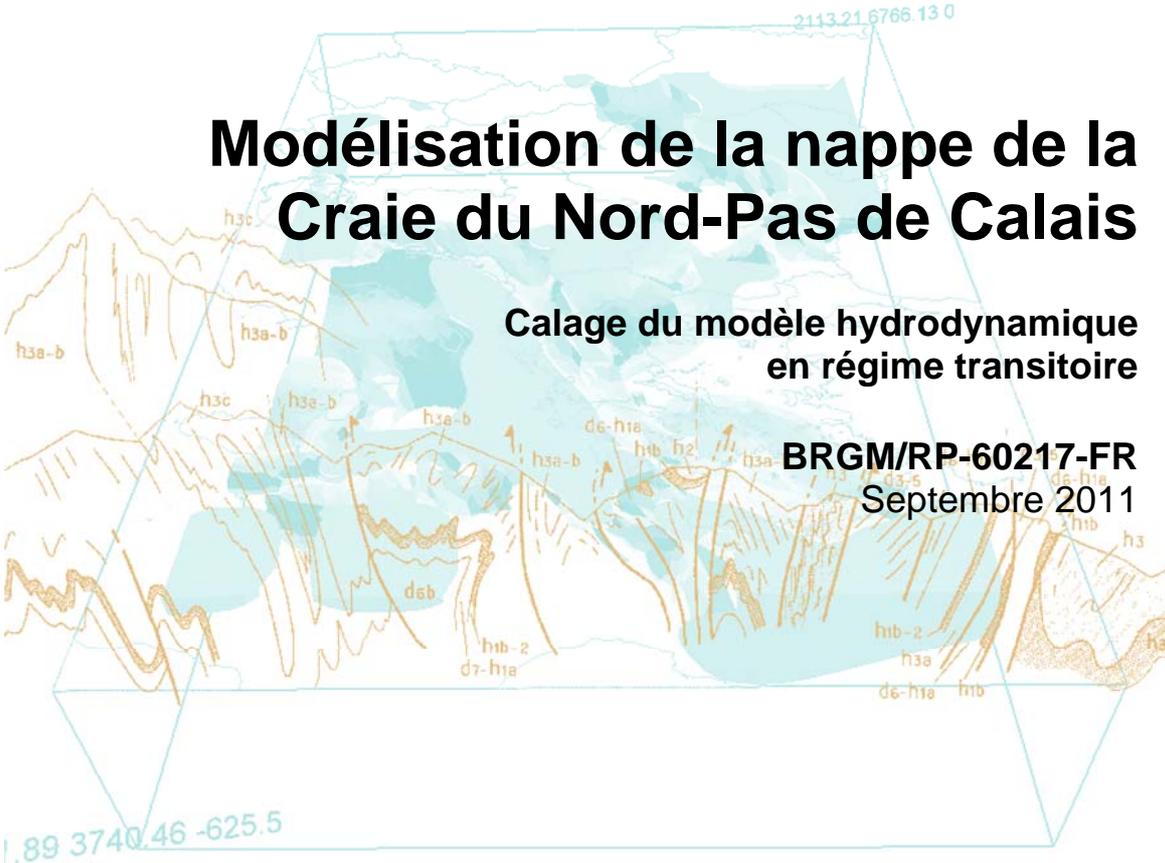




Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas de Calais

Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire

BRGM/RP-60217-FR
Septembre 2011



Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas de Calais

Calage du modèle hydrodynamique
en régime transitoire

Rapport d'avancement

BRGM/RP-60217-FR

Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011SPEAUK104

E. BUSCARLET, L. PICKAERT

Avec la collaboration de P. STOLLSTEINER, T. KLINKA, A. WUILLEUMIER et F. ASFIRANE

Vérificateur :

Nom : Y. Barthélemy

Date : 13/07/2011

Signature :



Approbateur :

Nom :

Date :

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Mots clés : Modélisation, régime transitoire, nappe de la craie

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

E. Buscarlet, L. Pickaert avec la collaboration de P. Stollsteiner, T. Klinka, A. Wuilleumier et F. Asfirane – Modélisation de la nappe de la craie – Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire – Rapport d’avancement – BRGM/RP-60217-FR 46 p., 25 fig., 4 tab., 2 annexes.

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

Synthèse

La Communauté Urbaine de Lille, la Communauté d'Agglomération de Lens-Liévin (CALL), la Communauté d'Agglomération d'Hénin-Carvin (CAHC), l'État, Noréade (régie SIDEN SIAN) et le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en eau potable de la région de Douai (SIADO) ont souhaité disposer d'outils d'aide à la décision afin de mettre en place une stratégie de gestion de la ressource en eau au niveau de six masses d'eau sollicitées, en l'occurrence la Craie de la vallée de la Deûle (1003), de l'Artois et la vallée de la Lys (1004), de la Scarpe et la Sensée (1006), du Valenciennois (1007), du Cambrésis (1010) et de la bordure du Hainaut (1017).

Certaines de ces masses d'eau se caractérisent en effet par l'importance des prélèvements réalisés, notamment pour l'alimentation en eau potable, comme par exemple la Craie de la vallée de la Deûle et celle des vallées de la Scarpe et de la Sensée, chacune d'entre elles fournissant plus 50 millions de m³/an. Ces chiffres soulignent le caractère stratégique de ces masses d'eau qui répondent à elles seules à 48 % de la demande en eau potable du Nord - Pas de Calais (225,6 millions de m³ pompés chaque année dans ces deux départements pour cet usage).

A partir du modelé géologique construit pour restituer la géométrie des différentes couches aquifères, les écoulements souterrains ont pu être reconstitués à l'aide d'un modèle mathématique, opération qui ne fait rien d'autre que de mettre en œuvre, sous une forme synthétique et cohérente, les mécanismes qui régissent le devenir de l'eau.

La modélisation entreprise s'inscrit dans le cadre d'une problématique régionale, valable à cette échelle ou du moins à celle de la masse d'eau (dimension des mailles : 500 m de coté).

Le calage hydrodynamique a consisté à moduler la distribution spatiale des principaux paramètres jusqu'à ce que le modèle reproduise au mieux une piézométrie de référence (moyennes eaux 1997) s'avérant particulièrement complète au niveau des mesures réalisées. Cette première étape a servi de base au calage en régime transitoire (pas de temps mensuel) de l'outil réalisé.

Le présent rapport rend compte des principaux résultats obtenus, lesquels s'appuient sur l'existence d'une centaine de chroniques piézométriques et de différentes cartes piézométriques levées de par le passé.

A l'échelle de la région, les échanges calculés entre la nappe de la Craie et les rivières soulignent clairement l'inter dépendance de la nappe de la Craie avec les cours d'eau existants. La nappe d'eau joue un rôle essentiel dans la régulation des écoulements des rivières. En effet, du fait de la perméabilité de l'aquifère et des limons qui la recouvrent, il n'y a pratiquement pas de ruissellement, la quasi-totalité de l'eau de pluie non reprise par l'évaporation s'infiltrant directement dans le sous-sol. Lors d'années excédentaires, comme par exemple en 1994 et 1995 et plus encore en 2001, des débordements peuvent se produire dans les principaux cours d'eau de la région.

Malgré la complexité du domaine modélisé et les caractéristiques spécifiques de l'aquifère crayeux, le calage du modèle s'est attaché à reproduire les évolutions temporelles enregistrées sur les points de contrôle existants, soulignant ainsi la sensibilité de certains paramètres pris en compte.

Au terme de cette phase de calage en régime transitoire, le modèle peut être utilisé pour simuler différents scénarios de gestion de la nappe de la Craie. Pour être en mesure de répondre à des problématiques plus locales, il sera toutefois nécessaire d'affiner l'outil réalisé en discrétisant plus finement le réservoir crayeux.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de la présente étude.....	9
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL	9
1.2. CONSTRUCTION DU MODÈLE ET CALAGE EN PERMANENT	10
2. Construction du modèle en régime transitoire.....	13
2.1. SPATIALISATION DE LA PLUIE ET DES PARAMÈTRES DE SOL	13
2.2. PRÉLÈVEMENTS.....	15
2.3. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	17
2.3.1. Concernant la nappe de la craie.....	17
2.3.2. Concernant la nappe du Calcaire carbonifère	18
2.4. CANALISATION DES RIVIÈRES	19
3. Calage en régime transitoire	21
3.1. METHODOLOGIE.....	21
3.1.1. Données de référence	21
3.1.2. Conduite du calage.....	22
3.2. PARAMÈTRES HYDRAULIQUES DÉDUITS DE LA PHASE DE CALAGE	22
3.2.1. Distribution spatiale des perméabilités	22
3.2.2. Distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement	24
3.3. CARTES PIEZOMÉTRIQUES SIMULÉES	26
3.4. CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES SIMULÉES	27
3.4.1. Faille de Courchelettes.....	31
3.4.2. Sensibilité du paramètre Infiltration	33
3.4.3. Sensibilité du paramètre épaisseur productive de la Craie	35
3.5. DÉBITS SIMULÉS DANS LES RIVIÈRES.....	37
3.6. CAPTIVITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE	38
3.7. BILAN HYDRAULIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE.....	39
3.7.1. Recharge.....	39

3.7.2. Échanges nappe-rivières	40
3.7.3. Échanges entre couches.....	42
3.7.4. Synthèse du bilan hydraulique de la nappe	43
4. Conclusions.....	45
5. Bibliographie	47

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation des masses d'eau souterraine	10
Figure 2 : Répartition spatiale en zones de précipitation homogènes	14
Figure 3 : Répartition spatiale des paramètres du bilan hydrique	15
Figure 4 : Évolution des prélèvements en eau souterraine dans le bassin Artois-Picardie.....	16
Figure 5 : Prélèvements des principaux champs captants du Nord-Pas de Calais	16
Figure 6 : Réseau de suivi piézométrique BRGM (2011).....	21
Figure 7 : Perméabilités simulées dans la Craie séno-turonienne (m/s).....	23
Figure 8 : Coefficient d'emmagasinement libre simulé pour la Craie Seno-turonienne	25
Figure 9 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique basses-eaux 2009	26
Figure 10 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 2009.....	27
Figure 11 : Comparaison évolution observée – évolution simulée.....	28
Figure 12 : Comparaison évolution observée – évolution simulée.....	29
Figure 13 : Comparaison évolution observée – évolution simulée.....	30
Figure 14 : Comparaison évolution observée – évolution simulée.....	31
Figure 15 : Localisation de la faille de Courchelettes.....	32
Figure 16 : Piézométrie simulée dans deux contextes hydrauliques de la faille de Courchelettes.....	33
Figure 17 : Localisation de la zone hydroclimatique testée – la Sensée à Etaing	34
Figure 18 : Effet d'une diminution des précipitations sur plusieurs piézomètres de la masse d'eau 1006	35
Figure 19 : Piézométrie simulée dans plusieurs contextes d'épaisseur productive (masse d'eau 1006)	36
Figure 20 : Piézométrie simulée dans plusieurs contextes d'épaisseur productive (masse d'eau 1010)	37
Figure 21 : Saturation simulée de la nappe de la Craie en octobre 2009	38
Figure 22 : Bilan hydroclimatique simulé pour la nappe de la Craie	39
Figure 23 : Échanges nappe-rivières simulés dans le Nord-Pas de Calais	41

Figure 24 : Sens des échanges nappe-rivières (état piézométrique hautes eaux 2001)	42
Figure 25 : Bilan hydraulique simulé de la nappe de la Craie	43
Figure 26 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 1995	51
Figure 27 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique basses-eaux 1997.....	53
Figure 28 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 2001	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Perméabilités prises en compte dans le modèle	22
Tableau 2 : Coefficients d'emmagasinement simulés pour les différentes formations.....	24
Tableau 3 : Répartition simulée des précipitations sur la région Nord-Pas de Calais.....	40
Tableau 4 : Bilans hydrologiques antérieurs pour la région Nord-Pas de Calais	40

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes piézométriques simulées de la nappe de la Craie	49
Annexe 2 Comparaisons des chroniques piézométriques observées et simulées.....	59

1. Contexte et objectifs de la présente étude

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

La nappe de la craie assure 95% de l'approvisionnement en eau potable du Nord de la France. Dans un contexte de préservation de la ressource en eau particulièrement sensible sur l'Aire Métropolitaine lilloise, il devient indispensable de définir les conditions d'une gestion plus rationnelle et mieux coordonnée de cette ressource.

La Communauté Urbaine de Lille, la Communauté d'Agglomération de Lens-Liévin (CALL), la Communauté d'Agglomération d'Hénin-Carvin (CAHC), l'État, Noréade (régie SIDEN SIAN) et le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en eau potable de la région de Douai (SIADO) ont souhaité disposer d'outils d'aide à la décision pour les aider à élaborer une stratégie de gestion de la ressource en eau des six masses d'eau qu'ils sollicitent.

La construction d'un outil de gestion des ressources en eau sur l'Aire des territoires qui concourent à l'alimentation en eau de la Métropole du Nord fait l'objet d'une convention entre LMCU et le BRGM. Le projet reçoit également des aides financières de l'Agence de l'Eau, de l'État et de la DREAL, versées à LMCU.

Ce projet s'articule autour de quatre phases :

1. collecte, analyse et synthèse des données hydrogéologiques de la nappe de la craie dans la zone d'étude ;
2. mise à disposition de la synthèse des données sur un site WEB via la réalisation d'un SIGES (Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines) ;
3. modélisation hydrodynamique de la nappe de la craie ;
4. modélisation des transferts de nitrates dans la nappe.

La première phase de collecte des données est en cours de valorisation avec leur mise à disposition sur le site internet du SIGES Nord-Pas de Calais. La troisième phase de l'étude concerne la réalisation du modèle hydrodynamique. En effet, la connaissance du fonctionnement de l'aquifère de la craie et la recherche d'une gestion optimale, servant au mieux les intérêts de tous les utilisateurs, passe par l'utilisation d'un modèle de simulation des écoulements.

Les objectifs visés à terme pour le modèle sont triples :

- comprendre les conditions générales de circulation des eaux superficielles et souterraines en intégrant les évolutions climatiques et celles des prélèvements/apports au cours du temps ;
- prévoir dans l'espace et dans le temps la disponibilité de la ressource en eau dans l'hydrosystème (niveaux piézométriques, débits des rivières) ;
- fournir les éléments nécessaires pour améliorer la gestion de la ressource en eau et optimiser les prélèvements à une échelle régionale.

Les résultats de la modélisation sont attendus pour la nappe de la craie sur l'aire d'alimentation de la métropole lilloise (cf. Figure 1), c'est-à-dire pour les six masses d'eau suivantes : 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).

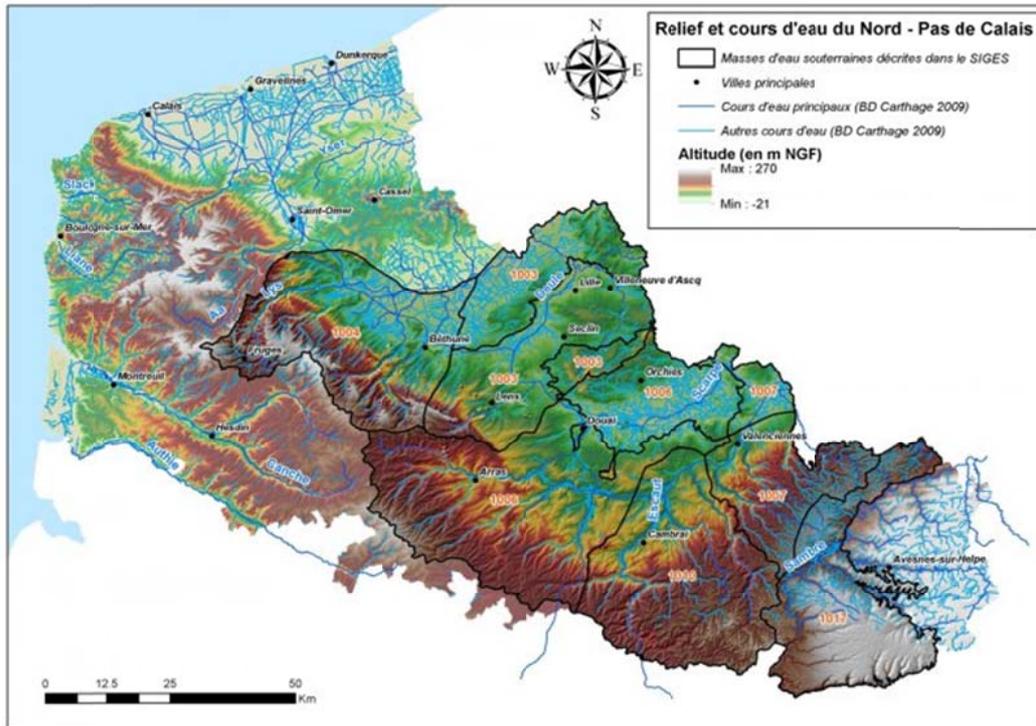


Figure 1 : Délimitation des masses d'eau souterraine

1.2. CONSTRUCTION DU MODÈLE ET CALAGE EN PERMANENT

Les contextes géologiques et hydrogéologiques de la nappe de la Craie dans le Nord-Pas de Calais, puis la construction et la mise en œuvre du modèle hydrogéologique, du modèle conceptuel jusqu'au calage en régime permanent, ont été décrits en détail dans les rapports des phases précédentes. Le lecteur pourra se référer en particulier au rapport BRGM RP-59720-FR (mars 2011) et à ses nombreuses références bibliographiques.

Rappelons que le modèle hydrodynamique en régime permanent comprend 9 couches, dont 3 niveaux aquifères :

- les limons des plateaux ;
- les argiles des Flandres ;
- les sables du Landénien ;
- les argiles de Louvil ;

- la craie du Turonien supérieur au Sénonien productive ;
- la craie du Turonien supérieur au Sénonien compacte ;
- les dièves ;
- les craies et marnes du Cénomaniens ;
- le Calcaire carbonifère.

Un modèle géologique a été construit pour restituer la géométrie 3D des différentes couches. L'horizon séno-turonien a été ensuite subdivisé en deux formations pour différencier verticalement deux zones de perméabilité dans la craie : la première, perméable, résulte du développement de la fissuration et de l'ouverture des joints de stratification, les fissures ouvertes se situant généralement dans les 25 premiers mètres de la zone saturée, la seconde zone, moins perméable, est située en-dessous, la craie y est plus compacte et les fissures sont moins ouvertes.

La piézométrie de référence reconstituée en régime permanent¹ repose sur un état piézométrique de basses eaux (1997), particulièrement complet au niveau de la campagne de mesures piézométriques réalisée. La comparaison des charges piézométriques et des débits des rivières calculés en régime permanent par le modèle avec les observations est assez satisfaisante. En effet, la distribution des charges est cohérente avec l'écoulement régional, les ordres de grandeur des débits étant bien reproduits.

En première approche, cette simulation valide donc les hypothèses choisies.

La deuxième étape, décrite dans le présent rapport, consiste à caler le modèle en régime transitoire.

Dans cette phase, le modèle de nappe est couplé à un simulateur permettant d'obtenir des bilans hydroclimatiques ainsi qu'aux principaux cours d'eau afin de tenir compte des échanges nappes / rivières.

Les simulations en régime transitoire sont menées au pas de temps mensuel sur près de 30 ans : 1982 à 2010.

¹ Rapport BRGM/RP-59720-FR

2. Construction du modèle en régime transitoire

2.1. SPATIALISATION DE LA PLUIE ET DES PARAMÈTRES DE SOL

Les fluctuations piézométriques de la nappe de la craie montrent une forte corrélation avec les chroniques de pluie efficace. Au cours de la phase précédente (régime permanent), l'infiltration a été estimée à l'aide d'un modèle global pluie-débit (logiciel Gardenia du BRGM). Un tel modèle permet de simuler dans un bassin donné le cycle hydrologique pluie-débit et/ou pluie-niveau à partir d'un débit à l'exutoire de la nappe sous-jacente ou un niveau piézométrique en un point quelconque de la nappe.

Après calage de chacun des 10 modèles globaux réalisés sur le domaine modélisé, l'introduction dans le modèle d'écoulement souterrain des paramètres de simulation du cycle hydrologique issus de ces modèles globaux a conduit à une spatialisation préalable de la pluie, de l'ETP et des paramètres de sol.

Précipitations

Seize stations météorologiques ont été retenues dans la zone modélisée. Le choix des stations météorologiques de référence est développé dans le rapport précédent, sur la base des données disponibles et de leur fiabilité.

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 de polygonalement de Thiessen, on aboutit à un découpage du modèle en 16 zones météorologiques (cf. Figure 2 présentée page suivante).

Dans une zone météorologique, toutes les mailles reçoivent la même précipitation.

ETP

De la même manière, 4 stations ont été retenues pour intégrer les chroniques d'évapotranspiration potentielle décadaires dans le modèle : Le Touquet, Abbeville, Saint-Quentin et Lille. Elles ont été ventilées dans les mêmes zones météorologiques que les précipitations, selon leur position géographique.

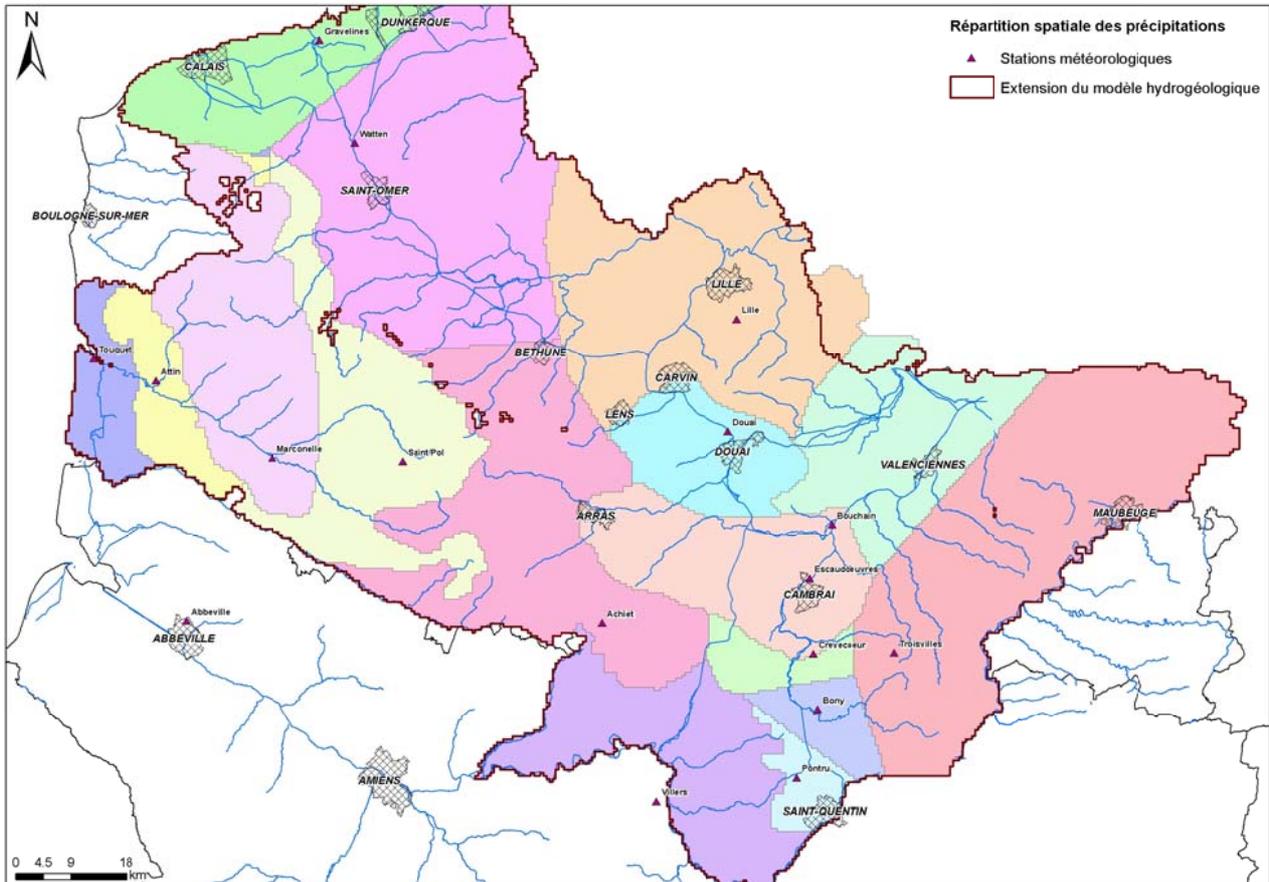


Figure 2 : Répartition spatiale en zones de précipitation homogènes

Paramètres de calcul du bilan hydrique

Les paramètres hydroclimatiques, introduits dans le modèle et basés sur le schéma Gardenia, dépendent de la nature du recouvrement de surface et des possibilités plus ou moins importantes de stockage de l'eau dans le sol.

À partir de la connaissance de la représentation des bassins versants, ces paramètres ont été étendus à l'ensemble de la zone d'étude (cf. Figure 3).

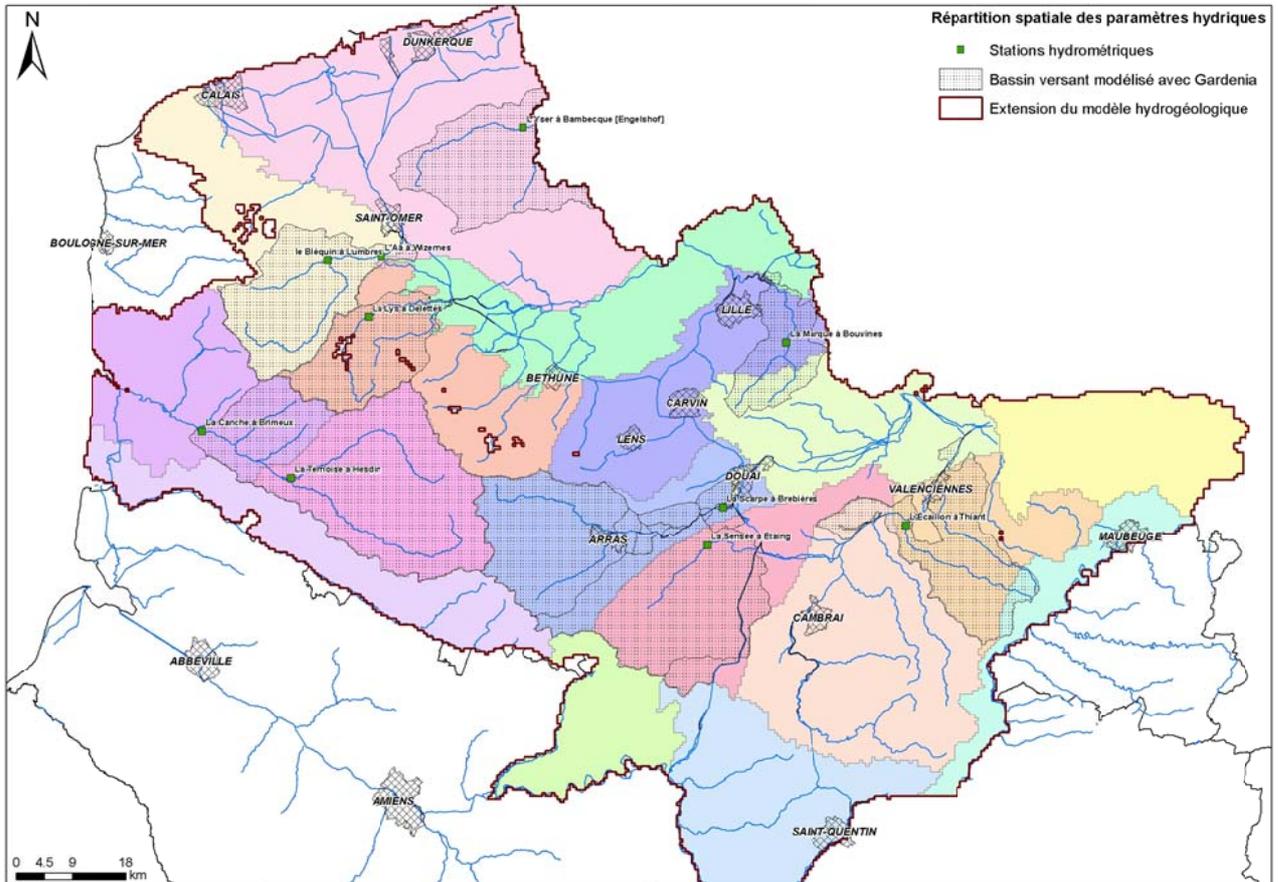


Figure 3 : Répartition spatiale des paramètres du bilan hydrique

2.2. PRÉLÈVEMENTS

La connaissance des prélèvements s'arrêtant en 2008, ces derniers ont été étendus à l'identique pour les années 2009 et 2010. L'évolution des prélèvements annuels entre 1982 et 2008 pour l'ensemble du bassin Artois-Picardie est présentée en Figure 4, tandis que les évolutions des prélèvements pour quelques champs captants sont présentées en Figure 5.

Il est à noter que pour les principaux champs captants, les prélèvements relevés par l'Agence de l'Eau correspondent à des volumes globaux annuels, affectés arbitrairement à un ouvrage du champ captant.

Dans le modèle hydrodynamique, ces volumes sont distribués de façon uniforme sur l'ensemble des ouvrages du champ captant considéré.

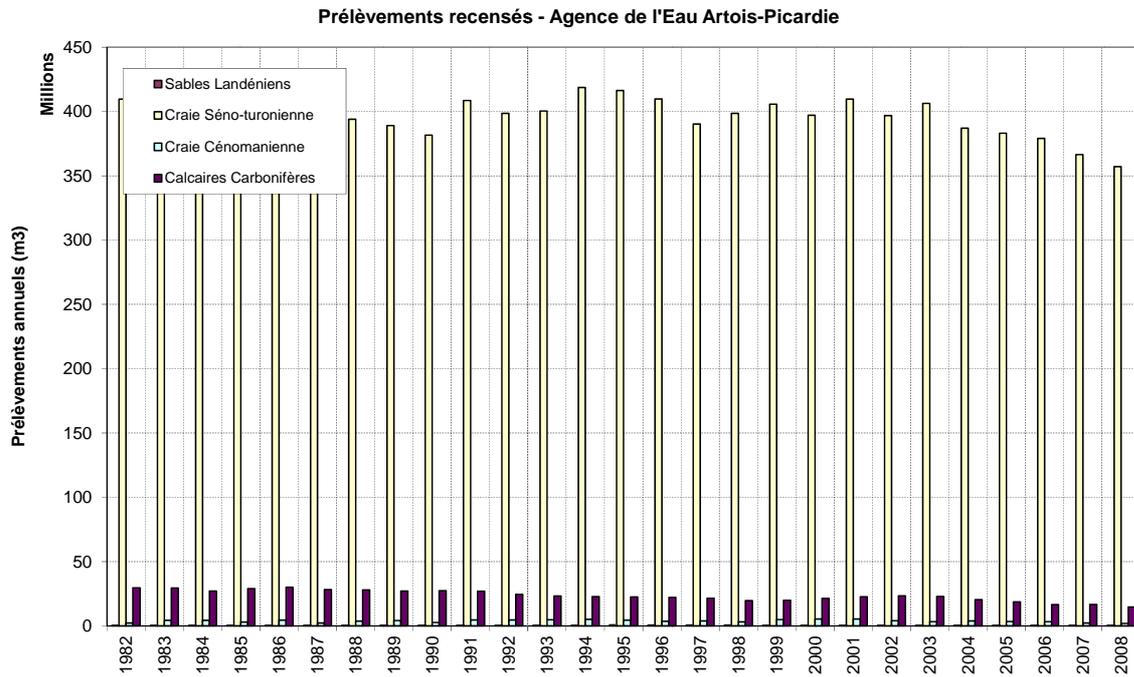


Figure 4 : Évolution des prélèvements en eau souterraine dans le bassin Artois-Picardie

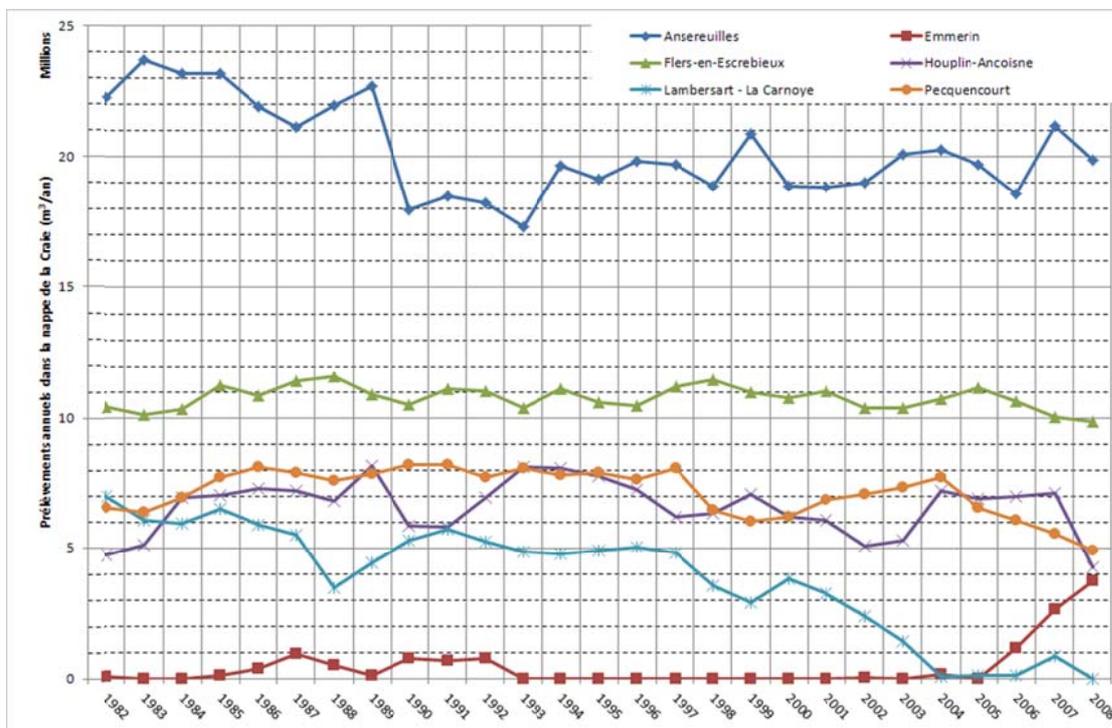


Figure 5 : Prélèvements des principaux champs captants du Nord-Pas de Calais

2.3. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

2.3.1. Concernant la nappe de la craie

Hétérogénéité 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. 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. »

La craie en Belgique

La nappe de la craie s'étend jusqu'en Belgique, avec des épaisseurs significatives dans le bassin de Mons, mais faibles, à l'ouest de Tournai. C'est donc un aquifère transfrontalier exploité de part et d'autre de la frontière franco-belge.

Coté belge, la géométrie de l'aquifère crayeux, les prélèvements effectués et la dynamique des écoulements n'ont pas été portés à notre connaissance. L'extension du modèle dans ce secteur est de ce fait assez schématique (la prise en compte de ce secteur sortant par ailleurs du cadre de cette étude).

Les transferts d'eau simulés de part et d'autre de la frontière sont *de facto* simulés de façon approchée. Les piézomètres frontaliers semblent cependant influencés par les impacts hydrauliques induits côté belge, à l'instar du piézomètre de Rombies et Marchipont (inventorié sous l'indice national 00291X0031) dont le modèle peine à restituer les fluctuations.

Une prise en compte plus précise de la géométrie du réservoir crayeux en Belgique et des sollicitations hydrauliques auquel il est soumis permettrait d'améliorer le calage dans la zone frontalière.

2.3.2. Concernant la nappe du Calcaire carbonifère

Dans le secteur de Lille-Tournai-Tourcoing, la nappe de la Craie est soumise à des échanges avec la nappe du Calcaire carbonifère sous-jacente. Ces deux nappes sont séparées par quelques dizaines de mètres de marnes crayeuses turoniennes.

Des systèmes de faille traversent ces horizons. De plus, la formation du Calcaire carbonifère est affectée par une karstification ancienne, qui se manifeste par des poches de dissolution remplies de dolomies résiduelles, d'argiles de décalcification et de sédiments continentaux (d'âge Wealdien), avec localement de multiples fractures ouvertes de dimensions variables. La nature des échanges hydrauliques entre les deux nappes (Craie et Calcaire carbonifère) est donc complexe, par drainance ou par le biais de fissures et ouvertures préférentielles.

Afin de simplifier la modélisation du Calcaire carbonifère (dans l'attente des résultats de la modélisation du Calcaire carbonifère prévue en 2012), les hypothèses suivantes ont été retenues : extension limitée à la zone de contact avec la nappe de la Craie dans la région de Lille, épaisseur du Calcaire carbonifère a priori constant de 50 m et charges imposées correspondant à la piézométrie mesurée au cours de la campagne d'octobre 2010.

Cette approximation ne permet pas de prendre en compte les variations piézométriques de la nappe du Calcaire carbonifère, ni la variabilité associée des échanges hydrauliques entre ces deux aquifères. Elle permet cependant de considérer cette drainance et d'apprécier son impact actuel sur la piézométrie de la nappe de la Craie dans ce secteur.

Rappelons que les écoulements de la nappe du Calcaire carbonifère sont principalement contrôlés par :

- la recharge pluviale sur les affleurements présents en territoire belge,
- l'infiltration depuis les principaux cours d'eau comme l'Escaut,

- les phénomènes de drainance avec les aquifère sus-jacents, nappe de la Craie et aquifères du Cénozoïque,
- les importants prélèvements pour l'eau potable et à des fins industrielles, que ce soit en Belgique et en France.

En 1973, alors que la nappe du Calcaire carbonifère était intensément exploitée, l'alimentation de la nappe du Calcaire par la nappe de la Craie était estimée à 36,6 millions de m³/an.

Il est à noter qu'au moment de la réalisation de ce document une étude approfondie du Calcaire carbonifère de la région lilloise est en cours. Cette étude apportera un complément d'information sur les relations entre les deux nappes. Ses résultats, notamment ceux relatifs à la modélisation hydrodynamique entreprise, seront intégrés au présent modèle, permettant ainsi de représenter plus finement les échanges hydrauliques dans ce secteur et les impacts probables qui en résultent pour la nappe de la Craie.

2.4. CANALISATION DES RIVIÈRES

La région Nord-Pas de Calais se caractérise par un important réseau de voies navigables et de rivières canalisées, présentant des écoulements susceptibles d'être modifiés par des manœuvres d'ouvrages. Les informations quantitatives obtenues sur ces canaux restent sommaires. Pour certaines stations hydrométriques, il n'a pas été possible de faire la part des débits artificiels, ce qui peut expliquer quelques différences observées avec les débits simulés. Il en résulte certaines incertitudes notamment pour les périodes extrêmes (crues et étiages sévères).

Marthe™ simule trois types d'apports aux rivières :

- le ruissellement, issu du bilan hydrologique dont les résultats sont étendus à chaque maille pour chaque pas de temps, est dirigé vers le réseau hydrographique en fonction de 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, sont traités de la même façon et transmis au cours d'eau voisin via la plus grande pente topographique,
- les échanges nappes-rivières augmentent ou diminuent les débits des cours d'eau en fonction des différentiels de niveaux hydrauliques entre nappe et rivière.

3. Calage en régime transitoire

3.1. METHODOLOGIE

3.1.1. Données de référence

De nombreux suivis piézométriques de la nappe de la Craie sont disponibles dans la région Nord-Pas de Calais, ainsi que plusieurs cartes piézométriques. Dans un premier temps, une attention particulière a été accordée aux piézomètres les plus représentatifs du comportement de la nappe de la Craie, à savoir les piézomètres du Réseau Artois-Picardie.



Figure 6 : Réseau de suivi piézométrique BRGM (2011)

Dans un second temps, les chroniques piézométriques des principaux champs captants ont été utilisées pour le calage. En complément, les chroniques de débit des rivières enregistrées sur plusieurs stations hydrométriques de la région ont été prises en compte pour contrôler la validité des flux hydrauliques simulés.

L'annexe 2 présente, par masse d'eau, la localisation et les chroniques piézométriques observées et simulées pour les principaux piézomètres utilisés.

3.1.2. Conduite du calage

Les perméabilités et les coefficients d'emmagasinement sont en règle générale affectés par couche de manière uniforme. Ce n'est pas le cas pour la craie séno-turonienne qui a fait l'objet d'une distribution spatiale fine.

3.2. PARAMÈTRES HYDRAULIQUES DÉDUITS DE LA PHASE DE CALAGE

3.2.1. Distribution spatiale des perméabilités

Horizon Turonien supérieur – Sénonien

Les gammes de perméabilité utilisées pour restituer la piézométrie observée sont conformes aux valeurs mesurées (cf. Figure 7). Leur répartition spatiale est corrélable avec la géomorphologie, les zones les plus perméables correspondant dans l'ensemble aux vallées, tandis qu'au droit des plateaux, la Craie est moins perméable. Peu d'informations sont disponibles pour estimer la perméabilité de la partie captive nord (Flandres) où une valeur plausible de 1.10^{-6} m/s a été retenue.

Turonien moyen (Dièves)

Les perméabilités de cette formation sont beaucoup plus homogènes, avec vers l'Ouest, des zones plus crayeuses, donc plus perméables. En dehors des quelques points de contrôle existants, la zonation régionale est issue de la carte de résistivité du Turonien moyen, dressée par Paul Caulier, suggérant que les zones de forte résistivité observées dans la partie ouest correspondent à des secteurs de forte perméabilité.

Cénomaniens

De même que pour l'horizon sus-jacent, la perméabilité de la craie cénomaniens montre une zonation régionale liée à la résistivité (plus élevée à l'ouest), mais cette formation reste peu perméable dans l'ensemble avec une perméabilité de l'ordre de 1.10^{-7} m/s. Le Tableau 1 synthétise les valeurs de perméabilité retenues pour les différentes formations modélisées.

Formation	Perméabilité en m/s
Séno-Turonien supérieur	De 10^{-6} à 10^{-2} m/s (cf. Figure 7)
Turonien moyen (dièves)	De 10^{-7} à 5.10^{-4} m/s
Cénomaniens	De 10^{-7} à 5.10^{-4} m/s

Tableau 1 : Perméabilités prises en compte dans le modèle

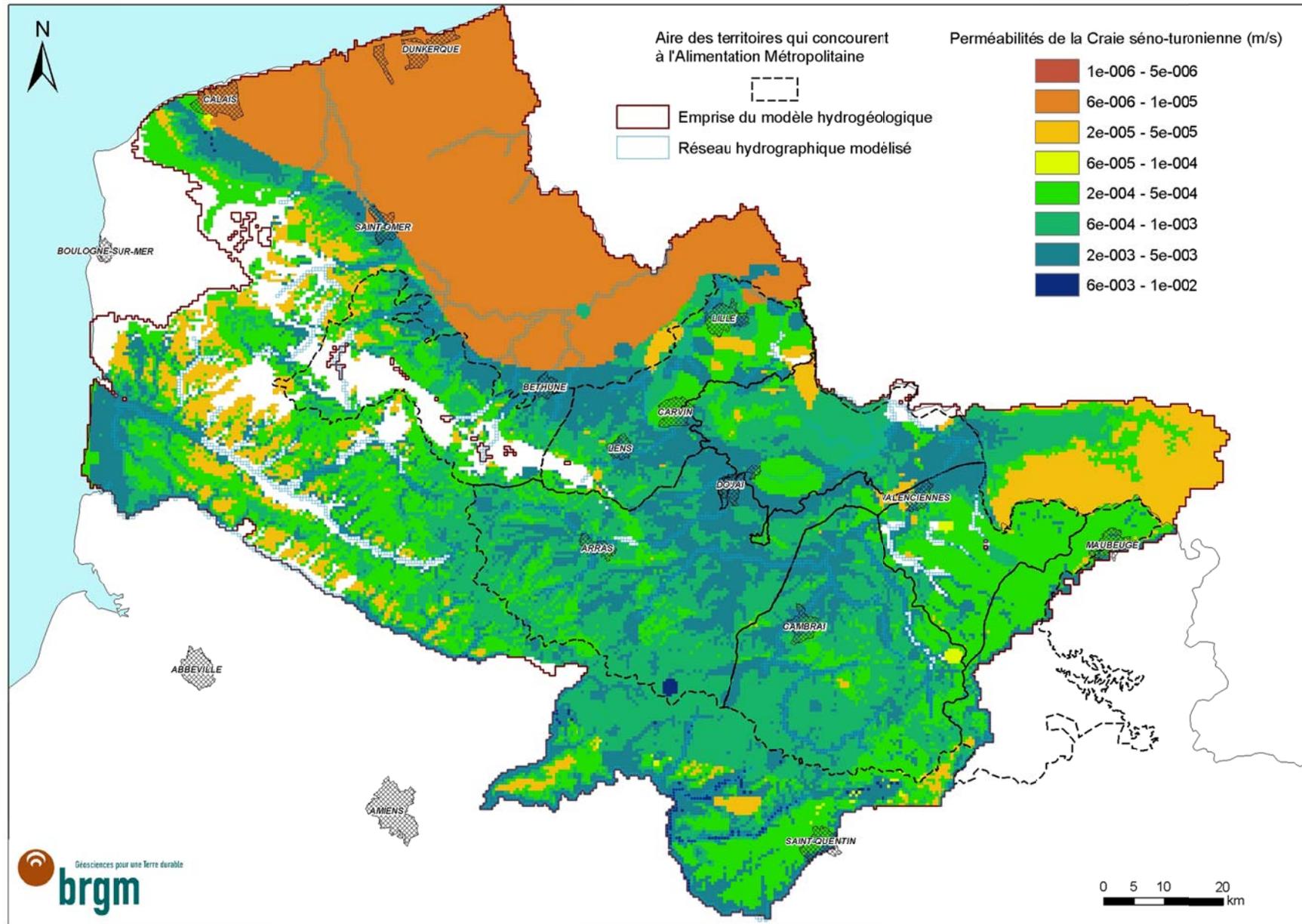


Figure 7 : Perméabilités simulées dans la Craie séno-turonienne (m/s)

3.2.2. Distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement

La capacité de l'aquifère crayeux à emmagasiner de l'eau est étroitement conditionnée par le développement de la fissuration existante.

Emmagasinement libre

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 porosité efficace de l'ordre de 2%.

On retrouve une distribution spatiale analogue présentant des similitudes avec celle de la perméabilité (Figure 8).

Emmagasinement captif

En régime captif, le coefficient d'emmagasinement de la Craie est de l'ordre de 10^{-4} , ce qui correspond à un coefficient d'emmagasinement captif spécifique d'environ 4.10^{-6} m^{-1} pour une épaisseur saturée moyenne de 25 m (cette valeur de 4.10^{-6} m^{-1} correspond à un maximum pour les milieux consolidés).

Le Tableau 2 synthétise les valeurs de ce paramètre retenues pour les différentes formations modélisées. Pour la couche du Calcaire carbonifère, la prise en compte de ce paramètre n'est pas nécessaire dans la mesure où les potentiels y sont imposés.

<i>Formation (numéro de couche)</i>	<i>Emmagasinement libre (%)</i>	<i>Emmagasinement captif spécifique (m^{-1})</i>
Argiles des Flandres (1)	1	1.10^{-5}
Sables landéniens (2)	10	1.10^{-5}
Argiles de Louvil (3)	1	1.10^{-5}
Craie séno-turonienne productive (4)	Spatialisé (cf. Figure 8)	2.10^{-6} à 2.10^{-5}
Craie séno-turonienne compacte (5)	1	1.10^{-6}
Dièves (6)	1	1.10^{-5}
Marnes et craie cénomaniennes (7)	1	1.10^{-5}
Calcaire carbonifère (8)	-	-

Tableau 2 : Coefficients d'emmagasinement simulés pour les différentes formations

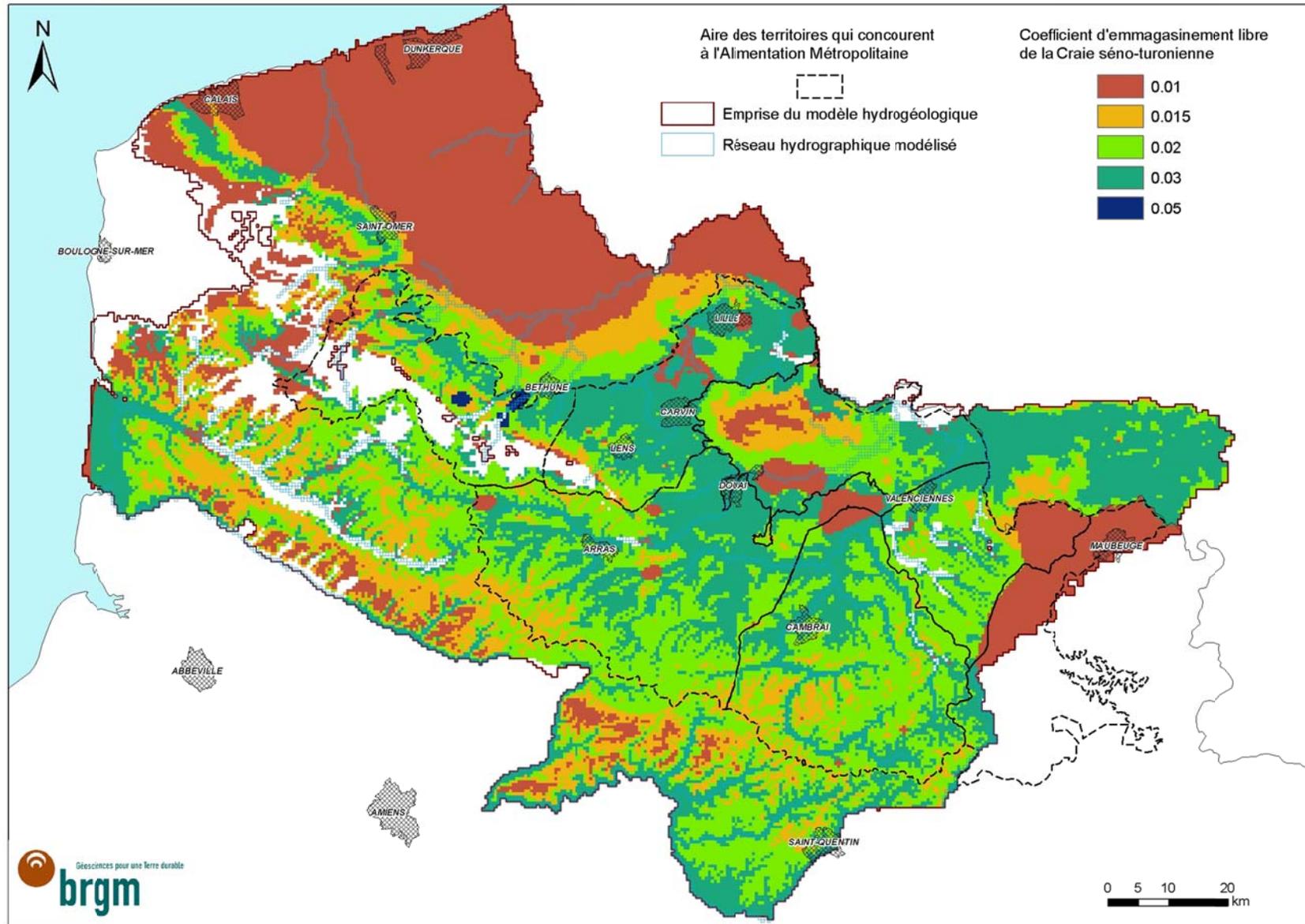


Figure 8 : Coefficient d'emmagasinement libre simulé pour la Craie Seno-turonienne

3.3. CARTES PIEZOMÉTRIQUES SIMULÉES

L'annexe 1 présente les cartes piézométriques simulées pour plusieurs dates (1995, 1997, 2001 et 2009), correspondant chacune à une campagne piézométrique. Les mesures sont symbolisées par des ronds dont la couleur est représentative du niveau piézométrique mesuré.

Pour chacune de ces cartes, un diagramme de dispersion, limité à la zone d'étude, montre la distribution des couples de points de mesures (avec en x, les charges observées et en y, les charges calculées), permettant ainsi d'apprécier visuellement les écarts de calage. Les diagrammes obtenus pour les hautes et basses eaux 2009 sont présentés sur les figures 9 et 10.

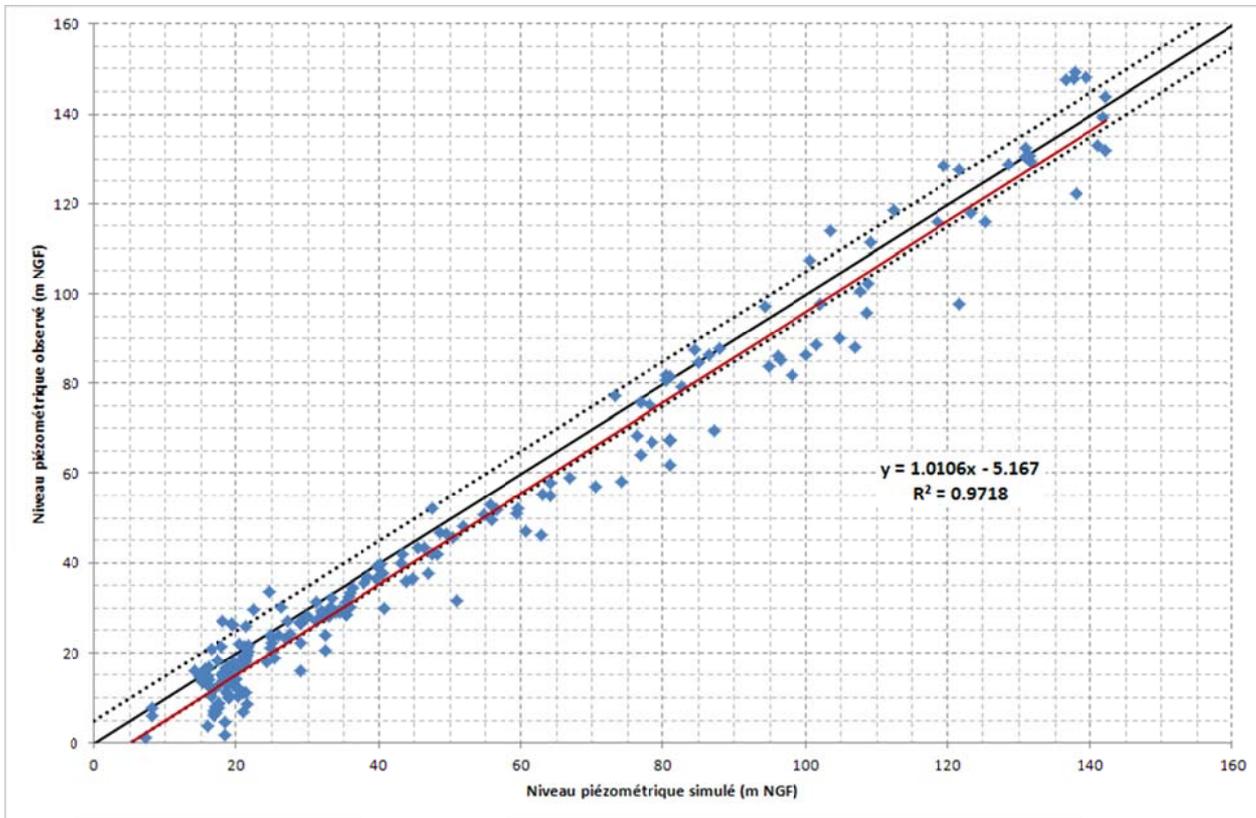


Figure 9 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique basses-eaux 2009

Ces diagrammes font apparaître une bonne concordance entre valeurs mesurées et simulées (239 points de mesure). Les droites de régression associées (en rouge sur les figures) présentent une pente proche de 1, avec un coefficient de corrélation satisfaisant.

Des disparités subsistent toutefois, essentiellement au droit de points de mesure correspondant à des ouvrages en exploitation. C'est notamment le cas de bon nombre

de forages de l'agglomération lilloise (nuage de points dont le niveau simulé est compris entre 0 et 20 m NGF). Il est à noter que les simulations ne prennent pas en compte les pertes de charge en forage.

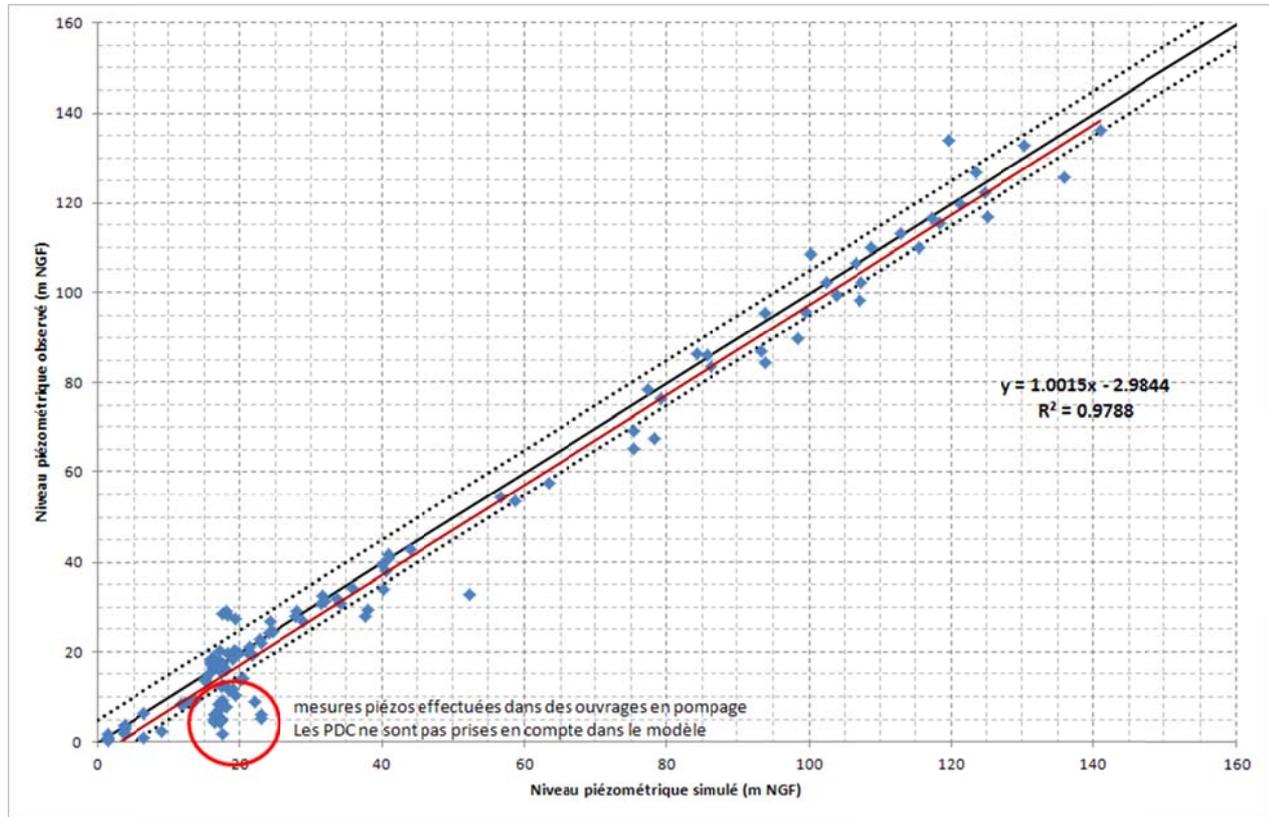


Figure 10 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 2009

3.4. CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES SIMULÉES

Le calage du modèle s'est attaché à reproduire les niveaux piézométriques mesurés dans les 150 piézomètres de contrôle ainsi que les évolutions temporelles enregistrées sur ces points de contrôle.

Dans un objectif de prévision des rabattements et d'anticipation des réactions de la nappe à des modifications de prélèvement, une attention particulière a été portée à la bonne restitution de ces évolutions piézométriques.

Les graphiques de comparaison "observé / calculé" sont reportés en annexe 2 pour chacune des masses d'eau étudiées.

Certaines masses d'eau se caractérisent par l'importance des prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable, comme par exemple au droit de la Craie de la vallée de la Deûle (MES 1003) ou au niveau de la Craie des vallées de la Scarpe et de la Sensée (MES 1006), chacune d'entre elles fournissant plus 50 millions de m³. Ces chiffres confirment le caractère stratégique de ces deux masses d'eau.

Masse d'eau 1003 : Craie de la vallée de la Deûle

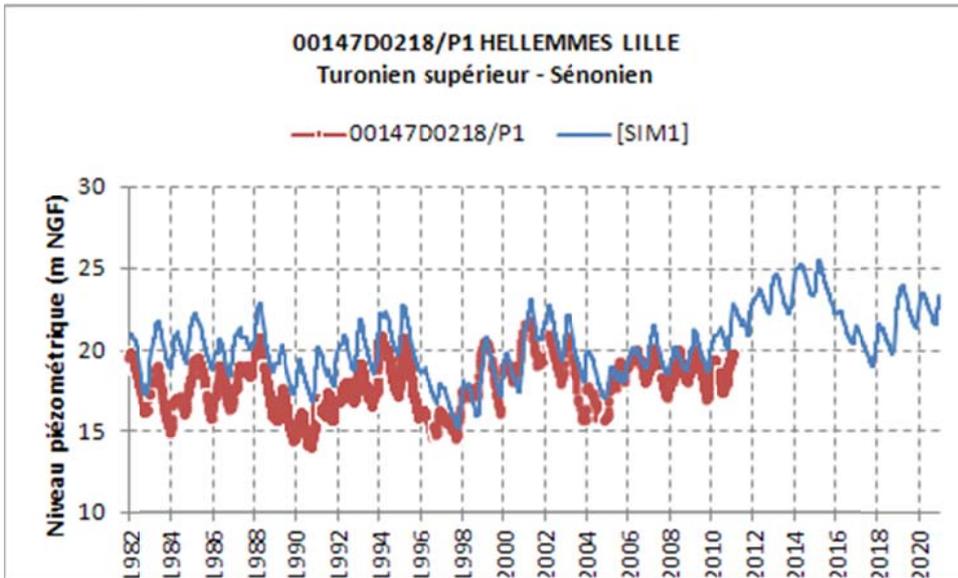


Figure 11 : Comparaison évolution observée – évolution simulée

Ce secteur concerne l'agglomération lilloise et les principaux champs captants de cette agglomération. Une analyse d'ensemble des chroniques simulées montre que le modèle restitue de manière satisfaisante les observations.

Si, pour quelques piézomètres, les niveaux simulés diffèrent de quelques mètres des niveaux observés, les évolutions simulées et les tendances restituées sur 27 années sont proches des observations faites (cf. Figure 11 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Au niveau du champ captant d'Emmerin et d'Houplin-Ancoisne, les volumes prélevés annuellement (données Agence de l'Eau Artois Picardie) sont cumulés en un forage du champ captant d'Emmerin. De ce fait, les niveaux calculés ne sont pas représentatifs des rabattements observés.

Pour les ouvrages les plus septentrionaux (piézomètres LMCU), les niveaux observés sont plus difficiles à reproduire. La géométrie du maillage (mailles de 500 m de côté) ne permet pas ici de simuler de manière détaillée les tendances observées, ce secteur étant l'un des plus aménagés de la région. De ce fait, les chroniques piézométriques sont très influencées par les prélèvements d'eau souterraine ainsi que par divers aménagements souterrains (structures enterrées, grands travaux ...).

Masse d'eau 1004 : Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys

Dans ce secteur, la nappe de la Craie est pour une part contenue dans les horizons crayeux du Turonien moyen et du Cénomaniens, comme le montrent les coupes géologiques et techniques disponibles dans la Banque du Sous-Sol (<http://infoterre.brgm.fr/>).

Les chroniques piézométriques calculées sont, dans l'ensemble, conformes aux observations, tant en niveaux absolus qu'en variations interannuelles. Plusieurs piézomètres présentent toutefois des variations piézométriques rapides de plusieurs dizaines de mètres d'amplitude (piézomètres de Verhocq, de Laire), traduisant vraisemblablement un milieu fissuré non pris en compte par le modèle.

Masse d'eau 1006 : Craie de la vallée de la Scarpe et de la Sensée

Les chroniques piézométriques de ce secteur sont globalement moins bien reproduites.

Le piézomètre de Lecelles (indice national 00216X0073) est probablement affecté par les écoulements de la nappe de la Craie en Belgique non pris en compte dans le secteur de Tournai

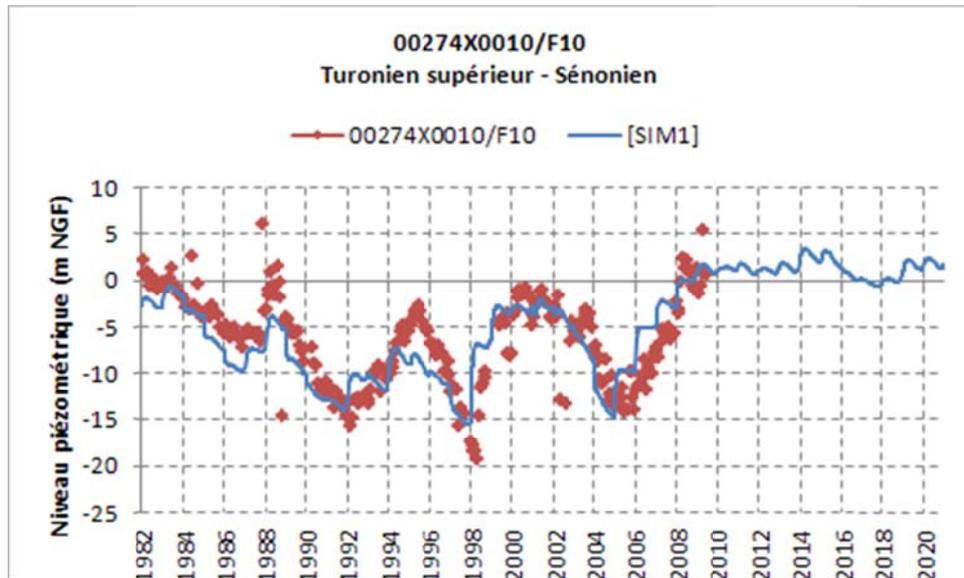


Figure 12 : Comparaison évolution observée – évolution simulée

Une attention particulière a été portée sur le champ captant de Pecquencourt et sur les piézomètres encadrant ce dernier. La nappe est ici captive.

Pour le secteur sous couverture tertiaire, les évolutions piézométriques sont dans l'ensemble bien reproduites, même si leurs fluctuations sont de moindre importance.

Les niveaux simulés sont corrects, mais ne restituent que peu l'amplitude des variations relevées.

Les perméabilités et coefficients d'emménagement retenus permettent de reproduire les périodes déficitaires 1982-87 et 2002-04 sur l'ensemble des ouvrages de ce champ captant (en niveaux comme en variations - cf. Figure 12).

Les fluctuations des piézomètres situés à proximité de ce champ captant sont mal reproduites (cf. évolutions des ouvrages inventoriés sous les indices 00274X0014 et 00281X0002). La prise en compte des prélèvements au niveau de chaque ouvrage

permettra d'affiner ce calage. Ces ouvrages sont proches de la limite nappe libre / nappe captive, difficile à reproduire précisément compte-tenu de la taille des mailles.

Les fluctuations des piézomètres situés plus au sud sont reconstituées, leurs amplitudes étant toutefois insuffisantes (00254X0037/PZ1, par exemple). L'ajustement des paramètres emmagasinement et perméabilité (tout en restant dans des ordres de grandeur cohérents) ne permet pas toujours de reproduire pleinement l'amplitude observée.

Malgré plusieurs tests réalisés afin d'améliorer le calage des ouvrages observés dans ce secteur, le modèle peine à reproduire la piézométrie de cette masse d'eau. Une approche plus locale représentant mieux la géométrie du réservoir permettrait d'améliorer ce calage.

C'est pourquoi une analyse de la sensibilité de certains paramètres pris en compte a été réalisée dans le cadre de ce document.

Masse d'eau 1007 : Craie du Valenciennois

Six piézomètres sont disponibles pour cette masse d'eau. Dans l'ensemble, les niveaux sont bien reproduits (cf. Figure 13).

Toutefois, ainsi que le montre l'évolution du piézomètre de Rombies et Marchipont (00291X0033), celle-ci présente une évolution des niveaux pluriannuelle, alors que la dynamique piézométrique observée est annuelle.

Dans ce secteur, la nappe de la Craie se poursuit en Belgique (Craie du bassin de Mons) où elle est exploitée par plusieurs ouvrages.

Les résultats des modélisations réalisées coté belge demanderaient à être intégrés dans le présent modèle afin de mieux représenter les piézomètres situés dans la zone frontalière.

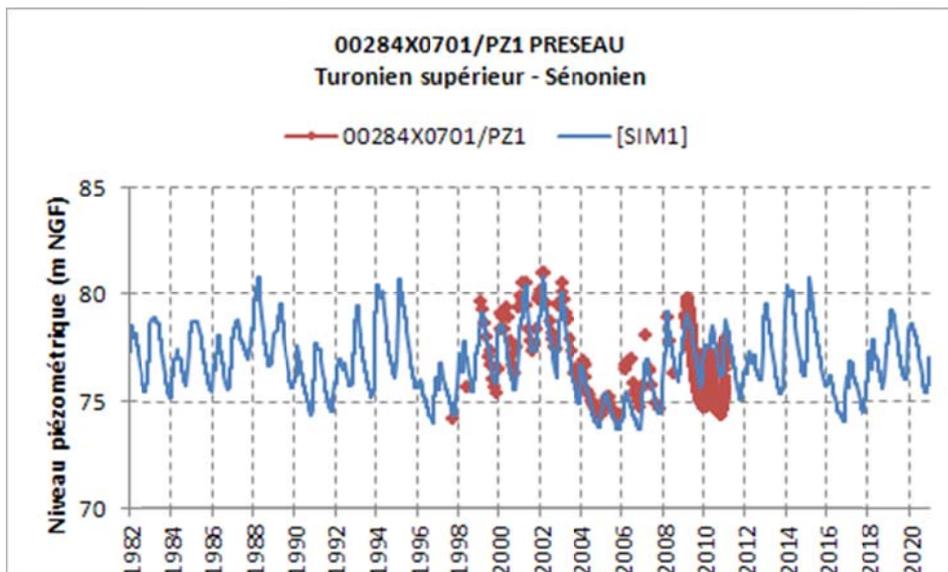


Figure 13 : Comparaison évolution observée – évolution simulée

Masse d'eau 1010 : Craie du Cambrésis

Dans ce secteur, les niveaux piézométriques et leurs variations sont dans l'ensemble médiocrement reproduits (cf. Figure 14).

La modification des paramètres de calage (emmagasinement, perméabilité, colmatage des rivières) ne permet pas d'améliorer les résultats obtenus, malgré plusieurs tests réalisés, notamment sur l'épaisseur de la craie productive.

Le réseau hydrographique dans cette zone est par ailleurs fortement canalisé, avec des interactions avec la nappe sans doute non négligeables.

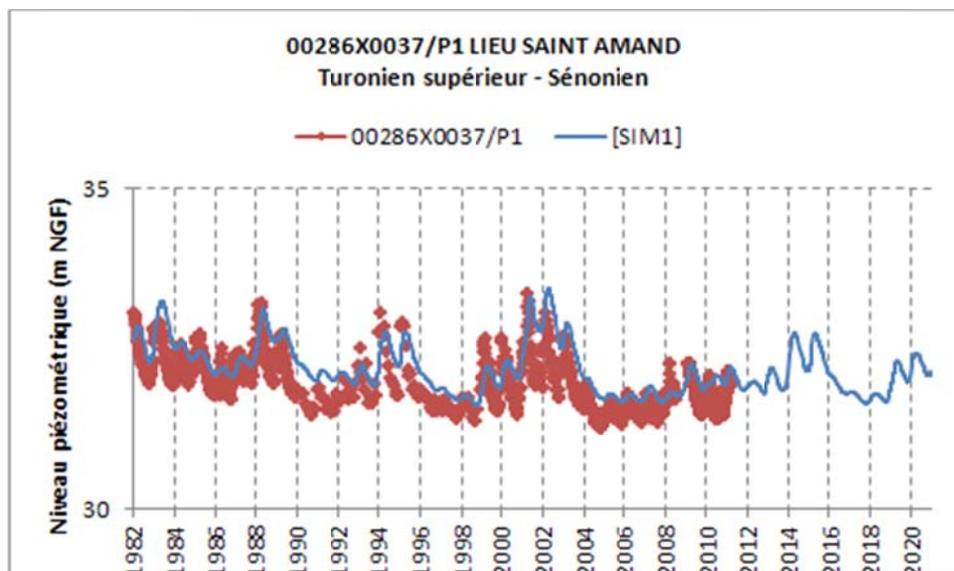


Figure 14 : Comparaison évolution observée – évolution simulée

Masse d'eau 1017 : Craie de la bordure du Hainaut

Nous disposons de peu de chroniques dans ce secteur permettant de parfaire le calage. Les niveaux piézométriques et leurs variations sont dans l'ensemble médiocrement reproduits.

Dans cette zone, l'épaisseur de la nappe de la craie est réduite. Un travail localisé sur la géométrie de l'épaisseur productive permettrait d'améliorer les résultats pour cette masse d'eau.

3.4.1. Faille de Courchelettes

Une modélisation du bassin versant de l'Escrebieux a été menée en 2005 (Lacherez-Bastin, 2005), soulevant la question du rôle hydraulique de la faille dite de Courchelettes. Cette faille de direction Sud-Ouest / Nord-Est s'étend de la Sensée à Aubry jusqu'à l'ouest de Flers-en-Escrebieux (cf. Figure 15 **Erreur ! Aucun nom n'a été donné au signet.**).

Le calage du modèle précité avait montré que cette faille constituait une zone d'écoulement préférentiel de l'eau, avec une transmissivité de l'ordre de $220 \text{ m}^2/\text{h}$ (soit une perméabilité de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ en considérant une épaisseur productive de 25 m).

Le modèle actuel n'a pas conclu à un rôle spécifique de cette faille, les perméabilités le long de la faille s'échelonnant de $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ à $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.



Figure 15 : Localisation de la faille de Courchelettes

Pour évaluer le rôle transmissif ou non de cette faille, une perméabilité $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ a été affectée à cet accident et la piézométrie calculée ([SIM2]) a été comparée au calage initial ([SIM]).

La comparaison des résultats obtenus selon ces deux hypothèses pour plusieurs ouvrages proches de cet accident ne permet pas de conclure sur le rôle hydraulique de cette faille, aucune différence significative n'étant décelable.

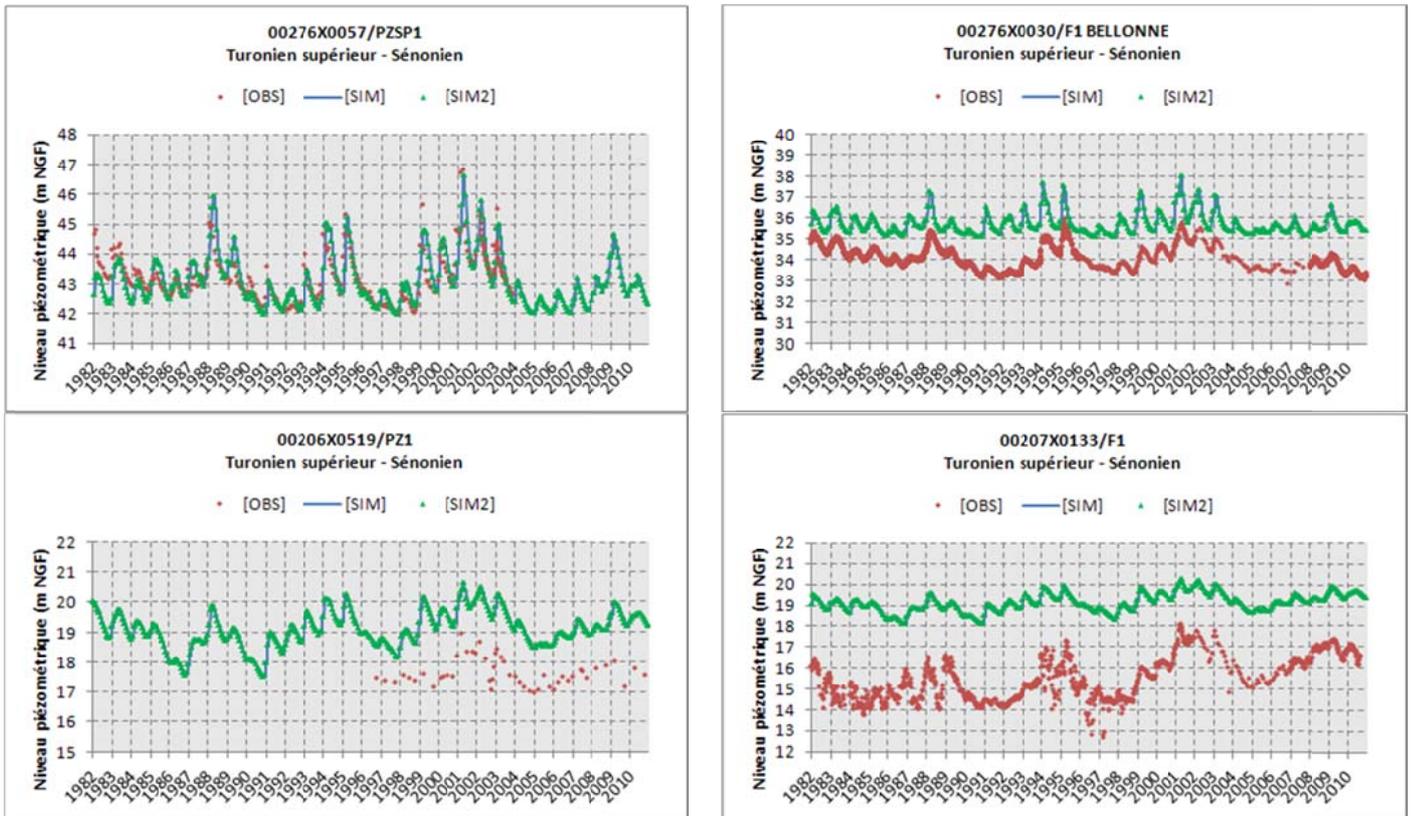


Figure 16 : Piézométrie simulée dans deux contextes hydrauliques de la faille de Courchelettes

3.4.2. Sensibilité du paramètre Infiltration

La spatialisation de ce paramètre (cf. § 2.1), déterminé à l'aide du modèle global Gardenia, induit des approximations. La masse d'eau 1006 s'étend en partie au droit d'une zone hydroclimatique correspondant au bassin versant de la Sensée à Etaing (cf. Figure 17).

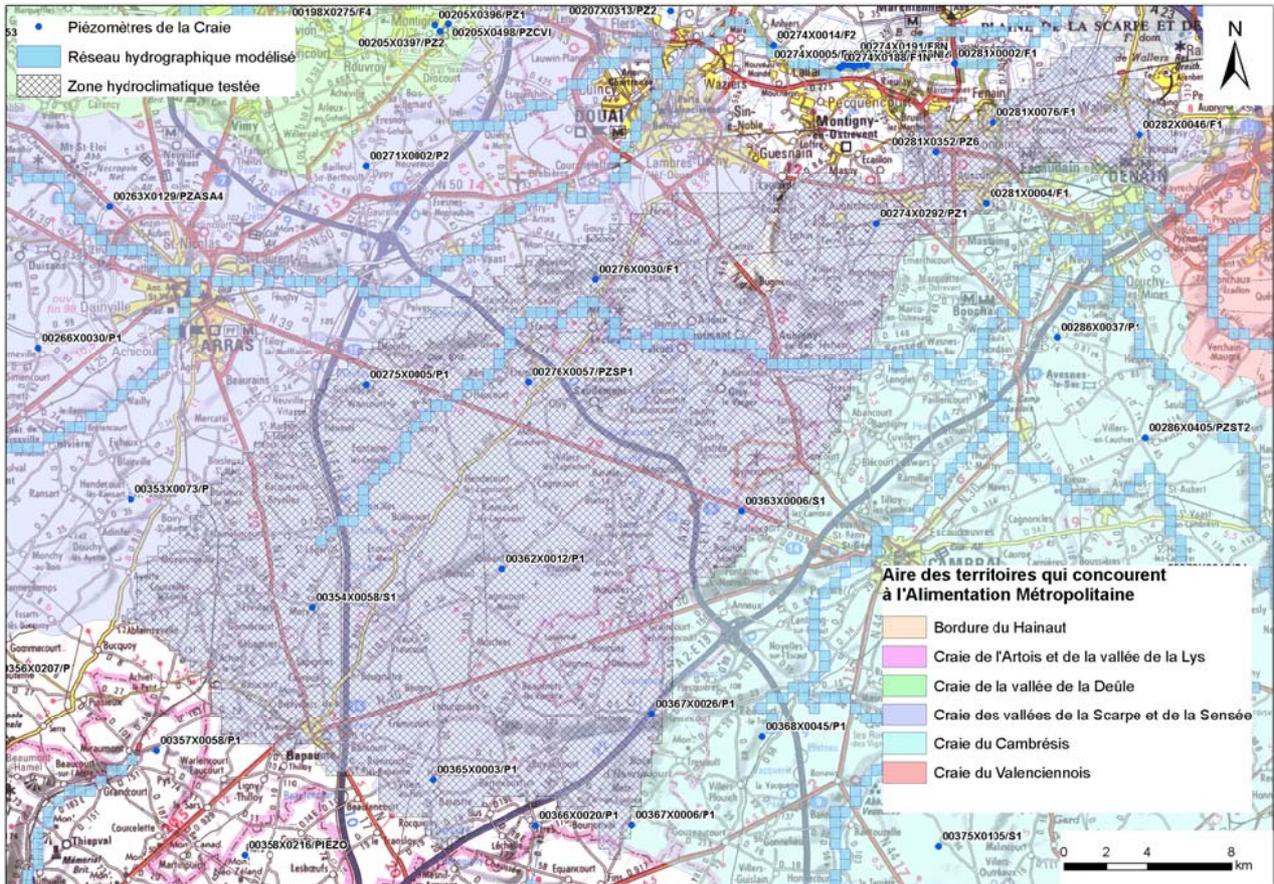


Figure 17 : Localisation de la zone hydroclimatique testée – la Sensée à Etainq

Pour tester la sensibilité du paramètre infiltration, les évolutions piézométriques simulées ([SIM]) ont été comparées avec celles calculées sur la base d'une réduction de 20 % de la pluie de ce secteur ([SIM2]).

L'effet d'une telle diminution se traduit par une baisse généralisée de leur niveau (comprise entre 0 et 5 m), directement fonction de la proximité ou non d'un exutoire (cours d'eau principalement).

Les variations piézométriques calculées semblent plus cohérentes avec les observations (cf. piézomètre 00362X0012/P1), celles-ci étant toutefois plus amorties (00281X0076 à Fenain par exemple).

Diminuer la pluie et augmenter localement la perméabilité (ou l'épaisseur) conduisent aux mêmes effets : baisse du niveau piézométrique et amortissement des fluctuations (cf. Figure 18).

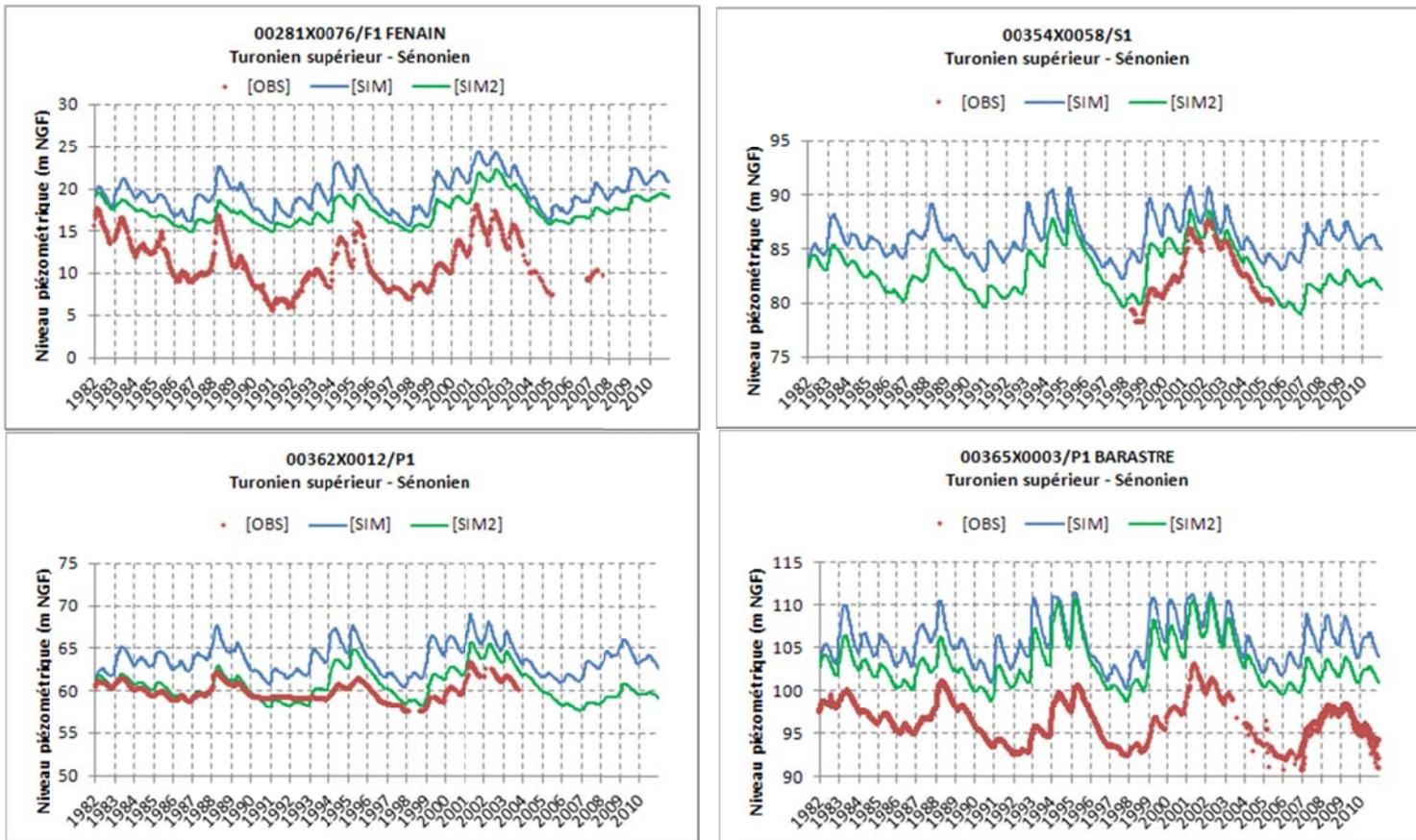


Figure 18 : Effet d'une diminution des précipitations sur plusieurs piézomètres de la masse d'eau 1006

Pour le piézomètre de Barastre (00365X0003), la diminution de la pluie entraîne une baisse du niveau comme il se doit, mais demeurant insuffisante (cf. Figure 18).

3.4.3. Sensibilité du paramètre épaisseur productive de la Craie

Une analyse de sensibilité du modèle a été menée en modifiant l'épaisseur productive de la nappe de la Craie. Le substratum de la craie productive du Séno-Turonien a été estimé en supposant l'épaisseur de la zone saturée comme constante (25 m).

Les données de diagraphies réalisées au micro-moulinet mesurées dans 151 forages captant la craie montrent que cette épaisseur est très variable d'un ouvrage à l'autre (entre 1,5 à 60 m – cf. rapport BRGM/RP-59720-FR).

Pour estimer le poids de cette hypothèse, une simulation a été menée en considérant l'ensemble de la formation du Séno-Turonien comme productive ([SIM2]) ou à l'opposé en réduisant cette épaisseur productive à 15 m ([SIM3]), voire à 5 m ([SIM4]).

La comparaison des résultats de ces différentes simulations (cf. Figure 19) montre des différences significatives, indiquant par là-même l'influence de l'épaisseur productive de la Craie :

- pour le piézomètre de Tincques par exemple (00254X0037), l'augmentation de l'épaisseur productive conduit à représenter la piézométrie observée de manière satisfaisante.
- à l'opposé, pour le piézomètre de Rieulay (00281X0002), situé en bordure de zone captive, une épaisseur productive faible semble plus proche de la réalité.

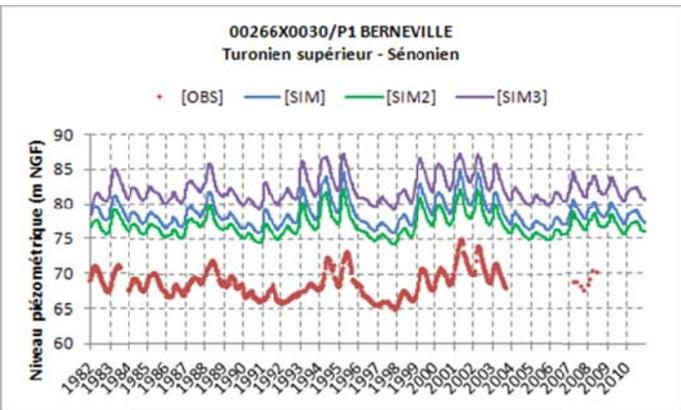
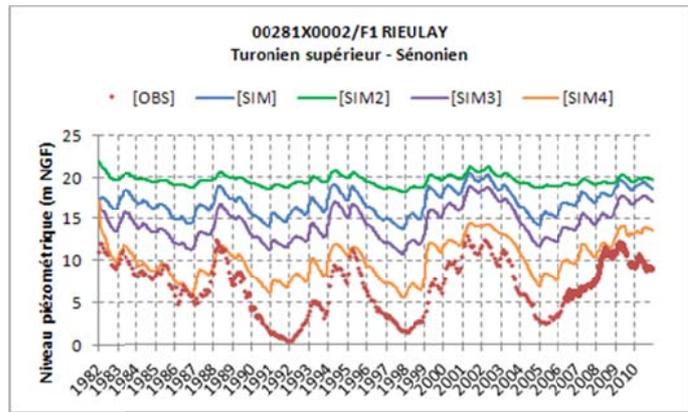
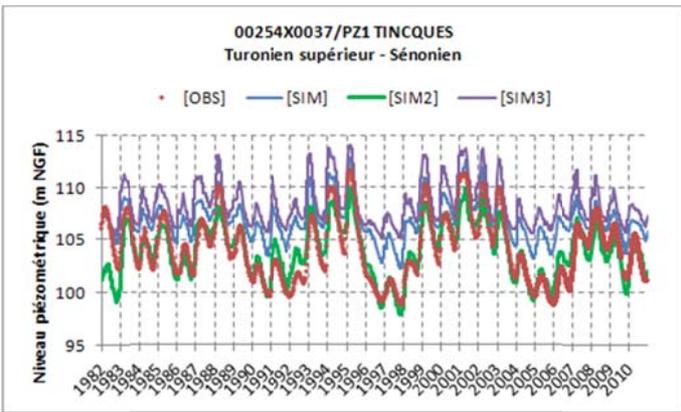


Figure 19 : Piézométrie simulée dans plusieurs contextes d'épaisseur productive (masse d'eau 1006)

Cette analyse met en évidence que ce paramètre n'est pas toujours discriminant, comme par exemple au droit du piézomètre de Lecelles (00216X0073) non affecté par des variations d'épaisseur productive (proximité de la limite nord du modèle et d'un cours d'eau). De la même manière, la piézométrie simulée évolue pour le piézomètre de Berneville (00266X0030), se rapprochant des observations faites, mais insuffisamment.

La même analyse de sensibilité du modèle (cf. Figure 20) a été menée au droit de la masse d'eau 1010 en modifiant l'épaisseur productive de la nappe de la Craie (simulation réalisée selon différentes épaisseurs de craie productive : 25 m pour [SIM], 15 m pour [SIM2] et 5 m pour [SIM3]).

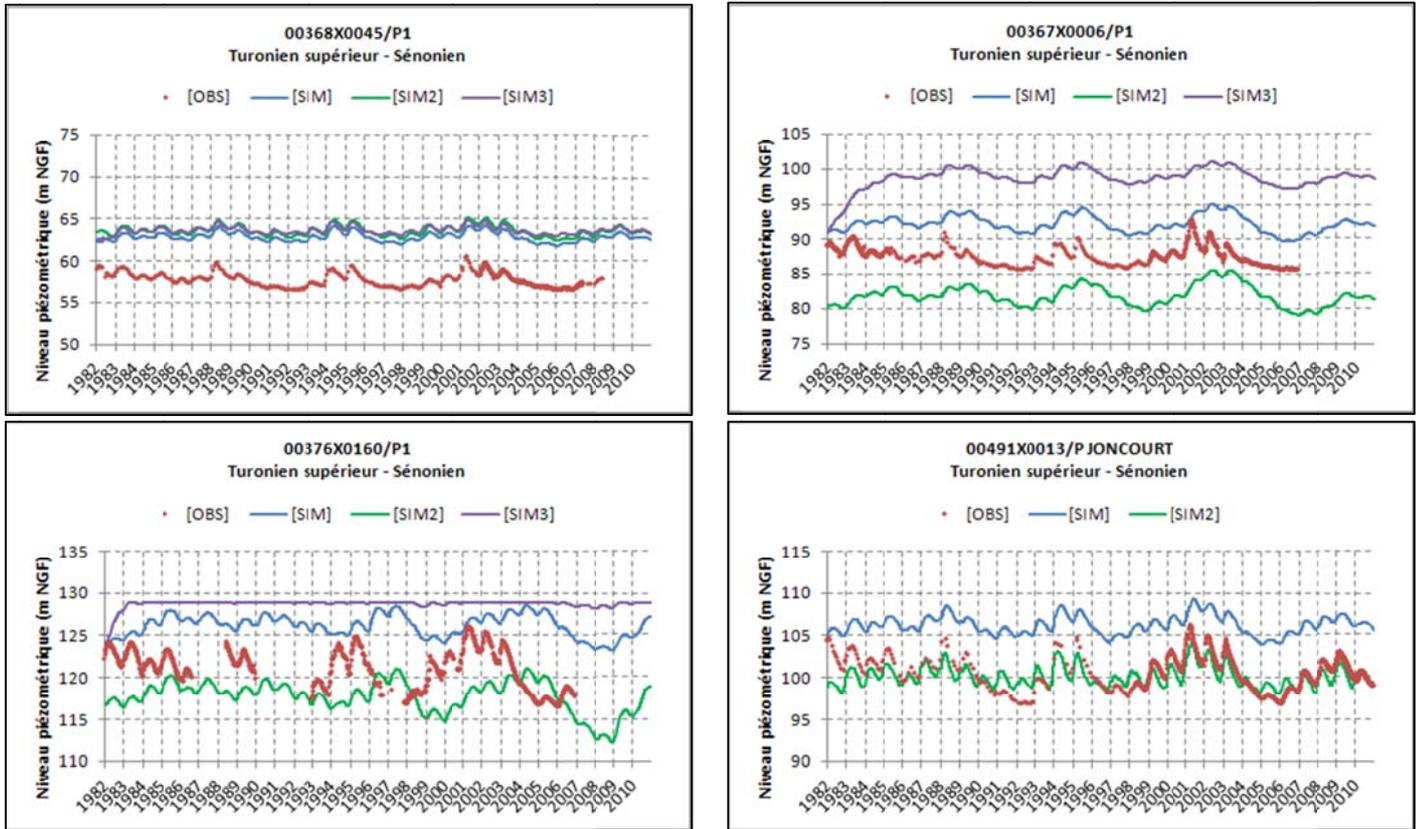


Figure 20 : Piézométrie simulée dans plusieurs contextes d'épaisseur productive (masse d'eau 1010)

La comparaison des résultats obtenus montre des différences significatives. Les piézomètres simulés présentent des comportements fondamentalement différents, soulignant ainsi le poids de l'hypothèse initiale qui considère une épaisseur productive moyenne de 25 m.

Pour améliorer le calage et pouvoir répondre à des problématiques locales, l'hypothèse de cette épaisseur productive doit être adaptée sur la base des données de micro-moulinet disponibles.

3.5. DÉBITS SIMULÉS DANS LES RIVIÈRES

Le modèle simule également les chroniques hydrométriques des 18 stations de la zone modélisée.

La comparaison entre débits observés et débits modélisés dans les principales rivières du secteur d'étude permet de vérifier la cohérence de la pluie efficace globale, sa distribution spatiale, sa répartition entre ruissellement et recharge de nappe ainsi que la bonne prise en compte des échanges nappes-rivières.

Dans l'ensemble, les débits simulés dans les rivières – qui représentent pour l'essentiel les exutoires de la nappe de la craie – sont restitués de façon cohérente par le modèle et permettent de valider les ordres de grandeurs de débits.

L'artificialisation du réseau hydrographique du Nord-Pas de Calais, la taille des mailles du modèle, le pas de temps décadaire et les hypothèses simplificatrices retenues ne permettent toutefois pas un calage détaillé. Le pas de temps utilisé pour le bilan hydrologique (10 jours) est trop grand pour restituer correctement des phénomènes limités dans le temps (crues).

3.6. CAPTIVITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE

La Figure 21 montre le fonctionnement simulé de la nappe de la Craie durant les hautes eaux 2009. L'extension de la zone captive est cohérente avec l'extension connue (en hachuré rouge) et présentée dans l'Atlas des aquifères et eaux souterraines en France.

Cette dernière a été tracée en considérant les formations géologiques imperméables sus-jacentes à la nappe de la Craie et les observations piézométriques. Les triangles rouges indiquent les forages où la nappe était captive lors de la foration. La zone captive simulée se positionne bien sur la localisation de ces ouvrages.

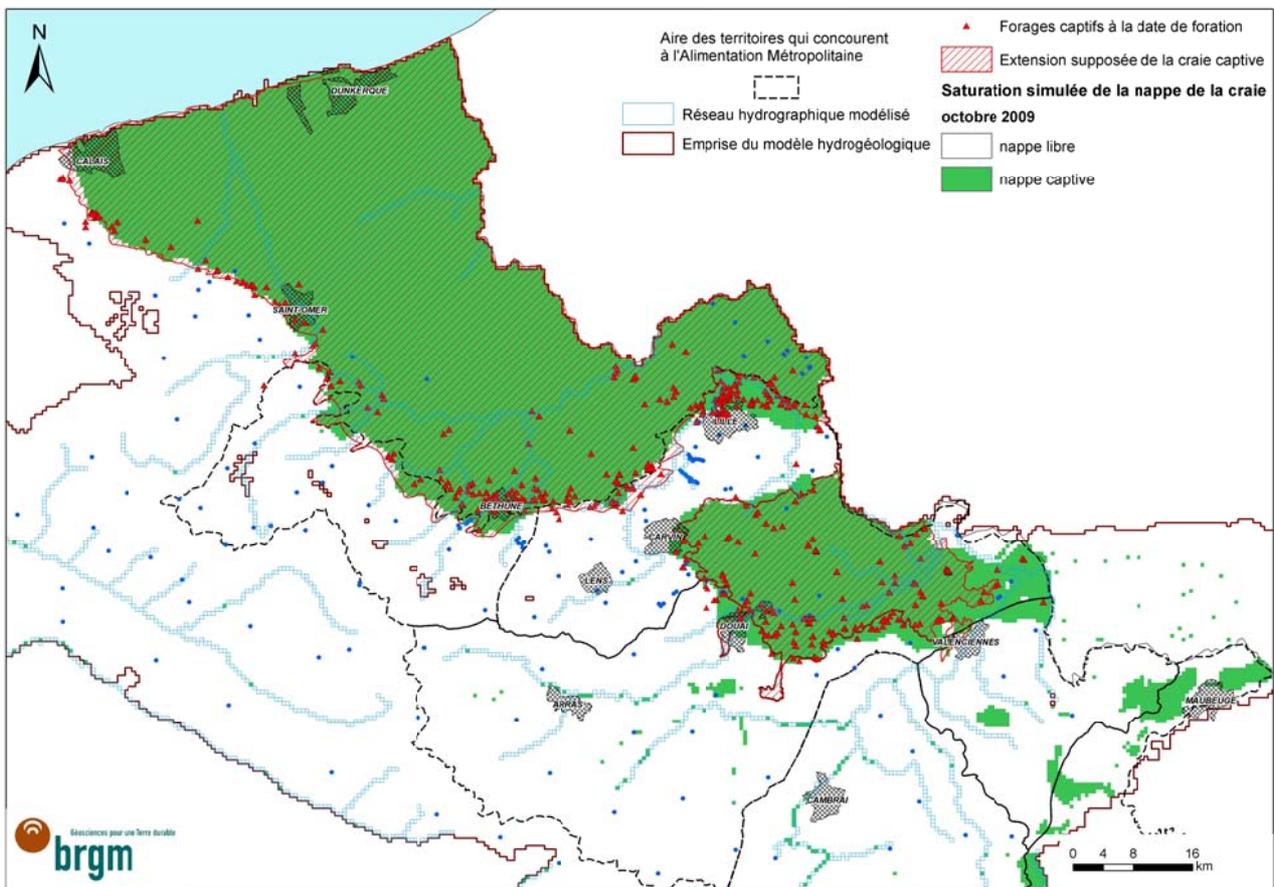


Figure 21 : Saturation simulée de la nappe de la Craie en octobre 2009

Dans le Valenciennois, la base de l'Argile de Louvil est constituée par une formation plus sableuse, parfois indurée, appelée « tuffeau de base », perméable contrairement à l'Argile de Louvil (distinction non faite sur les cartes géologiques au 1/50 000).

C'est pourquoi l'extension de la captivité de la nappe de la craie en bordure de recouvrement tertiaire a tendance à être surestimée. Le tracé de l'extension supposée de la craie captive est également le fruit d'une interprétation qui doit être revue dans les conditions actuelles d'exploitation et d'alimentation de la nappe de la Craie.

3.7. BILAN HYDRAULIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE

3.7.1. Recharge

Le bilan hydroclimatique couplé au modèle hydrogéologique conduit à simuler une infiltration variant entre 145 et 341 mm/an dans la nappe de la Craie pour l'ensemble de la région Nord-Pas de Calais (cf. Figure 22).

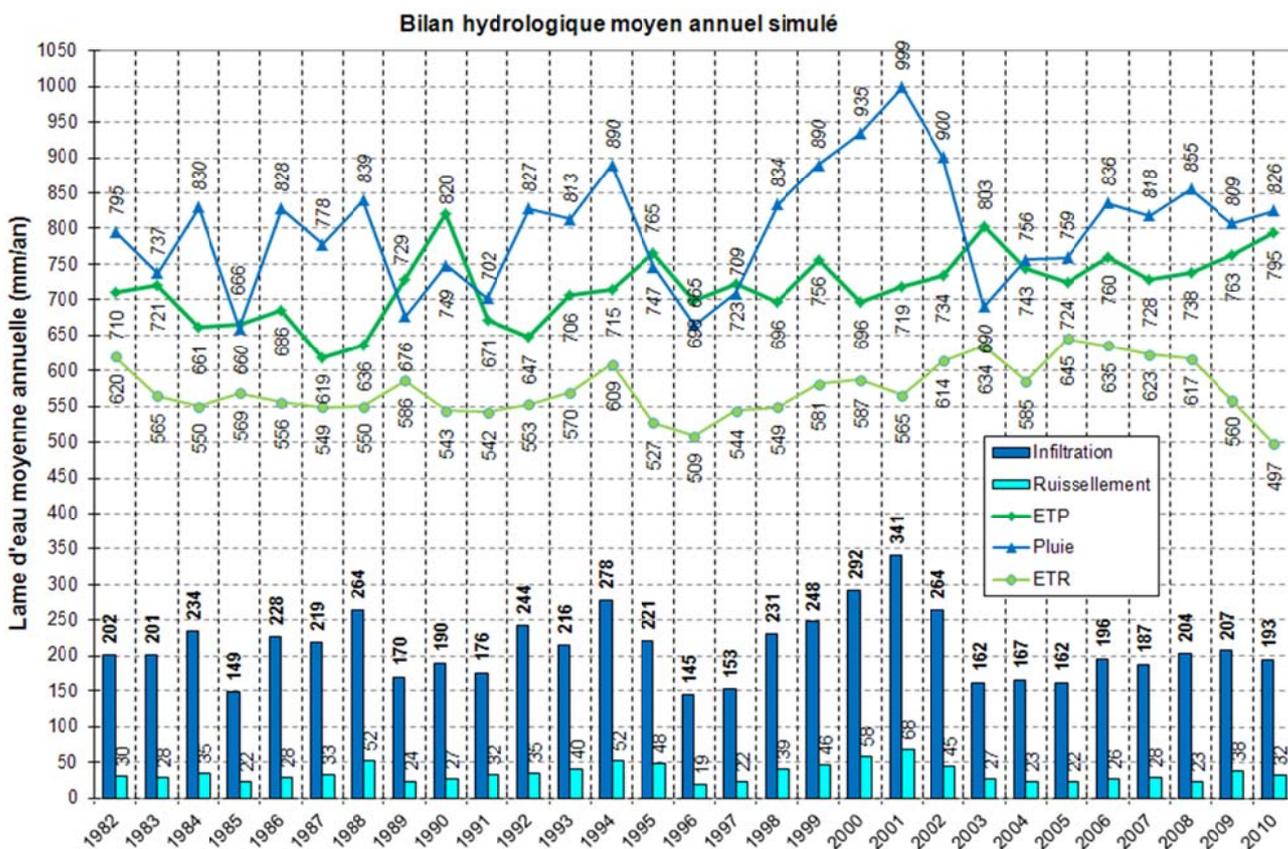


Figure 22 : Bilan hydroclimatique simulé pour la nappe de la Craie

Les moyennes interannuelles des différents éléments de ce bilan dressé sur l'ensemble de la période simulée (1982-2010) sont résumées dans le Tableau 3.

<i>Éléments du bilan</i>	Pluie	ETR	Infiltration	Ruissellement
Lame d'eau moyenne (mm/an)	799	556	211	32
Pourcentage du volume précipité (%)	100	70	26	4

Tableau 3 : Répartition simulée des précipitations sur la région Nord-Pas de Calais

Ce bilan est conforme aux observations et analyses déjà réalisées (cf. Tableau 4), tant en amplitude des lames d'eau considérées qu'en répartition entre les différentes composantes.

<i>Éléments du bilan</i>	Bilan en 1995 à partir d'observations <i>(Atlas des eaux souterraines, 2006)</i>		Traitement régionalisé sur 20 ans (1956-1975) <i>(Jean Beckelynck, 1981)</i>	
	Lame d'eau moyenne (mm/an)	Pourcentage du volume précipité (%)	Lame d'eau moyenne (mm/an)	Pourcentage du volume précipité (%)
Pluie	775	100	789	100
ETR	499	64,4	595	75
Infiltration	190	24,5	163	21
Ruissellement	86	11,1	31	4

Tableau 4 : Bilans hydrologiques antérieurs pour la région Nord-Pas de Calais

3.7.2. Échanges nappe-rivières

A l'échelle du Nord Pas de Calais, les échanges calculés entre la nappe de la Craie et les rivières sont synthétisés sur la Figure 23. Cette figure souligne clairement l'interdépendance de la nappe de la Craie avec les cours d'eau existants.

La nappe d'eau souterraine de la Craie joue un rôle essentiel dans la régulation des écoulements des rivières. En effet, du fait de la perméabilité de cette craie et des limons qui la recouvrent, il n'y a pratiquement pas de ruissellement, la quasi-totalité de l'eau de pluie non reprise par l'évaporation s'infiltrant dans le sous-sol. De ce fait, les cours d'eau présentent un régime très particulier, restant peu sensible à des événements pluviométriques isolés.

Lors d'années excédentaires, comme par exemple en 1994 et 1995 et plus encore en 2001, des débordements peuvent se produire dans les principaux cours d'eau de la région.

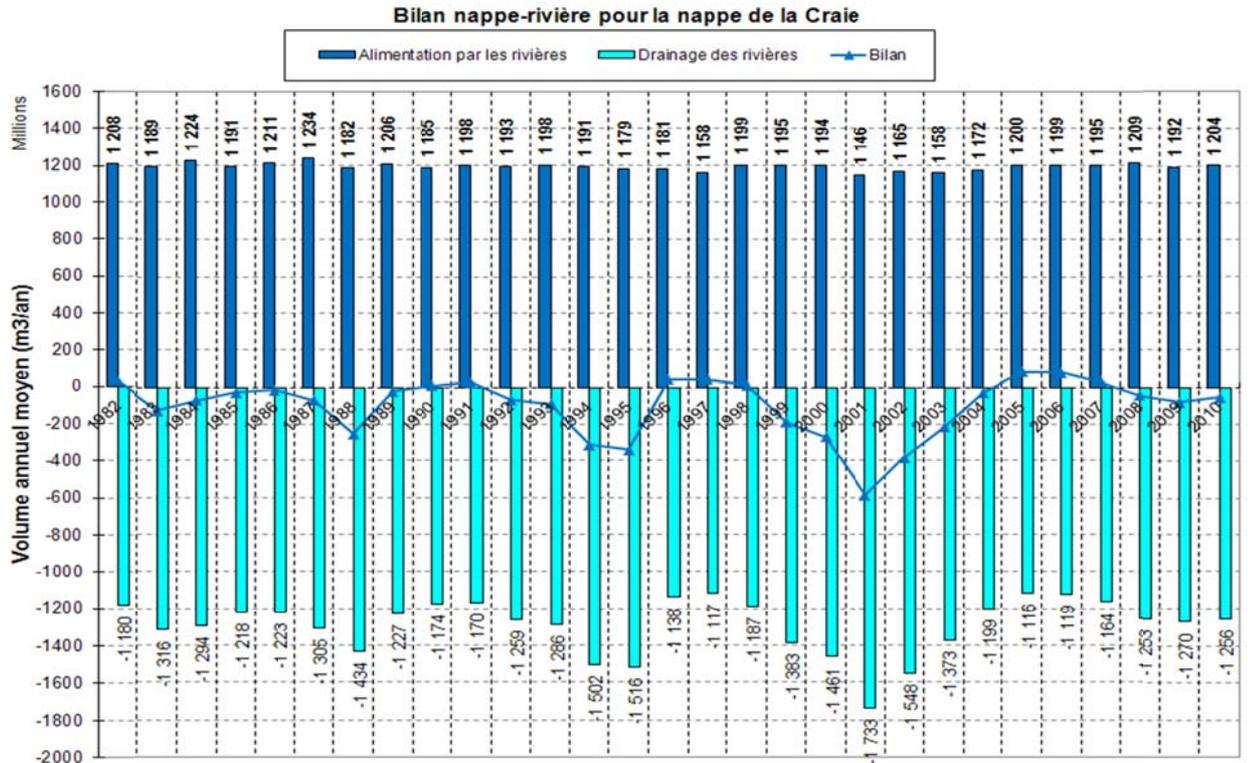


Figure 23 : Échanges nappe-rivières simulés dans le Nord-Pas de Calais

La Figure 24 présente la localisation et le sens des échanges pour l'état piézométrique hautes eaux 2001. La nappe de la craie est drainée sur la quasi-totalité du réseau hydrographique.

Le drainage total a été évalué à 1,1 milliard de m³/an dans l'Atlas des eaux souterraines, 2006. Le modèle reproduit cet ordre de grandeur.

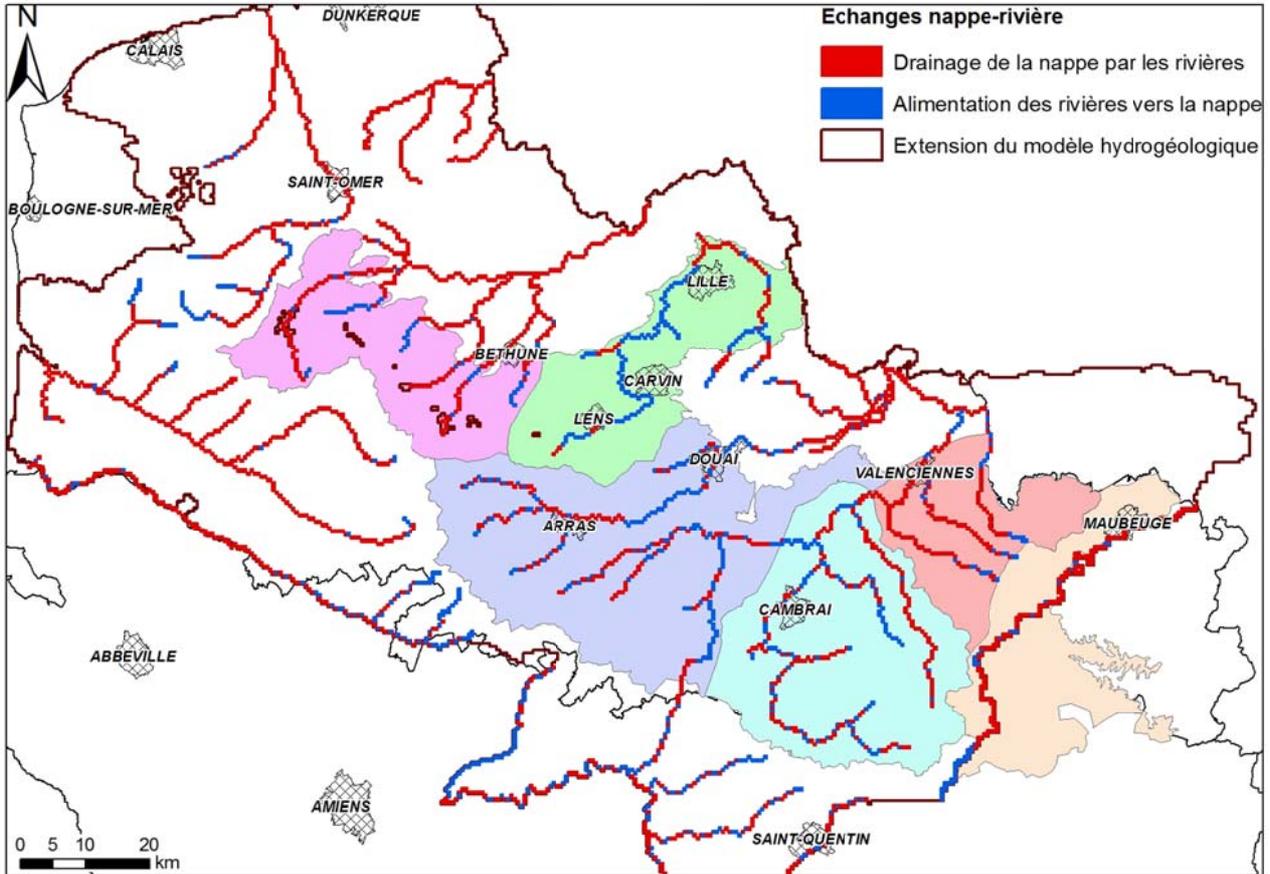


Figure 24 : Sens des échanges nappe-rivières (état piézométrique hautes eaux 2001)

En plusieurs endroits, ce sont les cours d'eau qui alimentent la nappe (en bleu sur la figure). Les pertes sont localisées essentiellement le long de la Deûle canalisée, au niveau des champs captants du sud de Lille, de la Scarpe canalisée, de la Sensée canalisée ou de l'Escaut en aval de Cambrai.

La dynamique des échanges nappe-rivière est bien reproduite, tant en volumes échangés qu'en localisation de ces échanges.

3.7.3. Échanges entre couches

Les échanges de la nappe de la craie avec les couches supérieures, peu productives, sont négligeables.

Dans le secteur de Lille, une drainance descendante ou ascendante peut être observée, induite par le différentiel de charge existant avec la nappe du Calcaire carbonifère. En 1973, alors que la nappe du Calcaire carbonifère était intensément exploitée dans le secteur de Lille, l'alimentation de la nappe du Calcaire par celle de la Craie était estimée à 36,6 millions de m³/an. L'importance de ces échanges sera affinée plus en détail au vu de la modélisation du Calcaire carbonifère en cours.

3.7.4. Synthèse du bilan hydraulique de la nappe

Ainsi que l'illustre la Figure 25, le bilan de la nappe de la Craie est largement dominé par l'infiltration pluviale, variable dans le temps.

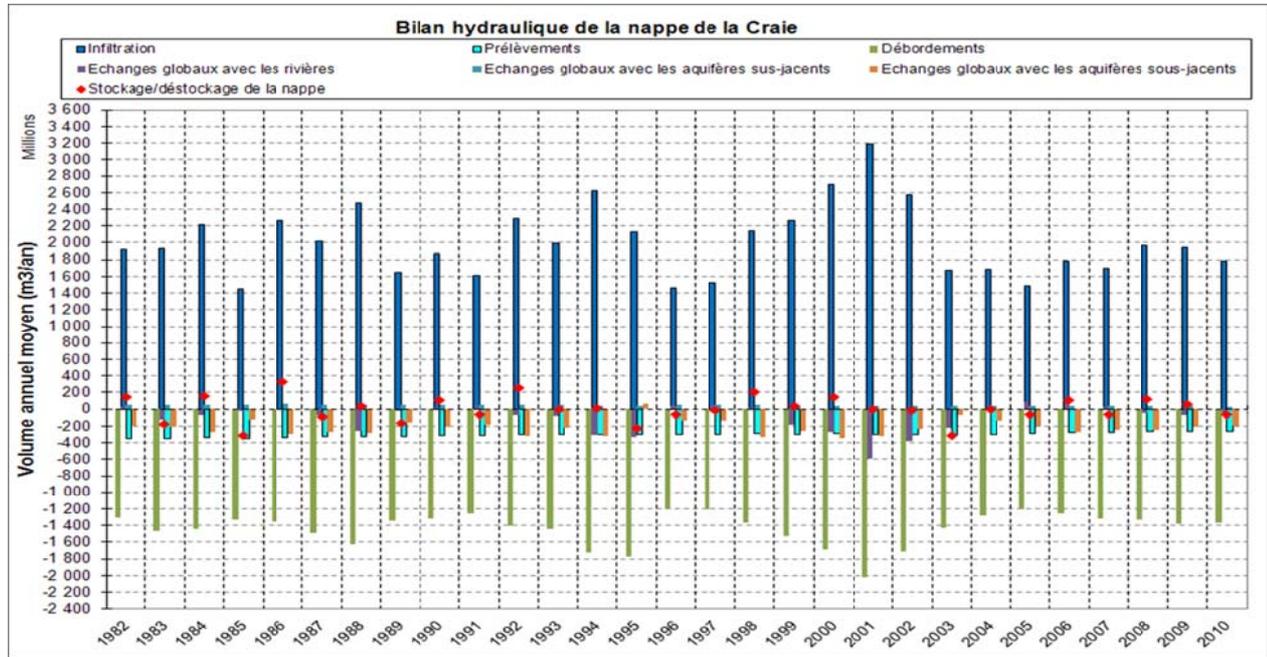


Figure 25 : Bilan hydraulique simulé de la nappe de la Craie

Les débordements, qui s'élèvent à 1200 millions de m³/an en moyenne, correspondent aux sources et émergences de la nappe de la craie, mais également à toutes les rivières. L'adéquation des débits simulés avec les observations permet d'être assuré de la bonne prise en compte des émergences de la nappe.

Le stockage / déstockage de la nappe, très variables d'une année à l'autre, reste faible en regard des autres composantes du bilan. Dans l'ensemble, la nappe est très réactive aux apports pluviométriques : une forte infiltration engendre un fort drainage par les cours d'eau et des débordements élevés, sans que cela constitue un apport net pour la nappe.

Rappelons par ailleurs que les coefficients d'emmagasinement de l'aquifère crayeux lorsque la nappe est libre sont faibles (de 1 à 5 %). La ressource en eau est fortement tributaire de la pluviométrie.

4. Conclusions

Le calage du modèle hydrodynamique a été réalisé en transitoire au pas de temps mensuel de 1982 à 2010. Ce calage s'appuie sur l'existence de 150 de chroniques piézométriques et de différentes cartes piézométriques : 1995, 1997, 2001 et 2009. En complément, les chroniques de débit des rivières enregistrées sur plusieurs stations hydrométriques de la région ont été prises en compte pour contrôler la validité des flux hydrauliques simulés.

Le modèle hydrodynamique comprend 9 couches, dont 3 niveaux aquifères construit sur la base d'un modèle géologique.

Les paramètres hydroclimatiques introduits dans le modèle dépendant de la nature du recouvrement de surface et des possibilités plus ou moins importantes de stockage de l'eau dans le sol ont été préalablement calés à l'aide de 10 modèles globaux basés sur le schéma Gardenia. Les données météorologiques : pluies, ETP et paramètres de sol, ont été spatialisées en 16 zones.

Les prélèvements annuels entre 1982 et 2008 industriels, agricoles et collectifs ont été distribués de façon uniforme sur l'ensemble des ouvrages du champ captant considéré.

Le calage a consisté en une distribution spatiale fine et réalistes des perméabilités et les coefficients d'emmagasinement, en particulier pour la craie séno-turonienne.

Rappelons que la dimension des mailles est de 500 m de côté, cette modélisation s'inscrit dans le cadre d'une problématique régionale, valable à cette échelle ou du moins à celle de la masse d'eau.

Pour la masse d'eau 1003 : Craie de la vallée de la Deûle, concernant l'agglomération lilloise et les principaux champs captants de cette agglomération, le modèle restitue de manière satisfaisante les observations. Si, pour quelques piézomètres, les niveaux simulés diffèrent de quelques mètres des niveaux observés, les évolutions simulées et les tendances restituées sur 27 années sont proches des observations faites.

Pour certains ouvrages, notamment les plus septentrionaux, les niveaux observés sont plus difficiles à reproduire. La géométrie du maillage (mailles de 500 m de côté) ne permet pas ici de simuler de manière détaillée les tendances observées, ce secteur étant l'un des plus aménagés de la région. De ce fait, les chroniques piézométriques sont très influencées par les prélèvements d'eau souterraine ainsi que par divers aménagements souterrains (structures enterrées, grands travaux ...).

Au niveau de la masse d'eau 1004 : Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys, la nappe de la Craie est pour une part contenue dans les horizons crayeux du Turonien moyen et du Cénomaniens. Les chroniques piézométriques calculées sont, dans l'ensemble, conformes aux observations, tant en niveaux absolus qu'en variations interannuelles. Plusieurs piézomètres présentent toutefois des variations piézométriques rapides de plusieurs dizaines de mètres d'amplitude traduisant vraisemblablement un milieu fissuré non pris en compte par le modèle.

Pour la masse d'eau 1006 : Craie de la vallée de la Scarpe et de la Sensée, les chroniques piézométriques sont globalement moins bien reproduites. La nappe est en partie captive. Pour le secteur sous couverture tertiaire, les évolutions piézométriques sont dans l'ensemble bien reproduites, même si leurs fluctuations sont de moindre importance. Les niveaux simulés sont corrects, mais ne restituent que peu l'amplitude des variations relevées. La taille des mailles ne permet pas de reproduire précisément le calage pour les ouvrages proches de la limite nappe libre / nappe captive. Malgré plusieurs tests réalisés afin d'améliorer le calage des ouvrages observés dans ce secteur, le modèle peine à reproduire la piézométrie de cette masse d'eau. Une approche plus locale représentant mieux la géométrie du réservoir permettrait d'améliorer ce calage.

Pour la masse d'eau 1007 : Craie du Valenciennois, les 6 chroniques disponibles sont, dans l'ensemble, bien reproduits. Dans ce secteur, la nappe de la Craie se poursuit en Belgique (Craie du bassin de Mons) où elle est exploitée par plusieurs ouvrages. Les prélèvements réalisés coté belge demanderaient à être intégrés dans le présent modèle afin de mieux représenter les piézomètres situés dans la zone frontalière.

Pour la masse d'eau 1010 : Craie du Cambrésis, les niveaux piézométriques et leurs variations sont dans l'ensemble médiocrement reproduits. La modification des paramètres de calage (emmagasinement, perméabilité, colmatage des rivières) ne permet pas d'améliorer les résultats obtenus, malgré plusieurs tests réalisés, notamment sur l'épaisseur de la craie productive. Le réseau hydrographique dans cette zone est par ailleurs fortement canalisé, avec des interactions avec la nappe sans doute non négligeables.

Nous disposons de trop peu de chroniques pour la masse d'eau 1017 : Craie de la bordure du Hainaut, pour obtenir un calage satisfaisant.

Malgré l'étendu et la complexité du domaine modélisé et des caractéristiques spécifiques de l'aquifère crayeux, les résultats de la modélisation en régime transitoire sont satisfaisants et prometteurs. Niveaux moyens, fluctuations annuelles et tendances générales sont assez bien reproduits.

Plusieurs analyses de sensibilité ont été menées sur le rôle hydraulique de la faille de Courchelette, sur les données de précipitation et sur l'épaisseur productive de la Craie. Elles mettent clairement en évidence l'impact des données relatives à l'épaisseur productive de la Craie. Celle-ci, très variable, doit être revue dans des perspectives d'amélioration du modèle pour répondre à des problématiques locales.

Les bilans hydrauliques calculés par le modèle semblent représentatifs de la réalité, tant au niveau de leurs composantes d'infiltration que des échanges nappe-rivières.

Au terme de cette phase de calage en régime transitoire, le modèle peut être utilisé pour simuler différents scénarios de gestion de la nappe de la Craie, en particulier pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération métropolitaine lilloise.

La phase 4 de l'étude est quant à elle destinée à simuler l'évolution des teneurs en nitrates dans la nappe de la craie, à l'échelle des masses d'eau.

5. Bibliographie

Aquifères & Eaux souterraines en France - Tome 1 chapitre IV : Flandres-Artois-Ardennes – ouvrage collectif (2006).

Modélisation de la nappe de la craie du Nord-Pas de Calais – schéma conceptuel – calage du modèle hydrodynamique en régime permanent – BRGM/RP-59720-FR (2011).

P. Caulier - Étude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord - Thèse (1974)

J. Beckelynck – Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes – Application à la modélisation de la nappe de la Craie dans le bassin de l'Aa de la moyenne Lys – Thèse (1981).

Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive des champs captants du sud de Lille. Rapport final (2007). SAFEGE.

Bassin versant de l'Escrebieux, champ captant de Quiery La Motte. Modélisation de la nappe de la craie. Rapport définitif (2009). SB₂O Ingénierie & environnement.

Optimisation de la gestion du champ captant de Pecquencourt – Modélisation de la nappe de la craie – phase 3 (2009). SB₂O Ingénierie & environnement.

Nappe transfrontalière du Calcaire Carbonifère. État des lieux des connaissances en vue de la modélisation de son fonctionnement pour une gestion intégrée - BRGM/RP-55117-FR (2006).

Étude hydraulique globale dans le cadre du SAGE de la Sensée ref : 19600-3.1 – BC/ALP/EH Hydratec (2009).

Hydrogéologie de la Craie en France. N Crampon, JC Roux, P Bracq. Hydrogéologie n°2 1993

Surveillance piézométrique dans l'emprise de l'agglomération Lilloise, année 1988 BRGM 89 SGN 224 NPC (2009).

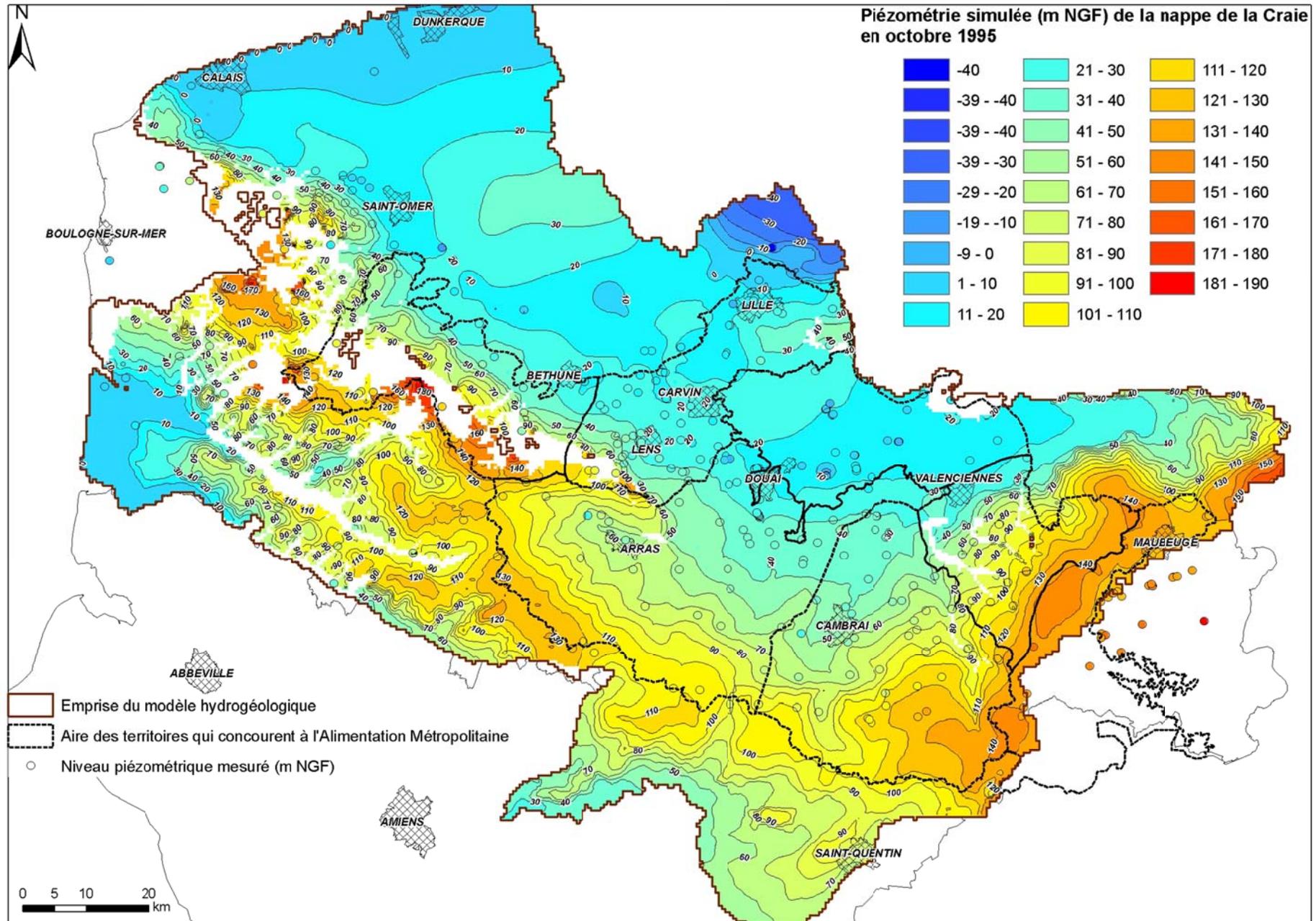
DIREN Nord-Pas de Calais - Recueil hydrologique de la région Nord-Pas de Calais (2003).

Benichou P & O Le Breton (1987) Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY. 'Agrométéorologie des régions de moyenne montagne', Toulouse (1986). Ed. INRA, Paris (Les Colloques de l'INRA, n° 39).

Lacherez-Bastin S. – Contribution à l'étude de la migration des nitrates dans le sol et la zone non-saturée de la nappe de la craie dans le nord de la France – Modélisation intégrée des nitrates dans le bassin versant de l'Escrebieux – Thèse (2005).

Annexe 1

Cartes piézométriques simulées de la nappe de la Craie



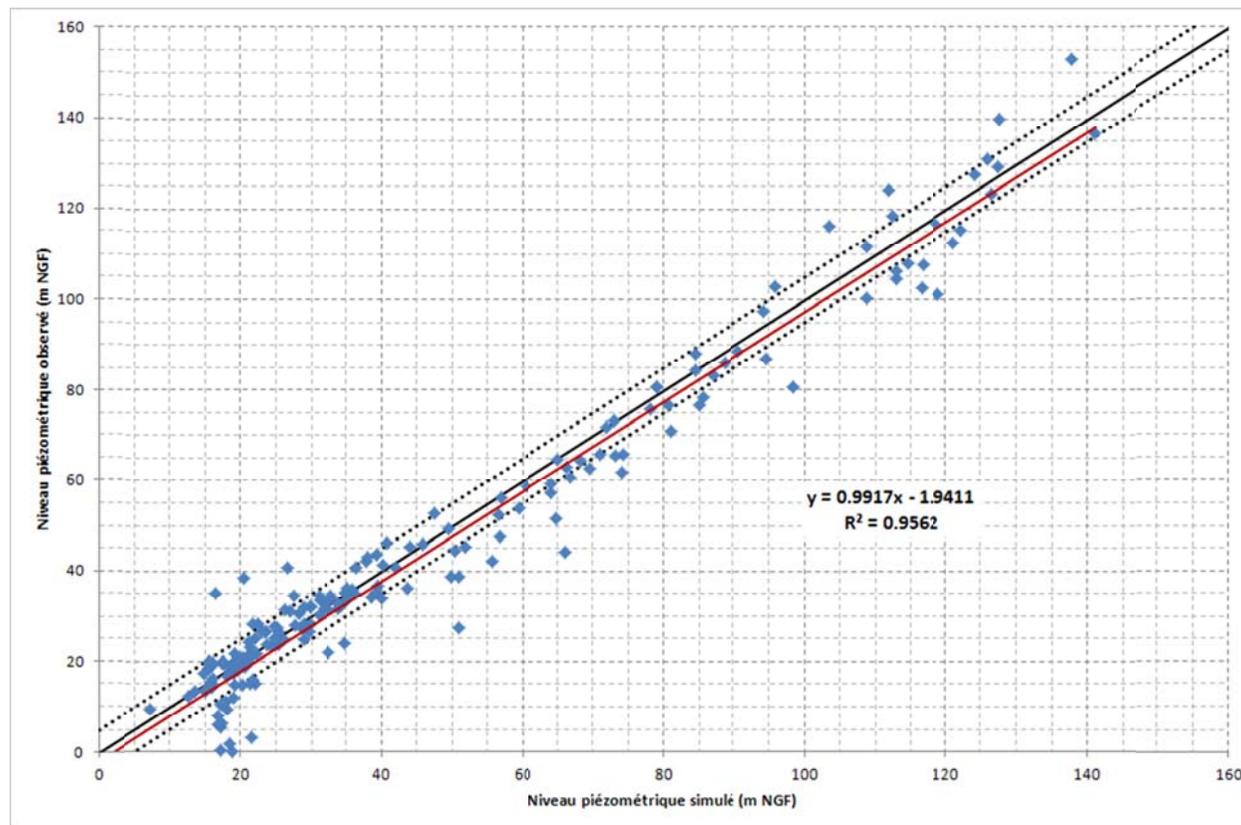
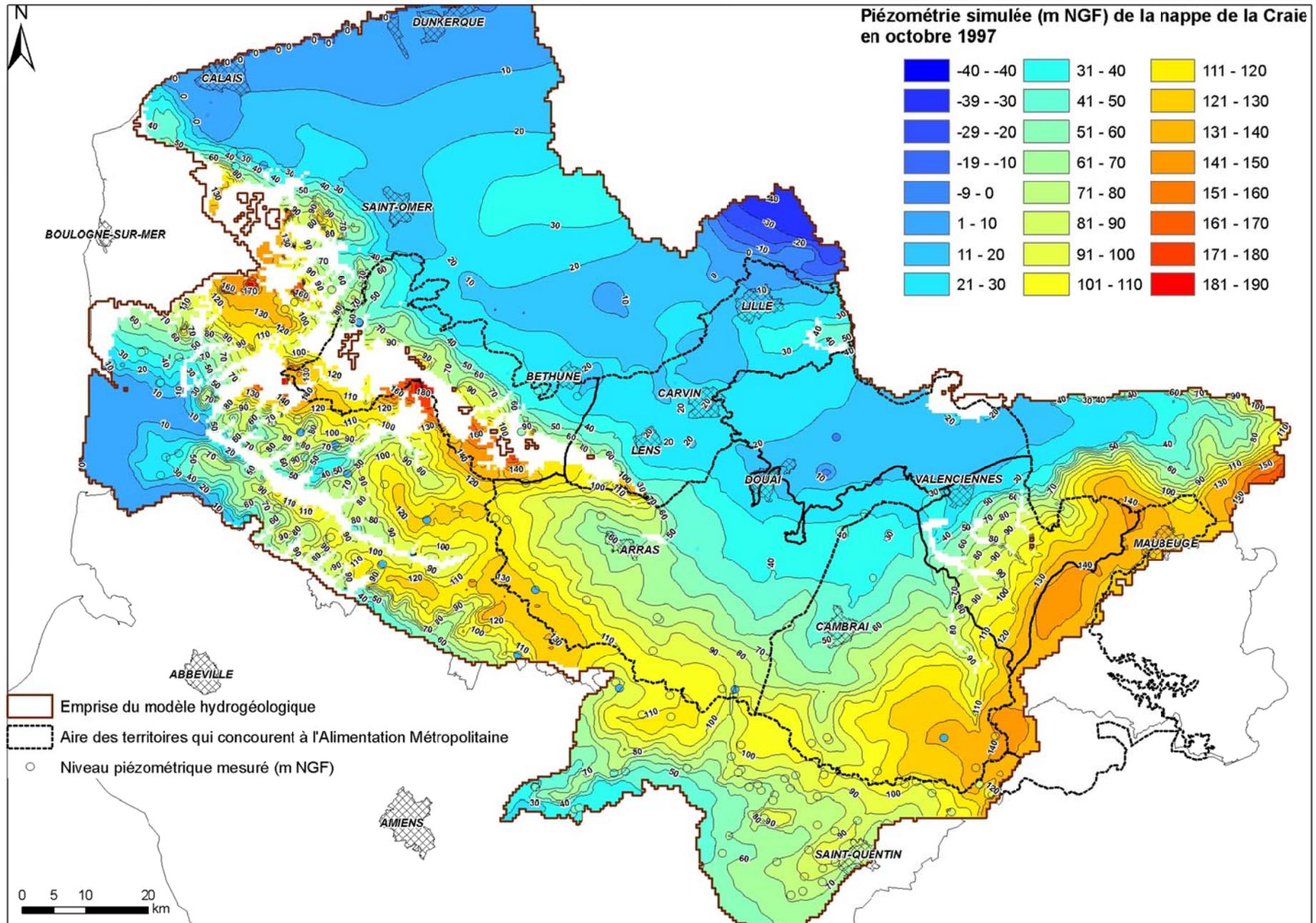


Figure 26 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 1995



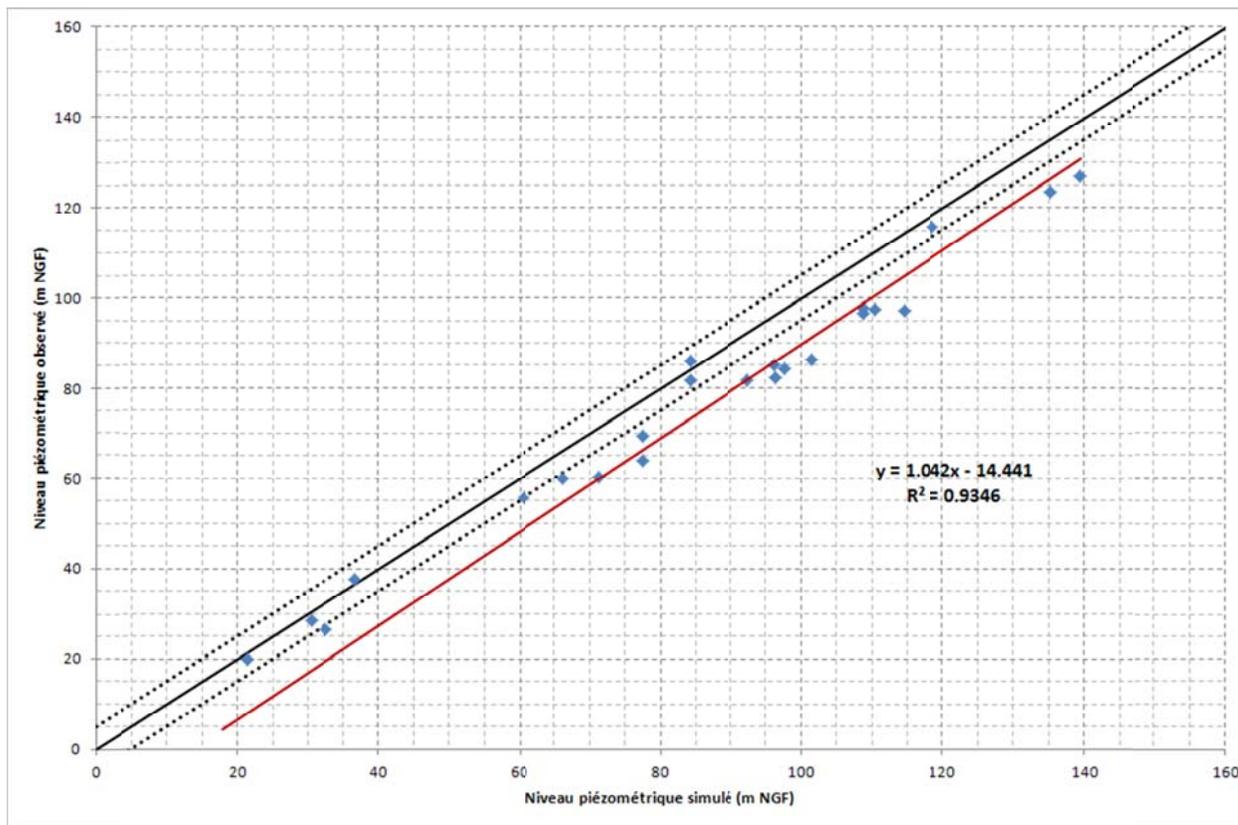
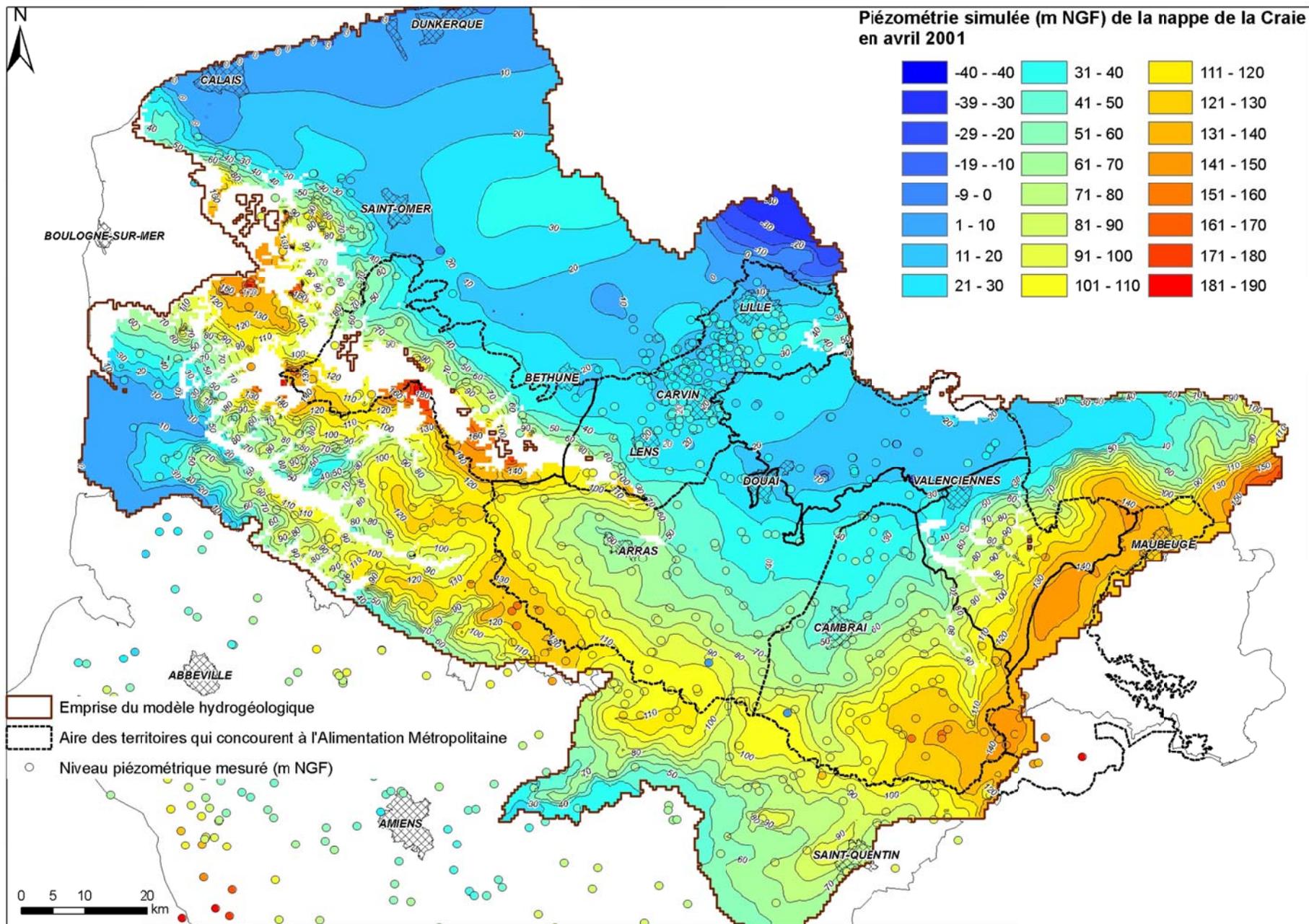


Figure 27 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique basses-eaux 1997



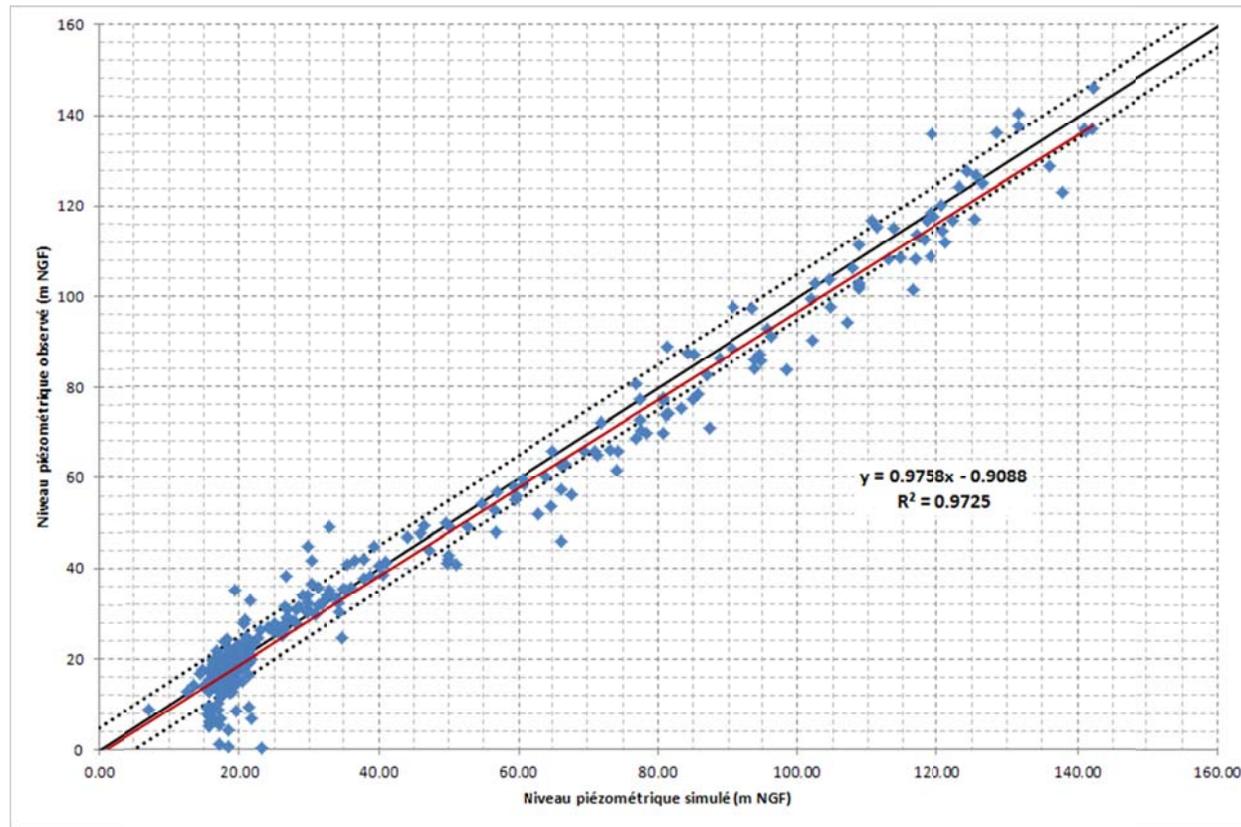
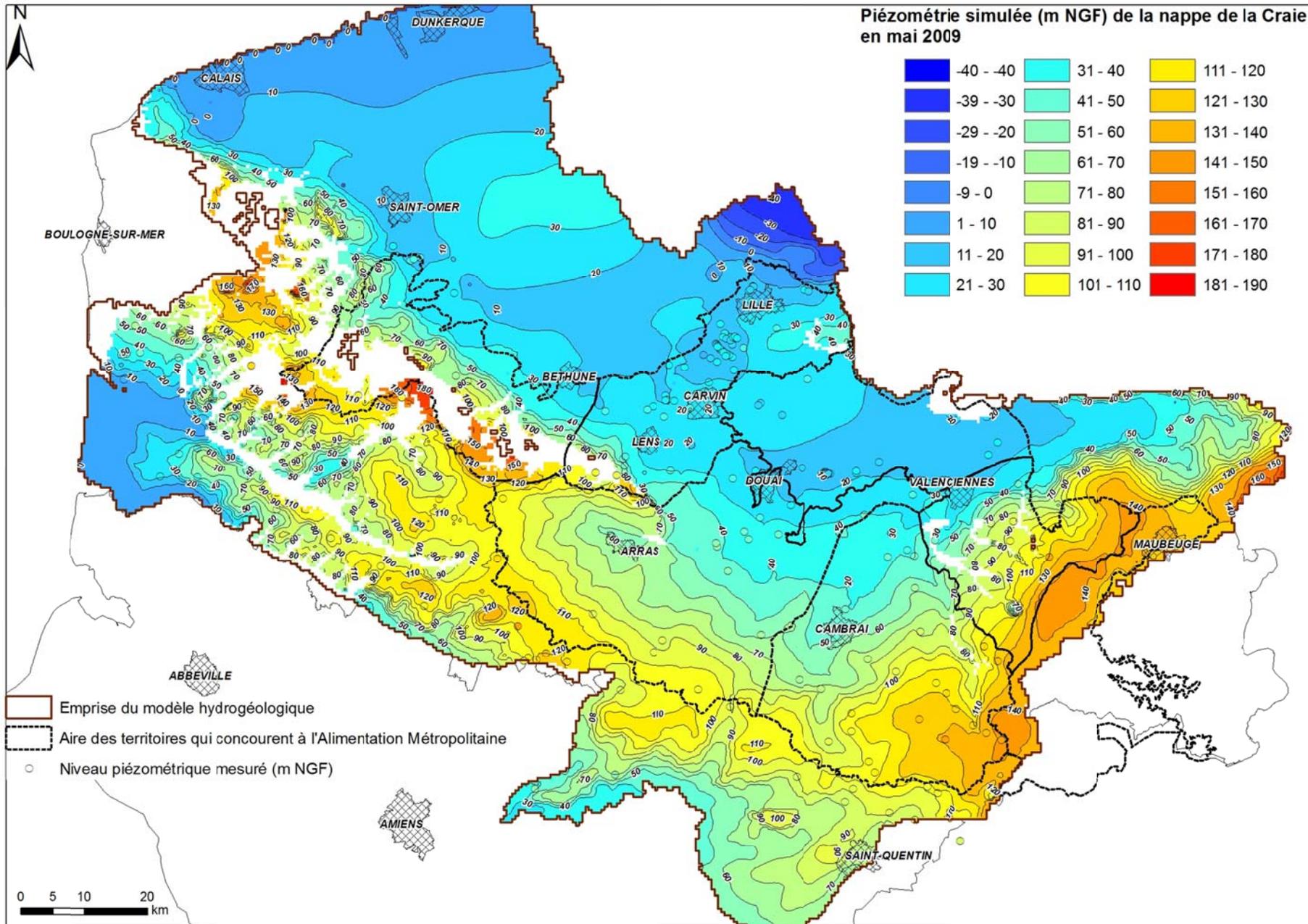
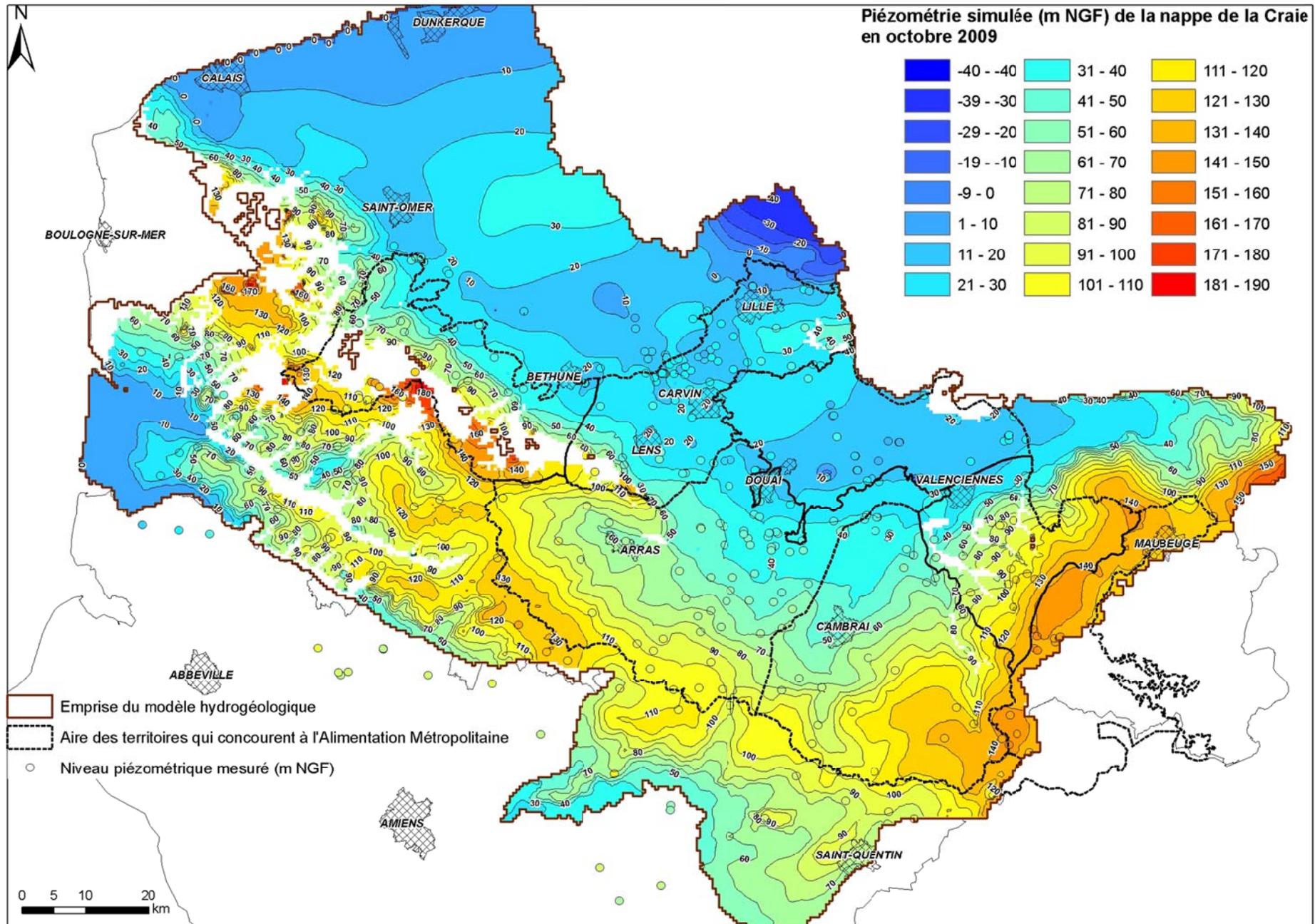


Figure 28 : Diagramme de dispersion de la carte piézométrique hautes-eaux 2001

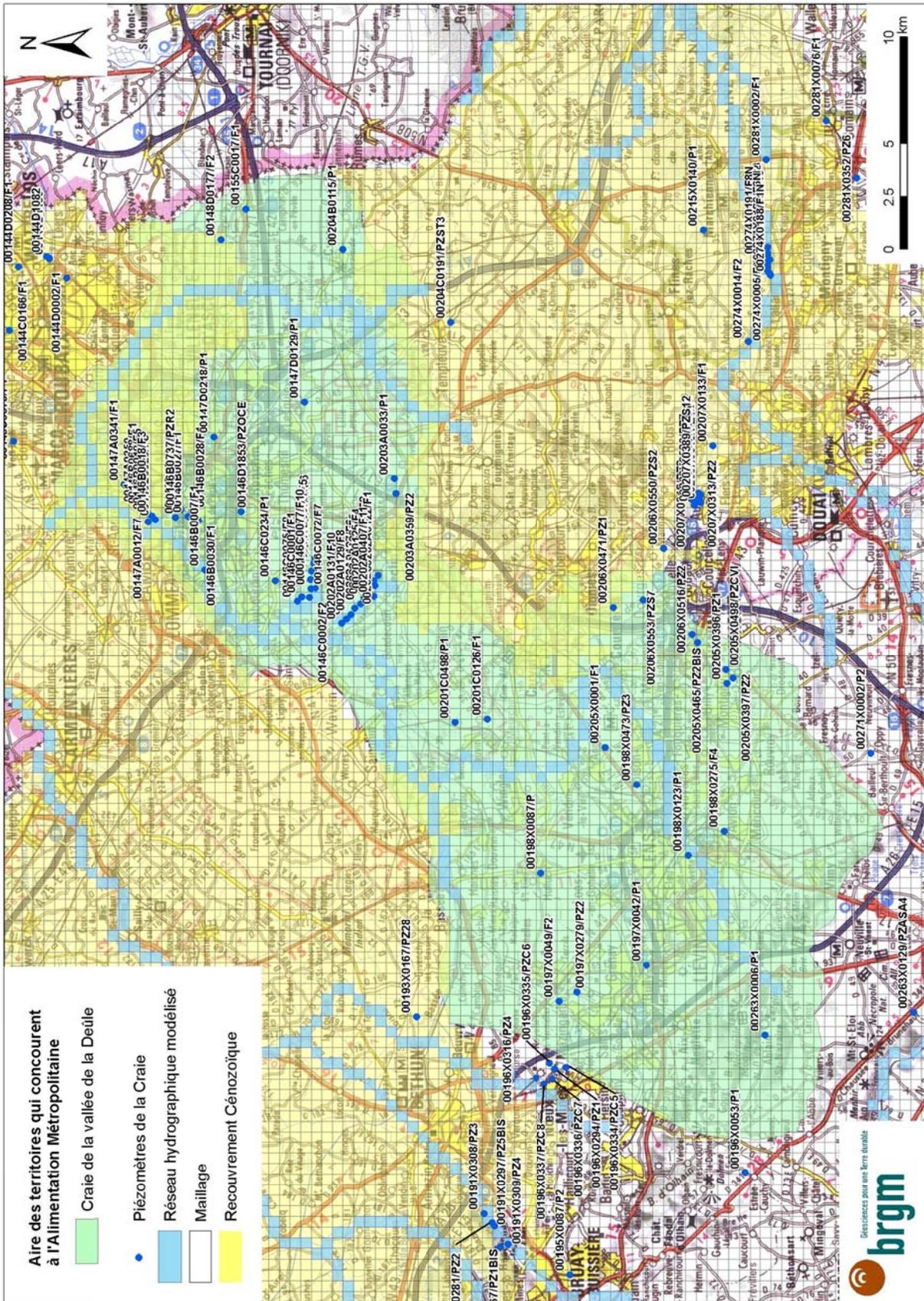


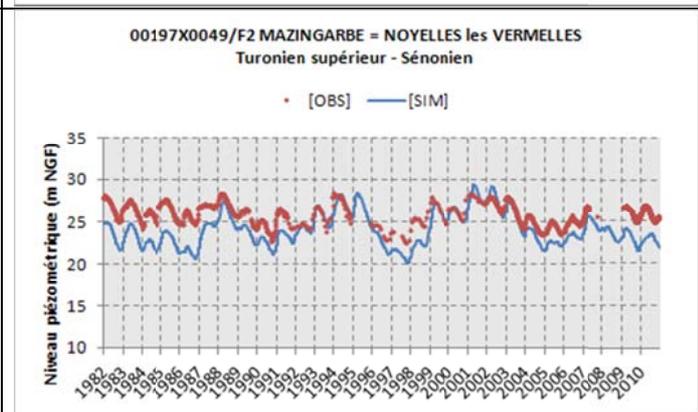
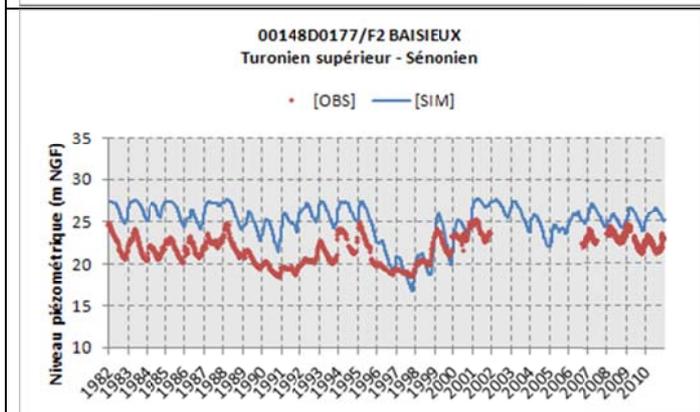
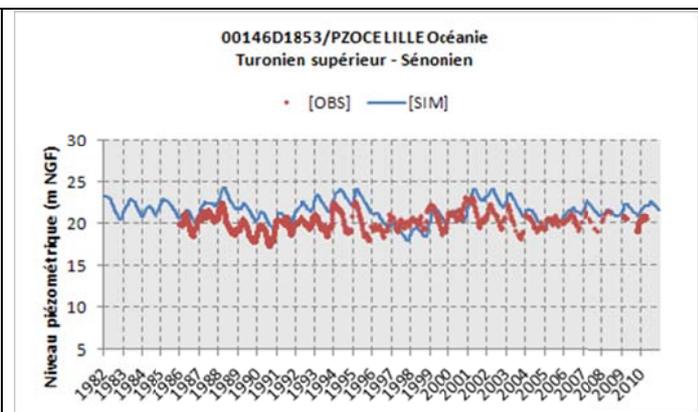
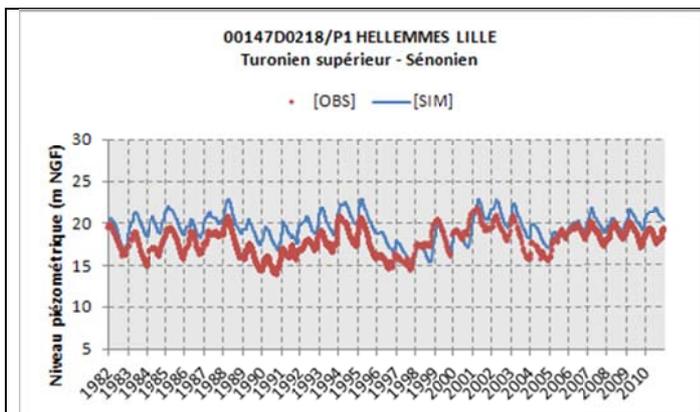
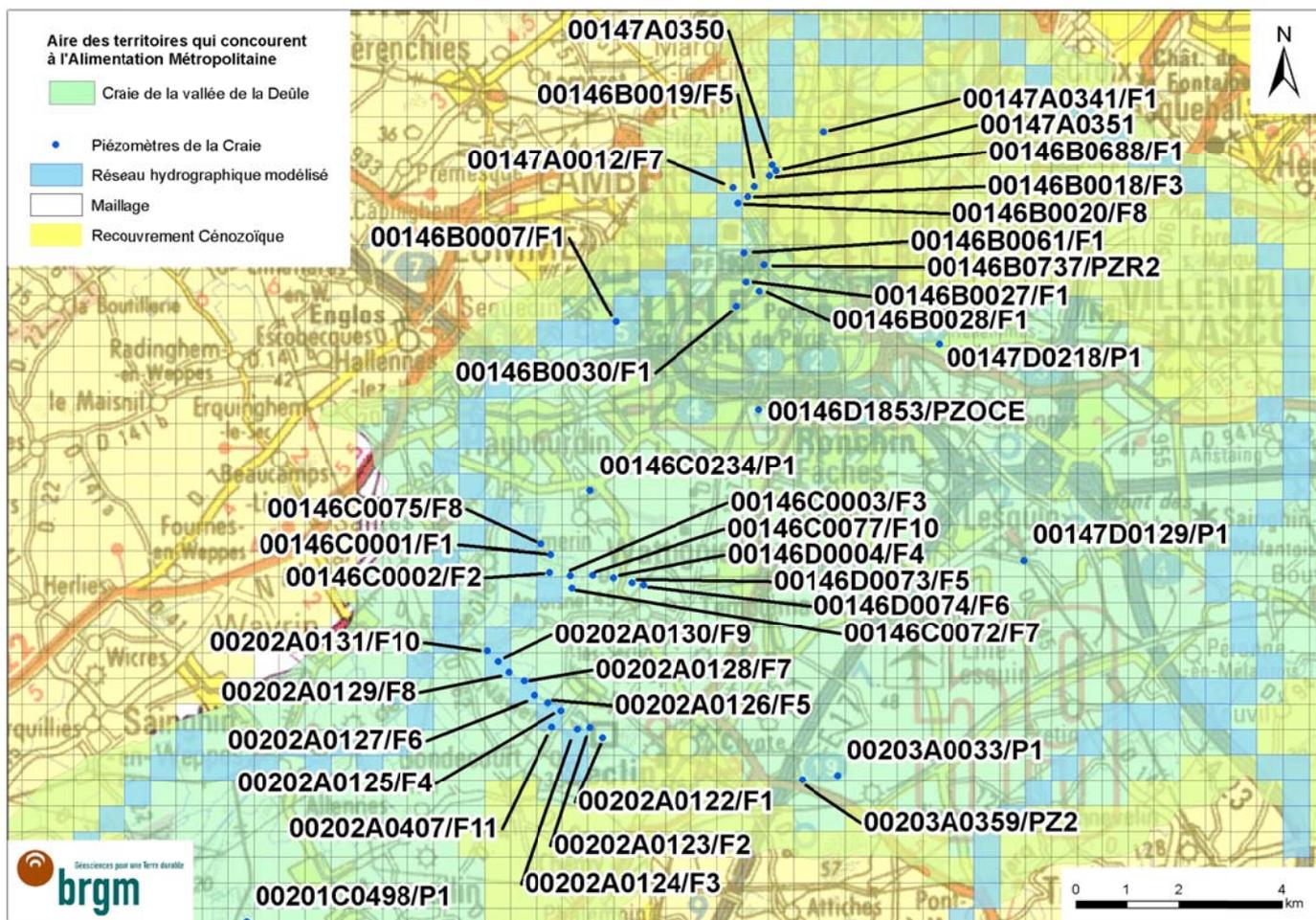


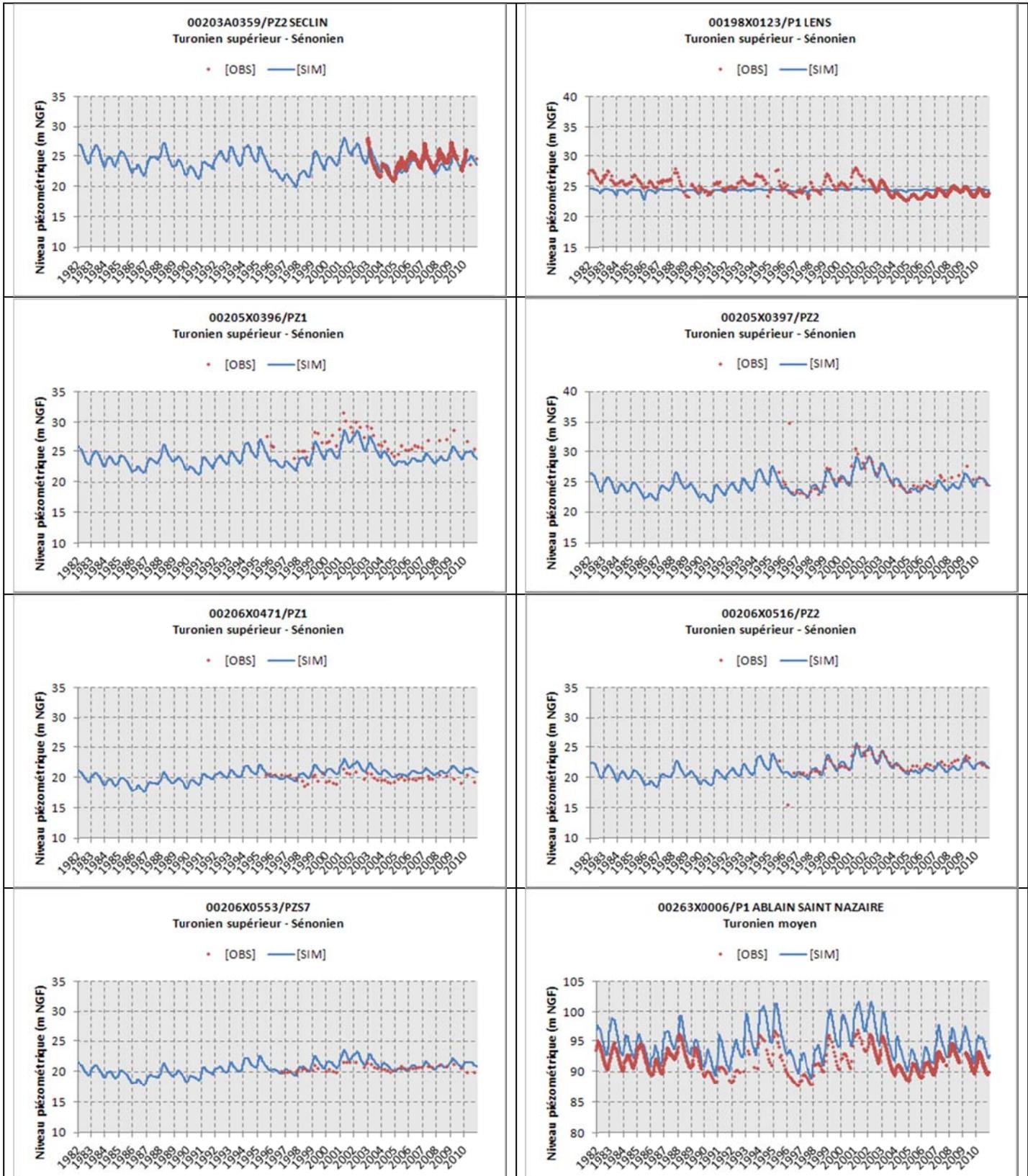
Annexe 2

Comparaisons des chroniques piézométriques observées et simulées

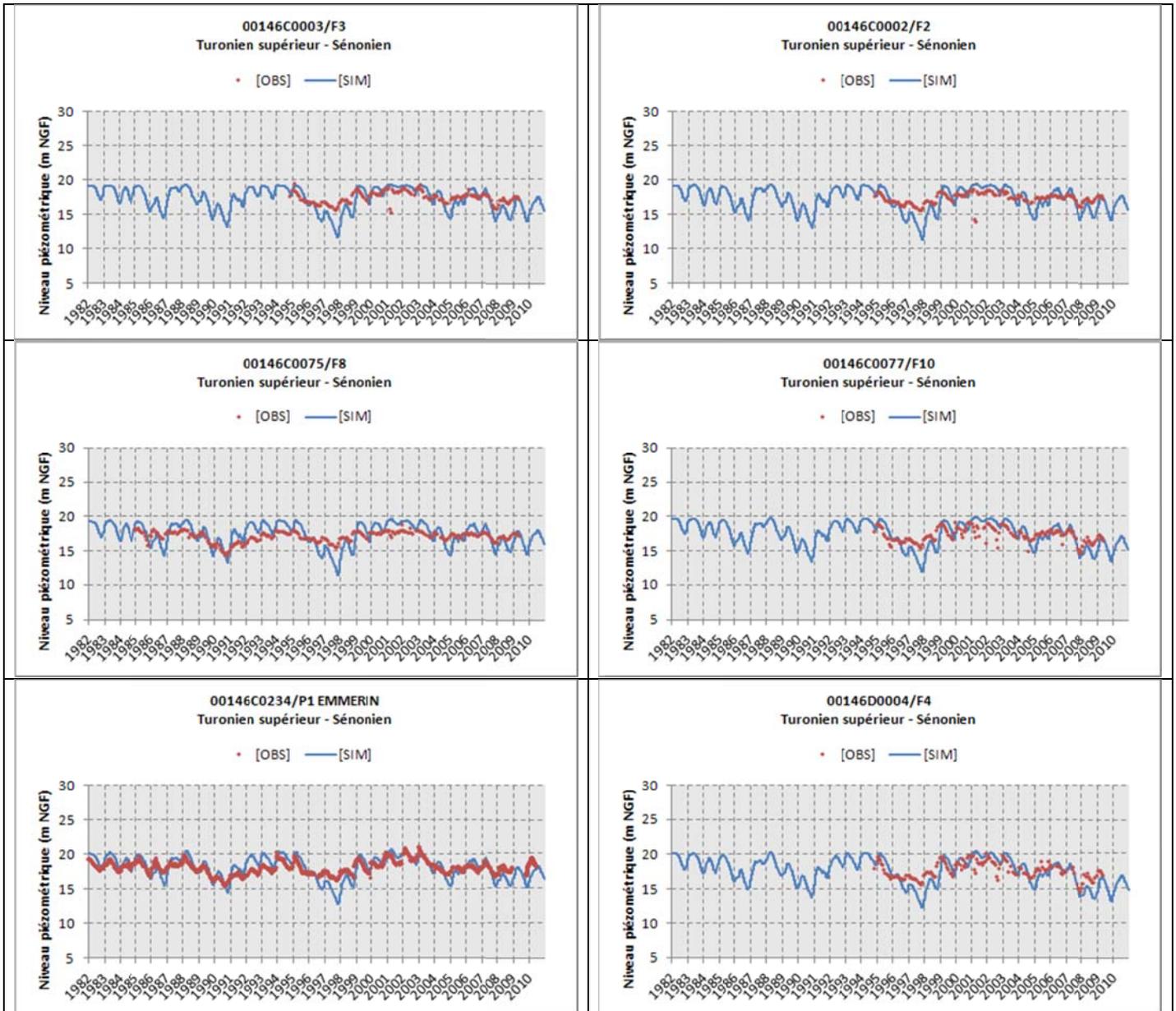
MASSE D'EAU : 1003 Craie de la vallée de la Deûle



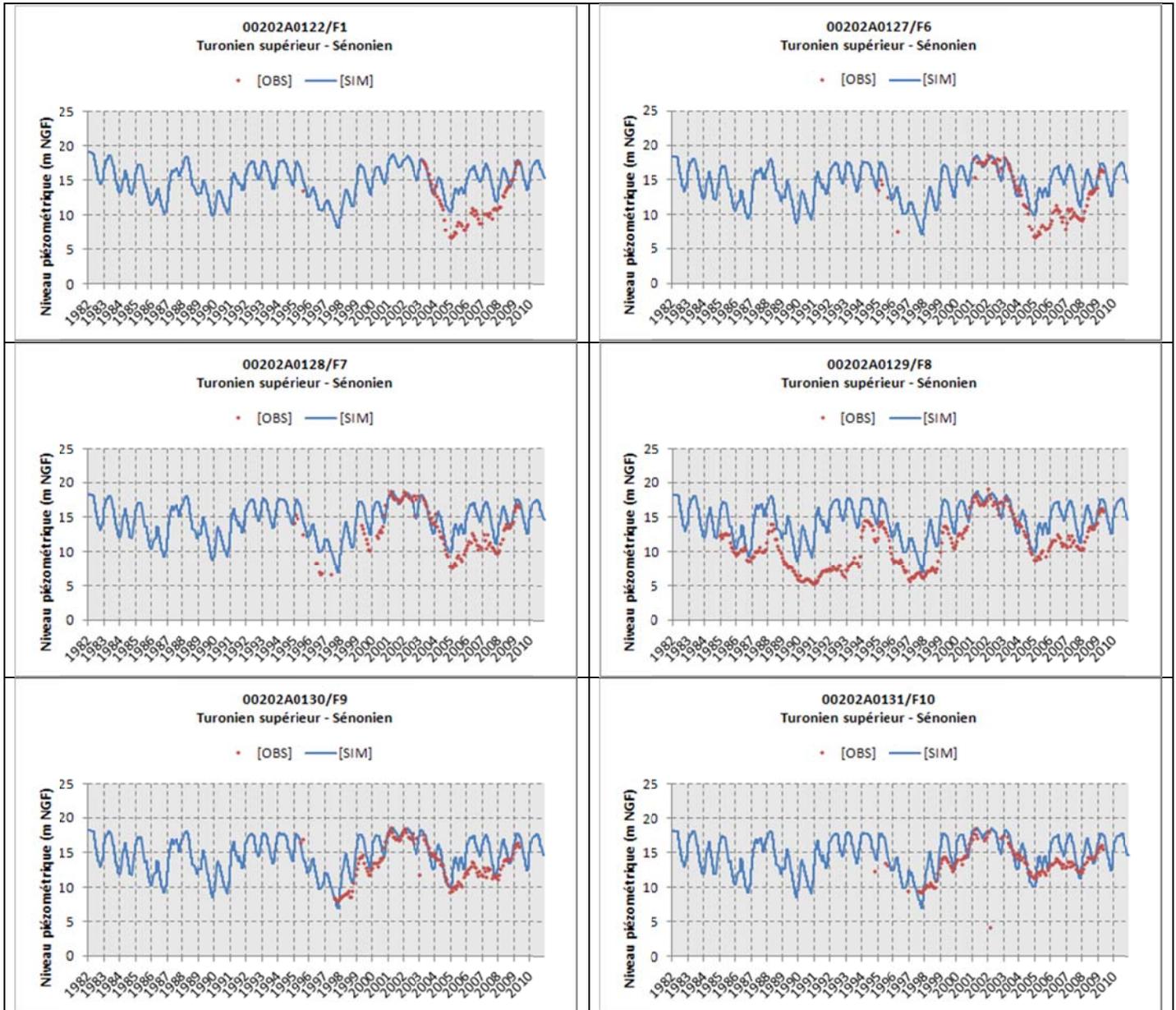




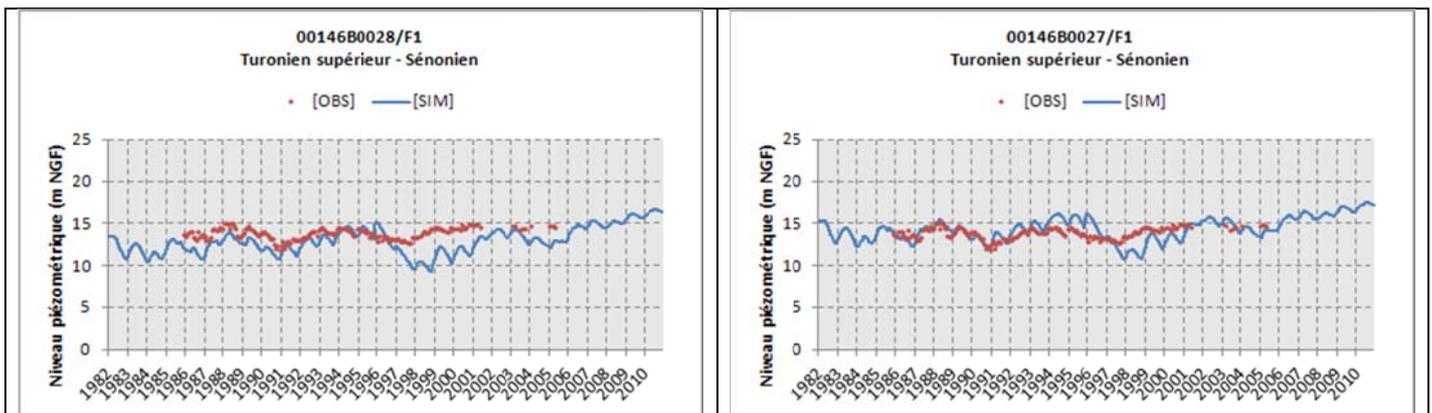
Champ captant d'Emmerin



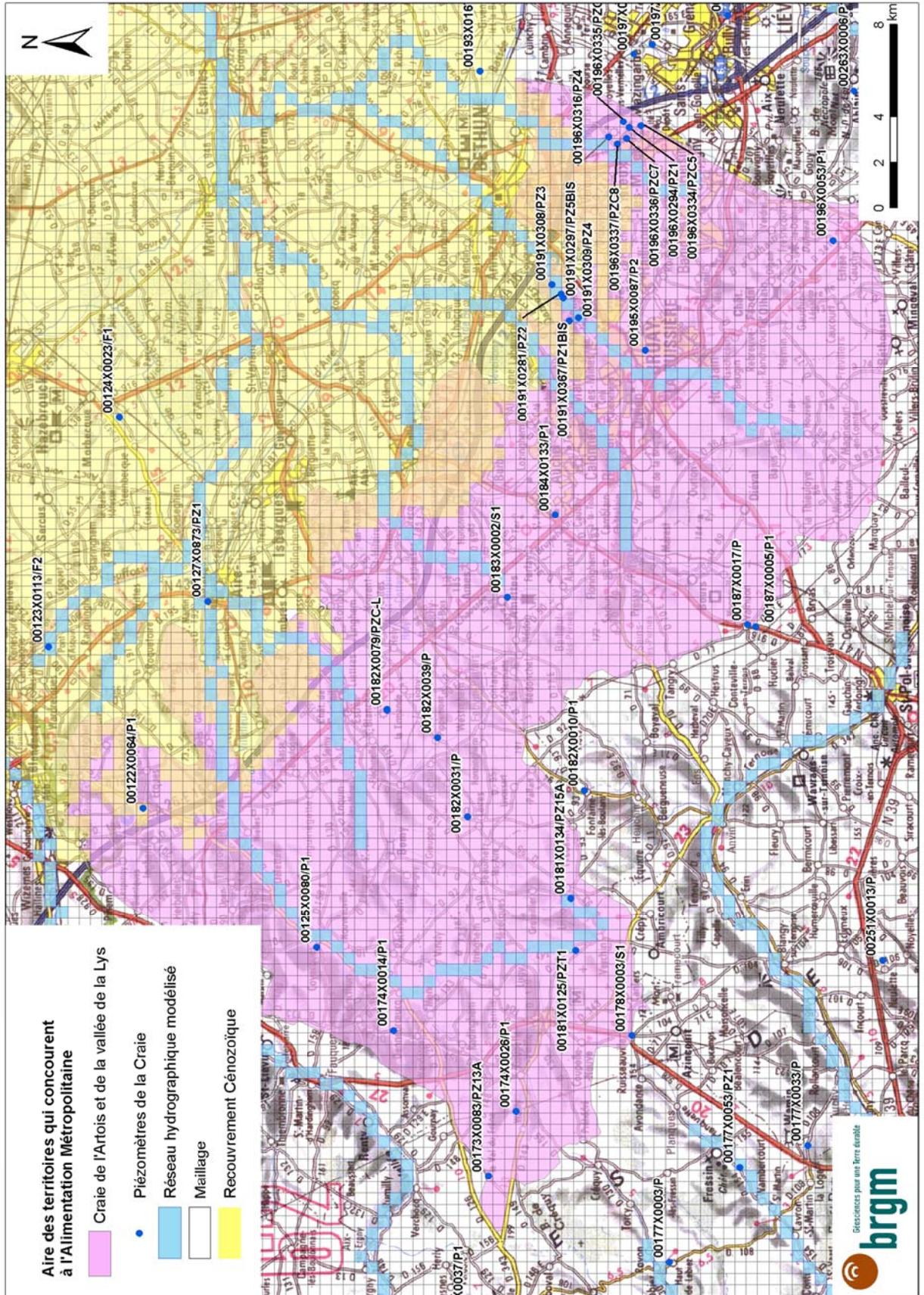
Champ captant d'Houplin-Ancoisne

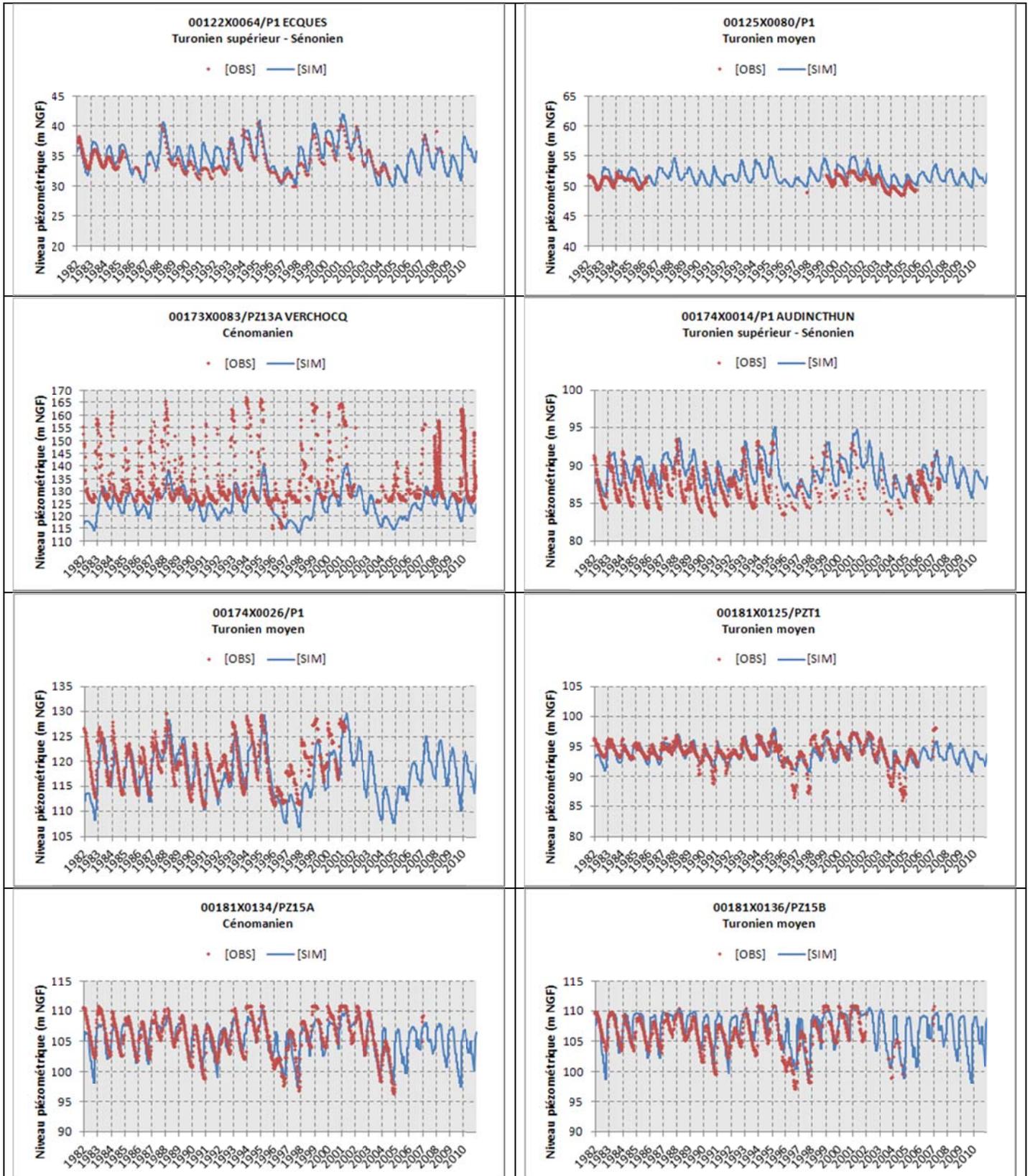


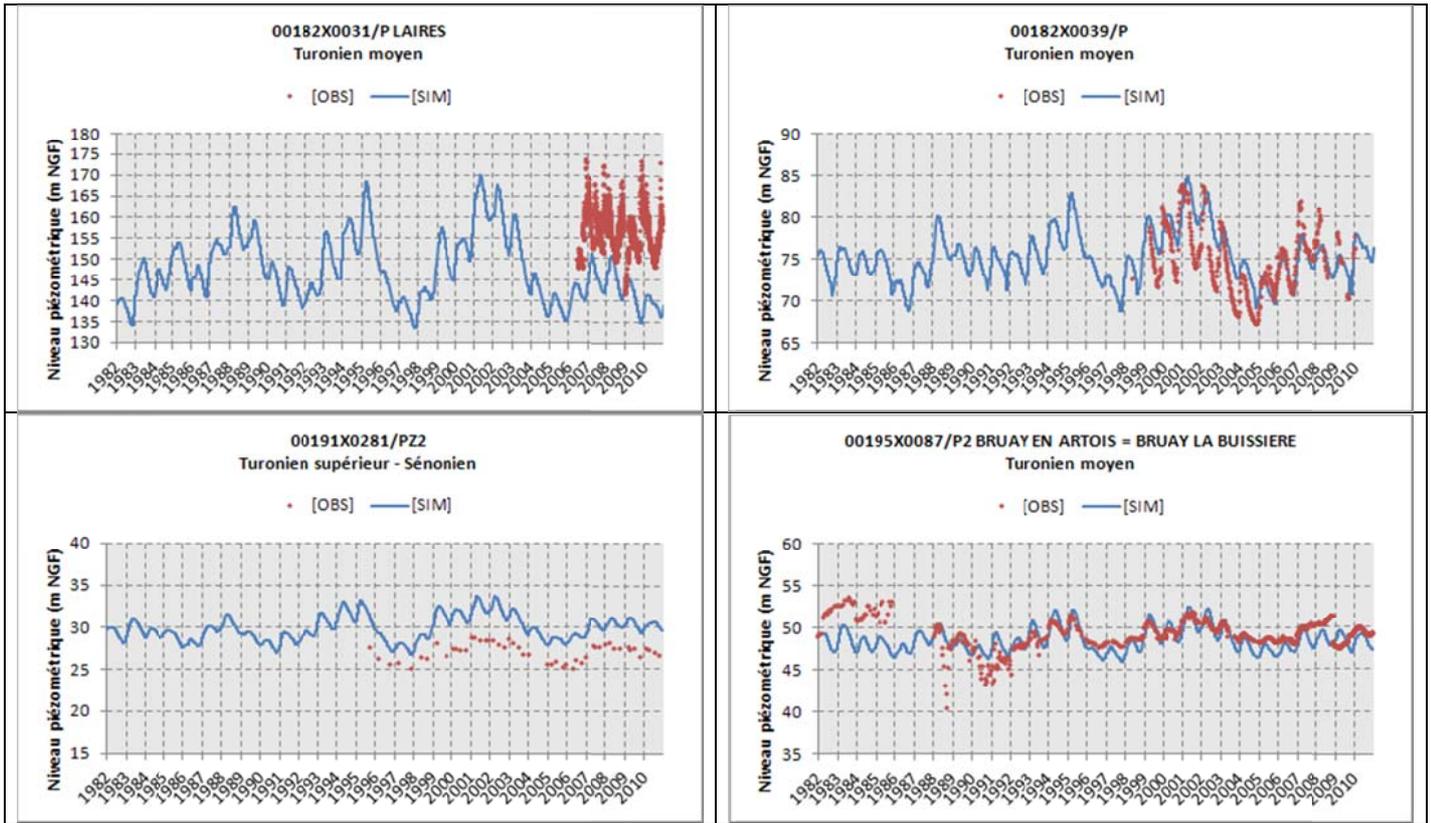
Piézomètres de Lille (LMCU)



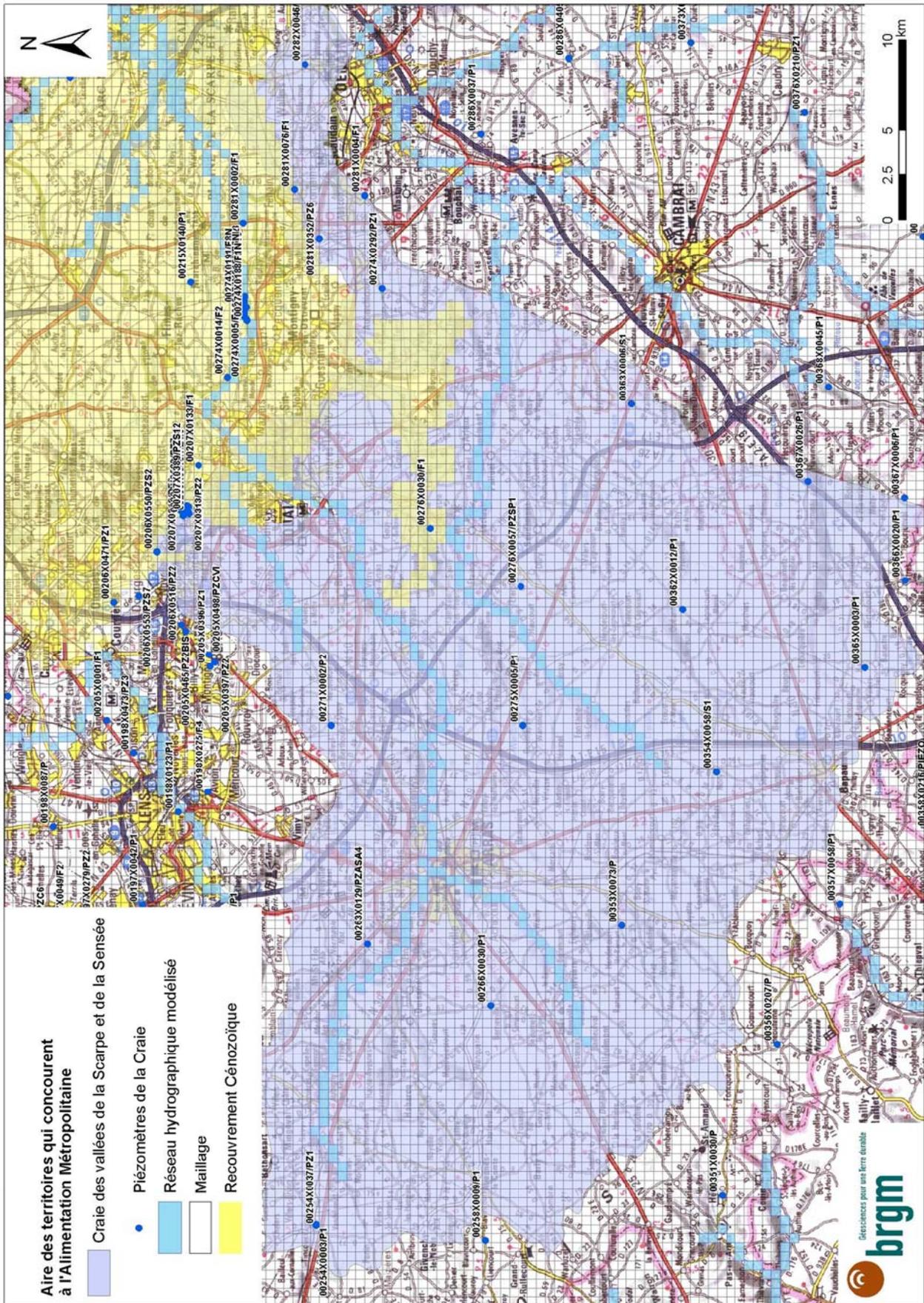
MASSE D'EAU : 1004 Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys

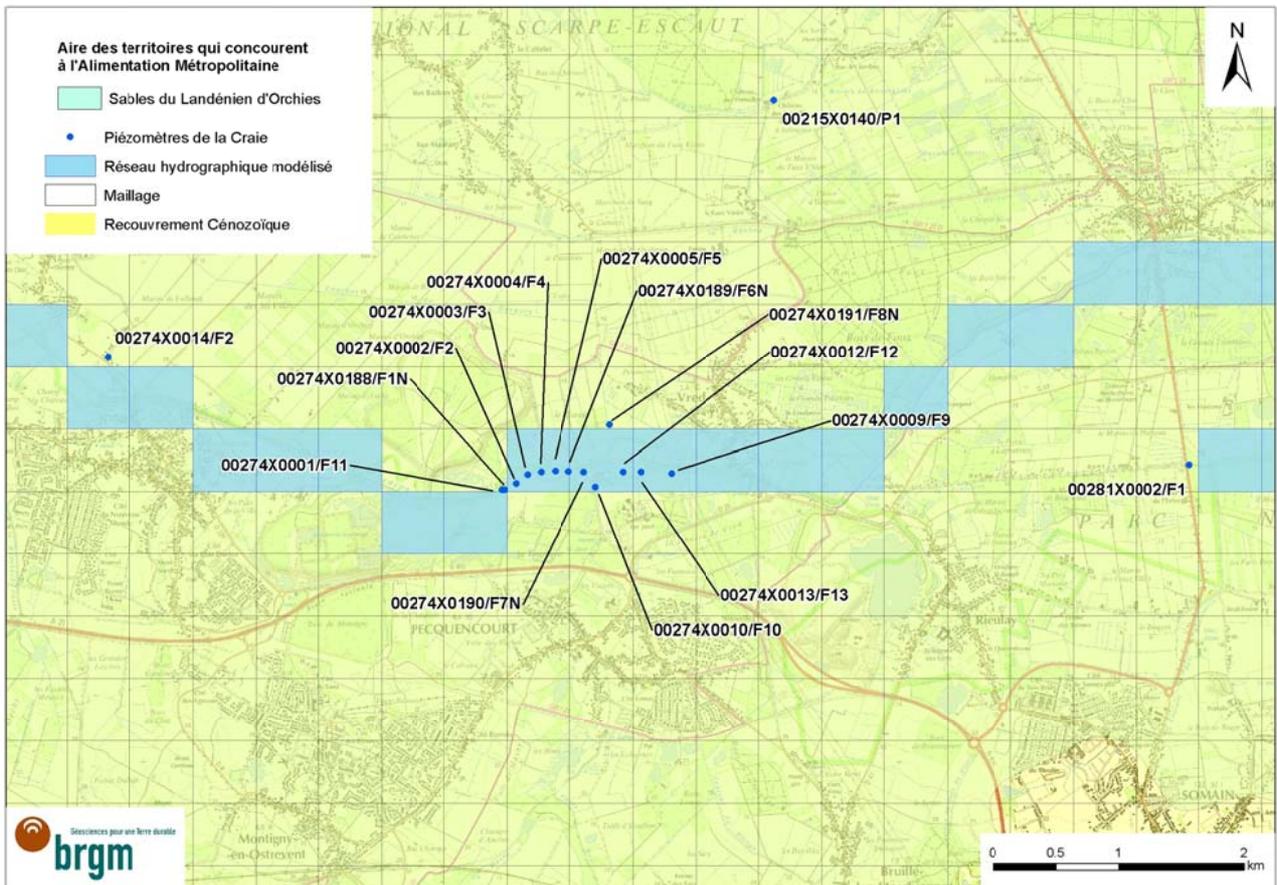
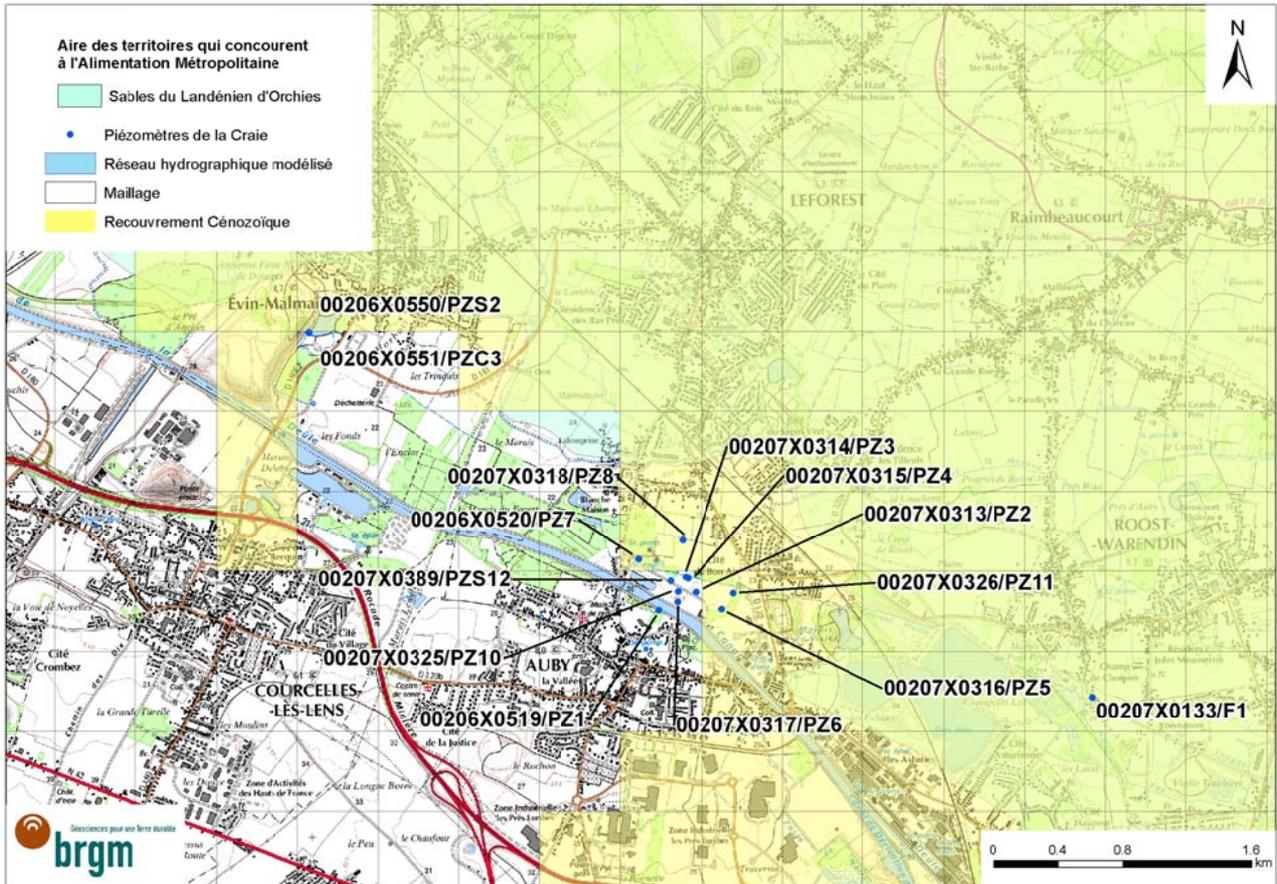


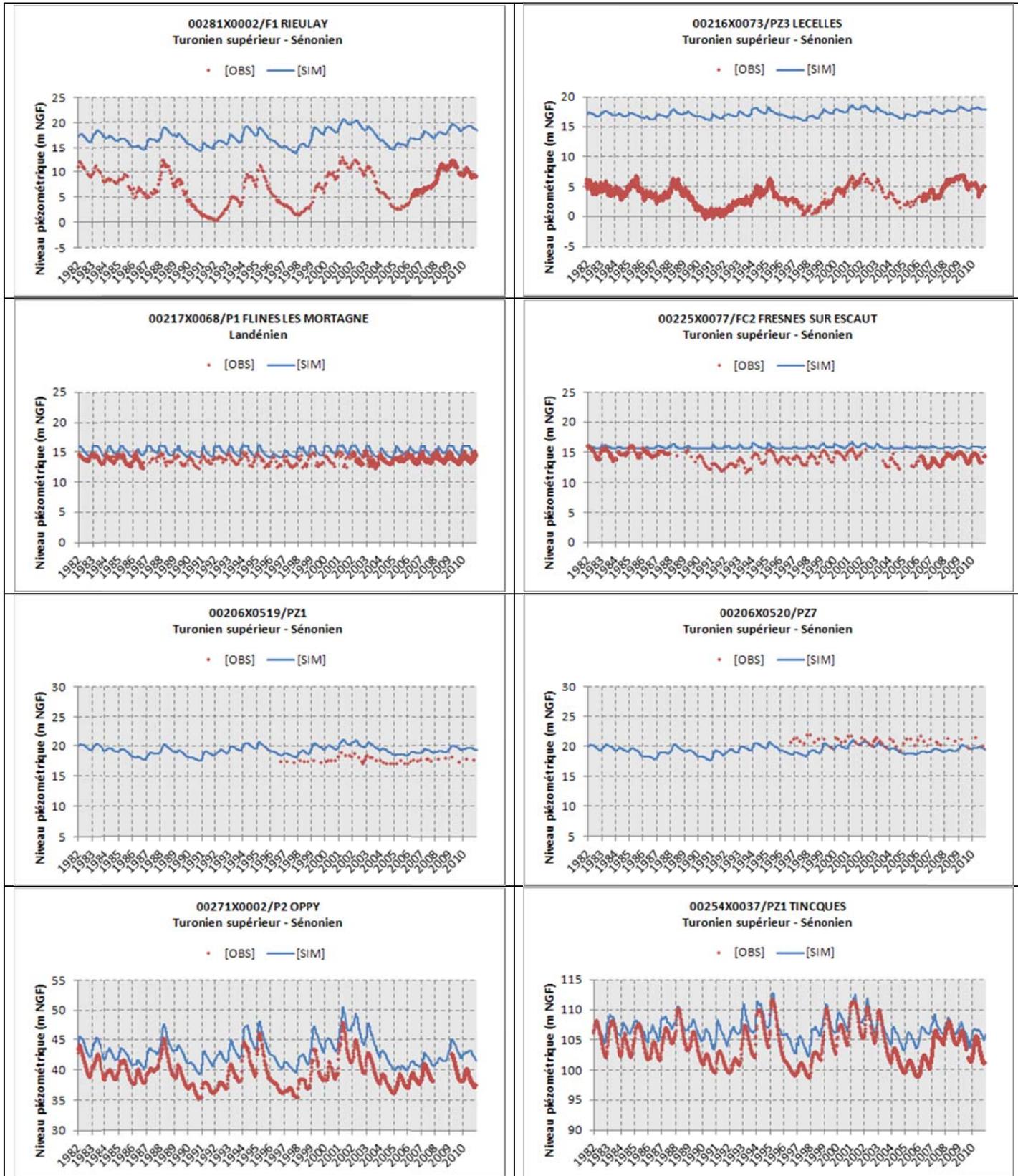


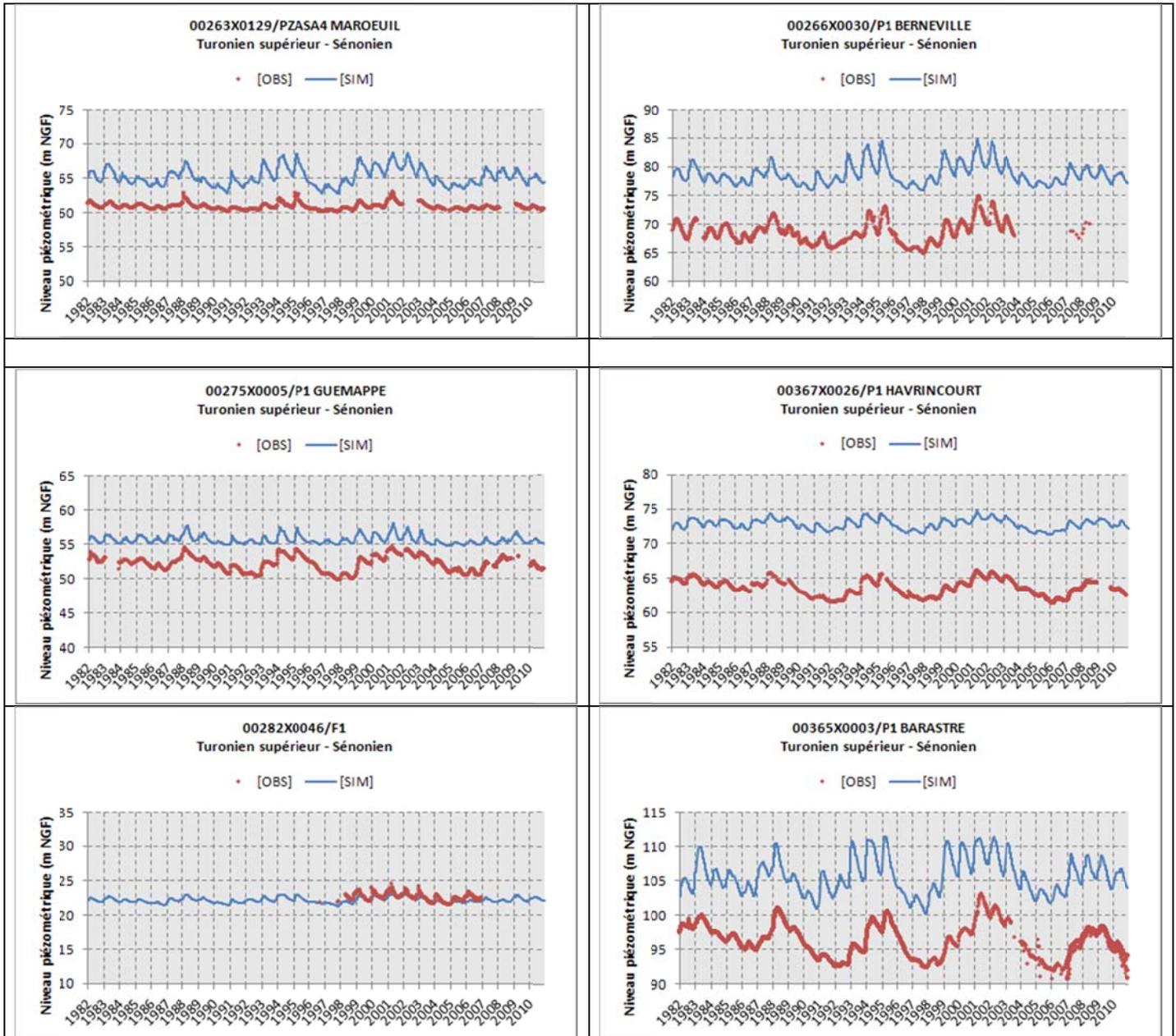


MASSE D'EAU : 1006 Craie de la vallée de la Scarpe et de la Sensée

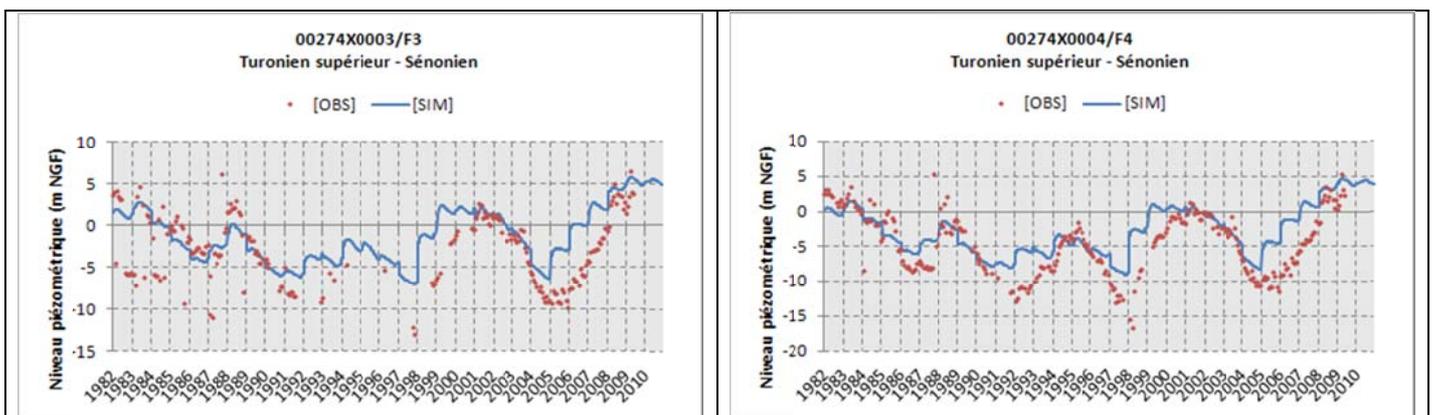


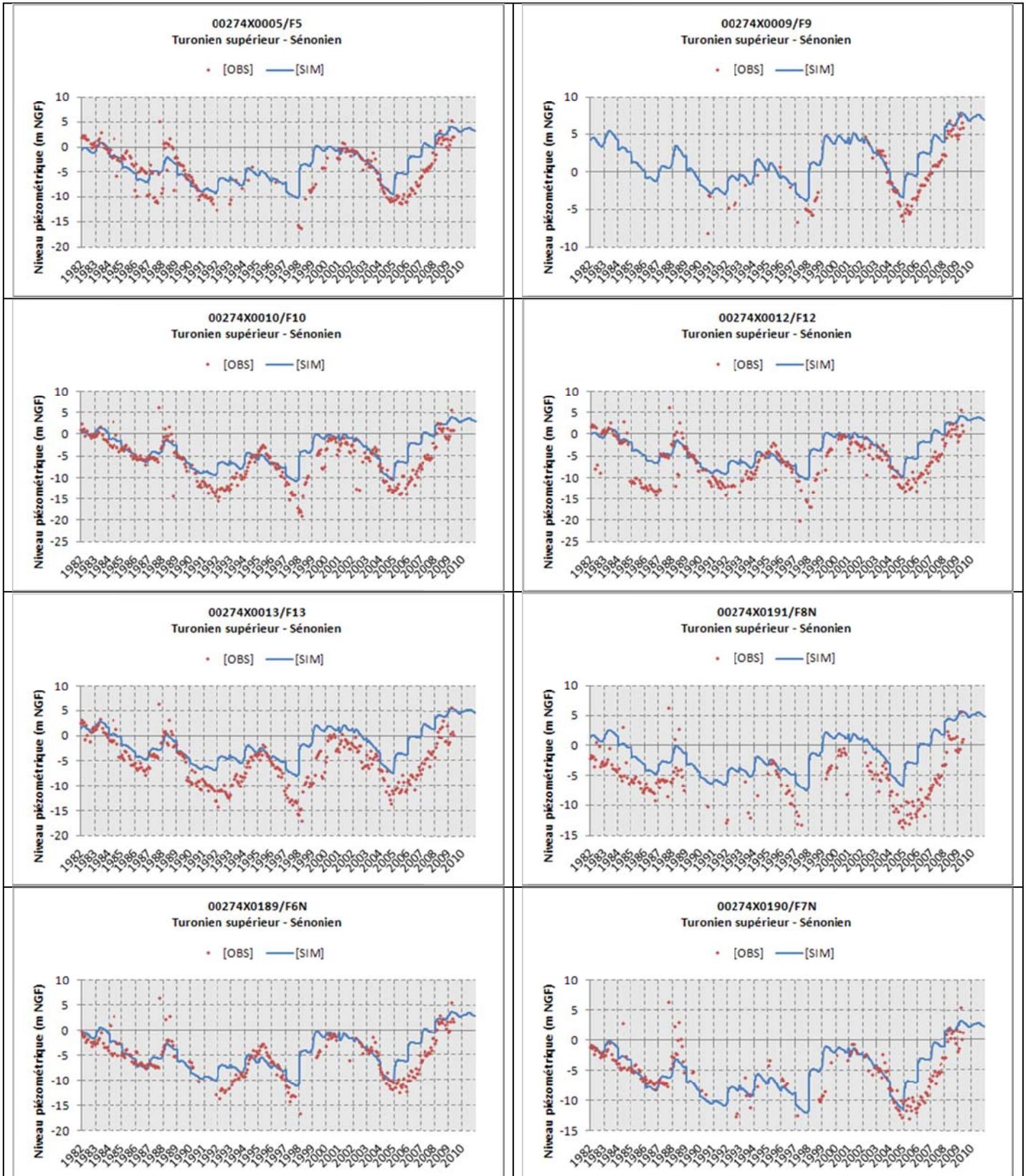




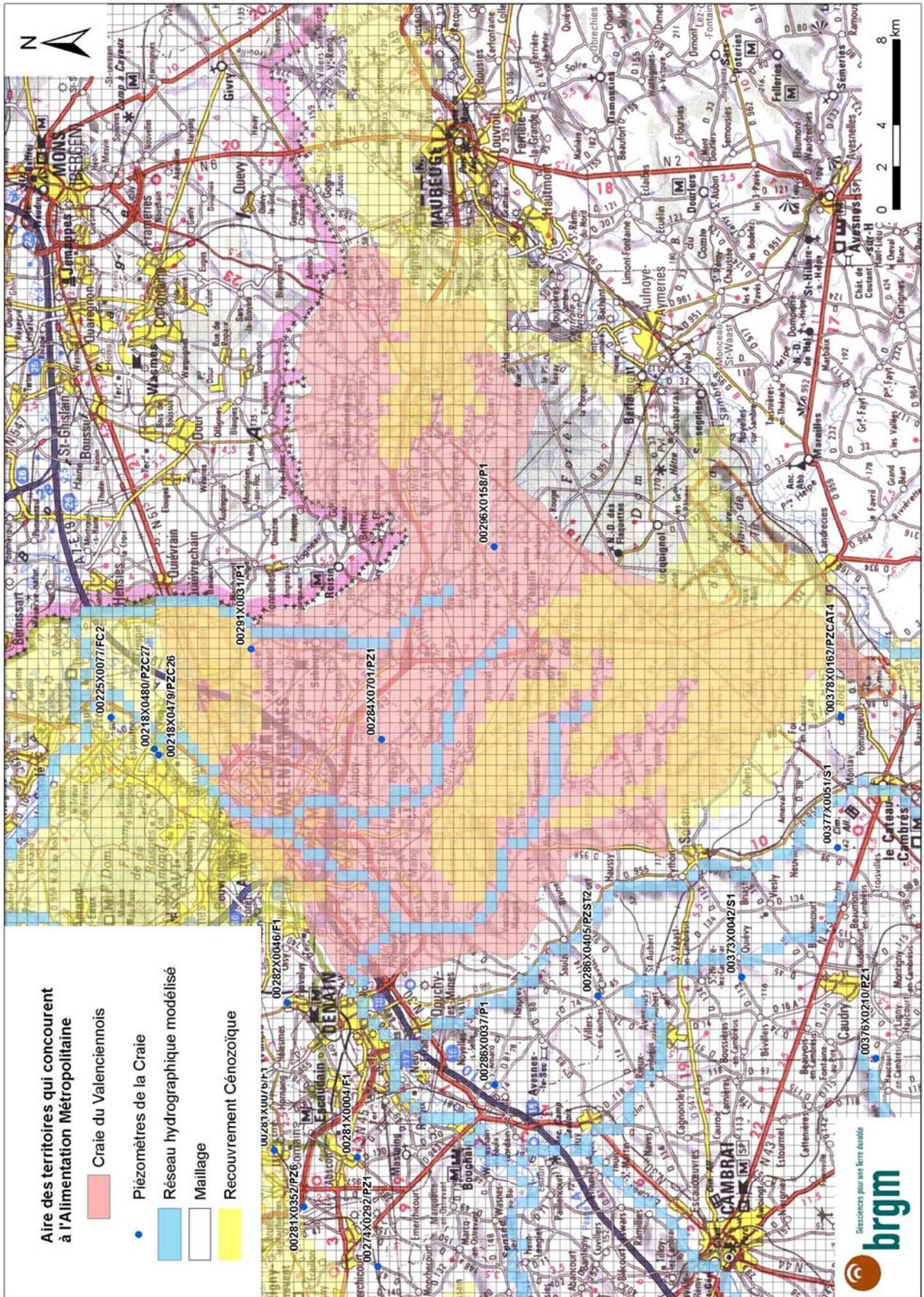


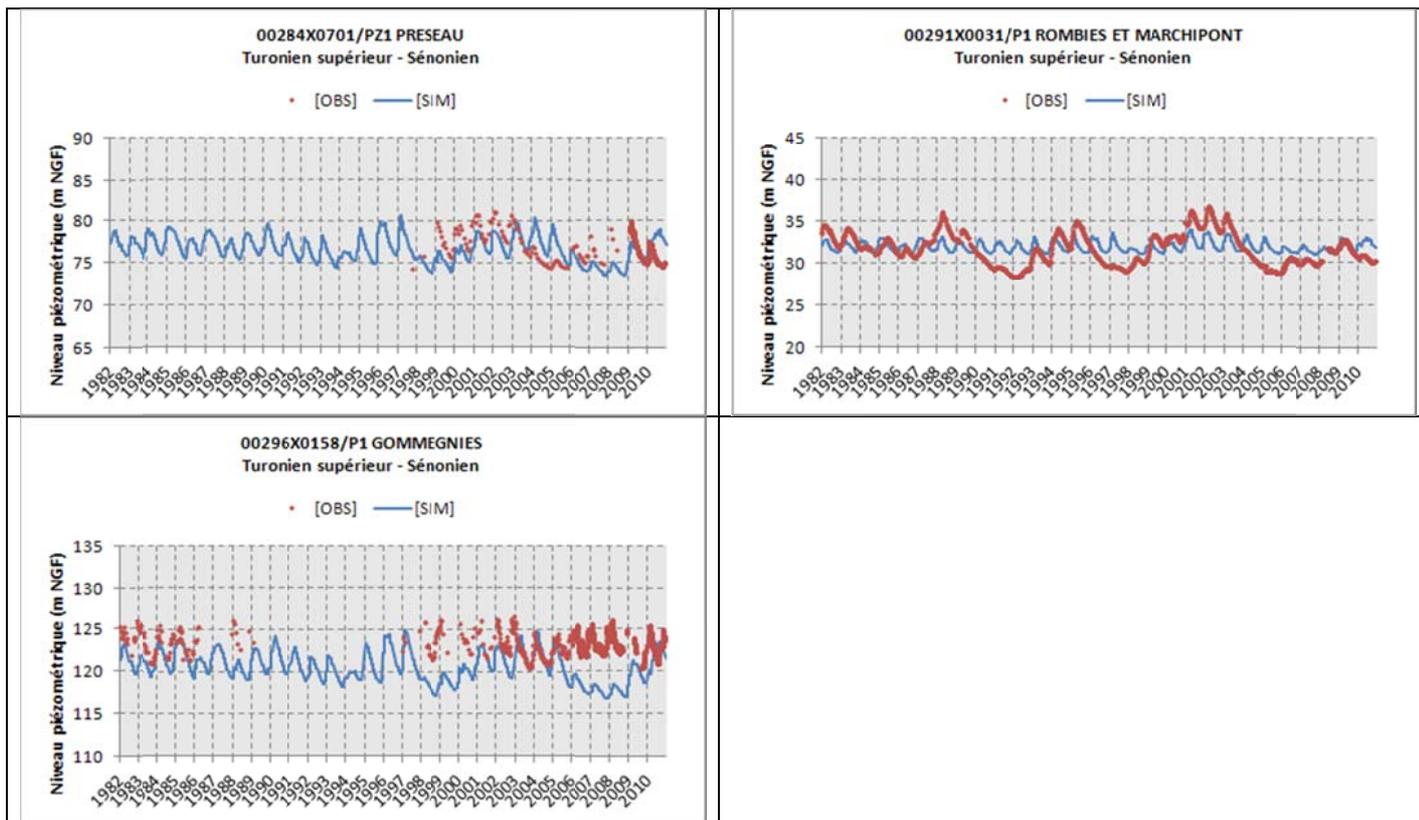
Champ captant de Pecquencourt



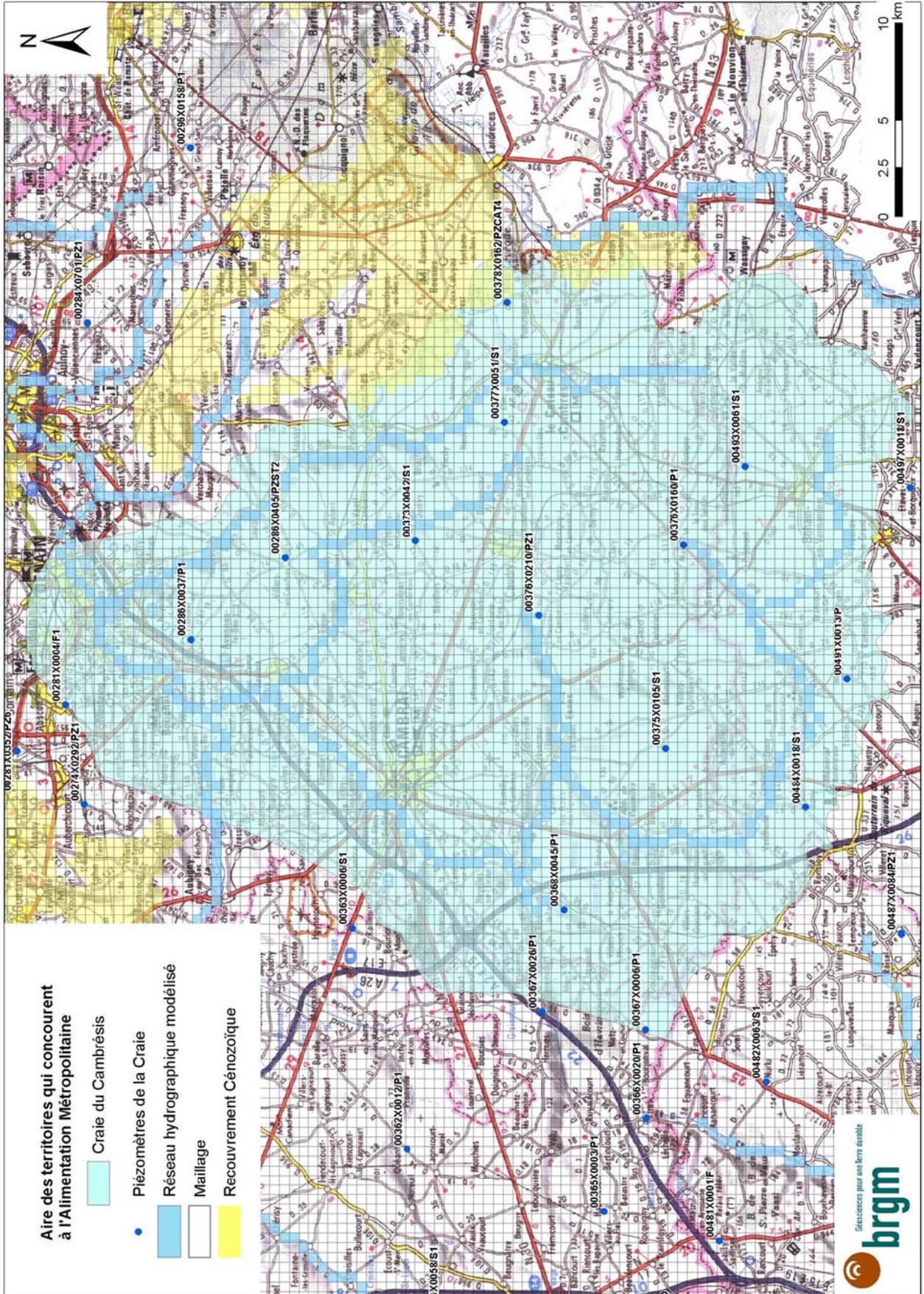


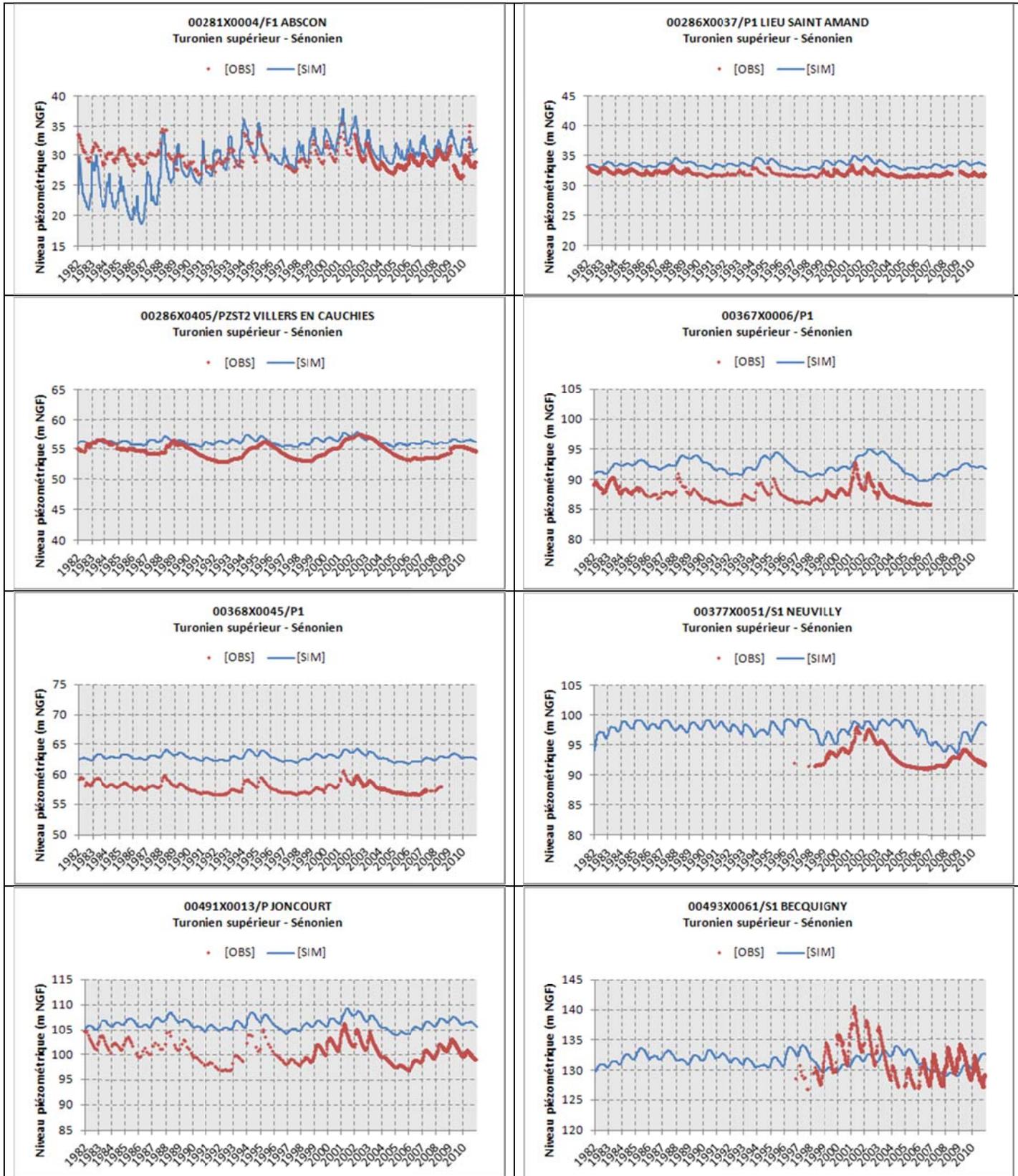
MASSE D'EAU : 1007 Craie du Valenciennois





MASSE D'EAU : 1010 Craie du Cambrésis







Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Nord-Pas de Calais
Synergie Park
6^{ter} rue Pierre et Marie Curie
59 260 – Lezennes - France
Tél. : 03 20 19 15 40