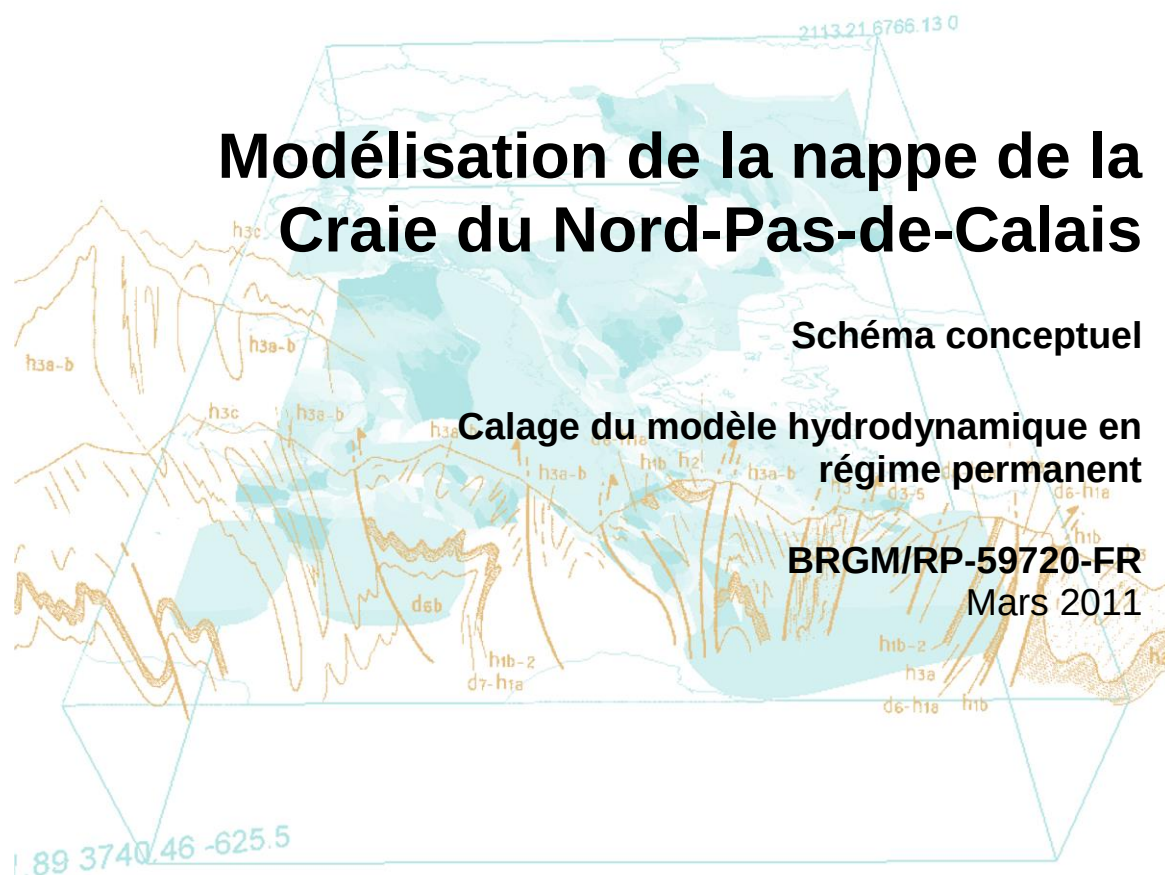




Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais

Schéma conceptuel

Calage du modèle hydrodynamique en régime
permanent

Rapport d'avancement

BRGM/RP-59720-FR

Mars 2011

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

E. BUSCARLET, L. PICKAERT

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

Vérificateur :

Nom : Vincent PETIT

Date : 14/03/11

Signature :

Approbateur :

Nom : Jean-Rémi MOSSMANN

Date : 11/03/11

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 permanent, piézométrie, synthèse, nappe de la craie

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

Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais - Schéma conceptuel - Calage du modèle hydrodynamique en régime permanent - Rapport d'avancement
BRGM/RP-59720-FR - Mars 2011 – Auteurs : E. BUSCARLET et L. PICKAERT avec la collaboration de P. STOLLSTEINER, T. KLINKA et F. ASFIRANE

Synthèse

Une modélisation hydrodynamique a été réalisée dans le cadre de la mise en place de l'outil de gestion des ressources en eau de l'Aire d'Alimentation de la Métropole lilloise.

Le modèle couvre les six masses d'eau de la nappe de la craie sollicitées : 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), et au-delà.

Les niveaux aquifères pris en compte dans le modèle sont :

- Les sables d'Ostricourt,
- La craie,
- Les Calcaires Carbonifères.

Aux endroits où les alluvions sont en contact avec la craie, une seule formation a été considérée. Les niveaux imperméables ou peu productifs entre ces entités aquifères sont également modélisés.

Les limites du modèle sont déterminées de manière à être le plus réaliste possible d'un point de vue hydrodynamique.

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

- Les limites ouest et est du réservoir correspondent aux limites du réservoir crayeux, où affleurent les 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). Bien que géologiquement la craie existe encore, le poids des terrains sus-jacents ferme les fissures et joints de stratification de la formation qui n'est plus aquifère.
- Le long de la mer du Nord, la charge est imposée à 0 m NGF ; niveau de la mer ;
- Au sud, l'Authie, l'Ancre et la Somme constituent une limite de débordement.

Neuf couches ont été prises en compte :

- 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,
- Les Dièves vertes et bleues du Turonien moyen et inférieur,

- Les Craies et marnes cénomaniennes,
- Le « socle » âgé du Crétacé inférieur, Jurassique et Paléozoïque.

Le modèle réalisé à l'aide du logiciel MARTHE est construit suivant un schéma en différences finies, chacune des couches est représentée en plan par un maillage constitué de mailles carrées de 500 m x 500 m.

Un premier calage a été mené en régime permanent. Le modèle s'attache à représenter l'état piézométrique basses-eaux de 1997, au cours duquel la nappe de la craie a fait l'objet d'une campagne piézométrique soutenue. Dans la réalité l'état permanent n'arrive que très rarement, mais cette étape permet de fixer les ordres de grandeur de perméabilité choisis, d'évaluer la prise en compte de la recharge, de vérifier le modèle conceptuel et la géométrie du modèle.

La comparaison des charges et débits des rivières calculés par le modèle avec les observations est assez satisfaisante :

- La distribution des charges est cohérente avec l'écoulement régional,
- Les ordres de grandeur des débits sont reproduits.

Sans conclure sur la fiabilité du modèle, cette simulation valide les hypothèses choisies en première approche. Il s'agit à présent de tester le modèle en régime transitoire sur la période 1982-2009 (27 années) au pas de temps mensuel.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de la présente étude	9
1.1. CONTEXTE GENERAL	9
1.2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE ET CALAGE EN PERMANENT	10
2. Etat d'avancement du projet.....	11
3. Caractéristiques générales du secteur d'étude	12
3.1. DONNÉES PAYSAGÈRES ET RÉGIONS NATURELLES.....	12
3.2. TOPOGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS	14
3.3. CLIMATOLOGIE.....	14
3.3.1. Précipitations.....	14
3.3.2. Pluies efficaces	16
4. Eaux souterraines	17
4.1. NATURE, GÉOMÉTRIE ET STRUCTURE DES RÉSERVOIRS.....	17
4.1.1. Les calcaires paléozoïques	20
4.1.1. Le Jurassique du Boulonnais.....	21
4.1.1. La Craie du Crétacé	21
4.1.1. Les Sables landéniens	21
4.1.2. Les Aquifères quaternaires.....	21
4.1.3. Fonctionnement hydraulique de la nappe de la craie.....	22
4.1.4. Principales caractéristiques	22
4.1.5. Structure.....	23
4.1.6. Piézométrie de la nappe de la craie.....	24
4.1.7. Caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives	29
4.1.8. Relations avec les eaux de surface	31
4.1.9. Relations avec les autres aquifères	31
5. Modelisation	33
5.1. RETOURS D'EXPERIENCES DES MODELES PRECEDENTS.....	33
5.1.1. Modèles hydrodynamiques de la nappe de la craie	33
5.2. CONTEXTE DE LA MODELISATION	35

5.3. COLLECTE DES DONNEES.....	36
6. Construction du modele hydrodynamique.....	37
6.1. MODELE CONCEPTUEL	37
6.2. GEOMETRIE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE.....	38
6.2.1. Le modèle géologique du Nord Pas de Calais.....	38
6.2.2. L'épaisseur de craie productive	41
6.3. CALCUL DE L'INFILTRATION	44
6.3.1. Pluie efficace moyenne interannuelle (cf. paragraphe 3.3.2)	44
6.3.2. Modélisation pluie-débit-niveau piézométrique	44
6.4. CARACTERISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	54
6.4.1. Prise en compte du réseau hydrographique dans le modèle maillé	54
6.4.2. Paramètres choisis	54
6.5. PRELEVEMENTS	56
6.6. PERMEABILITES	58
6.7. EMMAGASINEMENT	62
6.8. FAILLES (CF. PARAGRAPHE 4.2.3).....	63
6.9. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION	64
7. Calage du modèle hydrodynamique	67
7.1. CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT	67
7.1.1. Principe	67
7.1.2. Données de référence	68
7.1.3. Résultats	70
8. Conclusion.....	77
9. Bibliographie	79

Liste des figures

Figure 1 : localisation des pays du Nord-Pas-de-Calais	13
Figure 2 : Relief et cours d'eau du Nord Pas de Calais	15
Figure 3 : Précipitations efficaces moyennes interannuelles (J.-Y. Caous, 1994).....	16
Figure 4 : Coupes géologiques régionales (J Beckelinck, 1981)	17
Figure 5 : Carte géologique du Nord Pas de Calais	18
Figure 6 : Domaines et systèmes aquifères de la région Nord Pas de Calais	20
Figure 7 Carte piézométrique Hautes eaux 2009 (en m N.G.F.)	25
Figure 8 Carte piézométrique Basses eaux 2009 (en m N.G.F.)	26
Figure 9 : Influence hydraulique des failles (piézométrie de mai 2009)	28
Figure 10 : Secteurs étudiés par modélisation numérique	34
Figure 11 : Extension et maillage du modèle	39
Figure 12 : Emprises des sources de données utilisées pour la construction du modèle hydrogéologique	42
Figure 13 : Données de diagraphie au micromoulinet dans la craie séno-turonienne	43
Figure 14 : Principes de GARDENIA	45
Figure 15 : Localisation des points de mesure pour le calage du modèle global Gardenia.....	48
Figure 16 : Réseau hydrographique modélisé	55
Figure 17 : Prélèvements recensés dans le bassin Artois-Picardie	56
Figure 18 : Volumes prélevés dans la nappe de la Craie en 1997 (m ³ /an).....	57
Figure 19 : Cartes des valeurs de transmissivité de la craie calculées sur forage (m ² /s).....	60
Figure 20 : Valeurs initiales de perméabilité de la craie séno-turonienne (m/s)	61
Figure 21 : Libération d'eau souterraine dans les aquifères. n_e porosité efficace et S coefficient d'emménagement (in Castany, 1982).....	62
Figure 22 : Réseau de suivi piézométrique de la nappe de la Craie utilisé pour le calage en régime transitoire	65
Figure 23 : Stations hydrométriques des principaux cours d'eau utilisées pour le calage en régime transitoire	66
Figure 24 : Données de référence pour le calage du modèle en régime permanent.....	69
Figure 25 : Piézométrie simulée de la nappe de la Craie en régime permanent (m NGF)	71
Figure 26 : Diagrammes de dispersion des niveaux piézométriques simulés en régime permanent	72
Figure 27 : Comparaison des débits des rivières observés et simulés en régime permanent....	73
Figure 28 : Détail de la piézométrie simulée dans le secteur de Lille	74

Figure 29 : Piézométrie simulée (m NGF) de la craie Cénomaniennne.....	75
Figure 29 : Bilan hydraulique simulé	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Formations modélisées	40
Tableau 2 : Synthèse des paramètres utilisés dans le modèle global Gardenia	51
Tableau 3 : Caractéristiques hydrauliques des formations hydrogéologiques modélisées	58
Tableau 4 : Détermination des classes de transmissivité de la craie séno-turonienne	59
Tableau 5 : Emmagasinement des formations hydrogéologiques modélisées	63

Liste des annexes

Annexe 1 Généralités sur la modélisation en hydrogéologie
Annexe 2 Présentation des modèles utilisés

1. Contexte et objectifs de la présente étude

1.1. CONTEXTE GENERAL

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, Noréade, la Communauté d'agglomération de Lens-Liévin (CALL), la communauté d'agglomération d'Hénin-Carvin (CAHC), le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en eau potable de la région de Douai (SIADO) ont souhaité disposer d'outils d'aide à la décision visant à définir une stratégie de gestion de la ressource en eau, sur les six masses d'eau qu'ils sollicitent.

L'édification d'un outil de gestion des ressources en eau sur l'aire des territoires qui concourent à l'alimentation métropolitaine fait l'objet d'une convention entre LMCU et le BRGM. Le projet reçoit également des aides financières de l'Agence de l'eau et de la DREAL versées à LMCU.

Ce projet s'étale sur une durée de 3 ans ; le terme est prévu en décembre 2011. Il s'articule autour de quatre phases :

1. Collecter, organiser et synthétiser les 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 par 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 par sa 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. Outre les aspects quantitatifs, un tel outil pourrait aussi être utilisé pour évaluer les impacts sur la nappe, de pollutions ponctuelles (rejets industriels) ou diffuses (pollutions par les nitrates et les phytosanitaires par exemple).

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 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, c'est-à-dire 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).

1.2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE ET CALAGE EN PERMANENT

Ce rapport présente la construction du modèle jusqu'au calage en régime permanent. Il comprend :

- L'élaboration du modèle conceptuel de la nappe de la craie sur la base d'un certain nombre d'hypothèses et de choix qui en découle (extension, nature hydraulique des limites, représentation des rivières...).
- Une recherche bibliographique sur la nappe de la craie et plus particulièrement sur les études de modélisation existantes.
- Le recueil des données hydrogéologiques nécessaires au modèle à partir du travail réalisé lors de la première phase de préparation du SIGES.
- La mise en forme et le traitement des données avant utilisation par le modèle.
- La construction du modèle.
- Le calage en régime permanent, c'est-à-dire en supposant un état équilibré de l'aquifère sur le plan hydraulique.

Les objectifs et les rendus de cette phase sont les suivants :

- Disposer d'un modèle représentant la géométrie des différentes formations géologiques, les failles, les cours d'eau en relation avec l'aquifère...
- Vérifier la cohérence des données nombreuses, indépendantes mais influençant toutes le cycle de l'eau (pluie, température, perméabilité, niveau piézométrique, débits...)
- Conforter les choix et hypothèses du modèle conceptuel par des validations quantifiées.
- établir un état piézométrique stabilisé issu d'un calcul qui servira de surface piézométrique de départ aux calculs en régime transitoire.
- disposer de valeurs de perméabilité sur l'ensemble de l'aquifère

2. Etat d'avancement du projet

Un modèle géologique à 9 couches a été réalisé à l'aide du logiciel G D M. Cette modélisation fait l'objet du rapport RP-58910-FR. Le principe de ce logiciel est basé sur l'interpolation spatiale des données. Pour sa construction, les données de plus de 1100 forages ont été prises en considération.

Les résultats de cette modélisation sont des cartes isopaques et isohypses ainsi qu'un modèle numérique sous forme de grille qui a été lu et utilisé par le logiciel MARTHE pour la construction du modèle de simulation des écoulements.

Les cartes piézométriques des périodes de basses eaux puis de hautes eaux ont été élaborées à partir de mesures du niveau d'eau collectées sur environ 350 ouvrages respectivement effectuées en mai 2009 et en octobre 2009. Ces campagnes font l'objet du rapport BRGM RP-58542-FR.

Le présent rapport rend compte d'une part, de la construction et du calage du modèle hydrodynamique de la nappe de la craie en régime permanent ainsi que des hypothèses retenues pour la réalisation du modèle en régime transitoire.

Le calage en régime permanent a pour but de fixer les ordres de grandeur des valeurs de perméabilité, d'évaluer de la recharge, de vérifier le modèle conceptuel et la géométrie du modèle.

Le calage en régime transitoire, plus réaliste et précis, est en cours et fera l'objet d'un autre rapport.

3. Caractéristiques générales du secteur d'étude

3.1. DONNÉES PAYSAGÈRES ET RÉGIONS NATURELLES

Le territoire concerné comprend les départements du Nord (5800km², 447 hab/km²) et du Pas-de-Calais (6700 km², 218 hab/km²). L'ensemble est frontalier avec la Belgique et possède une façade maritime (Mer du Nord et Manche).

La région peut être décrite comme un assemblage de petites régions caractérisées par leur relief et leur pédologie. On distingue de cette façon 6 zones géomorphologiques (cf. Figure 1) :

- LE BOULONNAIS,
- L'ARTOIS
- LA PLAINE D'ARRAS,
- L'AVESNOIS,
- LES FLANDRES,
- LA REGION LILLOISE.

Le Boulonnais est le prolongement Nord-ouest de l'Artois. Mais l'érosion s'est effectuée au fur et à mesure de la formation de l'anticlinal de l'Artois et a mis à nu les terrains du Jurassique, voire du Paléozoïque à Ferques, donnant un relief parfois encaissé.

Cette zone nous montre 2 paysages différents :

- le Bas Boulonnais, qui représente une dépression où se trouve les affleurements de terrains primaires,
- le Haut Boulonnais, qui constitue la périphérie de la boutonnière boulonnaise. Son altitude diminue à la fois vers les plaines flamandes au Nord, devant la Picardie et à l'Est en rejoignant l'Artois.

L'Artois correspond à un bombement anticlinal limitant naturellement le plateau picard au Sud et les plaines flamandes du Nord. Ce relèvement s'y achève par une faille de regard nord, dominant la Flandre d'une cinquantaine de mètres. Le dôme de l'Artois s'étend du Nord-Ouest au Sud-Est, depuis le Boulonnais jusqu'au Cambrésis

La plaine d'Arras se situe au niveau d'une incurvation importante de l'anticlinal artésien vers l'Est et constitue un plateau crayeux d'altitude moyenne de 100 mètres limité à l'Est par le Cambrésis.

La **plaine de la Scarpe** est bordée au Nord par les **collines de la Pévèle**. Au sud, l'**Ostrevent** s'étale de Douai à l'Ouest jusqu'à Raismes à l'Est et offre un relief moins monotone avec des altitudes comprises entre 15 et 90 m

L'Avesnois est le prolongement de l'Ardenne vers l'Ouest. En effet, sous les limons fertiles (favorables à la culture du blé et de la betterave) et la craie (de faible épaisseur si elle n'est pas absente) se retrouvent les structures paléozoïques plissées de cette région d'aspect verdoyant.

La Flandre est le commencement de la grande plaine de l'Europe du Nord se continuant en Belgique, dans les Pays-Bas et en Allemagne. Son altitude est faible (30 m) sauf pour les buttes témoins tertiaires que sont les Monts des Flandres (140 m). A l'Ouest, se trouve la plaine maritime façonnée par l'influence anthropique.

La région lilloise est actuellement une immense zone urbaine (Lille-Roubaix-Tourcoing-Armentières) implantée sur l'anticlinal du Mélantois faisant affleurer des terrains crétacés.

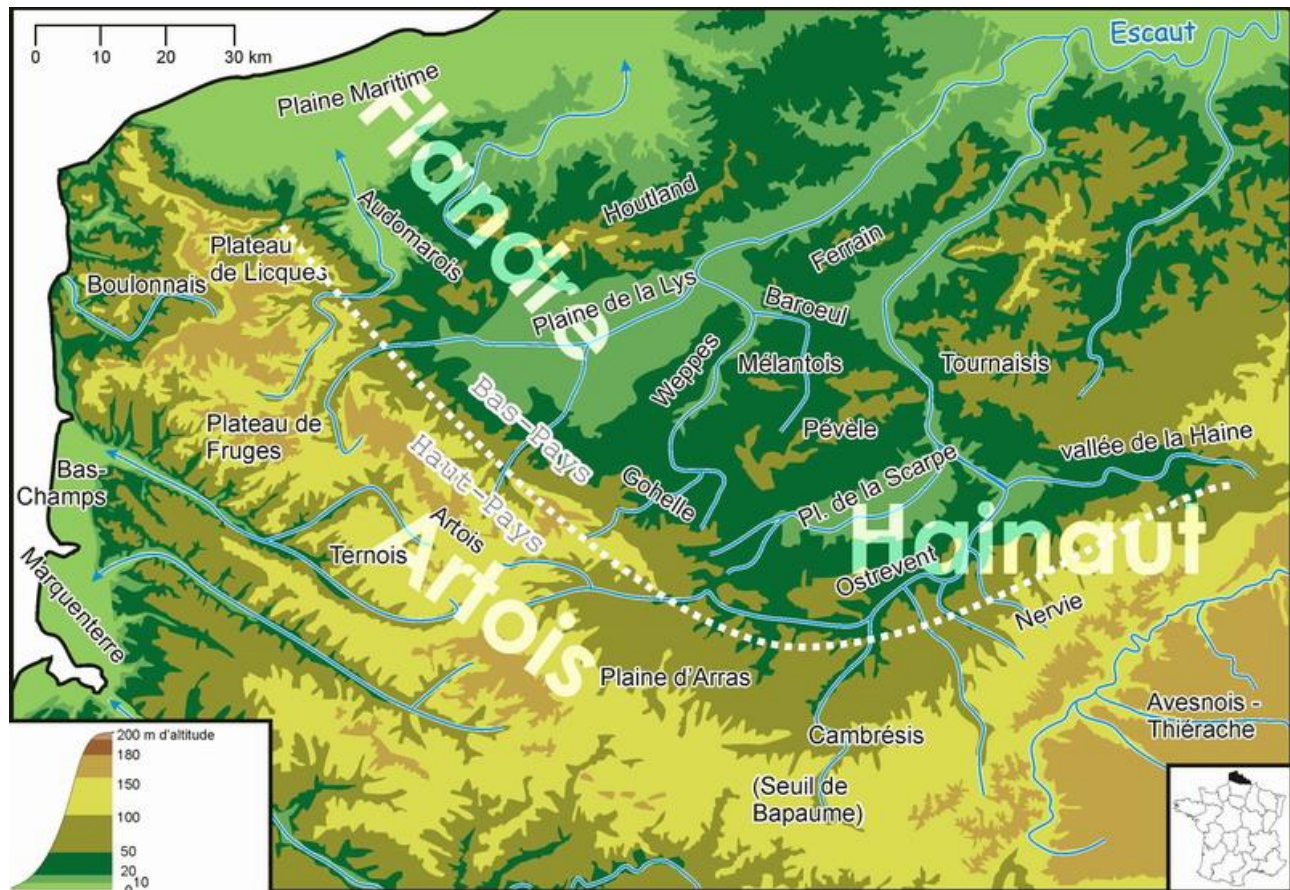


Figure 1 : localisation des pays du Nord-Pas-de-Calais

3.2. TOPOGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS

Le relief est peu prononcé dans son ensemble (figure 2) : au Nord, s'étendent les plaines des Flandres (localement sous le niveau de la mer) et de la Lys, puis des plateaux crayeux d'altitude modeste (60 à 120 m). A l'Est, l'altitude augmente à l'approche de l'Avesnois et du massif ardennais (377 m au Sud de Revin). La partie méridionale de la région est marquée par un relèvement qui court du Boulonnais à l'Ardenne et dont la partie occidentale, nord-ouest/sud-est, constitue les collines de l'Artois dont l'altitude décroît du Haut Boulonnais (211 m) jusqu'à Arras (70 m).

La principale **caractéristique hydrographique** du Nord - Pas-de-Calais est l'absence de grands fleuves et de reliefs importants. Les cours d'eau, constitués de rivières et de petits fleuves côtiers, se caractérisent par la faiblesse de leur débit (Le total des débits moyens interannuels dans le Nord - Pas-de-Calais ($75 \text{ m}^3/\text{s}$) est 5 fois plus faible que le celui de la Seine et 10 fois moindre que celui de la Loire - le module le plus important est celui de la Lys : $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ à son entrée en Belgique, à Wervicq) et de leur pente.

La région a une forte tradition d'aménagements hydrauliques : lutte contre les intrusions salées, assainissement des zones humides, évacuation des eaux de ruissellement, canaux, moulins... Avec 650 km de cours d'eau et canaux, elle a un réseau de voies navigables sans équivalent en France. Les faibles pentes ont incité l'homme à canaliser les cours d'eau et à tisser un réseau maillé de canaux entre les différents bassins. Seules l'Authie, la Canche, la Liane, la Slack et le Wimereux sont hydrauliquement indépendantes. Des canaux de liaison permettent à l'eau de s'écouler de bassin à bassin, et parfois même, grâce à des stations de pompes, d'inverser le cours de l'eau.

3.3. CLIMATOLOGIE

3.3.1. Précipitations

Du point de vue climatique, la région est régie par un climat océanique doux et tempéré toute l'année avec des précipitations plus importantes au niveau des hauts reliefs, représentés par le Haut Boulonnais, le Haut Artois, l'Avesnois ainsi qu'au niveau de la frange littorale, le Bas Artois et les Flandres.

Ce rôle du relief est capital dans la répartition pluviométrique et permet d'expliquer ces observations (" abri " opéré par l'Artois de Saint-Omer à Lens), mêmes locales (exemple des Monts des Flandres).

Mais d'autres paramètres guident cette organisation des isohyètes comme l'exposition aux vents dominants d'Ouest ou Sud-Ouest chargés d'humidité, la distance au domaine marin, la variabilité du relief (collines, changement de pentes, obstacles aux courants nuageux. . .).

Par conséquent, leur répartition dépend à la fois de la distance du littoral, mais aussi du relief, si faible soit-il : plus de 1 000 mm dans le Haut Artois et 800 à 900 mm dans l'Avesnois, entre 600 et 650 mm dans les plaines des Flandres et de la Lys, comme dans le Douaisis et le Cambrésis.

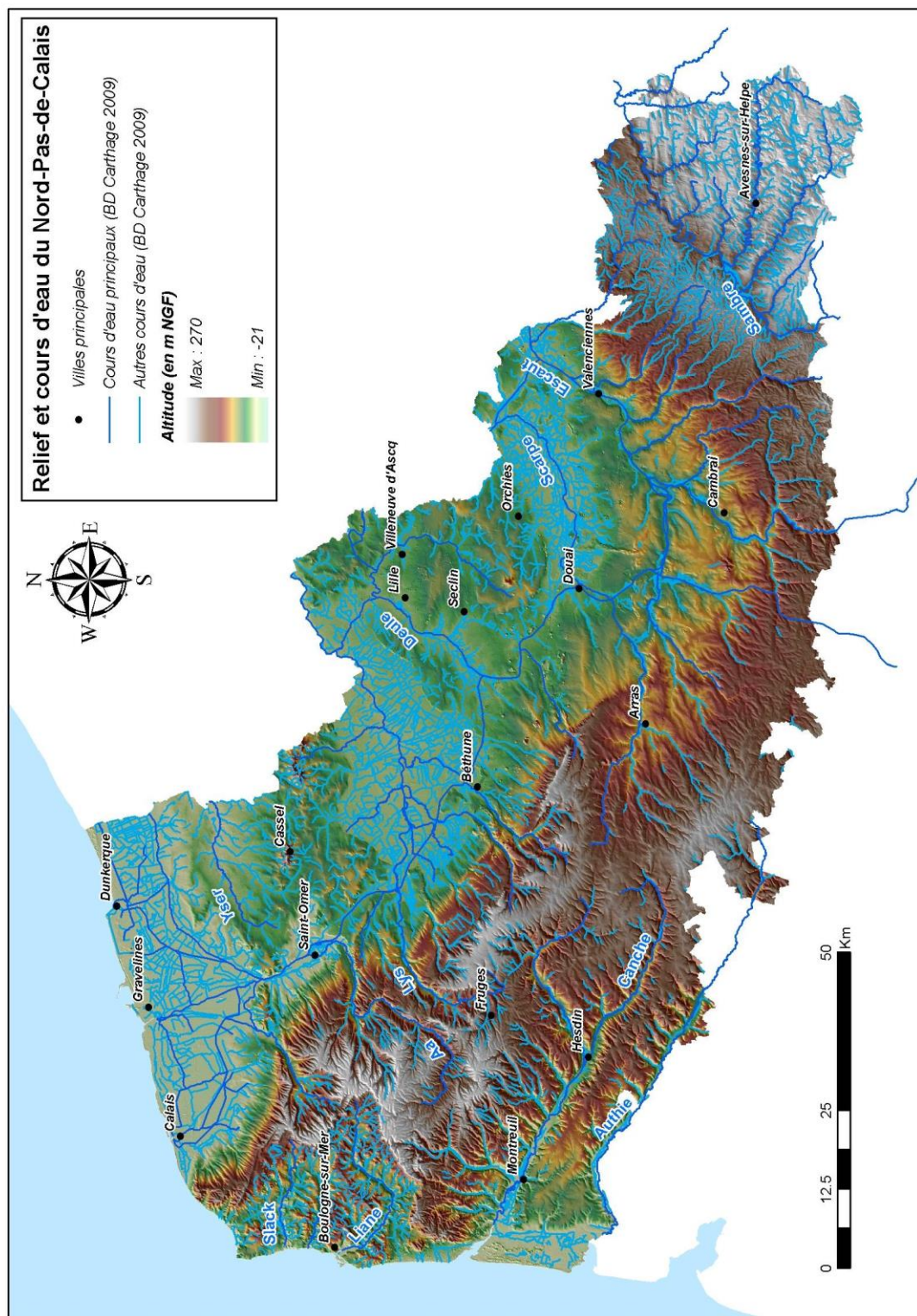


Figure 2 : Relief et cours d'eau du Nord Pas de Calais

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.

3.3.2. Pluies efficaces

La moyenne interannuelle des précipitations efficaces correspondantes est estimée à 265 mm, mais avec de fortes variations d'une année à l'autre et une distribution spatiale (Fig. 3) assez similaire à celle de la pluie totale.

Cette distribution est hétérogène avec notamment deux dômes pluviométriques situés à l'ouest et à l'est de la région (Boulonnais et Avesnois) dus à la position relative des reliefs aux vents dominants humides de secteur ouest.

La part de la pluie annuelle s'infiltrant varie considérablement d'une année sur l'autre, par exemple 1971, année particulièrement sèche, et en 2001, exceptionnellement arrosée. A l'échelon mensuel, le phénomène est encore plus accentué, aucune pluie de la saison estivale ne s'infiltrant dans le sol, du fait de l'évapotranspiration.

L'apport pluvial est le phénomène essentiel alimentant les nappes libres (celle de la Craie, des Sables landéniens, du Calcaire carbonifère dans sa partie belge).

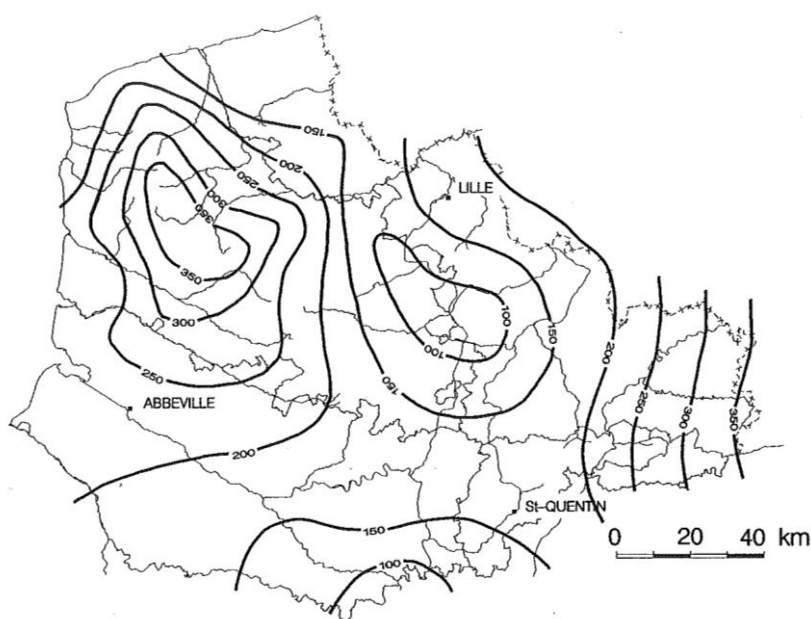


Figure 3 : Précipitations efficaces moyennes interannuelles (J.-Y. Caous, 1994).

4. Eaux souterraines

4.1. NATURE, GÉOMÉTRIE ET STRUCTURE DES RÉSERVOIRS

L'examen du **contexte géologique** est essentiel pour caractériser les bassins hydrogéologiques, leur nature et leur structure.

La région Nord - Pas-de-Calais appartient aux parties nord du Bassin de Paris et sud du Bassin de Bruxelles, séparées par l'anticlinal faillé de l'Artois, d'axe nord-ouest/sud-est. Le Crétacé supérieur, discordant sur des structures paléozoïques complexes, affleure sur 60 % du territoire et les formations cénozoïques sur 30 % (Fig. 5). Les formations crétacées, largement recouvertes par des limons, s'appuient à l'Est sur le massif paléozoïque ardennais (l'Avesnois) alors qu'elles s'ennoient au Nord sous le Tertiaire des bassins des Flandres et d'Orchies, séparés par l'anticlinal du Mélandois. Au Nord-Ouest, l'anticlinal de l'Artois s'ouvre sur les terrains jurassiques et paléozoïques de la « boutonnière » du Boulonnais, terminaison orientale de l'anticlinal du Weald (cf. coupes de la fig. 4).

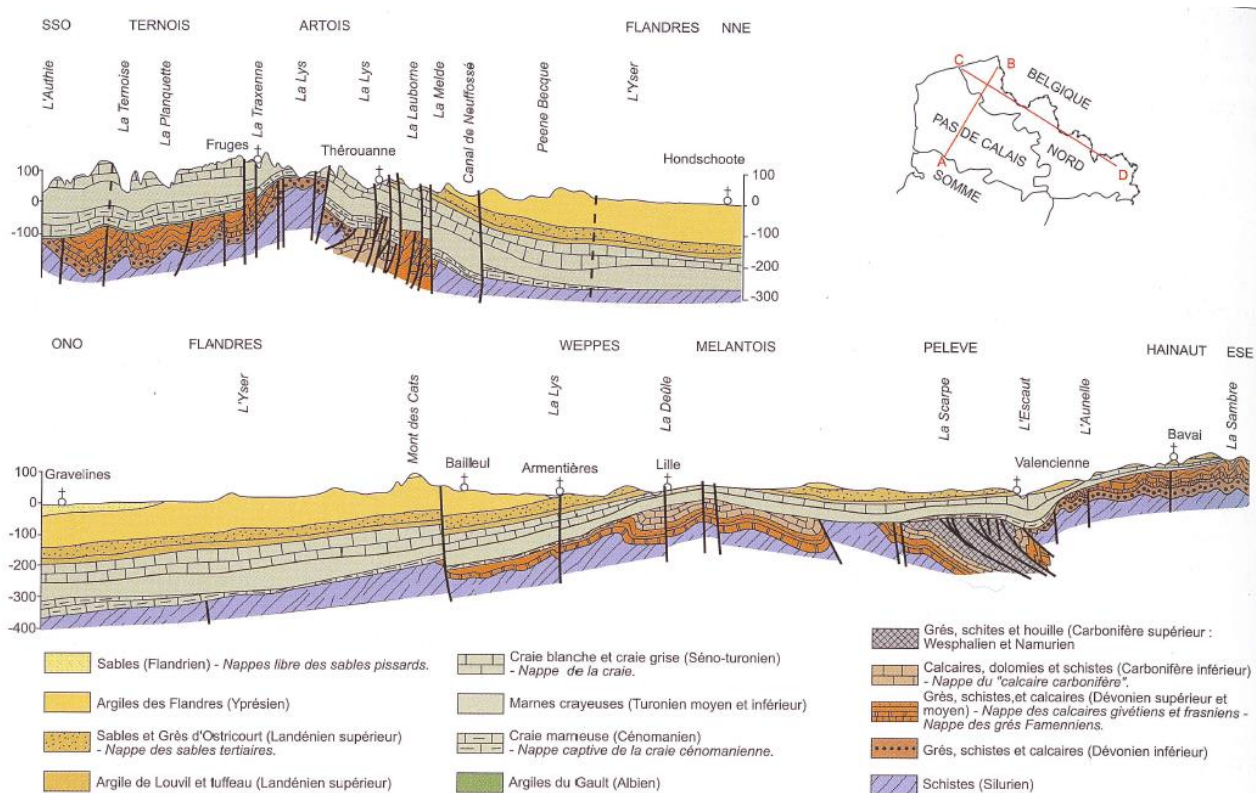


Figure 4 : Coupes géologiques régionales (J Beckelinck, 1981)

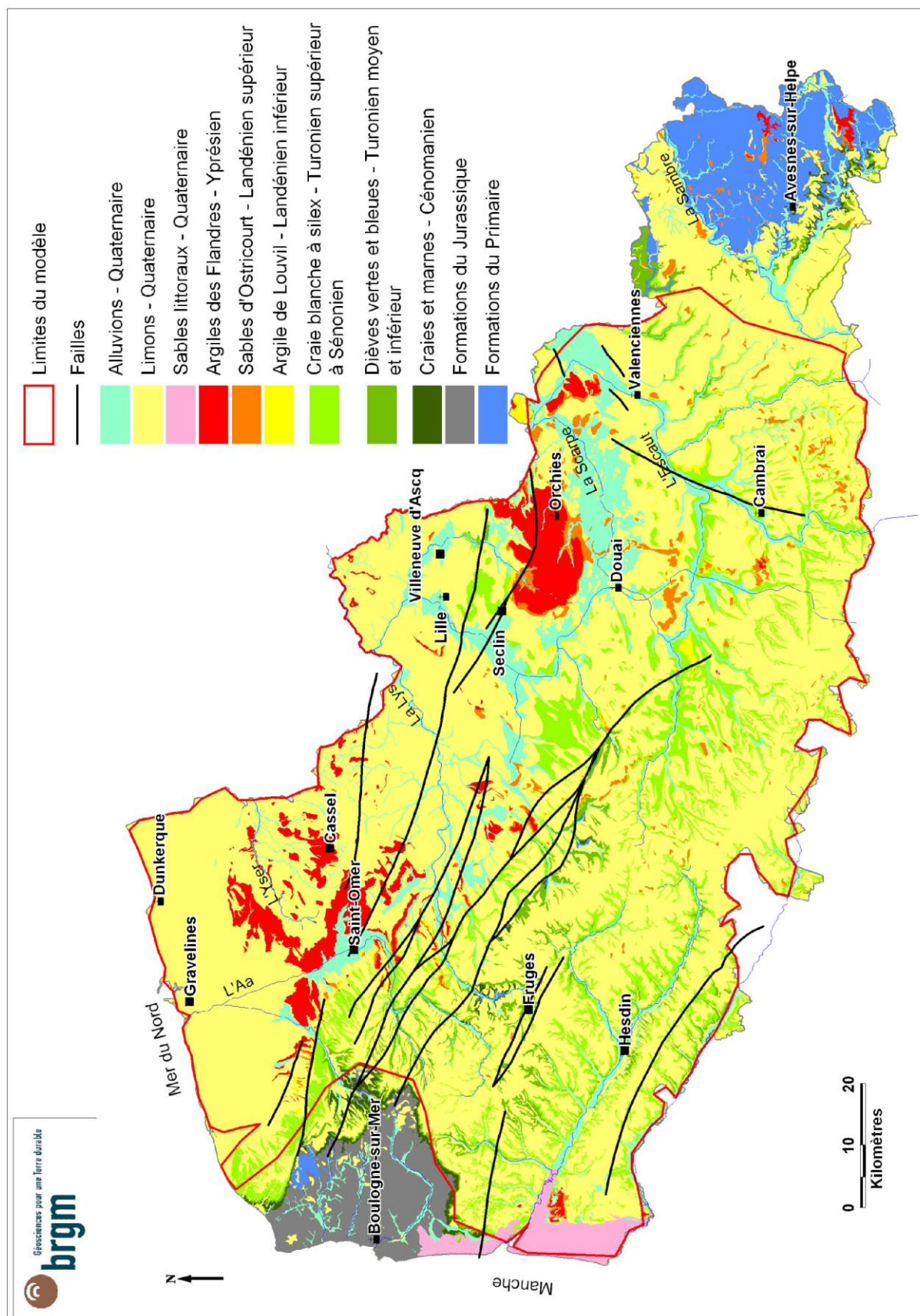


Figure 5 : Carte géologique du Nord Pas de Calais

La succession lithologique des terrains permet de différencier plusieurs réservoirs aquifères, séparés par des couches imperméables, dont la disposition est synthétisée dans le tableau suivant.

QUATERNAIRE	Alluvions anciennes et modernes du Quaternaire ; sables littoraux du Quaternaire	Aquifère
	Limons des plateaux du Quaternaire	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 Landénien supérieur (ou Thanétien supérieur)	Aquifère
	Argile de Louvil du Landénien inférieur (ou Thanétien inférieur)	Aquiclude
SECONDAIRE (Crétacé supérieur)	Craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien	Aquifère
	Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen	Aquiclude
	Craies et marnes du Cénomanién	Aquifère/aquiclude
PRIMAIRE A SECONDAIRE	Le « substratum » : comprenant l'ensemble des formations géologiques du Secondaire (Crétacé inférieur) au Primaire	Aquifère/aquiclude

D'une manière plus précise et à partir des systèmes aquifères prédéfinis (fig. 6), il est possible de distinguer, du plus profond au plus superficiel, les réservoirs suivants :

- LE CALCAIRE CARBONIFERE DE LA REGION DE LILLE
- LES FORMATIONS PALEOZOÏQUES DES ARDENNES,
- LES FORMATIONS PALEOZOÏQUES ET JURASSIQUES DU BOULONNAIS,
- LA CRAIE DU SENO-TURONIEN, LOCALEMENT DU CENOMANIEN,
- LES SABLES TERTIAIRES DES FLANDRES,
- LES SABLES TERTIAIRES DU BASSIN D'ORCHIES,
- LES SABLES QUATERNAIRES DE LA PLAINE MARITIME.

A ces réservoirs s'ajoutent différents aquifères alluviaux en grande partie subordonnés aux cours d'eau.

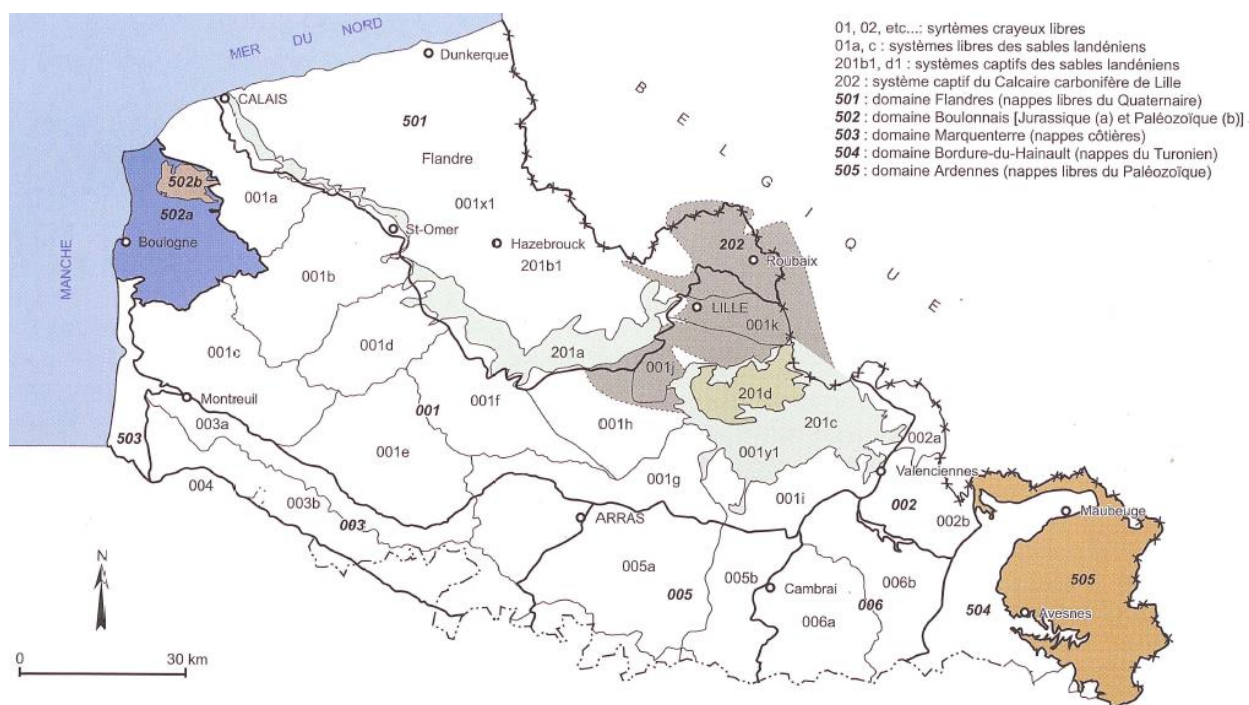


Figure 6 : Domaines et systèmes aquifères de la région Nord Pas de Calais

4.1.1. Les calcaires paléozoïques

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Ils sont sollicités en tant qu'aquifères dans trois secteurs distincts de la région Nord-Pas-de-Calais :

- **l'Avesnois** (extrémité est du département du Nord) : calcaires et dolomies du Dévonien (Givétien-Frasnien) et du Mississipien (ex-Dinantien), fortement plissés et faillés : nappes, majoritairement libres, de fractures localement karstifiées. Seule ressource pour cette région,
- **la région lilloise** (Roubaix-Tourcoing et Belgique) : calcaires mississippiens discordants à faible profondeur, sous une couverture réduite de Crétacé supérieur. La nappe, captive en France et libre dans le Tournaisis, est fortement surexploitée en France comme en Belgique,
- **le Boulonnais** (massif de Ferques dans le Nord de la « boutonnière ») : structure complexe, faillée et chevauchante où seuls les calcaires viséens présentent un intérêt hydrogéologique local.

Remarque : Dans la partie française du Paléozoïque ardennais, ce sont surtout les calcaires du Givétien-Couvinien et les grès et quartzites du Cambrien qui sont aquifères. Parmi les assises transgressives du Lias au Crétacé, certaines sont aquifères : calcaires du Sinémurien supérieur, calcaires du Dogger, gaize de l'Oxfordien inférieur, calcaires de l'Oxfordien supérieur et sables verts albiens. Le principal aquifère régional reste néanmoins les alluvions de la Meuse.

4.1.1. Le Jurassique du Boulonnais

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Les aquifères du Jurassique du Boulonnais (Bajocien à Tithonien) - Multiples (calcaires bathoniens, calcaires oxfordiens, grès à différents niveaux du Jurassique supérieur) et discordants sur le Paléozoïque et sous le Crétacé moyen, ces aquifères ont une extension qui ne dépasse guère celle de la « boutonnière » du Boulonnais où ils contribuent pour moitié à l'alimentation en eau du District de Boulogne-sur-Mer.

4.1.1. La Craie du Crétacé

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Présent sur les 9/10 de la région Nord - Pas-de-Calais, le Crétacé supérieur crayeux perd son caractère aquifère en s'enfonçant profondément sous la plaine de Flandre. Dans le Boulonnais, le Cénomanien supérieur est crayeux et aquifère, comme le Turonien supérieur et le Sénonien, tandis que plus à l'Est seuls ces deux derniers restent véritablement aquifères. Même s'il existe des secteurs où s'individualise une nappe captive cénomanienne (Haut Artois), la nappe de la craie est le plus souvent considérée comme unique à l'échelle régionale. Majoritairement libre, elle devient captive sous les dépôts holocènes de la plaine littorale occidentale (Bas Champs) et surtout sous le Tertiaire du bassin d'Orchies (Sud-Est de Lille) et de la bordure des Flandres (de Calais à Lille) où elle est encore localement artésienne. Elle constitue largement la première ressource en eau potable de la région.

La présente étude concerne principalement la nappe de la craie.

4.1.1. Les Sables landéniens

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Ce sont des sables glauconieux marins, des tuffeaux ou des sables blancs continentaux, reposant généralement sur des formations plus argileuses. Partie méridionale du vaste bassin éocène franco-belge, cet aquifère s'étend sur environ 3 000 km² en Flandres et dans le Bassin d'Orchies, contenant une nappe libre dans les affleurements périphériques méridionaux, puis captive sous les argiles yprésiennes. Malgré leur réserve considérable, ces sables n'offrent qu'une faible productivité, mise surtout à profit pour l'agriculture et l'élevage.

4.1.2. Les Aquifères quaternaires

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

Alluvions récentes, dunes littorales, sables « pissarts » sont des aquifères généralement peu productifs et d'intérêt très local. Les alluvions peuvent toutefois présenter une forte productivité sectorielle et avoir un impact (contamination) important sur l'aquifère crayeux sous-jacent.

4.1.3. Fonctionnement hydraulique de la nappe de la craie

(Extrait de l'atlas des Aquifères & Eaux souterraines en France)

4.1.4. Principales caractéristiques

Les formations crayeuses sont présentes dans la majeure partie (90 %) de la région Nord Pas de Calais. Elles ne sont absentes qu'aux deux extrémités Ouest et Est (Bas Boulonnais et Avesnois) où affleurent les terrains sous-jacents.

La craie n'affleure cependant que sur un peu plus de la moitié de la surface des deux départements du Nord et du Pas-de-Calais, puisqu'elle s'enfonce vers le Nord-Nord-Est sous de puissants dépôts cénozoïques (Flandres et bassin d'Orchies) depuis la mer du Nord jusqu'au Bassin du Hainaut en passant par le Valenciennois.

En raison des variations de faciès du Crétacé supérieur et de la structure régionale, le réservoir crayeux n'est pas partout le même et n'est pas non plus unique.

En périphérie de la « boutonnière » du Boulonnais, l'aquifère est épais et continu du Cénomaniens moyen à supérieur au Sénonien, malgré la présence d'intercalations marneuses, mais la nappe est principalement contenue dans la craie cénomaniens, en raison du relèvement anticlinal. La continuité hydraulique entre les assises du Turonien (supérieur et moyen) et celles du Cénomaniens est prouvée par traçages.

Plus au Sud-Est (secteur de Fruges), le Cénomaniens supérieur encore crayeux et aquifère contient une nappe captive ou semi-captive sous couverture devenue peu perméable du Turonien inférieur, tandis que la craie du Turonien supérieur commence à se gorger d'une nappe libre. Plus à l'Est, le Cénomaniens devenu plus marneux ne renferme pratiquement plus de nappe exploitable.

La craie du Turonien supérieur-Sénonien contient une nappe libre quasi continue dans la plaine d'Arras, le Béthunois, la région de Lens à Lille, le Douaisis et le Cambrésis jusqu'au Valenciennois.

Sous couverture, au cœur du bassin des Flandres, la craie n'est pratiquement plus aquifère. Par contre, bien que captive, la nappe de la craie reste encore bien productive dans le bassin d'Orchies, même sous plus de 50 m de couverture.

A l'échelle du Nord-Pas-de-Calais, la nappe de la craie est habituellement considérée, notamment pour sa représentation piézométrique, comme une nappe unique, quel que soit le réservoir crayeux concerné (Cénomaniens, Turonien moyen, Turonien supérieur-Sénonien).

4.1.5. Structure

Le trait structural majeur du Nord - Pas-de-Calais est le **bombement anticlinal de l'Artois** dont l'axe, globalement nord-ouest/sud-est, s'abaisse vers le Sud-Est et s'estompe à l'approche d'Arras, tandis qu'il s'ouvre à l'Ouest sur les formations jurassiques et paléozoïques du Bas Boulonnais. Dissymétrique, à flanc sud doux et flanc nord plus incliné, cet anticlinal est affecté de failles longitudinales (N 100° à 120°) dues au rejeu en sens inverse de failles tardi-hercyniennes. Il en résulte un découpage du flanc nord en compartiments de plus en plus abaissés dans cette direction. Le socle paléozoïque, discordant sous la couverture Crétacé supérieur, affleure localement dans l'axe de l'anticlinal (au Nord de Fruges) et sur le flanc nord, le long de la faille de Pernes. Les rejets post-crétacés de ces failles longitudinales peuvent atteindre une soixantaine de mètres pour la faille de Ruitz et une centaine de mètres pour celles de Pernes et de Marqueffles.

Séparant les bassins tertiaires des Flandres et d'Orchies, l'**anticlinal du Mélantois** (faillé Sud-Sud-Ouest/.Nord-Nord-Est dans sa partie sud) fait réapparaître les terrains crétacés transgressifs et relativement peu épais, où la craie du Turonien supérieur et du Sénonien peut aussi quasiment disparaître par érosion.

Plus à l'Est, Valenciennes et l'Escaut sont situés sur un axe structural majeur, actuellement sous forme de **horst** avec relèvement brutal des couches, séparant le bassin d'Orchies, à l'Ouest, de la fosse de la Haine (début du bassin de Mons) à l'Est.

4.1.6. Piézométrie de la nappe de la craie

Deux campagnes de mesures piézométriques ont été réalisées en 2009 durant les hautes puis les basses eaux. Elles font l'objet du rapport RP- 58542-FR dont les principaux résultats sont repris ci-dessous.

Un total de 223 points a été mesuré fin avril/début mai pour la campagne des hautes eaux ; 362 points ont été mesurés fin septembre/début octobre pour la campagne des basses eaux (points représentés par des étoiles sur les cartes des figures 8 et 9).

L'analyse des cartes piézométriques issues des campagnes hautes eaux et basses eaux 2009 (fig. 7 et 8, représentant les isopièzes en mètres N.G.F.) indique que la nappe de la craie :

- « épouse » d'une manière générale la morphologie de la topographie naturelle des terrains traversés, en particulier dans les secteurs où les reliefs sont bien marqués (collines d'Artois notamment, bordures de l'Avesnois notamment).
- Se trouve « drainée » par les vallons et vallées sèches sous l'effet d'une meilleure perméabilité du réservoir généralement liée à une fissuration et fracturation secondaire.
- Subit des modifications de ses écoulements à l'approche des principaux champs captant de la région (notamment ceux implantés au sud Lille : Les Ansereuilles à Wavrin, Don Sainghin, Houplin Ancoisne).
- Conserve une même configuration d'écoulement entre les périodes de hautes et basses eaux, ces deux périodes étant toutefois marquées par des isopièzes pouvant se décaler spatialement avec des dômes et des dépressions d'extensions variables.

Remarque : Une carte piézométrique est une interprétation à un temps donné à partir de mesures ponctuelles.

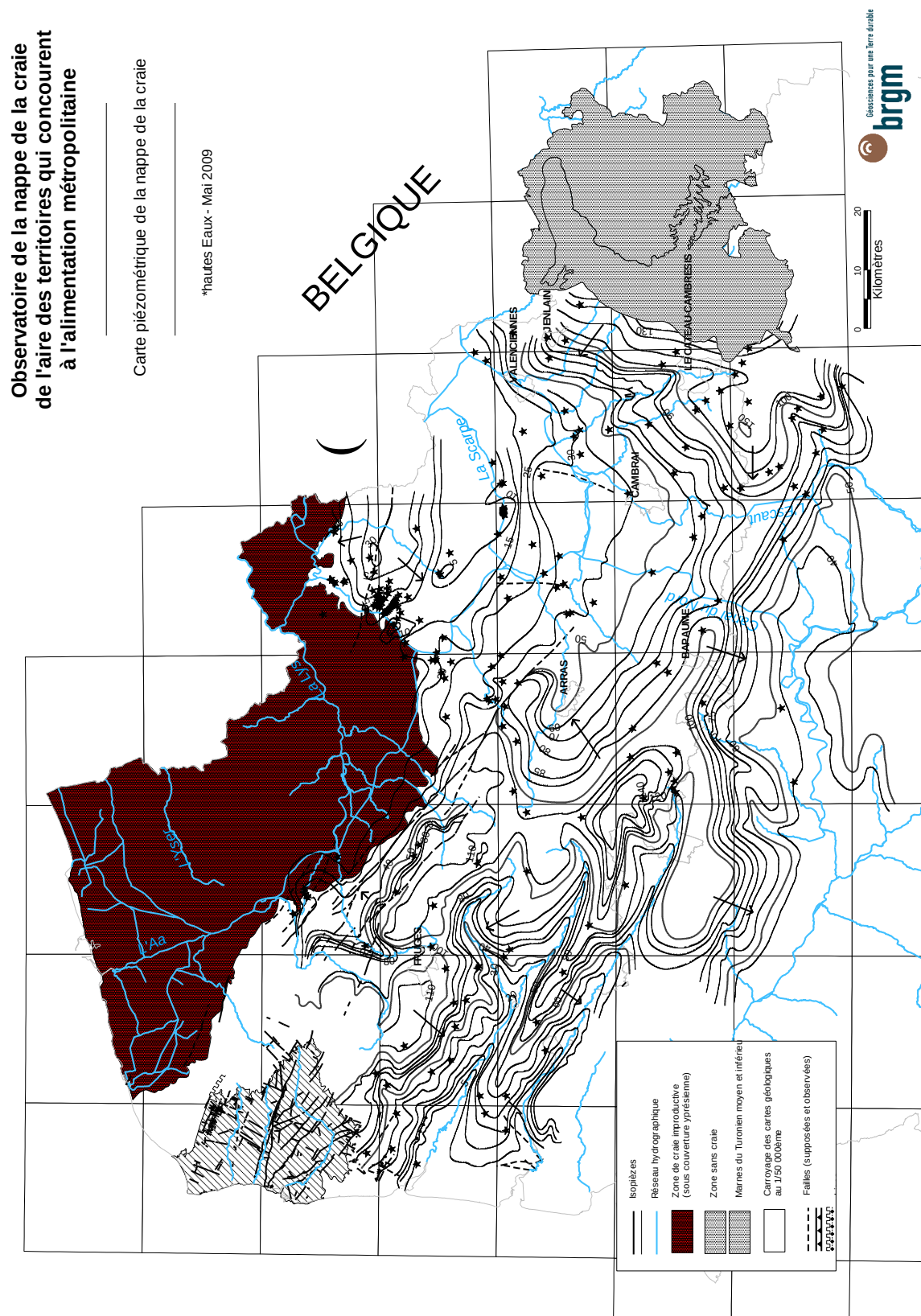


Figure 7 Carte piézométrique Hautes eaux 2009 (en m N.G.F.)

Concernant le sens d'écoulement de la nappe, la région est traversée du Nord-Ouest vers le Sud-Est par une ligne principale de partage des eaux souterraines, partant de l'extrémité orientale de la « boutonnière » du Boulonnais, et après un décrochement d'une dizaine de kilomètres vers le Sud, à l'Est de Saint-Pol (interfluve Ternoise-Scarpe), se poursuivant par les environs de Bapaume, passant ensuite entre Cambrai et Saint-Quentin. On peut arbitrairement diviser la région en deux à partir du méridien d'Arras :

- à l'Ouest, dans le Haut et le Moyen Artois, pays de collines au relief relativement prononcé, les isopièzes sont serrées (gradients hydrauliques de 0,5 % à 4 %), avec des écoulements assez étroitement liés au relief et aux vallées généralement drainantes tant que la nappe est libre,
- à l'Est, dans un pays plutôt tabulaire, correspondant approximativement au bassin de la Scarpe et de l'Escaut, la piézométrie devient plus lâche (gradients de 0,5 % à 1,25 %) et les écoulements moins tributaires du système hydrographique.

Dans le secteur occidental, l'axe principal de partage des eaux souterraines coïncide avec les altitudes les plus élevées de l'Artois. Les cotes piézométriques y sont supérieures à +100 m, le dôme piézométrique s'abaisse ensuite rapidement en direction d'Arras où il fait place à la dépression de la vallée de la Scarpe, mais se prolonge dans sa partie Sud, après le décalage de Saint-Pol, avec des cotes encore supérieures à +100 m au Sud de Bapaume.

Le versant nord du dôme piézométrique principal de l'Artois est modelé par les hautes vallées drainantes de la Hem, de l'Aa et de la Lys.

Le versant sud du dôme piézométrique de l'Artois, nettement plus étendu que celui du Nord, est profondément marqué par les vallées fortement drainantes et parallèles de la Canche et de l'Authie, orientées N 120° et séparées par une étroite crête piézométrique rectiligne.

Plus à l'Est, dans la plaine d'Arras et le Cambrésis, l'écoulement est globalement dirigé vers le Nord, convergent vers le bassin d'Orchies où la nappe devient captive sous les formations tertiaires. On observe une vaste zone relativement déprimée au nord de Douai, au niveau du bassin d'Orchies jusque vers Saint Amand les Eaux. L'absence de prélèvements importants dans ce secteur donne à penser que cet abaissement piézométrique serait lié à une mauvaise perméabilité et une mauvaise alimentation de l'aquifère de la craie qui se trouve en position captive sous les formations argileuses du Tertiaire.

A l'axe anticlinal du Mélantois, qui sépare les bassins des Flandres et d'Orchies, correspond aussi un dôme piézométrique.

Vers Le Cateau et vers l'Est (approche de la remontée du socle paléozoïque de l'Avesnois), l'écoulement souterrain est dirigé vers le Nord-Ouest, avec des gradients plus accentués (1 à 2 %) et un rôle drainant marqué du Haut Escaut et ses affluents de rive droite.

Nature hydraulique des failles

Au Sud-Est de la haute vallée de la Lys, la piézométrie est fortement influencée par la série de failles longitudinales du horst de l'Artois qui peuvent engendrer des décalages de plusieurs dizaines de mètres par suite du compartimentage de l'aquifère (Figure 9)

On peut considérer les failles suivantes comme quasiment étanches, sur au moins une partie de leur tracé :

- Faille de Marqueffles : au SW de cette faille, la craie aquifère a été érodée et elle est donc moins épaisse et moins productive. Les écoulements bloqués vers le nord créent des sources de débordement dans la vallée de la Scarpe. Les courbes piézométriques sont nettement déviées dans sa partie sud.
- Faille de Ruitz : on observe le même comportement qu'autour de la faille de Marqueffles, avec en plus une fracturation secondaire SW-NE augmentant localement la productivité dans les vallées.
- Faille de Pernes : au sud de la faille, les formations aquifères sont érodées (épaisseur de quelques mètres). Plus au sud, la nappe est drainée par la Canche.
- Le "groupe de failles", au NW, est plutôt drainant et augmente localement la transmissivité ce qui peut favoriser l'artésianisme en aval.

Les autres failles ne semblent pas avoir d'influence significative sur les écoulements dans la nappe de la craie. Ce sont les failles de Seclin, d'Haubourdin et de Bailleul.

La carte de la Figure 9 illustre la position des failles, où l'on peut appliquer les hypothèses hydrauliques précédentes, le drainage marqué de nappe par la Scarpe au sud de la faille de Marqueffles, le drainage de la nappe par la Ternoise (bassin de la Canche) au sud de la faille de Pernes.

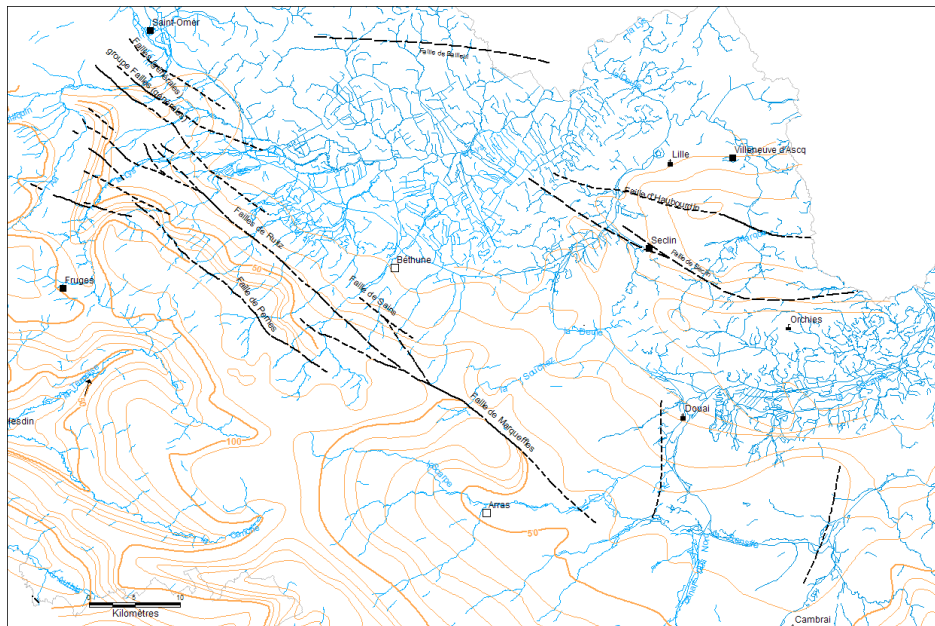


Figure 9 : Influence hydraulique des failles (piézométrie de mai 2009)

4.1.7. Caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives

La perméabilité matricielle de la craie, même la plus pure, reste faible (10^{-8} à 10^{-9} m/s). Plus aquiclude qu'aquifère, la craie devient aquifère grâce au développement de la fissuration avec des ouvertures et une connectivité suffisantes pour permettre un écoulement gravitaire, mais aussi à la faveur de joints de stratification plus ou moins ouverts. Il en résulte une variabilité très importante de la perméabilité tant verticalement qu'horizontalement (selon des directions souvent combinées de la fracturation) : le milieu crayeux est en réalité hydrauliquement hétérogène.

La distribution verticale des perméabilités, qui n'est guère connue qu'à la faveur d'essais ponctuels ou de travaux souterrains (tunnel sous la Manche, métro lillois, entre autres), se révèle très hétérogène :

- Dans la craie cénomaniennne de Sangatte (entrée du tunnel sous la Manche), les perméabilités croissent de bas en haut (de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6}$ jusqu'à 10^{-4} m/s). Dans le Pays de Licques, elles varient de 10^{-5} à 10^{-3} m/s, avec quelques passages décimétriques à 10^{-2} m/s.
- Dans la craie du Turonien supérieur-Sénonien du secteur du tunnel sous la Manche, les perméabilités s'échelonnent de moins de 10^{-8} m/s jusqu'à $1,7 \cdot 10^{-2}$ m/s. Leur répartition verticale est liée au recoupement de fractures ou de joints de stratification ouverts : ainsi, à mi-distance entre Calais et Sangatte, dans la craie sénonienne confinée sous la couverture flamandienne, les plus fortes perméabilités ($3 \cdot 10^{-4}$ et $8 \cdot 10^{-4}$ m/s) sont respectivement situées à 57-58 m, puis 77-78 m de profondeur mais séparées par une zone à $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

La répartition horizontale des perméabilités est souvent corrélable avec les caractéristiques géomorphologiques de la région, les zones les plus perméables correspondant généralement aux axes de drainage, eux-mêmes souvent liés au développement directionnel de la fracturation (vallées sèches et vallées humides sous alluvions). Régionalement, la bordure du recouvrement tertiaire des Flandres reste la zone où les plus fortes perméabilités sont mises à profit pour l'exploitation de la nappe de la craie.

La transmissivité et surtout le débit spécifique (plus souvent déduit des traditionnels pompages d'essai par paliers), sont connus pour de nombreux ouvrages d'exploitation. Bien que distribuées de façon non uniforme à travers la région, les valeurs ponctuelles (près de 700 prises en compte) de transmissivité (et de débit spécifique) des aquifères crayeux du Nord - Pas-de-Calais, se rangent dans une fourchette de $1,5 \cdot 10^{-5}$ à $2,8 \cdot 10^{-1}$ m²/s avec une moyenne de $1,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s, selon la répartition suivante :

T ≥	$1 \cdot 10^{-1}$ m ² /s	$5 \cdot 10^{-2}$ m ² /s	$1 \cdot 10^{-2}$ m ² /s	$5 \cdot 10^{-3}$ m ² /s	$1 \cdot 10^{-3}$ m ² /s
%	1,6	5	31,6	48	85,5

Les valeurs de transmissivité supérieures ou égales à 1.10^{-2} m²/s se rencontrent :

- En pied du flanc nord de l'anticlinal de l'Artois, de part et d'autre de la limite du recouvrement quaternaire marin (secteur de Sangatte-Calais) puis du recouvrement tertiaire des Flandres, tant en nappe encore libre que lorsqu'elle devient captive sous faible recouvrement. Une telle zone s'étend au Sud-Ouest d'une ligne Calais-St Omer-Lillers-Béthune-La Bassée, d'abord étroite (de l'ordre de 1 à 2 km entre Sangatte et Guînes) puis s'élargissant vers le Sud-Est où elle atteint 4 à 5 km de large.

- Dans la plupart des basses vallées avant recouvrement tertiaire.

- Dans les vallées drainant fortement la Craie, avec ou sans dépôt alluvial épais.

- Dans le Bassin minier à proximité du bassin d'Orchies, de Carvin à Douai.

- En quelques points de la plaine littorale occidentale, en nappe captive sous une couverture quaternaire.

Les valeurs les plus élevées se rencontrent surtout dans les vallées humides, sous des alluvions réalimentant la nappe de la craie turo-sénonienne, notamment à Quiery-La-Motte ($2,8.10^{-1}$ m²/s) dans la vallée de l'Escrebieux et près d'Arras ($2,5.10^{-1}$ m²/s) dans la vallée de la Scarpe.

Si la transmissivité est généralement très élevée ($T > \text{ou} = 1.10^{-2}$ m²/s) lors du passage de l'aquifère crayeux sous la couverture tertiaire des Flandres, et le reste encore en nappe captive à moins de 5 km de la limite d'affleurement, ses valeurs chutent très vite quand la craie plonge sous le Tertiaire (Audruicq : 5.10^{-5} m²/s; Estaires : $1,5.10^{-5}$ m²/s; Armentières : 5.10^{-4} m²/s).

Dans la craie sub-affleurante des plateaux, la transmissivité reste généralement médiocre ($10^{-4} < T < 10^{-5}$ m²/s), pouvant néanmoins dépasser 1.10^{-3} m²/s dans les vallons secs.

Le coefficient d'emmagasinement est moins bien connu régionalement. En nappe libre, il s'agit de la porosité efficace dont la valeur moyenne est de 2 % (sur 38 valeurs), avec quelques valeurs exceptionnelles atteignant et même dépassant 10 %. En nappe captive le coefficient d'emmagasinement reste le plus souvent de l'ordre de 10^{-4} (1 à 7.10^{-4}).

A Béthune, une trentaine de traçages a été réalisée (de 1979 à 1987) en pompage dans la nappe semi-captive de la craie (sous 18,6 m de Landénien) suivant quatre directions et des distances de 10 à 27 m. Les valeurs brutes de dispersivité longitudinale s'échelonnent entre 0,2 et 5 m (moyenne : 2,7 m), tandis que la porosité cinématique varie de 1,1 à 5,7 % (moyenne : 3,3 %). En modèle convergent multicouche, avec échanges verticaux et diffusion dans la matrice, les valeurs moyennes de dispersivité longitudinale et de porosité cinématique sont respectivement de 0,52 m et 2 %.

A Sangatte, un multitraçage réalisé en 1988 sur le nouveau captage a été interprété en tenant compte de la superposition de l'écoulement convergent (pompage) et de l'écoulement naturel. Les valeurs obtenues pour une distance de 39 m sont :

- Dispersivité longitudinale : 9,7 m
- Dispersivité transversale : 2 m
- Porosité cinématique : 3,4 %

4.1.8. Relations avec les eaux de surface

Le drainage de la nappe de la craie par la quasi-totalité des cours d'eau est effectif dans la moitié ouest de la région en raison de leur encaissement relatif dans la craie subaffleurende. Il en est de même à l'Est pour le Haut Escaut et ses affluents de rive droite. Ce drainage est visible sur les cartes piézométriques. Presque tous les modèles numériques réalisés confirment le rôle drainant de la plupart des cours supérieurs des rivières. Ainsi, la Lys en amont d'Aire-sur-la-Lys drainerait la craie à raison de 32 l/s par km, la Canche, avec la Ternoise, serait alimentée à raison de 13,7 l/s, la Sensée drainerait jusqu'à 647 l/s et l'Escaut en amont de Cambrai 189 l/s. Plus globalement, l'ensemble de la nappe libre de la craie alimenterait les cours d'eau à raison 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 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 réalimentent 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.

4.1.9. Relations avec les autres aquifères

Les échanges par drainance entre la nappe des sables landéniens et la craie sont facilités par le caractère souvent finement sableux ou tuffacé de l'Argile de Louvil. Sur la majeure partie de la bordure méridionale des Flandres, la mise en charge de la nappe de la craie permet ainsi une alimentation par drainance ascendante de la nappe des sables « landéniens » à travers l'Argile de Louvil semi-perméable, mais les nombreux pompages inversent souvent les échanges.

Plus à l'intérieur du bassin des Flandres, l'aquifère crayeux peut aussi être réalimenté par la nappe, également captive, des sables landéniens, à la faveur de failles dont le rejet peut localement dépasser l'épaisseur des Argiles de Louvil avec, pour conséquence, une forte minéralisation des eaux de la craie (cas de Laventie à 15 km au Nord-Est de Béthune où le niveau piézométrique est supérieur d'une dizaine de mètres dans les sables par rapport à la craie).

En outre, en situation perchée et en limite d'affleurement, la nappe des sables landéniens peut se déverser dans la craie. Généralement modeste, ce type d'échange a été pris en compte dans certaines modélisations (52 l/s dans le Sud du Douaisis). Sur la bordure méridionale des Flandres, en limite de recouvrement par les Argiles de Louvil, il existe par contre quelques débordements de la nappe de la craie qui se traduisent par des sources et des cours d'eau qui, à leur tour peuvent alimenter, un peu plus à l'aval, les sables tertiaires.

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 contribuent 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) fournissent (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 apportent par drainance quelque 156 l/s à la nappe de la craie; cette drainance est 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; elle a localement pour conséquence la pollution des eaux captées dans la craie.

Une drainance descendante peut également se produire à partir de la nappe des dunes littorales qui recouvrent les formations flamandaises peu perméables des Bas Champs qui, à leur tour, confinent la craie. Cette réalimentation se traduit par un dôme piézométrique dans la nappe de la craie, entre les baies de Canche et d'Authie.

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 que par quelques dizaines de mètres 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 en 1973.

5. Modelisation

5.1. RETOURS D'EXPERIENCES DES MODELES PRECEDENTS

5.1.1. Modèles hydrodynamiques de la nappe de la craie

La nappe de la craie a été abondamment étudiée, dès la fin du XIX^{ème} siècle. Elle a fait l'objet d'un certain nombre de modèles hydrodynamiques à partir des années 1970. La [Figure 10](#) présente l'emprise d'un certain nombre de ces modèles.

Plusieurs rapports des études précitées ont pu être consultés à la bibliothèque de l'Agence de l'Eau Artois Picardie à Douai, mettant en lumière les éléments suivants :

- Hormis le modèle Craie/Carbonifère, les modèles ont été construits pour répondre à une problématique locale (gestion d'un champ captant, problème de pollution d'un captage, remontée de nappe...) et leur emprise est limitée au secteur étudié ou au bassin versant concerné. Les conditions aux limites nécessitent donc d'imposer des potentiels hydrauliques fixes ou des limites à flux nul arbitraires ;
- Les modèles plus anciens sont monocouches, tandis que les plus récents, à partir des années 1980 sont multicouches, surtout pour représenter les échanges avec les aquifères surmontant la craie : les alluvions et les sables Landéniens, et plus rarement avec le Cénomaniens sous-jacent ;
- Les relations nappe-rivière ne sont pas explicitement simulées, sauf pour deux modèles récents (champ captant de Verchin et Nord-Est de Valenciennes, utilisant la fonctionnalité idoine de Modflow) ; dans la plupart des modèles les rivières sont considérées comme des lignes de potentiel imposé ;
- Que ce soit en régime transitoire ou en régime permanent, la plupart des modélisations considèrent une infiltration constante. Pour Verchin et Valenciennes, un bilan hydrologique faisant intervenir la RFU est utilisé pour le régime transitoire (Formule de Thornthwaite pour Verchin). Le modèle de l'Artois et du Cambrésis de 1979 utilise un modèle global à réservoirs pour simuler l'infiltration ;
- Le calage des modèles est réalisé en deux étapes : en régime permanent tout d'abord sur la base d'une carte piézométrique ou de quelques mesures synchrones, suivi d'un calage en régime transitoire qui s'étend de quelques mois à une dizaine d'années ;
- Le modèle de la nappe de la craie sous Lille souligne le rôle non négligeable de l'infiltration liée aux pertes des réseaux d'eau en zone urbaine (11 l/s/km², à replacer toutefois dans le contexte de 1974), ainsi qu'un débit de fuite vers la Belgique de l'ordre de 25 l/s.

Ces modèles, généralement de bonne facture, restent cependant conceptuellement insuffisants pour répondre à la problématique de gestion de l'Aire des territoires qui concourent à l'Alimentation Métropolitaine.

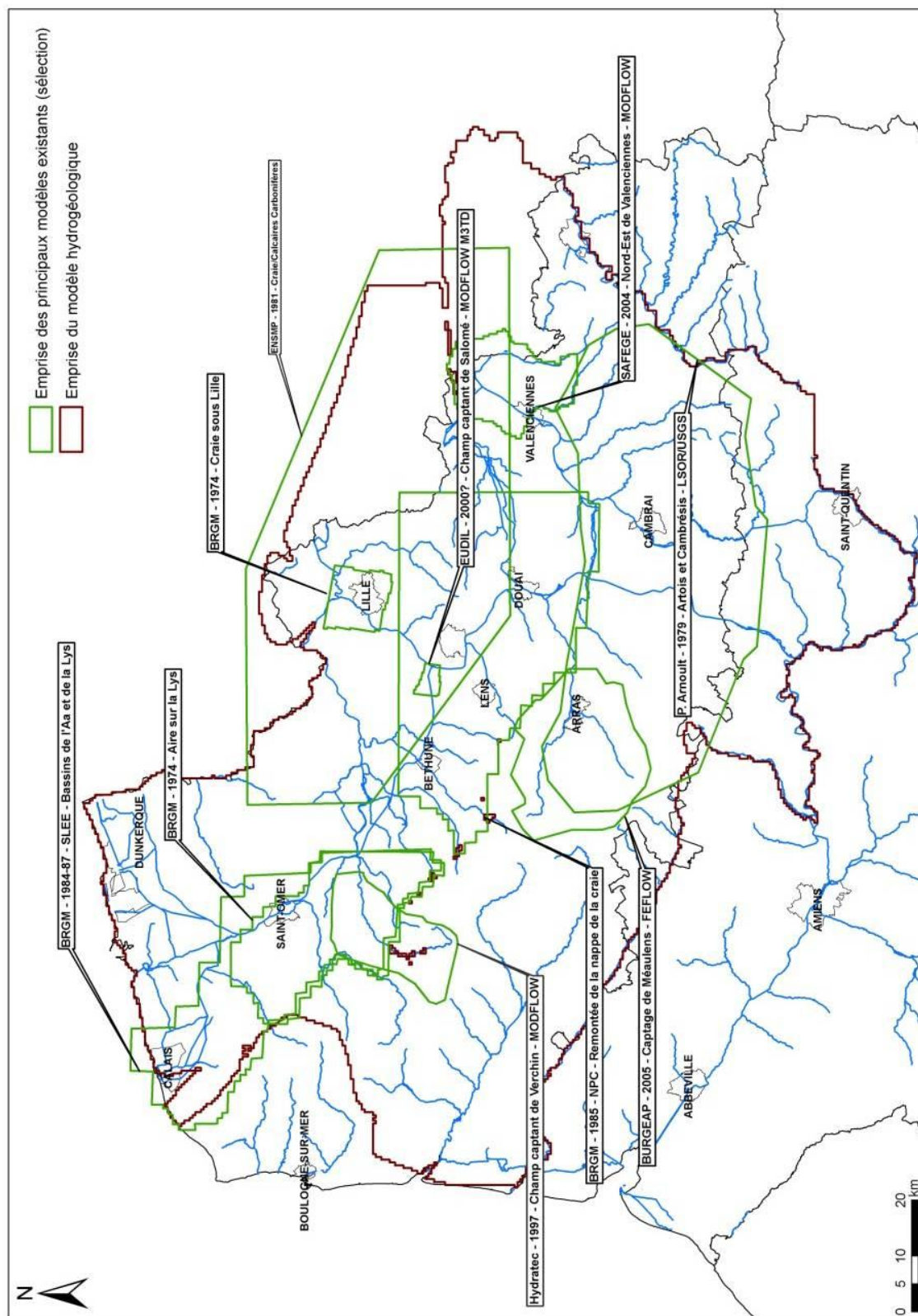


Figure 10 : Secteurs étudiés par modélisation numérique

5.2. CONTEXTE DE LA MODELISATION

Compte-tenu des nombreux travaux déjà effectués, on peut s'interroger sur la pertinence d'un nouveau modèle. De nombreux aspects justifient cependant cette démarche :

- En premier lieu, la taille du modèle et la **prise en compte du contexte régional** constitue une approche nouvelle : alors que tous les précédents modèles restent locaux, le secteur d'étude est élargi de manière à prendre en compte la nappe de la craie dans son ensemble régional « hydrogéologiquement cohérent », permettant d'imposer des conditions hydrauliques naturelles qui n'affecteront pas ou peu les résultats : limites étanches (limite d'affleurement de la craie), zones de drainage (par les rivières) et zone d'infiltration. Toutes les masses d'eau qui participent à l'alimentation de la métropole Lilloise sont bien entendu intégrées, mais également toutes les masses d'eau en lien avec ces dernières ;
- **Les écoulements du système aquifère crayeux sont représentés dans leur globalité, notamment les échanges avec les autres aquifères régionaux** : les sables landéniens et les calcaires carbonifères. Le modèle est donc multicouche, et prend en compte les formations imperméables (Argiles des Flandres, argiles de Louvil, Dièves, craie Cénomaniennne marneuse), qui participent également à la dynamique des écoulements par leur emmagasinement ;
- De nombreuses mesures piézométriques sont disponibles (environ 170 chroniques existent, constituées principalement par le réseau de suivi piézométrique du bassin Artois-Picardie, que complètent le réseau de suivi piézométrique du département du Pas-de-Calais ainsi que le réseau de suivi piézométrique dans le cadre de l'après-mine de l'UTAM Nord), sur une longue échelle de temps (supérieure à une trentaine d'années pour la plupart et, jusqu'à 100 ans pour certains) et bien réparties sur l'ensemble de la région NPC. **La confrontation du modèle et de ses nombreuses observations permettra d'en assurer la robustesse** et la bonne compréhension des phénomènes qui caractérisent les écoulements. Les modèles calés en régime transitoire n'ont généralement pas dépassé 10 ans de mesure ;
- De la même manière, les prélèvements dans la nappe de la craie sont connus relativement précisément à partir des années 1980. L'agence de l'eau Artois-Picardie dispose d'une base de données qui recense chacun des captages, son volume prélevé annuel et sa localisation précise depuis 1982. **Dans un contexte de gestion globalisée de la ressource, la valorisation de ces informations dans un modèle régional est essentielle** ;
- Les fluctuations piézométriques de la nappe de la craie, qu'on peut classer en trois familles de fréquence annuelle à interannuelle, dépendent directement du cycle des précipitations, que tempère l'inertie de la nappe. **L'estimation fine des infiltrations pluviales**, lame d'eau infiltrée et temps d'infiltration jusqu'à la nappe, est dès lors indispensable pour représenter la dynamique des écoulements. **Un modèle global pluie-débit est mis en œuvre** pour simuler l'infiltration et est couplé directement au modèle hydrodynamique maillé ;
- La nappe de la craie est drainée par presque tous les cours d'eau régionaux, mais en de nombreux endroits ces échanges sont inversés, et les rivières alimentent la nappe. Pour représenter cette dynamique, **les échanges nappe-rivière sont modélisés grâce à un module spécifique couplé avec le modèle maillé**, en utilisant la relation de Manning ;
- Enfin, **un modèle de transfert de masse sera réalisé**, s'appuyant sur le modèle hydrodynamique calé. L'aspect qualité des eaux dans les modélisations existantes a jusqu'à présent très peu été pris en compte.

5.3. COLLECTE DES DONNEES

Etape préalable à toute modélisation, la collecte des données a commencé dans le cas présent dès la phase 1 de ce projet. La construction d'un modèle nécessite le recueil et la synthèse des données suivantes :

- Géologie : l'analyse géologique a été réalisée à partir de l'interprétation d'environ 1 100 forages, ce qui a permis de mettre en place un référentiel hydrogéologique informatisé. e travail a été complété par la récupération des coupes géologiques disponibles dans la région
- Hydrogéologie : caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (conductivité hydraulique, transmissivité, coefficient d'emménagement, coefficient d'échange...), piézométrie de la nappe en période de basses et de hautes eaux, conditions aux limites (niveaux, flux),
- Hydrologie : réseau hydrographique (caractérisé par sa géométrie, ses débits, ses niveaux...).
- Climatologie : la pluviométrie et l'évapotranspiration.
- Prélèvements : pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'industrie et l'irrigation

Toutes les données géolocalisées vont permettre de construire les différentes grilles du modèle : géométrie, conditions aux limites, recharge, propriétés hydrauliques.

6. Construction du modèle hydrodynamique

6.1. MODELE CONCEPTUEL

Pour répondre aux objectifs visés, le modèle doit pouvoir représenter l'hydrosystème dans sa globalité afin de reproduire les écoulements superficiels et souterrains, au sein des aquifères et les échanges entre aquifères.

Les niveaux aquifères pris en compte dans le modèle sont :

- Les sables d'Ostricourt,
- La craie,
- Les Calcaires Carbonifères.

Aux endroits où les alluvions sont en contact avec la craie, une seule formation a été considérée. Les niveaux imperméables ou peu productifs entre ces entités aquifères sont également modélisés.

A noter que les sables d'Ostricourt et les calcaires carbonifères sont modélisés pour une estimation correcte des flux. Par ailleurs, la nappe du Carbonifère sous la Lille est en cours d'étude.

Limites du modèle

Les résultats de la modélisation sont attendus pour la nappe de la craie sur l'aire d'alimentation de la métropole lilloise, c'est-à-dire 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).

Toutefois, afin de prendre en compte des limites de modélisation le plus réaliste possible d'un point de vue hydrodynamique, la zone de modélisation a été étendue à l'ensemble de la région Nord Pas de Calais (hors formations primaires de l'avesnois et formations jurassiques du Boulonnais) ainsi que sur la rive droite de la Somme.

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

- Les limites ouest et est du réservoir correspondent aux limites du réservoir crayeux, où affleurent les formations sous-jacentes, respectivement le Boulonnais et l'Avesnois, et constituent des limites à flux nul ;
- Au nord, la craie est captive et s'enfonce sous de puissants dépôts cénozoïques (Flandres et bassin d'Orchies). Bien que géologiquement la craie existe encore, le poids des terrains sus-jacents ferme les fissures et joints de stratification de la formation qui n'est plus aquifère. La frontière avec la Belgique constitue une limite à flux nul ;
- Le long de la mer du Nord, la charge est imposée à 0 m NGF, niveau de la mer ;
- Au sud, l'Authie, l'Ancre et la Somme draine largement la nappe de la craie et constituent une limite de débordement, contrôlé par la hauteur du fond de ces cours d'eau.

Représentation numérique

Le modèle est construit suivant un schéma en différences finies, chacune des couches est représentée en plan par un maillage constitué de mailles carrées de 500 m x 500 m. C'est un modèle de type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation considérée et la face inférieure au mur de cette formation (cf ~~Figure 11~~~~Figure 11~~~~Figure 11~~).

Logiciel utilisé

Le logiciel utilisé est Marthe v7.1 (2010), dont on trouvera une description détaillée en annexe 2. Ce logiciel est intensément utilisé et développé au BRGM depuis plus de 25 ans.

6.2. GEOMETRIE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

6.2.1. Le modèle géologique du Nord Pas de Calais

La géométrie des formations aquifères du Nord Pas de Calais a fait l'objet d'un modèle géologique complet, réalisé à l'aide de GDM et Multilayer, logiciels de modélisation géologique développés par le BRGM.

Neuf couches ont été prises en compte (Tableau 1) :

- 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,
- Les Dièves vertes et bleues du Turonien moyen et inférieur,
- Les Craies et marnes cénomaniennes,
- Le « socle » âgé du Crétacé inférieur, Jurassique et Paléozoïque.

Les isohypses et isopaques calculés par le modèle géologique au pas d'espace de 500 m de côté permettent de reconstituer les toits et murs des formations hydrogéologiques.

Sur le plan hydraulique, les niveaux piézométriques de la craie et des alluvions sont confondus et le contraste de perméabilité faible. Pour ces raisons, les alluvions et la craie sont considérées comme une entité hydrogéologique homogène aux endroits où ces deux formations sont en contact.

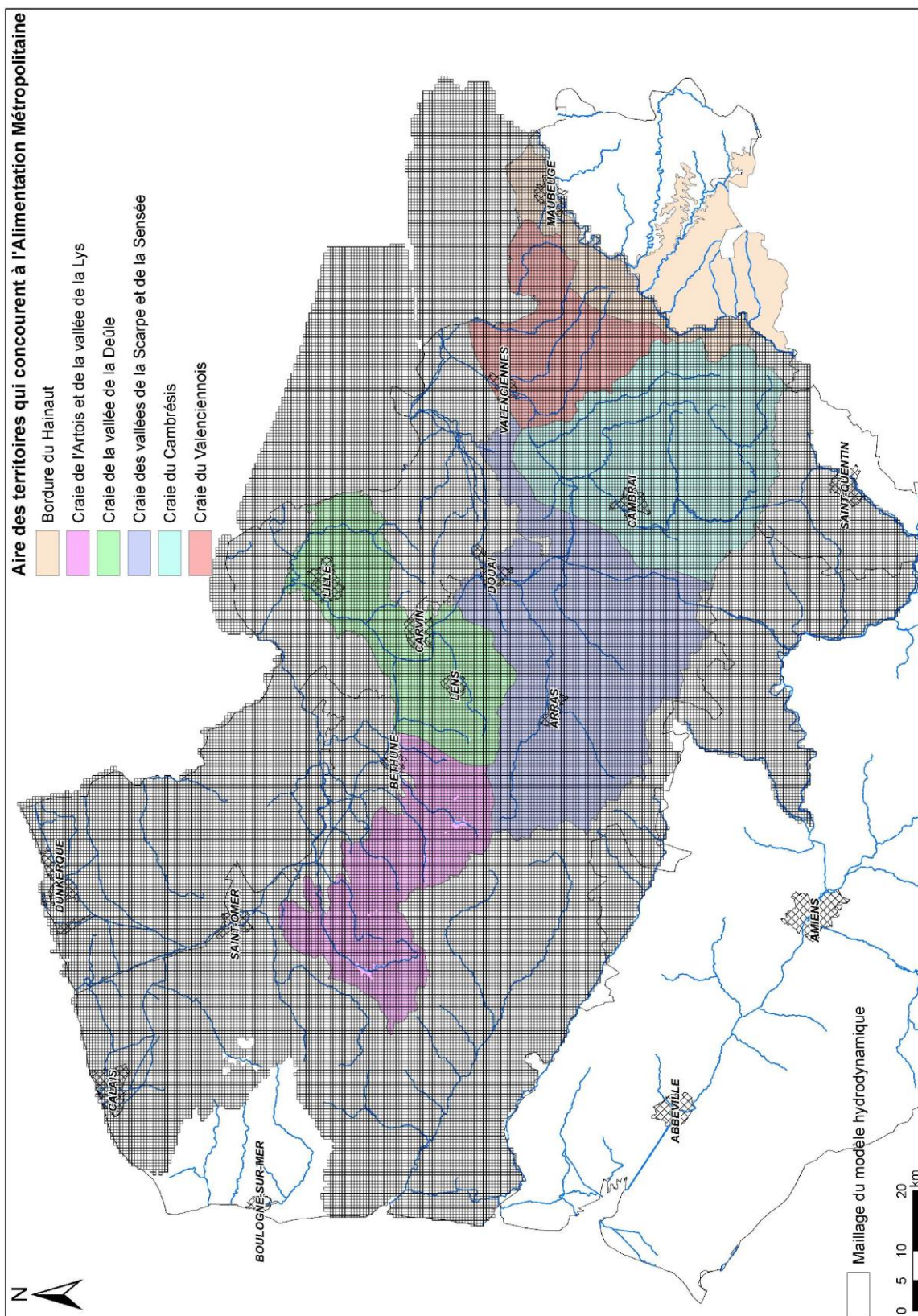
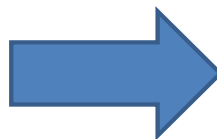


Figure 11 : Extension et maillage du modèle

âge	Formations géologiques	Numéro de couche
QUATÉRNAIRE	Alluvions anciennes et modernes du Quaternaire ; sables littoraux du Quaternaire	1
	Limons des plateaux du Quaternaire	2
TERTIAIRE	Argiles des Flandres (Argiles d'Orchies et de Roubaix) de l'Yprésien	3
	Sables d'Ostricourt, du Quesnoy, de Grandglise et de Bracheux du Landénien supérieur (ou Thanétien supérieur)	4
	Argile de Louvil du Landénien inférieur (ou Thanétien inférieur)	5
SECONDAIRE (Crétacé supérieur)	Craie blanche à silex du Turonien supérieur au Sénonien	6
	Dièves bleues et vertes du Turonien inférieur et moyen	7
	Craies et marnes du Cénomanién	8
PRIMAIRE À SECONDAIRE	Le « Socle » : comprenant l'ensemble des formations géologiques du Secondaire (Crétacé inférieur) au Primaire	9



Formations hydrogéologiques	Caractéristiques hydrauliques	Numéro de couche
Limons des plateaux	Semi-perméable	1
Argiles des Flandres	Aquitard	2
Sables du Landénien	Aquifère	3
Argile de Louvil	Aquitard, aquifère dans les horizons sableux indurés (« Tuffeau de base »)	4
Craie du Turonien supérieur au Sénonien productive	Aquifère	5
Craie du Turonien supérieur au Sénonien compacte	Aquitard	6
Dièves	Aquitard	7
Craies et marnes du Cénomanién	Aquitard et aquifère dans le Cénomanién riche en craie	8
Calcaires Carbonifères	Aquifère	9

Tableau 1 : Log géologique régional et log hydrogéologique correspondant à la modélisation

L'emprise du modèle géologique reste toutefois limitée à la région Nord-Pas-de-Calais, d'autres sources de données ont été nécessaires pour compléter la géométrie du modèle (Figure 12) :

- La géométrie de la formation des craies à silex a été complétée au sud par la géométrie du modèle Somme. Réalisé en 2002 pour la prévision des crues de nappe¹ à l'aide du logiciel Marthe, ce modèle monocouche couvre l'ensemble du bassin crayeux de la Somme. La géométrie des formations crayeuses du Séno-Turonien a été interpolée au pas de 500 m à partir des données de la banque de données du sous-sol (BSS), tout en considérant une épaisseur limite productive de 25 m de zone saturée (voir § 6.2.2).
- 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.
- Bien que la modélisation précise des Calcaires Carbonifères ne soit pas l'objet de l'étude, sa prise en compte comme couche hydrogéologique est nécessaire pour estimer les échanges avec l'aquifère crayeux. L'extension connue à ce jour des Calcaires Carbonifères a été choisie comme limite de cette couche. Une épaisseur productive de 50 m est considérée à partir du toit de cette formation.

L'extension du modèle à la Belgique et à l'emprise des Calcaires Carbonifères a nécessité l'utilisation du modèle numérique de terrain du SRTM² au pas de 90 m.

6.2.2. L'épaisseur de craie productive

Le mur effectif du réservoir aquifère productif de la craie ne correspond en fait que rarement au toit des marnes du Turonien moyen : la capacité aquifère de la craie résulte du développement de sa fissuration et de ses joints de stratification plus ou moins ouverts. Ceux-ci se ferment en profondeur, avec le poids des terrains sus-jacents, entraînant une diminution très sensible de la perméabilité de la craie. Les fissures ouvertes se situent en général dans les 15 à 25 premiers mètres de la partie saturée du réservoir, comme les montrent les diagraphies au micromoulinet (Figure 13).

En pratique, seule la partie fissurée de la craie constitue l'aquifère, tandis que la craie sous-jacente, compacte, forme le substratum. 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 profondeur productive de 25 m ;
- Ce substratum a ensuite été corrigé par rapport au toit des dièves turoniennes sous-jacentes qui réduisent localement cette épaisseur.

¹ Rapport BRGM/RP-51827-FR- Simulation par modèle des hautes-eaux de la Somme (2002)

² Shuttle Radar Topography Mission « finished » data <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

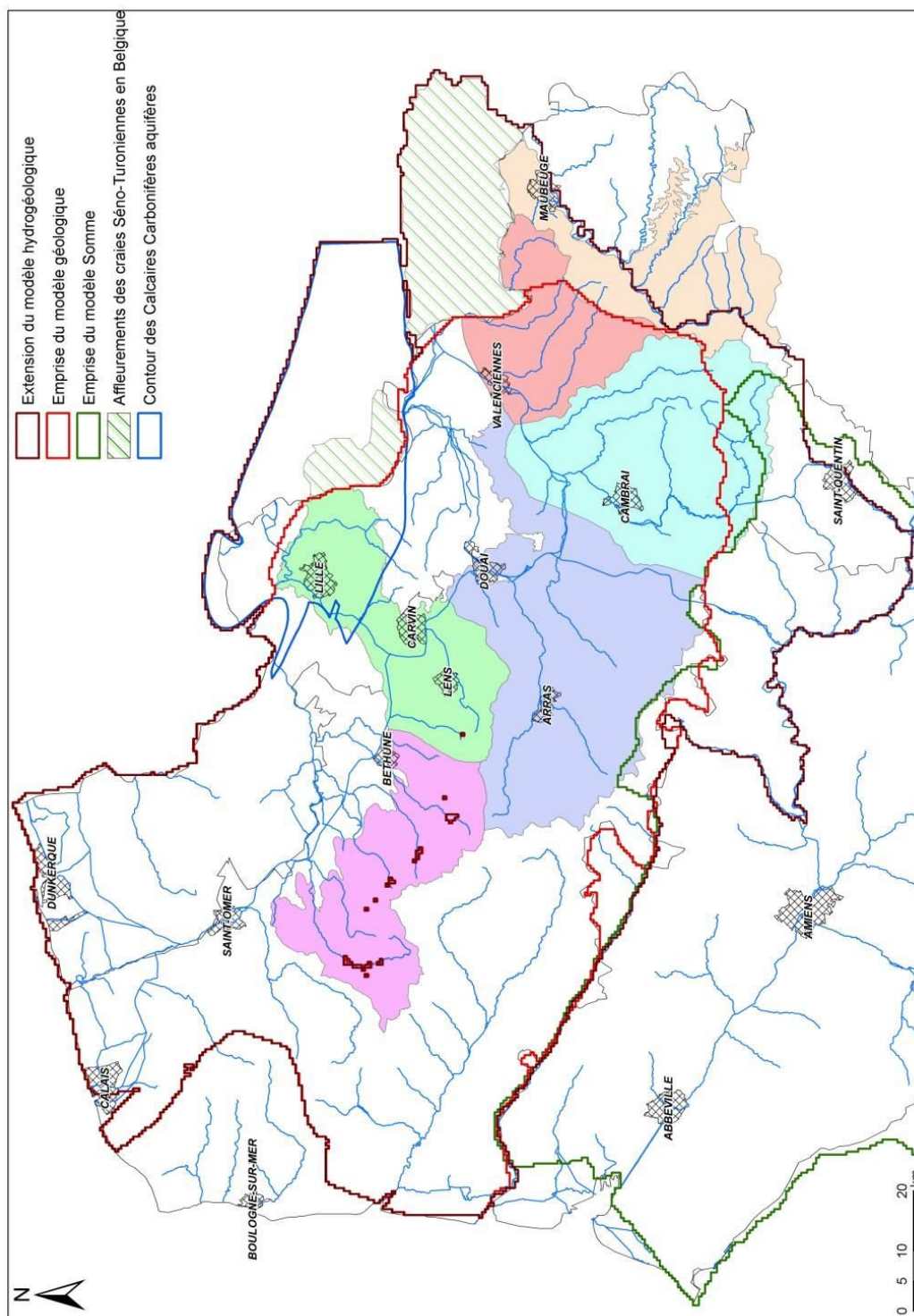


Figure 12 : Emprises des sources de données utilisées pour la construction du modèle hydrogéologique

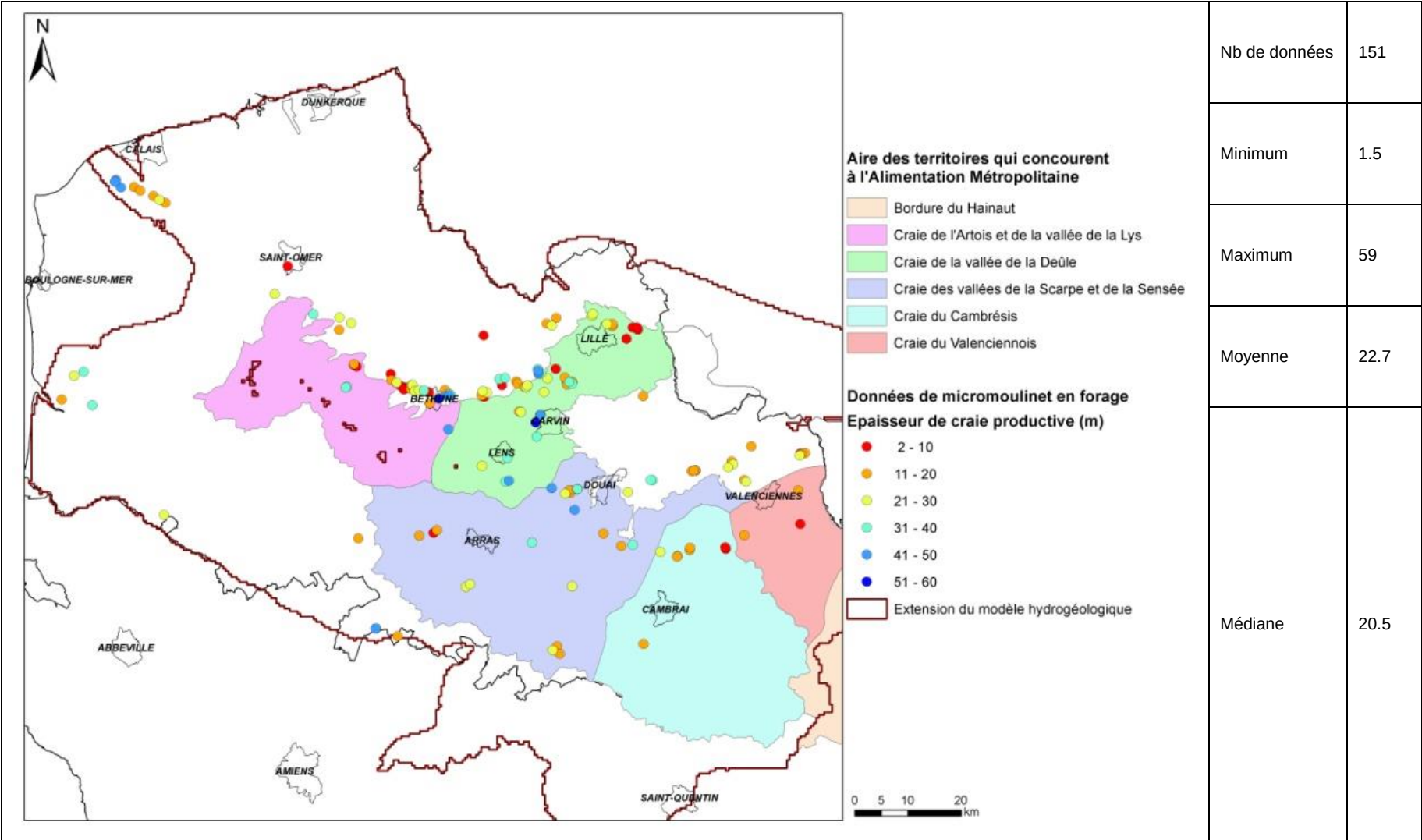


Figure 13 : Données de diagrapie au micromoulinet dans la craie séno-turonienne

6.3. CALCUL DE L'INFILTRATION

6.3.1. Pluie efficace moyenne interannuelle (cf. paragraphe 3.3.2)

La moyenne régionale interannuelle des précipitations efficaces, calculée sur une période de 30 à 40 ans peut être estimée à 265 mm (pour 775 mm/an de précipitation totale). Le bilan moyen régional des précipitations sur 20 années de mesure peut être estimé comme suit³ :

- 75% de la pluie est reprise par ETP, tandis que 25% s'infiltre ou ruisselle ;
- Entre 3 et 5 % seulement de la pluie efficace ruisselle là où la craie affleure tandis que le reste s'infiltre.

La carte des pluies efficaces interannuelles met en évidence leur variabilité géographique (cf. figure 3). **Cette répartition sera introduite dans le modèle en régime permanent comme recharge moyenne.**

6.3.2. Modélisation pluie-débit-niveau piézométrique

Les fluctuations piézométriques de la nappe de la craie montrent une forte relation avec les variations de pluie efficace. Pour mieux représenter ces fluctuations en régime transitoire, une approche plus fine de l'infiltration est nécessaire.

Le modèle global pluie-débit GARDENIA⁴ a été mis en œuvre. Son but est de calculer les apports à la nappe dont les valeurs seront utilisées dans le modèle hydrodynamique. Il prend en compte les constantes de temps qui caractérisent les différentes composantes du cycle de l'eau depuis les précipitations jusqu'à la vidange gravitaire d'une nappe, ainsi que la répartition de cette eau entre écoulements de surface et milieu souterrain. Il ne prend pas en compte les caractéristiques hydrodynamiques du milieu. Il permet de simuler l'évolution des débits à l'exutoire d'un bassin hydrogéologique et/ou l'évolution des niveaux piézométriques en un point distant d'un cours d'eau, situé dans le bassin versant. Les données d'entrée nécessaires sont les chroniques de pluie et d'ETP.

GARDENIA (modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **D**Ébits et des **N**iveaux **A**quifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants. Il en réalise le bilan hydrologique à partir d'une chronique, représentative à l'échelle du bassin, de pluies et d'évapotranspiration potentielle (ETP). Une fois calé sur les observations disponibles, il permet de calculer le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Comme explicité sur la figure 14, GARDENIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;

³ J.Beckelynnck –thèse de doctorat (1981)

⁴ Une description plus détaillée du logiciel GARDENIA est disponible en annexe 2.

- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement lent.

L'allure exponentielle du tarissement des débits de rivières et des niveaux des nappes souterraines rappelle celle de la vidange d'un réservoir. Le comportement d'un système aquifère est donc représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transferts non linéaires permettent cependant d'adapter cette approximation un peu schématique.

Le modèle GARDÉNIA comprend au maximum quatre réservoirs ; les modèles réalisés pour cette étude n'en font intervenir que 3.

Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) pour chacun des pas de calcul.

Des prélèvements ou des injections ou des échanges (pertes ou apports) de débits peuvent être fournis en tant que données d'entrée :

- sous la forme d'un fichier unique au même pas de temps que les données de base (pluie et ETP),
- par une valeur constante.

Les apports sont indiqués en signe positif, les pertes en négatif.

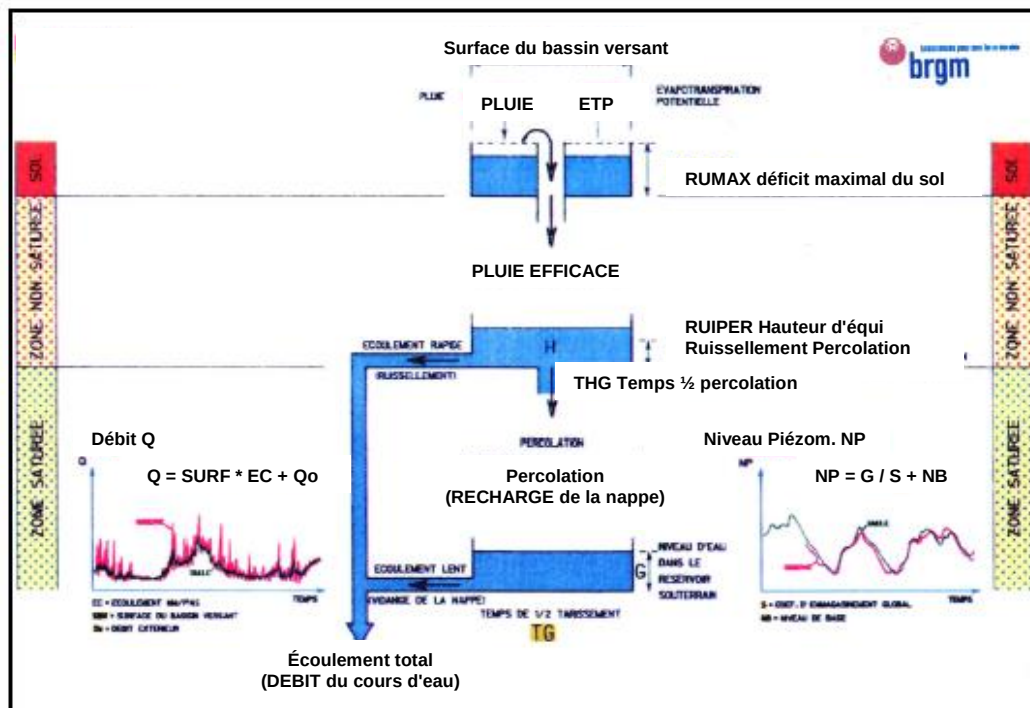


Figure 14 : Principes de GARDÉNIA

Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples (détaillées en annexe) qui sont particulières à chaque réservoir ; ces lois sont contrôlées par les paramètres des modèles (réserve utile, temps de transferts, seuils de débordement, etc.).

Une procédure de calage automatique particulièrement robuste (algorithme de Rosenbrock) permet d'estimer le jeu de paramètres assurant la meilleure restitution des débits et/ou niveaux mesurés.

Le modèle, une fois calé, est en mesure de simuler au choix :

- des débits,
- des niveaux piézométriques,
- ou les deux simultanément.

• Initialisation

La période d'initialisation (non utilisée pour le calage) dépend de l'inertie du système hydrologique, plus le système a de la « mémoire » plus la période doit être longue.

Hormis pour les systèmes ayant une forte inertie 10 années de démarrage, de 1980 à 1989, ont généralement été retenues. Elles correspondent souvent à des périodes sans observations sur les débits et/ou niveaux. Par ailleurs, avant la série d'initialisation, le modèle est placé en équilibre hydrologique en début de calcul, c'est-à-dire que le niveau piézométrique correspond à la pluie efficace entrante

• Calage

✓ Généralités

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle, de telle sorte qu'ils permettent de calculer des niveaux piézométriques et/ ou des débits aussi proches que possible des valeurs observés.

Les données nécessaires au calage sont :

- des séries ininterrompues d'« entrées » du modèle : pluie et évapotranspiration ;
- une série d'observations, chroniques piézométriques et chroniques de débits, non nécessairement continues, mais pour une période concomitante aux séries précédentes. Cette série sera comparée avec la « sortie » du modèle.

Le calage se fait par une méthode semi-automatique à partir d'un jeu de paramètres initiaux. Certains paramètres peuvent ou non être optimisés. Le modèle fait varier ces paramètres (dans une gamme de valeurs définie) et recherche, par un algorithme d'optimisation non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960), un jeu fournissant les résultats les plus proches possibles de la série d'observations.

Il fournit :

- des bilans des différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, infiltration, écoulement...) ;
- une représentation graphique permettant de comparer observations et simulations ;
- des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

Lorsque les critères numériques d'ajustement et les graphiques de comparaison visuelle sont satisfaisants, on peut considérer que l'on dispose d'un jeu de paramètres représentatifs du bassin dans la mesure où les valeurs des paramètres obtenues sont hydrologiquement réalistes.

– Paramètres hydrologiques du modèle

Les paramètres hydrologiques du modèle sont au nombre de huit.

Les six paramètres dimensionnels sont les caractéristiques des différents réservoirs :

- capacité du réservoir RU (mm), ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ;
- Temps de demi-montée du réservoir (mois), THG ;
- RUI/PERC (mm) hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation ;
- Temps de demi-tarissement du réservoir (mois), TG.

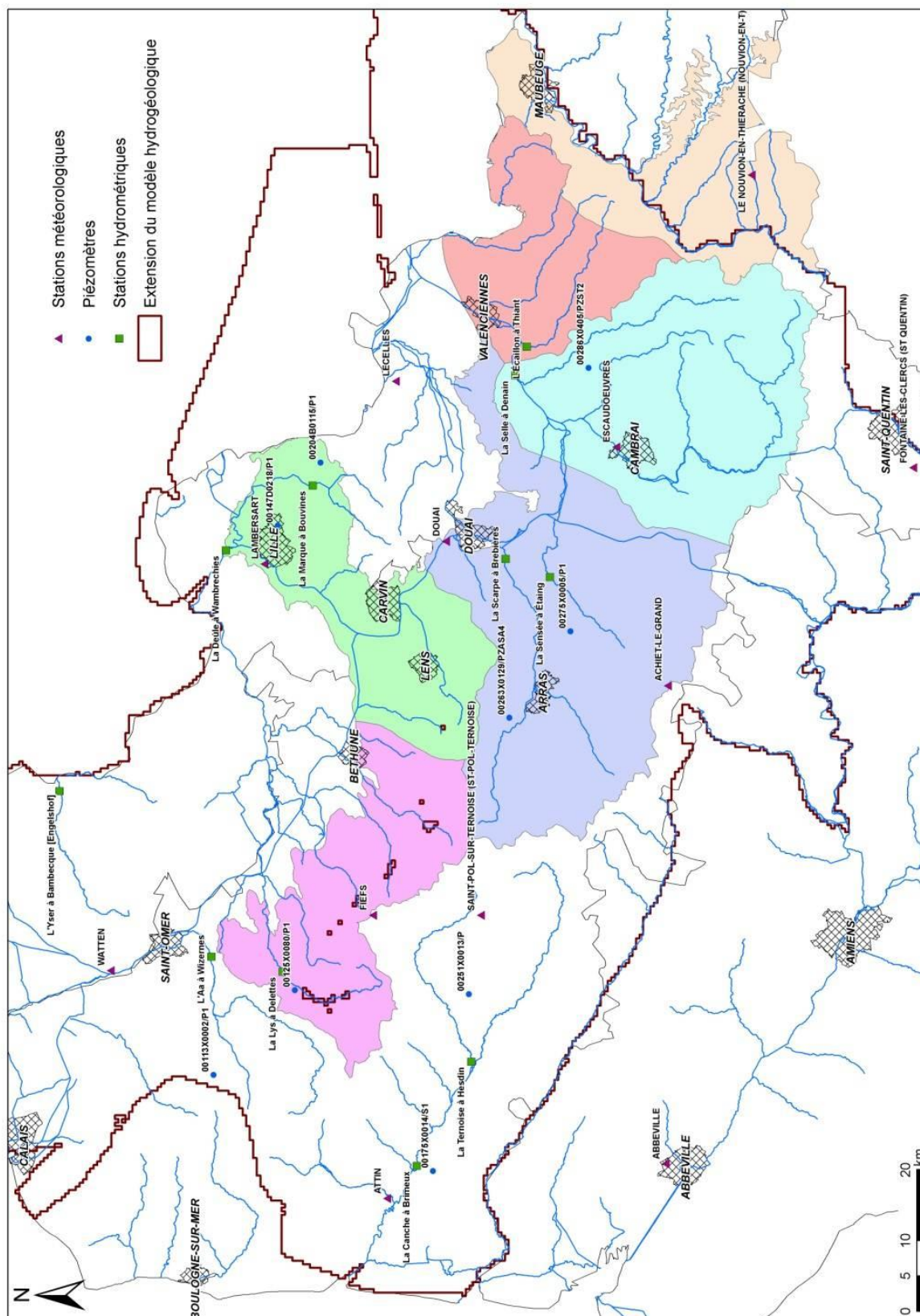
Deux coefficients correctifs sont destinés à prendre en compte l'éventuelle non-représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant, il s'agit :

- D'un coefficient de correction de la lame d'eau chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées ;
- D'un coefficient de correction d'ETP, dont le but est similaire.

En outre, deux autres paramètres peuvent être optimisés par calage du modèle :

- le coefficient d'emmagasinement « équivalent » ;
- et le niveau de base local.

Ces modélisations GARDENIA sont conduites afin de faciliter le calage du modèle hydrodynamique en lui fournissant par bassin versant des valeurs d'apport à la nappe les plus réalistes possibles pour les différents paramètres de calage. Les bassins versants ont été choisis en fonction des données hydrométriques et piézométriques (données de calage) existantes. Seuls les bassins versants comportant des chroniques de données ayant au minimum 10 ans de données en hydrométrie ou en piézométrie ont été retenus. Les bassins versants subissant une trop grande influence anthropique ont également été écartés (par exemple la Deûle).



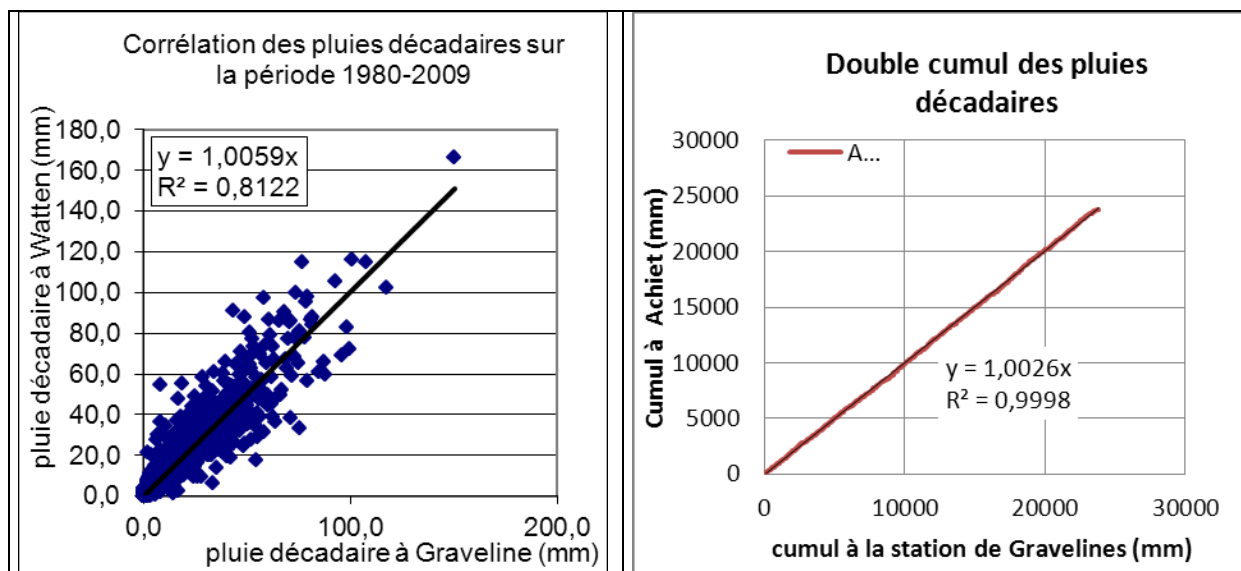
✓ Données d'entrée

La période de calage commune aux différentes données correspond à la période 1990-2009 (avec une période d'initialisation entre 1980 et 1989).

Précipitations et évapotranspiration potentielle: les relevés décennaux de 1980 à 2009 ont été acquis auprès de Météo France, via internet (la climathèque), pour les différentes stations ayant des données sur la totalité de cette période. Vingt stations pluviométriques ont ainsi été retenues. Par ailleurs, nous disposons ainsi de l'ETP au droit des stations de Lesquin, Saint-Quentin, Abbeville et du Touquet.

✓ Contrôle et validation des données d'entrée

Afin de vérifier, compléter et valider les données d'entrée, nous avons réalisé des corrélations et des doubles cumuls sur l'ensemble des données de pluie et d'ETP au pas de temps décennal. Les graphes suivants fournissent un exemple de ces opérations.

**Exemple de corrélation et double cumul réalisés**

De ces analyses, il résulte qu'il y a de nombreuses valeurs décennales manquantes au droit des stations de Fiefs et Cassel. Il est donc préférable de choisir prioritairement les autres postes. Pour les quelques valeurs manquantes au droit des autres postes, elles seront remplacées par les valeurs des postes où la corrélation est la meilleure. Ces postes sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Pluviometrie décadaire	Abbeville 80001001	Achiet 62005001	Attin 62044001	Bony 02100001	Bouchain 59092001	Cassel 59135001	Crevecoeur 59161001	Douai 59178001	Escaudoevres 59206001	Fiefs 62333001
Département	80	62	62	2	59	59	59	59	59	62
Nbval	1080	1077	1074	1077	1080	962	1080	1080	1074	990
Val absente	0	3	6	3	0	118	0	0	6	90
ecart (%) sur moyenne interannuelle	6	7	33	1	-5	-	-2		-4	-
meilleure correlation avec		Crevecoeur	Watten	Crevecoeur		-			Bouchain	-

Nombre de pas de temps sur la période :

1080

Pluviometrie décadaire	Lille 59343001	Marconnelle 62555001	Pontru 02614001	Saint Pol 62767001	Troisvilles 59604001	Villers 80801001	Watten 59647001	Le Touquet 62826001	Gravelines 59273001
Département	59	62	2	62	59	80	59	62	59
Nbval	1080	1068	1080	1080	1076	1080	1080	1080	1069
Val absente	0	12	0	0	4	0	0	0	11
ecart (%) sur moyenne interannuelle	Ref	36	0	29	5	-1	7	17	2
meilleure correlation avec		Fiefs			Crevecoeur				Douai

Nombre de valeurs manquantes, corrélation inter-station, et variation globale de la pluviométrie entre 1980 et 2009.

La pluviométrie varie d'environ 35% au droit de l'ensemble de la zone, avec un maximum à Marconnelle (1011 mm, département 62) et un minimum à Escaudoevres (690 mm, département 59).

L'EvapoTranspiration Potentielle moyenne interannuelle varie quant à elle d'environ 15% sur la période 1980-2009 au droit des quatre stations climatologiques. Le maximum se situe à Lille (778 mm) et le minimum à Abbeville (677 mm).

✓ Données de calage

Niveaux piézométriques : les chroniques, de périodicité variable, de 1980 à 2009 ont été récupérés sur la banque de données ADES.

Débits des stations hydrométriques : les chroniques de 1980 à 2009 ont été récupérés sur la banque de données HYDRO.

La figure 15 présente les différentes stations du bassin et l'affectation des données météorologiques aux piézomètres retenus.

✓ Résultats du calage

Le tableau ci-dessous détaille les associations des stations et résume les principaux paramètres qui pourront être utilisés lors du calage du modèle hydrodynamique.

Station hydrométrique	Piézomètre	Pluie	ETP	Surface du bassin (km ²)	Coefficient de correction de la pluie (%)	Coefficient de correction de l'ETP (%)	Coefficient emmagasinement (%)	Réserve utile (mm)	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	Temps de 1/2 montée (mois)	Coefficient de corrélation global
E2071105 : La Scarpe à Brébières	00263X0129	Saint Pol	Lille	473	0	0	27	236	9500	1.14	0.79
E1566010 : La Sensée à Etaing	00275X0005	Achiet	Lille	299	0	0	9.8	239	3186	0.32	0.91
E1727510 : L'Ecaillon à Thiant	00284X0701 /PZ1	Troisvilles	Lille	173	0	0	4.2	157	130	0.30	0.77
E5406510 : La Ternoise à Hesdin	00251X0013	Saint Pol	Abbeville	342	0	0	1.66	30	5500	0.05	0.87
E1726020 : La Selle à Denain	00286X0405 /PZST2	Achiet	Saint Quentin	252	11.6	6.4	2.3	125	408	19.3	0.85
E3511220 : La Lys à Delettes	00125X0080	Saint Pol	Lille	158	3.5	-10	7.4	125	126	1.7	0.87
E4905710 : L'Yser à Bambecque	-	Watten	Abbeville	342	-5	-2.4		347	13	0.7	0.87
E4035710 : L'Aa à Wizernes	00113X0002	Saint Pol	Abbeville	392	-3.7	-15	0.47	44	226	2.8	0.87
E3346010 : La Marque à Bouvines	00204B0115 /P1	Lille	Lille	135	-1.5	-6.3	1.1	109	37	1.6	0.84
E5400310: La Canche à Brimeux	00175X0014 /S1	Saint Pol	Abbeville	894	0	0	1.67	32	9000	0.03	0.85

Tableau 2 : Synthèse des paramètres utilisés dans le modèle global Gardenia

✓ Limites du modèle

Incertitudes liées à l'appréciation de la validité du calage

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ? Comment en déduire qu'il est acceptable d'utiliser les paramètres calés pour des extensions de données ?

Il est difficile de répondre à ces questions de façon générale, d'autant que l'on ne peut jamais assurer la qualité des extrapolations d'une façon strictement déductive. Des changements de tendance peuvent se produire dans les périodes extrapolées.

Rappelons tout d'abord qu'un modèle n'est jamais, au mieux, qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties.

La qualité d'une simulation est essentiellement basée sur des appréciations visuelles, et son jugement dépend du but qu'on s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données, du bilan des différents flux et de la vraisemblance des paramètres.

Il est inutile de s'attendre à (ou rechercher) un calage quasi-parfait si la qualité des données est douteuse.

Le calage est optimisé par le modèle, mais ce dernier ne peut prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrologue : le modèle n'est pas « calé » par une procédure automatique universelle. Il est calé par l'utilisateur, mettant à profit les performances numériques de l'ordinateur.

Incertitudes liées au choix de la durée de modélisation

Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles hydrologiques. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut souvent dix à quinze années de mesures, voire quelquefois plus, pour identifier des fluctuations piézométriques pluriannuelles.

Il faut donc disposer de plusieurs cycles de fonctionnement du système. Il faut ajouter à cela qu'il est très souhaitable de disposer d'un historique de données correspondant à des situations variées.

La règle est donc qu'un modèle peut être considéré comme correctement ajusté quand toutes ses composantes ont fonctionné plusieurs fois en conduisant à des effets notables et corrects sur les simulations.

Pour les calages, nous avons choisi de privilégier le calage sur une période de 20 ans de façon à être représentatif de conditions climatiques variés. Des calages sur des périodes plus courtes donnent de meilleurs coefficients d'ajustement mais ils se révèlent moins robustes lorsqu'on les applique sur des périodes plus longues.

Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

Malgré les performances des méthodes de recherche utilisées par le modèle, le choix des paramètres initiaux est essentiel. Pour des raisons dimensionnelles, il peut parfois arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations quasi-équivalentes (non unicité du calage).

Incertitudes liées au choix du coefficient d'emmagasinement

Pour un calcul de niveau de nappe libre, le coefficient d'emmagasinement joue le rôle de facteur d'amplitude. Or, le coefficient d'emmagasinement n'est pas toujours connu précisément.

A noter que, dans le modèle, ce coefficient ne serait égal au coefficient d'emmagasinement moyen de la nappe que si le point d'observation était situé loin de tout cours d'eau. Si le point d'observation du niveau est proche d'un cours d'eau qui impose un niveau peu variable, le coefficient d'emmagasinement apparent sera considérablement supérieur au coefficient d'emmagasinement en nappe libre réel de l'aquifère.

Ce coefficient ne peut donc pas être relié aisément à des interprétations de pompages d'essai dont la validité reste locale et qui très souvent sont réalisés sur de courtes périodes et peuvent donner un coefficient d'emmagasinement de nappe captive. Le coefficient d'emmagasinement de GARDÉNIA correspond plus à des variations de niveaux sur des périodes beaucoup plus longues et le type de coefficient d'emmagasinement à prendre en compte est celui d'une nappe libre.

Par ailleurs, le coefficient d'emmagasinement au sens traditionnel, est le plus souvent défini avec une précision très inférieure à 20 %, alors que des écarts de 20 % dans le bilan sont difficilement acceptables.

Néanmoins, les coefficients optimisés ont été comparés aux coefficients d'emmagasinement de nappe libre ou à des valeurs de porosité efficace, pour voir si l'ordre de grandeur était à peu près identique.

En outre, il faut être conscient du fait que le modèle global GARDÉNIA prend en compte un coefficient d'emmagasinement global unique alors que l'on sait que celui-ci peut être variable sur une verticale.

6.4. CARACTERISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

6.4.1. Prise en compte du réseau hydrographique dans le modèle maillé

Le réseau hydrographique est superposé au maillage hydrodynamique, il est composé de tronçons reliés entre eux, un tronçon constituant une « maille rivière » en relation avec une maille du modèle hydrodynamique. Chaque tronçon est défini par les éléments suivants ;

- Sa longueur et sa largeur,
- La cote absolue de l'eau dans le tronçon,
- La cote absolue du fond de la rivière,
- L'épaisseur du lit de la rivière,
- La perméabilité du lit de la rivière.

Le débit de la rivière dans chaque tronçon est calculé de manière itérative à partir du débit entrant (provenant du tronçon amont), du débit sortant (dans le tronçon aval), du débit d'échange avec l'aquifère, d'un terme source s'il existe (pompage ou injection dans la rivière) et d'un éventuel stockage. L'équation de Manning permet de relier la hauteur d'eau et le débit dans le tronçon. Les interactions entre la nappe et la rivière dépendent de la différence entre la hauteur d'eau dans la rivière et le niveau piézométrique, contrôlé en outre de manière non-linéaire par une couche intermédiaire (lit de la rivière) qui fait intervenir l'épaisseur du lit, sa perméabilité et la surface d'échange.

6.4.2. Paramètres choisis

Les principaux cours d'eau de la région Nord Pas-de-Calais ont été implémentés dans le modèle (Figure 16). Le réseau hydrographique est toutefois largement anthropisé et la région est quadrillée par un réseau de canaux interconnectés entre eux sur lesquels on ne dispose que d'informations quantitatives très sommaires. Les écoulements sont susceptibles d'être modifiés par la manœuvre d'ouvrages⁵.

Par ailleurs, les canaux artificiels (hors rivières canalisées) ne sont pas pris en compte. Bâti le plus souvent en béton, on considère qu'ils influent peu sur l'hydrodynamique de la nappe, provoquant un drainage ou une alimentation non significatifs. Le calage du modèle permettra de statuer sur cette hypothèse simplificatrice, qui sera revue au besoin.

Les paramètres nécessaires à la simulation des échanges nappe-rivières ont été définis comme suit :

- La longueur de chaque tronçon a été calculée par intersection du segment de la ligne d'eau avec la maille du modèle de 500 m de côté ;
- La largeur des tronçons varie entre 10 à 50 m suivant l'importance de la rivière ;
- La cote de l'eau dans la rivière est définie comme le point le plus bas du MNT au pas de 50 m (BD ALTI) ;

⁵ Recueil hydrologique de la Somme et cours d'eau du Nord-Pas de Calais (DIREN, 2003)

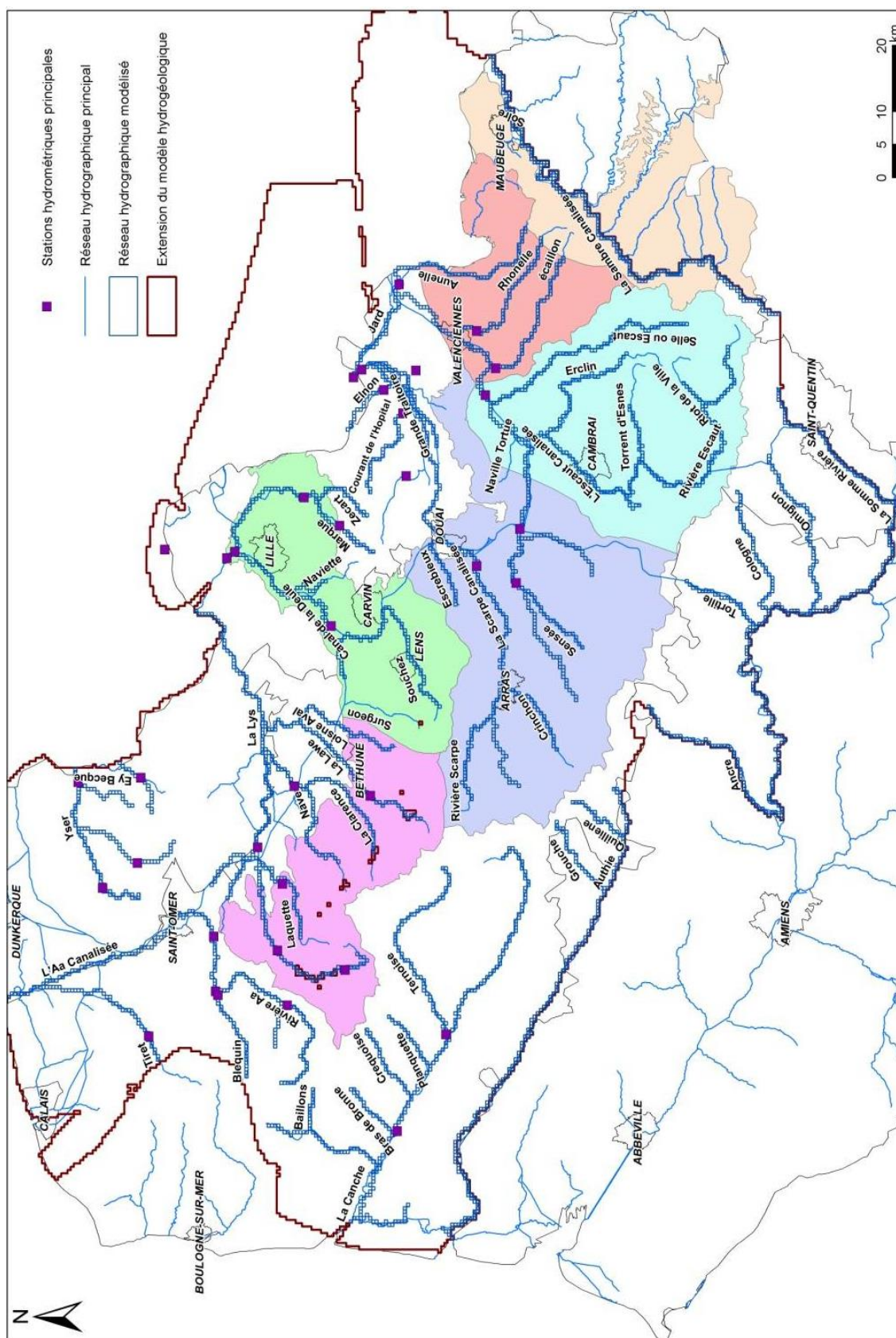


Figure 16 : Réseau hydrographique modélisé

- La cote du fond du lit est déterminée à partir de la cote de l'eau dans la rivière 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 fixé 0,5 m, ni sur la perméabilité des berges, que l'on choisit initialement à 10^{-4} m/s. Ce paramètre est utilisé par la suite comme paramètre de calage pour reproduire les débits observés dans les rivières.

6.5. PRELEVEMENTS

La nappe de la craie assure près de 95% de l'alimentation en eau potable de la région Nord-Pas-de-Calais. Les captages et les volumes prélevés sont dans l'ensemble bien connus et régulièrement suivi dans le temps. Les données obtenues de l'AEAP permettent d'établir les bilans ci-dessous depuis 1982 (Figure 17).

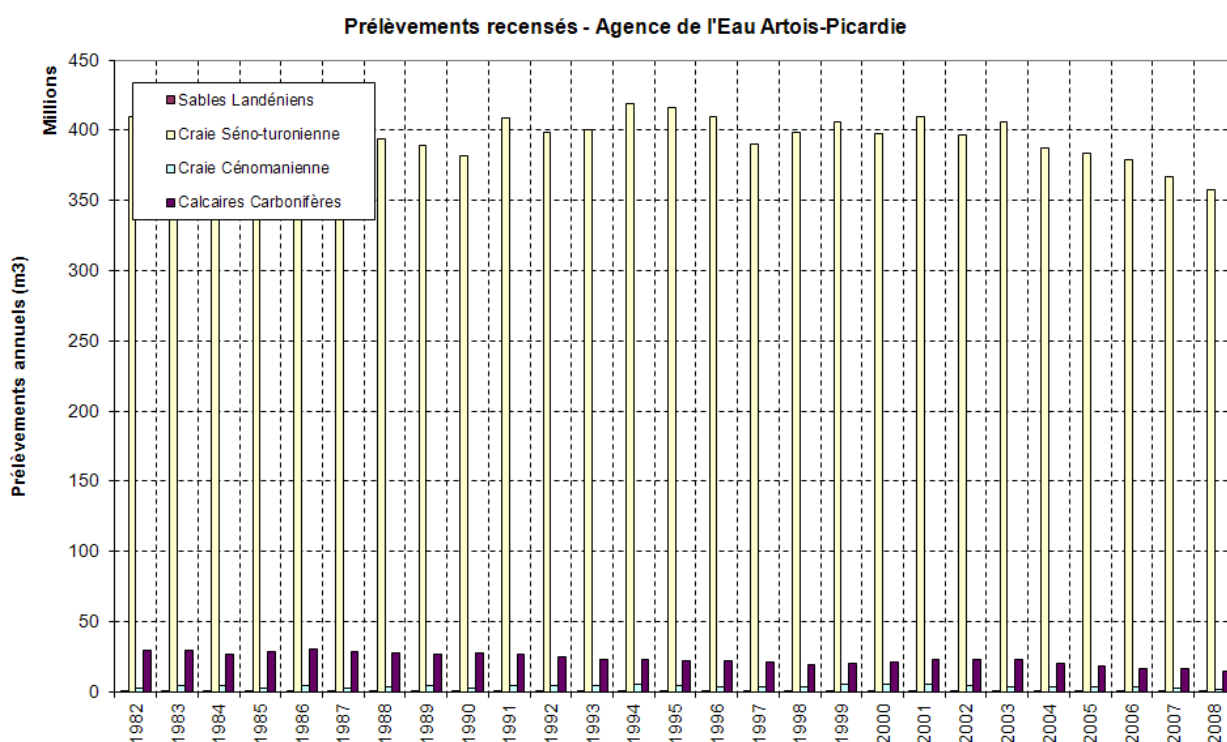


Figure 17 : Prélèvements recensés dans le bassin Artois-Picardie

Pour le calage en régime permanent, les prélèvements de l'année 1997 sont considérés, évalués à 292 millions de m³ environ dans la nappe de la craie, tout usage confondu. La répartition des prélèvements est présentée Figure 18.

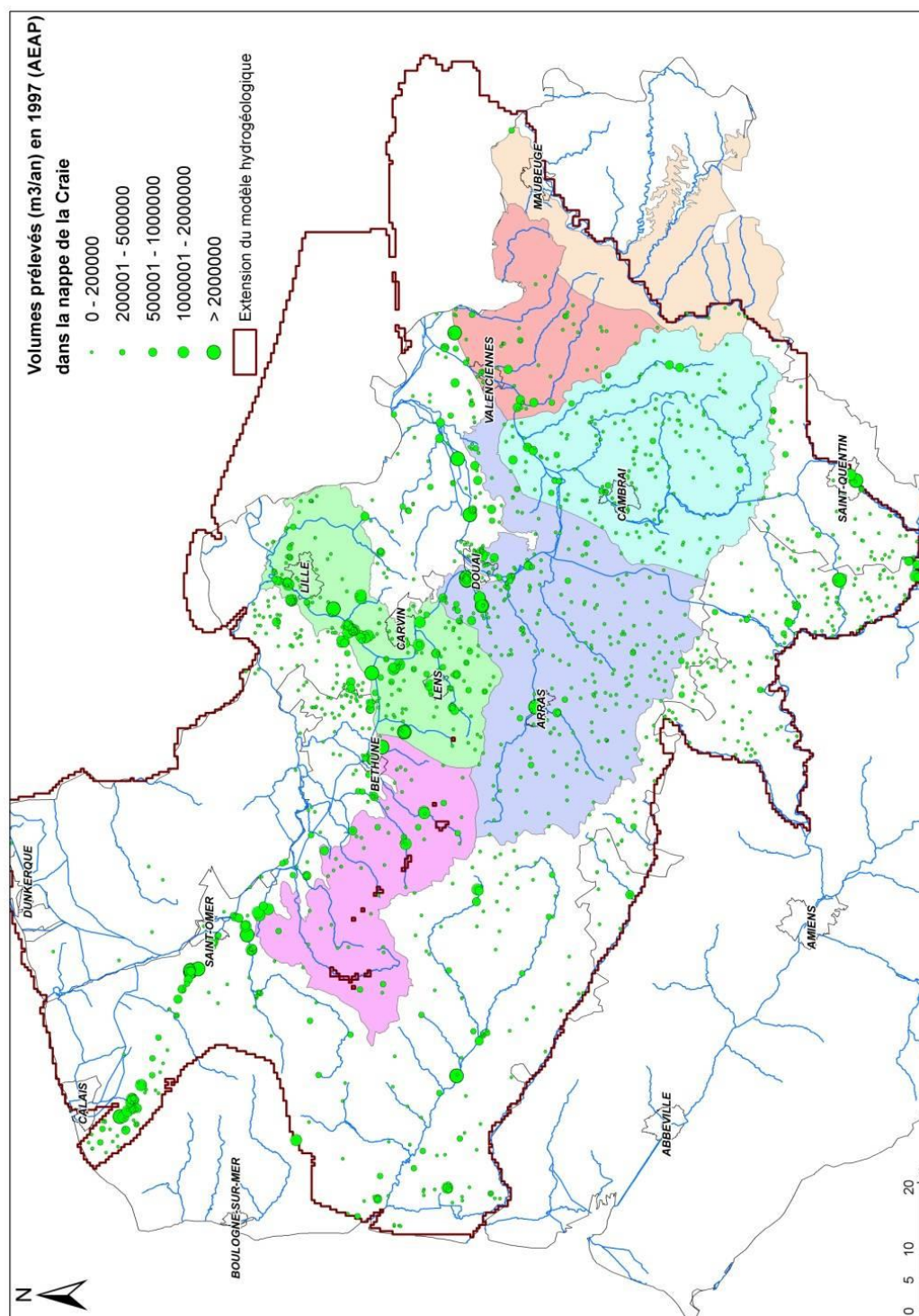


Figure 18 : Volumes prélevés dans la nappe de la Craie en 1997 (m³/an)

Au cours du régime transitoire, les prélèvements seront appliqués dans les mailles, les couches et les périodes de pompage correspondant aux captages recensés. Ces prélèvements étant essentiellement destinés à l'AEP, ils sont considérés constants sur une année (pas de variations saisonnières).

A 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 sollicités, et leurs impacts sur l'hydrodynamique de la nappe de la craie sont considérés comme nuls.

6.6. PERMEABILITES

Des gammes de perméabilité sont attribuées à chaque couche modélisée avant calage. Elles représentent l'aptitude de la formation géologique à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de potentiels.

Formation (numéro de couche)	Caractéristique	Perméabilité (m/s)	Epaisseur lithologique moyenne (m)
Limons des plateaux (1)	Semi-perméable	1.10^{-6}	5
Argiles des Flandres (2)	Aquitard	1.10^{-9}	60
Sables Landéniens (3)	Aquifère	2.10^{-5}	20
Argiles de Louvil (4)	Aquitard, aquifère dans les horizons sableux indurés (« Tuffeau de base »)	1.10^{-9} 1.10^{-5}	20
Craie Séno-turonienne productive (5)	(voir ci-dessous)	spatialisée	25
Craie Séno-turonienne compacte (6)	Aquitard	1.10^{-8}	30
Dièves (7)	Aquitard	1.10^{-9}	60
Marnes et craie Cénomaniennes (8)	Aquitard et aquifère dans le Cénomaniens riche en craie	1.10^{-8} 2.10^{-4}	40
Calcaires Carbonifères (9)	Aquifère	5.10^{-4}	50

Tableau 3 : Caractéristiques hydrauliques des formations hydrogéologiques modélisées

La perméabilité de la craie séno-turonienne a fait l'objet d'une analyse approfondie. De nombreuses mesures de transmissivité en forage (par pompage d'essai) sont disponibles (Figure 19), qu'il est possible d'interpoler à l'ensemble de la région suivant la méthodologie suivante :

- Comme il est rappelé plus haut, la capacité aquifère de la craie dépend uniquement de sa fissuration et de l'ouverture de ses joints de stratification; 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 en fonction de l'épaisseur de zone non-saturée au-dessus de l'aquifère.**
- Dans un premier temps, l'épaisseur de zone non-saturée est déterminée maille par maille par soustraction de la surface piézométrique restituée de 1997 à la topographie, puis regroupée en 5 classes : nulle, inférieure à 20 m, comprise entre 20 et 40 m, comprise entre 40 et 60 m, supérieure à 60 m ;

- Pour chacune de ces classes⁶, une transmissivité caractéristique a été attribuée dans un deuxième temps d'après le Tableau 4 ci-dessous ;

Épaisseur 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	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$60 < E_{ZN}$	4	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$

Tableau 4 : Détermination des classes de transmissivité de la craie séno-turonienne

- Enfin, la perméabilité par maille est déterminée par division de la transmissivité obtenue par l'épaisseur de l'aquifère (Celle-ci étant calculée maille par maille par soustraction du substratum productif de la craie à la surface piézométrique restituée de 1997) ; une distribution initiale des perméabilités de la craie est finalement obtenue (Figure 20). Cette distribution est ensuite ajustée au cours du calage.

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 de la transmissivité mesurée.

⁶ Cette méthodologie a été appliquée avec succès pour la modélisation de la Somme.

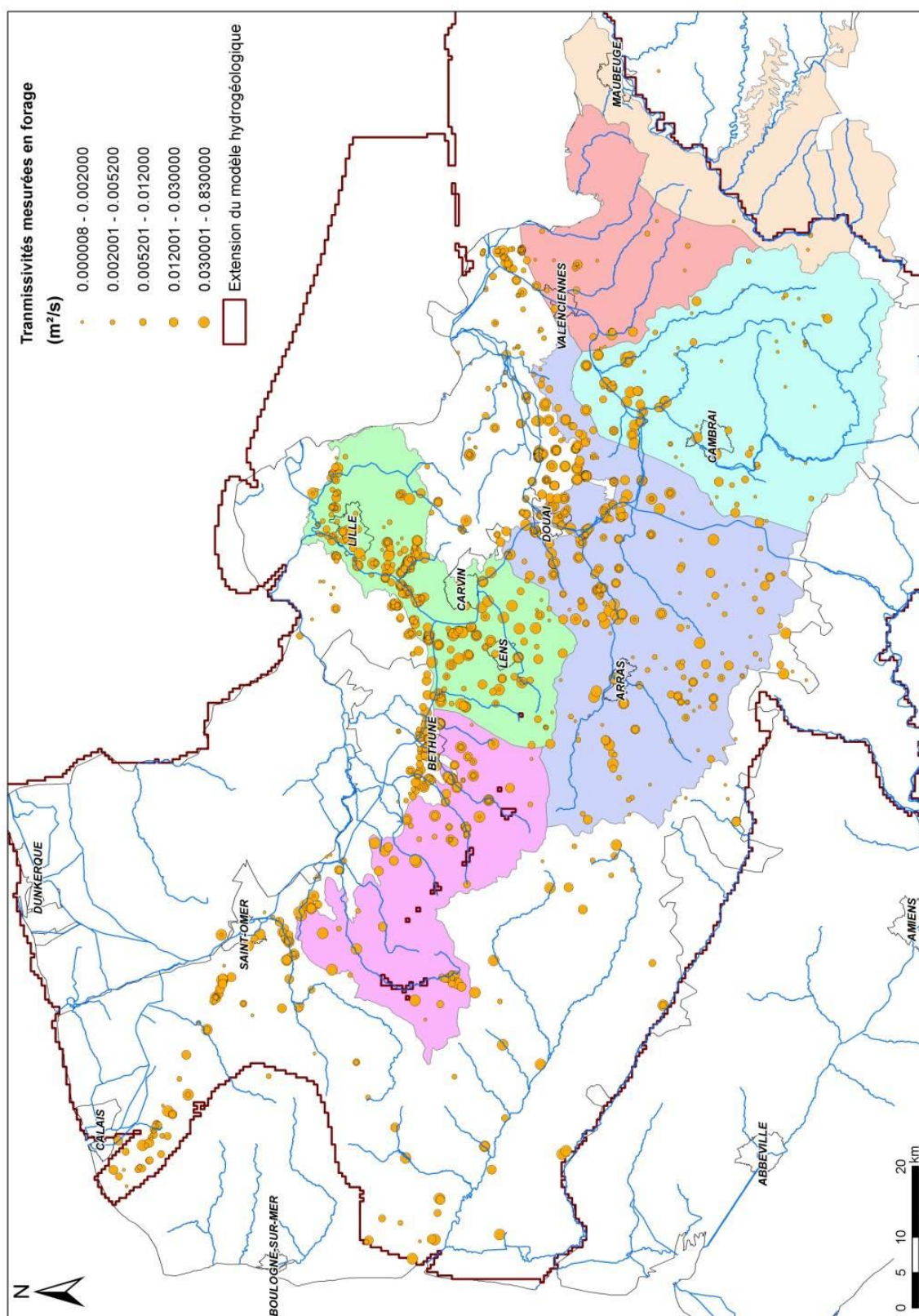


Figure 19 : Cartes des valeurs de transmissivité de la craie calculées sur forage (m²/s)

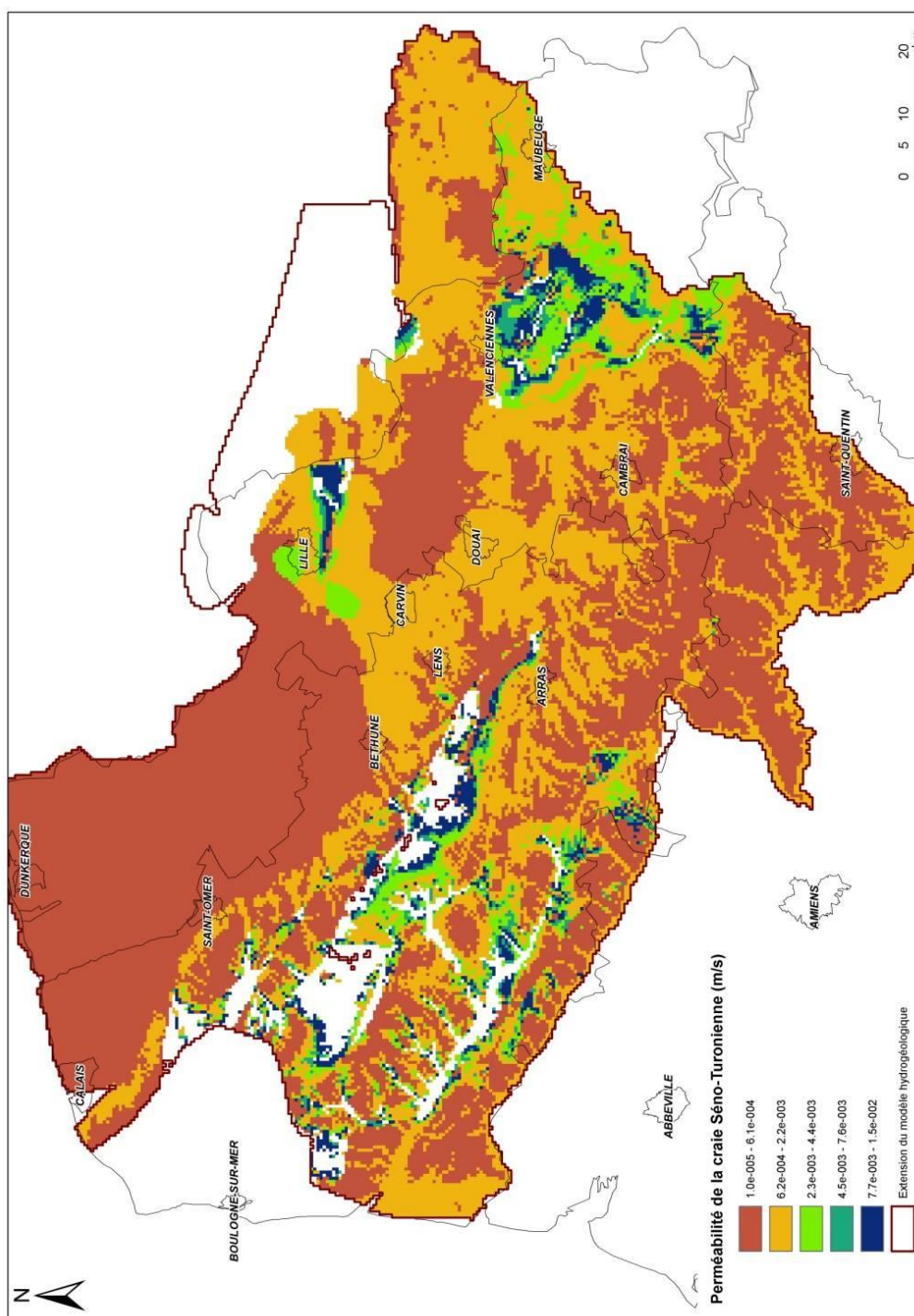


Figure 20 : Valeurs initiales de perméabilité de la craie séno-turonienne (m/s)

6.7. EMMAGASINEMENT

L'emmagasinement représente la fonction capacitive de l'aquifère – son aptitude à stocker de l'eau : sous l'effet d'un abaissement du niveau piézométrique, de l'eau est libérée du réservoir soit par gravité en nappe libre, soit par expulsion de l'eau -sous l'action de l'expansibilité de l'eau et de la compressibilité du milieu aquifère- en nappe captive (Figure 21). Pour chaque couche, on définit un emmagasinement libre (en %, qui équivaut à une porosité efficace), et un emmagasinement captif spécifique (en m^{-1} , volume d'eau libérée par unité de volume du milieu aquifère, par unité de variation de charge hydraulique).

Ce paramètre conditionne les fluctuations piézométriques observées en régime transitoire, en particulier dans les zones captives.

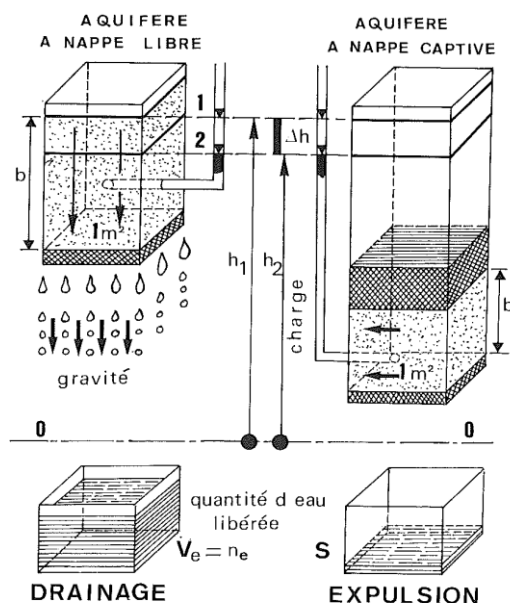


Figure 21 : Libération d'eau souterraine dans les aquifères. n_e porosité efficace et S coefficient d'emmagasinement (in Castany, 1982)

Le Tableau 5 présente les valeurs d'emmagasinement choisies initialement pour les différentes formations considérées. Pour les aquifères, elles correspondent à des valeurs mesurées, tandis que des faibles valeurs ont été attribuées aux aquitards.

<i>Formation (numéro de couche)</i>	<i>Emmagasinement libre (%)</i>	<i>Emmagasinement captif spécifique (m^{-1})</i>
Limons des plateaux (1)	1	1.10^{-4}
Argiles des Flandres (2)	1	1.10^{-5}
Sables Landéniens (3)	20	1.10^{-5}
Argiles de Louvil (4)	1	1.10^{-5}
Craie Séno-turonienne productive (5)	spatialisé (voir ci-dessous)	2.10^{-3}
Craie Séno-turonienne compacte (6)	1	1.10^{-5}
Dièves (7)	1 à 2	1.10^{-5}
Marnes et craie Cénomaniennes (8)	1	1.10^{-5} à 1.10^{-4}
Calcaires Carbonifères (9)	15	1.10^{-4}

Tableau 5 : Emmagasinement des formations hydrogéologiques modélisées

De la même manière que pour la transmissivité, l'expérience de terrain montre que l'emmagasinement libre (noté S) de la craie est lié à l'épaisseur de zone non-saturée. Les ordres de grandeur ont été attribués de manière analogue à la transmissivité :

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

6.8. FAILLES (CF. PARAGRAPHE 4.2.3)

Plusieurs accidents structuraux majeurs affectant les formations crayeuses sont visibles dans la région Nord-Pas de Calais. Les principales familles de fracture sont orientées Nord 100° - 120° et découpent les formations du Crétacé en compartiments plus ou moins abaissés, avec des rejets qui peuvent atteindre 60 à 100 m (faille de Marqueffles).

Ces failles ont été prises en compte dès la construction du modèle géologique. D'un point de vue hydrogéologique, les observations montrent que la piézométrie est fortement influencée par la série de failles longitudinales du horst de l'Artois :

- les failles de Marqueffles, Ruitz et Pernes sont considérées comme étanches et bloquent les écoulements. Dans le modèle, des limites étanches sont appliquées le long de ces failles dans la couche de la craie, interdisant tout écoulement de part et d'autre de ces limites ;
- le groupe de failles au sud-ouest de Saint-Omer sont par contre plutôt drainantes et augmentent localement la transmissivité du milieu. La perméabilité du modèle est localement modifiée dans ces zones, en accord avec les observations.
- Les autres failles majeures n'ont pas d'influences significatives reconnues (Seclin, Haubourdin, Bailleul).

6.9. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION

Avant d'utiliser le modèle pour réaliser des scénarios d'exploitation, déterminer l'optimisation des champs captants ou simuler le transport, il s'agit dans un premier temps de le caler, c'est-à-dire rechercher l'ensemble des paramètres du modèle (Transmissivité, emmagasinement, colmatage ou non rivières..) pour lesquelles il y a la meilleure adéquation entre les valeurs observées (Suivi piézométrique, débit mesuré dans les rivières, présence avérée d'artésianisme..) et les valeurs calculées.

Le calage est mené en deux temps, en régime permanent puis en régime transitoire :

- En régime permanent, le modèle s'attache à représenter l'état piézométrique basses-eaux de 1997, au cours duquel la nappe de la craie a fait l'objet d'une campagne piézométrique soutenue. Dans la réalité, l'état permanent n'arrive que très rarement, mais cette étape permet de fixer les ordres de grandeur de perméabilité choisis, d'évaluer la prise en compte de la recharge, de vérifier le modèle conceptuel et la géométrie du modèle. Le régime permanent fournit également un état stable permettant de démarrer les simulations transitoires.
- En régime transitoire, le modèle est calé sur la période 1982-2009 (27 années). L'échelle de temps est découpée entre le modèle hydroclimatique qui utilise le pas de temps décadaire, et le modèle hydrodynamique qui utilise le pas de temps mensuel. En pratique, pour une maille et un pas de temps mensuel donné, l'infiltration pluviale en entrée résultera de la somme de l'infiltration calculée sur trois pas de temps décadaires. Le calcul hydrodynamique se déroule donc sur 444 pas de temps (37 x 12 mois). Les résultats sont comparés aux 170 chroniques piézométriques disponibles dans la région Nord-Pas-de-Calais (Provenant du réseau piézométrique AEAP, du réseau piézométrique du département du Pas-de-Calais, du réseau piézométrique UTAM Nord, Figure 22) ainsi que des débits de rivières mesurés dans 35 stations hydrométriques de la région (Données Banque Hydro, Figure 23). Les cartes piézométriques tracées à partir d'observations (Hautes-eaux 1995, basses-eaux 1997, 2001 et 2009) sont également comparées aux sorties du modèle au pas de temps concerné pour vérifier la cohérence régionale.

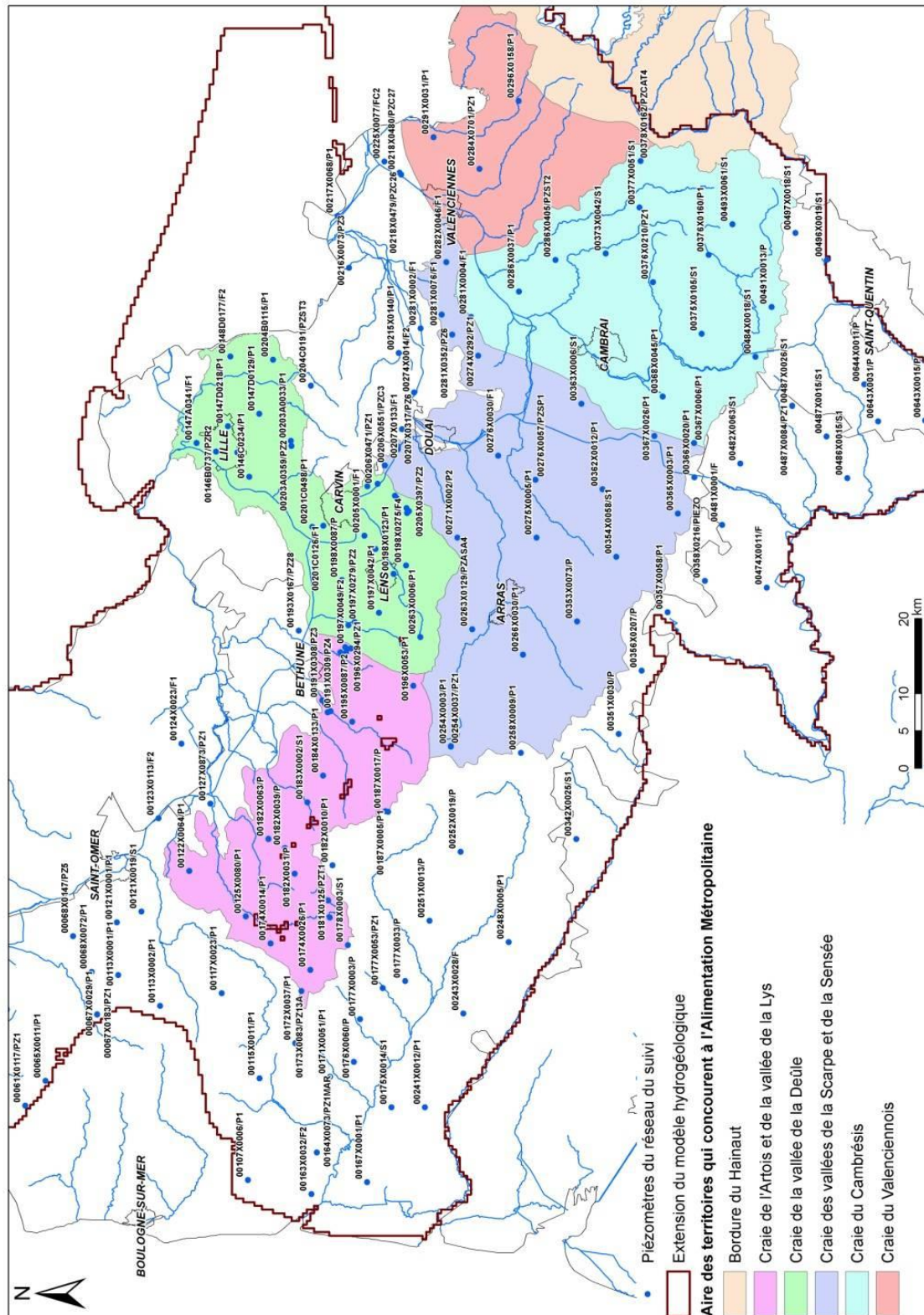


Figure 22 : Réseau de suivi piézométrique de la nappe de la Craie utilisé pour le calage en régime transitoire

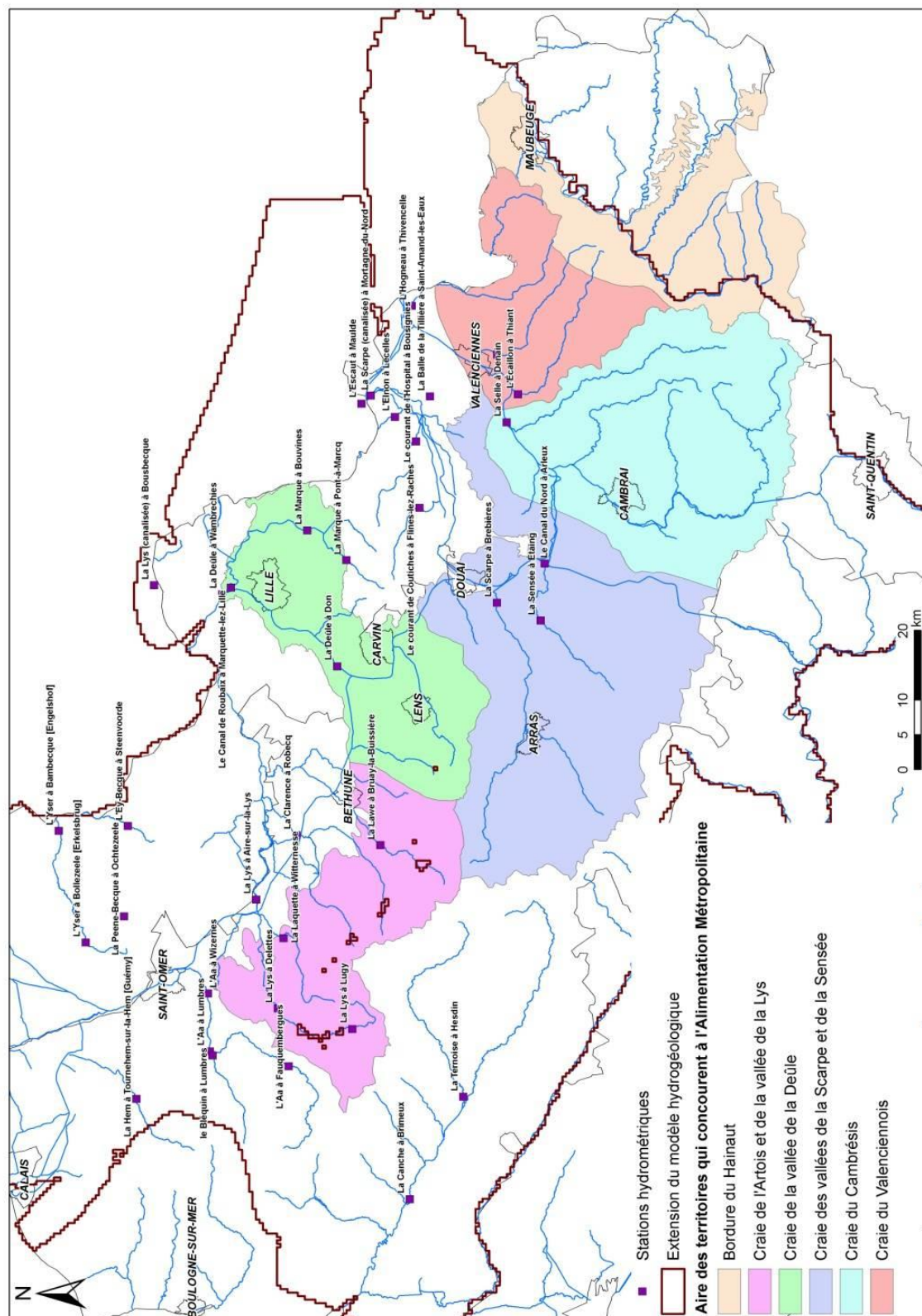


Figure 23 : Stations hydrométriques des principaux cours d'eau utilisées pour le calage en régime transitoire

7. Calage du modèle hydrodynamique

7.1. CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

7.1.1. Principe

Le calage a pour but d'obtenir une bonne adéquation entre charges et débits hydrauliques simulés et observés. Le modèle a été calé sur les hauteurs piézométriques mesurées en décembre 1997.

L'ajustement des paramètres du modèle porte essentiellement sur les distributions spatiales des perméabilités. La répartition des perméabilités tient compte d'entités géologiques réelles (décharge, silt, tourbe et craie), supposées homogènes.

Afin de s'assurer de la validité numérique et physique du modèle, il est important de contrôler les critères de convergence des résultats calculés

Ainsi, les paramètres de résolution des calculs hydrodynamiques sont réglés de façon à fournir des résultats numériques significatifs (bonne convergence des calculs, bilans hydrauliques cohérents) dans des temps de calcul raisonnables.

Les objectifs du calage en régime permanent sont de

- Tester la géométrie du modèle ;
- Conforter les choix et hypothèses du modèle conceptuel par des validations quantifiées.
- Vérifier la cohérence des données nombreuses, indépendantes mais influençant toutes le cycle de l'eau (pluie, température, perméabilité, niveau piézométrique, débits...)
- établir un état piézométrique stabilisé issu d'un calcul qui servira de surface piézométrique de départ aux calculs en régime transitoire.
- disposer de valeurs de perméabilité sur l'ensemble de l'aquifère

Ces objectifs seront considérés comme atteints si le calage en régime permanent est jugé correct. Dans le cas contraire, les hypothèses de départ peuvent être révisées. Néanmoins, comme le régime permanent n'est en réalité quasiment jamais observé dans la nature, il n'est pas possible, à ce stade intermédiaire, de fournir des réponses à des questions concrètes (optimisation de pompage par exemple). Il sera nécessaire de réaliser auparavant le calage en régime transitoire et en hydrodispersif (pour les études concernant les pollutions), comme c'est prévu dans le cadre de ce projet.

7.1.2. Données de référence

L'année 1997 correspond à une année de basses-eaux pour la nappe de la craie dans le Nord Pas-de-Calais. Trois jeux de mesures sont disponibles, auxquels seront confrontés les résultats du modèle (Figure 24) :

- Les mesures de la campagne piézométrique basses-eaux réalisée en décembre 1997 (104 points disponibles), ainsi que le tracé des isopièzes interprétées à partir des points de mesure ;
- Les mesures piézométriques du réseau de suivi en continu, moyennées sur le mois de décembre 1997 (81 points disponibles) ;
- Les débits mesurés aux stations hydrométriques, moyennés sur le mois de décembre 1997 (29 mesures disponibles). Plusieurs stations ne disposent pas de mesures pour la période considérée, leur suivi ayant commencé dans les années 2000, le module interannuel du mois de décembre a alors été choisi comme référence.

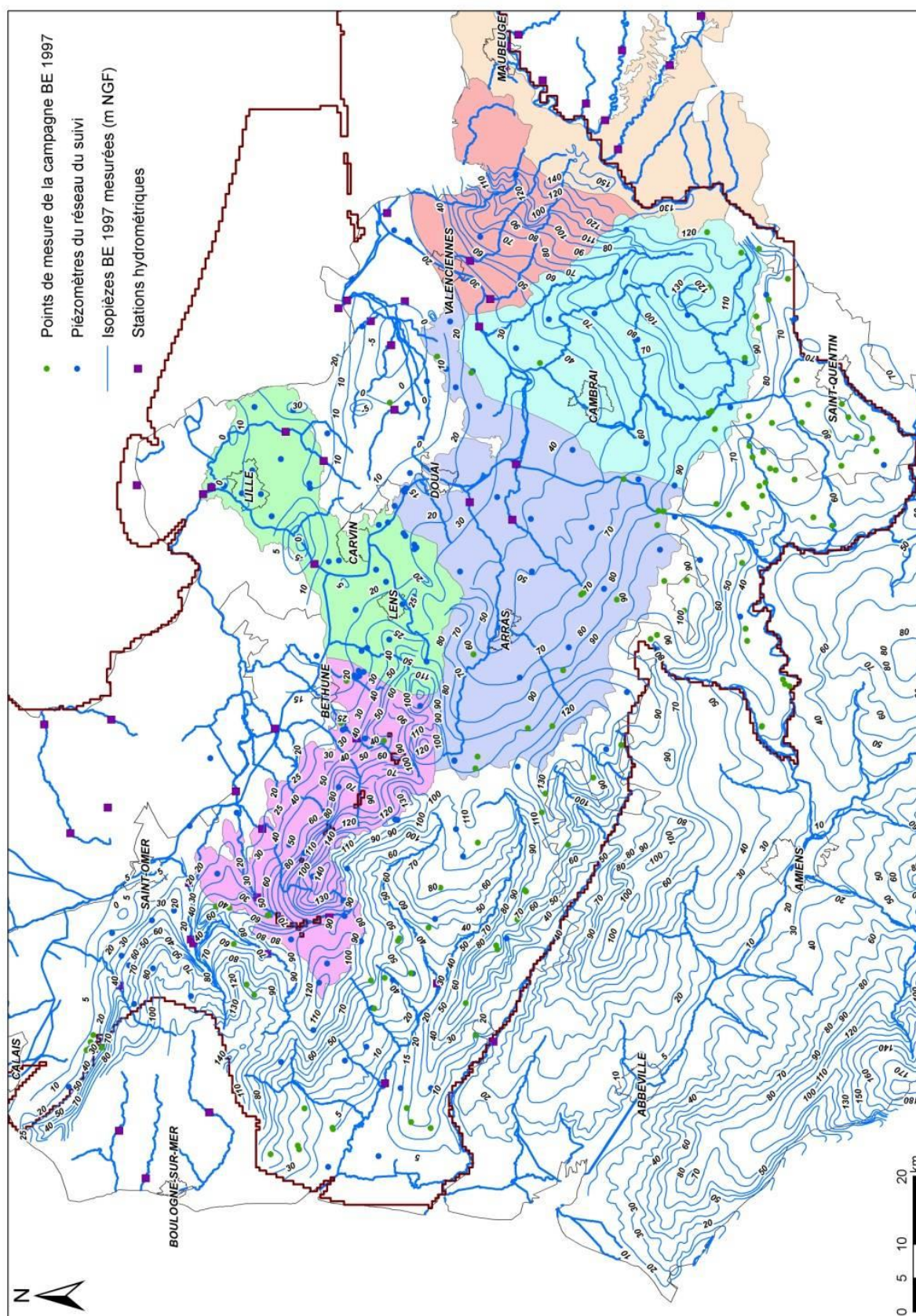


Figure 24 : Données de référence pour le calage du modèle en régime permanent

7.1.3. Résultats

Piézométrie

La piézométrie simulée à l'issue du calage en régime permanent est présentée Figure 25. À l'échelle régionale, elle est reproduite de manière satisfaisante par le modèle, avec la ligne de partage des eaux de la boutonnière du Boulonnais jusqu'à Saint-Quentin, un écoulement dirigé vers le nord dans la plaine d'Arras et le Cambrasis.

L'appréciation du calage peut se faire de manière statistique en traçant un diagramme de dispersion représentant les charges observées en fonction des charges simulées aux différents points de mesures. Deux diagrammes sont tracés, un avec les mesures du réseau et l'autre avec les mesures de la carte piézométriques 1997 (Figure 26).

Pour les deux jeux de mesure considérés, le nuage de points se concentre autour de la diagonale de pente 1 et d'ordonnée à l'origine nulle ; la droite de régression qui relie la charge simulée à celle observée a une pente très proche de 1 dans les deux cas, avec un coefficient de corrélation élevé, supérieur à 0.9. Les secteurs où de grands différences apparaissent sont situés dans la partie captive de la craie et proche de la Belgique où les écoulements transfrontaliers sont peu connus. Dans certains cas, le niveau simulé est largement en dessous du niveau mesuré (~30 m dans le secteur de Guînes au sud-est de Calais).

On constate toutefois un biais généralisé, ainsi que le soulignent les moyennes des écarts de 2 m et 3 m dans chacun des cas : les charges simulées sont globalement plus élevées que les valeurs mesurées. Ce résultat est néanmoins attendu car l'infiltration considérée en entrée du modèle correspond à un régime interannuel moyen et est sans doute supérieure à l'infiltration hivernale de 1997 qui a pour conséquence le régime de basses-eaux auquel le modèle se réfère.

Ainsi, ces critères statistiques montrent que si le modèle calcule des charges en moyenne plus élevées que celles mesurées, la distribution piézométrique simulée à l'échelle régionale reste cohérente avec les écoulements observés.

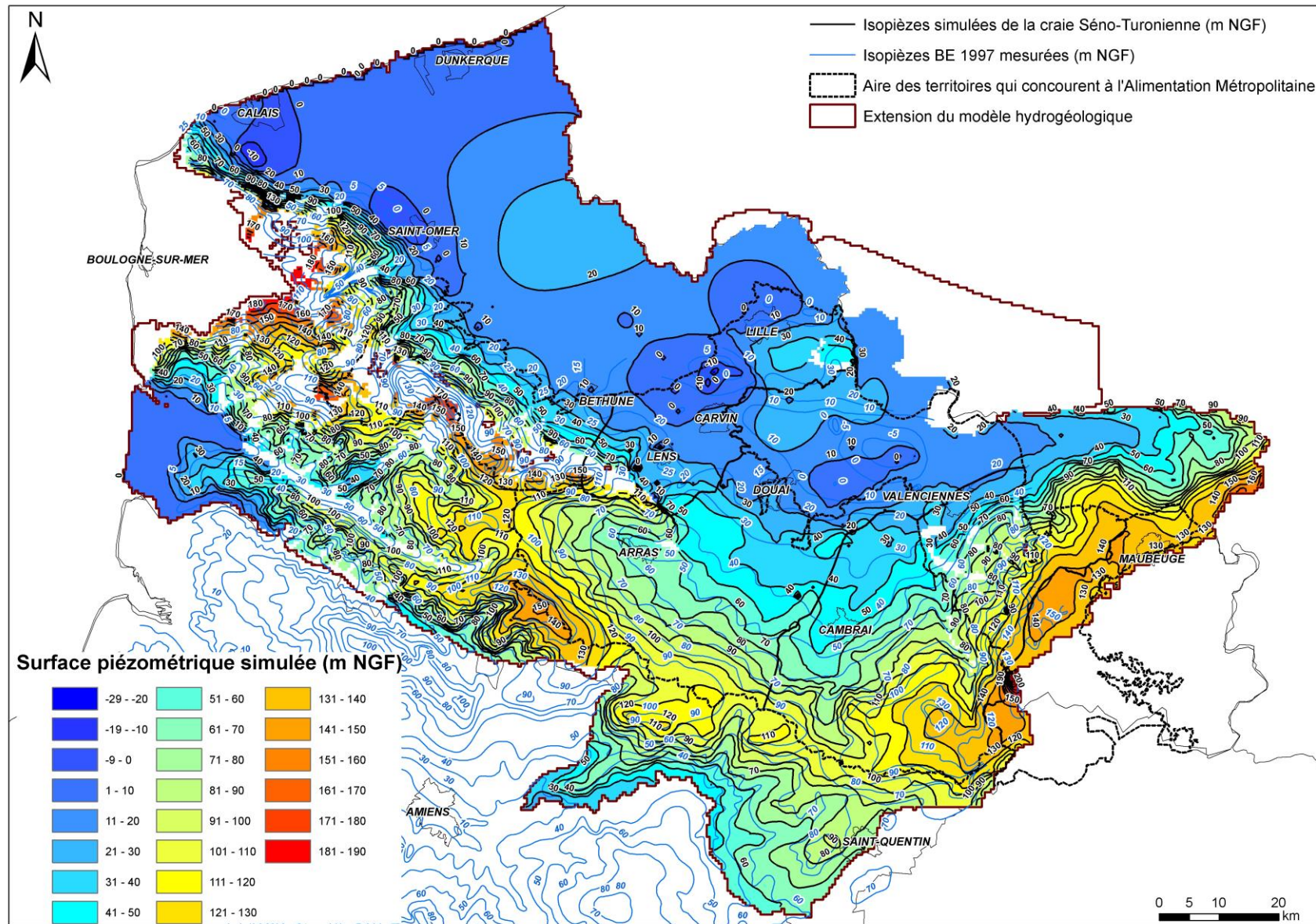


Figure 25 : Piézométrie simulée de la nappe de la Craie en régime permanent (m NGF)

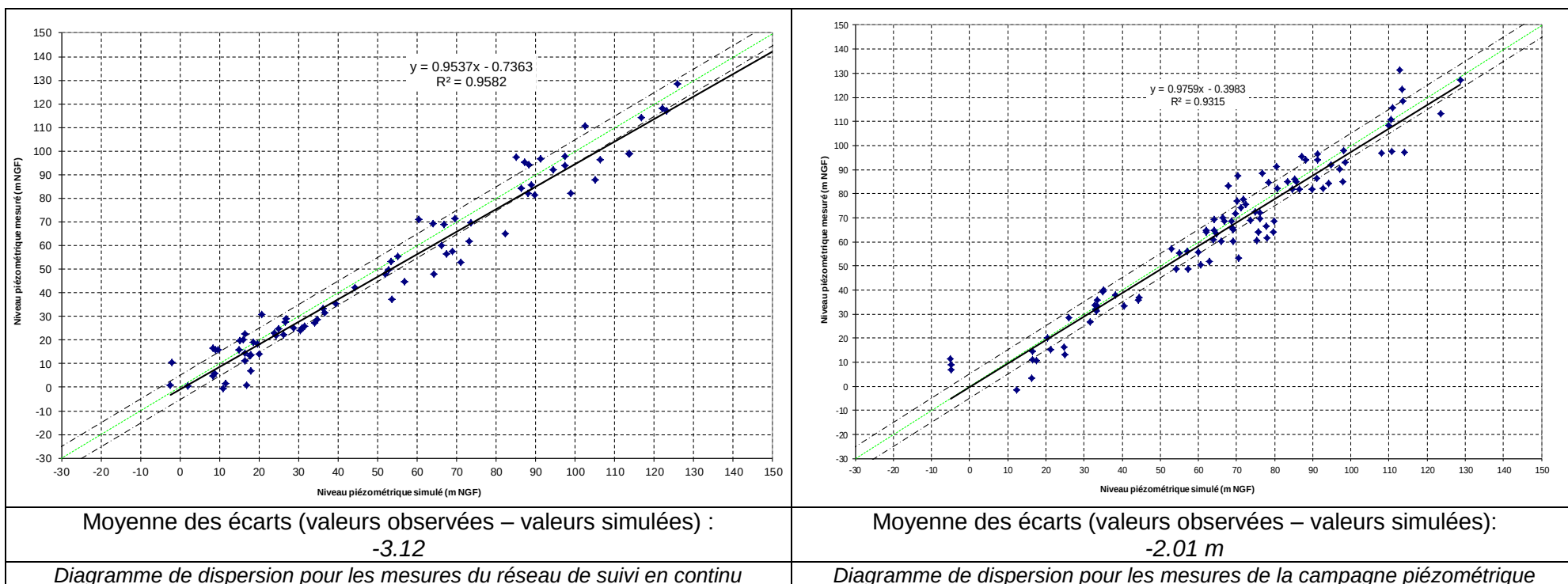


Figure 26 : Diagrammes de dispersion des niveaux piézométriques simulés en régime permanent

Débit des rivières

Le débit simulé dans les rivières est comparé avec les débits mesurés aux stations hydrométriques et moyennés sur le mois de décembre 1997 (Figure 27). Dans l'ensemble, les ordres de grandeur des débits sont bien reproduits. Des différences notables apparaissent toutefois :

- Les débits simulés résultent de l'alimentation/drainage par rapport à la nappe et de l'apport par ruissellement. De même que pour la piézométrie, l'infiltration et le ruissellement imposés en entrée sont issus d'une moyenne interannuelle qui ne correspond pas aux conditions hydriques de décembre 1997, et les débits simulés sont globalement plus élevés que ceux mesurés ;
- Dans les secteurs où la différence de débit est significative, la connexion à des canaux peut expliquer les variations : l'Escaut à Maulde est canalisée et a un régime fortement influencé, la Selle à Denain a également un régime influencé, tandis que la Deûle est canalisée et son débit n'est probablement pas la résultante des phénomènes décrits ci-dessus.
- L'approche en régime permanent reste grossière et l'utilisation du modèle global pluie-débit Gardenia en régime transitoire permettra d'affiner ces débits

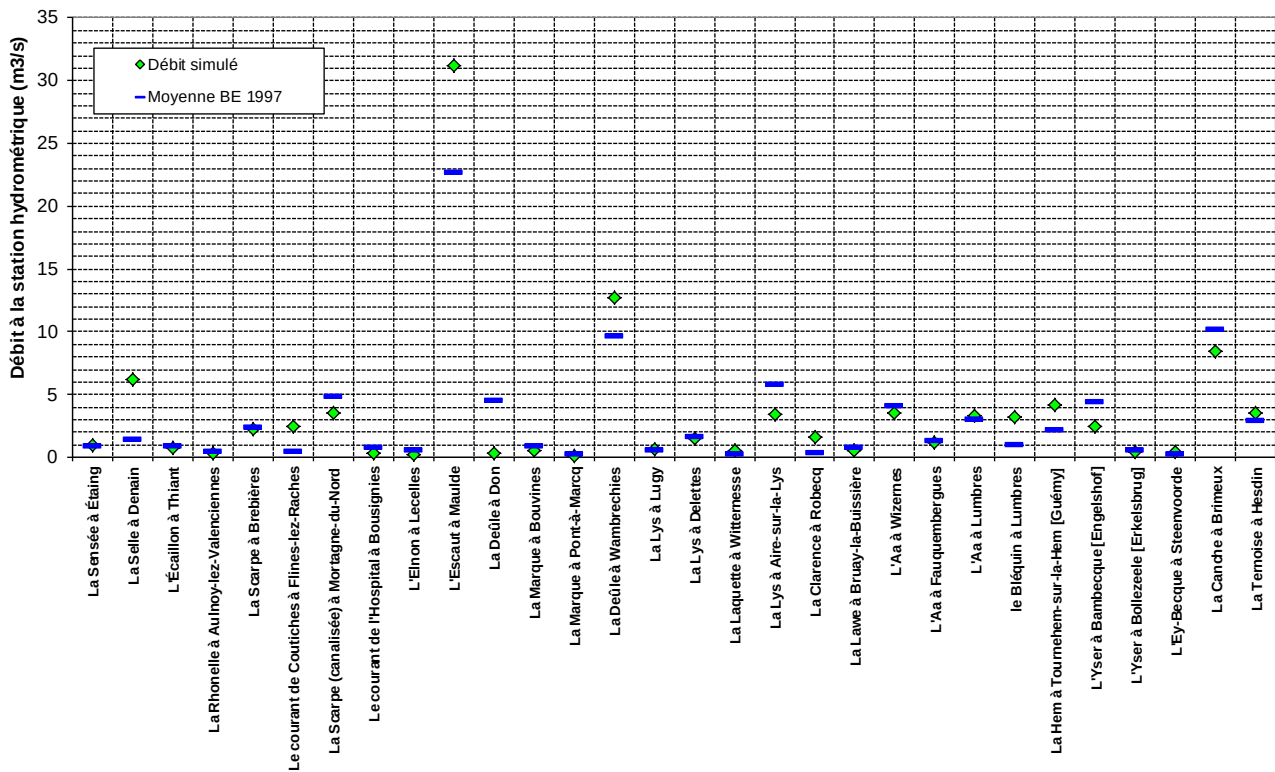


Figure 27 : Comparaison des débits des rivières observés et simulés en régime permanent

Résultats dans le secteur de Lille

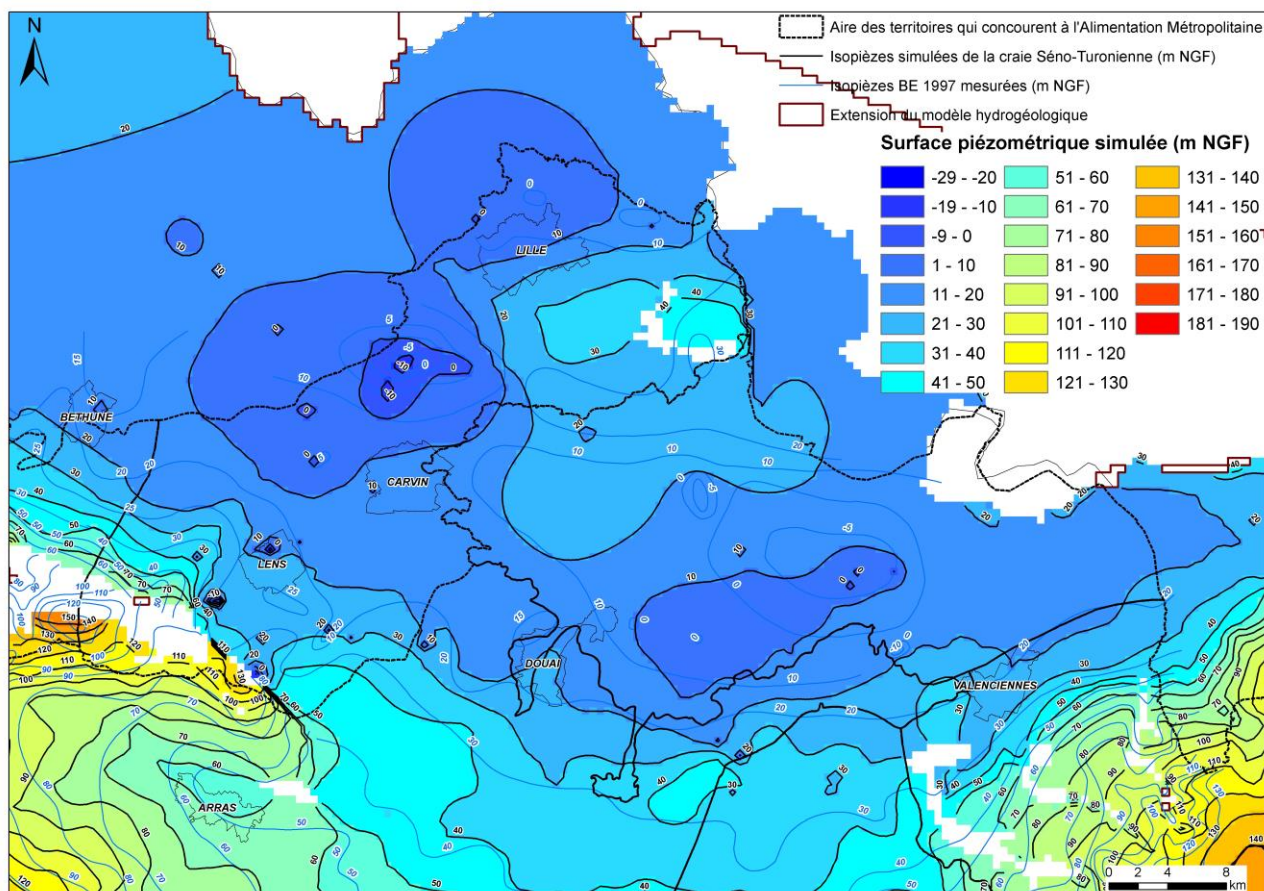


Figure 28 : Détail de la piézométrie simulée dans le secteur de Lille

La Figure 28 présente la piézométrie simulée de la craie Séno-Turonienne dans le secteur de Lille. Globalement, le dôme piézométrique à l'est de Lille, les deux dépressions piézométriques liées aux champs captants du sud Lille et au bassin d'Orchies sont représentées. En revanche les niveaux calculés diffèrent des niveaux observés. A noter que la partie captive de la craie proche de la Belgique reste peu connue. Le calage de cette zone sera à améliorer en régime transitoire.

Craie Séno-Turonienne et Cénomanienne

La piézométrie simulée de la craie Séno-Turonienne (couche 5) présentée Figure 25 doit être en toute rigueur complétée par la piézométrie de la craie cénomanienne (couche 8, Figure 29), en particulier aux endroits où la craie séno-turonienne est absente, « la nappe de la craie » au sens régional correspondant alors à l'aquifère cénomanien ; c'est le cas notamment en bordure du Boulonnais.

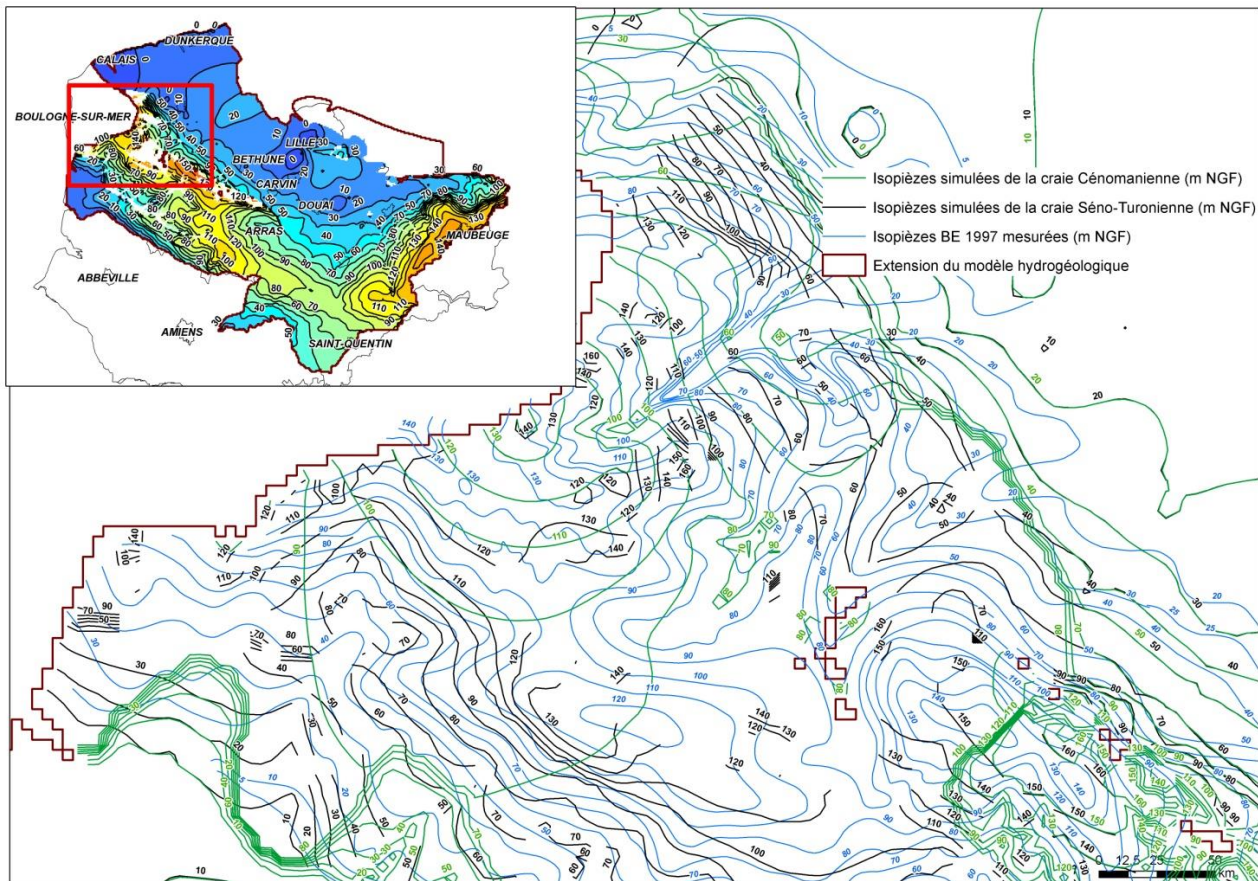


Figure 29 : Piézométrie simulée (m NGF) de la craie Cénomanienne

Dans la suite de l'étude, les cartes piézométriques simulées présentées ne feront référence qu'à **la craie séno-turonienne** (couche 5 du modèle). En effet, sur l'Aire des Territoires concourant à l'alimentation métropolitaine, seule cette formation est aquifère : le cénomanien sous-jacent étant imperméable. Lors du régime transitoire, la comparaison des chroniques piézométriques fera par contre la distinction entre niveau piézométrique dans la craie Séno-Turonienne ou Cénomanienne.

Bilan des flux

Le schéma de la figure suivante présente le bilan hydraulique de la modélisation en régime permanent : apport à la nappe, drainage par les rivières, prélèvements. Ce bilan montre un bon équilibre du modèle.

Bilan hydraulique simulé de la nappe de la Craie Séno-turonienne

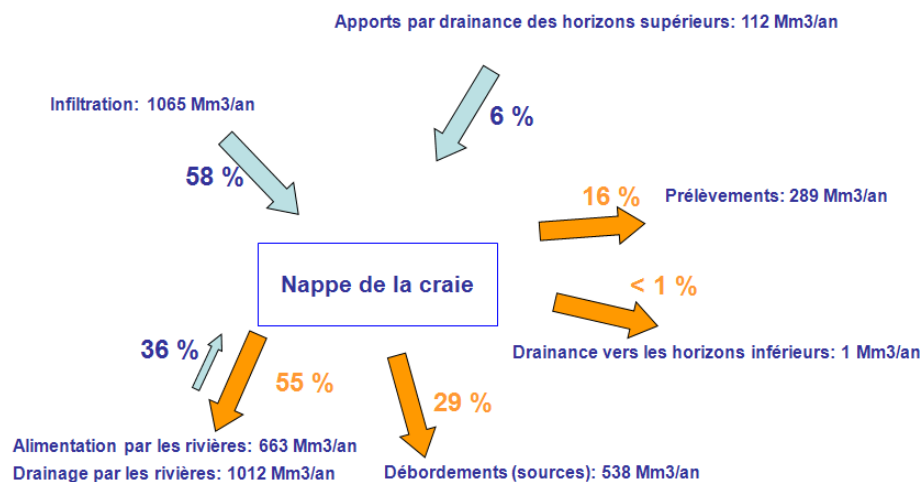


Figure 30 : Bilan hydraulique simulé

Le bilan simulé est proche du bilan d'ensemble de la région Nord Pas de Calais réalisé en 1995 (en million de m³) tant en ordre de grandeur qu'en ratio des diverses composantes.

Infiltration	Prélèvements	Alimentation par les cours d'eau	Drainage par les rivières	Sources
1407	292	240	1115	239

Tableau 6 : Bilan annuel de la nappe de la craie dans la région Nord Pas de Calais en Mm³ (N. Crampon, 1995)

Conclusion

La comparaison des charges et débits des rivières calculés par le modèle avec les observations est satisfaisante dans le cadre d'un calage en régime permanent :

- La distribution des charges est cohérente avec l'écoulement régional,
- Les ordres de grandeur des débits sont reproduits.

La cohérence des données d'entrée du modèle est vérifiée et valide les hypothèses de départ. Rappelons qu'à ce stade, c'est-à-dire avec un calage en régime permanent, un modèle hydrodynamique présente peu d'applications pratiques à part un bilan très global des flux. Ce calage comporte des imperfections liées au fait que les régimes hydrauliques sont toujours transitoires dans la réalité. Néanmoins, c'est une étape indispensable et préalable au calage en régime transitoire. Dans le cas de la modélisation de la nappe de la craie, les résultats obtenus sont suffisamment satisfaisants pour passer à l'étape suivante du calage en régime transitoire.

8. Conclusion

Grâce à un travail important de recueil de données, cette 3ème phase de l'étude SIGES Nord Pas de Calais permet de disposer d'un modèle hydrodynamique de la nappe de la craie couvrant une large partie de la région centrée sur l'Aire d'alimentation en eau potable de Lille. La taille du modèle et la **prise en compte du contexte régional** permettant d'imposer des conditions hydrauliques naturelles qui n'affecteront pas ou peu les résultats, constituent une approche nouvelle :

- Toutes les masses d'eau qui participent à l'alimentation de la métropole Lilloise sont intégrées, mais également toutes les masses d'eau en lien avec ces dernières
- Les écoulements du système aquifère crayeux sont représentés dans leur globalité, notamment les échanges avec les autres aquifères régionaux : les sables landéniens et les calcaires Carbonifères. Le modèle est multicouche, et prend en compte les formations imperméables (Argiles des Flandres, argiles de Louvil, Dièves, craie Cénomaniennne marneuse), qui participent également à la dynamique des écoulements par leur emmagasinement ;
- De nombreuses mesures piézométriques et de débits de rivières sont disponibles sur une longue échelle de temps et bien réparties sur l'ensemble de la région NPC. La confrontation du modèle et de ses nombreuses observations permettra d'en assurer la robustesse et la bonne compréhension des phénomènes qui caractérisent les écoulements.
- Dans un contexte de gestion globalisée de la ressource, les volumes prélevés annuellement et leur localisation précise depuis 1982 sont pris en compte
- L'estimation fine des infiltrations pluviales, lame d'eau infiltrée et temps d'infiltration jusqu'à la nappe a été modélisée à l'aide d'un modèle global pluie-débit et sera couplé directement au modèle hydrodynamique maillé ;
- les échanges nappe-rivière sont modélisés grâce à un module spécifique couplé avec le modèle maillé, en utilisant la relation de Manning ;

Cette modélisation s'appuie aussi sur un Système d'Information Géographique qui permet de caractériser chaque maille.

Les premières modélisations en régime permanent donnent des résultats reproduisant assez fidèlement les écoulements souterrains. La comparaison des charges et débits des rivières calculés par le modèle avec les observations est satisfaisante dans le cadre d'un calage en régime permanent :

- La distribution des charges est cohérente avec l'écoulement régional,
- Les ordres de grandeur des débits sont reproduits.

La cohérence des données d'entrée du modèle est vérifiée et valide les hypothèses de départ. Rappelons qu'à ce stade, c'est-à-dire avec un calage en régime permanent, un modèle hydrodynamique présente peu d'applications pratiques à part un bilan très global des flux. Ce calage comporte des imperfections liées au fait que les régimes hydrauliques sont toujours transitoires dans la réalité. Néanmoins, c'est une étape indispensable et préalable au calage en régime transitoire. Dans le cas de la modélisation de la nappe de la craie, les résultats obtenus sont suffisamment satisfaisants pour passer à l'étape suivante du calage en régime transitoire.

9. Bibliographie

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

BRGM/RP-51827-FR Simulation par modèle des hautes-eaux de la Somme (2002)

Note 94 SGR-NPC 005 SDAGE du Bassin Artois-Picardie : Essai de zonation des ressources renouvelables potentielles en eau souterrain du Bassin (1994)

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

Castany G. Principes et méthodes de l'hydrogéologie (1982) Dunod Université

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

Annexe 1

Généralités sur la modélisation en hydrogéologie

Introduction

Les modèles en hydrogéologie sont utilisés pour différentes finalités :

- chercher à comprendre le fonctionnement d'un système aquifère complexe (zone saturée ou non-saturée), à nombreux paramètres, et tenter d'identifier les paramètres les plus « signifiants »,
- simuler des phénomènes non observables, par exemple évaluer l'impact d'une pollution de nappe (risque d'atteinte d'un captage, au bout de combien de temps, niveaux de concentrations atteints,...),
- modéliser des phénomènes observables : évolution des niveaux d'une nappe, des débits d'un cours d'eau, d'une concentration en nitrates mesurée dans un cours d'eau ou une source,...

Les modèles et leurs domaines d'application

Dans une problématique de gestion de la quantité et de la qualité de la ressource en eau d'un hydrosystème, trois grandes catégories de modèles peuvent être construits :

- *les modèles spatialisés (ou maillés)* : ils sont sous-tendus par les équations de la physique des écoulements souterrains. C'est l'approche de modélisation la plus complète. Ils peuvent être déterministes (sans variable aléatoire) ou stochastiques quand ils font appel à variables aléatoires pour rendre compte des incertitudes liées à la complexité du milieu. Leur principe repose sur un découpage de l'aquifère en éléments finis de forme variable (triangulaire, carrée, rectangulaire...) appelés mailles. Les lois fondamentales de l'hydrodynamique peuvent alors être utilisées entre chacun de ces « morceaux » considérés comme homogènes.
- *Les modèles globaux de type conceptuel* : ils utilisent un concept physique pour représenter le fonctionnement de l'hydrosystème (par exemple un assemblage de réservoirs en liaison hydraulique les uns avec les autres). Tout en ayant un sens physique, ils ne prennent pas en compte les équations physiques réelles. Les paramètres de ces modèles sont généralement dimensionnels : capacité, constante de temps... Bien que certains paramètres renvoient à une réalité physique (capacité de rétention d'un sol, coefficient d'emménagement par exemple), d'autres paramètres (constante de temps de tarissement par exemple) résultent de la combinaison de paramètres physiques moyens (transmissivité..) et ne peuvent en aucun cas être mesurés directement.
- *Les modèles globaux de type boîte noire* : ils consistent uniquement (sans toutefois être simples) à mettre en relation une sortie du système modélisé (niveau de nappe, débit d'un cours d'eau, ...) avec une ou plusieurs entrées (Pluie, ETP, ...), par l'intermédiaire de fonctions paramétrées ayant une forme analytique.

Conduite d'une modélisation

Quel que soit le modèle, une modélisation se déroule suivant les mêmes phases :

- *La collecte des données* : il s'agit de recueillir les données les plus représentatives de l'hydrosystème (données climatiques, niveaux piézométriques, prélèvements, concentrations des eaux...). Dans le cas des modèles maillés il faut également recueillir des informations géologiques pour identifier la structure de l'aquifère (toits et murs des couches géologiques) ;
- *La construction du modèle* : il s'agit d'organiser les données collectées sous la forme requise par le logiciel qui fera fonctionner le modèle ;
- *Le calage du modèle* : durant cette phase, on recherche l'ensemble des valeurs des paramètres pour lesquelles il a la meilleure adéquation possible entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle. Pour un modèle spatialisé, il s'agit des paramètres descriptifs du milieu (perméabilités et coefficient d'emménagement des formations, perméabilités du lit des cours d'eau...). Pour les modèles globaux, il s'agit des paramètres internes au modèle (non descriptifs du milieu). La phase de calage peut être très rapide pour les modèles globaux (procédures semi-automatiques) à très longues (plusieurs mois) pour les modèles maillés, où le calage se fait par une succession de simulations « essais – erreurs » du fait de la complexité du système. La qualité du calage est appréciée visuellement (par superposition des chroniques mesurées et calculées) et par l'intermédiaire de critères quantitatifs permettant d'évaluer les écarts entre valeurs simulées et valeurs observées ;
- *La validation du modèle* : la validation consiste à confronter les simulations avec des données (niveaux piézométriques, débits...) non utilisées dans le calage, et vérifier la qualité du calage ;
- *L'exploitation du modèle calé* : une fois calé, le modèle peut être utilisé en prévision : évaluation de l'impact de scénarios climatiques, recherche d'une configuration optimale de prélèvements permettant de respecter un certain nombre de contraintes, prévision d'un état piézométrique face à une demande en eau accrue...

Annexe 2

Présentation des modèles utilisés :

Le modèle global GARDENIA

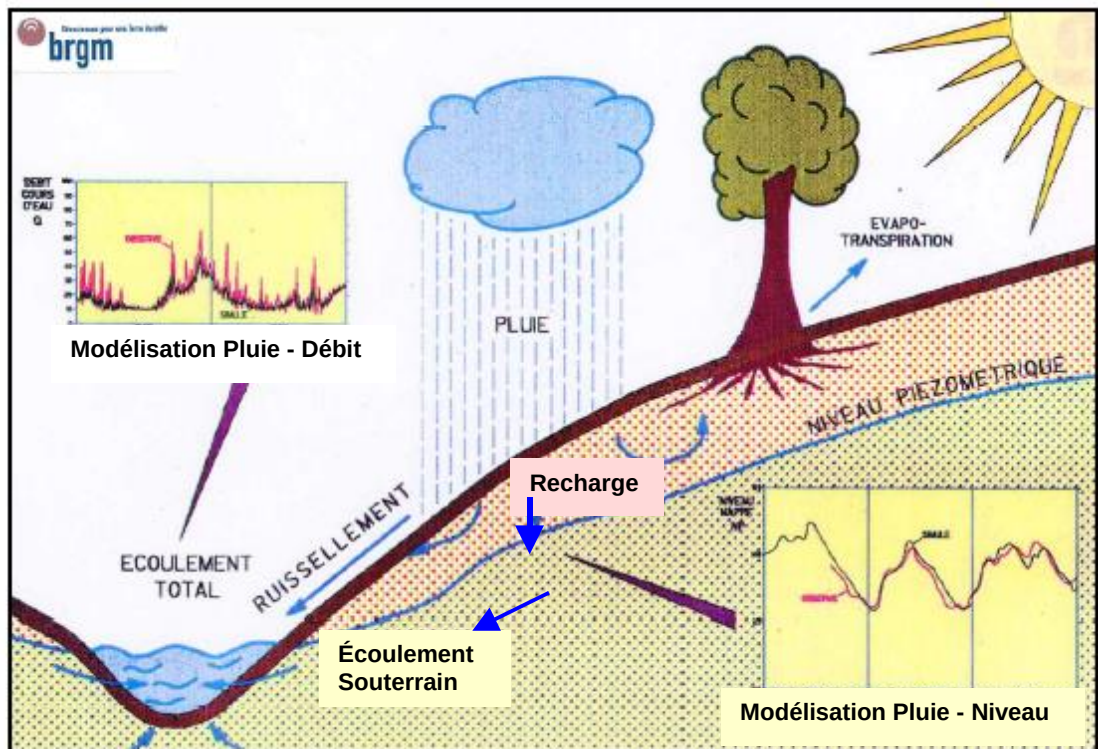
Le modèle maillé MARTHE

GARDENIA

Modélisation hydrologique globale de bassins versants

DOMAINES D'APPLICATION

GARDENIA (modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **N**iveaux **A**quifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants. Il réalise le bilan hydrologique à partir d'une chronique, représentative à l'échelle du bassin, de pluies et d'évapotranspiration potentielle (ETP). Une fois calé sur les observations disponibles, il permet de calculer le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.



Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

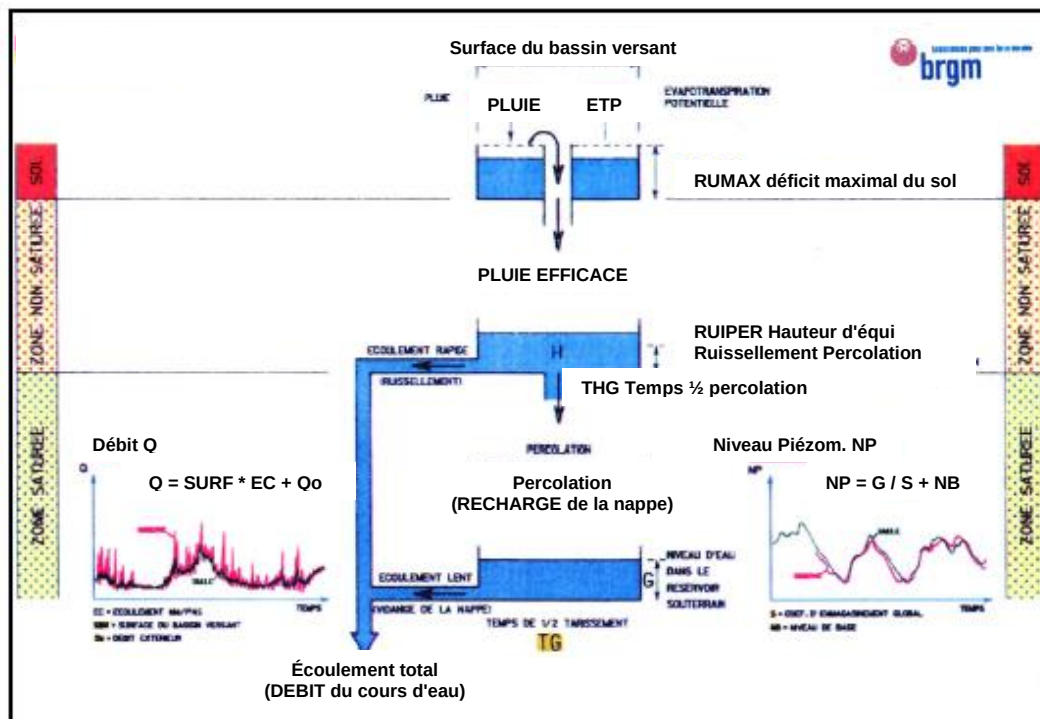
Son domaine d'application est très large. Il concerne essentiellement l'extension de données de débits ou de niveaux piézométriques pendant une longue période durant laquelle les précipitations et l'évapotranspiration potentielle sont connues. Ces longues séries peuvent ensuite être utilisées pour effectuer des prévisions de niveaux ou de débits pour le dimensionnement d'ouvrages, ou pour l'étude de phénomènes particuliers, tels que remontée de nappe, occurrence d'inondations ou de sécheresse. GARDENIA permet également de mettre en évidence des phénomènes exogènes, tels que les pompages en nappe ou en rivière, qui peuvent se traduire par une dégradation plus ou moins nette du calage. Il permet, en outre, d'estimer les différents termes du bilan hydrologique du bassin, notamment la pluie efficace ou la recharge pluviale. Il permet enfin, grâce à la prise en compte des phénomènes de fonte de neige, de simuler le comportement de bassins à régime nival.

Développé par le BRGM depuis 1980, GARDENIA a été utilisé sur plusieurs centaines de bassins, tant français qu'étrangers. C'est un logiciel particulièrement fiable et éprouvé dans le domaine de l'hydrologie de bassins, opérationnel sous

environnement Windows et compatible avec les principaux formats de données, tels le format BANQUE HYDRO du Ministère de l'Environnement et le format SANDRE de Météo-France.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

GARDENIA simule par une succession de réservoirs les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement). Les paramètres associés à chaque réservoir concernent notamment la capacité maximale de rétention du sol (RUMAX) pour le réservoir « sol » ainsi que les différents temps de transfert d'un réservoir à l'autre (THG et TG) pour les réservoirs les plus profonds.



Principe du modèle hydrologique global GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique.

Une procédure de calage automatique particulièrement robuste (algorithme de Rosenbrook) permet d'estimer le jeu de paramètres assurant la meilleure restitution des débits ou niveaux mesurés. On peut également estimer automatiquement la sensibilité du calage à un ou plusieurs paramètres.

GARDENIA peut travailler à un pas de temps journalier, décadaire ou mensuel, le pas de temps des données pluviométriques fixant le pas de temps de calcul.

MARTHE

Modélisation d'Aquifères avec maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique

DOMAINE D'APPLICATION

Conçue et réalisée au groupe BRGM pour la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive des écoulements souterrains en milieu poreux, la chaîne de logiciels MARTHE est destinée à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés :

- Gestion des ressources aquifères :
 - Évaluation des termes du bilan hydraulique d'un système aquifère : recharge par infiltration pluviale, apports latéraux par les bassins versants, circulations souterraines et flux associés, fluctuations annuelles, stockages-déstockages saisonniers ...
 - Impacts hydrodynamiques d'aménagements existants ou à créer : pompages, irrigation, drainage, gravières, bassins d'infiltration ...
 - Gestion et optimisation de champs captants.
- Génie civil :
 - Assèchement de fouilles.
 - Effets hydrauliques de parois étanches.
 - Travaux souterrains (métros, parking, tunnels, ...).
- Environnement :
 - Infiltration d'un polluant en zone non saturée, percolation jusqu'à la nappe, puis migration souterraine.
 - Simulation du panache de pollution s'échappant d'une zone contaminée : trajectoires, vitesses de déplacement, concentrations atteintes à l'aval. Modélisation de scénarios hydrauliques de confinement ou de décontamination.
 - Impacts de décharges domestiques et industrielles sur les eaux souterraines.
 - Etude du confinement de stockages souterrains.
- Exploitation minière :
 - Calcul de débits d'exhaures miniers et des rabattements associés.

REFERENCES

Au cours des 20 dernières années, MARTHE a été utilisé pour modéliser plus de 250 contextes aquifères répartis dans une vingtaine de pays, sur des financements français, nationaux et internationaux.

STRUCTURE DU LOGICIEL

Au module de calcul hydrodynamique et hydrodispersif (MARTHE proprement dit), sont associés des modules de préparation, gestion et représentation graphique des données et des résultats de modélisation ces modules sont centralisés dans l'interface WinMarthe :

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le domaine à modéliser est discrétisé selon un maillage rectangulaire de type "écossais" : chaque ligne et chaque colonne de mailles a une largeur constante, mais l'utilisateur est libre d'adapter la largeur de chacune de ces lignes et colonnes en fonction des hétérogénéités locales, de la densité des informations disponibles, et de la précision recherchée. Il est en outre possible d'affiner localement le maillage par des sous-maillages emboîtés (gigognes).

Les mailles du modèle sont automatiquement associées à des coordonnées géographiques (norme « Semis » élaborée au BRGM), ce qui permet de superposer les données initiales et les résultats des simulations à des fonds cartographiques préalablement digitalisés. Les données peuvent être définies maille par maille, ou bien par zones, par couches ou globalement pour tout le maillage. Toutes les données sont stockées dans des fichiers texte.

Les résultats de modélisation sont édités dans des fichiers texte. Ils peuvent être édités et représentés graphiquement. Les débits calculés (débits aux potentiels imposés, débits résiduels de convergence) peuvent être présentés maille par maille, ou bien par zones, par couches, ou encore pour tout le modèle.

La convergence des calculs est contrôlée par plusieurs critères : écarts de charge (moyen et maximal entre deux itérations successives) et débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle, et ponctuel dans chacune des mailles).

Calcul des écoulements

Les calculs hydrodynamiques sont effectués selon une méthode aux volumes finis. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés (gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat).

Calcul du transport

Selon le type de problème posé (dominance de la convection ou de la dispersion), l'utilisateur peut choisir entre trois techniques de calcul pour optimiser le schéma de transport mis en oeuvre :

- méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux ;
- volumes finis ;
- méthode des caractéristiques (MOC) utilisant des particules ;
- méthode des déplacements aléatoires (Random Walk), dite aussi méthode des particules ;

Le transport en nappe est simulé sous ses composantes advective, diffusive et dispersive. Plusieurs options sont proposées pour le transport réactif :

- décroissance exponentielle de l'effluent en fonction du temps ;
- dégradation en chaîne ;
- facteur de retard avec coefficient de partage K_d (phénomènes d'adsorption-désorption) ;
- prise en compte de la double porosité (avec cinétique ou en équilibre) ;
- isothermes de Freundlich ou de Langmuir

Interactions géochimiques

Les interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice peuvent être simulées par couplage entre MARTHE et un modèle chimique "dédié" au contexte géochimique d'écoulement.

MARTHE permet de simuler de nombreux types d'écoulement, en zones saturées et non saturées, en milieux monophasiques et diphasiques. Plusieurs niveaux d'utilisation sont distingués :

- Hydrodynamique classique :
 - Maillages 2D (en plan, en coupe verticale, en coordonnées cylindriques) ou 3D.
 - Aquifères monocouches ou multicouches (empilement d'aquifères séparés par des épontes semi-perméables).
 - Nappes libres, captives ou semi-captives en régime hydraulique permanent ou transitoire.
 - Prise en compte de discontinuités telles que plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains), parois étanches (palplanches, ...).
 - Couplage avec un réseau hydrographique.
 - Bilan hydroclimatique couplé.
 - Anisotropies horizontale et verticale des perméabilités.
 - Calcul de trajectoires (directes et inverses) en régime hydraulique permanent ou transitoire.
- Transport hydrodispersif :
 - Migration hydro-dispersive d'un effluent dans la nappe et la zone non saturée.
- Zone Non Saturée, Densité, Température :
 - Traitement continu de la zone saturée et de la zone non saturée.
 - Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
 - Transferts d'énergie ;
 - Prise en compte des variations de viscosité avec la température.
- Calage automatique, Optimisation :
 - Calage automatique du modèle, selon des zones homogènes ou maille par maille.
 - Analyse de sensibilité aux paramètres de calage.
- Utilisations spéciales :
 - Fractures verticales par transmissivités équivalentes ; Réseaux de galeries.
 - Transport avec interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
 - Écoulements diphasiques : eau douce et eau salée, eau et air, eau et "huile".
 - Écoulements de gaz.
 - Prise en compte du développement de la végétation.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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