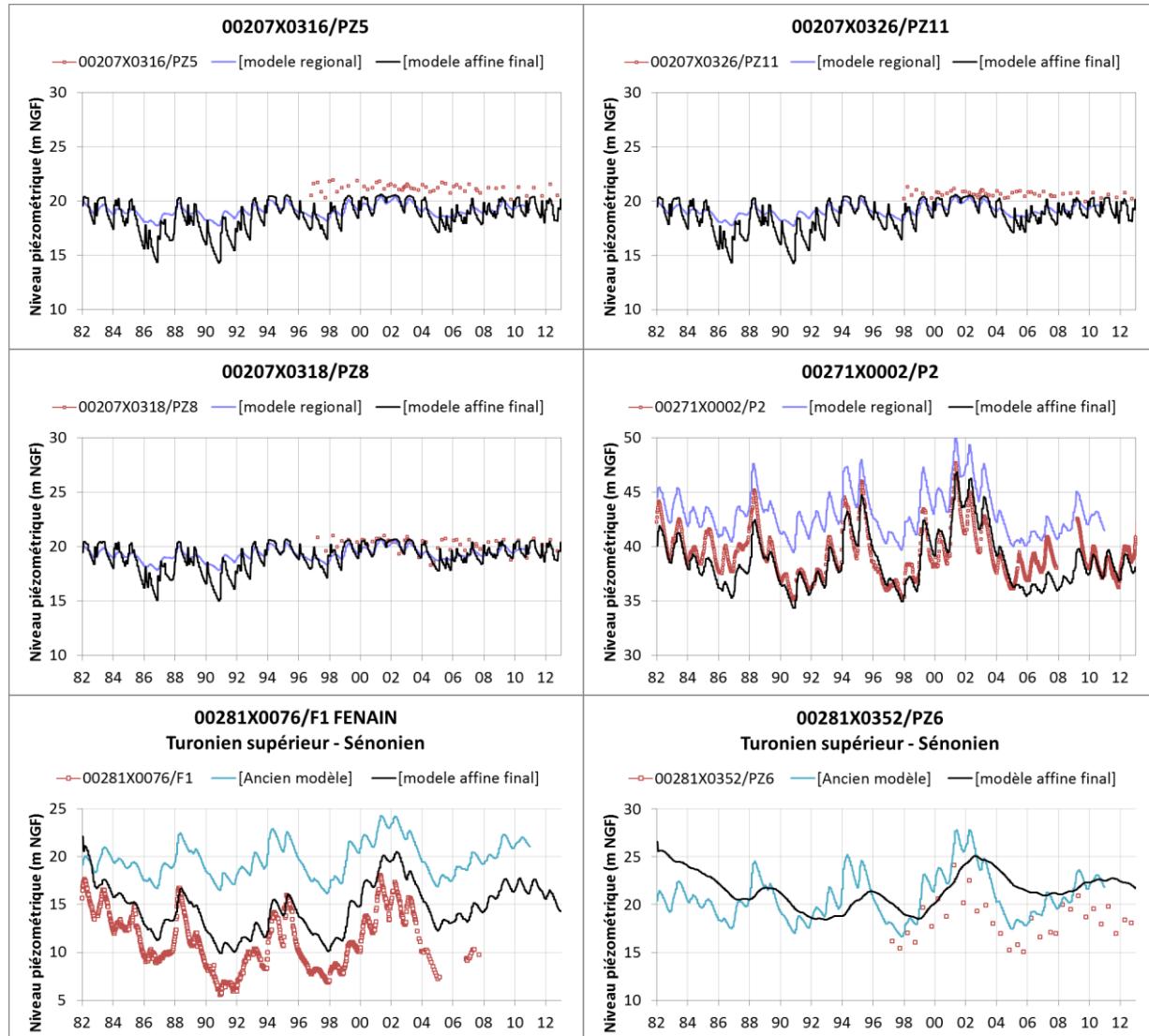


Figure 152 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1006.

Zone affinée – ME 1018

Dans ce secteur, la Craie est sous couverture tertiaire et la nappe est généralement captive. Les modifications apportées au secteur de Pecquencourt ont amélioré la simulation des piézomètres au Sud de la zone. Au Nord, en revanche, des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour acquérir de nouvelles données sur la Craie captive et sur les Sables d'Ostricourt afin d'améliorer le calage dans ce secteur. Des chroniques piézométriques acquises par Noréade (Figure 154) permettent toutefois de conforter les résultats du calage dans ce secteur.

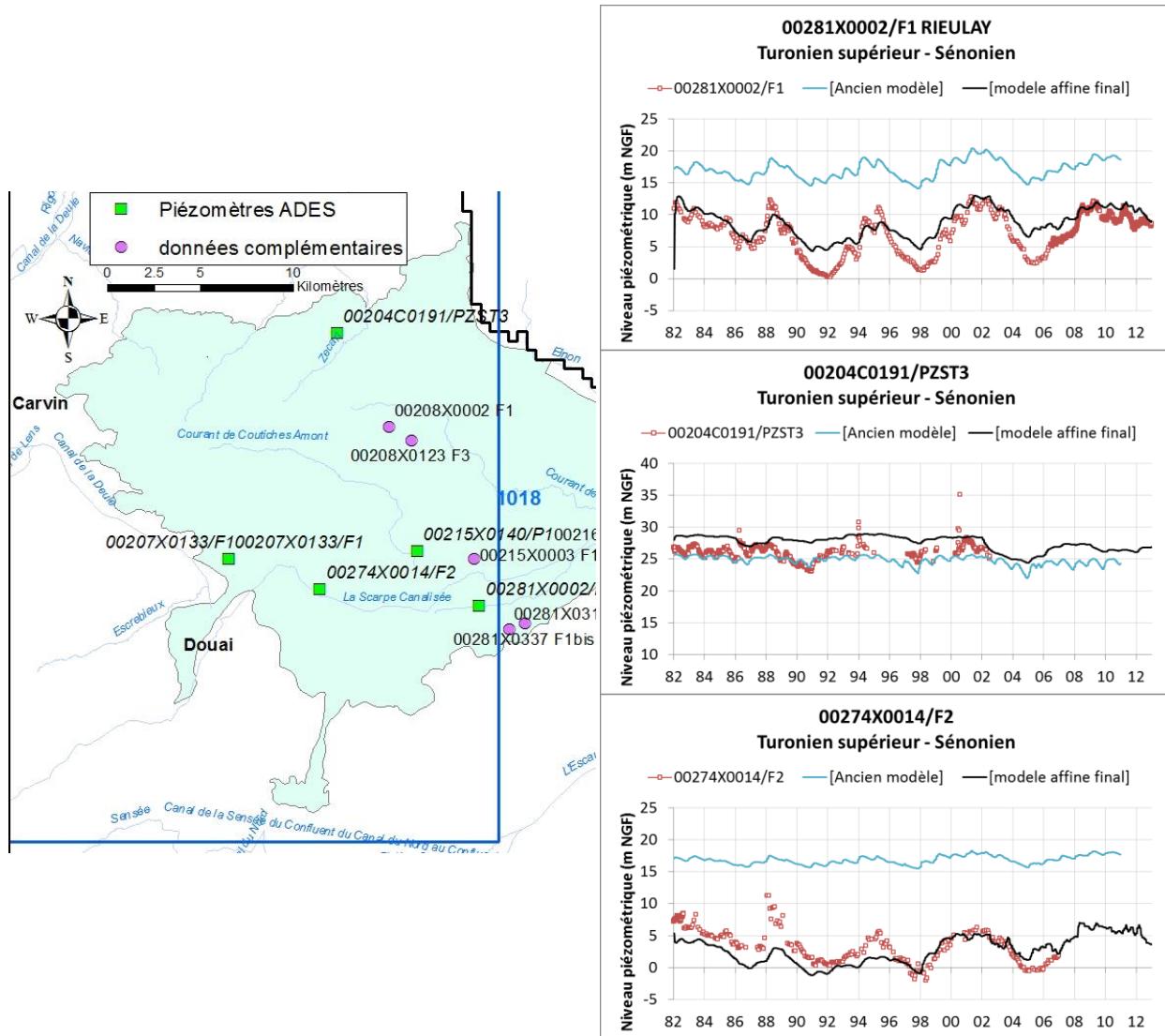


Figure 153 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées dans la zone affinée et sur la masse d'eau 1018.

Données complémentaires de la masse d'eau 1018 : les données Noréade

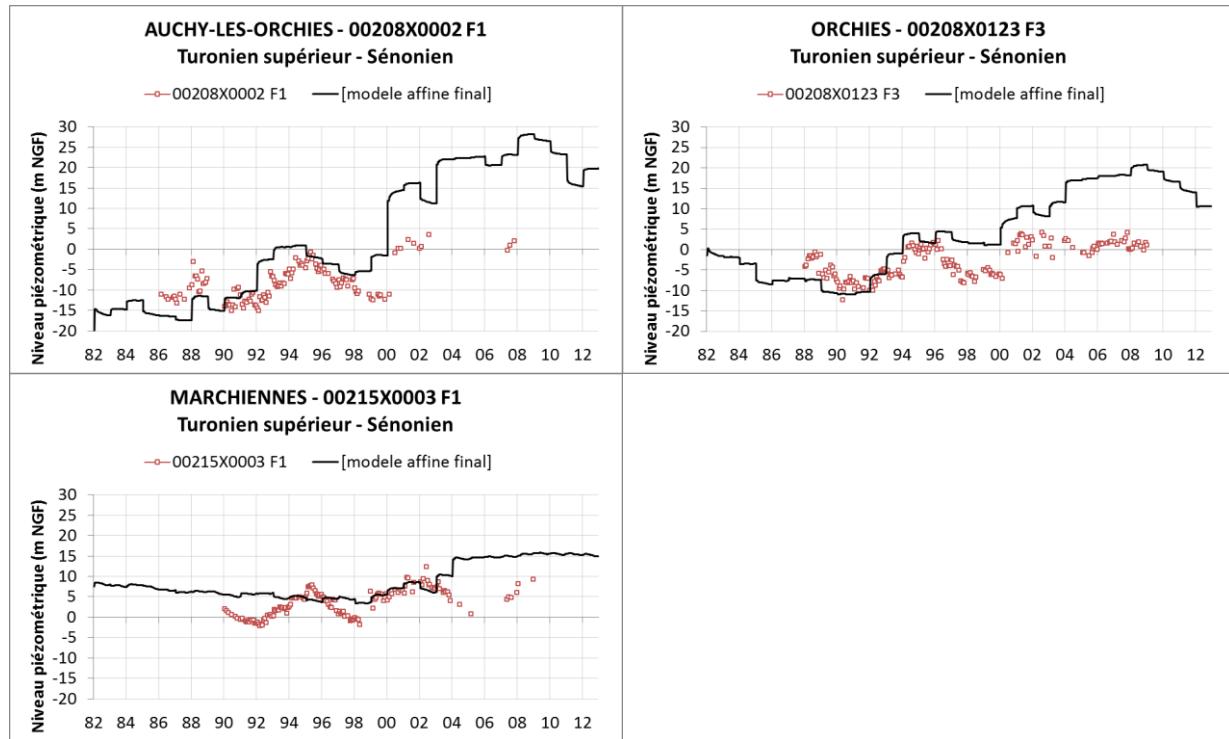


Figure 154 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées sur la masse d'eau 1018.

Carbonifère

La méthode de couplage utilisée entre le modèle de la Craie affiné et celui du Carbonifère (modèle ScaldWIN) permet d'obtenir des chroniques simulées dans le Carbonifère identiques aux résultats du modèle ScaldWIN. La Figure 155 présente les résultats obtenus dans la couche Carbonifère.

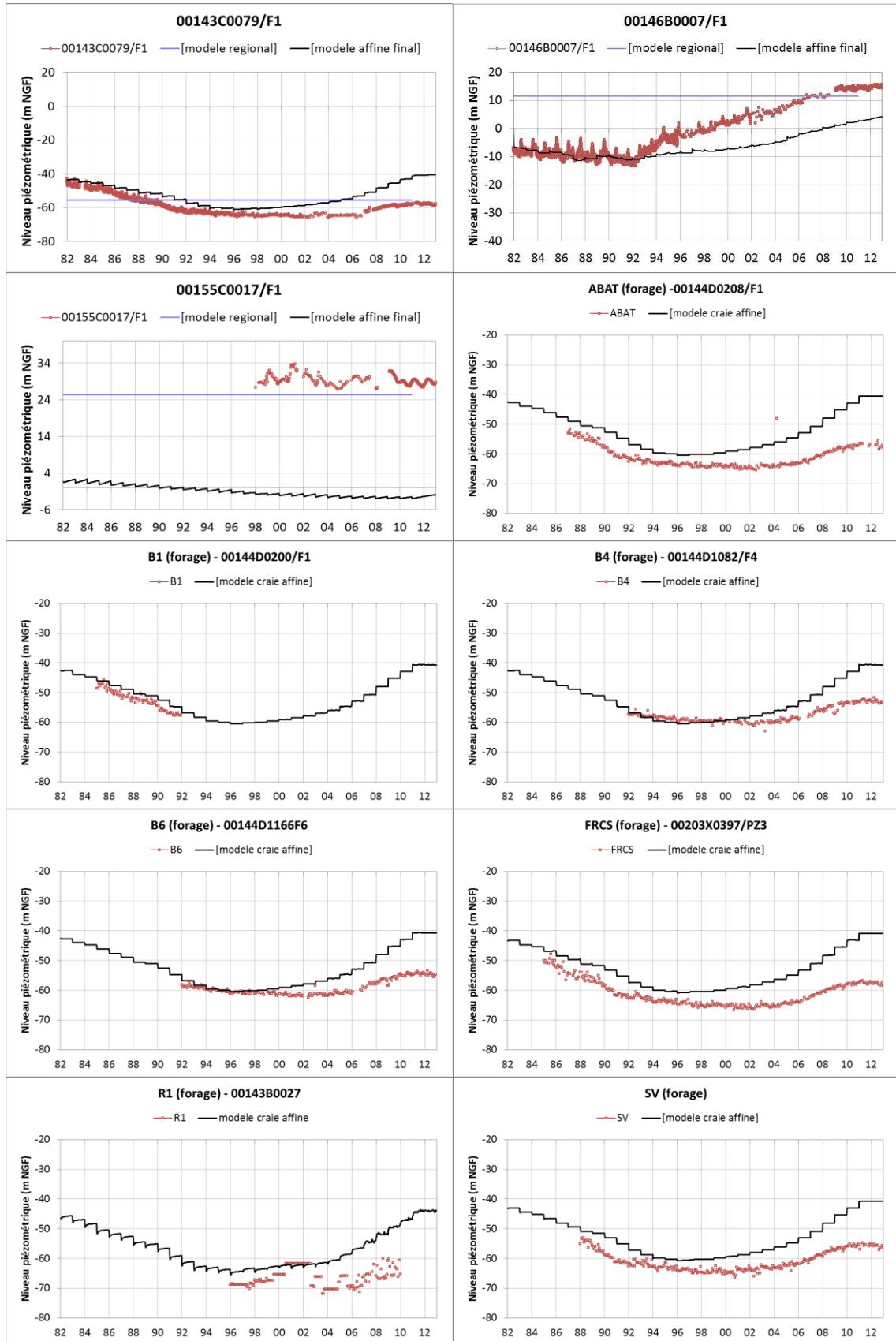


Figure 155 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées dans les Calcaires du Carbonifère.

Reste du modèle

Pour les masses d'eau souterraine à enjeu situées hors de la zone affinée, le calage s'est globalement amélioré. Pour alléger le rapport, ne sont présentées ci-après que les chroniques piézométriques montrant des modifications significatives par rapport au modèle régional.

Massé d'eau 1003 : Craie de la vallée de la Deûle

Une analyse d'ensemble des chroniques piézométriques simulées dans la Craie de la vallée de la Deûle montre que le modèle restitue de manière satisfaisante les observations. Ce constat est valable pour les piézomètres ADES, et aussi pour des données complémentaires de producteurs d'eau (il s'agit ici des données Noréade) (Figure 156).

Dans cette masse d'eau, des améliorations ont été apportées par rapport au modèle régional, comme le démontre la Figure 157 où sont représentées en bleu les simulations du modèle régional, et en noir les simulations du modèle craie affiné. Ces améliorations sont essentiellement dues à une meilleure prise en compte des échanges nappe-rivière dans le modèle affiné.

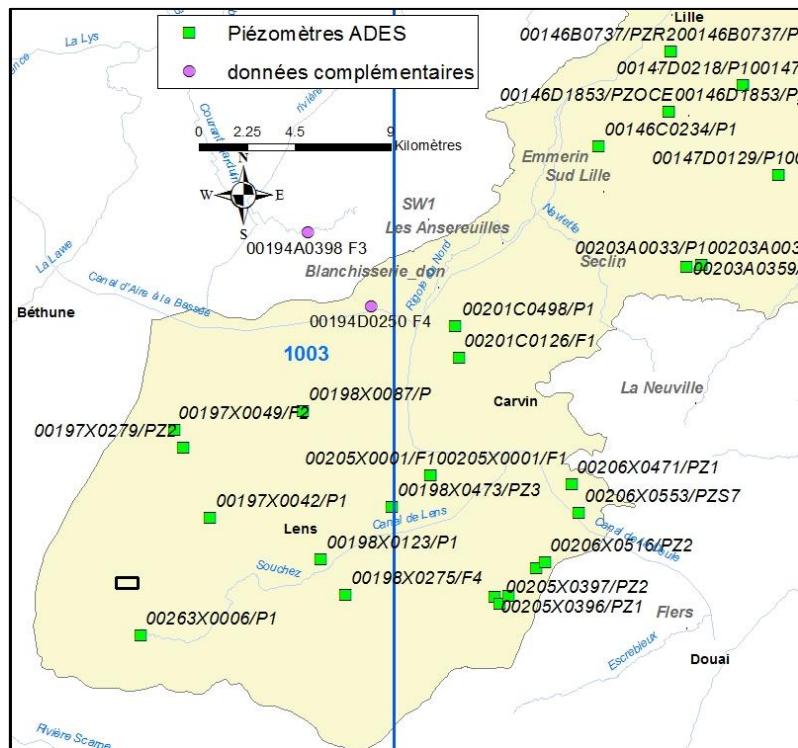


Figure 156 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires présentées pour la masse d'eau 1006.

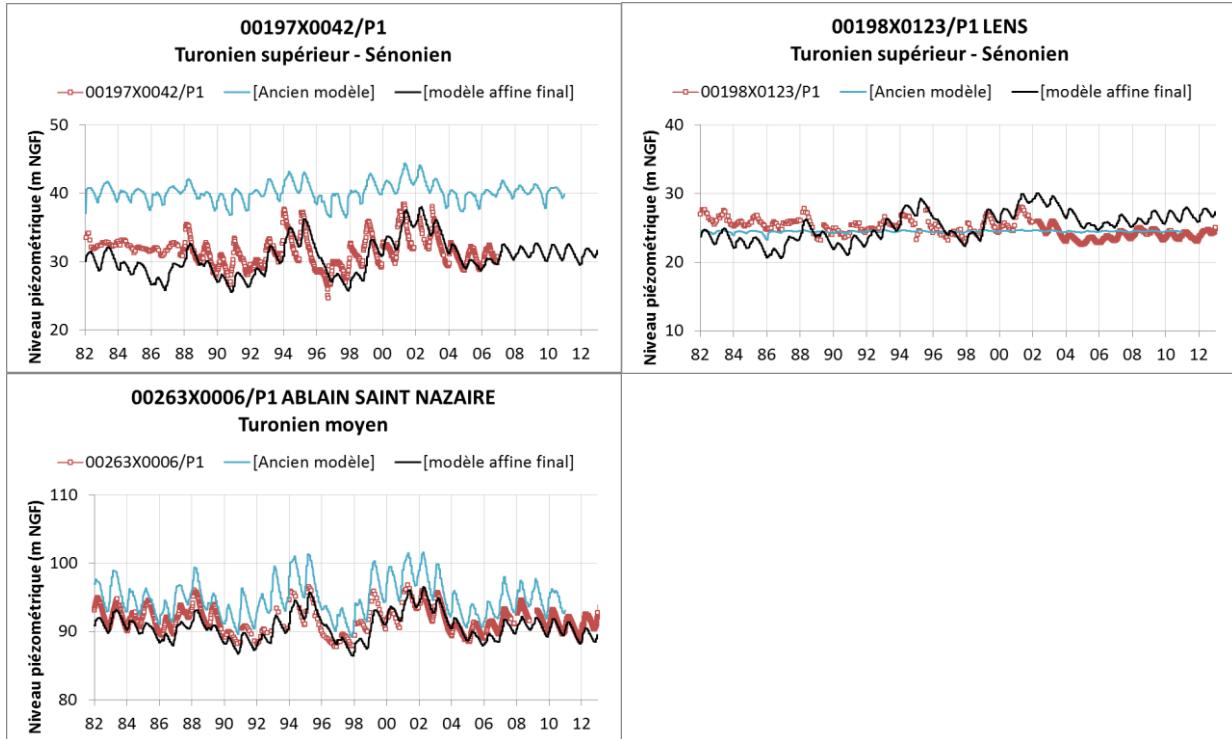


Figure 157 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données ADÉS) et simulées dans la masse d'eau 1003.

Données complémentaires de la masse d'eau 1003 : données Noréade

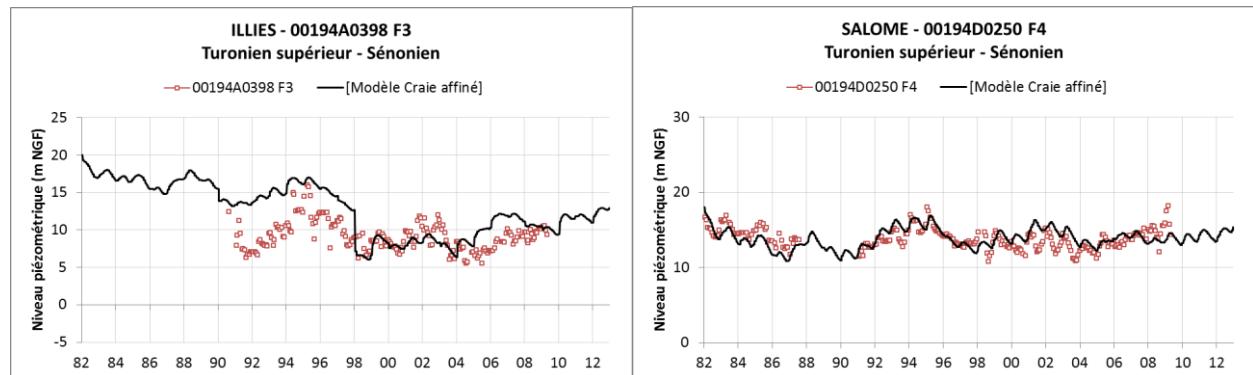


Figure 158 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées dans la masse d'eau 1003.

Massé d'eau 1006 : Craie de la vallée de la Scarpe et de la Sensée

Sur toute une zone localisée autour de trois cours d'eau, la rivière Scarpe, le Crinchon et le Cojeul, délimitée en orange sur la Figure 159, la perméabilité de la Craie productive a été augmentée. Cette modification a permis d'abaisser les niveaux piézométriques environnants.

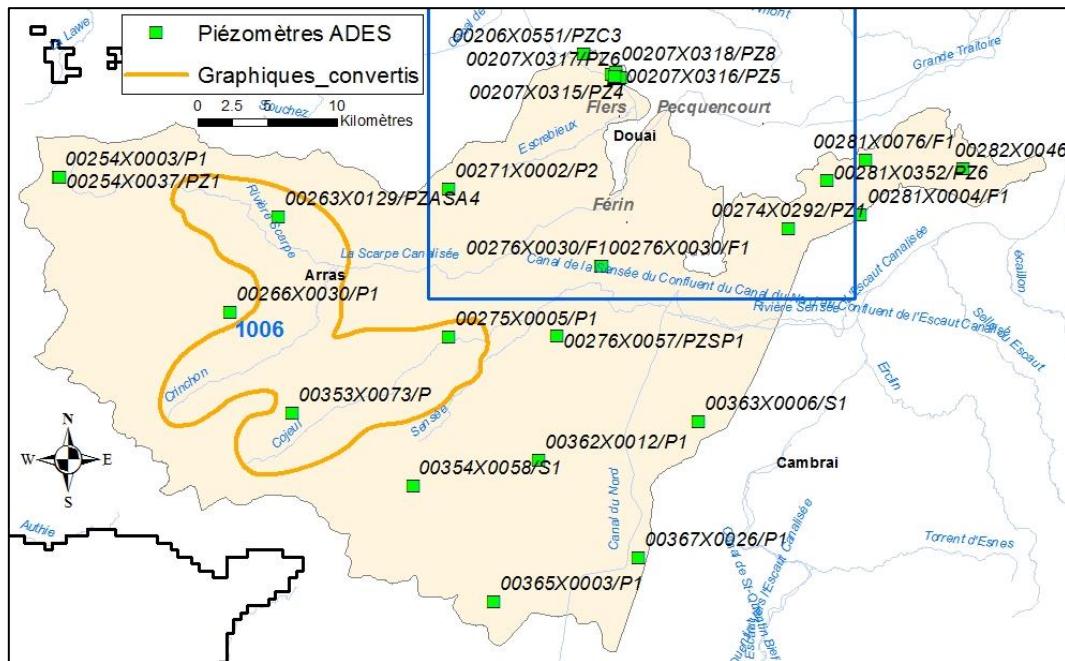


Figure 159 : Localisation des piézomètres ADES de la masse d'eau 1006.

La comparaison entre les chroniques observées et simulées, présentée à la Figure 160, montre les améliorations apportées par cette modification. Elles sont visibles sur les piézomètres 00254X0003, 00263X0129, 0266X0030 et 0353X0073.

Plus généralement, sur l'ensemble de la masse d'eau 1006, les chroniques piézométriques sont bien reproduites.

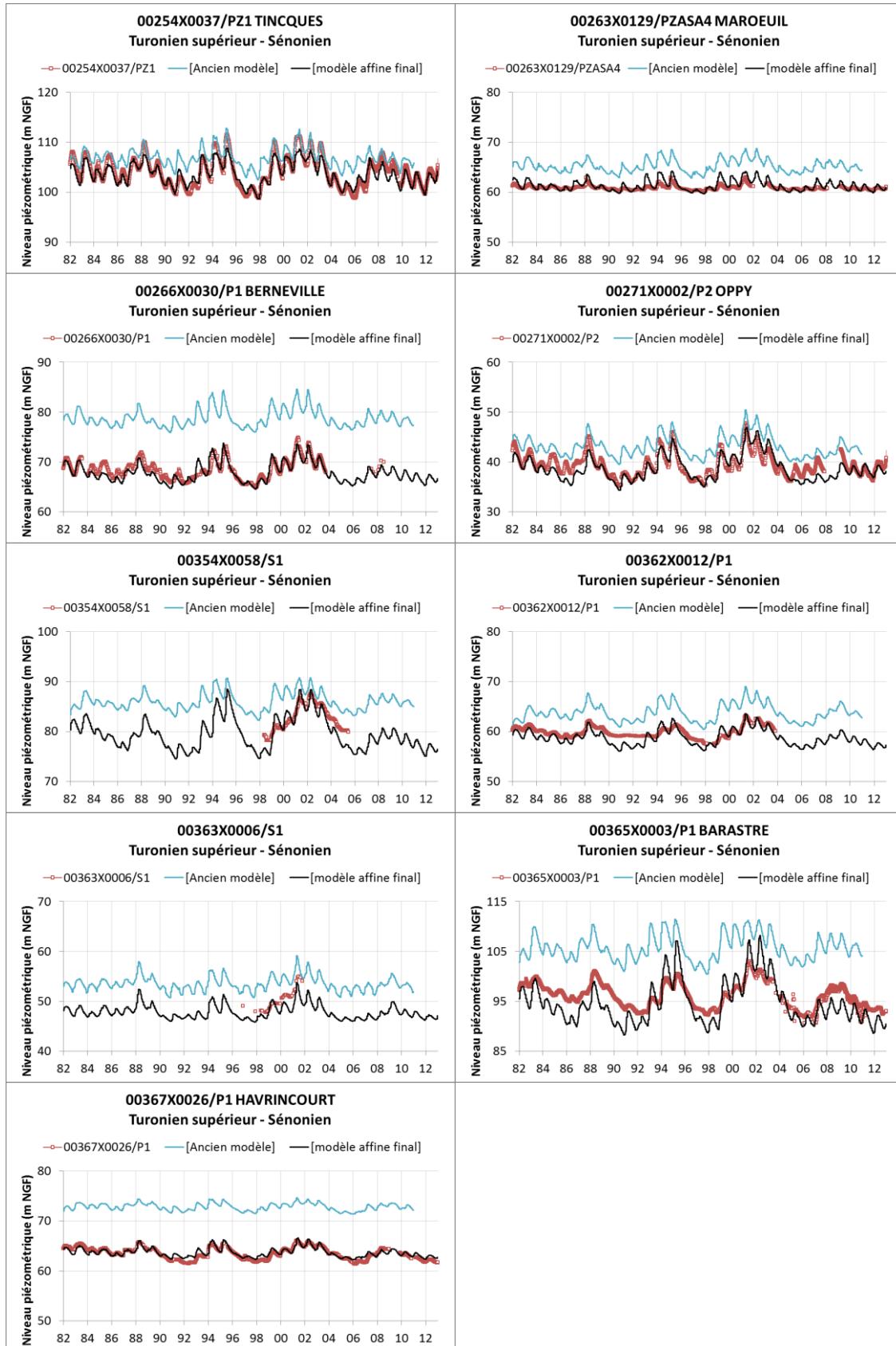


Figure 160 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées sur la ME 1006.

Massé d'eau 1007 : Craie du Valenciennois

Les trois piézomètres ADES de cette masse d'eau sont fortement influencés par les rivières et le recouvrement de terrains tertiaires (Figure 161). Le comportement des trois piézomètres de suivi est différent : la dynamique du piézomètre de Rombies et Marchipont est pluri-annuelle, alors que les deux autres piézomètres présentent des cycles plutôt annuels. Le modèle a d'ailleurs du mal à représenter ce comportement pluri-annuel.

Les niveaux simulés sont assez différents de ceux du modèle régional (Figure 163). Ces différences sont dues à la modification de la géométrie, notamment à la présence des Sables d'Ostricourt sur une partie de la masse d'eau dans le modèle affiné, alors qu'ils n'étaient pas présents dans le modèle régional. Par conséquent, cette modification de géométrie a impacté l'épaisseur de la couche de Craie productive mais aussi sa perméabilité. Le travail de recalage n'a pas été effectué dans ce secteur car il est assez éloigné de la zone ciblée par la présente étude.

Le calage du modèle sur cette masse d'eau pourrait être amélioré par différentes pistes. Notamment, le secteur belge de la nappe de la Craie est mal connu et probablement mal représenté dans le modèle. En effet, dans ce secteur, la nappe de la Craie se poursuit en Belgique et est en connexion hydraulique avec la Craie du Bassin de Mons, exploitée par plusieurs ouvrages.

La comparaison des résultats de simulation avec d'autres données disponibles sur cette masse d'eau (données des producteurs d'eau) montre que les niveaux simulés sont en général assez bien calés altimétriquement mais que leurs amplitudes peuvent significativement différer des observations de terrain (Figure 164).

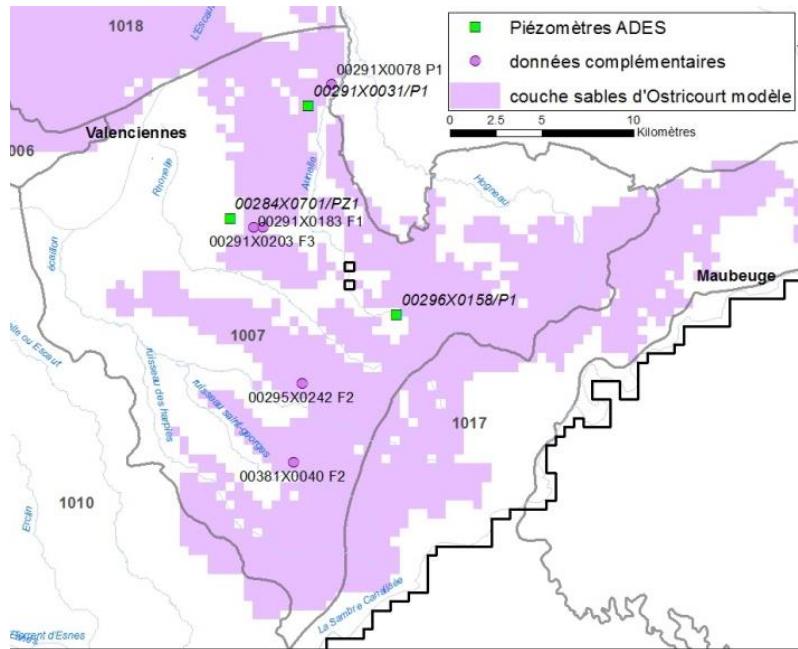


Figure 161 : Recouvrement des Sables d'Ostricourt sur la masse d'eau 1007.

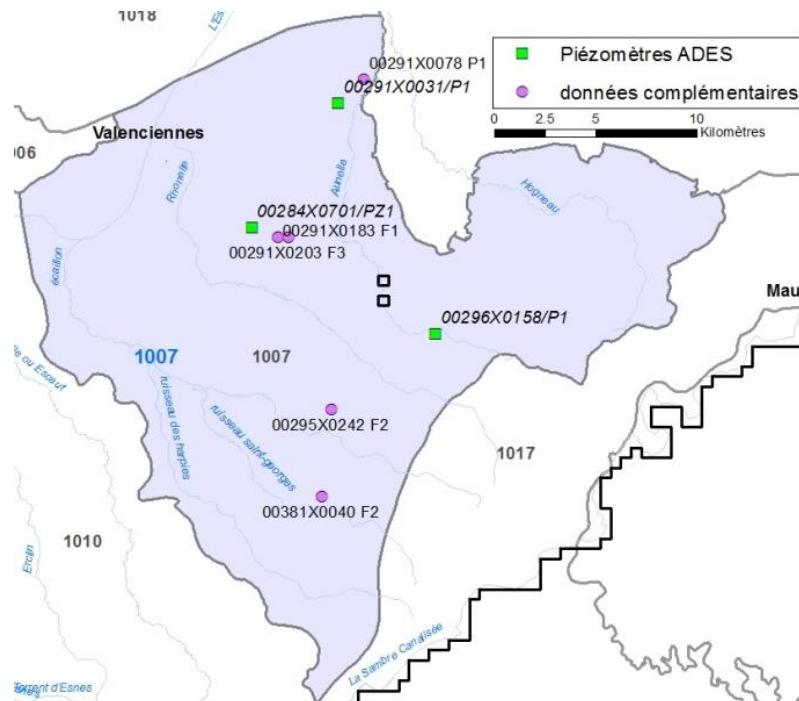


Figure 162 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau 1007.

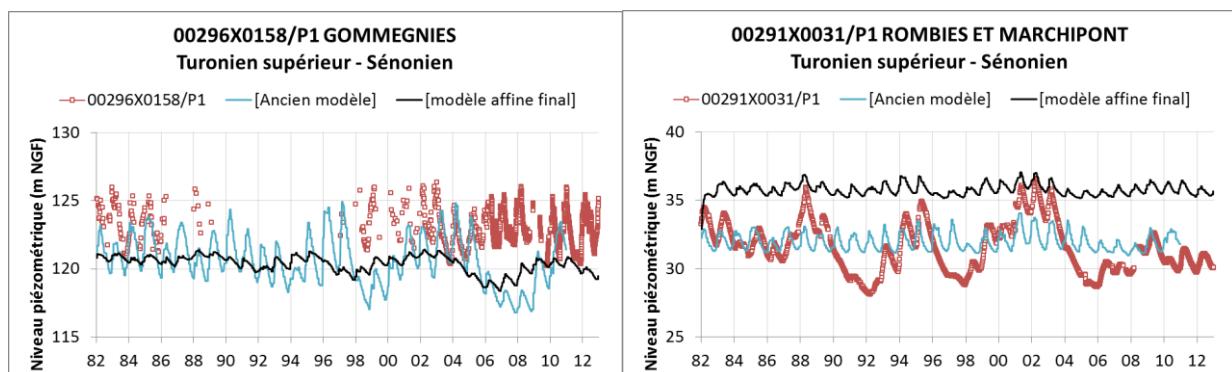


Figure 163 : Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées sur la ME 1007.

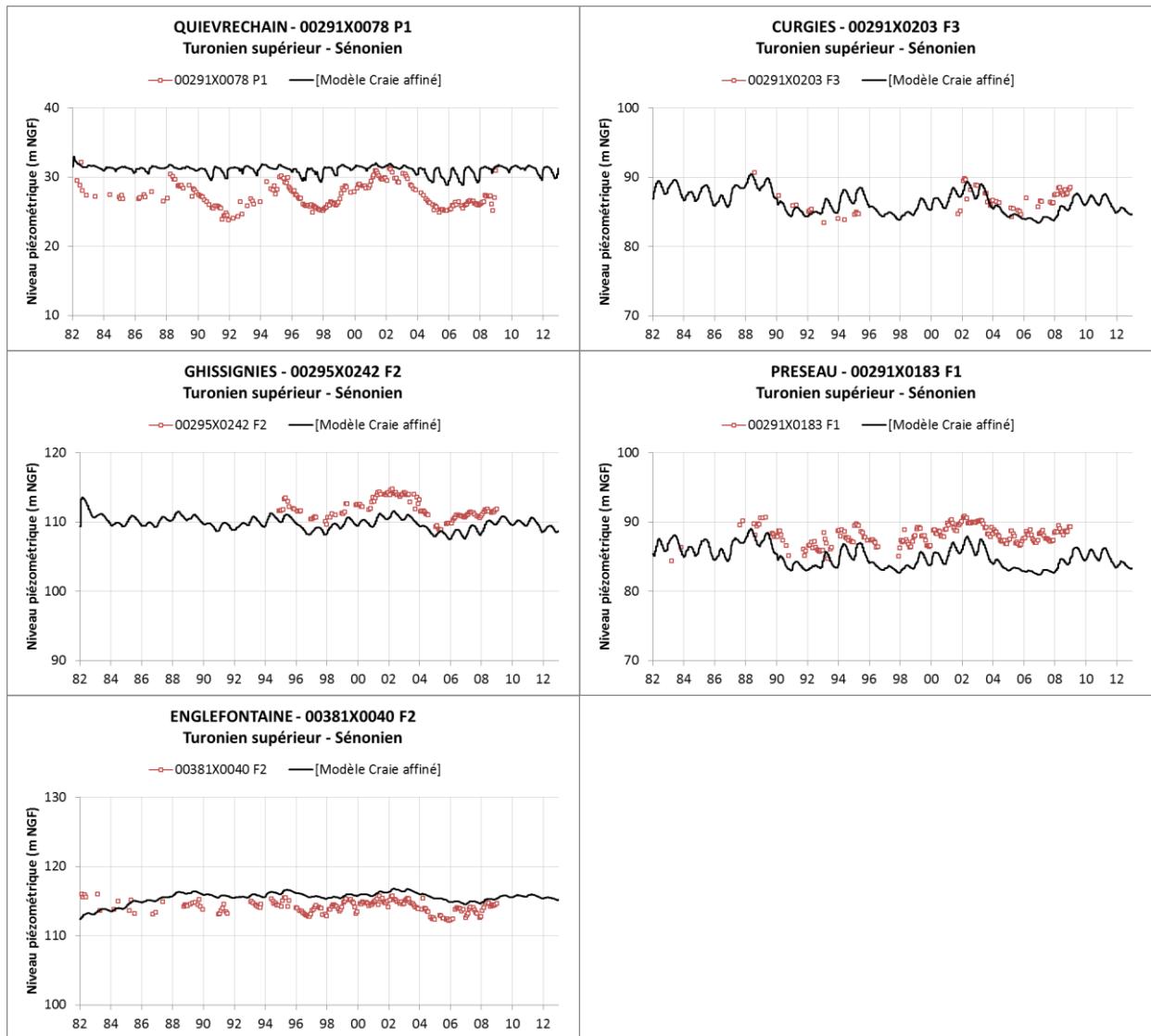


Figure 164 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données producteurs) et simulées sur la masse d'eau 1007.

Masse d'eau 1010 : Craie du Cambrésis

Les données utilisées pour le calage sont présentées sur la Figure 165. Dans ce secteur, la restitution des niveaux piézométriques et de leurs fluctuations a dans l'ensemble été améliorée (Figure 166) même si des écarts altimétriques subsistent encore entre niveaux simulés et observés.

La comparaison des chroniques piézométriques simulées avec les données transmises par Noréade montre toutefois qu'il reste des secteurs où la piézométrie n'est pas encore bien reproduite : piézomètres 00376X0185, 00377X0002 par exemple (Figure 167).

Pour améliorer la restitution de la piézométrie de cette masse d'eau, notamment au Sud, il faudrait retravailler sur la structure géométrique du modèle dans ce secteur. L'idée serait d'étendre le nouveau modèle géologique au-delà de la limite régionale et d'individualiser les couches de limons et d'alluvions qui recouvrent la Craie dans cette zone.

Par ailleurs, le réseau hydrographique est fortement canalisé dans ce secteur, avec des interactions sur la nappe sans doute non négligeables et insuffisamment prises en compte dans le modèle affiné.

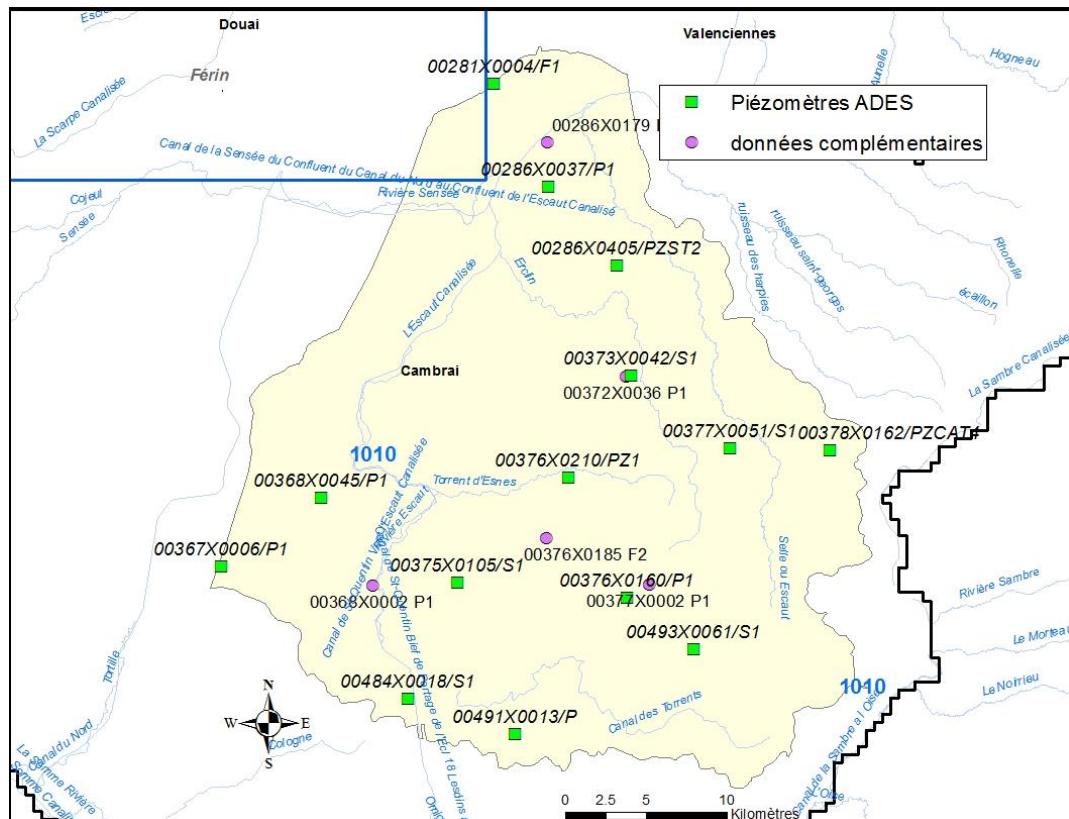


Figure 165 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau 1010.

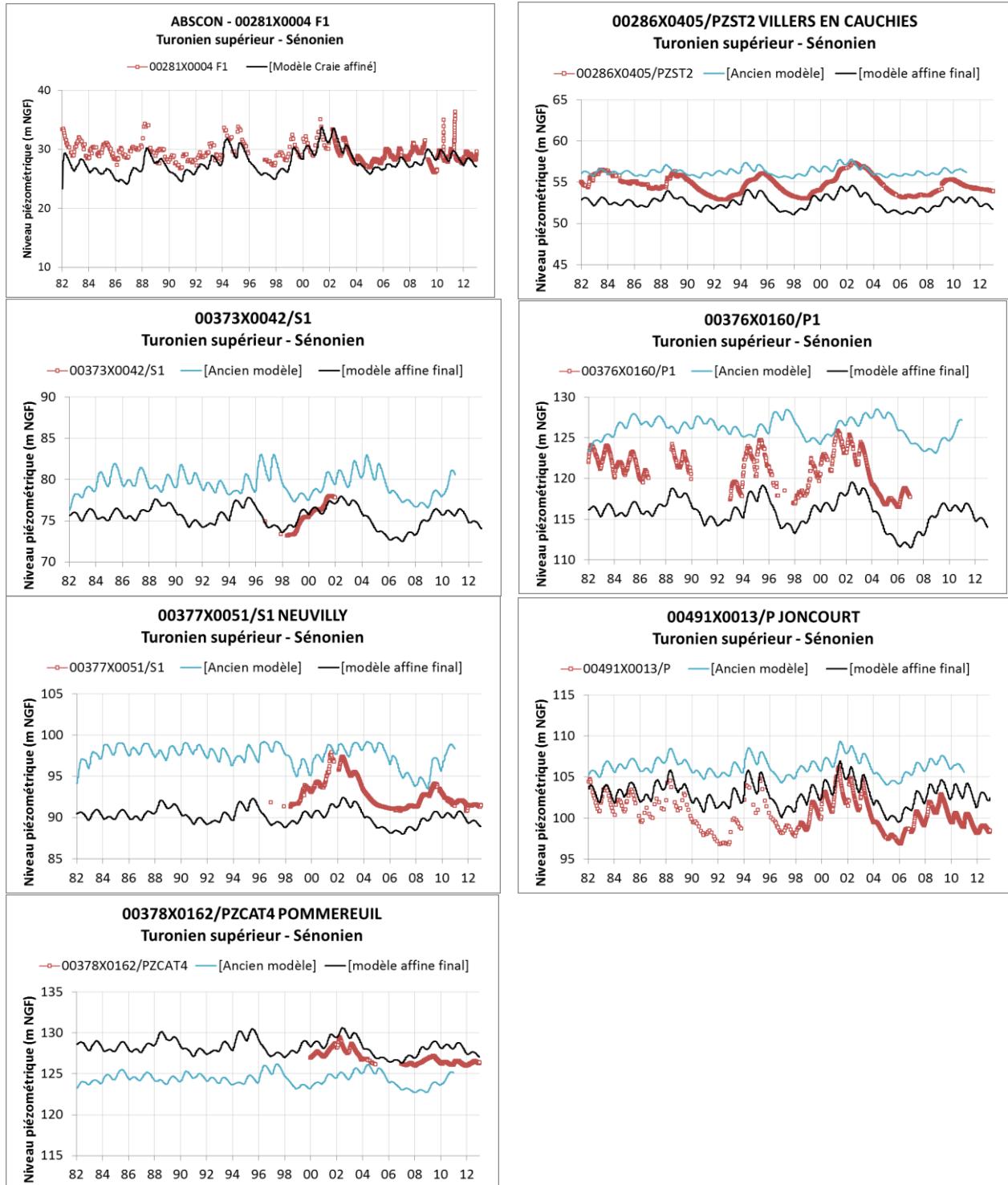


Figure 166 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1010.

Données complémentaires de la masse d'eau 1010 : les données Noréade

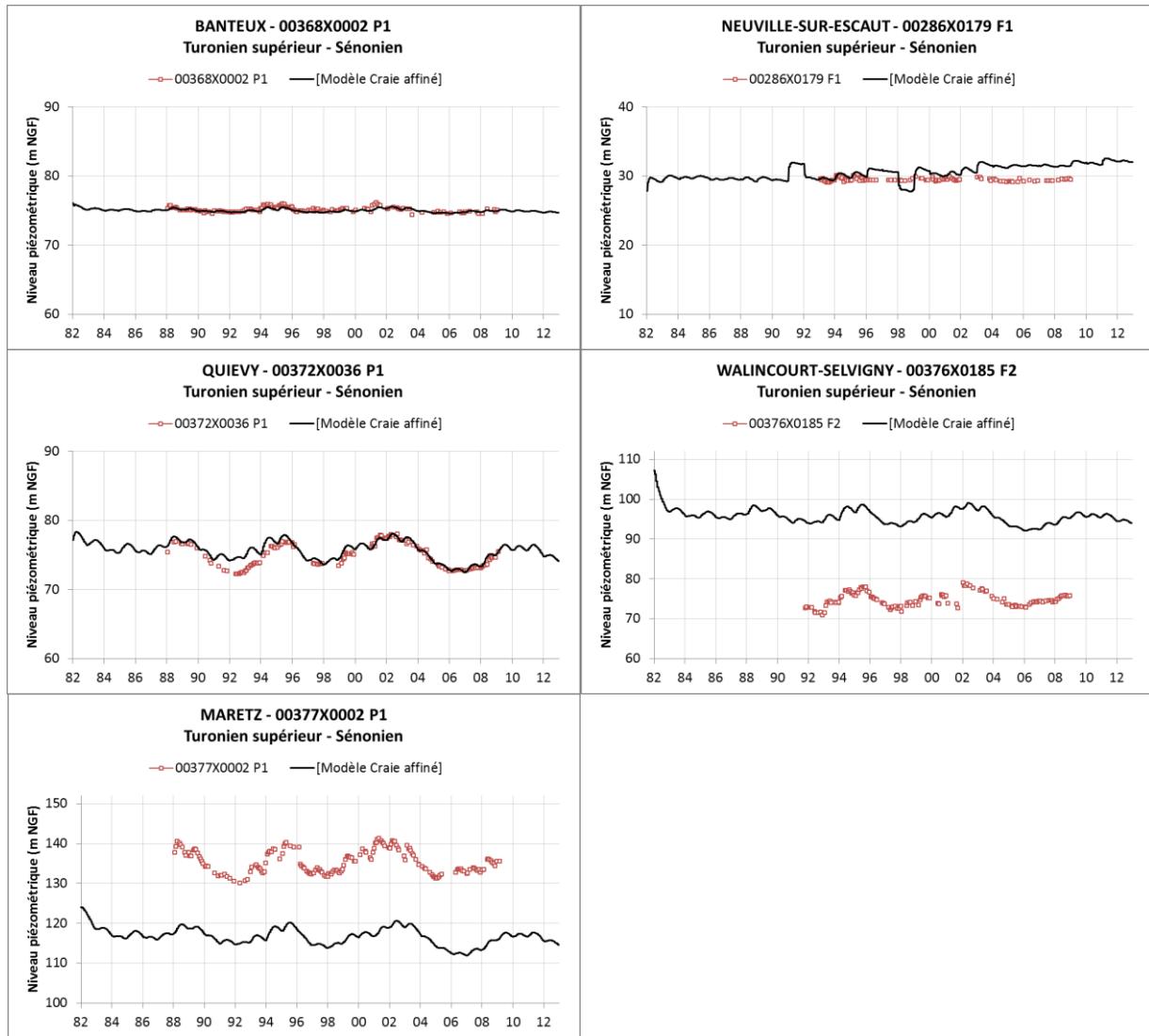
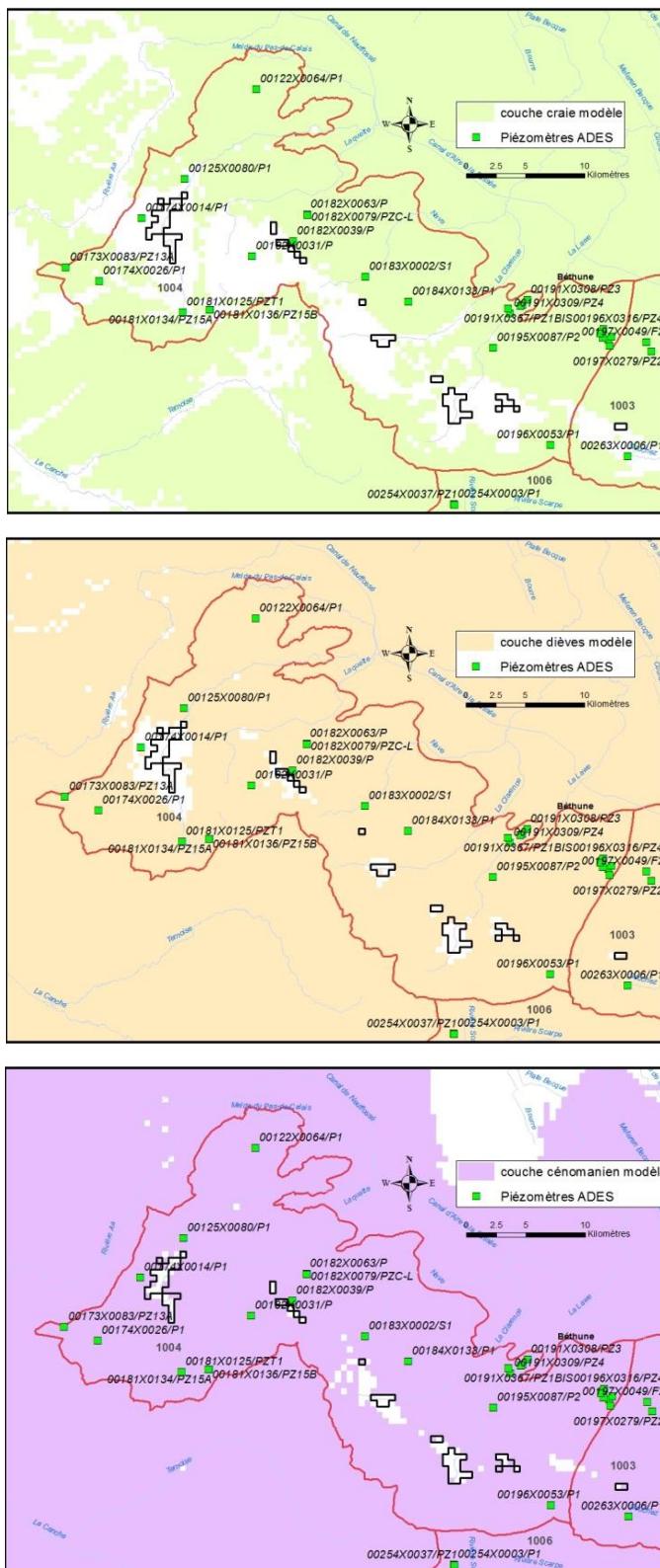


Figure 167 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données producteurs) et simulées sur la masse d'eau 1010.

Massé d'eau 1004 : Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys



Les figures en regard présentent les extensions des couches de la Craie (en haut), des Dièves (au milieu), et du Cénomanien (en bas) dans le modèle affiné pour la masse d'eau 1004.

On constate que, dans ce secteur, la nappe de la Craie s.s. ne couvre que les 2/3 de la masse d'eau environ. La nappe de la Craie est en fait essentiellement contenue dans les horizons crayeux du Turonien moyen (Dièves) et du Cénomanien. Bien que les coupes géologiques et techniques disponibles pour les piézomètres cités aient été vérifiées dans la BSS, la distinction entre la nappe de la Craie séno-turonienne, les Dièves, et la Craie du Cénomanien est difficile sur certains piézomètres. De plus, à cause du découpage en mailles de 500 m, certains piézomètres se trouvent décalés en limite de formation, ce qui peut nuire à leur représentativité dans le modèle.

Globalement sur la masse d'eau (Figure 168), les chroniques piézométriques simulées sont, dans l'ensemble, conformes aux observations, tant en niveaux absolus qu'en variations interannuelles (Figure 169). Certains piézomètres présentent des variations piézométriques erratiques, difficiles à comprendre et à replacer dans le contexte hydrogéologique ; c'est le cas du piézomètre de Verchocq et du piézomètre de Laire. Ceux-ci sont alors mal simulés.

Cependant, quelques améliorations ont été apportées par rapport au modèle régional, notamment sur deux ouvrages implantés au centre de la masse d'eau, les piézomètres 00183X0002 et 00184X0133 (Figure 169).

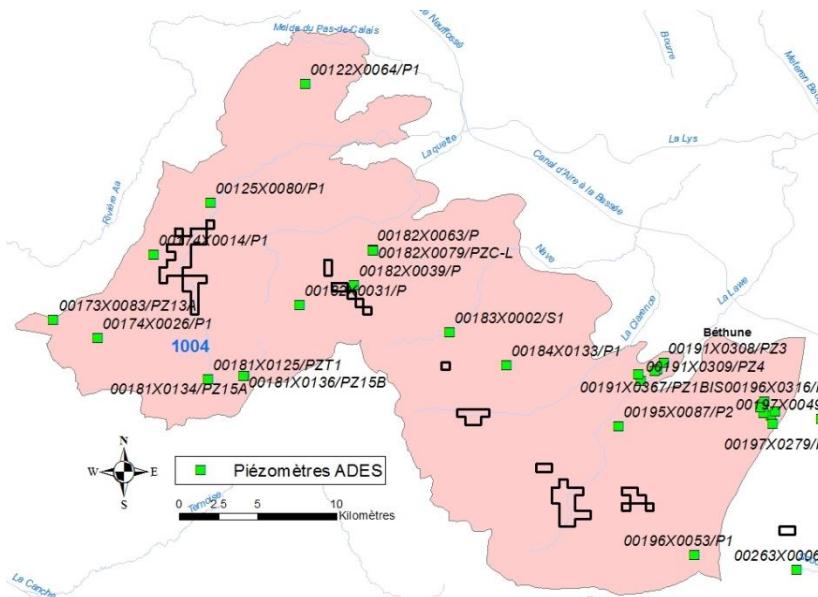


Figure 168 : Localisation des piézomètres ADES sur la masse d'eau 1004.

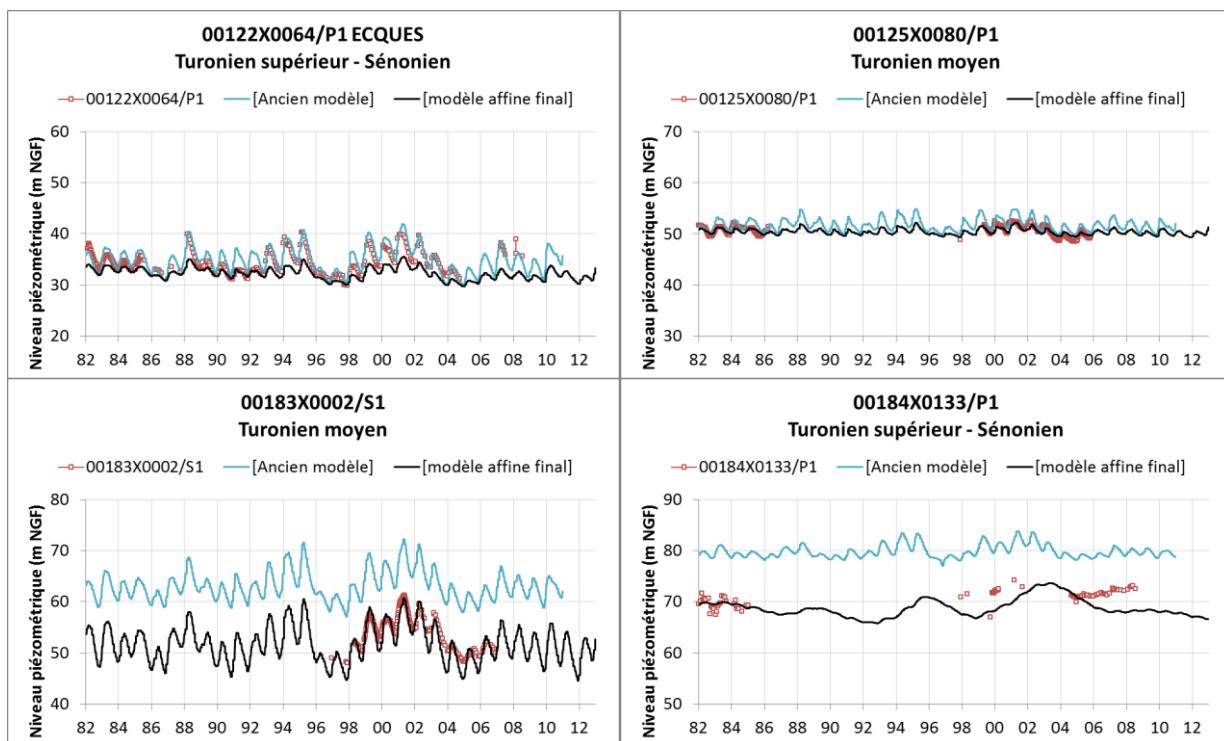


Figure 169 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1004.

Craie sous la Masse d'eau 1018 : Sables du Landénien d'Orchies

Dans ce secteur, la nappe de la Craie est sous couverture tertiaire et généralement captive. Les piézomètres proches de la zone affinée sont, dans l'ensemble, bien reproduits : 00281X0312, 00281X0337 (Figure 170 et Figure 171). Les fluctuations des autres piézomètres, plus à l'Est de la masse d'eau, sont peu significatives (inférieures à 1 m) car ces ouvrages sont implantés à proximité de cours d'eau, ce qui explique que leurs niveaux simulés soient stabilisés à la cote de la rivière. Le fait que les niveaux observés présentent des fluctuations significatives amène à penser que les rivières sont fortement colmatées dans ce secteur. En outre, les piézomètres proches de la frontière sont probablement affectés par les écoulements de la nappe de la Craie en Belgique. Des améliorations restent donc à apporter au modèle dans ce secteur.

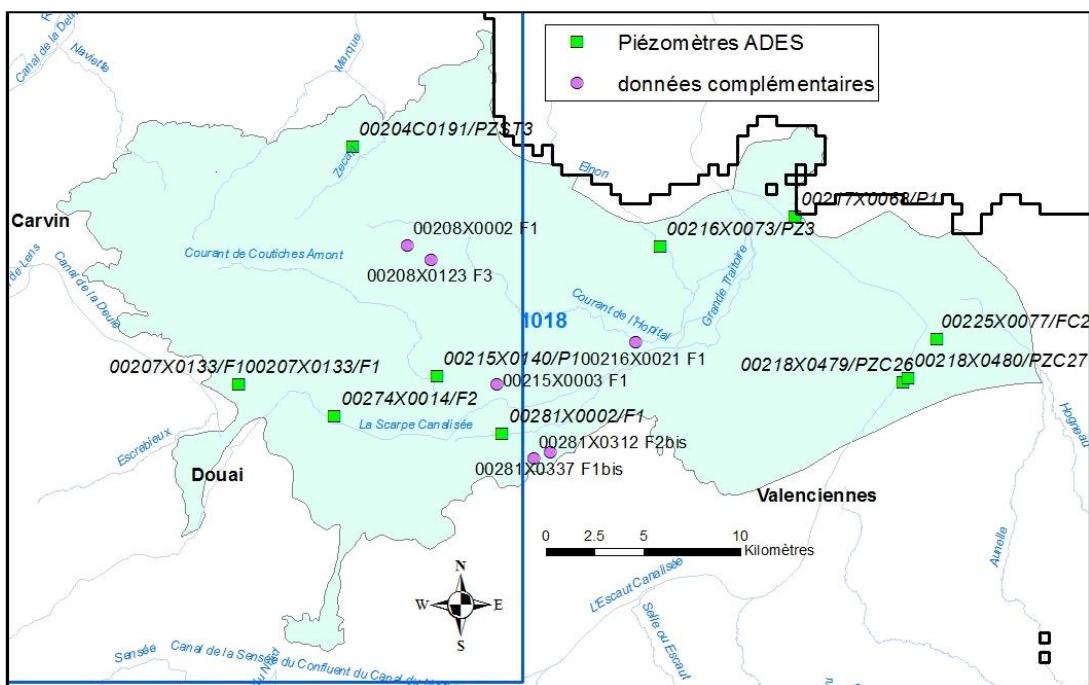


Figure 170 : Localisation des piézomètres ADES et des données complémentaires sur la masse d'eau 1018.

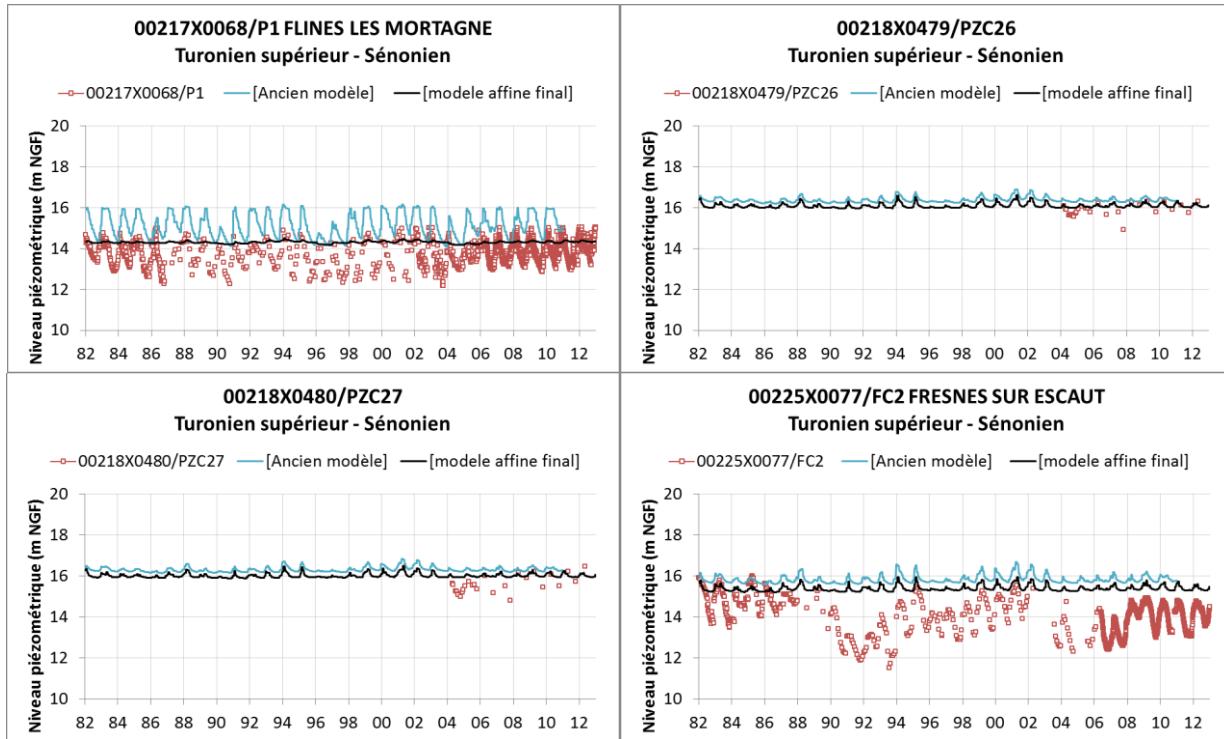


Figure 171 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (ADES) et simulées sur la masse d'eau 1018.

Données complémentaires de la masse d'eau 1018

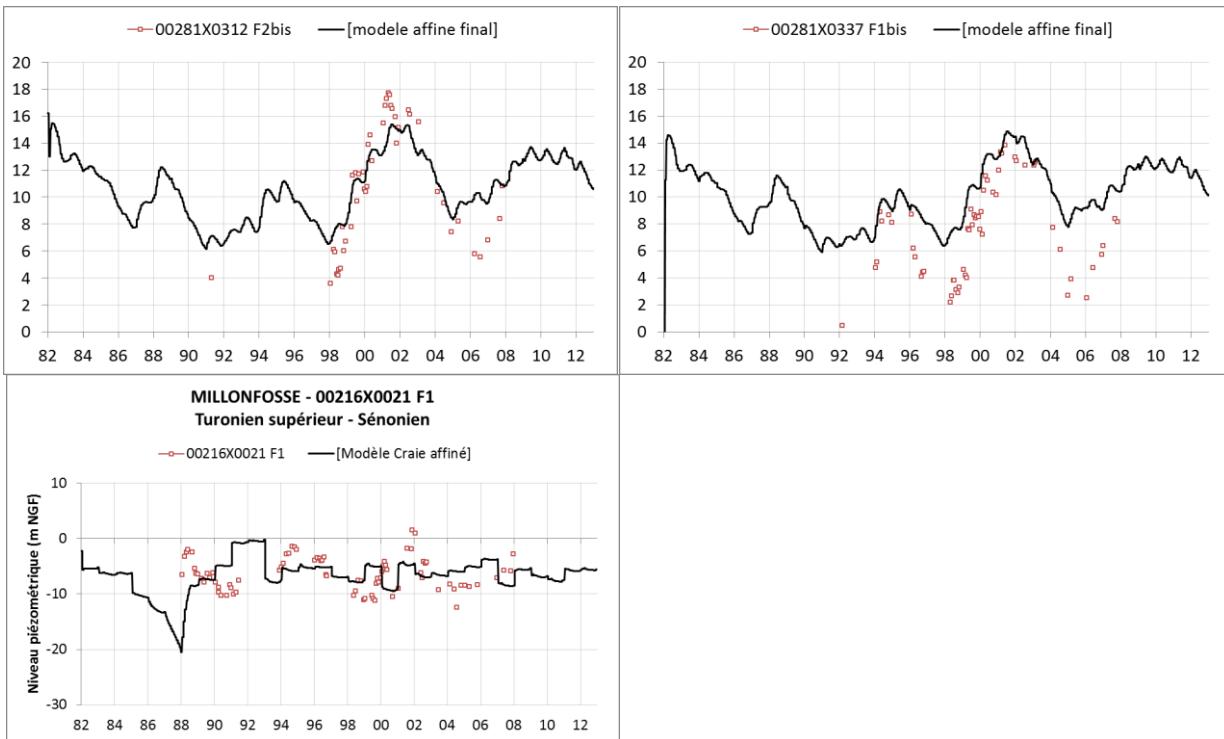


Figure 172 : Comparaison des chroniques piézométriques observées (données Noréade) et simulées sur la masse d'eau 1018.

8.3.3 Vérification des débits simulés dans les rivières

Selon les positions relatives de la ligne d'eau dans la rivière et du niveau piézométrique dans l'aquifère, les échanges hydrauliques entre rivière et nappe peuvent se faire de la rivière vers la nappe ou, inversement, de la nappe vers la rivière. Le débit d'échange rivière - nappe est contrôlé par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

Dans l'ensemble, les débits des rivières – qui représentent pour l'essentiel les exutoires de la nappe de la Craie – sont bien restitués par le modèle, aussi bien en amplitude qu'en fluctuations (Figure 173), ce qui témoigne d'une bonne évaluation de la recharge de la nappe par le module hydroclimatique intégré à MARTHE.

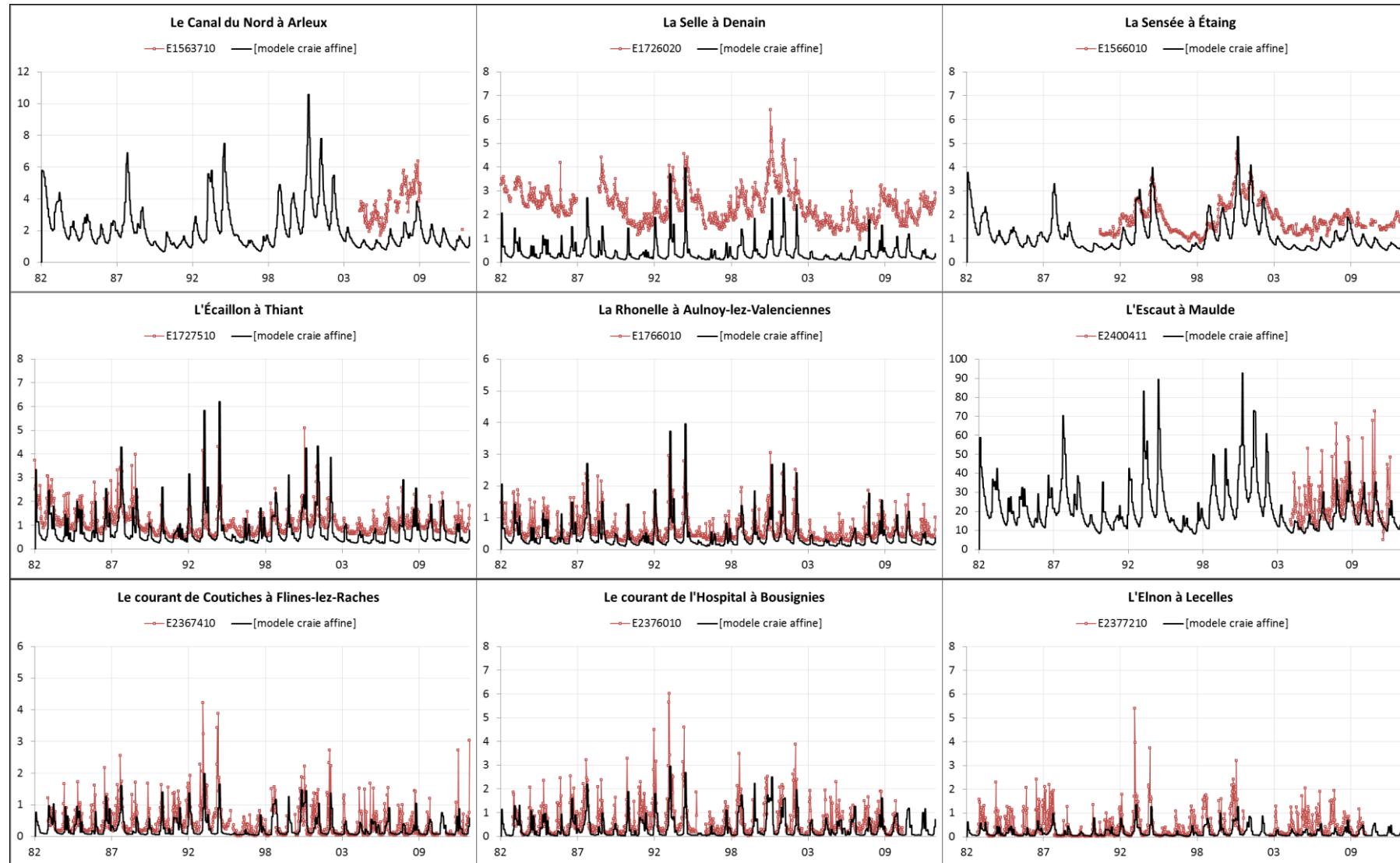
Cependant, pour certaines stations hydrométriques, il n'a pas été possible de bien quantifier les débits anthropiques, aussi bien sous forme de prélèvement que de restitution, ce qui peut expliquer les différences constatées avec les débits simulés, notamment pour le Canal de la Deûle.

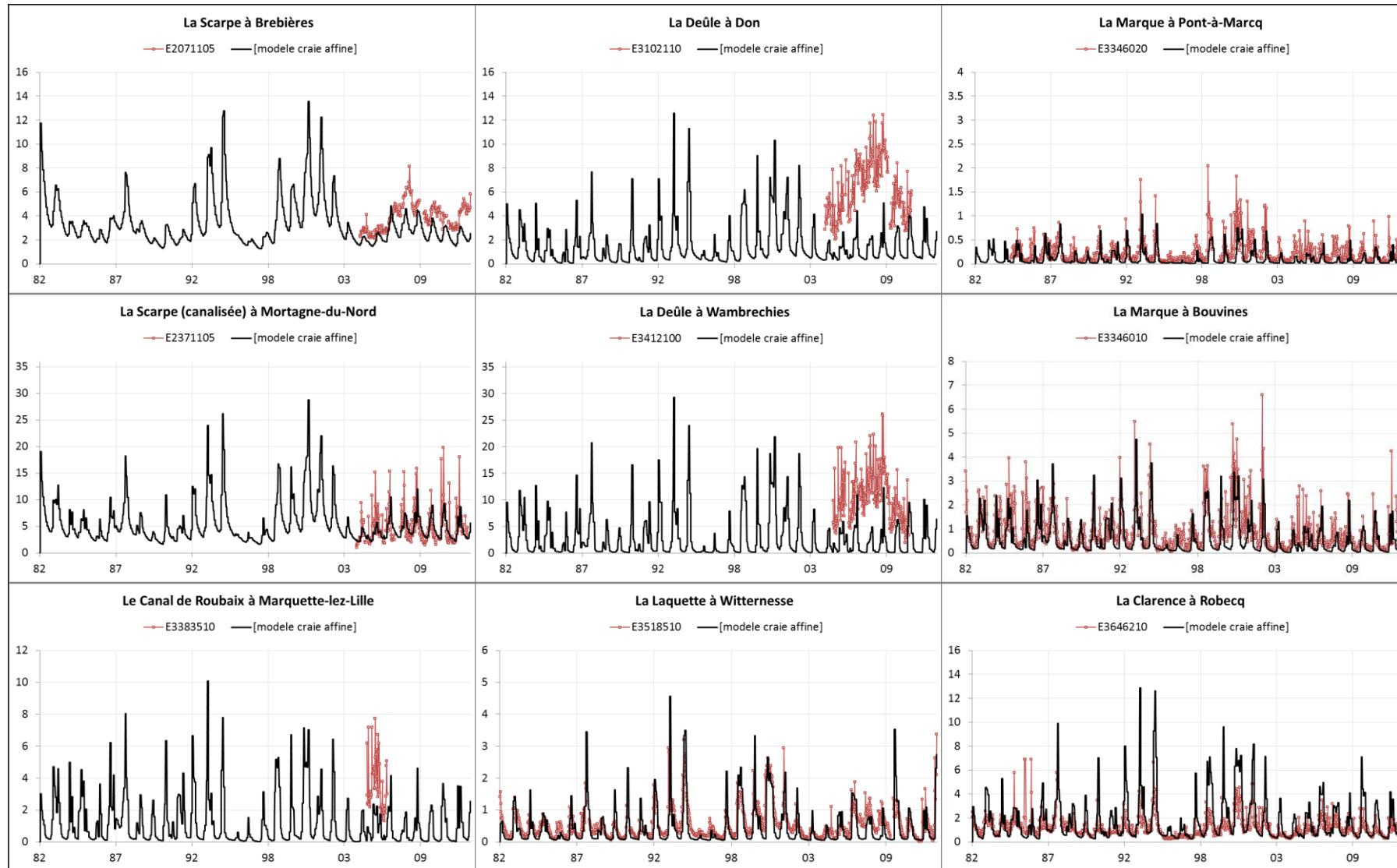
En effet, la région Nord-Pas-de-Calais se caractérise par un important réseau de voies navigables et de rivières canalisées où les écoulements sont susceptibles d'être modifiés par la manœuvre d'ouvrages. Le constat est le même pour l'ensemble du réseau canalisé des grandes vallées alluviales (Scarpe, Lys, Escaut, Sambre et Wateringues)⁹. Les informations quantitatives obtenues sur ces canaux restent très sommaires. Il en résulte d'importantes incertitudes notamment pour les périodes extrêmes (crues et étiages sévères).

Par ailleurs, les pics de crue sont généralement sous-estimés. Ces phénomènes, très limités dans le temps, sont difficiles à simuler et le pas de temps utilisé pour les apports hydroclimatiques (10 jours) est trop grand pour les restituer correctement.

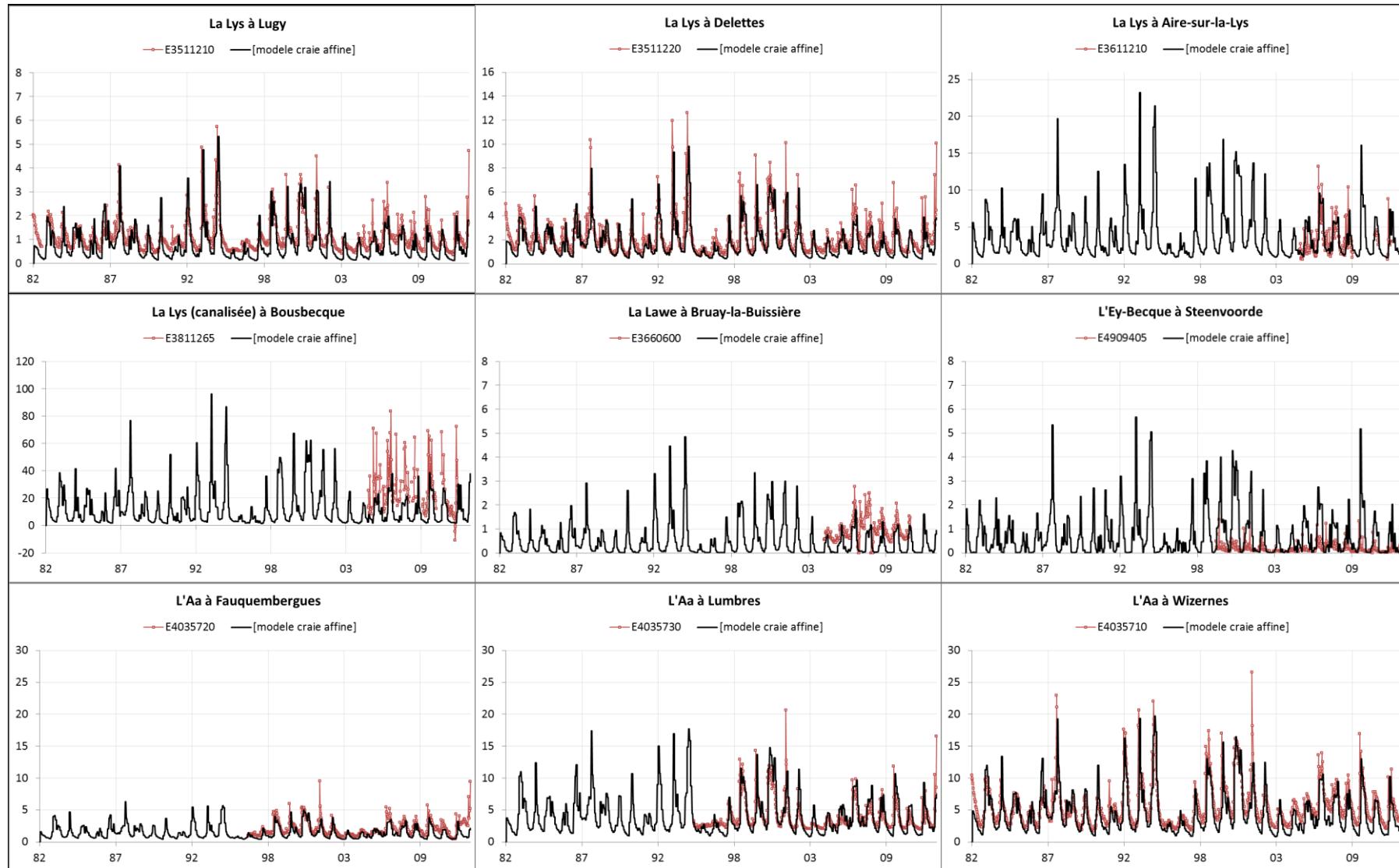
⁹ Recueil hydrologique de la région Nord-Pas-de-Calais (2003)

Modèle affiné de la Craie du Nord-Pas-de-Calais





Modèle affiné de la Craie du Nord-Pas-de-Calais



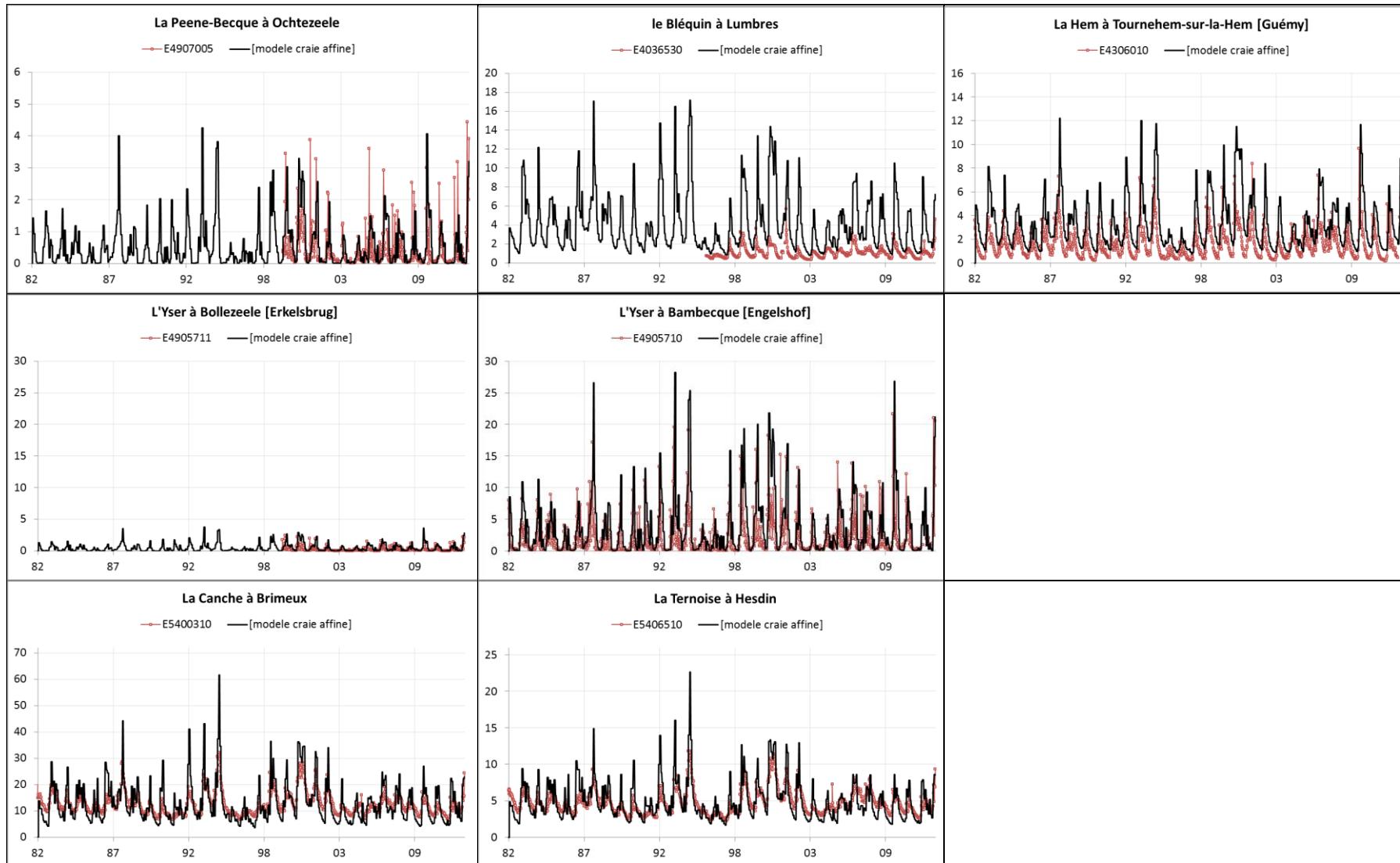


Figure 173 : Comparaison des débits observés et simulés dans les cours d'eau.

9 Validation du modèle

Une comparaison des débits de débordement du modèle au niveau des couches superficielles (alluvions et limons) avec la cartographie des milieux potentiellement humides a été réalisée.

9.1 CARTOGRAPHIE NATIONALE DES MILIEUX POTENTIELLEMENT HUMIDES

A la demande de la Direction de l'Environnement et de la Biodiversité du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, l'INRA (US InfoSol, Orléans) et AGROCAMPUS OUEST (UMR INRA AGROCAMPUS OUEST SAS, Rennes) ont produit une carte des milieux potentiellement humides. Un "milieu humide" est défini par le Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE) comme étant une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre.

La carte des milieux potentiellement humides modélise les enveloppes qui, selon les critères géomorphologiques et climatiques, sont susceptibles de contenir des zones humides au sens de l'arrêté du 24 juin 2008 modifié. La méthode ne tient compte ni des aménagements réalisés (drainage, assèchement, comblement), ni de l'occupation du sol (culture, urbanisation, ...), ni des processus pédologiques et hydrologiques locaux qui limiteraient le caractère effectivement humide de ces zones. Les enveloppes d'extension des milieux potentiellement humides sont représentées selon trois classes de probabilité (assez forte, forte et très forte). Ces classes sont retranscrites en dégradé de bleu sur la Figure 175 présentant la carte des milieux potentiellement humides à l'échelle nationale et sur la Figure 174 de manière plus détaillée à l'échelle du modèle.

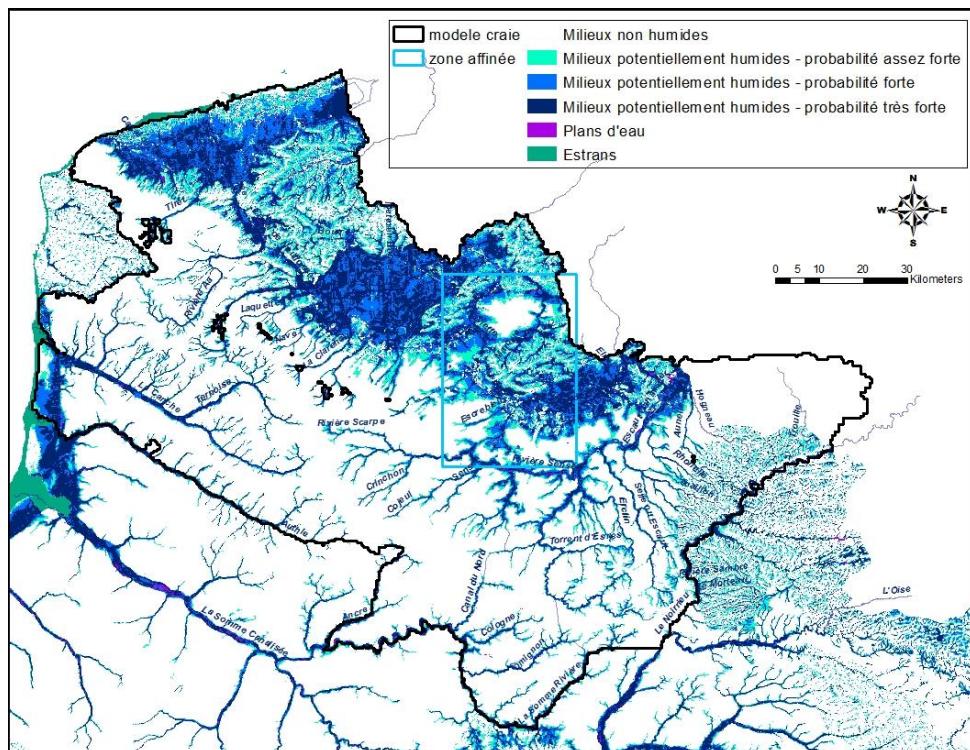


Figure 174 : Cartographie à l'échelle du modèle des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance (d'après le MEDDE, GIS Sol. 2014).

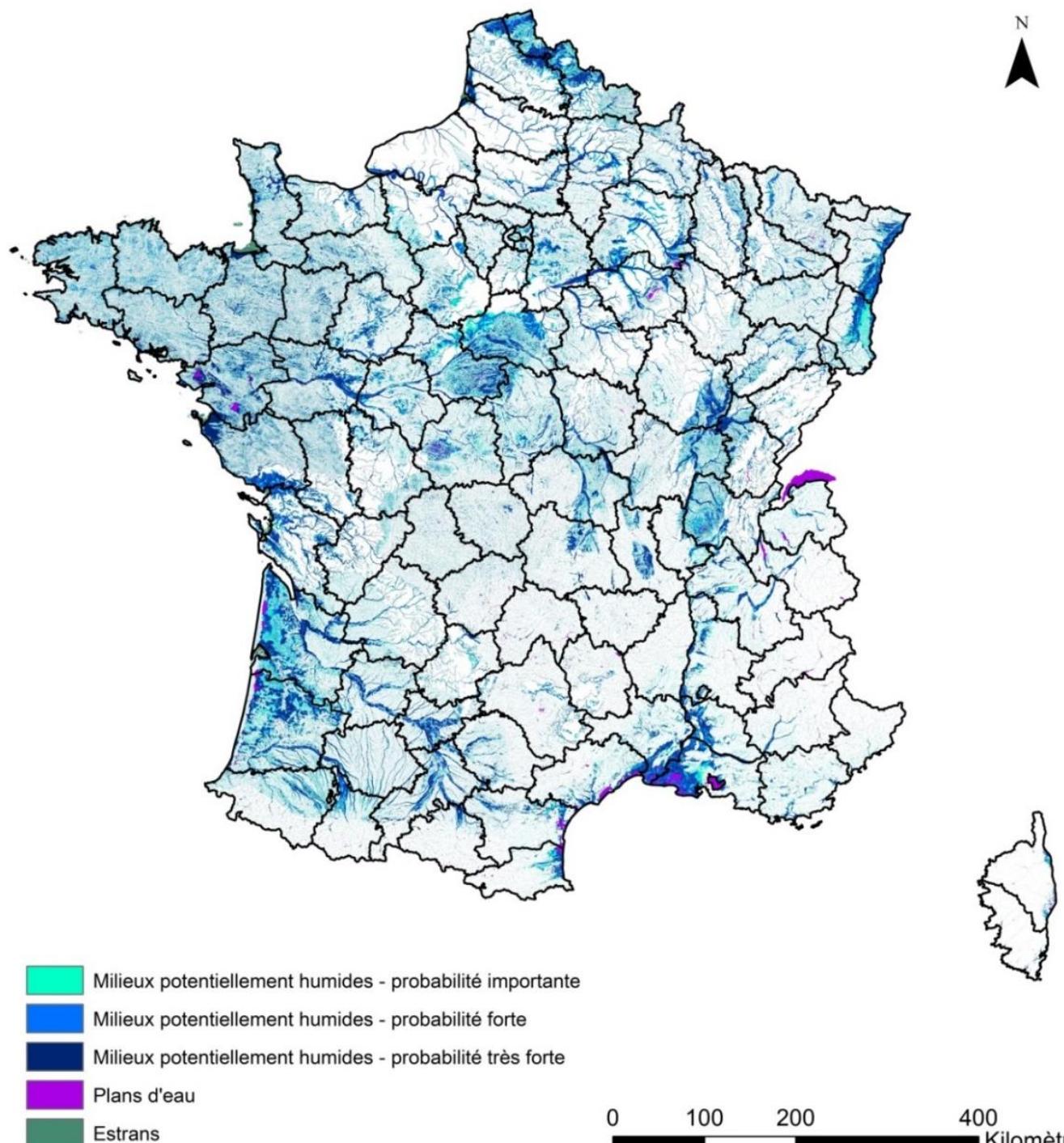


Figure 175 : Cartographie nationale des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance (d'après le MEDDE, GIS Sol. 2014).

9.2 DEBITS DE DEBORDEMENT DU MODELE AFFINE

Les Figure 176 et Figure 177 présentent les cartes des débits de débordement du modèle pour les deux couches superficielles (alluvions et limons) pendant la période de hautes eaux de 2001 (HE 2001) et celle des moyennes eaux de 2009 (ME 2009).

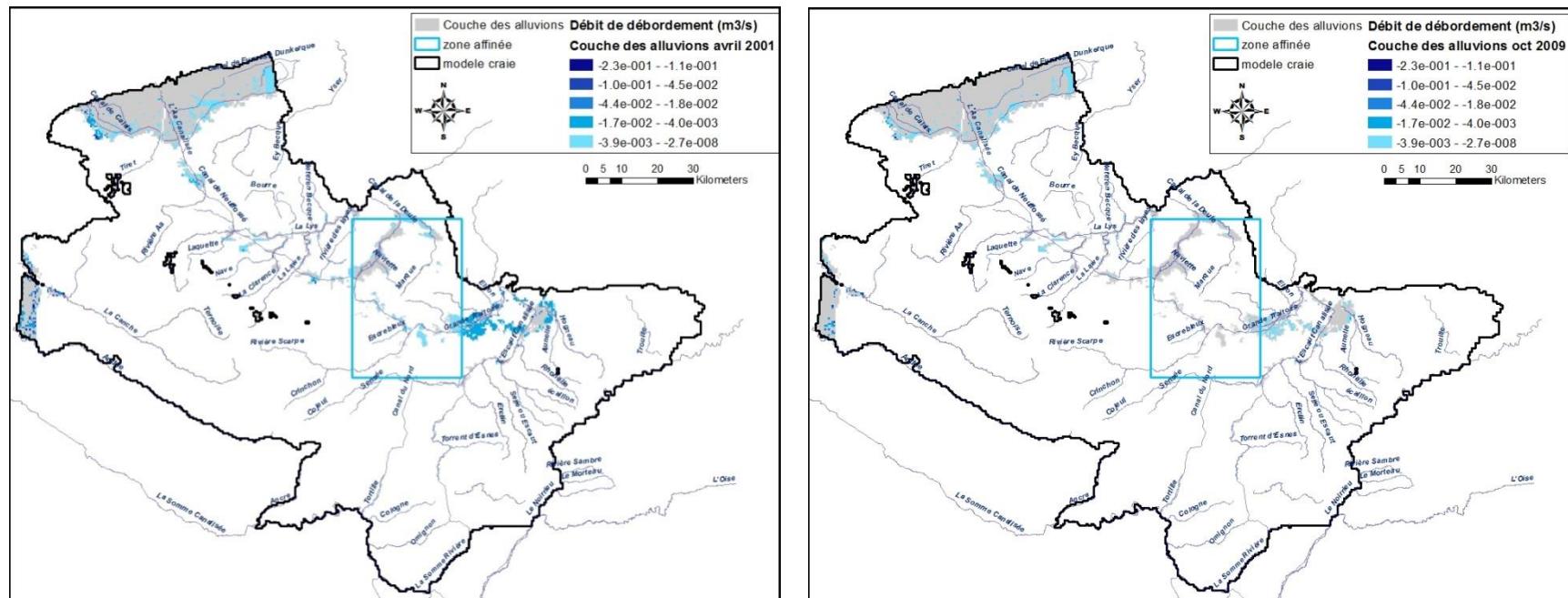


Figure 176 : Cartes des débits de débordement pour la couche des alluvions pendant la période des hautes eaux de 2001 (à gauche) et des moyennes eaux de 2009 (à droite).

La comparaison des deux périodes piézométriques : HE 2001 et ME 2009 montre que :

- Dans la couche des alluvions pendant les HE 2001 :
 - un certain nombre de mailles saturées en eau induisent du débordement dans la zone affinée autour de la Scarpe canalisée et du canal de la Deûle
 - les zones de débordement sont légèrement plus étendues et leurs débits associés plus intenses notamment au niveau des sables littoraux au Nord et à l'Ouest.

- Dans la couche des limons, la superficie des zones de débordement est bien plus importante dans la situation des hautes eaux 2001 qu'en octobre 2009. La couche mince des limons peut vite se retrouver saturée et engendrer des zones de débordement relativement vastes. Par contre le bloc Nord reste saturé en eau pour les deux régimes piézométriques avec des gammes de débits de débordement équivalents.

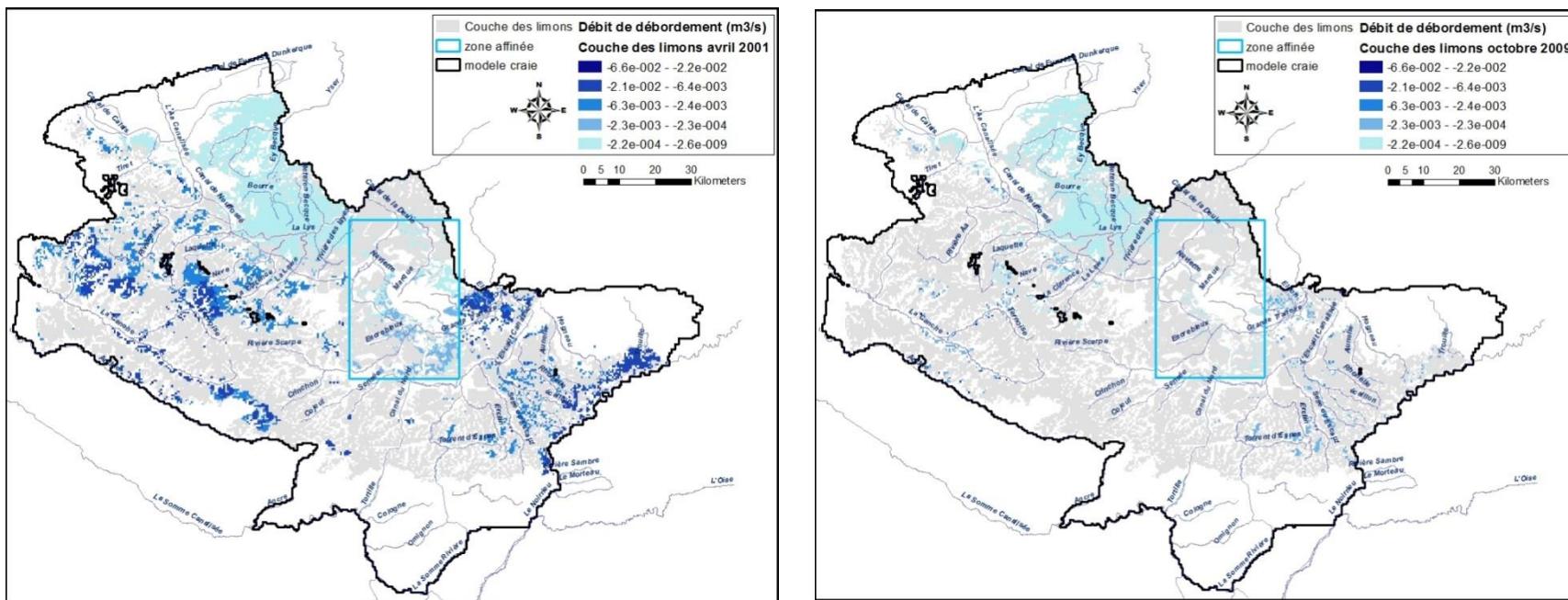


Figure 177 : Cartes des débits de débordement pour la couche des limons pendant la période des hautes eaux de 2001 (à gauche) et des moyennes eaux de 2009 (à droite).

9.3 VALIDATION DU MODELE

La comparaison entre la carte des milieux potentiellement humides et l'étendue des zones de débordement du modèle permet de valider le calage.

Les zones de débordement du modèle sont bien répertoriées en tant que milieux potentiellement humides de probabilité importante à très forte sur la carte. Avec des hypothèses similaires (pas de prise en compte des aménagements réalisés, ni de l'occupation du sol) ; les résultats obtenus par les deux méthodes sont bien cohérents entre eux.

10 Exploitation du modèle affiné

10.1 CALCULS DE TRAJECTOIRES « INVERSES »

Avec la dernière version du logiciel MARTHE, il est possible de lancer le calcul des trajectoires « inverses » à un pas de temps donné. Le numéro de ce pas de temps est défini dans le fichier des paramètres. Les points choisis comme « départs de trajectoires » inverses sont les puits de pompage des principaux champs captants de la zone affinée.

Afin de comparer les tracés des trajectoires en fonction de l'état piézométrique considéré et de cerner l'enveloppe interannuelle des trajectoires, trois états piézométriques distincts ont été choisis pour la simulation des trajectoires : basses eaux 1997 (octobre 1997), hautes eaux 2001 (mai 2001) et un état intermédiaire correspondant à décembre 2012. Ces trois périodes peuvent être resituées dans le contexte piézométrique interannuel en analysant la chronique du piézomètre 00147D0218/P1, Figure 178.

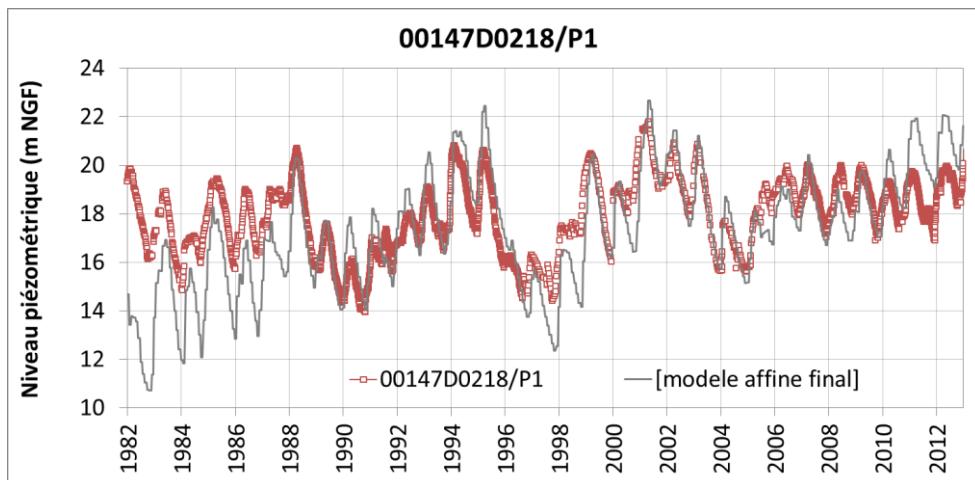


Figure 178 : Visualisation des périodes de basses eaux 1997, hautes eaux 2001 et moyennes eaux 2012 sur la chronique du piézomètre 00147D0218/P1.

Chacune des trois cartes ci-après montre une vue globale des trajectoires aboutissant aux différents champs captants, pour les trois configurations de nappe évoquées : basses eaux : Figure 179, hautes eaux : Figure 180, moyennes eaux : Figure 181. La couleur du tracé permet d'identifier la couche où circule la trajectoire.

On constate qu'en période de hautes eaux, les trajectoires sont nettement plus courtes. Par ailleurs, en période de hautes eaux, les trajectoires remontent presque systématiquement jusqu'aux couches quaternaires : limons et/ou alluvions (en vert et rouge sur les figures). En basses eaux, en revanche, elles peuvent rester cantonnées dans la couche de la Craie, notamment pour les champs captants de Férin, des Ansereuilles, d'Emmerin et d'Houplin. Les plus grandes différences de trajectoires s'observent au voisinage des champs captants de Lille, et des champs captants de Flers et de Férin. En période de basses eaux, l'origine des trajectoires de ces deux derniers champs captants se trouve tout au Sud de la masse d'eau 1006.

Les différents tracés permettent de voir l'étendue approximative des aires d'alimentation et de distinguer les venues d'eau par couches géologiques traversées.

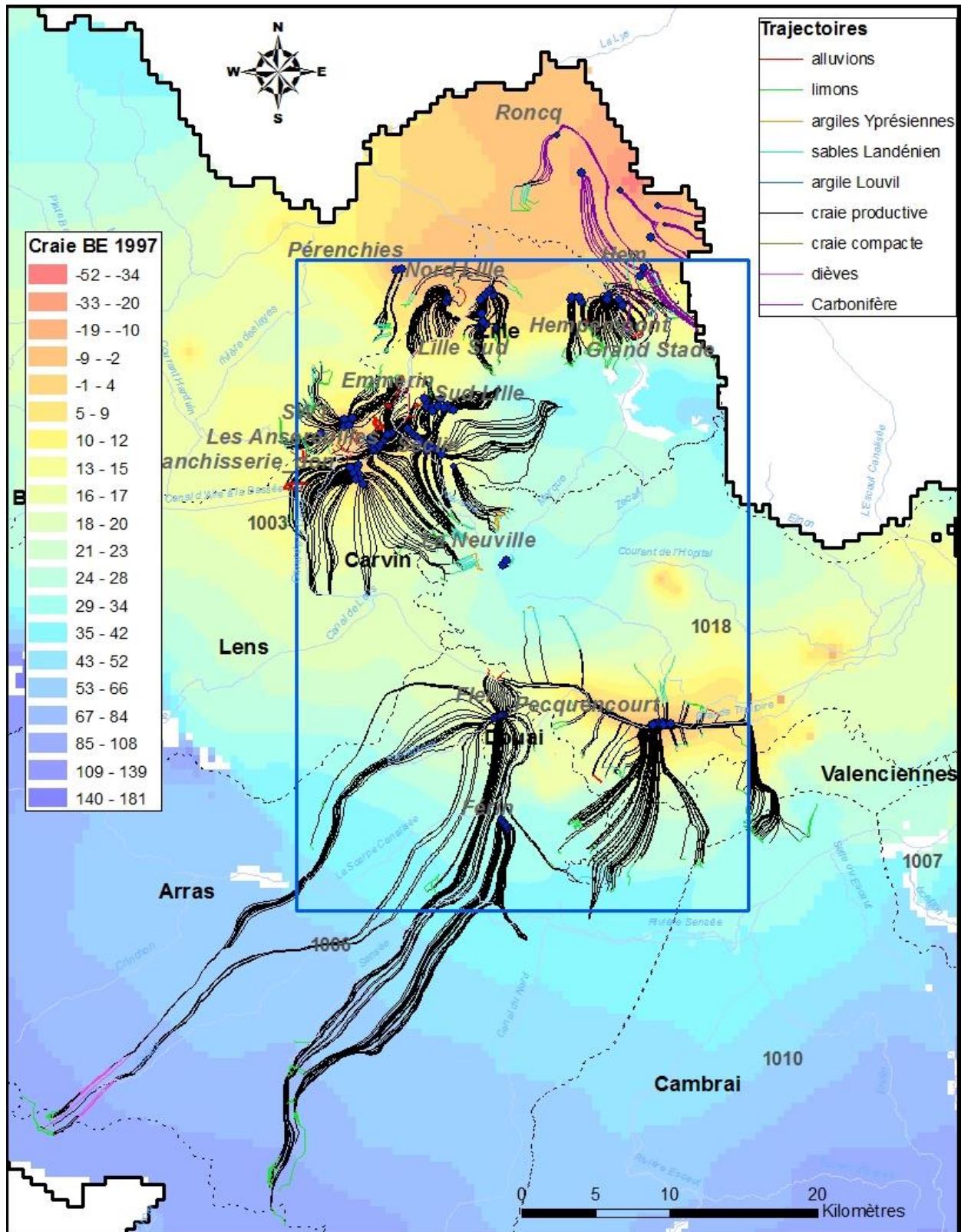


Figure 179 : Tracé des trajectoires inverses, en basses eaux 1997, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.

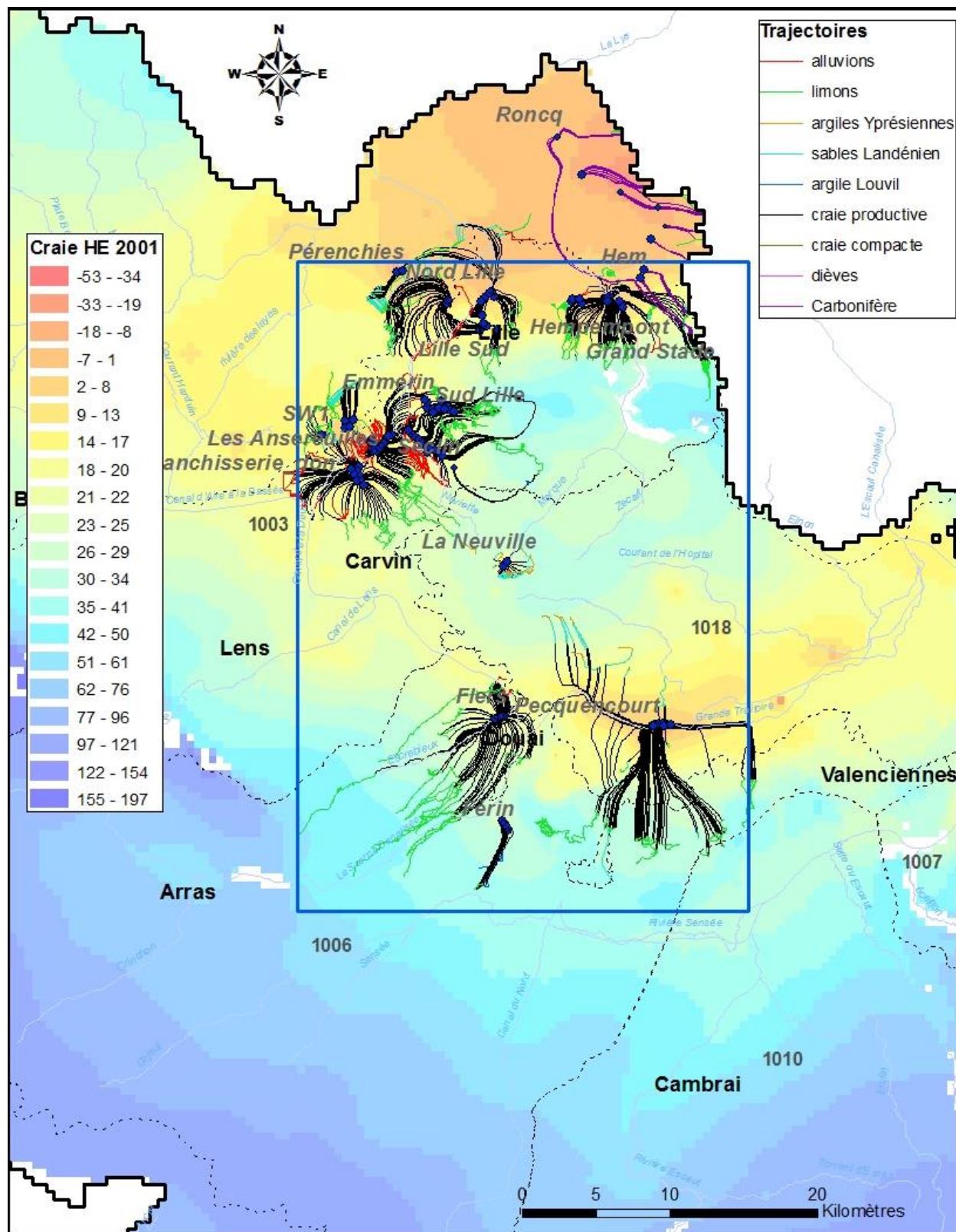


Figure 180 : Tracé des trajectoires inverses, en hautes eaux 2001, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.

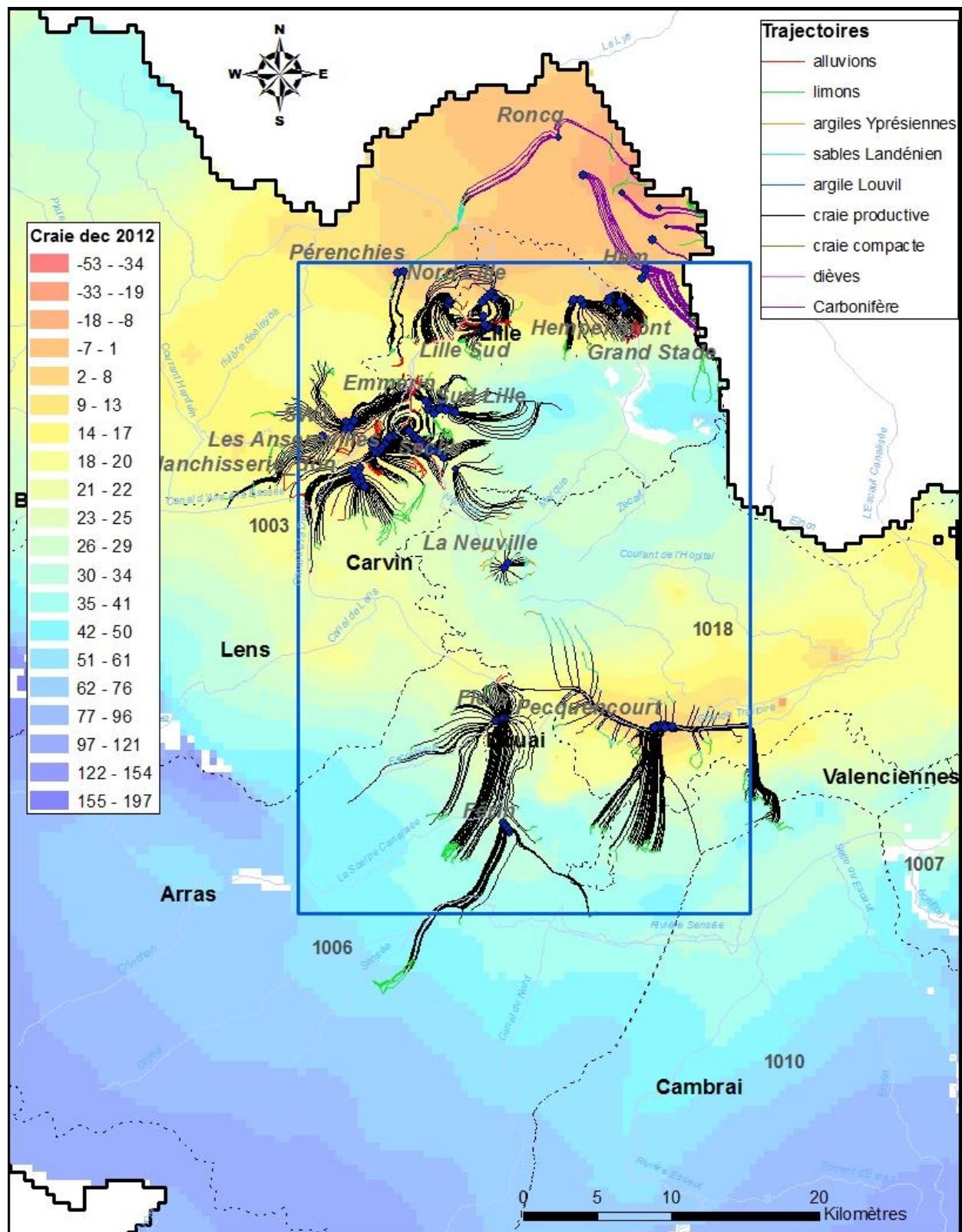


Figure 181 : Tracé des trajectoires inverses, en moyenne eaux de décembre 2012, parvenant aux champs captants de la zone affinée - coloration par couches.

Les figures des pages suivantes proposent des comparaisons de trajectoires inverses pour les trois régimes piézométriques choisis, champ captant par champ captant :

Champs captants de Lille - Figure 182

En basses eaux, les trajectoires inverses restent dans la Craie ou remontent jusqu'aux sables du Landénien (en bleu cyan sur les figures) pour les forages les plus au Sud de la zone. Pour les forages implantés plus au Nord (Hempempont, Nord de Lille, Pérenchies), le point de départ des trajectoires se situe dans la couche des limons. En hautes eaux, les trajectoires sont plus courtes et remontent presque systématiquement dans les couches quaternaires (limons et alluvions).

Sur le champ captant des Ansereuilles, le tracé des trajectoires est similaire pour les trois configurations : elles proviennent toutes du Sud. Elles sont toutefois plus longues en période de basses eaux et descendant jusqu'au Canal de la Deûle au Sud des forages. Certaines démarrent dans les alluvions en période de hautes eaux.

Sur le champ captant d'Houplin, les trajectoires sont réparties de part et d'autre de la ligne reliant tous les forages de H1 à H10, de manière quasi symétrique. Cette répartition est plus visible en période de basses eaux.

Pour le champ captant d'Emmerin, les origines des trajectoires se situent quasiment toutes à l'Est des forages, au niveau du dôme piézométrique où les niveaux sont proches de 40 mNGF.

Pour les forages au Nord de Lille, les trajectoires proviennent pratiquement toutes du Sud à l'exception des forages LAMA1 et LAMA2 pour lesquels certains faisceaux arrivent du Nord-Ouest.

Champs captants d'Hempempont et du Carbonifère - Figure 183

Sur le champ captant d'Hempempont, le tracé des trajectoires est assez similaire pour les trois configurations. Elles proviennent du Sud et Sud-Est pour HE4 et remontent jusqu'aux limons ou aux alluvions pour les forages les plus à l'Est.

Pour le Carbonifère, les trajectoires démarrent toutes des mailles à potentiel imposé situées sur la frontière Est du modèle. Quelques faisceaux de trajectoires alimentant le forage de Roncq proviennent aussi du Sud, Sud-Ouest.

Champ captant de Pecquencourt - Figure 185

On voit sur la figure que les trajectoires suivent la direction préférentielle des axes de forte perméabilité. La majorité des trajectoires proviennent du Sud de la zone des forages de Pecquencourt, mais des contributions significatives sont aussi apportées par les bras Est et Ouest.

Champs captants de Flers et Férin - Figure 186

Le régime piézométrique influence de façon déterminante la longueur des trajectoires inverses parvenant aux champs captants de Flers et de Férin.

Pour le champ captant de Flers, les trajectoires sont réparties de part et d'autres des forages et de l'Escrebieux. En basses eaux, les points de départ des trajectoires se situent tout au Sud de la masse d'eau 1006, à environ 40 km au Sud-Ouest des forages. En hautes eaux, les plus longues trajectoires ne dépassent pas 7 km.

Pour le champ captant de Férin, les trajectoires démarrent au Sud-Ouest des forages, à 30 km en basses eaux et 4 km en hautes eaux.

Il convient de noter que les trajectoires inverses qui sont présentées et commentées pour les trois états piézométriques retenus sont calculées et tracées comme si les états piézométriques correspondants étaient permanents. Comme ce n'est pas le cas, il en découle que les très longues trajectoires tracées pour le régime de Basses Eaux 1997 restent théoriques et n'ont guère de probabilité de se matérialiser. Selon ce raisonnement, les trajectoires des moyennes eaux de décembre 2012 sont les plus probables.

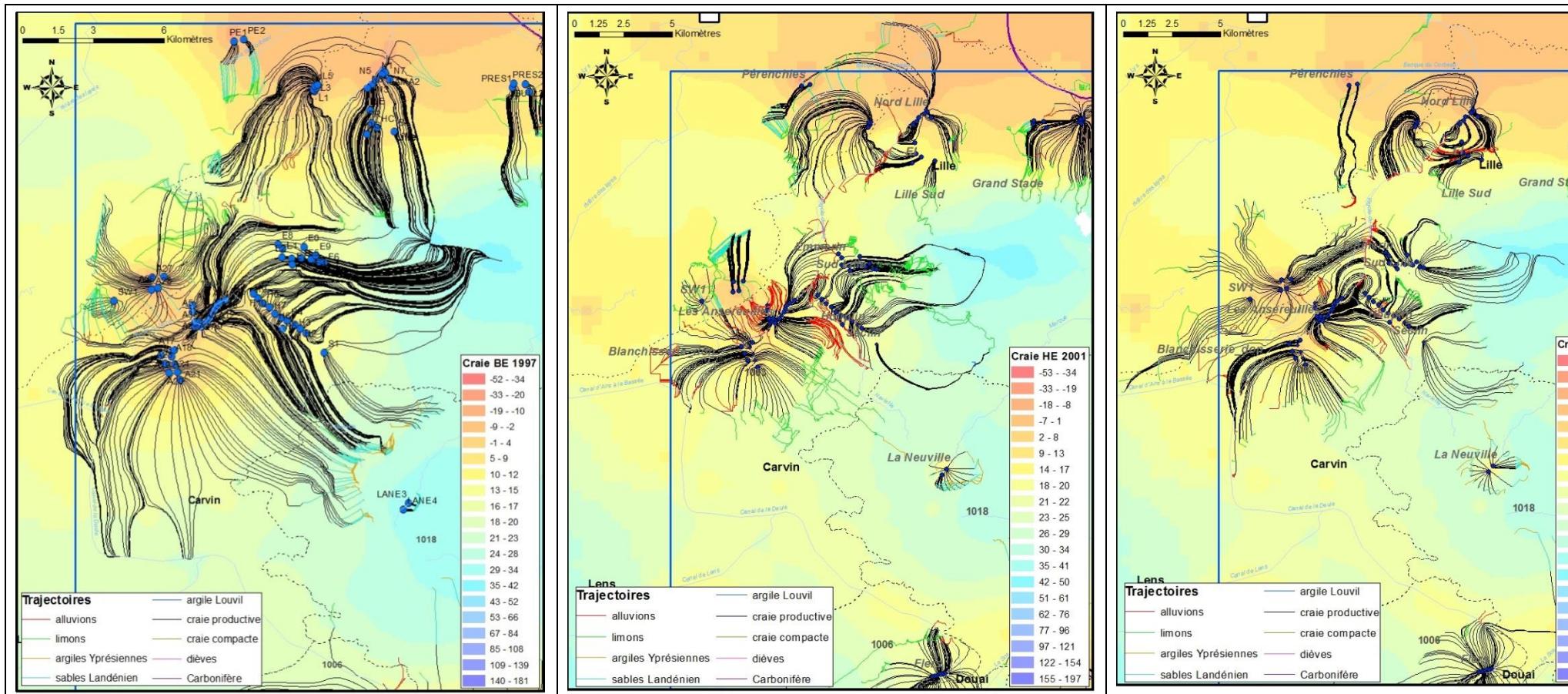


Figure 182 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (BE 1997, HE 2001, dec 2012) sur les champs captants de Lille.

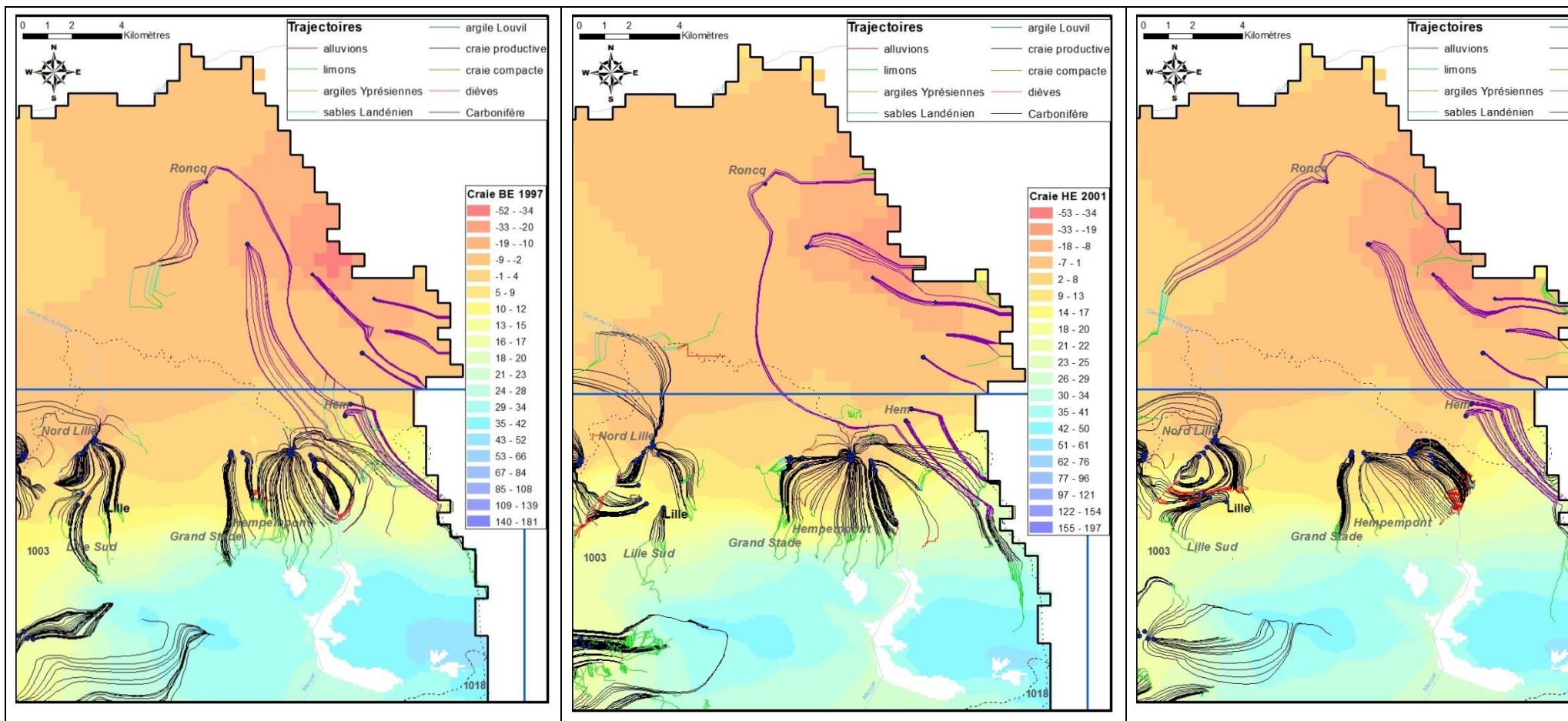
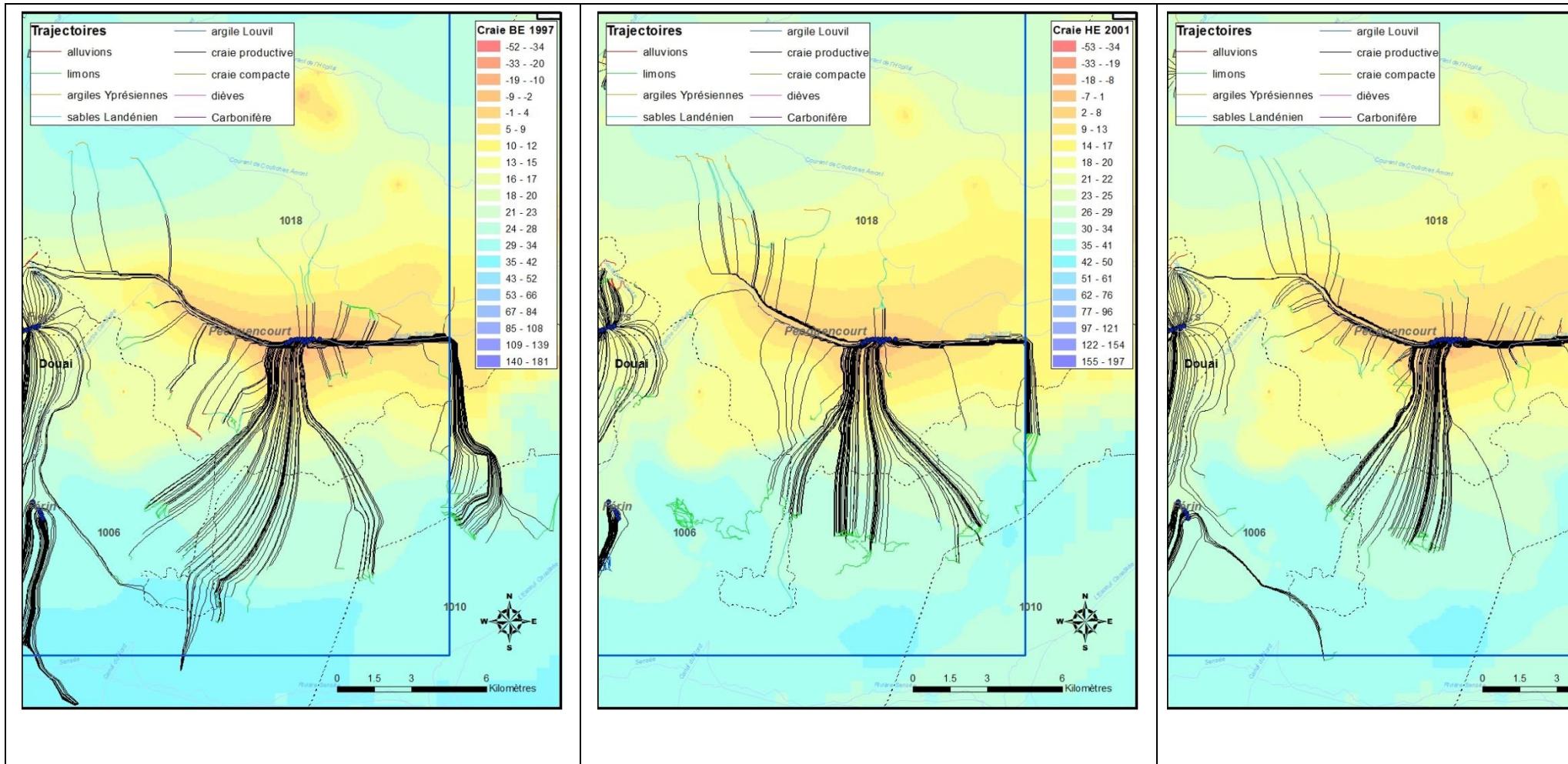


Figure 183 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (BE 1997, HE 2001, dec 2012) sur les champs captants d'Hempempont et du Carbonifère.



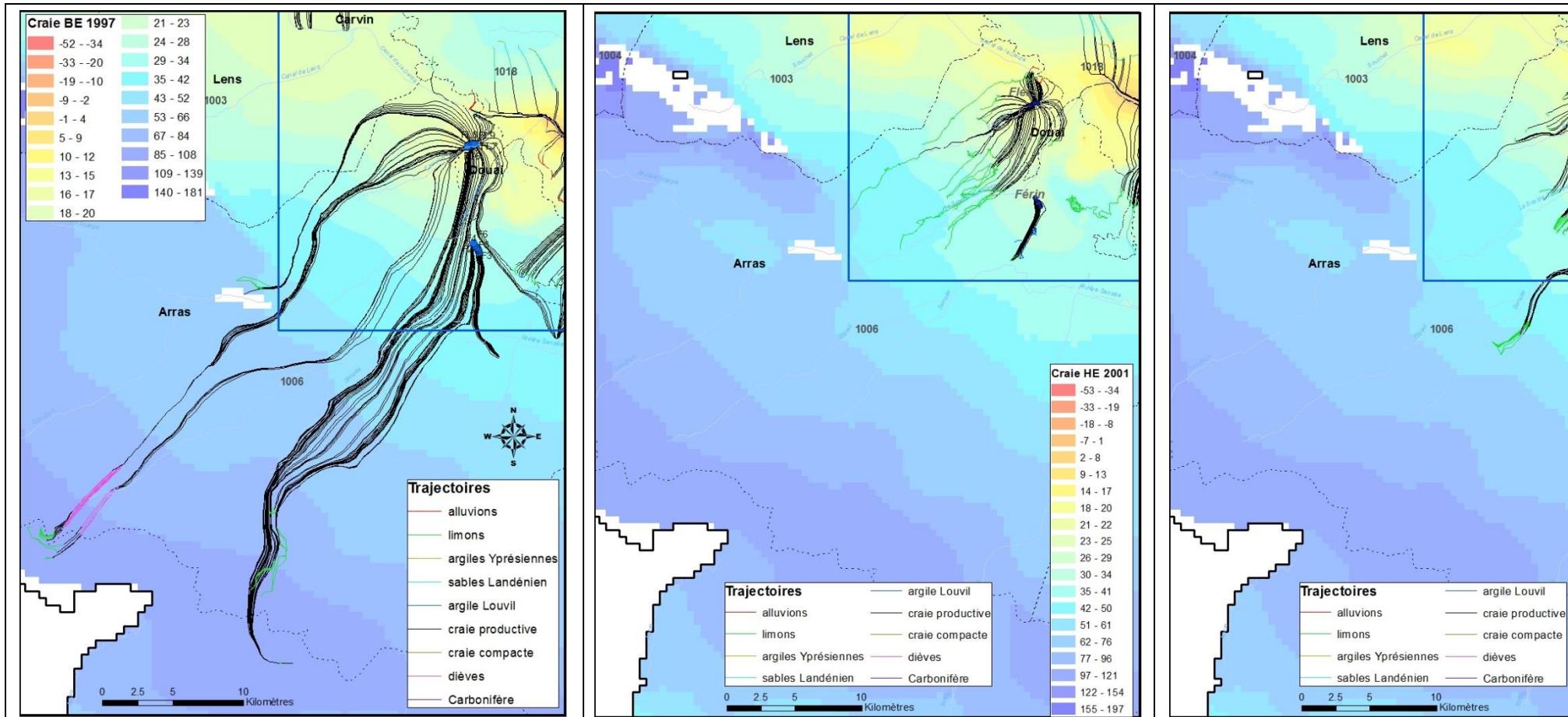


Figure 185 : Tracé des trajectoires inverses pour différents régimes piézométriques (HE 2001, BE 1997, dec 2012) sur les champs captants de Flers et de Férin.

10.2 BILAN HYDRAULIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE

10.2.1 Bilan hydroclimatique

Précipitations et pluies efficaces

Les précipitations moyennes de la région, calculées à partir des cinq stations météorologiques de longue durée (30 à 40 ans) du bassin Artois-Picardie, sont de l'ordre de 775 mm/an. Elles varient fortement selon les années, parfois du simple au double. Ces précipitations sont assez bien réparties tout au long de l'année, avec un maximum en novembre et des minima en février et avril. La moyenne interannuelle des pluies efficaces correspondantes est estimée à 265 mm/an, avec de fortes variations d'une année à l'autre et une distribution spatiale assez similaire à celle de la pluie totale. A l'échelon mensuel, le phénomène est encore plus accentué, aucune pluie de la saison estivale ne s'infiltre dans le sol, tout est consommé par l'évapotranspiration.

Résultats modèle

Les chroniques mensuelles de précipitation et d'évapotranspiration potentielle, ainsi que celles des différentes composantes hydroclimatiques (ETR : EvapoTranspiration Réelle, Ruissellement, Infiltration) calculées par le modèle sur la période simulée sont présentées à la Figure 186. Leurs moyennes annuelles sont indiquées dans le Tableau 18.

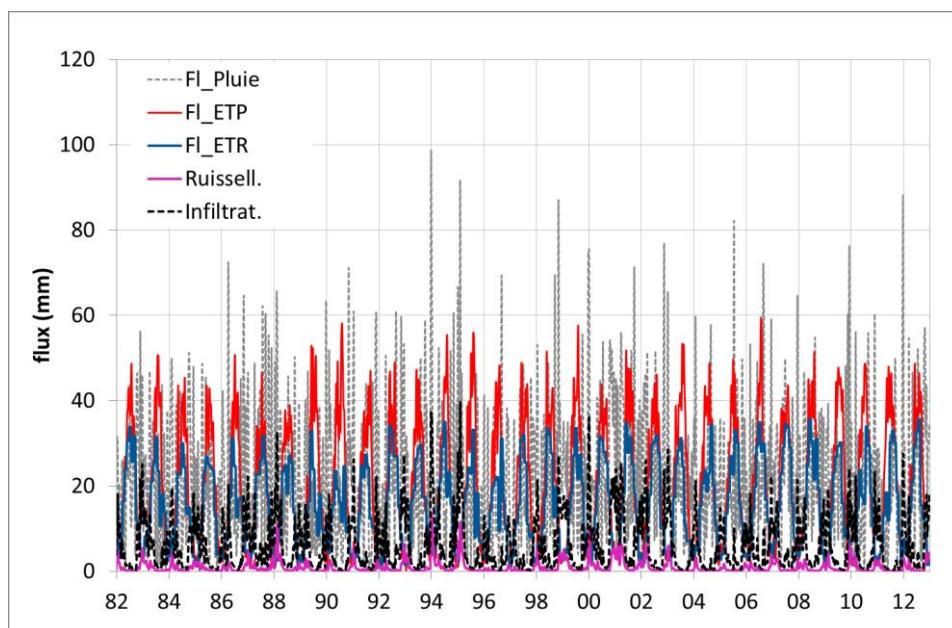


Figure 186 : Chroniques hydroclimatiques appliquées à la nappe de la Craie.

	Pluie	ETP	ETR	Ruissellement	Infiltration
Lame d'eau moyenne (mm/an)	685.51	617.95	465.81	30.12	182.86
Pourcentage du volume précipité	100%		68%	4%	27%

Tableau 18 : Moyennes interannuelles des composantes hydroclimatiques sur l'ensemble du modèle.

10.2.2 Bilan global

Le Tableau 19 donne les valeurs des différentes composantes de débit (en m^3/s) et de flux d'eau (en mm/an) circulant au sein de chaque couche du modèle, et entre les couches.

En termes de débits prélevés et de calcul de la recharge sur l'ensemble du modèle, les valeurs moyennes calculées par le modèle sur la période 1982-2012 sont conformes aux bilans des données d'entrée synthétisées avant la phase de modélisation, ce qui valide le processus d'assignation des données au modèle.

On constate que dans la couche des alluvions, seulement 10% de la recharge transite vers les nappes sous-jacentes. Dans la couche des limons, une partie des débits provenant de la recharge déborde mais la majorité des débits est acheminée par drainance verticale vers la nappe de la Craie séno-turonienne productive. Dans la couche de Craie productive, les apports par drainance descendante ($30 m^3/s$) sont presque aussi importants que la recharge sur les affleurements de cette formation ($28.73 m^3/s$). Ces apports se partagent ensuite entre débordement ($24 m^3/s$), drainage par les cours d'eau ($20.5 m^3/s$), et prélevements ($9.5 m^3/s$).

Les échanges nappe-rivière se font majoritairement au sein de la couche de Craie productive mais 20% de ces échanges se font dans la couche des Dièves lorsque celle-ci est perméable et se confond avec l'aquifère crayeux (au droit de la masse d'eau 1004).

Débits échangés en m ³ /s (en moyenne sur la période de simulation)										
couche	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
1	alluvions	-0.10		2.78	-2.94	-0.09	-0.09		0.26	0.26
2	limons			36.03	-5.69	0.00	-0.46	0.08	-31.29	-31.21
3	argiles des flandres			0.65	-0.41	-0.02	-0.03	0.18	-0.44	-0.26
4	sables d'Ostricourt	-0.01	-0.06	1.04	-1.34	-0.18	-0.05	2.42	-1.93	0.49
5	argiles de Louvil			1.23	-0.46	-0.05	0.00	1.73	-2.47	-0.74
6	craie productive	-0.17	-9.46	27.53	-23.72	-20.34	-0.06	30.38	-4.97	25.41
7	craie compacte	-0.01		0.00	0.00		0.00	-2.29	2.30	0.01
8	dièves			5.16	-3.04	-6.37	0.01	6.05	-1.83	4.22
9	cénomanien		-0.58	1.18	-1.35	-0.95	0.00	1.68	0.00	1.68
10	Carbonifère	0.56	-0.61				0.08	0.14		0.14
global		0.27	-10.71	75.61	-38.94	-28.00	-0.60			
Débits échangés en Mm ³ /an (en moyenne sur la période de simulation)										
couche	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
1	alluvions	-3.29		87.81	-92.79	-2.81	-2.73		8.22	8.22
2	limons			1137.04	-179.41	-0.06	-14.54	2.59	-987.56	-984.97
3	argiles des flandres			20.56	-12.82	-0.57	-1.01	5.78	-13.99	-8.21
4	sables d'Ostricourt	-0.27	-1.98	32.74	-42.16	-5.83	-1.59	76.44	-61.03	15.41
5	argiles de Louvil			38.83	-14.47	-1.68	-0.04	54.67	-78.09	-23.43
6	craie productive	-5.40	-298.43	868.79	-748.54	-641.94	-1.86	958.77	-156.75	802.02
7	craie compacte	-0.47		0.07	-0.07		0.01	-72.23	72.68	0.45
8	dièves			162.95	-95.93	-200.87	0.24	191.02	-57.87	133.15
9	cénomanien		-18.37	37.19	-42.74	-29.82	0.02	52.96	0.01	52.97
10	Carbonifère	17.83	-19.33				2.51	4.38		4.38
global		8.39	-338.11	2385.98	-1228.93	-883.59	-18.99			

Tableau 19 : Débits (en m³/s) et flux (en mm/an) intra- et inter-couches sur l'ensemble du domaine modélisé.

10.2.3 Échanges nappe-rivières

Evolution temporelle des échanges nappe-rivières

Globalement, sur le domaine modélisé, les nappes sont drainées par les cours d'eau, ce dont témoigne le fait que les débits globaux des échanges nappe-rivière soient négatifs dans le modèle. La majorité des échanges entre nappes et cours d'eau se concentre dans la couche de la Craie productive, comme le montre la Figure 187 où l'on constate que les écarts sont faibles entre la courbe verte représentant les débits d'échange nappe-rivière dans la couche de la Craie et la courbe noire quantifiant ces échanges sur l'ensemble du modèle.

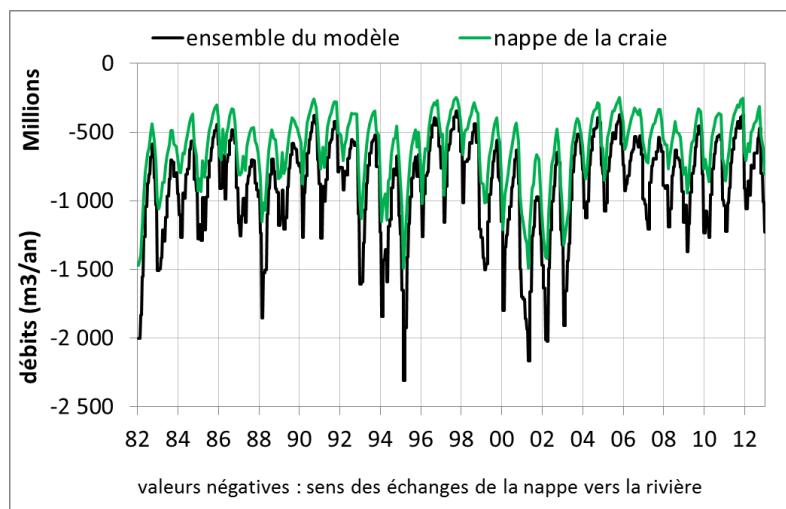


Figure 187 : Comparaison des débits d'échange nappe-rivière entre la totalité du domaine modélisé et la couche de la Craie productive.

Distribution spatiale des échanges nappe-rivières

La Figure 188 présente pour la période des basses eaux 2009 (octobre 2009), le sens des échanges nappe-rivière simulés sur les mailles du réseau hydrographique. En rouge : drainage de la nappe par les rivières, en bleu : alimentation de la nappe par les rivières. On constate que les rivières alimentent la nappe dans la partie amont des cours d'eau et sur la majorité de leur tracé dans la zone des champs captants de Lille.

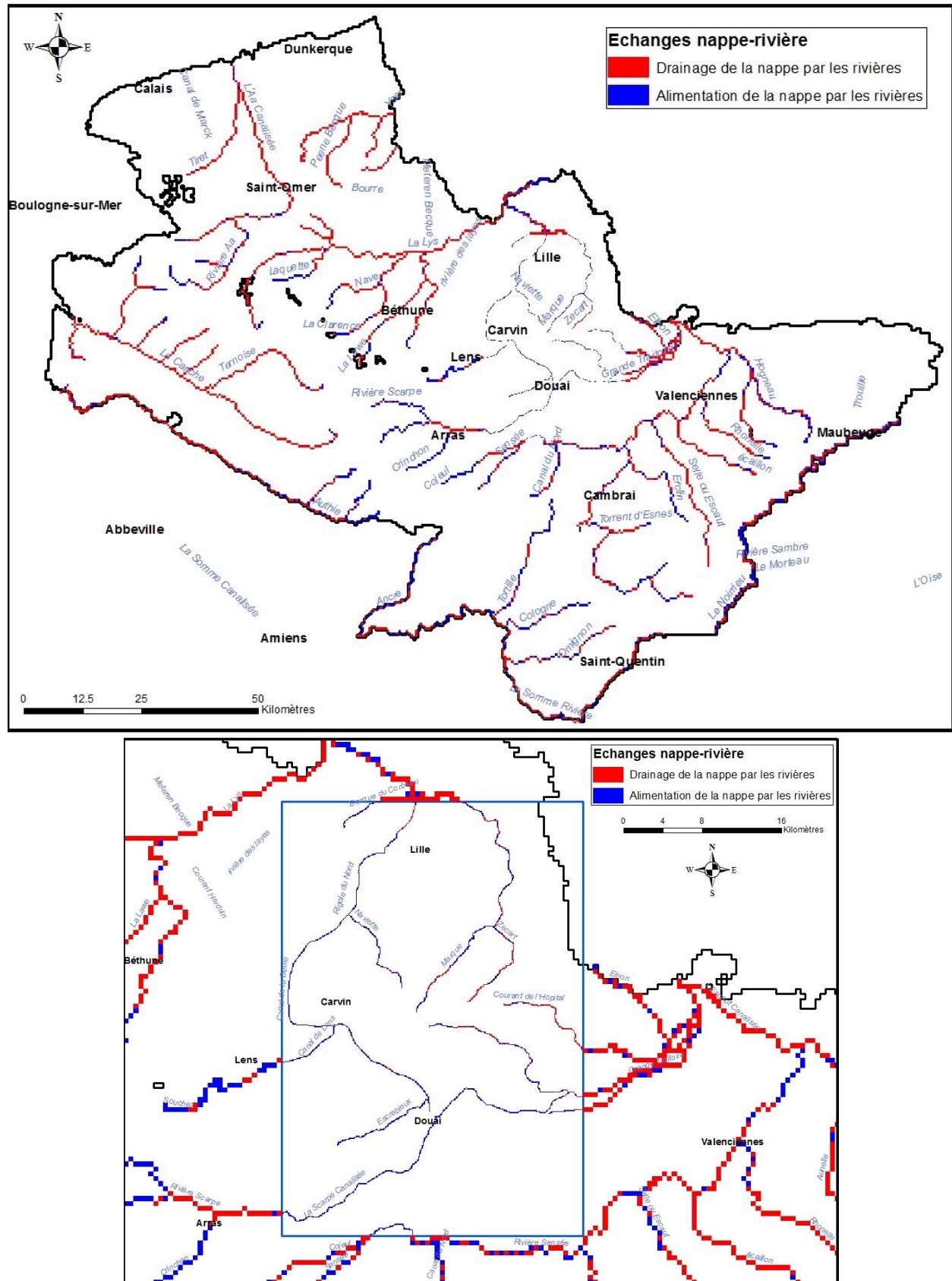


Figure 188 : Sens des échanges simulés entre nappes et rivières en octobre 2009 sur l'ensemble du modèle (en haut) et dans la zone affinée (en bas).

10.2.4 Bilan de la nappe de la Craie sur l'ensemble du modèle

L'évolution temporelle, sur la période de simulation, des débits circulant au sein de la nappe de la Craie (en millions de m^3 /an) est présentée à la Figure 189.

Comme déjà mentionné, l'alimentation de la couche de Craie productive se répartit en proportion quasi-équivalente entre la recharge et l'alimentation par les couches sus-jacentes. Les prélevements sont relativement constants autour de 300 Mm^3 /an. Les débits de débordement et les débits d'échange nappe-rivière sont assez proches, de l'ordre de 600 à 800 Mm^3 /an.

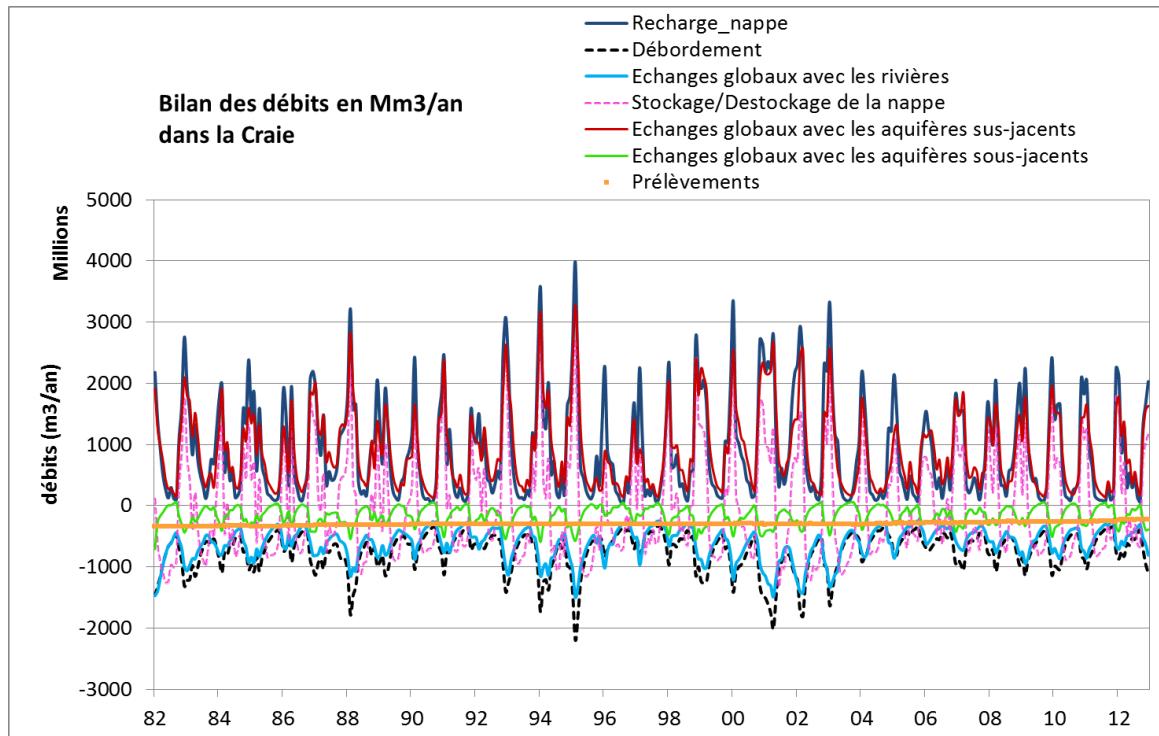


Figure 189 : Bilan des débits dans la nappe la Craie (en Mm^3 /an).

10.2.5 Bilan par zones autour des champs captants

Afin d'évaluer les échanges entre les différentes nappes (alluvions, Craie séno-turonienne et Calcaires carbonifères), des bilans ont été réalisés pour des zones plus restreintes autour des champs captants.

La délimitation de ces zones de bilan s'est appuyée sur le tracé des trajectoires inverses. Cette analyse a conduit à définir quatre zones autour des champs captants d'Hempempont (1), Emmerin-Houplin-Ansereuilles (2), Flers (3) et Pecquencourt (4). Ces zones sont délimitées par des polygones rouges sur la Figure 190.

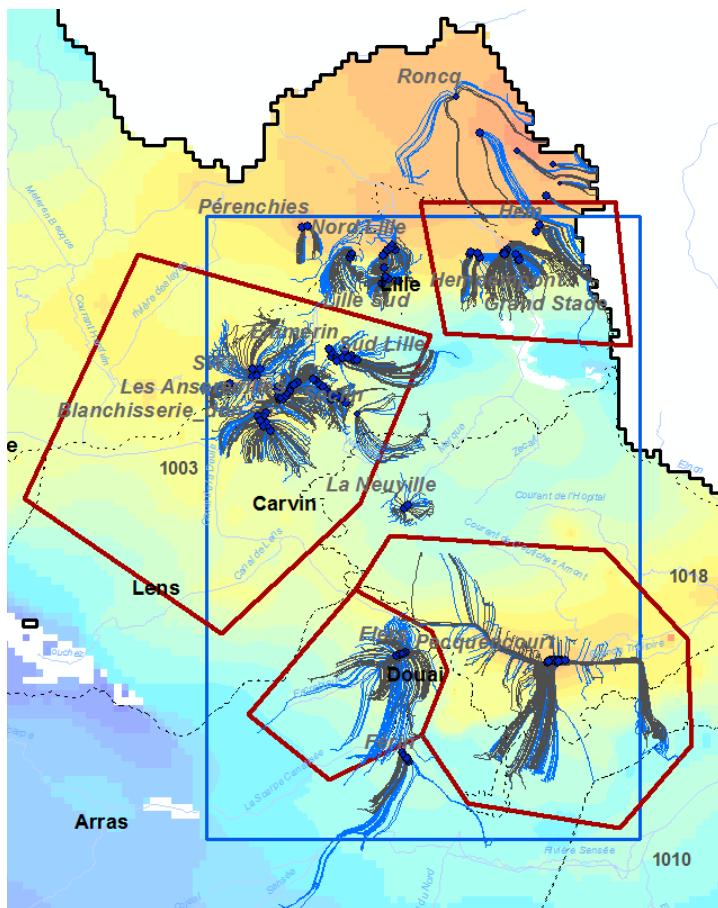


Figure 190 : Délimitation des zones de bilan autour des champs captants : polygones rouges.

Sont regroupées pour ces bilans, les couches d'alluvions et de limons d'une part, et les couches de la Craie séno-turonienne productive et compacte d'autre part.

Les mailles concernées par ces bilans sont présentées :

- pour les couches quaternaires : zones 1 à 4 sur la Figure 191,
- pour les couches de la Craie : zones 61 à 64 sur la Figure 192,
- pour la couche Carbonifère : zones 101 et 102 sur la Figure 193.

NB : les argiles des Flandres ne sont présentes que sur une très petite partie dans les zones des champs captants de Lille (NO) et de Pecquencourt (N). Les argiles de Louvil couvrent environ la moitié des zones autour des champs captants d'Hempempont, de Lille et de Pecquencourt. Ce qui permet des échanges entre les couches du quaternaires et l'aquifère crayeux.

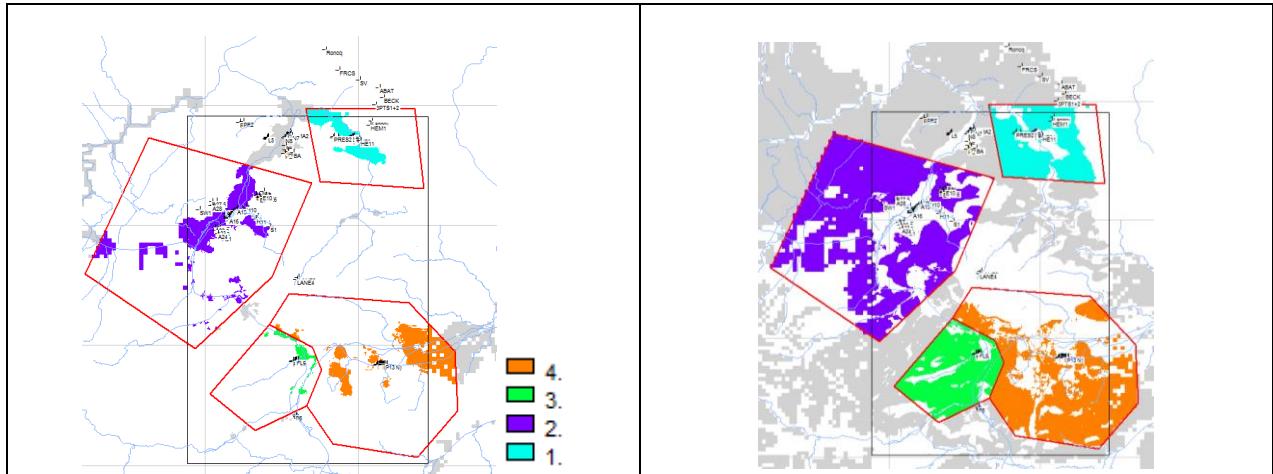


Figure 191 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 1 à 4 pour la couche des alluvions (à gauche) et celle des limons (à droite).

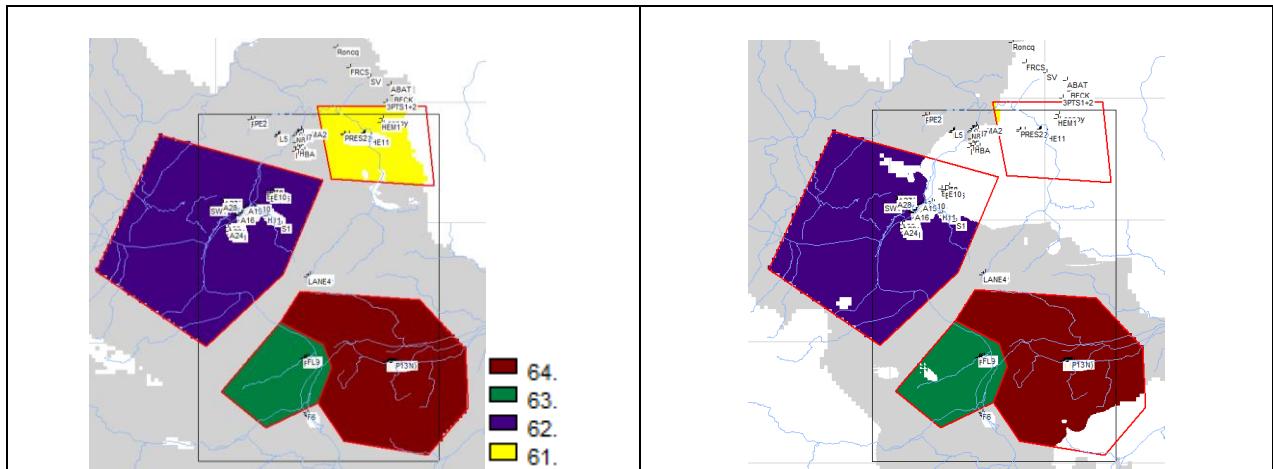


Figure 192 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 61 à 64 pour la couche de la Craie séno-turonienne productive (à gauche) et de la Craie compacte (à droite).

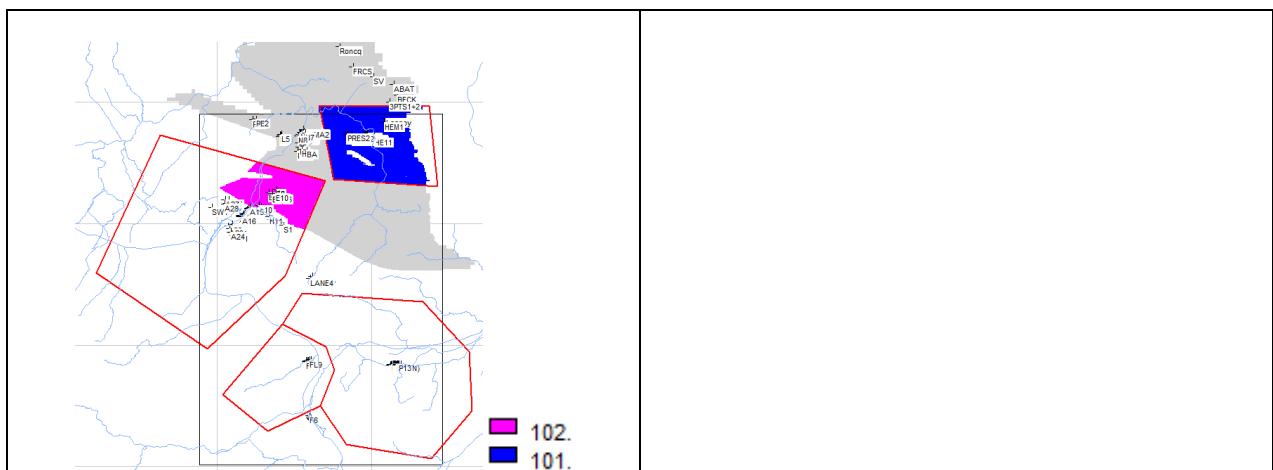


Figure 193 : Représentation des mailles concernées par les bilans par champs captants : zones 101 et 102 pour la couche des Calcaires carbonifères.

Le Tableau 20 synthétise les composantes des débits échangés dans chacune des quatre zones.

Pour le champ captant d'Hempempont, 85% de la recharge qui alimente les couches quaternaires transitent vers les couches crayeuses. Dans ces horizons, les débits sortant se répartissent entre prélèvements et débits descendant vers la couche Carbonifère (la moitié à peu près).

Pour les champs captants d'Emmerin, d'Houplin et des Ansereuilles, les débits prélevés sont très importants et supérieurs à la recharge des deux aquifères (Quaternaire + Craie) mais les rivières contribuent à une alimentation non négligeable de ces aquifères. Dans les couches crayeuses, les apports proviennent majoritairement des limites de la zone : couches sus-jacentes et apports latéraux, ainsi que de la recharge et des rivières dont le cumul équivaut à la moitié des apports des nappes encaissantes. Les débits transitant vers la couche Carbonifère sont très faibles.

Dans la zone du champ captant de Flers, la quasi-totalité de la recharge des couches quaternaires transite vers les couches sous-jacentes, notamment les couches crayeuses. Les débits prélevés dans la nappe de la Craie sont conséquents dans cette zone. Ils sont compensés par les débits apportés par les couches quaternaires et les échanges horizontaux en proportion équivalente, et aussi par les apports des rivières (à hauteur de 10% environ).

Au droit du champ captant de Pecquencourt, un peu plus de la moitié de la recharge des couches superficielles transite vers les couches sous-jacentes. Dans les couches crayeuses, les débits proviennent exclusivement des couches sus-jacentes car il n'y a pas d'échange nappe-rivière dans ce secteur ni de recharge. Il est à noter qu'une partie des prélèvements (environ 20%) n'est pas effectivement prise en compte dans le modèle. Malgré les gros efforts fournis pour améliorer le calage de ce champ captant, il n'a pas été possible de satisfaire la totalité des pompages. Même si la piézométrie est maintenant correctement simulée, des améliorations sont encore réalisables pour réduire l'écart entre prélèvements réels et ceux effectivement pris en compte dans le modèle.

Débits échangés en m^3/s champ captant d'Hempempont (en moyenne sur la période de simulation)

zone	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements réels	Prélèvements effectués dans le modèle	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par les limites	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
1	alluvions + limons				0.35	-0.09	0.01	-0.02	-0.29		-0.29	-0.29
61	craie productive + craie compacte		-0.16	-0.15	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.15	0.28	-0.14	0.14
101	Carbonifère	0.16	-0.06	-0.06				0.08	-0.01	0.15		0.15
	global	0.16	-0.21	-0.21	0.36	-0.10	0.01	0.06	-0.15	0.43	-0.44	-0.01

Débits échangés en m^3/s champ captant d'Emmerin Houplin (en moyenne sur la période de simulation)

zone	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements réels	Prélèvements effectués dans le modèle	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par les limites	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
2	alluvions + limons				0.92	-0.14	0.29	-0.04	-1.12		-1.12	-1.12
62	craie productive + craie compacte		-1.92	-1.88	0.33	-0.41	0.21	0.01	1.76	1.16	-0.01	1.16
102	Carbonifère									0.01		0.01
	global		-1.92	-1.88	1.25	-0.54	0.50	-0.03	0.64	1.17	-1.13	0.04

Débits échangés en m^3/s champ captant de Flers (en moyenne sur la période de simulation)

zone	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements réels	Prélèvements effectués dans le modèle	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par les limites	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
3	alluvions + limons				0.34	-0.04	0.03	0.00	-0.34		-0.34	-0.34
63	craie productive + craie compacte		-0.74	-0.73	0.05	-0.09	0.08	0.00	0.69	0.34	0.00	0.34
	global		-0.74	-0.73	0.39	-0.13	0.11	0.00	0.35	0.34	-0.33	0.00

Débits échangés en m^3/s champ captant de Pecquencourt (en moyenne sur la période de simulation)

zone	formation	Débits par les limites à potentiel imposé	Prélèvements réels	Prélèvements effectués dans le modèle	Recharge	Débordement	Echanges nappe-rivière	Stockage	Echange par les limites	Echange par le haut	Echange par le bas	Bilan des échanges verticaux
4	alluvions + limons				0.77	-0.31	-0.01	0.00	-0.44		-0.44	-0.44
64	craie productive + craie compacte		-0.57	-0.44	0.03	-0.02	0.00	0.00	0.43	0.43	0.00	0.43
	global		-0.57	-0.44	0.80	-0.34	-0.01	0.00	-0.02	0.43	-0.44	-0.02

Tableau 20 : Débits (en m^3/s) échangés par zone.

11 Conclusions et recommandations

Le modèle de la Craie affiné du Nord-Pas-de-Calais a été calé en régime transitoire de 1982 à 2012, avec 372 pas de temps mensuel. Le calage a été mené en plusieurs étapes. De ce processus de calage, deux observations majeures sur le fonctionnement du modèle sont ressortis :

- les cours d'eau semblent jouer un rôle important sur la masse d'eau 1003, en particulier le long du Canal de la Deûle et sur Seclin où ils semblent contribuer largement à l'alimentation en eau de la nappe de la Craie ;
- entre Lille et Villeneuve d'Ascq, la nappe de la Craie semble influencée par ses échanges avec la nappe du Carbonifère.

Résultats du calage

L'état de basses-eaux 2009 ayant fait l'objet d'une campagne piézométrique par le BRGM dans le cadre du projet SIGES, il a été choisi comme référence pour le calage du modèle. Il en ressort que le modèle restitue bien le comportement de la nappe de la Craie dans sa partie libre et sous recouvrement quaternaire. Au droit de la zone affinée, la nappe est fortement impactée par les champs captants, et la densité du réseau de mesure utilisé pour le tracé de la carte est parfois insuffisante pour garantir son tracé, notamment dans la partie captive de la Craie.

Dans le secteur Nord et centre de Lille ainsi que dans le champ captant d'Hempempont, le processus de couplage mis en place avec la nappe des Calcaires du Carbonifère a permis d'améliorer le calage des niveaux piézométriques de la nappe de la Craie par rapport au modèle régional antérieur. Les niveaux piézométriques des différents ouvrages sont bien restitués par le modèle.

Dans les champs captants d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne, les résultats du calage sont très satisfaisants. A Emmerin, les valeurs de perméabilité de la nappe de la Craie productive sont très élevées. La zone du champ captant d'Houplin est très sensible à la perméabilité attribuée à la nappe de la Craie.

Dans le secteur des Ansereuilles, les puits de pompage sont très nombreux et rapprochés, ce qui complique le calage du modèle. Les nombreuses simulations réalisées ont montré que cette zone est particulièrement sensible à deux paramètres de calage : la perméabilité de la nappe de la Craie productive et la perméabilité d'échange nappe-rivière. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur l'ensemble du champ captant et, plus au Sud, la piézométrie est très bien reproduite.

Dans le secteur du champ captant de Pecquencourt, s'est avérée particulièrement difficile à caler parce que les piézomètres alignés sur une ligne Est-Ouest passant par le champ captant sont très réactifs aux fluctuations des prélèvements, tandis que les piézomètres situés au Nord et au Sud montrent des réactions très amorties. Ces réactions contrastées témoignent d'une très forte anisotropie directionnelle des transmissivités, que rien ne permet de délimiter spatialement. L'hypothèse la plus probable serait que les forts contrastes de perméabilité dans ce secteur seraient dus à la présence de failles et de karsts en rapport avec des effondrements d'âge éocène. Les hypothèses retenues pour la modélisation (introduction de linéaments plus perméables) permettent de restituer de manière satisfaisante les évolutions piézométriques observées dans les puits et piézomètres à proximité du champ captant. Il serait toutefois

nécessaire d'approfondir les connaissances hydrogéologiques de cette zone, par exemple par le biais de monitoring dans les Sables d'Ostricourt, afin de valider ces hypothèses.

A proximité de ce secteur, au droit des champs captants de Flers et Féerin, la piézométrie simulée est correcte.

En dehors des champs captants, pour les masses d'eau souterraines impactées par l'alimentation de la métropole lilloise, le calage s'est globalement amélioré. En particulier, au droit de la masse d'eau 1006, les résultats sont très satisfaisants. Les modifications apportées au réseau hydrographique ont été très bénéfiques pour la masse d'eau 1003. Sur la masse d'eau 1010, le calage est globalement meilleur, même si une extension de la géométrie du modèle (notamment des couches quaternaires) au-delà de la limite régionale apporterait sans doute des améliorations. Au sein de la masse d'eau 1007, le calage n'est pas encore tout à fait satisfaisant. Pour ce secteur, ainsi que sur l'Est de la masse d'eau 1018, il faudrait améliorer la prise compte la nappe de la Craie du côté belge. Sur la masse d'eau 1004, les résultats déjà corrects du modèle régional, restent quasiment inchangés même si sur certains piézomètres de ce secteur la distinction entre les couches Craie du Sénonien-Turonien supérieur (Dièves) et Craie du Cénomanien n'est pas aisée.

Les débits des rivières semblent être bien restitués, hormis au droit du Canal de la Deûle, où il est constaté un écart non négligeable ; celui-ci pourrait provenir de la non prise en compte des prélèvements de surface ou d'autres actions anthropiques non modélisées.

Trajectoires inverses

Le calcul de trajectoires inverses s'effectue à un pas de temps donné comme si l'état piézométrique correspondant était permanent. Trois calculs ont été réalisés à trois dates données correspondant à trois régimes piézométriques contrastés : basses eaux de 1997, hautes eaux de 2001, et moyennes eaux de fin décembre 2012.

Le tracé des faisceaux de trajectoires résultants permet de délimiter l'enveloppe approximative des aires d'alimentation des champs captants et de distinguer les couches géologiques concernées par ces trajectoires.

On constate qu'en période de hautes eaux, les trajectoires sont nettement plus courtes qu'en périodes de basses eaux. Par ailleurs, en période de hautes eaux, les trajectoires remontent presque systématiquement jusqu'aux couches quaternaires (limons et/ou alluvions) contrairement à celles des basses eaux qui peuvent rester uniquement dans la couche de la Craie, notamment au droit des champs captants de Féerin, Ansereuilles, Emmerin et Houplin. Les plus grands écarts de trajectoire se rapportent aux champs captants de Lille et surtout de Flers et de Féerin. En période de basses eaux, l'origine des trajectoires parvenant à ces deux derniers champs captants se situerait tout au Sud de la masse d'eau 1006.

Bilans hydrauliques du modèle

Des bilans hydrauliques ont été réalisés à l'échelle globale du modèle et pour chacune des couches hydrogéologiques.

Dans la couche des alluvions, une partie des débits provenant de la recharge déborde, mais la majorité de ces débits est acheminée par drainance descendante vers la nappe de la Craie séno-turonienne productive.

Dans la couche de Craie productive, les apports par drainance ($30 \text{ m}^3/\text{s}$) depuis les formations encaissantes sont presque aussi importants que la recharge sur les affleurements de cette formation ($28.73 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces apports se partagent ensuite entre débordement ($24 \text{ m}^3/\text{s}$), drainage par les cours d'eau ($20.5 \text{ m}^3/\text{s}$), et prélevements ($9.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les échanges nappe-rivière se font principalement au sein de la couche de Craie productive, essentiellement par drainage de la nappe par les rivières. Ces échanges sont cependant inversés (des rivières vers la nappe) dans la zone des champs captants de Lille, en particulier le long du Canal de la Deûle.

Les bilans par zones géographiques autour des champs captants permettent d'évaluer les différentes composantes des débits apportés aux nappes : drainance verticale depuis les couches sus-jacentes, infiltrations depuis les rivières (notamment au voisinage des champs captants de Lille), et recharge pluviale sur les affleurements de la Craie.

Pistes d'améliorations du modèle

Par rapport au précédent modèle régional, le modèle de la Craie affiné a principalement apporté les améliorations suivantes :

- Amélioration sensible de la structure géométrique par un nouveau modèle géologique.
- Différenciation des couches de limons et d'alluvions sur l'ensemble du modèle pour restituer (1) un régime semi-captif de la Craie sous recouvrement alluvionnaire, et (2) une recharge de la nappe de la Craie par l'intermédiaire des formations alluvionnaires et limoneuses.
- Maillage affiné dans une large zone centrale, à une maille de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ permettant une résolution suffisante pour différencier la plupart des forages dans les principaux champs captants.
- Pas de temps mensuel pour les prélevements à partir de l'année 2000 plutôt que pas de temps annuel afin de tenir compte des évolutions mensuelles en plus des évolutions interannuelles.
- Actualisation et amélioration des données de prélevement, en particulier dans la zone affinée.
- Actualisation et amélioration des chroniques piézométriques, en particulier dans la zone affinée.
- Modification du réseau hydrographique au droit des champs captants du Sud de Lille pour mieux rendre compte des échanges entre nappes et cours d'eau secondaires, ainsi que des échanges avec les canaux de navigation.
- Intégration des résultats du projet ScaldWIN pour les caractéristiques des Dièves et du Carbonifère. Le couplage permet de modéliser simultanément les évolutions des charges piézométriques dans les deux aquifères (Craie et Calcaire carbonifère) et les échanges par drainance entre la Craie du Séno-Turonien et les Calcaires du Carbonifère.

Recommandations

Le calage du modèle pourrait être amélioré au Nord de Lille et sur les masses d'eau 1018 et 1007 essentiellement grâce à :

- une meilleure connaissance des prélevements assujettis à une référence piézométrique,
- l'acquisition de données piézométriques dans la masse d'eau des Sables du Landénien d'Orchies,

- une meilleure géométrie de la Craie en Belgique : Craie du Valenciennois et Craie de la masse d'eau des Sables du Landénien d'Orchies,
- un travail sur la géométrie des couches alluvions, limons et craie au Sud du modèle, au-delà de la limite administrative.

La simulation des débits de rivière dans les secteurs les plus sollicités serait plus satisfaisante en :

- renforçant le suivi hydrométrique des rivières,
- prenant en compte les perturbations anthropiques telles que rejets des STEP et prélèvements dans les rivières.

Par ailleurs, la couche du Carbonifère pourrait aussi être intégrée dans sa globalité (prise en compte totale du Carbonifère côté belge), ce qui faciliterait l'actualisation ultérieure du modèle.

En outre, des investigations complémentaires pourraient être menées au Nord de la zone affinée car il existe peu de données sur la nappe de la Craie sur ce secteur, de même qu'au Sud-Ouest du Carbonifère où il y a peu de piézomètres.

Enfin, une amélioration des connaissances sur la couche des Sables d'Ostricourt permettrait d'améliorer le calage de la piézométrie de la Craie dans certains secteurs, notamment dans la partie captive de l'aquifère crayeux pour mieux évaluer leur apport à l'aquifère crayeux.

12 Bibliographie

Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel P., Petit V., Pinault J.L., Pointet T. (2002)
Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport BRGM/RP-51827-FR

Bourgine B. (2007) Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer. Version 3. BRGM/RP-53111-FR, 197 p., 147 ill.

Bourgine B. et al. (2008) Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment. The Paris case, Proceeding of the Eighth international Geostatistics congress, J.M. Ortiz and X. Emery Editors, Vol2, pp 951-960.

BRGM – Cartes géologiques de Lille (n°14), de Carvin (n°20) et de Douai (n°27) et leurs notices. Éditions BRGM, Orléans.

Buscarlet E. et Pickaert L. (2011) Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais - Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-60217-FR

Castany et Margat J. (1977) Dictionnaire français d'hydrogéologie. Éditions du BRGM.(1987)

Caulier P. (1974) Étude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Université des Sciences et Technologies de Lille 1.

Cardin C., Dufrenoy R., Joublin F., Caron G., Despierres A., Maquet J., Pascoli T., Polez K., Gryczka M. et Pira K. (2011) Nord-Pas-de-Calais, Nappe de la Craie – Campagnes et cartes piézométriques «Hautes et basses eaux» 2009. Rapport BRGM/RP-58542-FR

Coulon H. (2007) Lambersart (59) Inondations par remontée de nappe. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Lille. CeTe Nord Picardie, dossier n°07.670.42902

Croiset N., Wuilleumier A., Bessiere H., Gresselin F. et Seguin J.J. (2013) Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR

Dufrenoy R., Petit V. avec la collaboration de Mardhel V. et Xu D. (2010) – Référentiel Hydrogéologique Français - BDLISA. Bassin Artois-Picardie. Années 3 et 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de niveaux 1, 2 et 3 en régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie. Rapport d'étape. BRGM/RP-57520-FR.

Gosselet M. J. (1905) Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et les sondages du nord de la France. Fascicule II, région de Lille. 98 p.

Lacquement F., Barchi P. et Quesnel F. (2004) Carte géologique harmonisée de la région Nord-Pas-de-Calais. BRGM/RP-53484-FR, 188 p., 3 fig., 18 tabl., 1 ann., 2 pl. hors-texte.

Lepretre J.-P. et Blanchin R. (1999) Numérisation des courbes isovaleurs des limites stratigraphiques et hydrogéologiques de la craie dans le bassin Artois-Picardie. Rapport BRGM-R-40699, 83 p., 16 annexes.

MEDDE, GIS Sol. 2014. Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 50 pages.

Minguely B. (2007) Caractérisation géométrique 3-D de la couverture sédimentaire Méso-Cénozoïque et du substratum varisque dans le nord de la France : Apports des données de sondages et des données géophysiques. 230 p., 90 fig., 1 annexe.

Picot J. et Bourgine B. (2010) Modélisation géologique de la craie séno-turonienne en région Nord-Pas de Calais. Rapport final. BRGM/RP-58910-FR, 75 p., 13 fig., 2 tabl., 2 annexes.

Picot J. et Dufrenoy R. (2012) Modélisation géologique dans la région Lilloise et du Tournaisis du toit de l'aquifère du Calcaire Carbonifère et des ensembles géologiques sus-jacents. Rapport BRGM/RP-61113-FR

Thiéry D. (1990) Software MARTHE version 4.3. Rapport BRGM/RR-32548-FR.

Thiéry D. (2003) Logiciel Gardénia version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR.

Thiéry D. (2013) Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1 – Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR

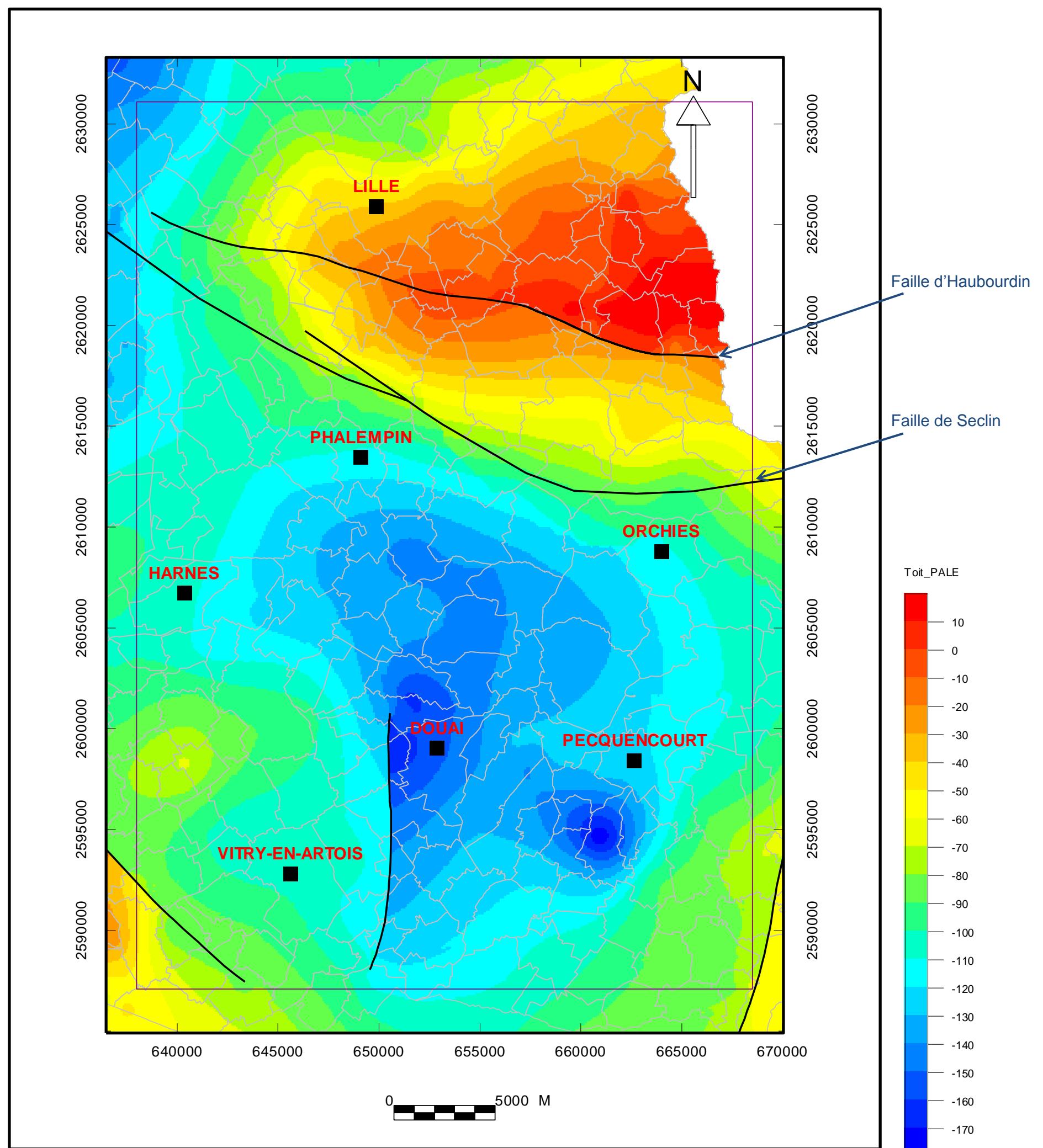
Thiéry D. et Golaz C. (2002) Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the Marthe model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP-51988-FR

Youssouf, H. (1973) Hydrologie karstique du Calcaire carbonifère de la Belgique et du Nord de la France: synthèse des données acquises en 1972. Thèse de l'université de Lille, 120 pp.

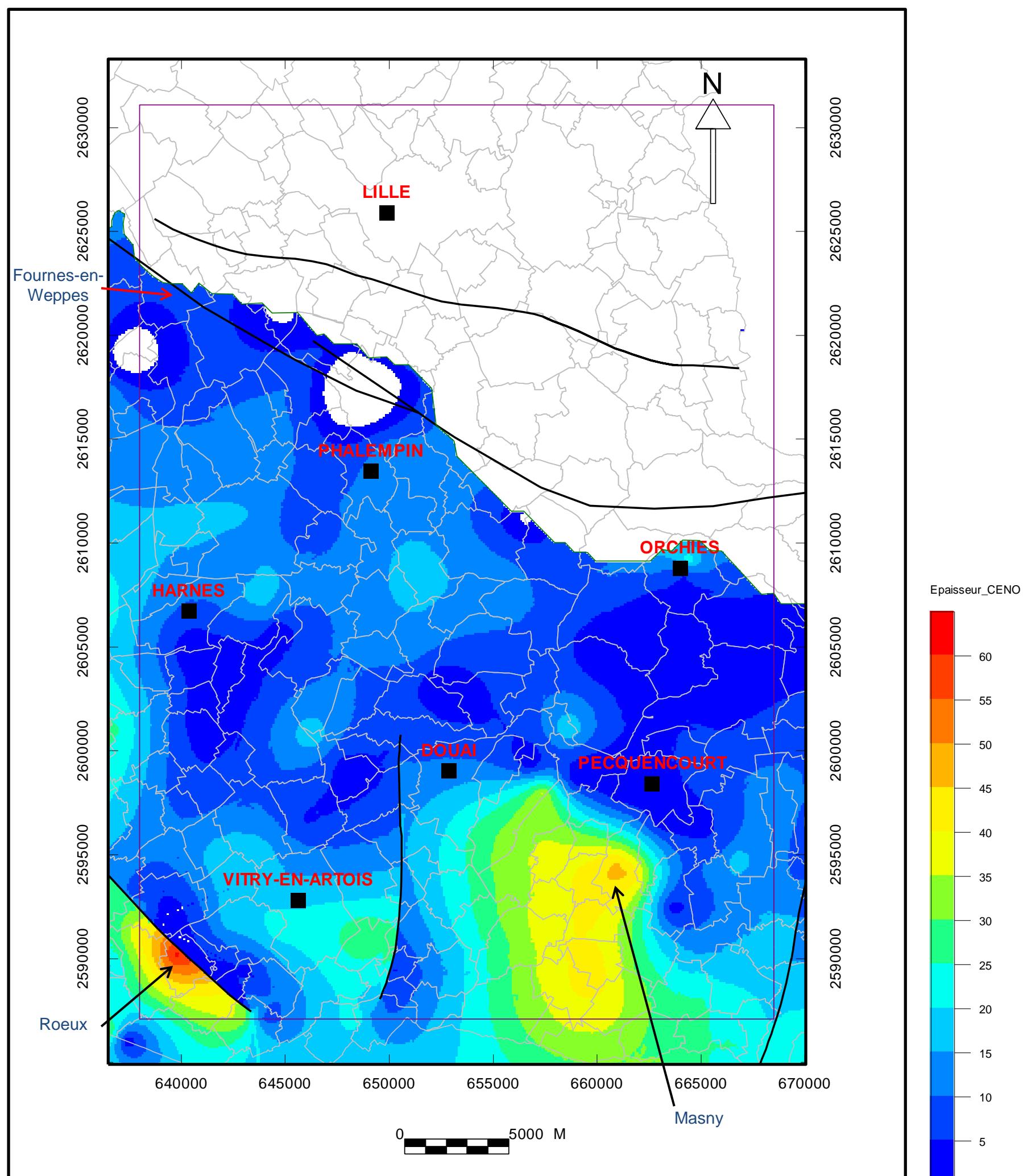
Annexe 1

Cartes des toits et des épaisseurs des formations géologiques modélisées dans le périmètre des champs captants

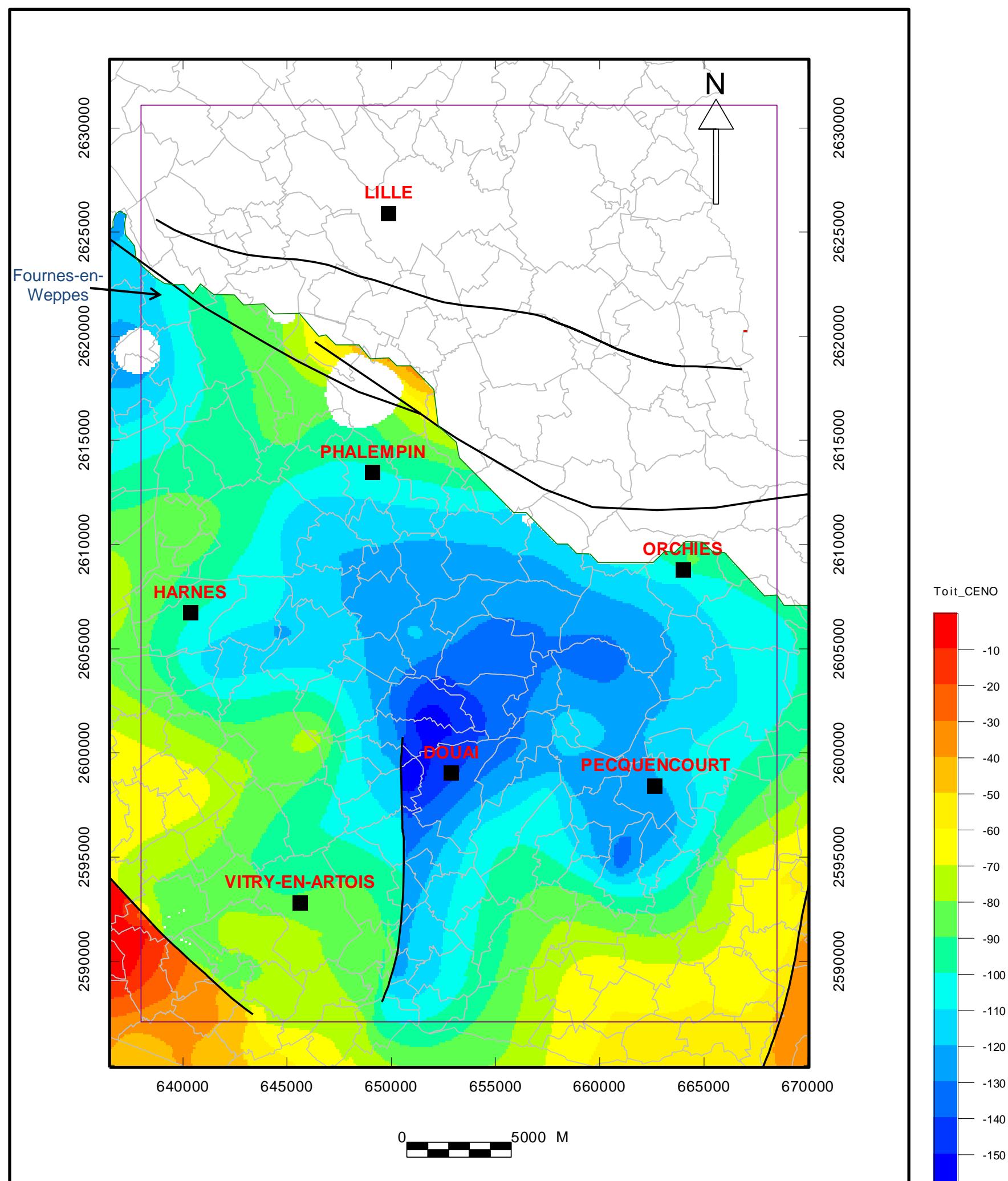
TOIT DU SOCLE ANTÉ-CRÉTACÉ SUPÉRIEUR



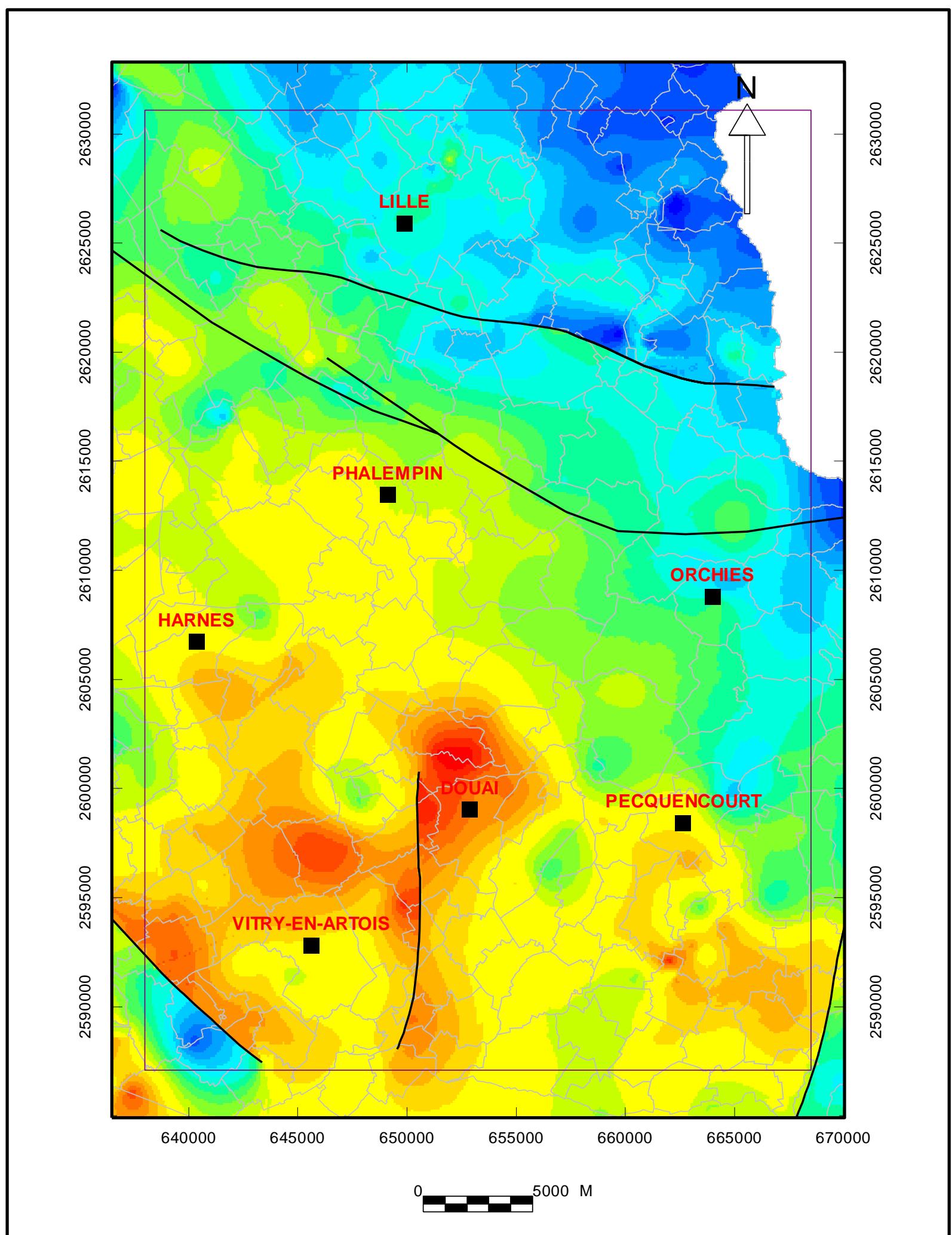
ÉPAISSEUR DES MARNES ET TOURTIA, CÉNOMANIEN



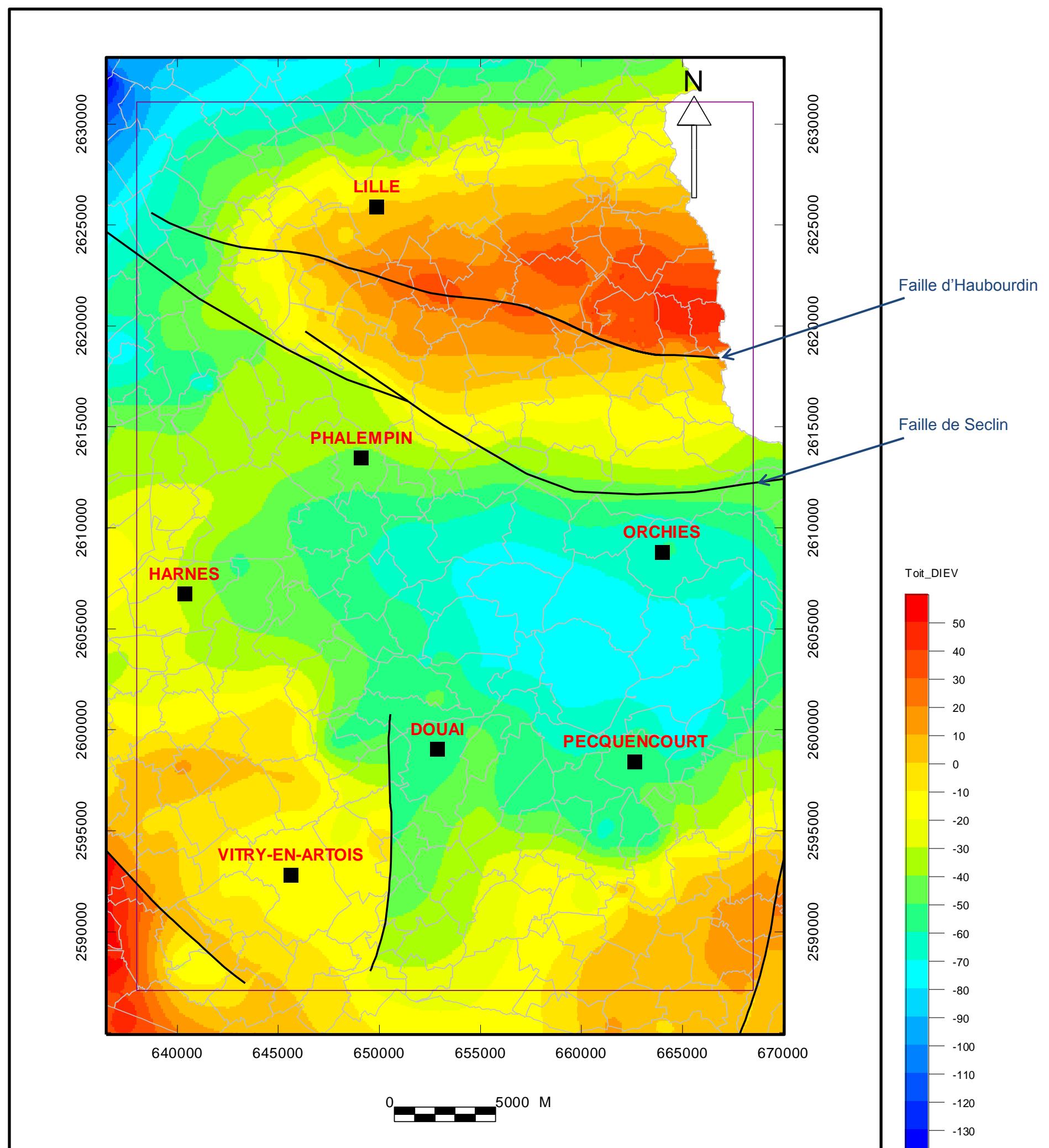
TOIT DES MARNES ET TOURTIA, CÉNOMANIEN



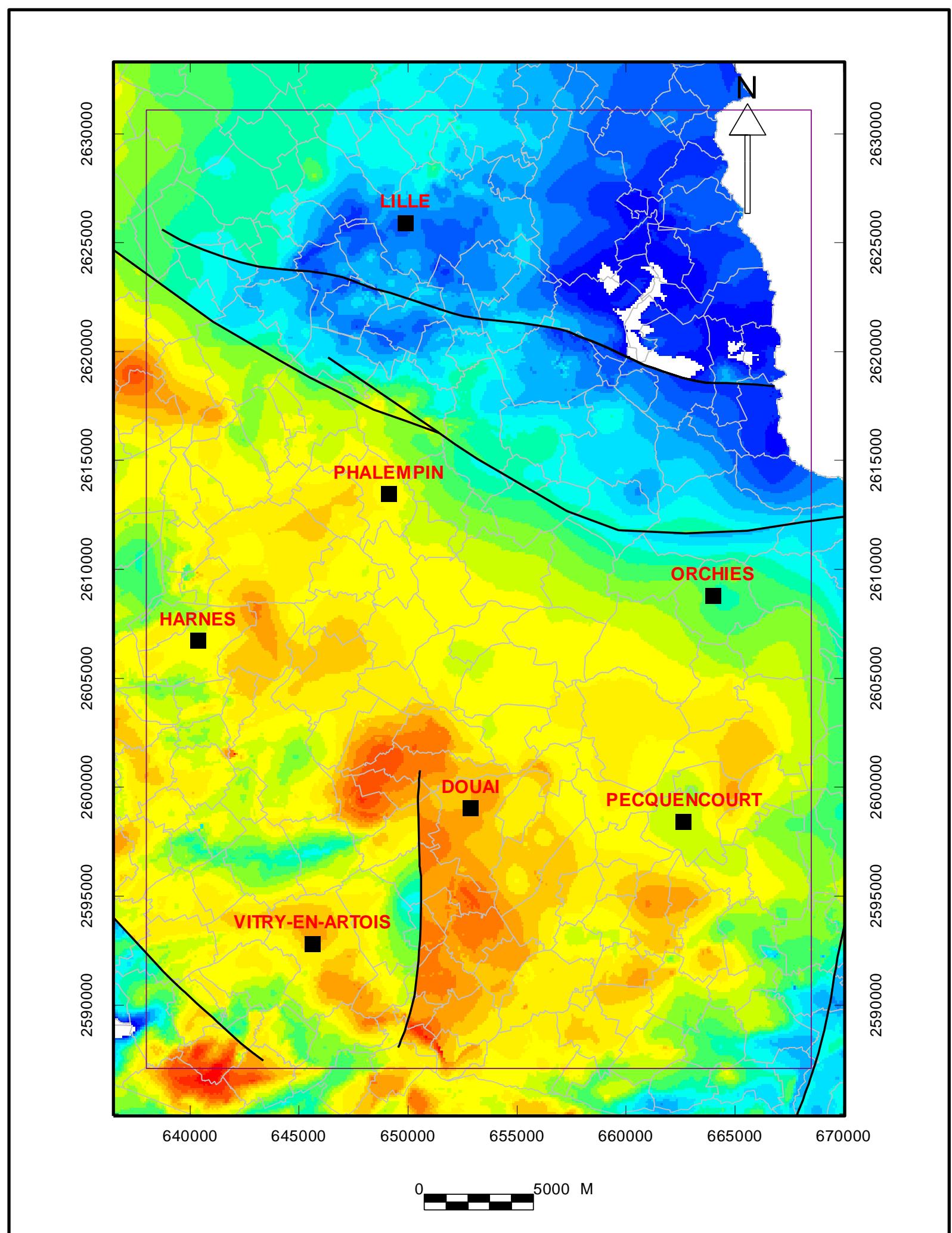
ÉPAISSEUR DES DIÈVES BLEUES ET VERTES, TURONIEN INFÉRIEUR ET MOYEN



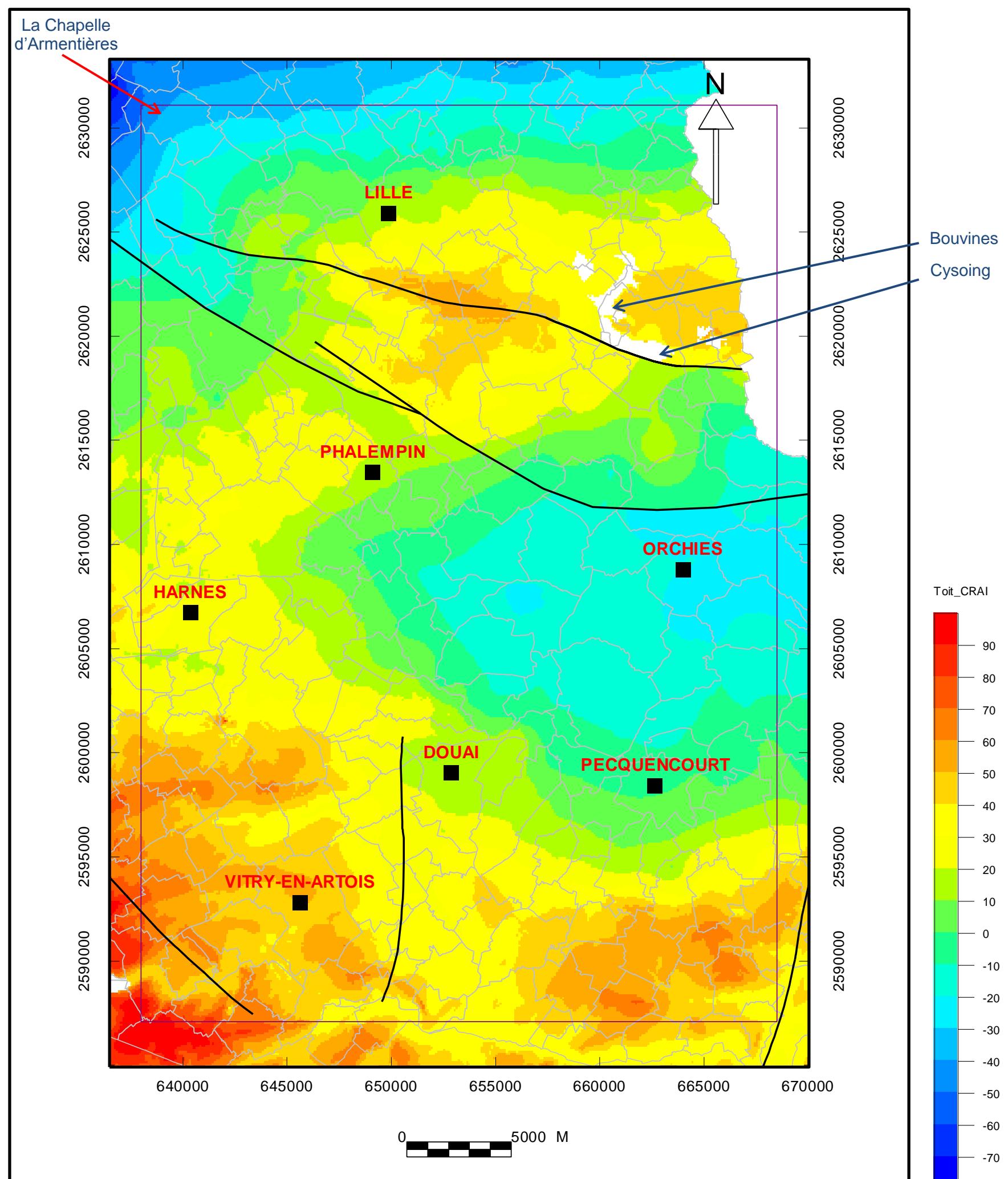
TOIT DES DIÈVES BLEUES ET VERTES, TURONIEN INFÉRIEUR ET MOYEN



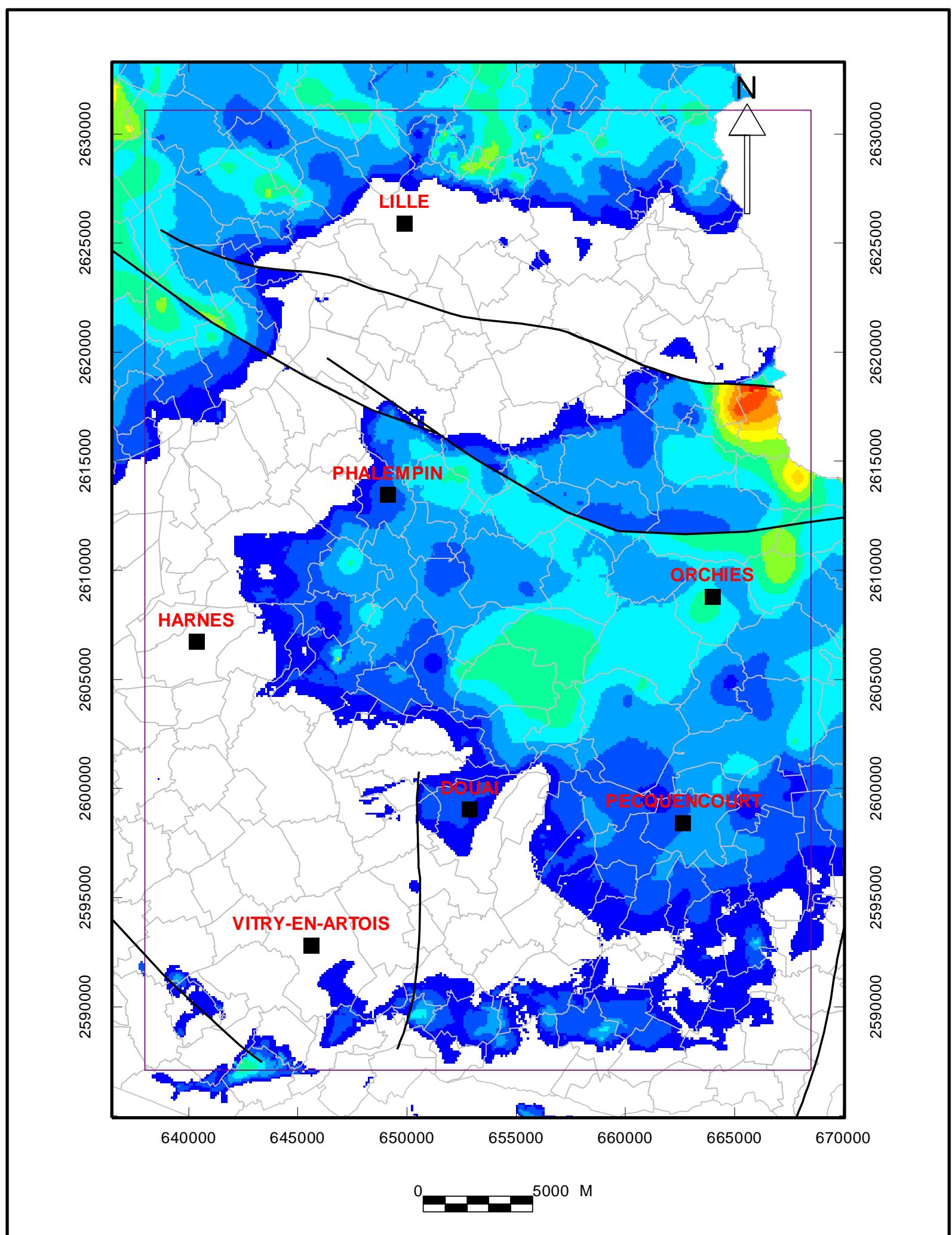
ÉPAISSEUR DES CRAIES GRISES ET BLANCHES À SILEX, TURONIEN SUPÉRIEUR À SÉNONIEN



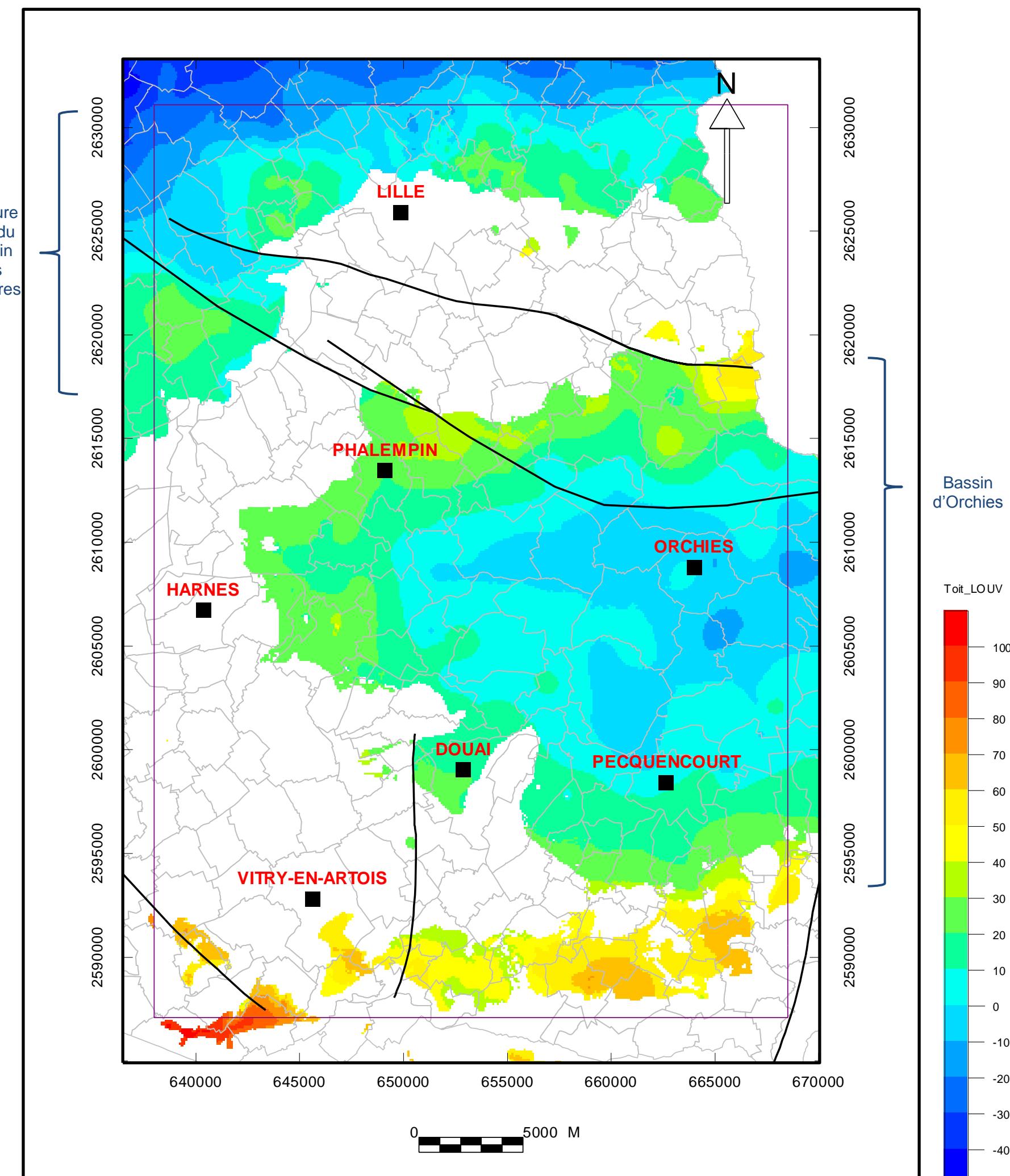
TOIT DES CRAIES GRISES ET BLANCHES À SILEX, TURONIEN SUPÉRIEUR À SÉNONIEN



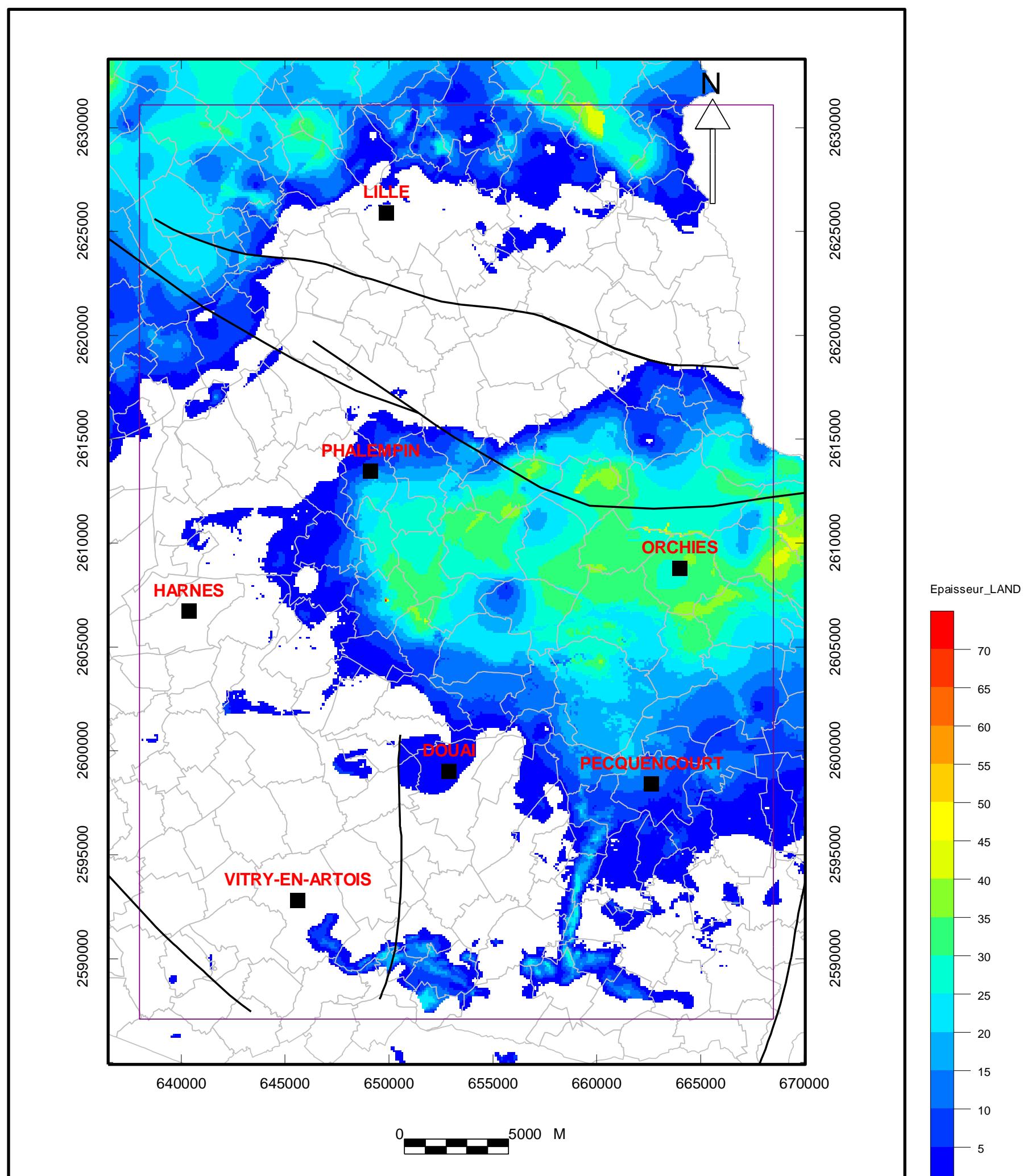
ÉPAISSEUR DES ARGILES DE LOUVIL, THANÉTIEN INFÉRIEUR



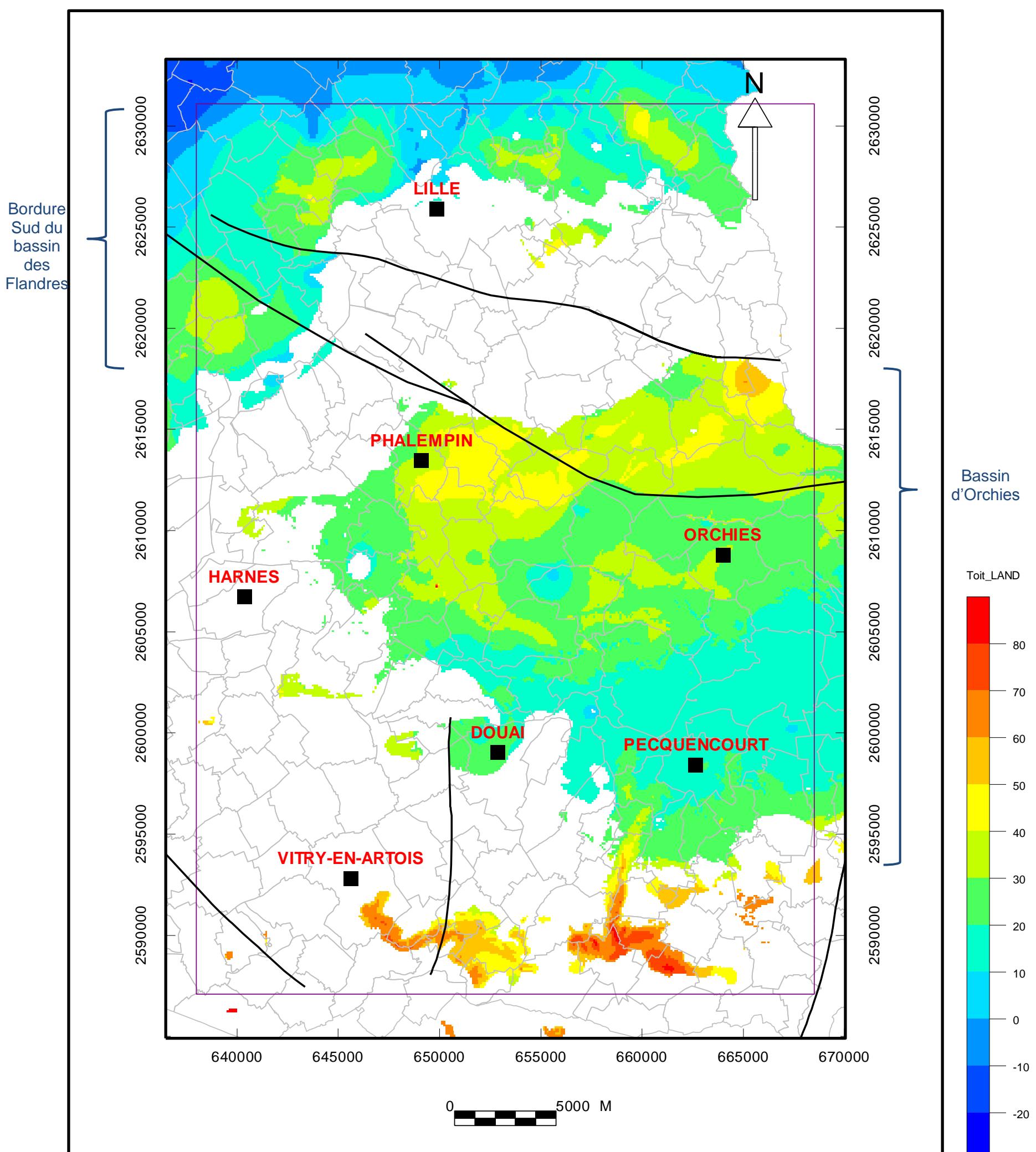
TOIT DES ARGILES DE LOUVIL, THANÉTIEN INFÉRIEUR



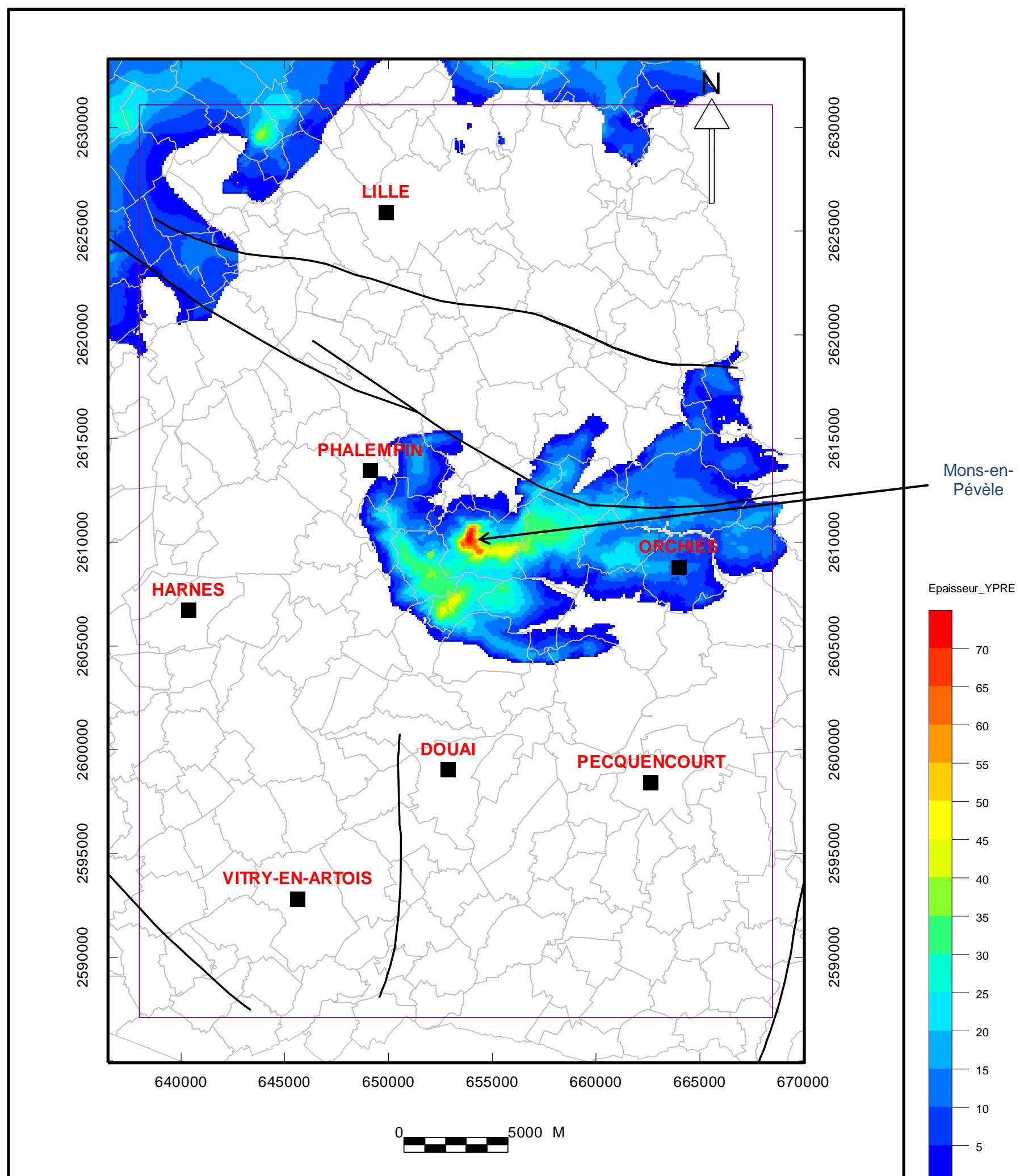
ÉPAISSEUR DES SABLES D'OSTRICOURT, THANÉTIEN SUPÉRIEUR



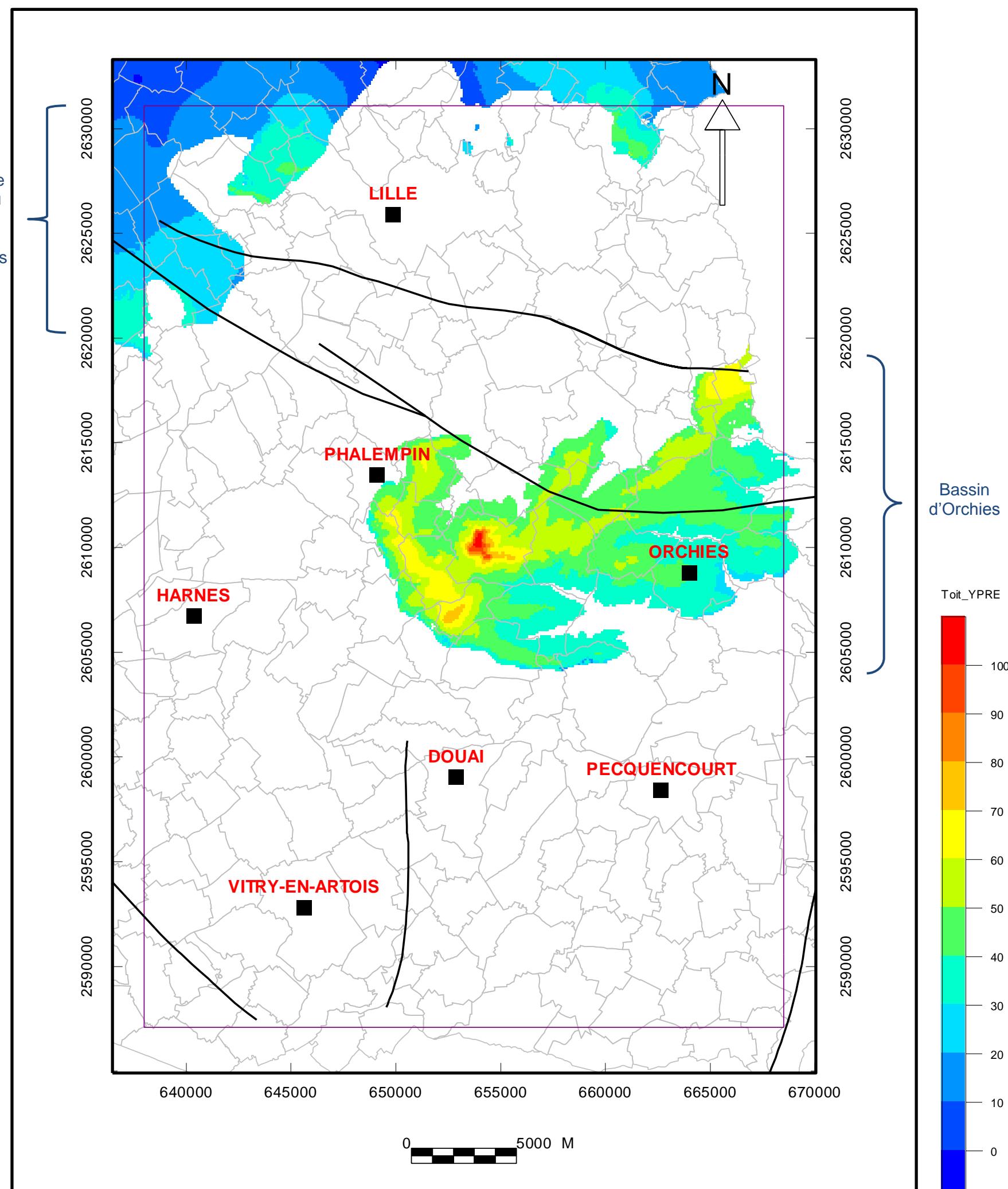
TOIT DES SABLES D'OSTRICOURT, THANÉTIEN SUPÉRIEUR



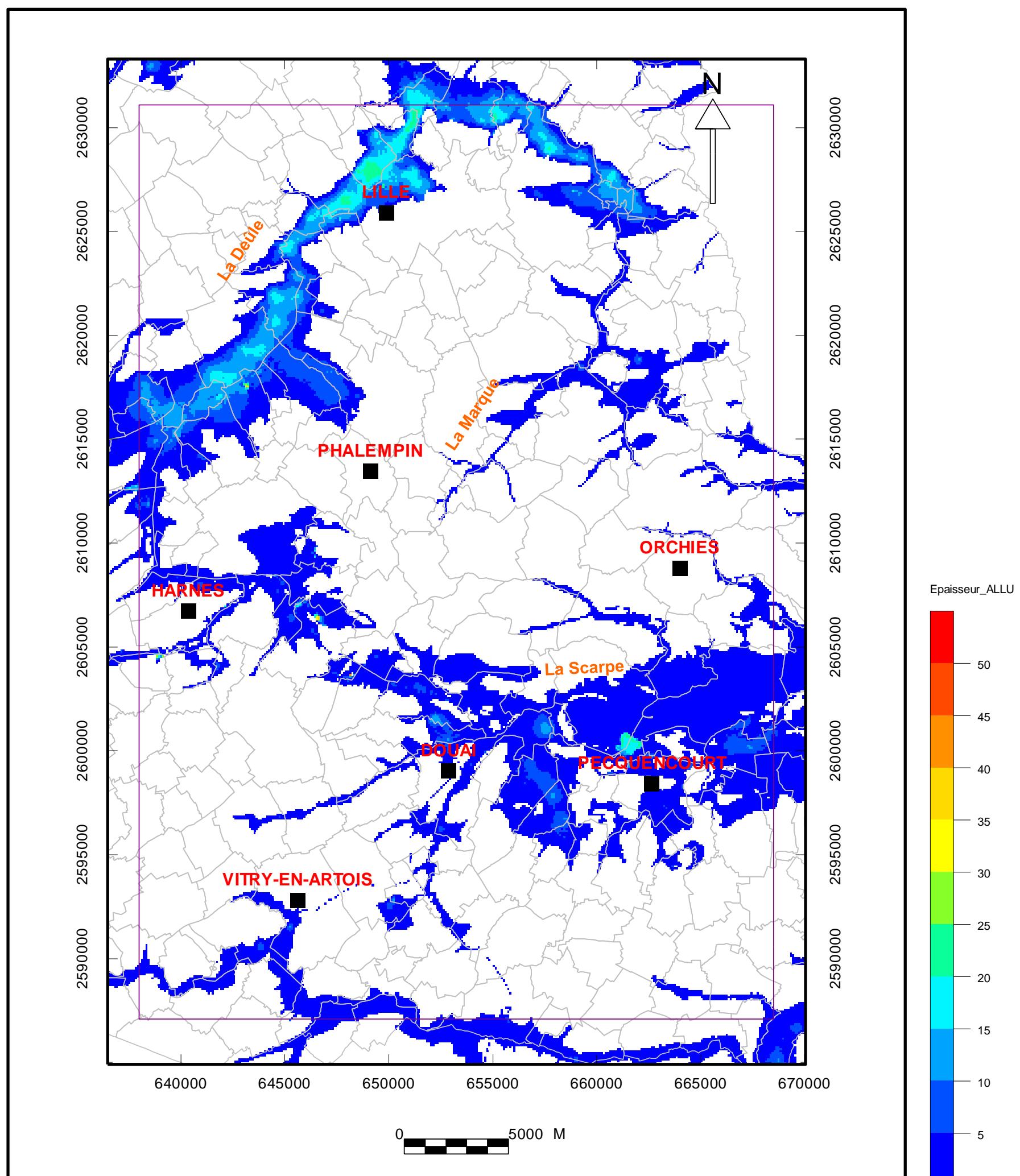
ÉPAISSEUR DES ARGILES DES FLANDRES, YPRÉSIEN



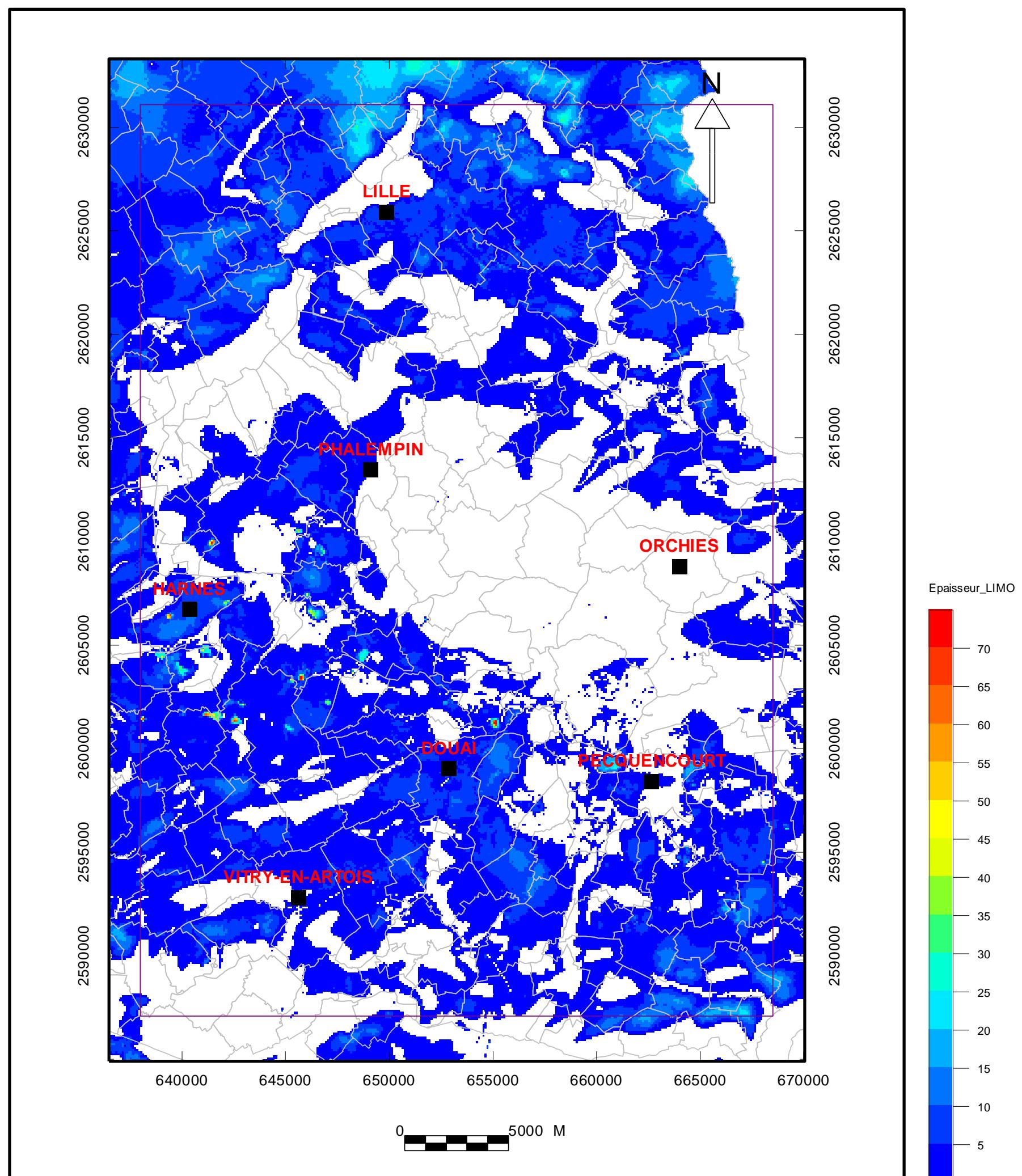
TOIT DES ARGILES DES FLANDRES, YPRÉSIEN



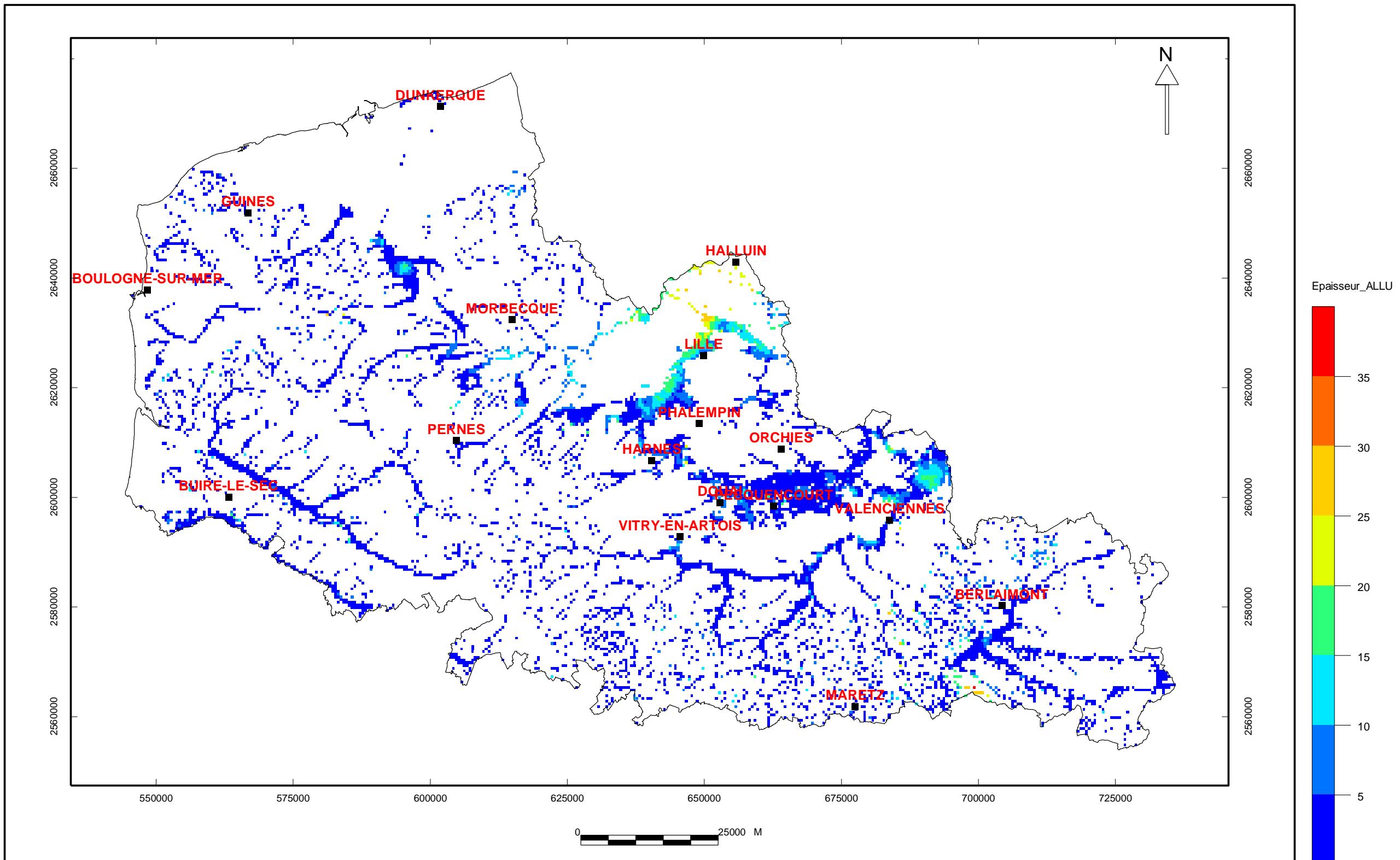
ÉPAISSEUR DES ALLUVIONS QUATERNAIERS



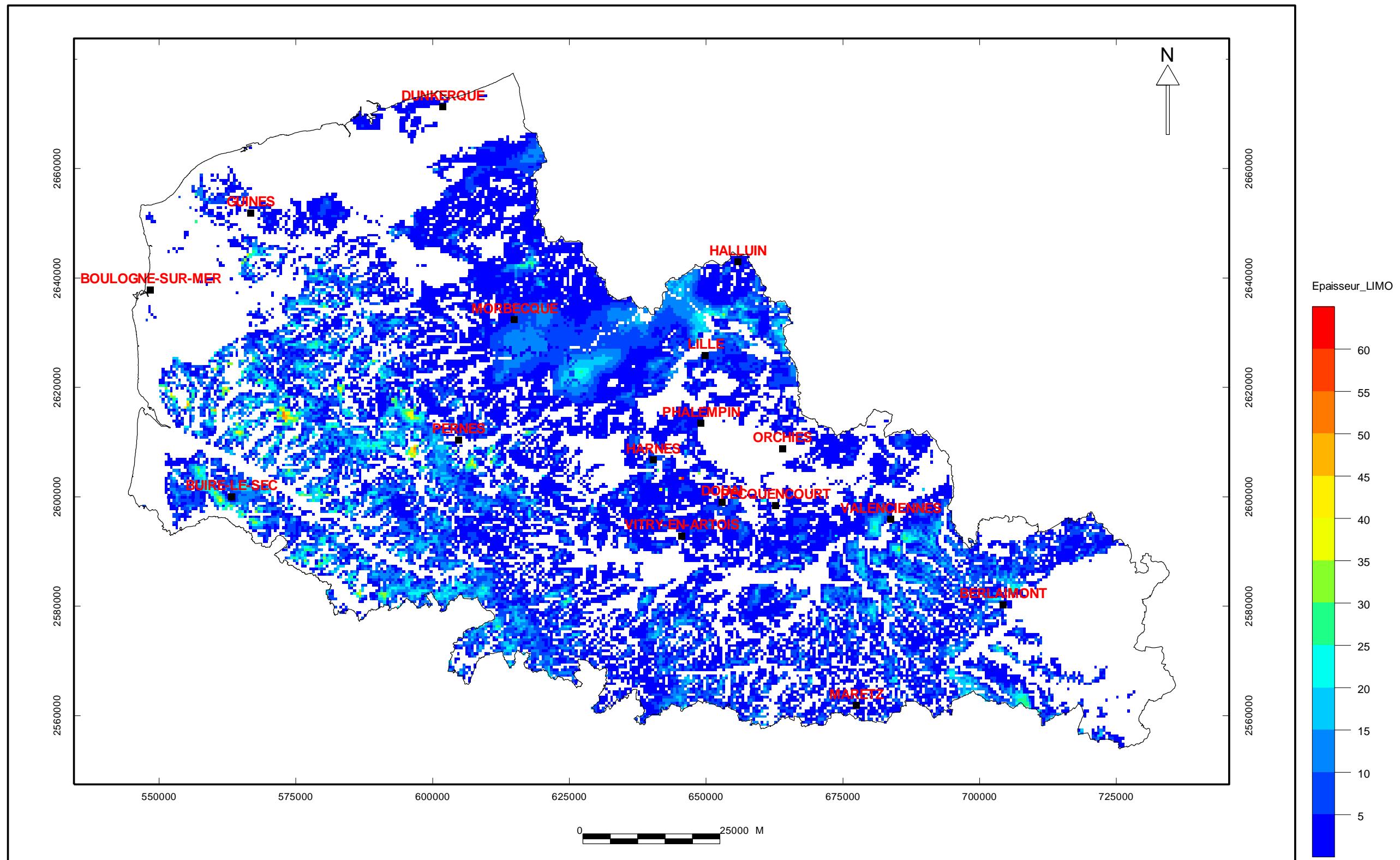
ÉPAISSEUR DES LIMONS QUATERNAIRES DANS LE PÉRIMÈTRE DES CHAMPS CAPTANTS



ÉPAISSEUR DES ALLUVIONS QUATERNAIERS RECALCULÉE SUR LA RÉGION

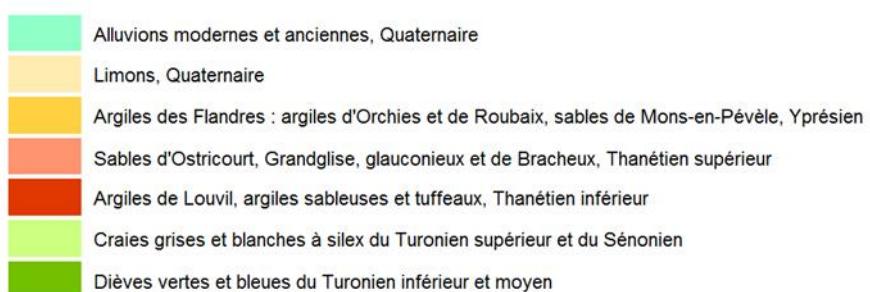
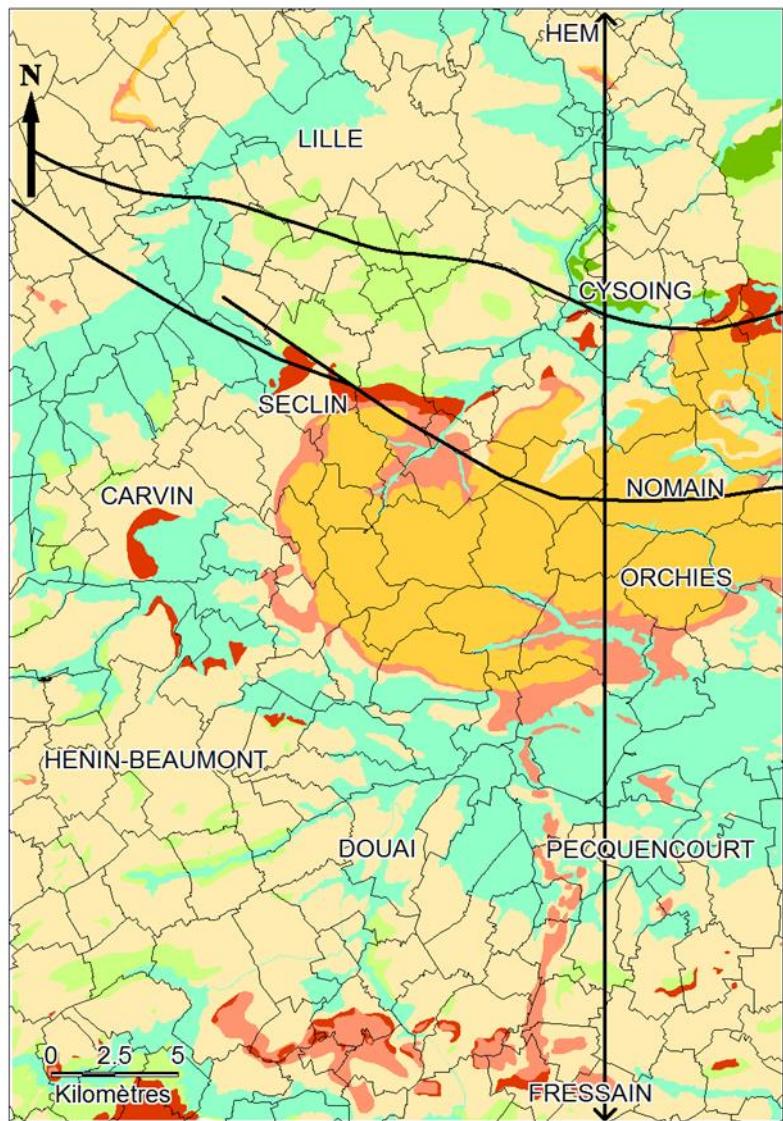


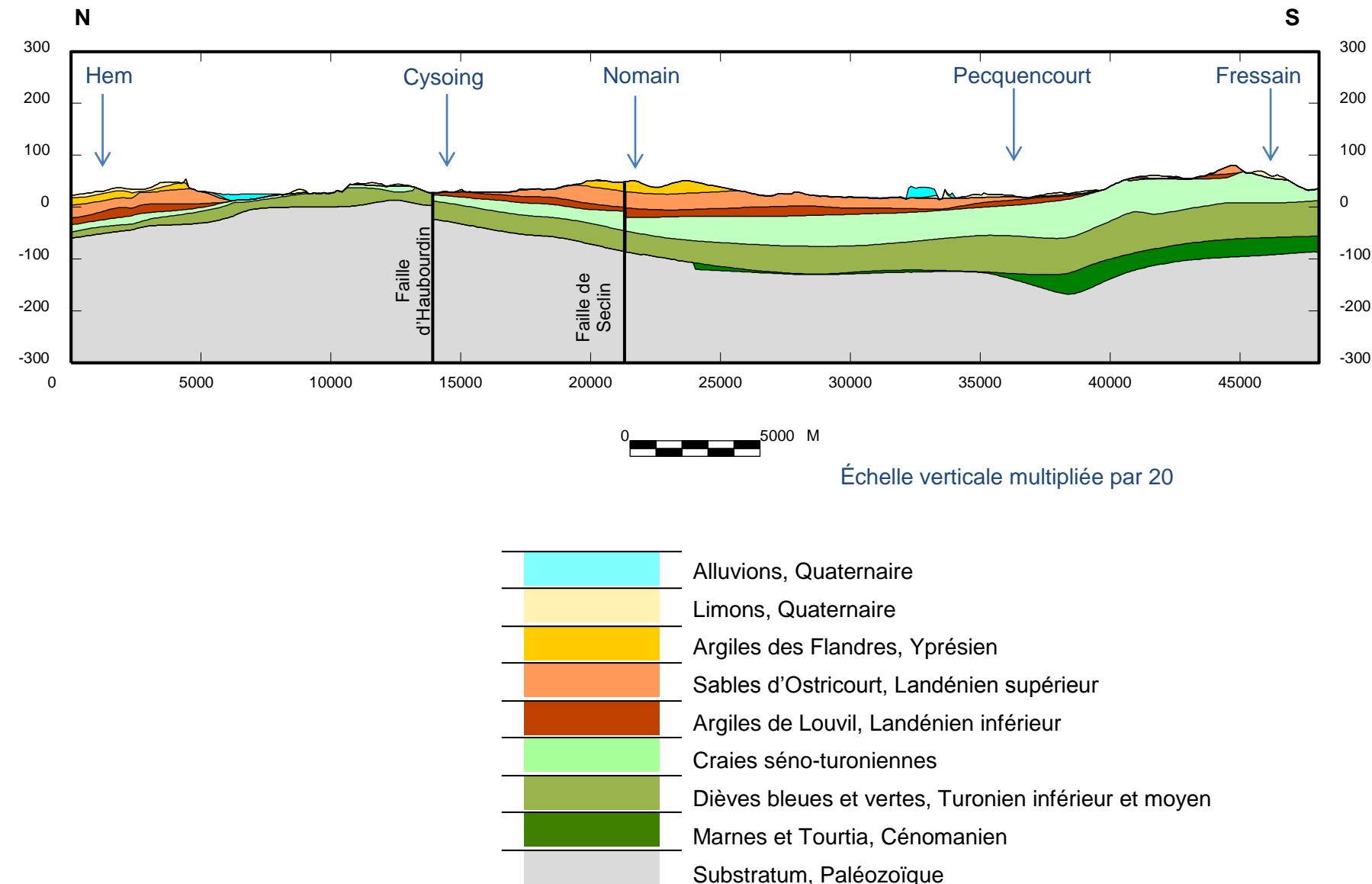
ÉPAISSEUR DES LIMONS QUATERNAIERS RECALCULÉE SUR LA RÉGION



Annexe 2

Coupe transversale dans le modèle géologique entre Hem et Fressain

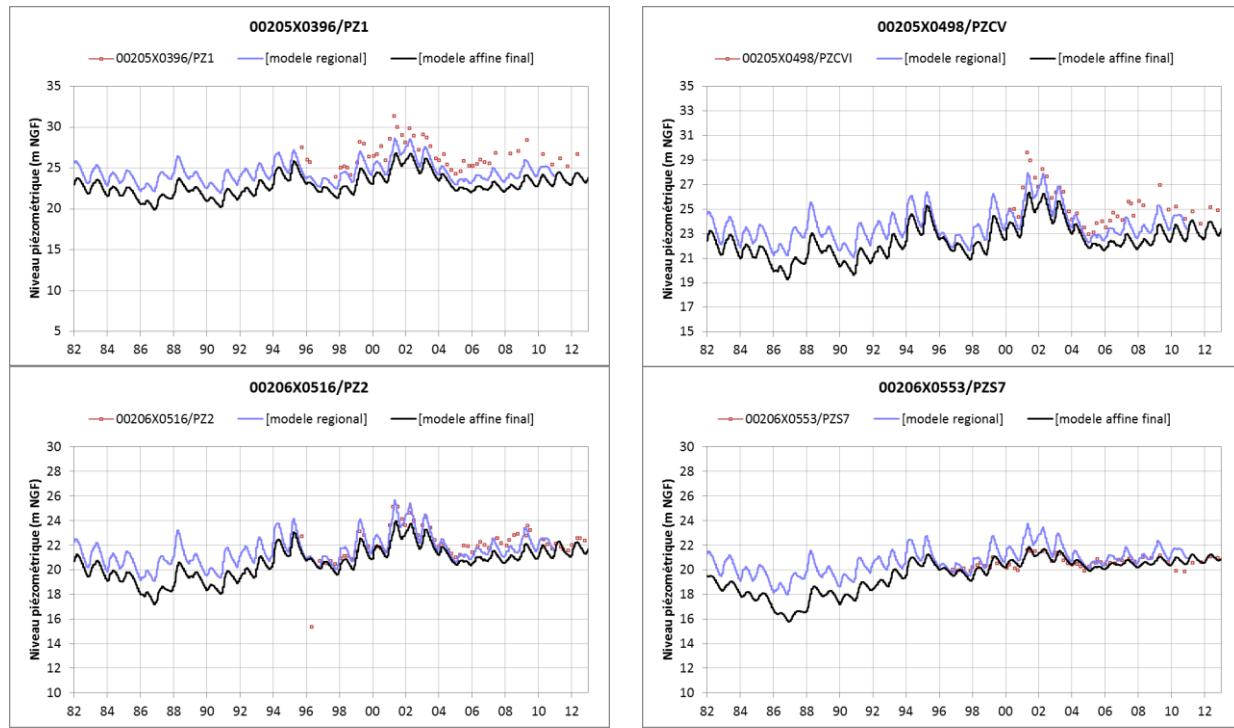




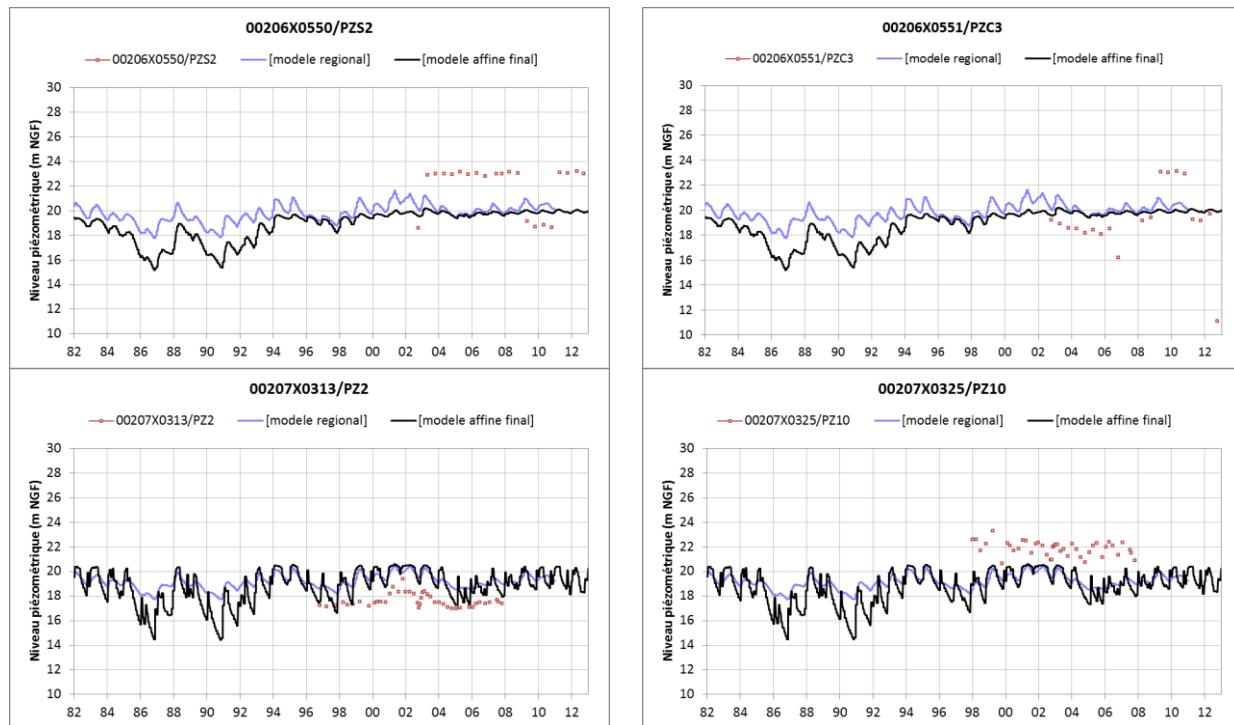
Annexe 3

Résultats de calage complémentaires

Complément ME 1003



Complément ME 1006

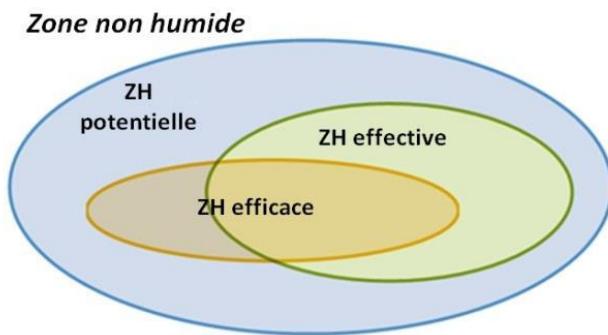


Annexe 4

Cartographie des zones potentiellement humides

Zones humides modélisées

Dans cette étude et en considérant la terminologie du Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE), les zones modélisées correspondent aux milieux potentiellement humides. Un milieu humide est une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été (par exemple d'après la carte de Cassini ou la carte d'état-major (1820-1866) en couleurs) en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre. Cette définition est assez proche de celle de « zone humide potentielle » de la typologie PEE (Potentielle, Effective, Efficace) développée par la recherche (Mérot et al., 2000 ; 2006). Cette typologie permet de hiérarchiser les zones humides selon 3 niveaux : zone humide potentielle, zone humide effective et zone humide efficace (par rapport à une fonction particulière).



Le premier niveau de la typologie définit des zones humides potentielles (ou milieux potentiellement humides), ce sont les zones qui selon les critères géomorphologiques et climatiques devraient présenter les caractéristiques d'une zone humide; elles représentent en quelque sorte l'enveloppe extérieure maximale d'extension des zones humides. Les zones humides effectives qui se trouvent à l'intérieur du premier niveau, présentent des caractéristiques identifiables de milieu humide (correspondant aux critères définis par la Loi sur l'eau de 1992 notamment par la présence de sols hydromorphes et de végétations hygrophiles), ces caractères ont pu disparaître dans les milieux potentiellement humides du fait notamment d'aménagements (drainage, désalinisation, endiguement...). Enfin, le troisième niveau définit les zones humides efficaces. Cette notion d'efficacité est propre à une fonction particulière (fonction hydrologique, épuratrice, biodiversité, paysagère...). La zone humide efficace peut bien sûr être définie différemment selon la fonction considérée.

L'intérêt de l'approche PEE est de permettre la réalisation d'un inventaire spatialisé des zones humides :

- En délimitant des milieux potentiellement humides sur la base de méthodes déterministes par modélisation (pré-délimitation) ;
- En délimitant des zones humides effectives par des inventaires de terrain reportés sous SIG.

Cadre d'utilisation de la carte produite

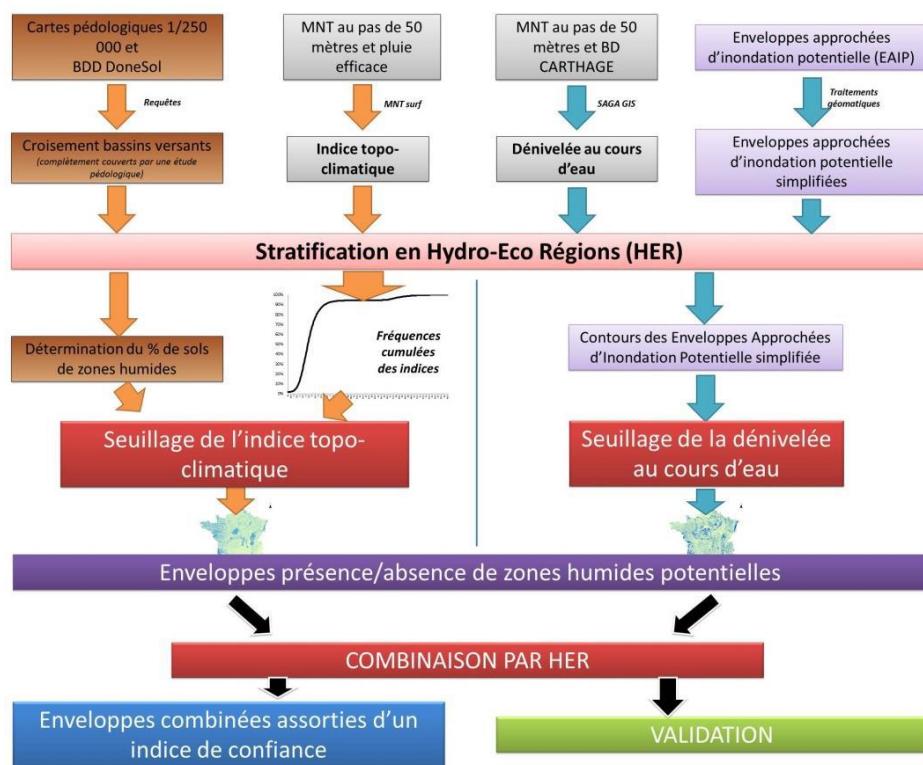
L'étude est réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 25 mètres dégradé au pas de 50 mètres pour permettre la réalisation de calculs sur la France entière. L'ensemble des traitements informatiques s'appuient sur ce MNT au pas de 50 mètres qui constitue la résolution de la carte finale des milieux potentiellement humides produites. Cette

résolution est compatible avec une échelle d'utilisation au 1/100 000, mais n'augure pas de la justesse de l'information produite.

L'approche développée dans cette étude présente néanmoins des limites quant à la prédition des milieux potentiellement humides. L'utilisation conjointe d'un indice topographique et d'enveloppes approchées d'inondation potentielle permet d'optimiser l'extension spatiale des milieux potentiellement humides, chacun des outils étant pertinent pour identifier spécifiquement les milieux humides de certains contextes géomorphologiques (tableau 1). Les zones karstiques, les plateaux et les zones humides de pente restent cependant difficiles à caractériser avec les outils développés.

Méthodologie générale

La méthodologie générale de l'étude (figure 2) s'appuie sur l'utilisation d'indices dérivés du MNT au pas de 50 mètres qui estiment le niveau de saturation en eau des sols. Ces dérivées nécessitent d'être seuillées (grâce à des données pédologiques et hydrogéologiques) et combinées afin de produire les enveloppes des milieux potentiellement humides.





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

Direction régionale Nord Pas de Calais
Synergie park
6 ter rue Pierre et Marie Curie
59260 – Lezennes – France
Tél. : 03.20.19.15.40