



DOCUMENT PUBLIC

Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2001-EAU-631

mars 2002
BRGM/RP-51827-FR





DOCUMENT PUBLIC

Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2001-EAU-631

N. Amraoui, C. Golaz, V. Mardhel, Ph. Negrel, V. Petit, J.L. Pinault, Th. Pointet

**mars 2002
BRGM/RP-51827-FR**



Mots clés : Simulation, Nappes, Cours d'eau, Modèles, GARDENIA, TEMPO, Somme.

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

Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel Ph., Petit V., Pinault J.L., Pointet Th. (2002) - Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig., 11 tabl., 5 ann.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les crues du bassin de la Somme survenues en fin d'hiver et printemps 2001 ont fait apparaître le rôle important joué par les nappes contenues dans les aquifères de la craie. Les nappes sont des objets naturels de grande dimension et leur manifestation peut être puissante comme on a pu l'observer. Toutefois, l'hydraulique des nappes se caractérise par une forte inertie ce qui permet d'envisager de prévoir leurs réactions à partir du moment où leur mode de fonctionnement est connu.

Le projet est conduit par le BRGM pour la partie hydrogéologique et par le CETMEF pour l'étude de la propagation de l'eau en surface. La révision du schéma géologique a permis de bien situer les unités aquifères et leurs importances respectives. Les données nécessaires ont été recueillies auprès de Météo France, de la DIREN, de la Banque du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM.

Les simulations ont fait appel à plusieurs modèles globaux pour fournir des indicateurs ponctuels à caractère prédictif sur des points singuliers des nappes et sur plusieurs cours d'eau. Un modèle maillé a été constitué pour analyser la distribution spatiale des zones contributives. Les modèles du premier type et du second type sont des outils de prévision applicables à la dimension temporelle et à la dimension spatiale, au sein du bassin versant.

Les outils mis en place sont actualisés régulièrement et exploités pendant toute la période hivernale 2001-2002. Ils permettent de suivre deux types d'évolutions des nappes, et les variations consécutives des débits des cours d'eau : les évolutions à « basse fréquence » c'est-à-dire à long temps de réaction -ce sont les fluctuations inter-annuelles qui sont à l'origine des états hautes ou basses eaux que l'on observe à l'entrée de l'hiver- et les évolutions à « haute fréquence », c'est-à-dire les réactions rapides des nappes, sous l'effet des précipitations mensuelles et saisonnières. Un dispositif de suivi renforcé pourra être mis en place sur le terrain pour accroître la pertinence des prévisions pour les périodes hivernales au-delà de 2002.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Rappel du cahier des charges	15
3. Révision du schéma morpho-structural	17
3.1. Bref historique de la géologie de la Somme, lecture et transposition du cadre géologique et hydrogéologique.....	17
3.2. Numérisation et discrétisation des données géologiques.....	19
3.2.1. Le modèle numérique de terrain	21
3.2.2. Le toit des formations du Turonien inférieur et moyen	21
3.2.3. Le toit des formations crayeuses du Sénonien	21
3.2.4. L'épaisseur du recouvrement de la craie	21
3.2.5. L'extension et l'épaisseur des alluvions	21
3.3. Contexte hydrogéologique	26
3.4. Numérisation et discrétisation des données hydrogéologiques	27
3.4.1. Mur de l'aquifère	27
3.4.2. Toit de l'aquifère	27
3.4.3. L'épaisseur du recouvrement de la nappe en situation de moyennes eaux ..	27
3.5. Fonctionnement du système aquifère	30
4. Données disponibles et sources d'information	33
4.1. Paramètres hydrodynamiques.....	33
4.2. Réseaux hydrographiques et sources.....	33
4.3. Prélèvements	34
4.4. Stations d'épuration et de traitements des eaux usées	34

4.5. Bilan des données disponibles.....	34
5. Limites du domaine de modélisation.....	43
5.1. Traitement préliminaire des données	43
5.1.1.Principe de la distribution initiale des transmissivités.....	43
5.1.2.Distribution des paramètres hydriques et hydrodynamiques	45
6. Étude des faciès chimiques et isotopiques des eaux – Résultat de la campagne de prélèvements en étiage 2001	53
6.1. Interprétation des analyses	54
6.1.1. Chimie des eaux.....	54
6.2. Faciès isotopique des eaux	56
7. Modèles globaux pluie-niveaux et pluie-débit GARDENIA	61
7.1. Présentation du modèle GARDENIA.....	61
7.2. Données disponibles.....	63
7.2.1.Données climatiques	63
7.2.2.Données hydrologiques.....	65
7.2.3.Données piézométriques	67
7.3. Simulation de la période janvier 1995 - novembre 2001	67
7.3.1.Remarque sur les phénomènes observés.....	67
7.3.2.Simulations pluie/niveau.....	68
7.3.3.Simulations pluie/débit	71
7.4. Simulation du débit de la Somme à Abbeville.....	73
7.4.1.Recherche du poste pluviométrique permettant la meilleure simulation.....	73
7.4.2.Bilan hydrologique du bassin calculé par GARDENIA	76
7.5. Utilisation du modèle en mode prévision.....	76
7.5.1.Démarche retenue	76
7.5.2.Résultats obtenus	77
7.6. Synthèse des résultats.....	78

8. Simulations de contrôle	81
8.1. Approche méthodologique.....	81
8.1.1. Présentation du modèle TEMPO	81
8.1.2. Modélisation inverse du niveau piézométrique de la nappe de la craie	83
8.1.3. Modélisation inverse du débit de la Somme à Abbeville.	86
8.2. Validation du modèle sur la période 1980 - 2001	88
8.3. Les prévisions du débit de la Somme.....	91
8.4. Analyse des résultats du modèle TEMPO, analyse comparative des résultats des modèles globaux	91
9. Modèle maillé du bassin de la Somme	93
9.1. Données climatiques complémentaires utiles pour le modèle maillé.....	93
9.1.1. Répartition spatiale des précipitations	94
9.1.2. Répartition des évapotranspirations potentielles (ETP).....	95
9.2. Maillage du modèle et conditions aux limites	97
9.3. Introduction des données dans le modèle.....	99
9.3.1. Géométrie de l'aquifère (passage à la résolution du maillage et estimation de l'erreur perte d'information).....	99
9.3.2. Réseau hydrographique.....	99
9.3.3. Distribution des précipitations et zones de recharge.....	105
9.3.4. Distribution initiale des perméabilités	105
9.3.5. Zones de débordement	105
9.4. Calage du modèle en régime permanent	111
9.4.1. Choix et justification de la période de référence	111
9.4.2. Introduction de la recharge et des prélèvements.....	111
9.4.3. Données de calage du modèle en régime permanent.....	111
9.4.4. Résultats du calage en régime permanent.....	113
9.5. Calage du modèle de la Somme en régime transitoire avec couplage nappe-rivière.....	119
9.5.1. Choix de la période de référence	119
9.5.2. Données d'entrée du modèle pour le régime transitoire.....	121

9.5.3. Données de contrôle du calage du modèle en régime transitoire	123
9.5.4. Principales phases de calage du modèle maillé en régime transitoire	123
9.5.5. Résultats	126
10. Amélioration de l'outil de prévision	145
10.1. Améliorations à apporter au modèle maillé	145
10.2. Amélioration et extension du dispositif de suivi	145
10.2.1. Amélioration du dispositif de suivi des nappes	146
10.2.2. Mise en place du dispositif de suivi de la zone non saturée	148
10.2.3. Amélioration du dispositif de suivi des rivières	149
11. Conclusion	151

Liste des figures

Fig. 1 - Localisation des points de la BSS disposant d'une coupe géologique.	18
Fig. 2 - Modèle numérique de terrain en mètres NGF.	20
Fig. 3 - Cote altimétrique du toit des dièves.	22
Fig. 4 - Cote altimétrique du toit de la craie sénonienne.	23
Fig. 5 - Épaisseur des formations recouvrant la craie sénonienne.	24
Fig. 6 - Extension et épaisseur des alluvions.	25
Fig. 7 - Cote altimétrique du mur de l'aquifère de la craie.	28
Fig. 8 - Épaisseur des terrains non saturés en période de moyennes eaux.	29
Fig. 9 - Bassins versants hydrologiques de la Somme.	31
Fig. 10 - Bassins versants souterrains déduits des moyennes eaux.	31
Fig. 11 - Carte de distribution des valeurs connues des transmissivités.	35
Fig. 12 - Carte de distribution des valeurs connues du coefficient d'emmagasinement.	36
Fig. 13 - Carte de distribution des valeurs calculées de débits spécifiques.	37
Fig. 14 - Carte de position des sources.	38
Fig. 15 - Carte de localisation des forages.	39

Fig. 16 - Position des stations d'épuration et de traitement des eaux.	40
Fig. 17 - Carte des isohyètes de Météo France.	44
Fig. 18 - Zones de recharge et valeurs par zone.	46
Fig. 19 - Carte de la répartition initiale des valeurs de transmissivité.	50
Fig. 20 - Carte de la répartition initiale des valeurs de perméabilité.	51
Fig. 21 - Expression du faciès chimique des eaux à travers le rapport des concentrations en chlore et en magnésium. Confrontation des deux campagnes de prélèvements : origines et mélanges des eaux.	55
Fig. 22 - Faciès isotopique des eaux à partir des isotopes du strontium : origine des eaux.	57
Fig. 23 - Relations nappe-rivières : apports naturels, apports anthropiques.	58
Fig. 24 - Architecture du logiciel GARDENIA. Les différents compartiments des milieux naturels sont représentés à l'aide de réservoirs successifs.	62
Fig. 25 - Localisation des stations météorologiques, piézométriques et hydrologiques, sur fond topographique.	64
Fig. 26 - Comparaison des débits des principaux cours d'eau de janvier 1994 à septembre 2001.	66
Fig. 27 - Essais de restitution par simulation GARDENIA des fluctuations piézométriques observées sur 7 ouvrages pour la période 1995-2001.	70
Fig. 28 - Essais de restitution par simulation GARDENIA des fluctuations de débits observées sur 4 stations de jaugeage des cours d'eau pour la période 1995-2001.	72
Fig. 29 - Restitution et calage des débits de la Somme à Abbeville au moyen des données pluviométriques recueillies à la station de Cottenchy-Boves et Glisy.	74
Fig. 30 - Simulations comparatives des débits de la Somme à Abbeville pour la période 1995-2001.	75
Fig. 31 - Chronique des paramètres d'entrée du modèle de simulation des débits de la Somme à Abbeville, pour l'année 2001.	76
Fig. 32 - Simulation en mode « prévision » à compter du 21/11/2001.	77
Fig. 33 - Simulation en mode « prévision » à compter du 21/11/2001. Probabilité de dépassement obtenues en excluant les années exceptionnelles.	78
Fig. 34 - Schéma d'architecture du modèle inverse à deux éléments.	83
Fig. 35 - Observation et simulation des évolutions du niveau piézométrique au droit de l'ouvrage 00463X0036.	84
Fig. 36 - Représentation de la distribution des pluies efficaces de la zone Glisy → Bernaville.	84

Fig. 37 - Expression de la fraction de la pluie efficace qui participe au transfert rapide via les fractures du réservoir aquifère.	85
Fig. 38 - Exemples de réponses impulsionnelles linéaires et non linéaires.	85
Fig. 39 - Simulation du débit de la Somme à Abbeville pour la période 1987-2001.	87
Fig. 40 - Analyse du débit de la Somme à Abbeville.	87
Fig. 41 - Réponse impulsionnelle du modèle à deux entrées restituant le débit de la Somme à Abbeville.	88
Fig. 42 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Piézomètre 463X - $R = 0,85$	89
Fig. 43 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Débit de la Somme - $R = 0,89$	89
Fig. 44 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Débit de la Somme - $R = 0,88$	90
Fig. 45 - Prévision du débit de la Somme à Abbeville en hautes eaux 2001-2002.	90
Fig. 46 - Délimitation de zones de valeurs de R_{max} utilisées pour le calcul du bilan hydrique.	96
Fig. 47 - Extension du modèle maillé et conditions aux limites.	98
Fig. 48 - Carte topographique du modèle de la Somme.	100
Fig. 49 - Carte du substratum de la nappe de la craie.	101
Fig. 50 - Réseau hydrographique du modèle de la Somme.	102
Fig. 51 - Carte du pourcentage de surface de la maille occupée par les alluvions.	104
Fig. 52 - Carte des zones de pluies et position des postes utilisés dans le calcul de la recharge de la nappe.	106
Fig. 53 - Carte des flux de la recharge moyenne sur la période janvier 1990 - décembre 1995.	107
Fig. 54 - Carte de recouvrement de la nappe de la craie.	108
Fig. 55 - Zones ayant un potentiel de débordement.	109
Fig. 56 - Prélèvements 1995 dans la nappe de la craie.	110
Fig. 57 - Carte de la piézométrie moyennes eaux 1995 et position des différents piézomètres.	112
Fig. 58 - Carte des perméabilités après le calage en régime permanent ME 95.	114
Fig. 59 - Carte de la répartition de la recharge après calage du modèle de la Somme en régime permanent ME 95.	115
Fig. 60 - Charges calculées en fonction des charges observées en ME 1995 dans les différents piézomètres.	116
Fig. 61 - Carte de charges calculées en régime permanent pour la période ME 1995.	117

Fig. 62 - Prélèvements mensuels dans la nappe de la craie.	120
Fig. 63 - Localisation des piézomètres de référence.	122
Fig. 64 - Bassins pour lesquels un précalage du bilan hydrique avec GARDENIA a été réalisé.	124
Fig. 65 - Zones météorologiques après calage en régime transitoire.	128
Fig. 66 - Champ de perméabilité issu du calage du modèle de la Somme en régime transitoire.	129
Fig. 67 - Carte de coefficient d'emmagasinement après calage du modèle en transitoire.	130
Fig. 68 - Historiques de la piézométrie simulée et de la piézométrie observée dans la Somme aval.	132
Fig. 69 - Historiques de la piézométrie simulée et celle et observée dans les bassins de la Nièvre et de l'Hallue.	134
Fig. 70 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans la Somme amont.	135
Fig. 71 - Historiques de la piézométrie simulée et celle et observée dans le bassin de la Selle.	135
Fig. 72 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans le bassin de l'Avre.	136
Fig. 73 - La Somme à Abbeville : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.	137
Fig. 74 - L'Avre à Moreuil : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.	137
Fig. 75 - La Selle à Plachy : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.	138
Fig. 76 - La Nièvre à l'Etoile : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.	138
Fig. 77 - L'Hallue à Bavelincourt : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.	139
Fig. 78 - Contribution de la nappe au débit de la Somme à Abbeville.	140
Fig. 79 - Quelques termes du bilan des flux calculés par le modèle.	143
Fig. 80 - Dispositif actuel de suivi des nappes et des rivières.	145
Fig. 81 - État de charge relative des sous-entités hydrogéologiques - mars 2001.	146
Fig. 82 - État de charge relative des sous-entités hydrogéologiques - juin 2001.	147
Fig. 83 - Localisation des cinq piézomètres proposés pour l'amélioration et l'extension du dispositif de suivi des nappes.	148

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Récapitulatif des données disponibles.....	41
Tabl. 2 - Simulations pluie/niveau : synthèse des paramètres utilisés.	69
Tabl. 3 - Simulations pluie/débit : synthèse des paramètres utilisés.....	71
Tabl. 4 - Simulation du débit de la Somme à Abbeville : synthèse des paramètres utilisés.....	74
Tabl. 5 - Débits simulés en ME 95 et débits observés dans les 5 stations hydrométriques de référence (BE 95 et HE 95).	118
Tabl. 6 - Bilan des flux en régime permanent - ME 1995.	119
Tabl. 7 - Bilan des débits dans le réseau hydrographique.....	119
Tabl. 8 - Synthèses des paramètres utilisés dans le calcul du bilan dans les 5 bassins versants.....	125
Tabl. 9 - Synthèses des paramètres utilisés dans le calcul du bilan dans les 5 bassins versants après calage du modèle.	126
Tabl. 10 - Termes du bilan des flux de 1995 à 1999 (calage).....	141
Tabl. 11 - Termes du bilan des flux de 1999 à 2001.....	142

Liste des annexes

Ann. 1 - Critère statistique (critère de Nash) utilisé pour estimer la qualité d'une simulation	153
Ann. 2 - Résultats complémentaires de simulation du débit de la Somme à Abbeville - Modèle GARDENIA	157
Ann. 3 - Résultats complémentaires - Générateur de pluie et d'ETP - Modèle TEMPO.....	163
Ann. 4 - Résultats du précalage du bilan hydroclimatique des différents bassins de la Somme avec le modèle GARDENIA.....	177
Ann. 5 - Complément de résultats du calage de la piézométrie en régime transitoire	181

1. Introduction

La prévision des crues de nappes s'appuie sur le fait que les écoulements souterrains se caractérisent par une inertie souvent importante. Cette inertie, et les règles connues qui gèrent les écoulements souterrains, font qu'à tout moment le débit d'une nappe -et la contribution de cette nappe au débit d'un cours d'eau- sont conditionnés par les sollicitations qui s'appliquent au milieu naturel, les pluies récentes en particulier, et par les états antérieurs de la nappe. Par l'observation, nous pouvons connaître les états successifs d'une nappe sur plusieurs mois, plusieurs années. Les règles de l'hydrodynamique permettent d'analyser les réactions de cette nappe et de comprendre l'enchaînement de ces états successifs.

Dès lors, on dispose des éléments essentiels pour passer en mode prédictif et émettre des pronostics sur l'évolution des débits de la nappe et des cours d'eau associés. C'est l'objet de cette étude qui, après une révision du schéma géologique sur la base des plus récentes données, fait appel à deux types de modèles pour forger un outil de prévision des débits, en particulier des débits en hautes eaux.

Conjointement, cet outil a été exploité toutes les deux semaines à titre de veille pendant toute la période des hautes eaux 2001-2002 pour prévoir et informer sur les situations extrêmes éventuelles, donnant lieu à des notes techniques commentant les simulations. Cette action qui est du domaine de la prévision, confine à la prévention dans la mesure où la connaissance des états à venir, avec une anticipation d'un mois au moins, permet de prendre des dispositions soit de protection soit de parade et d'informer avec anticipation, anticipation qui avait fortement manqué pendant la période hivernale 2000-2001.

Les deux types de modèles s'adressent respectivement à la variation dans le temps d'un signal -une chronique de débits en un point par exemple- et à la distribution spatiale des composantes des écoulements, autrement dit à la régionalisation des phénomènes et à l'identification des zones plus fortement contributives.

2. Rappel du cahier des charges

Le cahier des charges prévoyait les étapes suivantes :

- **La caractérisation du milieu physique** : c'est l'objet du chapitre 3 qui fait suite et complète un travail réalisé en juin 2001 (voir rap. BRGM RP-51030-FR). Il délimite latéralement et verticalement les unités aquifères en conformité avec le référentiel hydrogéologique de la France.
- **L'établissement des correspondances et le fonctionnement global du système** : la relation entre les pluies et les unités hydrauliques du système souterrain et superficiel, leurs fonctionnements, ont été examinés dans le même rapport cité ci-dessus et complétés par des mesures comparatives faites en période de basses eaux. Les interprétations des traçages chimiques et isotopiques ont conforté l'interprétation du mode de fonctionnement du système dans son ensemble.
- **Plusieurs modèles globaux** ont été réalisés et constituent la partie la plus directe de l'outil de prévision des évolutions du système. Ces modèles sont de deux sortes : des modèles paramétriques et des modèles statistiques. Ils portent sur les niveaux de nappes et les débits des cours d'eau et de la Somme en particulier.
- **Un modèle maillé a été réalisé**. Il couvre l'ensemble du bassin versant ; il permet d'analyser le comportement de chaque sous-bassin et en particulier la contribution relative de chaque unité hydraulique. Il permet d'identifier les points importants sur lesquels pourront porter des surveillances particulières et un schéma d'équipement de terrain sera proposé en conséquence. Le modèle a été constitué et calé en régime permanent. Il a ensuite été calé en régime transitoire sur la base des données de 1995 à 2002. Il est à même de fonctionner en mode prédictif sur tout scénario observé pour éprouver les évolutions du système. Il peut prendre en compte également des aménagements éventuels sur le bassin.
- Les données issues des différents modèles ont été transmises au CETMEF qui a entrepris **la réalisation du modèle de propagation** destiné à convertir les flux en hauteurs d'eau à la surface du sol.

3. Révision du schéma morpho-structural

3.1. BREF HISTORIQUE DE LA GEOLOGIE DE LA SOMME, LECTURE ET TRANSPOSITION DU CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Au Jurassique, les transgressions marines débutent dans la région Nord et leur avancée s'amplifie au Jurassique moyen (Bajocien et Bathonien). Les formations plus anciennes du Paléozoïque vont se couvrir de dépôts sableux (Bajocien).

Plus tard la sédimentation produira essentiellement des terrains calcaires (calcaires gréseux, calcaires oolithiques, calcaires marneux).

Au Cénomanién (Crétacé supérieur), suite à l'ouverture de l'océan Atlantique Nord, la transgression atteint son paroxysme

Sous un climat chaud, les micro-organismes foisonnent. Ils sédimentent et forment une boue calcaire. À la fin du Crétacé, la mer entame sa régression et les diagenèses transforment les sédiments en craie, roche compacte, consolidée.

À l'ère tertiaire, la position de la mer fluctue de manière importante et des dépôts de type continentaux s'accumulent dans la partie nord-est (argile de Louvil, sables landéniens...).

Enfin, au Quaternaire, les alternances de périodes de glaciation provoquent un refroidissement important et une baisse sensible du niveau marin. Les phases périglaciaires contribuent à la fissuration de la craie en diaclases qui favoriseront quelques millions d'années plus tard l'infiltration d'eau vers les aquifères de la craie.

Les dépôts de cailloutis et de loess (limon calcaire très fin d'origine éolienne) se déposent en plaine maritime et continentale.

Jusqu'à nos jours, l'érosion contribue à modeler les formations superficielles.

La série stratigraphique de l'encaissant de l'aquifère principal de la Somme peut être décrite depuis le Crétacé supérieur, c'est-à-dire du bas vers le haut comme suit :

- Le **Cénomanién**, constitué essentiellement de craie marneuse, grise, glauconieuse et à silex. Il débute par une assise de faible épaisseur marno-sableuse. Il atteint une puissance de 30 m au droit de la ville d'Amiens.
- Le **Turonien inférieur**, composé de marnes, généralement vertes, dont le faciès devient de plus en plus argileux vers la base de cette formation.

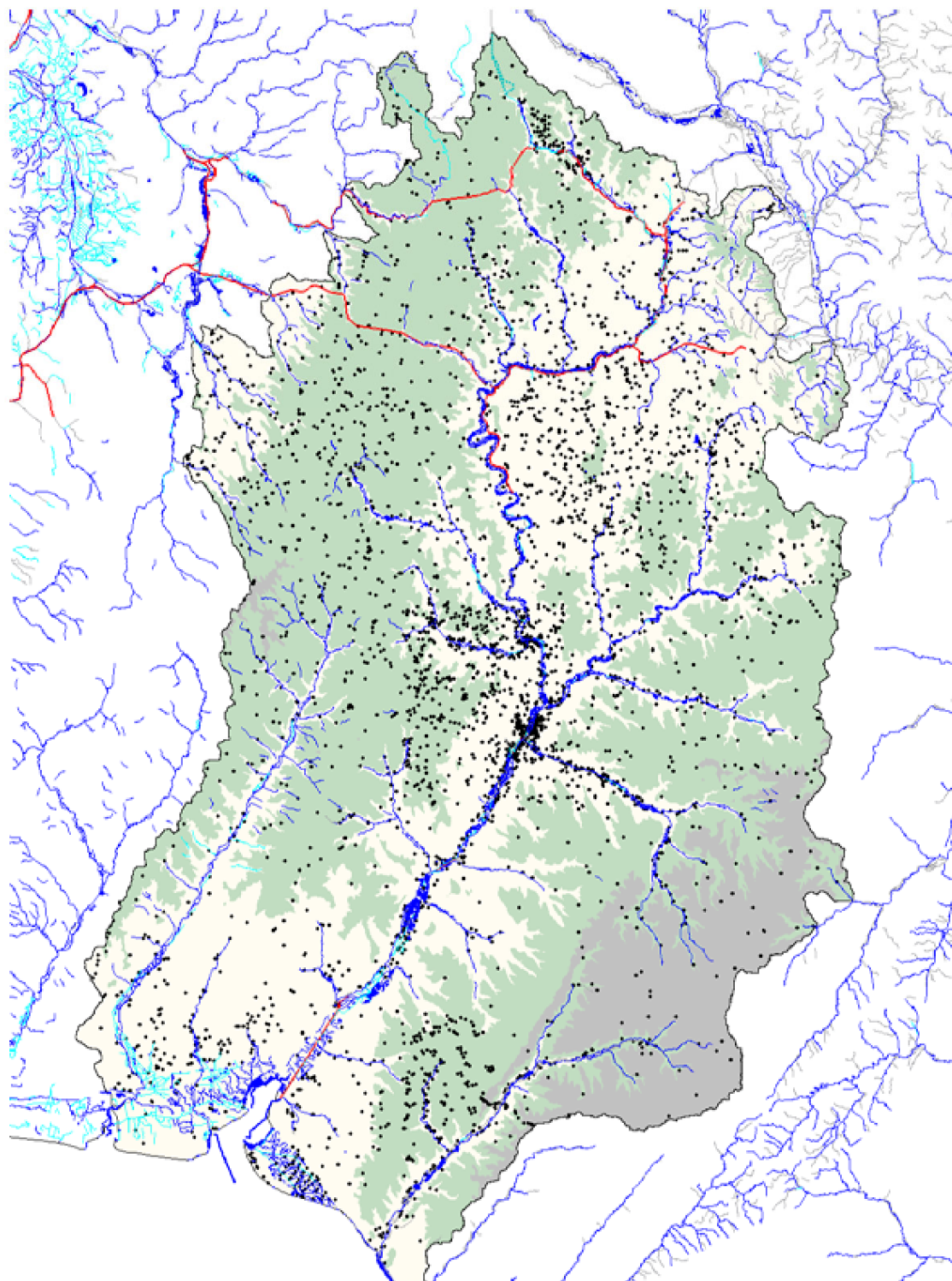


Fig. 1 - Localisation des points de la BSS disposant d'une coupe géologique.

- Le **Turonien moyen**, qui affleure localement dans les vallées de l'Authie et de la Bresle, est composé de marnes grises, parfois bleuâtres ou verdâtres. Il s'agit du faciès généralement dénommé « *dièves* ».
- Le **Turonien supérieur**, affleurant dans les vallées de l'Authie, la Tortille, Cologne et Omignon, se présente sous deux faciès distincts : une craie blanche, à gros silex puis une craie glauconifère, quelquefois phosphatée.

La transition du Turonien vers les faciès du Sénonien (Coniacien) est fréquemment marquée par l'apparition des formations de la « Meule » banc durci par cristallisation et le « Tun » qui forme des niveaux indurés de craie glauconieuse. Ces faciès, discontinus, sont reconnus peu perméables.

- Le **Sénonien** (Coniacien-Santonien et Campanien), composé d'une craie blanche pauvre en silex.
- Le **Tertiaire** apparaît au nord-est du secteur d'étude, recouvrant la craie sénonienne en concordance. Il s'agit de l'étage **landénien**, équivalent du Thanétien dans le bassin de Paris. Il apparaît également au sud-est du département où la série éocène est formée des sables thanétiens, dits de Bracheux.
- Le **Thanétien** est, également dans la partie sud-est du département, recouvert par les formations d'argiles sparnaciennes.
- Le **Quaternaire** est représenté par les alluvions fluviales bien développées dans les grandes vallées humides. Leur épaisseur totale est de 8 à 12 m en amont d'Amiens et de 12 à 16 m dans la basse vallée.

Enfin, la couverture limoneuse des plateaux, d'âge pléistocène, est principalement formée, au sommet, de limons silteux bruns, en général décalcifiés et à la base, de limons sableux jaunes. D'une puissance supérieure à 4 m sur les plateaux, ils disparaissent au rebord de ceux-ci.

3.2. NUMERISATION ET DISCRETISATION DES DONNEES GEOLOGIQUES

La représentation spatiale des différentes formations géologiques a été déduite de l'interprétation de la carte géologique (à l'échelle 1/50 000) et des coupes géologiques archivées en BSS (10 597 points sont inventoriés en Banque du Sous-Sol). La profondeur d'investigation moyenne est de 37 m (fig. 1).

Divers ouvrages et rapports ont été consultés également pour parvenir à une représentation tridimensionnelle des objets géologiques et hydrogéologiques nécessaires à l'édification du modèle maillé de simulation (cf. bibliographie).

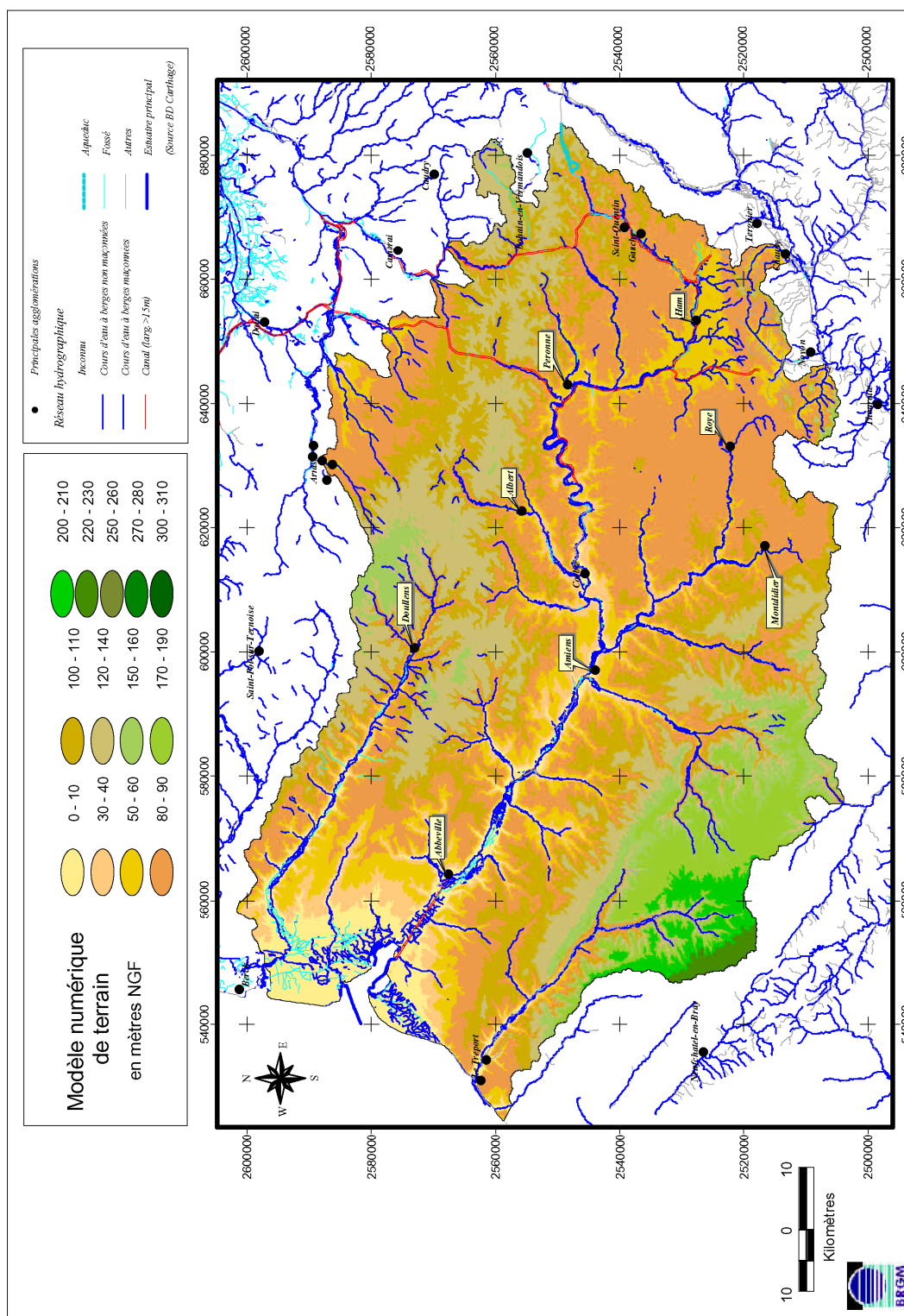


Fig. 2 - Modèle numérique de terrain en mètres NGF.

3.2.1. Le modèle numérique de terrain

Aujourd'hui, le développement de techniques modernes d'acquisition et de mise à disposition d'informations digitales a rendu possible la représentation à la fois de la topographie du milieu par le biais de modèles numériques d'altitude (MNA) et de terrain (MNT) et la représentation de l'occupation des sols par le biais de photographies aériennes ou de données satellitaires.

Ces informations servent de plus en plus à la description des caractéristiques physiques des bassins versants et à la cartographie numérique de leur couverture (fig. 2).

Le MNT est une expression numérique de la topographie. Il existe sous forme matricielle ou vectorielle. La forme vectorielle peut être constituée des courbes de niveau numérisées ou d'un réseau de triangles irréguliers qui relient les points cotés.

En modélisation hydrologique et environnementale, les MNT utilisés sont habituellement de forme matricielle. Les fichiers qui les constituent sont les altitudes (MNA ou DEM), les pentes, l'orientation et l'éclairage simulé.

Le modèle numérique des données exploité dans le cadre de cette étude provient de l'IGN. Il est au pas de 50 m.

3.2.2. Le toit des formations du Turonien inférieur et moyen

La morphologie du toit des dièves est représentée dans la figure 3.

3.2.3. Le toit des formations crayeuses du Sénonien

Le toit des formations du Sénonien provient d'une part de la digitalisation des affleurements présentés sur les cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et d'autre part des coupes recensées dans la banque de données du sous-sol (fig. 4).

3.2.4. L'épaisseur du recouvrement de la craie

L'épaisseur des formations recouvrant la craie a été déduite à partir du toit des formations crayeuses et sa comparaison au modèle numérique de terrain (fig. 5).

3.2.5. L'extension et l'épaisseur des alluvions

L'extension des formations alluvionnaires provient de la digitalisation de la carte géologique à l'échelle 1/50 000 et des données issues des coupes inventoriées en BSS (fig. 6).

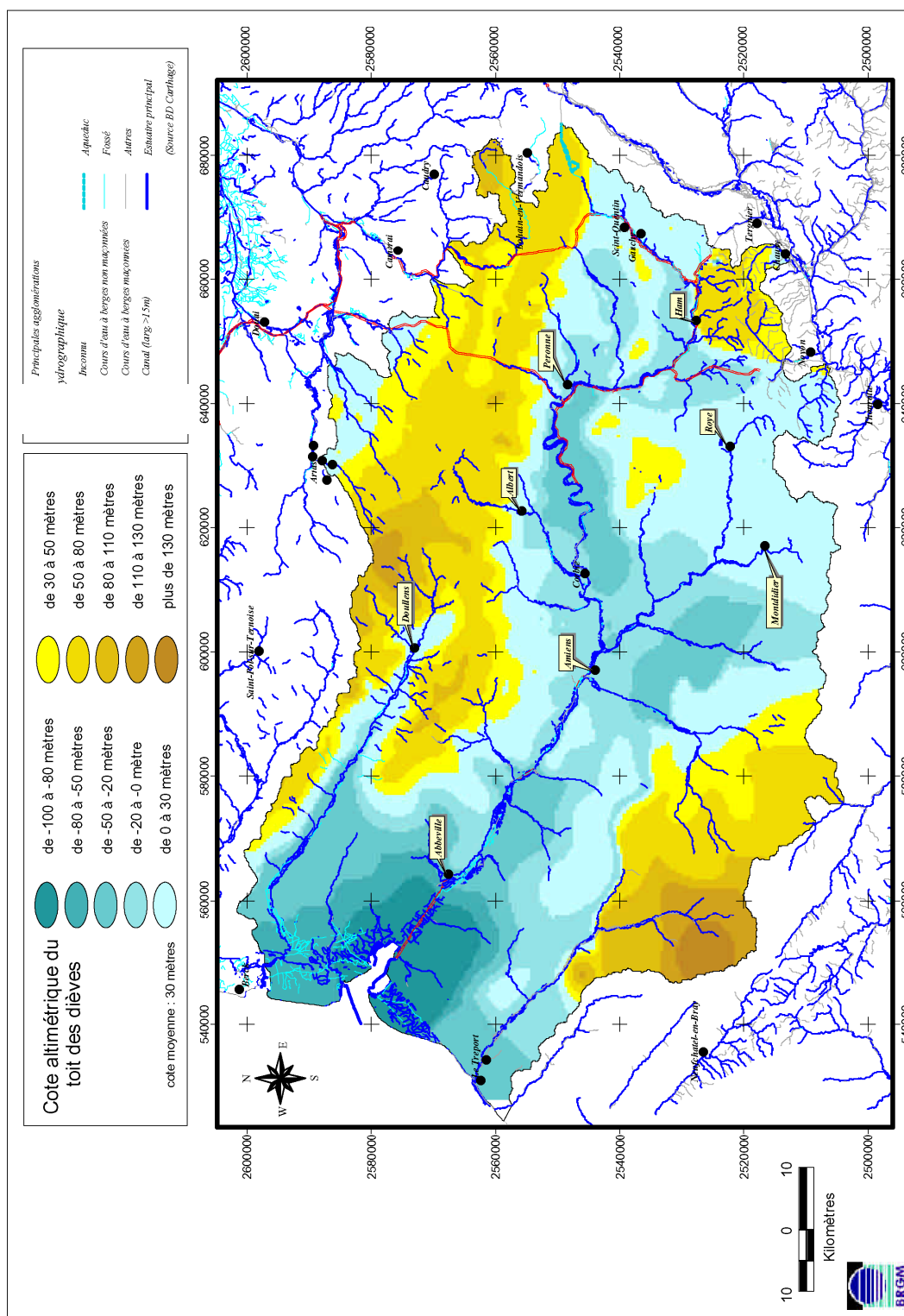


Fig. 3 - Cote altimétrique du toit des dièves.

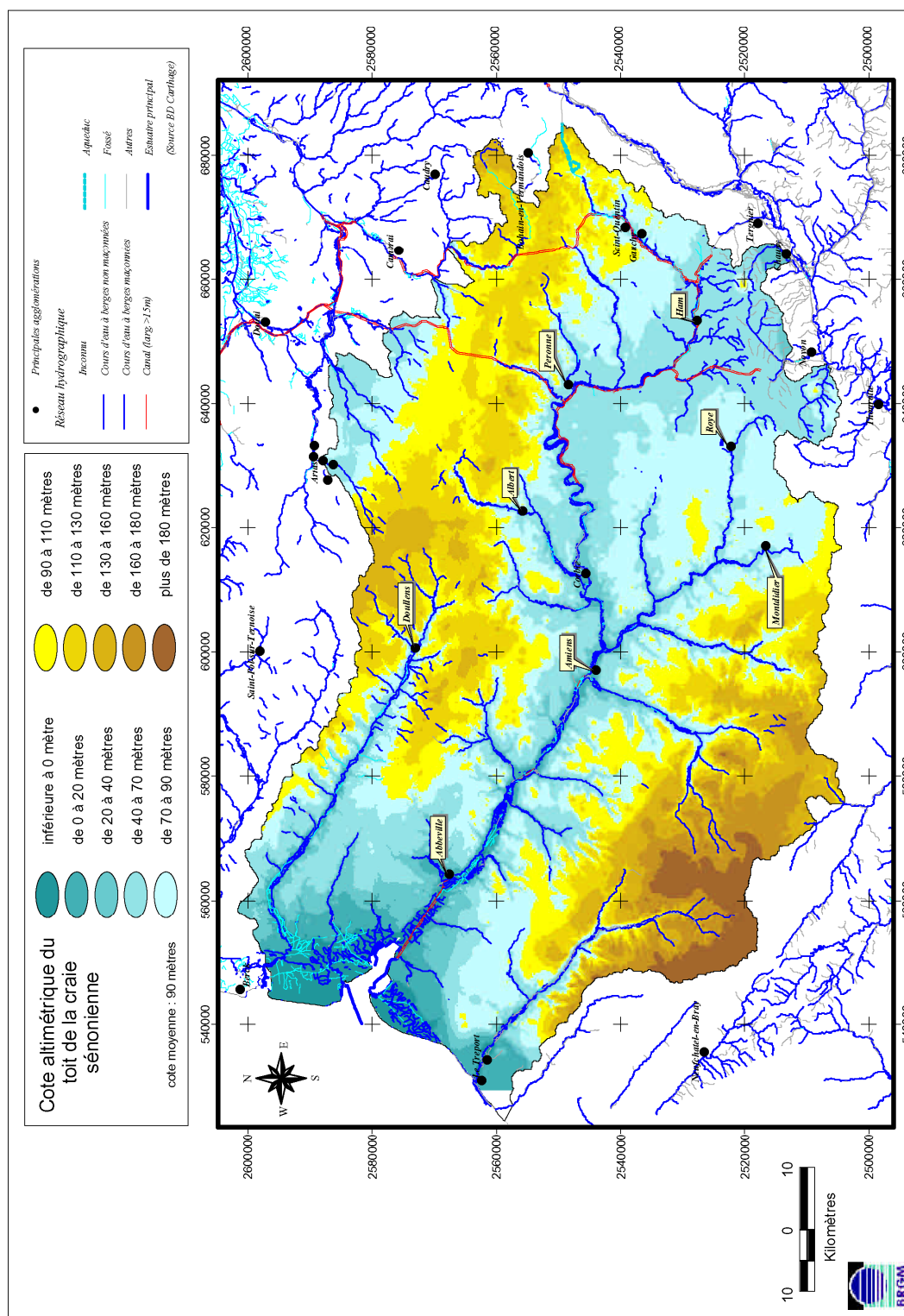


Fig. 4 - Cote altimétrique du toit de la craie sénonienne.

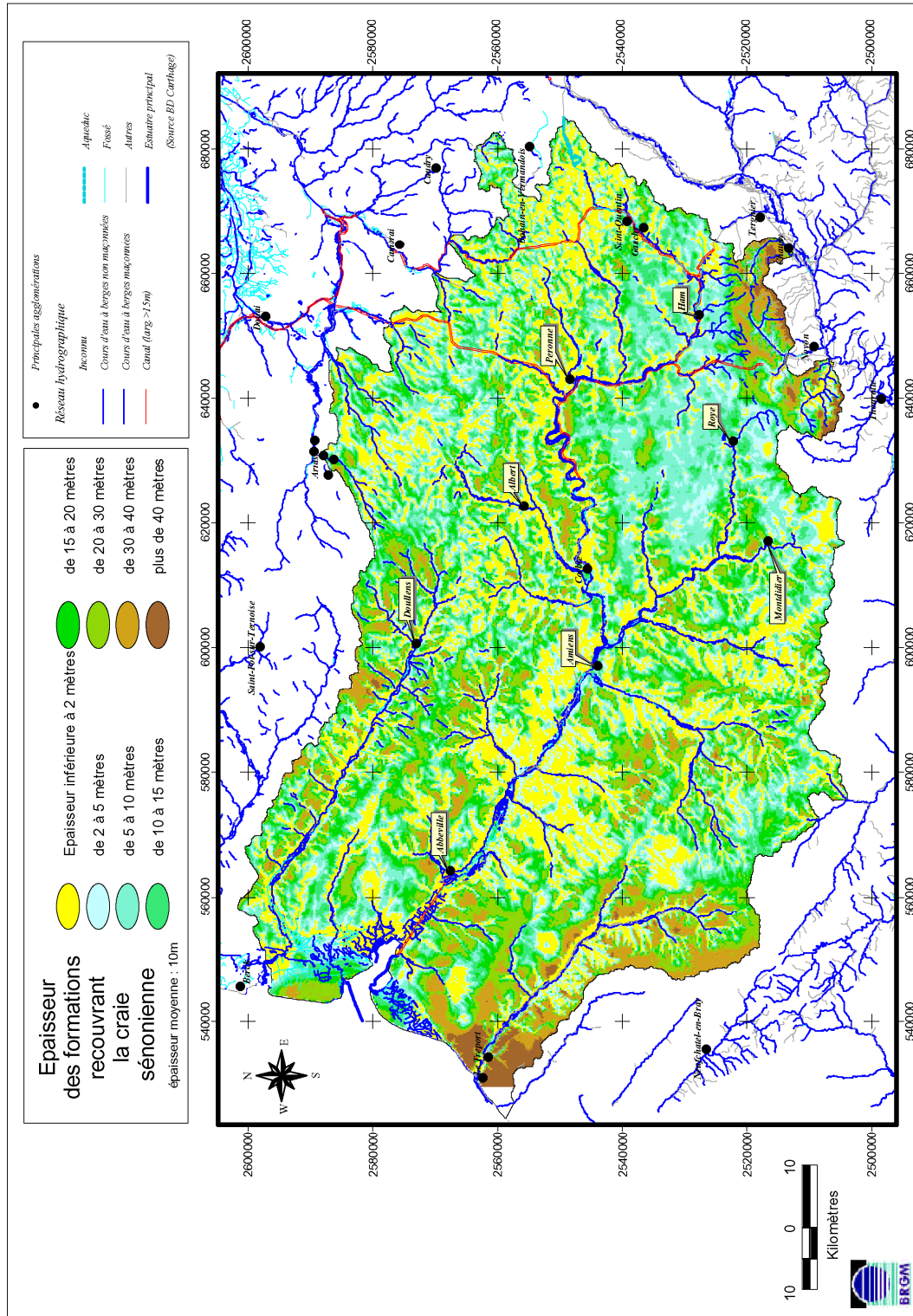


Fig. 5 - Épaisseur des formations recouvrant la craie sénonienne.

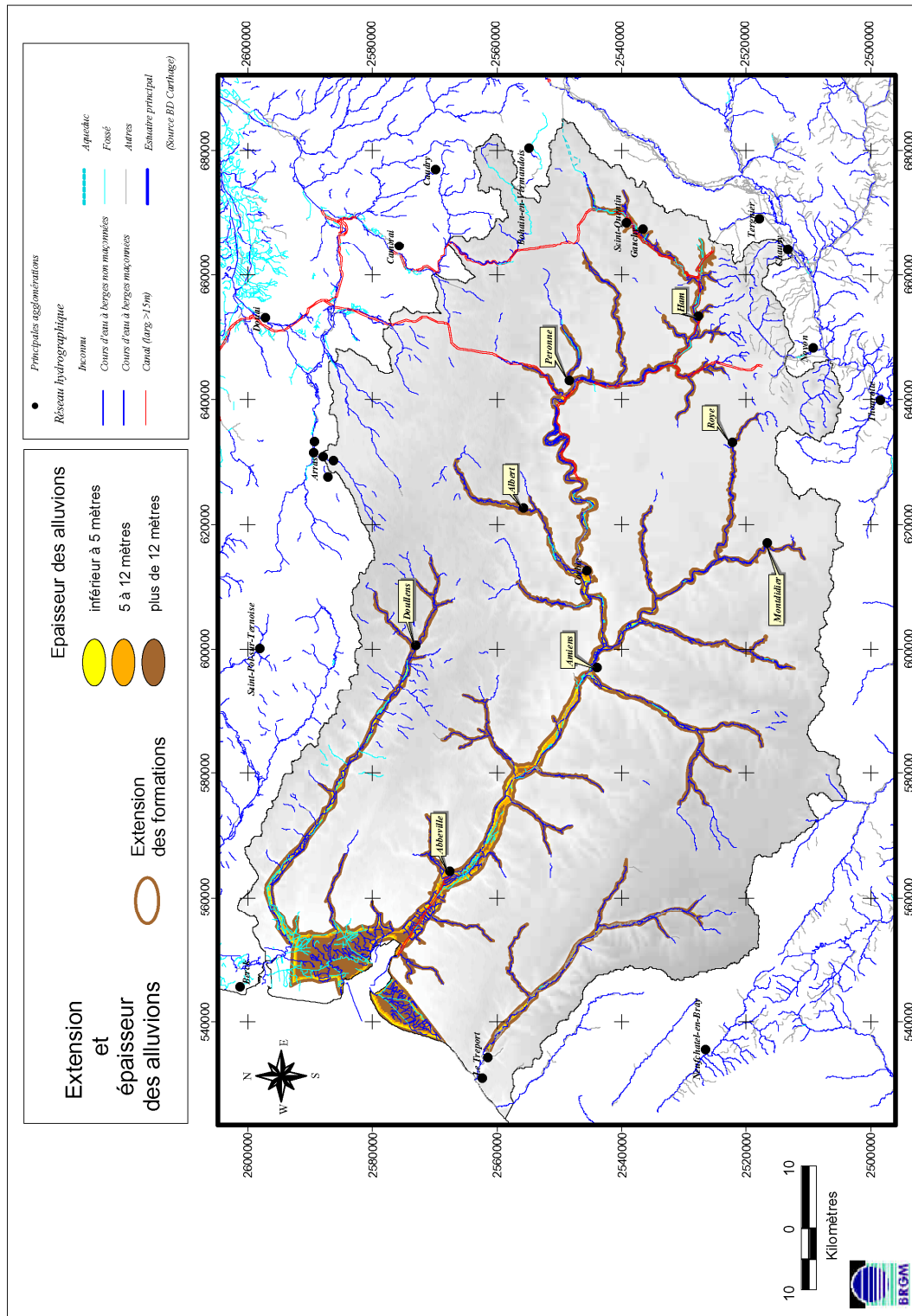


Fig. 6 - Extension et épaisseur des alluvions.

3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

- **L'aquifère principal, la nappe de la craie**

Au point de vue **stratigraphique**, l'aquifère principal est représenté par les craies perméables du Turonien supérieur et du Sénonien. Le Tertiaire apparaît au nord-est du secteur d'étude, recouvrant la craie en concordance. Dans la vallée de la Somme et certaines vallées de ses affluents, la craie est recouverte par les alluvions quaternaires. Ailleurs, ce sont les limons de plateaux qui masquent le substratum.

Le **mur théorique du réservoir** est constitué par les marnes et craies marneuses et argileuses du Turonien moyen (« Dièves bleues ») et inférieur (« Dièves vertes ») dont le coefficient de perméabilité ne dépasse guère 10^{-9} m/s. Son épaisseur totale est de l'ordre de 60 m.

Le **corps principal de l'aquifère** est constitué, de haut en bas, par la **craie blanche** de l'ex-Sénonien, contenant peu de silex, puis par la craie grise du Turonien supérieur, à gros silex cornus et bancs indurés situés au sommet de l'étage. L'**épaisseur moyenne de la couche crayeuse** du réservoir est de 60 m.

Le mur effectif du réservoir, en régime libre, ne correspond, en fait, que rarement au toit des marnes du Turonien moyen proprement dit. Il est plutôt défini par la zone où les fissures et les joints de stratification de la roche crayeuse se ferment en profondeur, induisant ainsi une diminution très sensible de sa perméabilité, tant verticale qu'horizontale. Ces fissures ouvertes se situent en général dans les 15 à 25 premiers mètres de la partie normalement saturée du réservoir, sauf à quelques exceptions près où on peut traverser, au cœur ou à la base de l'aquifère, des horizons très perméables (craies franches plus ou moins indurées) alternant avec des horizons très peu perméables. En pratique donc, seule la partie fissurée de la craie constitue, par la perméabilité ainsi dégagée, l'aquifère à proprement parlé. La craie sous-jacente, compacte constituant l'aquiclude¹.

Le **toit** est formé, tantôt par le sol, dans la partie libre de la nappe, par les faciès argileux du Landénien dans la partie nord-est, ou encore par les formations limoneuses des plateaux. L'épaisseur de la couche crayeuse est variable en fonction de la distance aux zones d'affleurement de l'aquifère.

L'**épaisseur de la couche alluviale**, quant à elle, va de 0 m, en bordure des affleurements, à 16 m. au centre de la vallée de la Somme, avec des valeurs inférieures à 10 m. dans les zones les plus étroites. Les formations de la couverture tertiaires et les formations limoneuses sont imperméables. Lorsqu'elles recouvrent l'aquifère crayeux, celui-ci passe d'un régime libre à un régime captif.

¹ Corps (couche, massif) de roches saturées, très faiblement conducteur d'eau souterraine, dont on ne peut extraire économiquement des quantités d'eau appréciables.

3.4. NUMERISATION ET DISCRETISATION DES DONNEES HYDRO- GEOLOGIQUES

La représentation spatiale des données relatives à l'hydrogéologie a été déduite de l'interprétation des cartes piézométriques antérieures et des données du suivi piézométrique disponibles.

3.4.1. Mur de l'aquifère

Le mur effectif du réservoir est défini par la zone où les fissures et les joints de stratification de la roche crayeuse se ferment en profondeur. L'observation des différentes coupes inventoriées, et les différents avis d'experts recueillis, convergent vers une estimation de cette profondeur de l'ordre de 25 m. Cette valeur est cependant contrôlée par la proximité des faciès très peu perméables du Turonien inférieur et moyen (les « dièves ») qui localement peuvent réduire cette épaisseur (fig. 7).

3.4.2. Toit de l'aquifère

Le toit de l'aquifère correspond au toit des formations du Sénonien.

3.4.3. L'épaisseur du recouvrement de la nappe en situation de moyennes eaux

De la carte piézométrique établie en situation moyenne, par comparaison avec le modèle numérique de terrain au pas de 50 m, on établit la carte de l'épaisseur moyenne du recouvrement de la nappe.

De manière systématique, les vallées humides principales montrent un recouvrement de la nappe très faible, parfois nul, ce qui confirme la faible capacité d'amortissement que présentent ces vallées face à un flux important venant d'un versant ou de la surface. On observe une dissemblance, nette entre le plateau du Santerre et le reste du bassin.

Le plateau présente un recouvrement dans la tranche 10 - 30 m qui lui donne à la fois une capacité d'absorption et d'amortissement assez importante, mais en cas de saturation de la zone non saturée (ou de remontée de nappe jusqu'à l'affleurement) lui donne une propension à « déborder » en premier si, comme on peut le penser, la porosité efficace de l'aquifère est comparable à ce qu'elle est ailleurs.

En revanche, on observe des recouvrements bien plus importants en rive droite et en rive gauche de la Somme en moyenne altitude, avec des conclusions conformes (fig. 8).

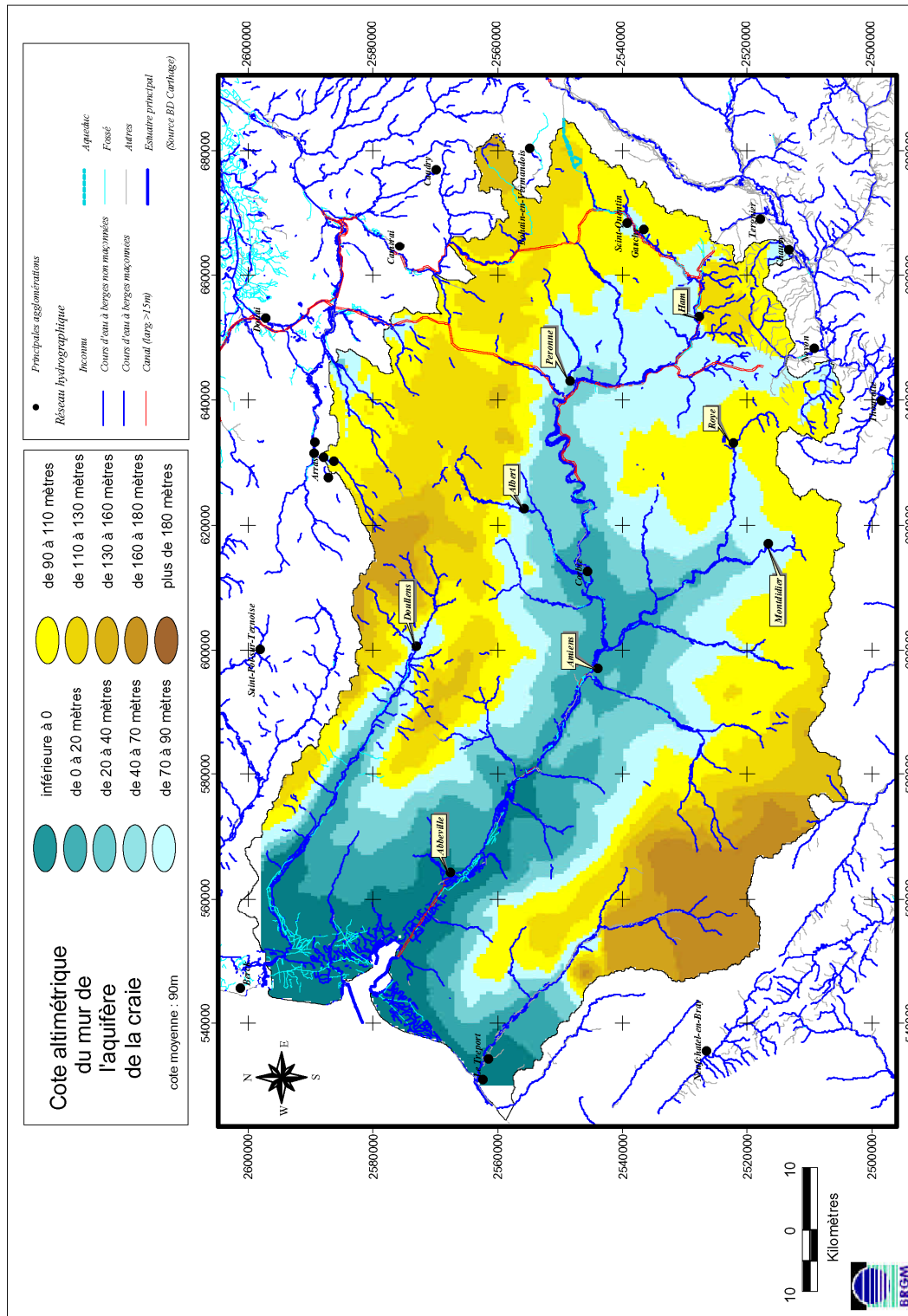


Fig. 7 - Cote altimétrique du mur de l'aquifère de la craie.

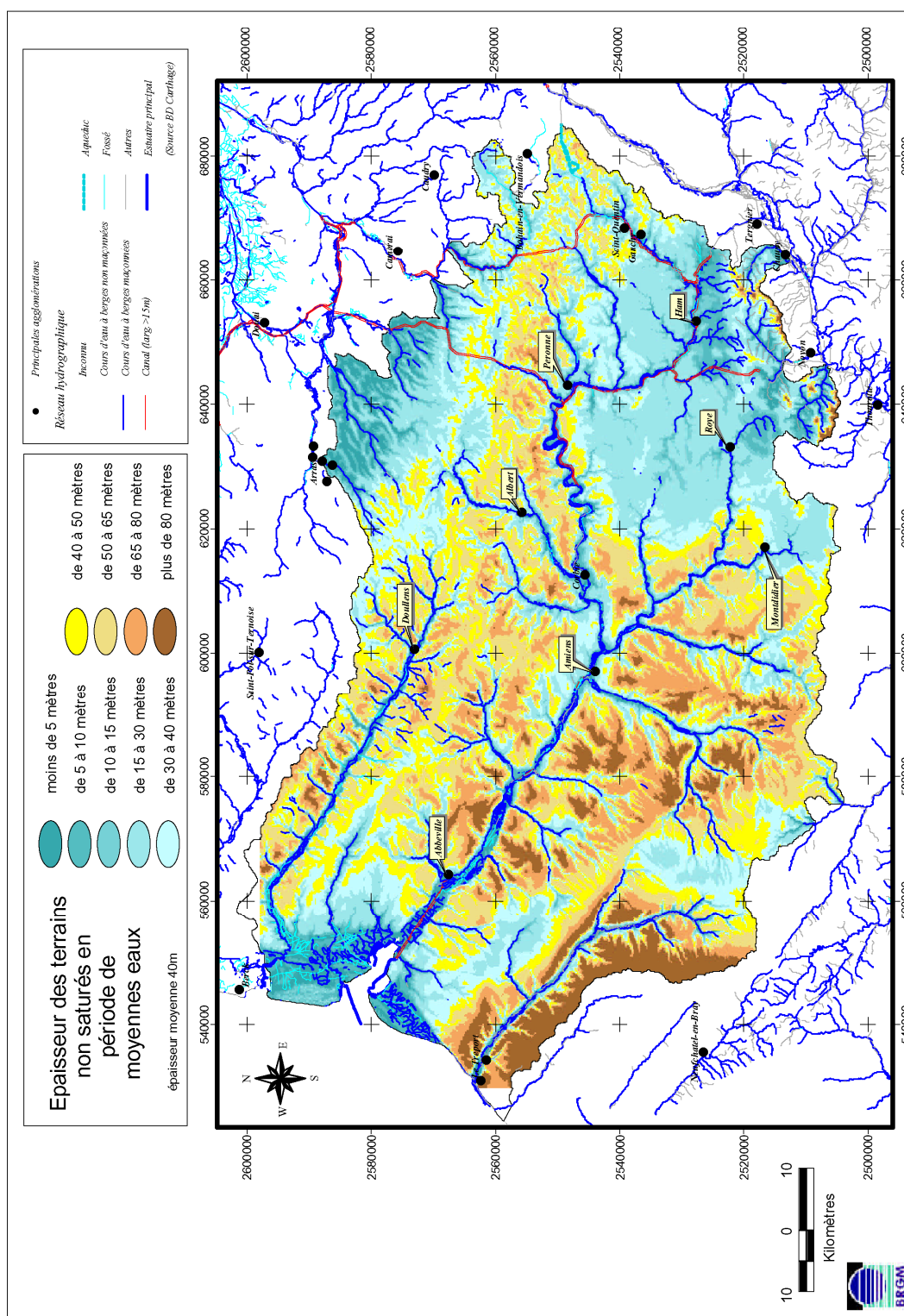


Fig. 8 - Épaisseur des terrains non saturés en période de moyennes eaux

3.5. FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME AQUIFÈRE

La superposition de bassins versants hydrographiques et hydrogéologiques témoigne d'une communication étroite entre l'ensemble des cours d'eau de l'aire d'étude et la nappe de la craie (fig. 9).

La nappe contribue au débit de la Somme, notamment en période de faible alimentation pluviale, dans une proportion de l'ordre de 80 % et de 70 % pour celui de la Selle.

Selon les saisons, les échanges entre la rivière et la nappe varient (fig. 10). En période de déficit pluviométrique ou en saison sèche, l'alimentation de la rivière (basses eaux) par drainage de la nappe est d'autant plus grand que le niveau de la rivière est bas.

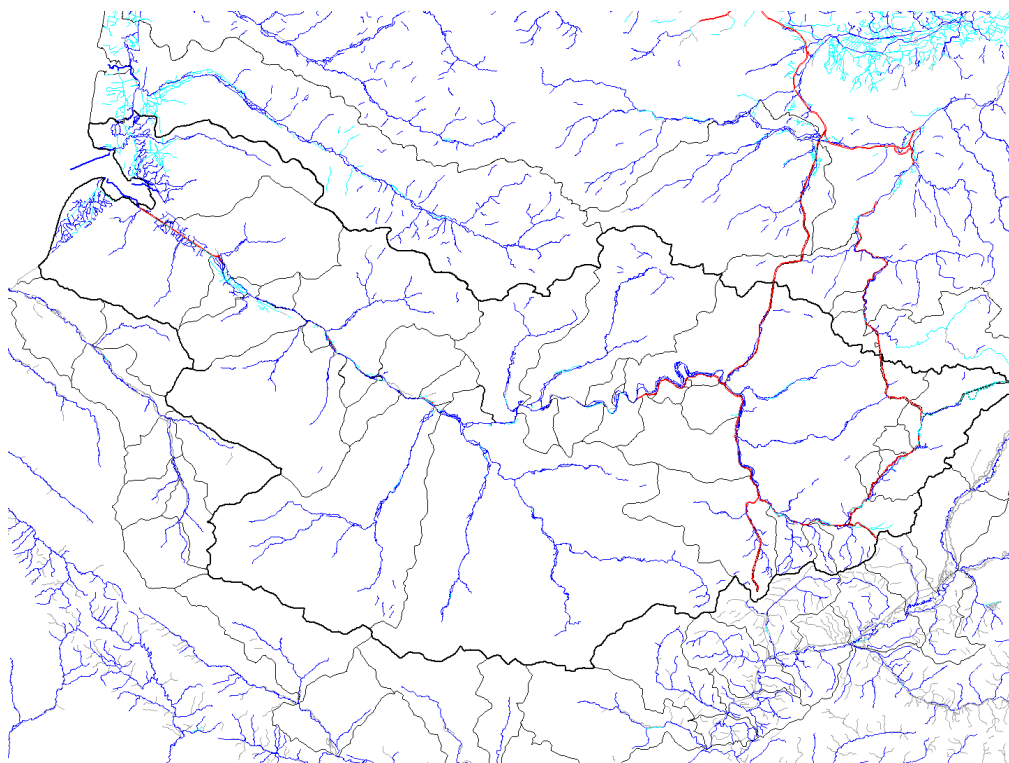


Fig. 9 - Bassins versants hydrologiques de la Somme.

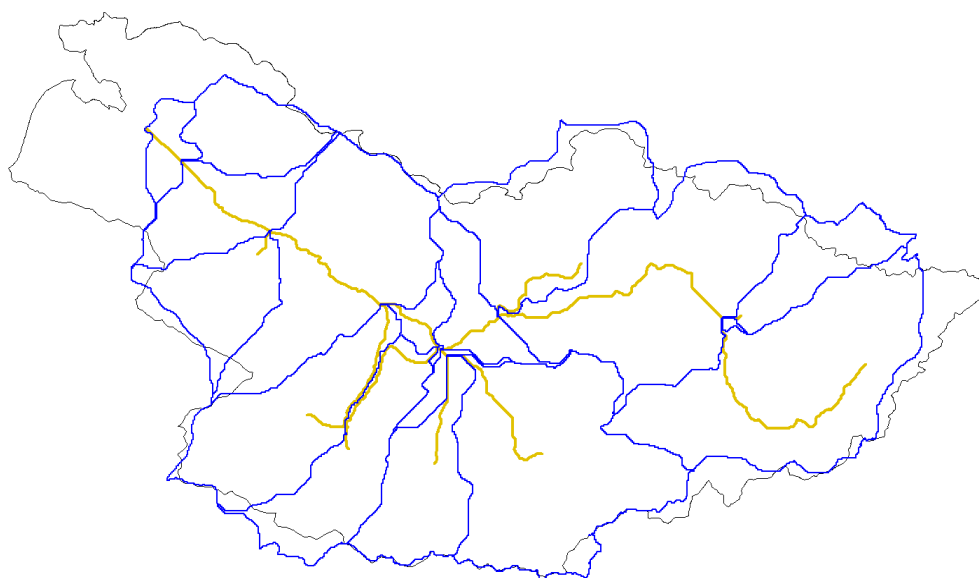


Fig. 10 - Bassins versants souterrains déduits des moyennes eaux.

4. Données disponibles et sources d'information

Les données hydroclimatiques sont traitées au chapitre 7.2.

4.1. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les paramètres hydrauliques comprennent les grandeurs suivantes : perméabilité, transmissivité, débit spécifique et coefficient d'emmagasinement. Les données disponibles en banque des données du sous-sol ont été extraites et ont été complétées par une étude bibliographique sur le bassin de la Somme. Cette étude a permis d'identifier les rapports et documents contenant des données. Ce sont principalement :

- 55 rapports de pompage d'essai dans lesquels ont été extraites des valeurs de transmissivité ou de perméabilité, ainsi que quelques valeurs du coefficient d'emmagasinement ;
- un recueil de valeurs de débits spécifiques. Les débits spécifiques sont connus pratiquement pour tous les forages et permettent de compléter les valeurs de transmissivité disponibles (fig. 11 à 13).

4.2. RESEAUX HYDROGRAPHIQUES ET SOURCES

Les informations contenues dans ce paragraphe proviennent essentiellement de l'atlas hydrogéologique de la Somme.

Le bassin versant de la Somme est marqué par l'abondance de vallées sèches. La proportion de vallées humides est très faible par rapport au nombre de vallées sèches. Seules les vallées principales de la Somme et de ses principaux affluents sont occupées par un cours d'eau permanent.

La nappe de la craie s'écoule vers les vallées principales qui constituent son niveau de base. Les cours d'eau font fonction de drains et sont alimentés en permanence par la nappe. Les vallons et les vallées sèches se comportent dans la majorité des cas comme des drains, cela correspond à l'écoulement préférentiel provoqué par une fissuration plus développée. Dans la vallée de la Somme la nappe est en charge sous les alluvions et les tourbes, même en période de basses eaux.

Ce phénomène apparaît aussi sur des affluents de la Somme :

- l'Avre (jusqu'à Roye) ;
- l'Hallue (jusqu'à Vadencourt) ;
- l'Ancre (jusqu'à Albert) ;
- l'Ingon (jusqu'à Fonches et/ou Fonchette) ;

- la Noye (jusqu'à Breteuil) ;
- la Selle (jusqu'à Conty) ;
- les trois Doms (jusqu'à Montdidier) ;
- la Nièvre (jusqu'à Canaples).

207 sources géoréférencées sont reconnues et localisées sur la figure 14. La quasi-totalité des sources sont des sources de dépression ou de thalweg. Elles apparaissent dans les vallées lorsque la surface de la nappe recoupe la topographie. Elles se répartissent en trois catégories :

- les sources de têtes de vallées humides qui marquent le départ des cours d'eau pérennes. En fonction de la hauteur de la nappe, elles peuvent se déplacer de plusieurs kilomètres entre leur position aval et amont ;
- les sources de débordement : elles naissent au pied des vallées humides au contact de la craie et des alluvions, ainsi qu'au pied des falaises de la plaine maritime ;
- les sources artésiennes : elles émergent dans les plaines alluviales au travers des niveaux argilo-tourbeux des dépôts fluviatiles.

4.3. PRELEVEMENTS

Les prélèvements dans les eaux souterraines sont disponibles par usage et par volume annuel, pour les années 1995 à 1999, sur le département de la Somme.

L'implantation des forages, correspondant à l'année 1999, est indiquée sur la figure 15.

Les prélèvements dans les eaux de surface pour un usage industriel sont limités à une douzaine de points.

4.4. STATIONS D'EPURATION ET DE TRAITEMENTS DES EAUX USEES

73 stations de traitement et d'épuration des eaux sont connues dans le département de la Somme. Elles sont localisées sur la figure 16.

4.5. BILAN DES DONNEES DISPONIBLES

L'ensemble des données disponibles est présenté dans le tableau 1.

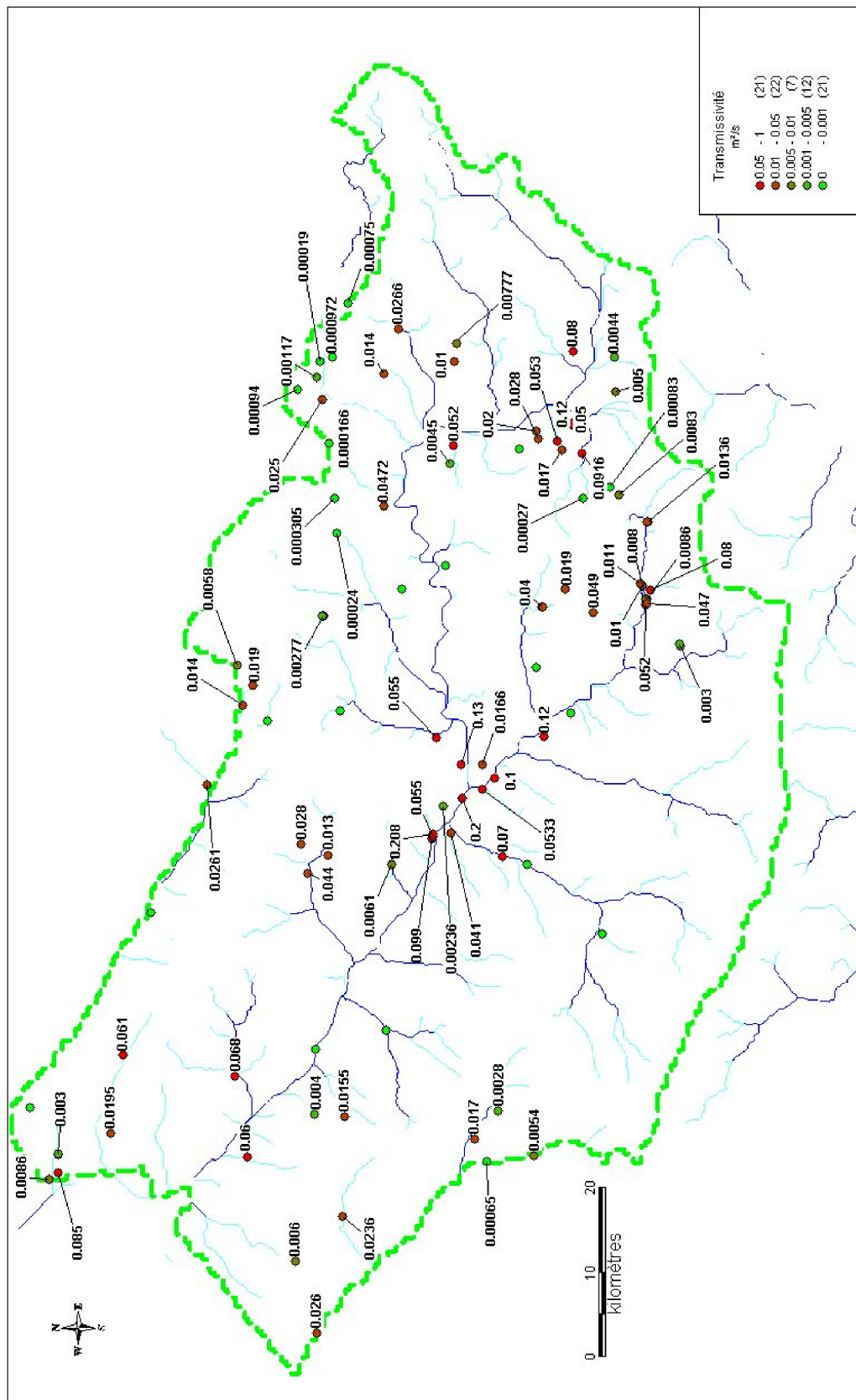


Fig. 11 - Carte de distribution des valeurs connues des transmissivités.

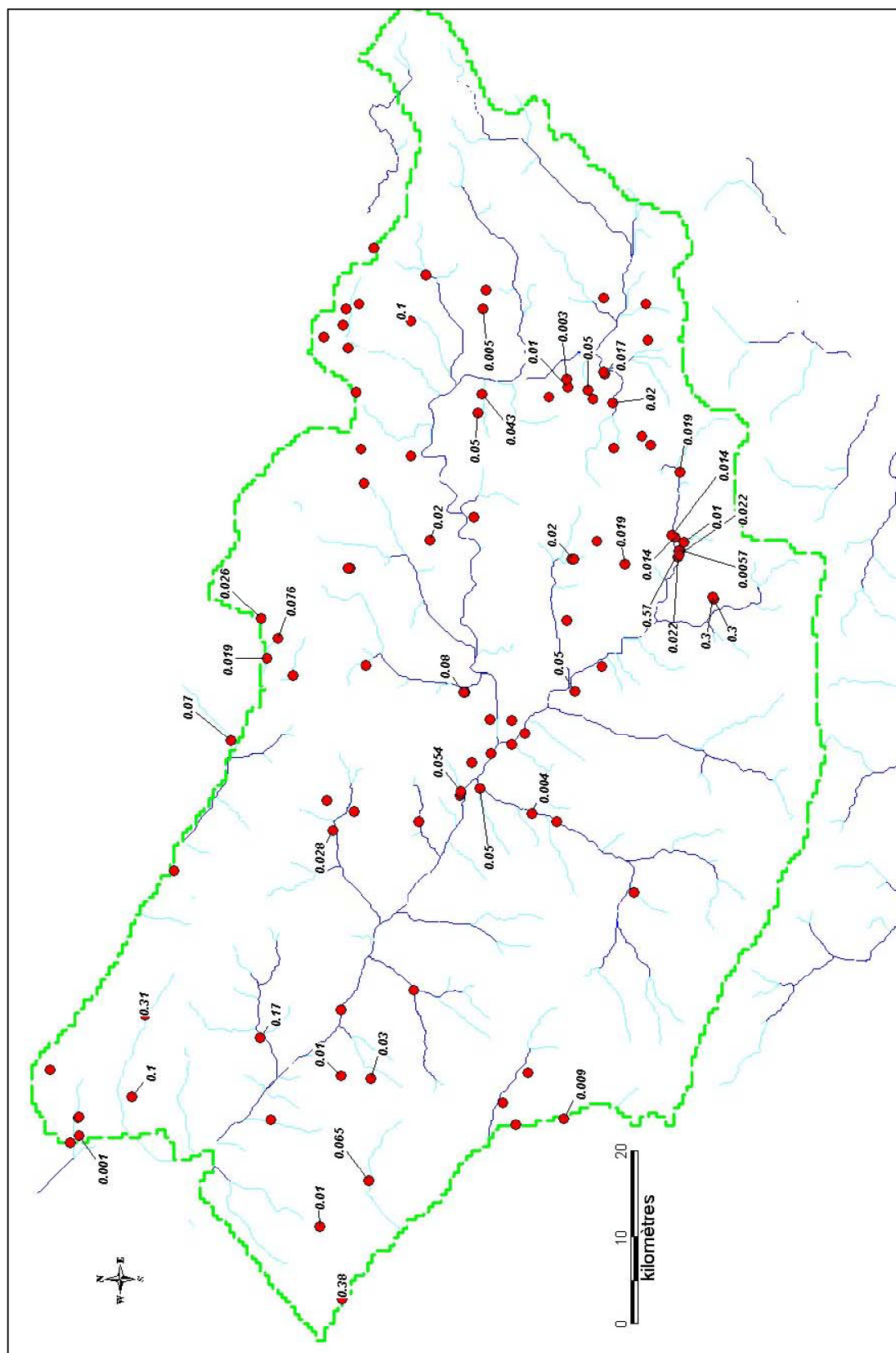


Fig. 12 - Carte de distribution des valeurs connues du coefficient d'emménagement.

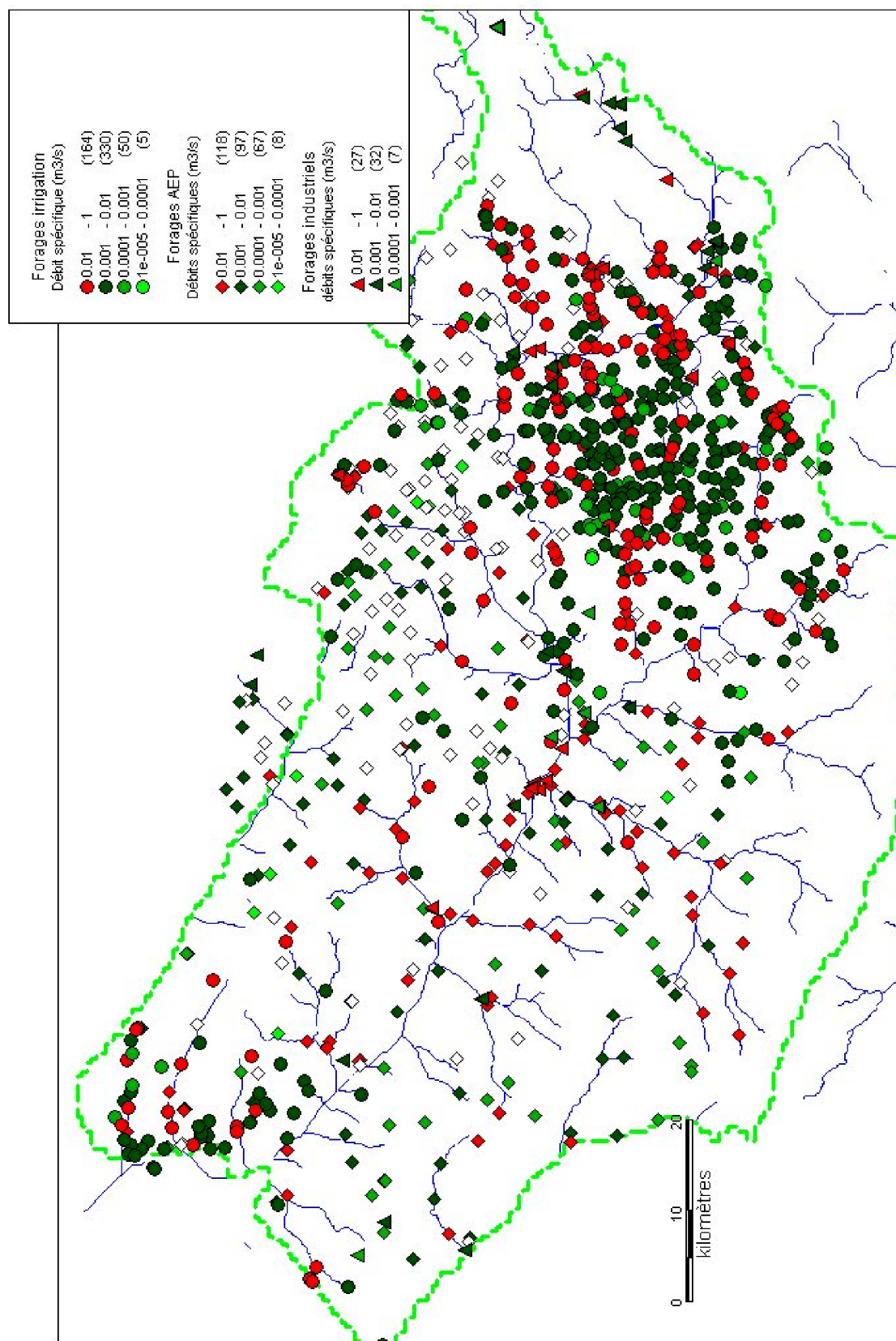


Fig. 13 - Carte de distribution des valeurs calculées de débits spécifiques.

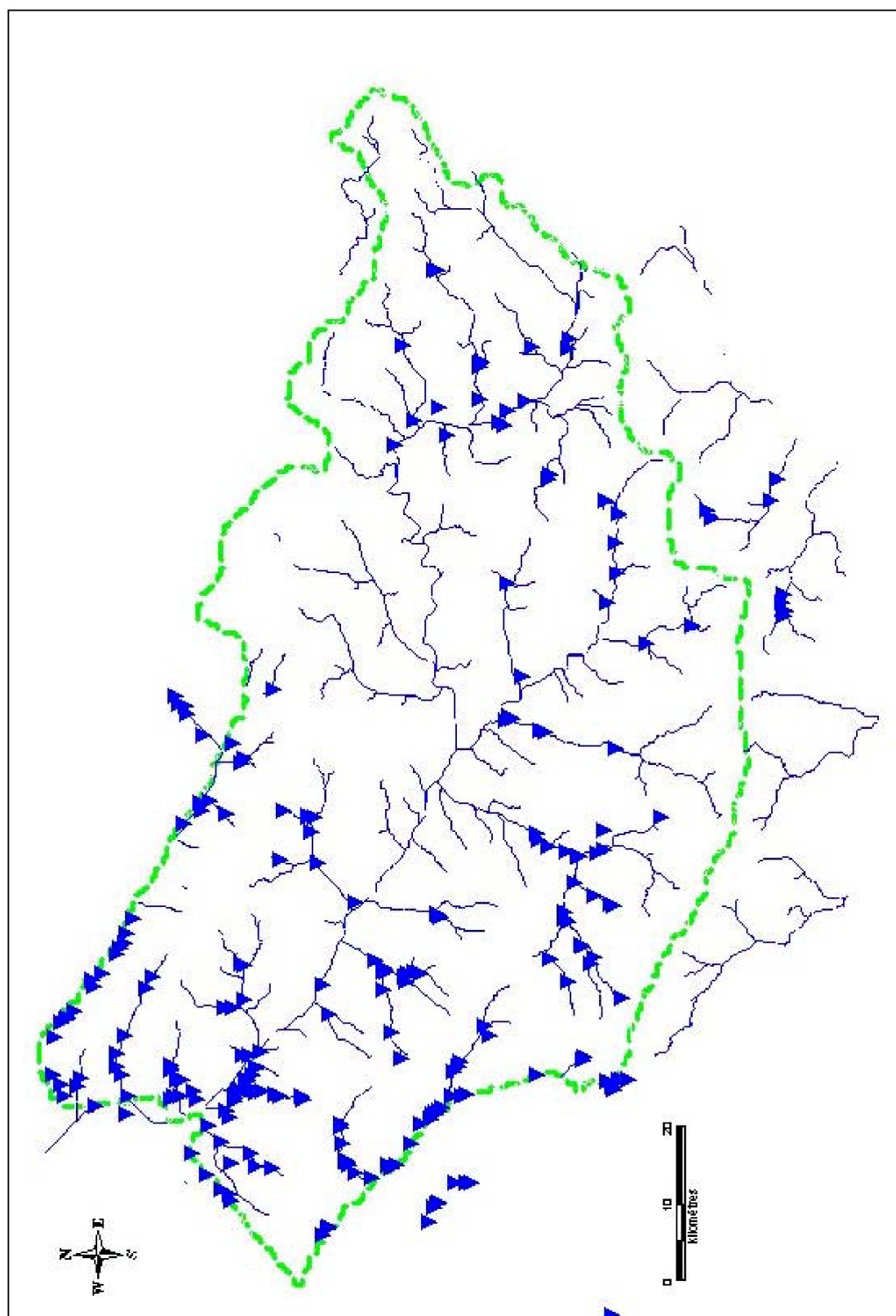


Fig. 14 - Carte de position des sources.

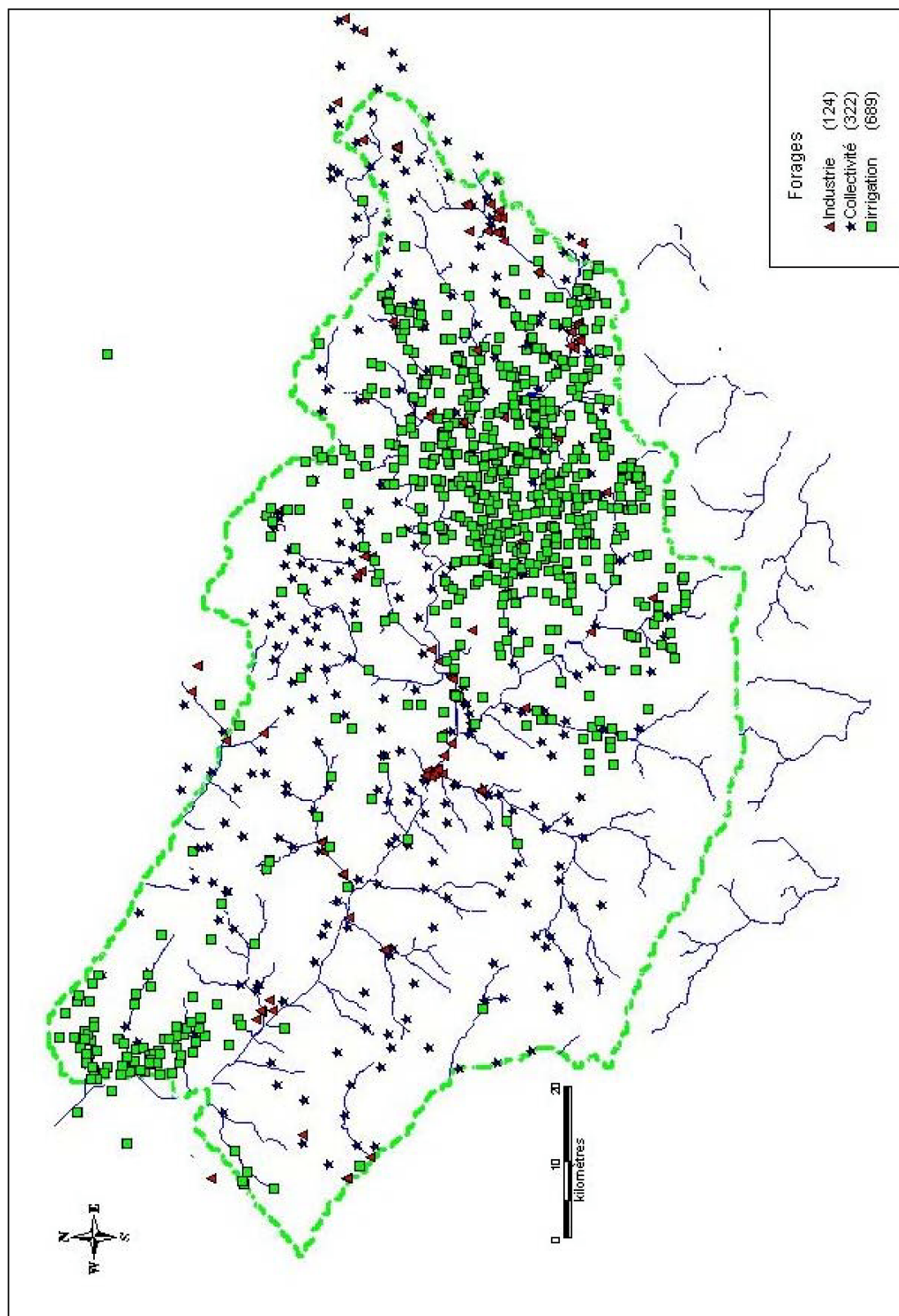


Fig. 15 - Carte de localisation des forages.

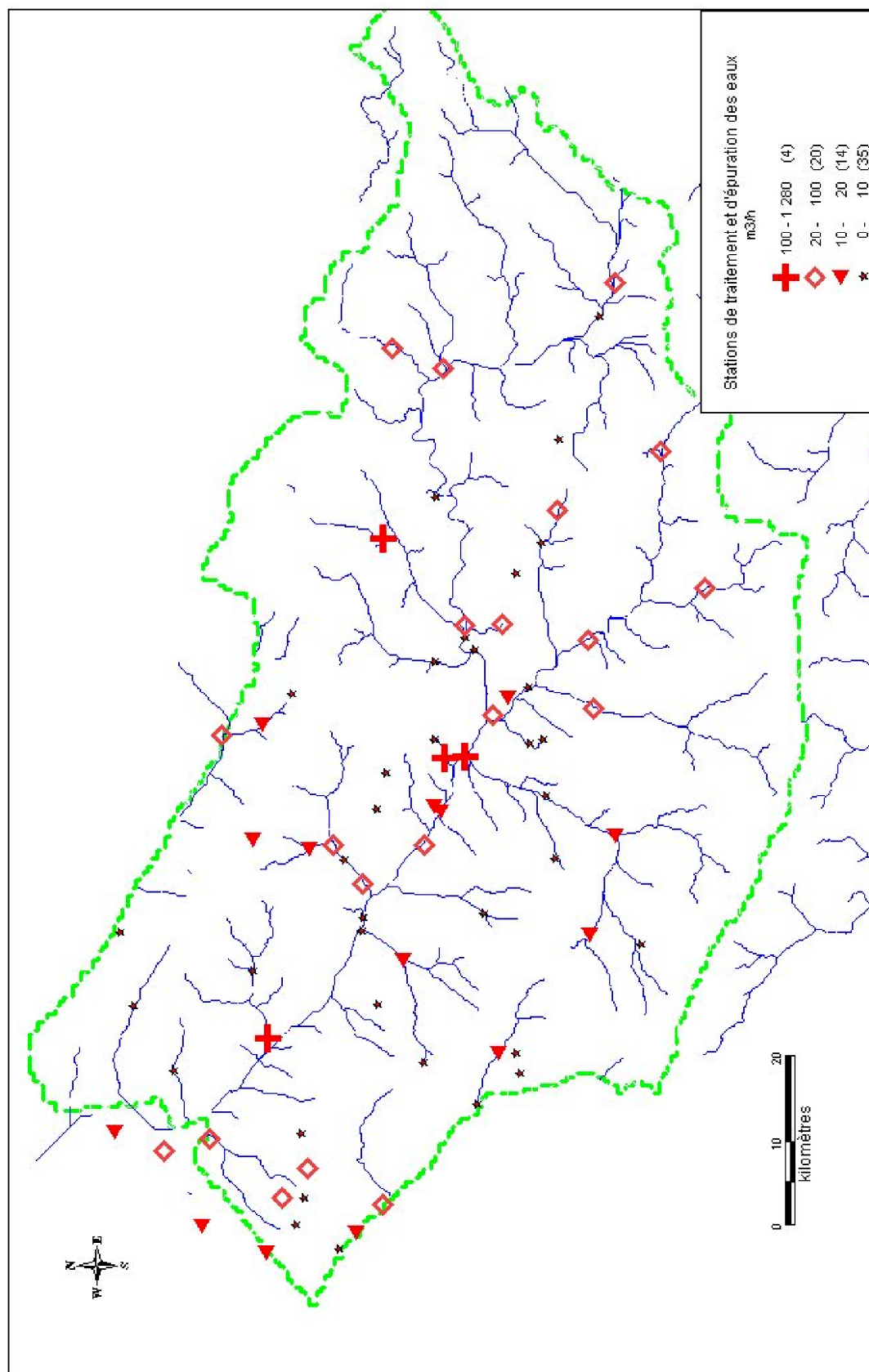


Fig. 16 - Position des stations d'épuration et de traitement des eaux.

	Données recherchées	Obtenues	Date d'obtention ou prévue d'obtention	Origine de l'information	Remarques
Paramètres hydrauliques	débits spécifiques	O	18-09-01	Inventaire Parc hydrogéologique, Antéa	3400 valeurs environ
	T, K, S	O	28-09-01	Rapports pompages d'essai, BRGM	55 rapports analysés
Sources	N° BSS, X, Y, Z, Débit	O	18-09-01	Inventaire parc hydrogéologique, Antéa	200 valeurs environ
Pompages dans les départements de la Somme et de l'Aisne	Prélèvements eaux de surface 1995-1999	O	28-09-01	AEAP	
	AEP, AEI, IRR1 1995-1999	O	28-09-01	AEAP	
	IRRI 2000	N	9-10-01	AEAP	
Pompage dans le département de l'Oise	AEP, AEI, IRR1 1995-1999	N		AESN	oui sur l'Aisne
	AEP, AEI 1997	O	3-10-01	AESN	Par communes
	IRRI 1999 et 2000	O	9-10-01	DDAF	
	Répartition mensuelle des prélèvements IRR1 02, 60 et 80	O	1-10-01	BRGM	OK
Rejets	STEP 80 et 02	O	8-10-01	AEAP	De 1995 à 2000, Récepteur = lagunes ou stations d'épuration
	STEP 60	O	26-09-01	AESN	Localisation approximative (DDAF, SATESE)
	Bassins de stockage ou d'infiltration industriels	O	12-10-01	7 industriels contactés	OK
Eaux souterraines	Chroniques piézométriques	O	Continu	BRGM	30 chroniques (plus ou moins complètes) sur 1995-2000, 63 chroniques partielles.

Tabl. 1 - Récapitulatif des données disponibles.

	Données recherchées	Obtenues	Date d'obtention ou prévue d'obtention	Origine de l'information	Remarques
Eaux de surface	Débits en 6 stations Étoile, Moreuil, Saint-Aurin, Plachy, Bavelincourt,	O	21-09-01	DIREN Picardie	
	Niveaux d'eau sur 6 stations, de 1995 à août 2001 Étoile, Moreuil, Saint-Aurin, Plachy, Bavelincourt, Peronne	O	21-11-01	DIREN Picardie	Péronne : mesures en amont du siphon. En attente des mesures en aval (moins influencées).
	Niveaux d'eau sur les stations de Hangest/Somme, Abbeville, de 1995 à septembre 2001	O	9-10-01	DIREN Nord-Pas-de-Calais	
	Niveau Authie à Dompierre de 1995 à octobre 2001	O	21-11-01	DIREN Nord-Pas-de-Calais	
	Atlas des zones inondables 2000	O	26-09-01	DDE	Reçu
	Schéma du canal de Peronne à Saint-Valery	O	6-11-01	DDE, Subd. Navigation	
	Coupes lithologiques du canal de la Somme	O	9-11-01	DDE, Subd. Navigation	
	Niveaux d'eau du canal maritime	O	5-10-01	DDE, Subd. Navigation	
	Profils en long et en travers	O	5-10-01	DDE, Subd. Navigation	Profil en long disponible
	Coupe géologique le long du canal	O	2-11-01	DDE, Subd. Navigation	
	Niveau Bresle à la station du Marais (1994 à septembre 2001)	O	12-11-01	DIREN Haute-Normandie	
	Débit Bresle à la station de Longroy de novembre 1994 à octobre 2001	O	12-11-01	DIREN Haute-Normandie	
	Niveau Canal entre Sormant et Abbeville de 2000 à septembre 2001	O	29-10-01	DDE, Subdivision Navigation	18 points écluses
	Bulletins de cellule de crise	O	5-10-01	DDE, Subdivision Navigation	Reçu

Tabl. 1 - Récapitulatif des données disponibles (suite).

5. Limites du domaine de modélisation

Les limites du bassin versant de la Somme ont été déterminées à partir du contexte naturel. Elles peuvent être de deux types : des crêtes piézométriques (limites à flux nul), ou des rivières limitrophes (limites à potentiel imposé).

Les limites se répartissent ainsi :

- En tête de bassin versant, les crêtes sont perpendiculaires aux cours d'eau. Il est préférable de prendre une limite à flux nul dans ce cas, avec des crêtes topographiques et piézométriques proches. Des limites fixées sur les cours d'eau des bassins versants contiguës seraient plus complexes et plus imprécises.
- Le long de la Bresle et l'Authie : ces deux cours d'eau sont proches et parallèles au bassin versant de la Somme. Le choix de les représenter en potentiel imposé présente l'avantage d'utiliser une limite hydraulique bien identifiée, et proche de la limite du bassin versant de surface de la Somme.
- Limites côté mer :
 - au nord de l'embouchure de la Somme : des sources sont indiquées sur la carte de l'atlas hydrogéologique. Cette limite a été mise en potentiel imposé (ou maille à débordement) à la cote des sources ;
 - au sud de l'embouchure de la Somme : des sources existent également, mais il est possible que le bassin versant de ces sources soit peu étendu avec une éventuelle crête piézométrique sous les premiers reliefs parallèles au rivage. En l'absence d'éléments de confirmation plus précis, le même schéma qu'au nord de l'embouchure a été appliqué.

En résumé, les limites sont à potentiel imposé le long de l'Authie, de la Bresle et côté mer, et en flux nul ailleurs.

5.1. TRAITEMENT PRELIMINAIRE DES DONNEES

5.1.1. Principe de la distribution initiale des transmissivités

L'extrapolation à la zone modélisée des valeurs connues ponctuellement sur différents ouvrages repose sur deux observations :

- **Les vallées (sèches et humides) sont des axes de plus forte perméabilité comme l'indiquent :**
 - les valeurs de transmissivité interprétées à partir des pompages d'essai ;
 - les valeurs de débits spécifiques, relativement denses sur la zone d'étude ;
 - la densité de forages plus forte dans les vallées ;

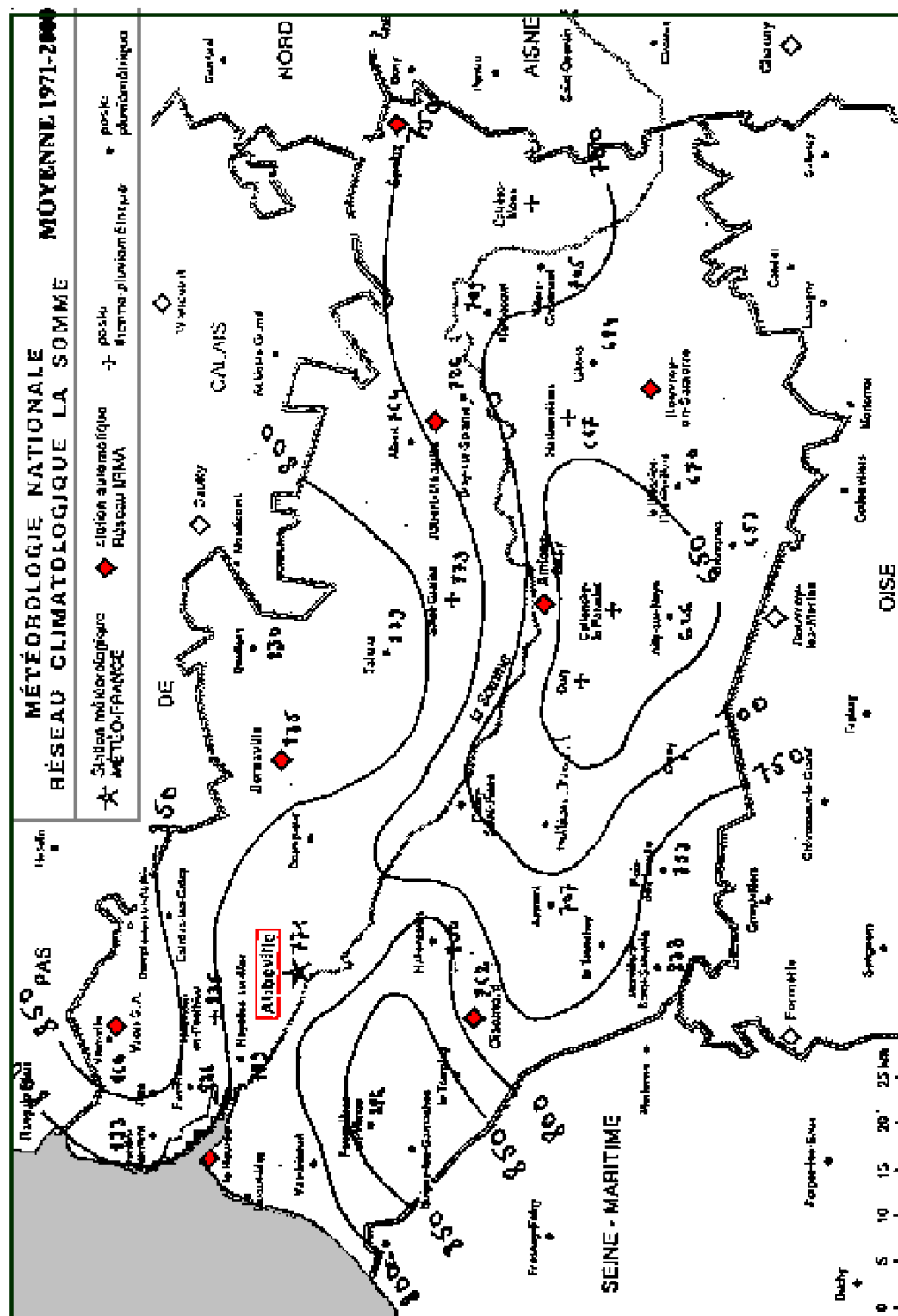


Fig. 17 - Carte des isohyètes de Météo France.

- les cartes piézométriques avec des axes de drainage bien marqués ;
- la connaissance géologique (fissuration développée dans les vallées).
- **La transmissivité diminue en fonction de la hauteur de la zone non saturée au-dessus de l'aquifère.** La craie en zone saturée, au-delà d'une certaine pression imposée par les terrains sus-jacents, se tasse et devient moins perméable. Cette observation a servi pour estimer la transmissivité sur les plateaux où moins d'information est disponible : le nombre de forages y est moindre d'ailleurs, en raison de la productivité insuffisante de l'aquifère.

5.1.2. Distribution des paramètres hydriques et hydrodynamiques

a) Influence de la pluviométrie

La carte des isohyètes (fig. 17) permet d'apprécier la variabilité spatiale du facteur principal à l'origine de la recharge des nappes.

La carte des zones de recharges (fig. 18) en est la traduction en termes d'apports directs à la nappe.

b) Influence de l'état d'occupation des sols

Quatre facteurs (en plus du facteur climatologique) sont susceptibles d'influencer les valeurs d'apport en eau à la nappe. En première approche, ces facteurs sont nettement moins déterminants que les précipitations atmosphériques et ont été négligés lors de cette première phase. Pour mémoire, ce sont :

- **Les formations de couverture** : parmi les formations de couverture présentes sur le bassin de la Somme, les formations du Sparnacien et du Thanétien apparaissent comme moins perméables que les autres. Le Sparnacien est constitué d'argiles ligniteuses (e3) qui ont pour effet de limiter l'infiltration verticale et de favoriser le ruissellement. Les sables de Bracheux du Thanétien ont une base argileuse qui représente souvent le substratum de petits aquifères perchés. Le détournement de l'infiltration au profit d'un écoulement en périphérie de ces formations est favorisé. Les formations proches recevant plus d'eau, devraient participer plus intensément à l'alimentation des aquifères. Cet aspect est limité, les formations du Sparnacien et du Thanétien couvrant une faible surface en limite sud et sud-est du bassin.
- **Les zones boisées** : les sols des zones boisées ont une RFU² plus importante que sur les plateaux. On considère que la RFU sur les plateaux est de l'ordre de 100 mm tandis qu'elle est plutôt de l'ordre de 200 mm dans les bois. La présence d'une RFU plus élevée équivaut à une zone tampon qui régule et diminue les apports à la nappe.

² RFU : réserve facilement utilisable. Cette expression est consacrée à la désignation du stock d'eau que le sol peut et doit accumuler, avant que ne se produise une infiltration vers la nappe.

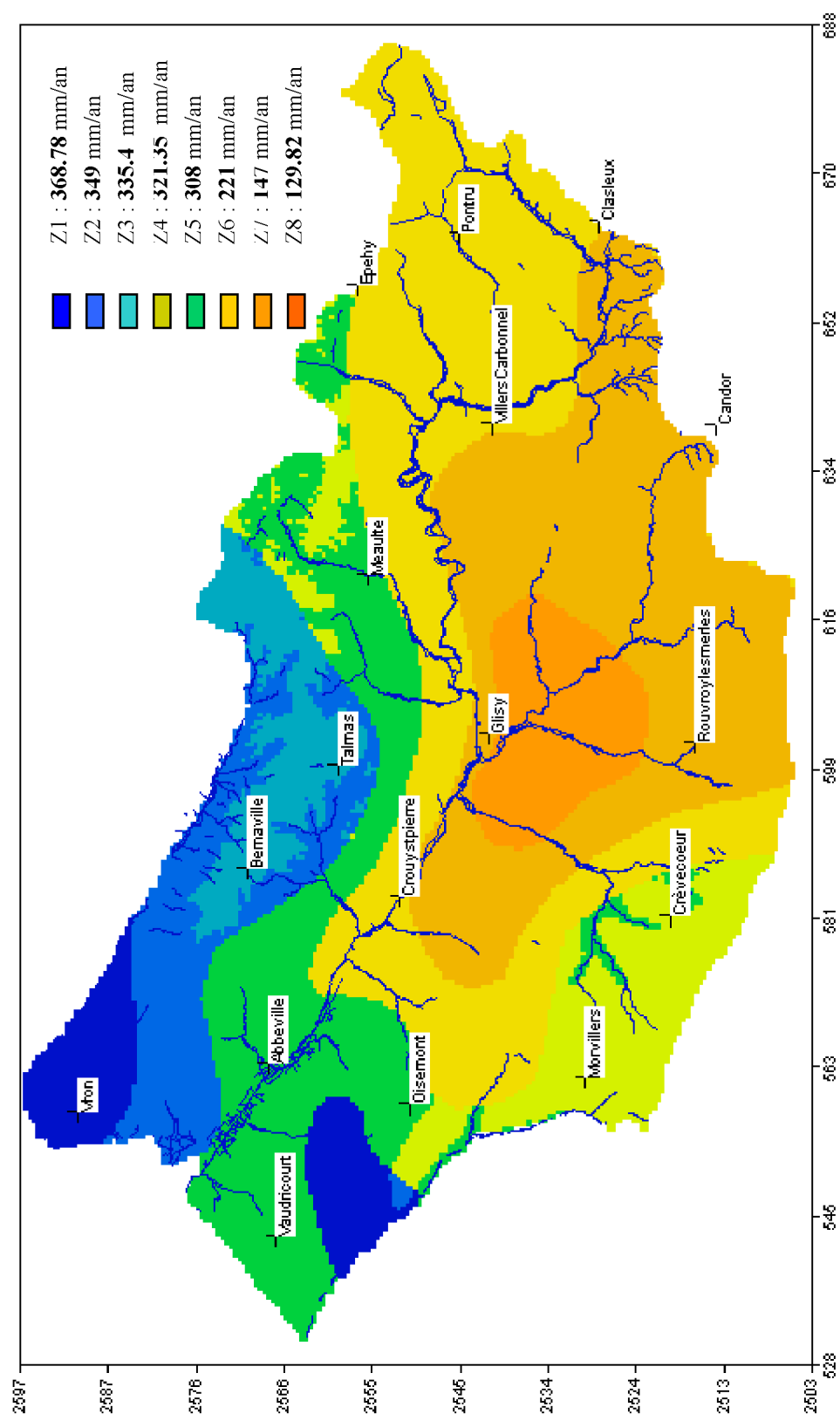


Fig. 18 - Zones de recharge et valeurs par zone.

- **Les plaines alluviales** : la nappe dans les formations alluviales est généralement captive sous des limons et des tourbes. La nappe peut y être en pression. Les apports à la nappe à partir des précipitations sont faibles dans les vallées, voire nulles en périodes de très hautes eaux.
- **Les zones urbaines** : de par leur imperméabilisation, les zones urbaines contribuent peu à l'alimentation des nappes (observation à confronter avec les pertes de réseaux qui jouent en sens inverse).

c) Prélèvements

Les valeurs numériques des prélèvements dans les eaux souterraines sont disponibles par usage et par volume annuel. La répartition par pas de temps de 30 jours a été calculée avec les hypothèses suivantes :

- **Irrigation** : l'irrigation est concentrée sur les trois mois d'été avec un maximum en juillet. La répartition suivante a été adoptée :
 - 25 % du total en juin ;
 - 50 % du total en juillet ;
 - 25 % du total en août.
- **AEP et industrie** : répartition homogène tout au long de l'année.
- **Années 2000 et 2001** : on ne dispose pas sur les deux années simulées des valeurs de prélèvements. Aussi, il a été pris pour hypothèse que les prélèvements AEP et industrie restaient inchangés par rapport à 1999 ; les prélèvements agricoles ont été estimés en comparant la pluviométrie des mois d'irrigation en 2000 et 2001 avec les années précédentes. Les valeurs correspondant aux pluviométries les plus proches ont été conservées.

En régime permanent, des simulations ont été réalisées avec les prélèvements hors irrigation et avec irrigation de l'année 1995.

d) Distribution spatiale des perméabilités et transmissivités

Deux étapes ont conduit à une zonation de la perméabilité sur la zone modélisée : dans un premier temps a été établie la répartition des valeurs de transmissivité (T), puis celle de la perméabilité (K) à partir de la distribution spatiale de l'épaisseur de la nappe (h) : $K = T/h$.

Les axes de vallées et les zones limitrophes ont été numérisées. Ces zones ont ensuite été subdivisées en secteurs homogènes au vu des valeurs de transmissivité.

Les épaisseurs de la zone non saturée ont été calculées par différence entre la topographie (modèle numérique de terrain au pas de 50 m) et la surface piézométrique

(restituée à partir des données de 1995 complétées par des données de la BSS). Ces valeurs ont été ensuite regroupées dans les classes suivantes :

- épaisseur de la zone non saturée inférieure à 20 m ;
- épaisseur de la zone non saturée comprise entre 20 et 40 m ;
- épaisseur de la zone non saturée comprise entre 40 et 60 m ;
- épaisseur de la zone non saturée supérieure à 60 m.

Une sélection des forages à l'intérieur de ces quatre zones a été opérée et a permis de calculer une valeur moyenne du débit spécifique ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) par zone :

• **Zone non saturée inférieure à 20 m**

Utilisation du forage	Nombre de forages	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne
AEP	139	0.00E+00	1.11E-03	4.65E-02
Irrigation	293	6.31E-05	6.11E-01	2.16E-02
Industrie	47	4.72E-04	1.30E-01	1.91E-02
Total	479	0.00E+00	6.11E-01	2.86E-02

• **Zone non saturée comprise entre 20 et 40 m**

Utilisation du forage	Nombre de forages	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne
AEP	124	0.00E+00	4.17E-01	1.21E-02
Irrigation	216	9.72E-05	8.47E-01	1.08E-02
Industrie	13	1.08E-04	3.94E-02	6.90E-03
Total	353	0.00E+00	8.47E-01	1.11E-02

• **Zone non saturée comprise entre 40 et 60 m**

Utilisation du forage	Nombre de forages	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne
AEP	89	0.00E+00	8.33E-02	3.41E-03
Irrigation	30	3.47E-04	3.19E-02	5.80E-03
Industrie	3	2.39E-04	3.17E-03	1.22E-03
Total	122	0.00E+00	8.33E-02	3.94E-03

• **Zone non saturée supérieure à 60 m**

Utilisation du forage	Nombre de forages	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne
AEP	30	0.00E+00	3.33E-03	5.74E-04
Irrigation	2	1.71E-02	1.75E-02	1.73E-02
Industrie	0			
Total	32	0.00E+00	1.75E-02	1.62E-03

En intégrant à l'intérieur de chaque zone les valeurs de T, de K et les débits spécifiques disponibles, la répartition initiale de la transmissivité dans le modèle de simulation a été choisie comme suit :

- épaisseur de la zone non saturée inférieure à 20 m 0,03
- épaisseur de la zone non saturée comprise entre 20 et 40 m 0,01
- épaisseur de la zone non saturée comprise entre 40 et 60 m 0,004
- épaisseur de la zone non saturée supérieure à 60 m 0,0006 m²/s

Dans les vallées, les critères précédents sont écartés au profit d'une répartition en fonction des valeurs de transmissivité qui sont suffisamment nombreuses dans ces secteurs. Les vallées ont donc été subdivisées en secteurs présentant une certaine homogénéité. (fig. 19).

Le modèle de simulation des écoulements du bassin de la Somme utilise la « perméabilité ». Ce paramètre (fig. 20) a été calculé par maille en divisant la valeur de transmissivité précédente par l'épaisseur de l'aquifère : surface piézométrique (restituée à partir des données de 1995 complétées par des données de la BSS) moins la surface de la base de l'aquifère.

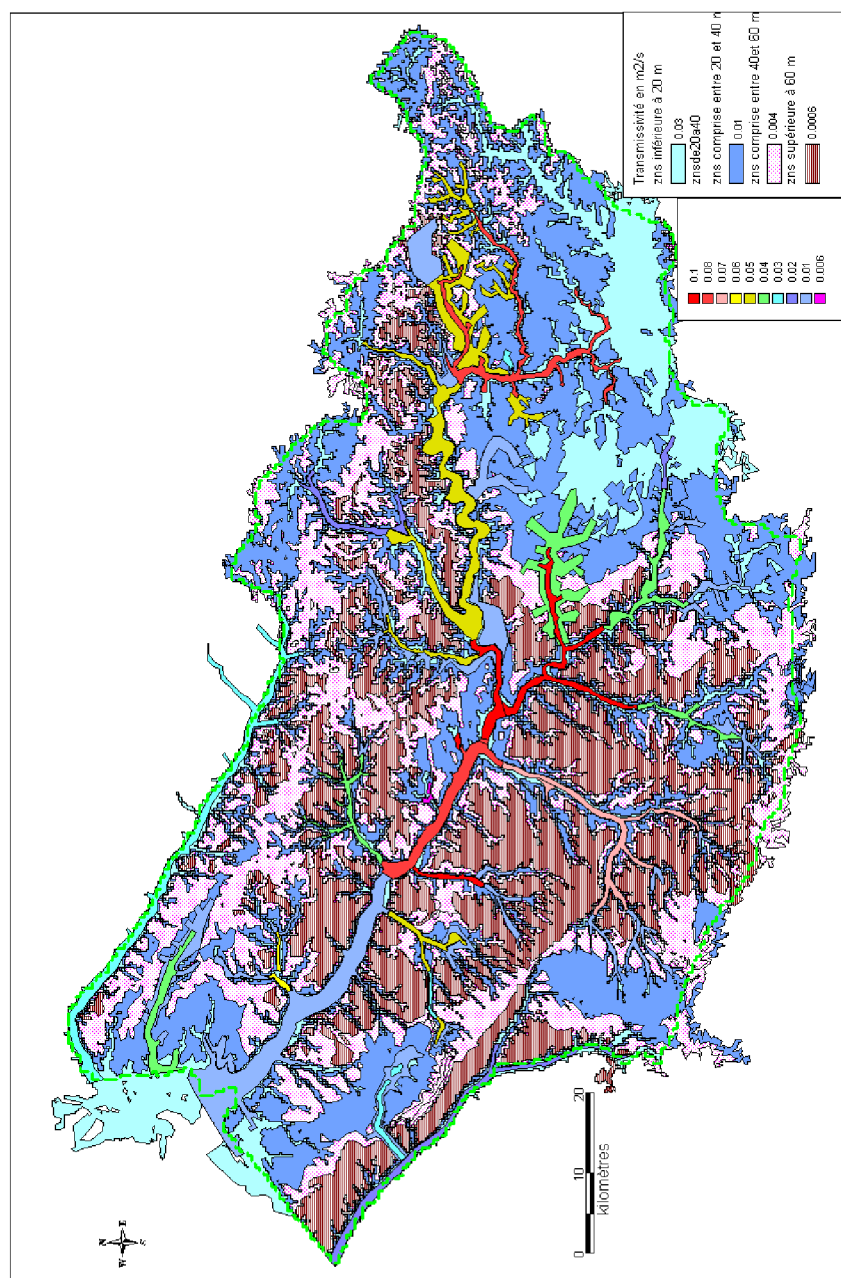


Fig. 19 - Carte de la répartition initiale des valeurs de transmissivité.

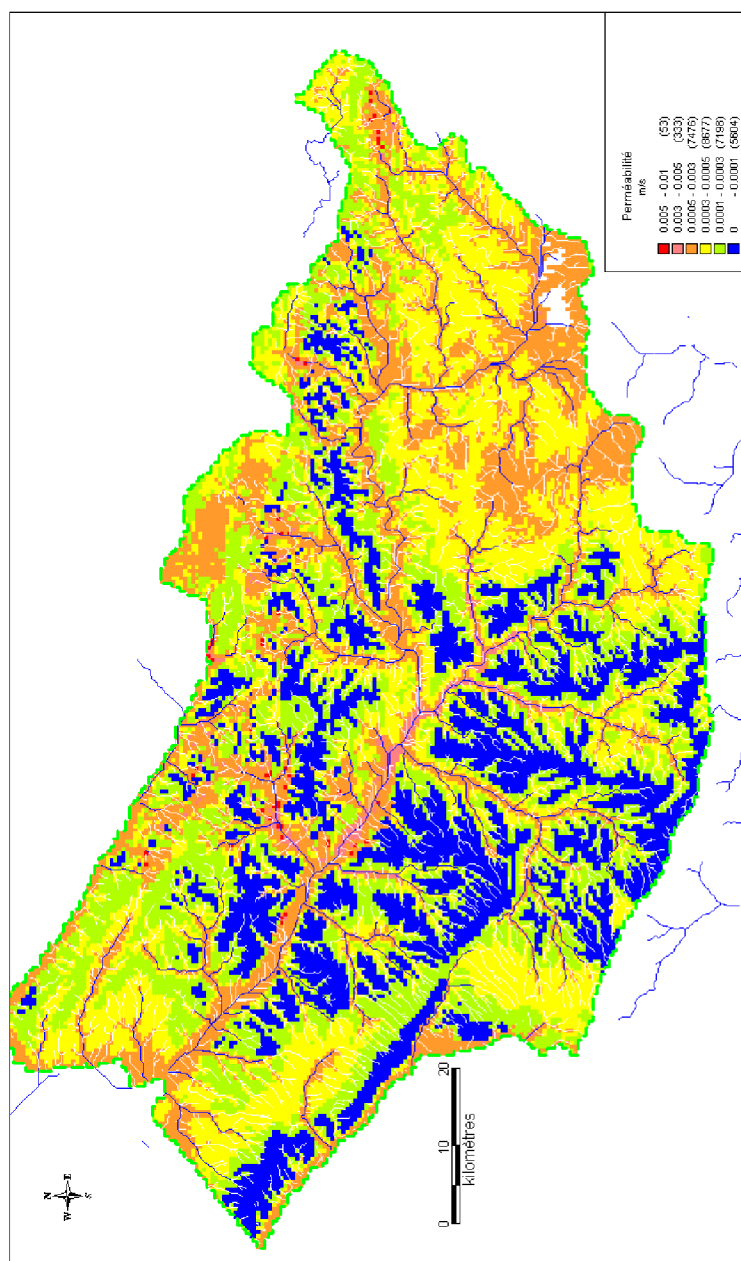


Fig. 20 - Carte de la répartition initiale des valeurs de perméabilité.

6. Étude des faciès chimiques et isotopiques des eaux – Résultat de la campagne de prélèvements en étiage 2001

L'étude des faciès chimiques des eaux renseigne fondamentalement sur le fonctionnement du bassin de la Somme. La contribution des eaux souterraines aux crues a été mise en évidence par la campagne de prélèvements d'avril 2001 (voir rap. BRGM/RP-51320-FR). La campagne menée en octobre 2001 avait pour objectif de caractériser la chimie et les compositions isotopiques des eaux de surface et souterraines lors d'une période de plus basses eaux. Ces résultats à la fois confirment et apportent des éléments nouveaux à l'analyse hydrodynamique.

La variété de composition des *eaux souterraines* résulte, soit de variations lithologiques dans la craie, soit d'apports anthropiques. La variété de composition des *eaux de rivières*, chimique et isotopique, est liée à l'influence de tous les apports, souterrains, superficiels, plus ou moins marqués par des apports anthropiques (engrais).

Une campagne de prélèvements a été faite au maximum de la crue en avril 2001 (débit de l'ordre de 100 m³/s à Abbeville), une seconde en octobre 2001 lors d'une période de plus basses eaux sur les mêmes points de prélèvements.

Les points de prélèvement ont été répartis comme suit :

- des puits, forages et résurgences dans la nappe de la craie ;
- la Somme d'amont en aval (4 points) ainsi que les affluents principaux (l'Hallue, l'Ancre, l'Avre et la Selle).

Les analyses concernent :

- les éléments bilantiels (*anions* : bicarbonates, nitrates, sulfates chlorures, fluorures ; *cations majeurs* : sodium, potassium, calcium et magnésium ; *cations traces* : rubidium, strontium) ;
- les isotopes de la molécule de l'eau (oxygène et de l'hydrogène) et le tritium ;
- les isotopes du strontium.

Les points échantillonnés sur la Somme sont désignés de l'amont à l'aval (Somme-1 : Neuville-lès-Bray, à Somme-4).

6.1. INTERPRETATION DES ANALYSES

Le faciès chimique de l'eau est initialement celui de l'eau de pluie. Dès que l'eau s'écoule, en surface ou en profondeur, et se trouve en contact avec des éléments solides chimiquement réactifs, son faciès chimique évolue. Ce faciès est en particulier très sensible aux réactions provoquées par le contact eau-roche. Pour cette raison, les eaux qui ont percolé au sein d'un aquifère se distinguent des eaux qui sont restées à la surface du sol. Que l'une ou l'autre de ces eaux se retrouve en rivière, les analyses renseigneront sur leur origine.

La signature que laisse la roche traversée sur le faciès chimique de l'eau est multiple. Elle peut être chimique sensu stricto et elle peut être isotopique. Ces deux volets sont abordés ci-après.

6.1.1. Chimie des eaux

Quelle que soit la période de prélèvement, les concentrations relativement plus élevées en chlore et strontium mesurées dans l'Avre sont le reflet d'apports anthropiques importants en éléments chimiques pour l'agriculture qui, au cours du lessivage des champs par le ruissellement, sont passés en solution dans les eaux et ont atteint la rivière. On peut en conclure que l'alimentation de l'Avre au cours des deux périodes était en bonne partie du ruissellement. Les eaux de nappes ne présentent pas cette surcharge chimique, ce qui les distingue et permet de suivre la progression du mélange des unes et des autres dans la Somme.

La chimie des eaux de la Somme traduit d'amont en aval une évolution depuis cette alimentation par le ruissellement, progressivement diluée par des eaux souterraines, beaucoup plus abondantes, de chimie différente, venues des versants, au point que la signature chimique des eaux de la Somme se rapproche de celle des nappes au point le plus aval. La progressivité des variations du faciès chimique de l'eau de la Somme donne une indication sur les segments de cours d'eau le long desquels l'apport des nappes a été le plus significatif.

Le chlore et le magnésium présents dans l'eau proviennent en proportions variables des apports atmosphériques et de l'altération de roches. Cependant, pour un grand nombre d'échantillons, les concentrations en ces éléments peuvent être influencées par les applications d'engrais ou les rejets d'eaux urbaines.

Graphiquement, la représentation des concentrations en chlore des eaux de rivières montre des points répartis entre un pôle représenté par l'Avre et un champ de points groupés, représentatif des eaux souterraines. C'est ce que montrent les figures 21 à 23 ci-après. Le suivi de plusieurs éléments chimiques et le suivi des isotopes du strontium conduisent à une même conclusion : il apparaît peu de différence entre les deux campagnes de prélèvements, ce qui laisse à penser que le système, du moins en l'état 2001 (basses eaux peu marquées), reçoit des apports relatifs constants en provenance des différents réservoirs ou sous-bassins.

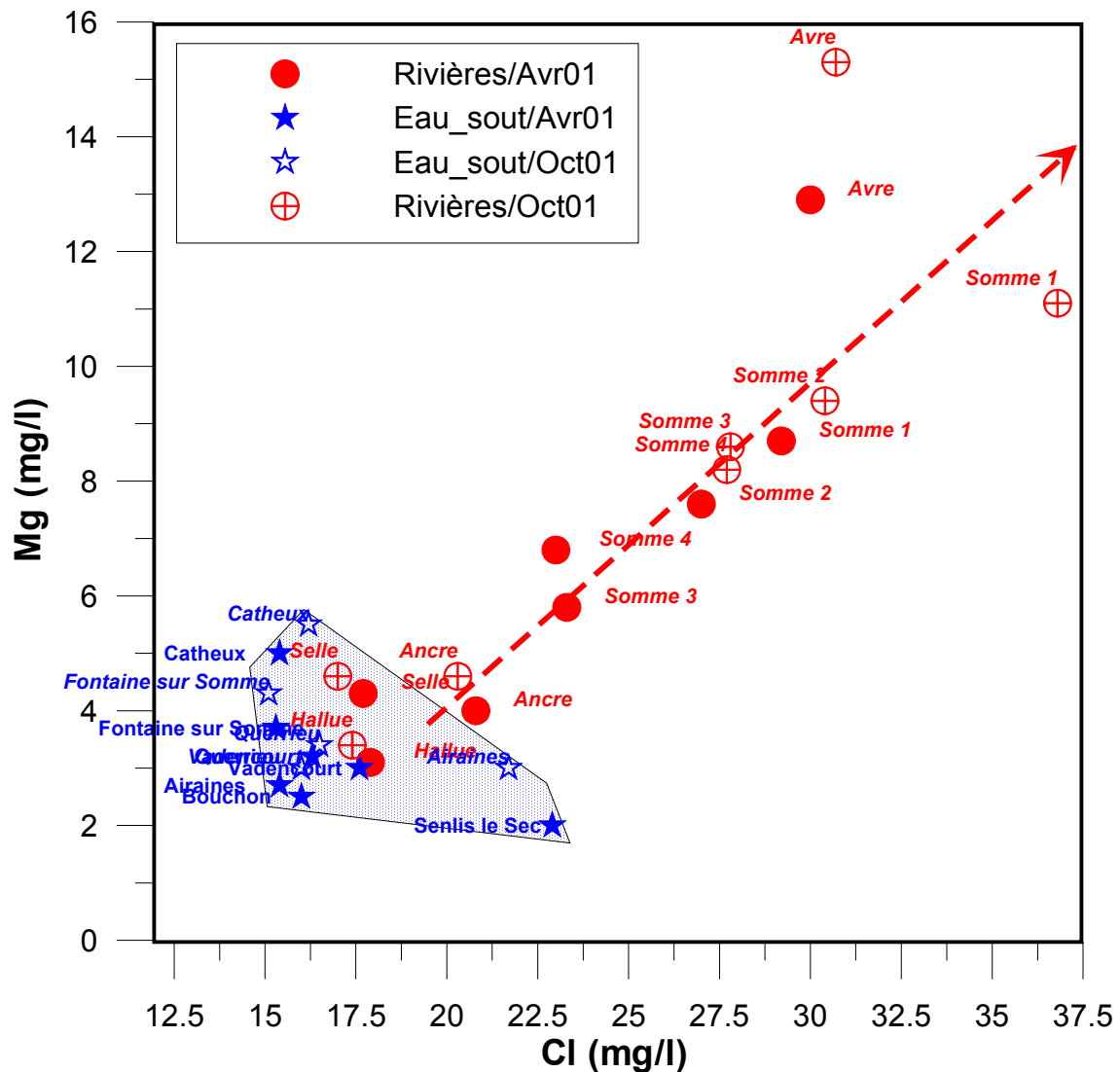


Fig. 21 - Expression du faciès chimique des eaux à travers le rapport des concentrations en chlore et en magnésium. Confrontation des deux campagnes de prélèvements : origines et mélanges des eaux.

Les teneurs en chlore et magnésium dans *les eaux souterraines* montrent des variations relativement faibles qui s'inscrivent dans un champ (étoiles). Les sommets du champ qui englobe les eaux souterraines correspondent aux échantillons de Catheux, situé dans la partie sud du bassin, de Senlis-le-Sec, situé dans la partie nord du bassin, et de l'Hallue et Airaines-Bouchon, situés dans la partie ouest du bassin près de Pont-Rémy. La deuxième série de prélèvements s'inscrit complètement dans ce champ sans en modifier les sommets.

L'échantillon de Senlis-le-Sec, le plus riche en chlorure, est également riche en nitrates (de l'ordre de 36 mg/l), indiquant une influence forte des épandages d'engrais. Cet échantillon n'a été prélevé que lors de la période de crue en avril. L'échantillon de Catheux présente, à teneur en Cl identique, une augmentation de la teneur en Mg qui peut être reliée à une variation de la lithologie (craie plus magnésienne). Il faut noter que la charge moyenne de la craie en Mg est de l'ordre de 1 800 mg/kg.

L'évolution *des eaux de surface* se traduit par des variations concomitantes en Cl et Mg. Les fortes teneurs observées dans l'Avre traduisent des apports anthropiques importants. L'alimentation de l'Avre est en bonne part le ruissellement. En octobre, on note une importante augmentation du magnésium sans réelle augmentation du chlorure.

Pour chacune des campagnes, la Somme est d'abord marquée par les apports de l'Avre (Somme-2), puis sa teneur en Cl et Mg diminue pour se rapprocher de la signature des eaux de nappes (Somme-3 et Somme-4).

6.2. FACIES ISOTOPIQUE DES EAUX (fig. 22)

Le strontium comporte deux isotopes : ^{86}Sr et ^{87}Sr . La mer de la craie, qui a permis le dépôt des formations turoniennes, était caractérisée par un rapport constant entre ces deux isotopes. Ce rapport s'est retrouvé avec la même constance dans les sédiments de cette mer et nous l'observons identiquement aujourd'hui dans tous les faciès de la craie.

Les eaux douces actuelles qui percolent dans l'aquifère de la craie se chargent chimiquement au contact de la roche et présentent rapidement dans ses éléments dissous le même rapport isotopique. Réciproquement, les eaux qui présentent ce rapport peuvent être considérées comme des eaux qui ont connu un parcours souterrain dans la craie, plus ou moins long.

Comme pour Cl et Mg, les teneurs en Strontium ont majoritairement une double origine : roche et apports d'engrais. Les rapports isotopiques de ces deux sources sont très différents ce qui permet de différencier les eaux à partir du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Les variations du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont importantes dans le système étudié et représentatives de sources de strontium réellement différentes. On observe deux relations linéaires dans les eaux souterraines, l'une regroupe les échantillons prélevés en avril, l'autre ceux prélevés en octobre. Dans chacune des relations, plusieurs familles d'eau sont mises en évidence : Vadencourt et Fontaine-sur-Somme en sont les pôles extrêmes. Si Vadencourt ne présente pas de variations des rapports isotopiques et des concentrations en Sr entre les deux campagnes de prélèvements, Fontaine-sur-Somme montre un rapport et une concentration en Sr plus élevés en octobre qu'en avril. La troisième relation concerne les eaux de surface qui évoluent entre un terme « Avre », vraisemblablement influencé par le drainage des champs libérant du strontium dans un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé, et un terme « nappes » marqué par des concentrations plus faibles et un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus bas. L'Avre ne montre pas de grandes variations en terme de rapports isotopiques et de concentrations en Sr entre avril et octobre.

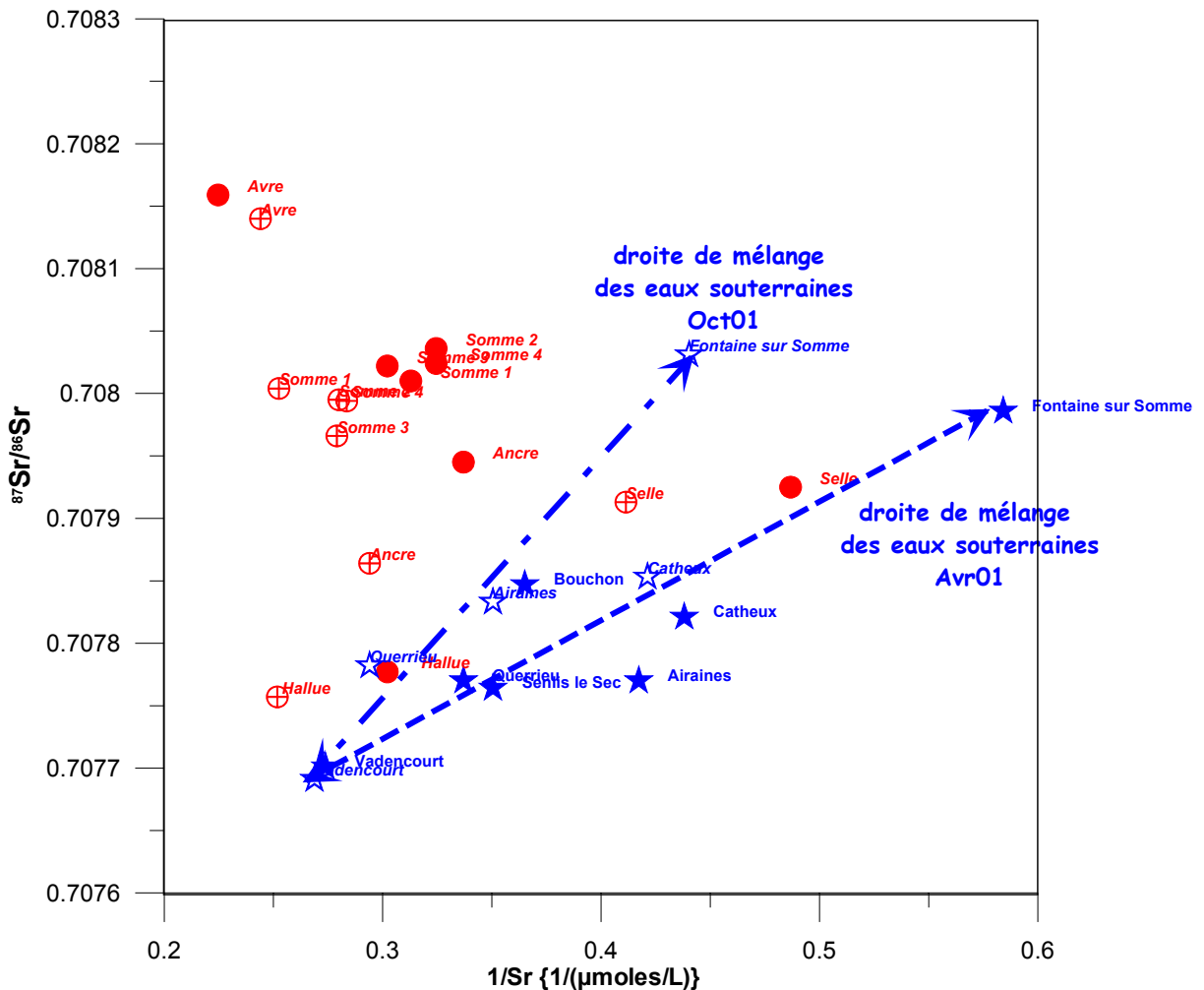


Fig. 22 - Faciès isotopique des eaux à partir des isotopes du strontium : origine des eaux.

Les échantillons de l'Hallue et de la Selle sont très proches des signatures des eaux souterraines. Ils se situent dans la relation linéaire définie pour les eaux souterraines. L'influence importante des eaux souterraines dans ces deux rivières est confirmée. On note toutefois que l'Hallue est proche des signatures des eaux souterraines du type Vadencourt et Querrieu, situées sur le bassin versant de l'Hallue. La Selle est, quant à elle, marquée par les signatures des eaux souterraines du type Catheux et Fontaine-sur-Somme.

Les points de la Somme des deux campagnes sont très groupés, montrant de très faibles variations en teneurs en Sr et en rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et donc une origine peu influencée par les apports d'engrais en cette saison pour la rivière Somme. Les rapports isotopiques sont plus bas en octobre sur la rivière Somme en relation avec des concentrations en Sr plus importantes.

Issue de la combinaison des deux précédentes, la figure 23 résume le fonctionnement que l'on peut envisager actuellement sur le bassin de la Somme.

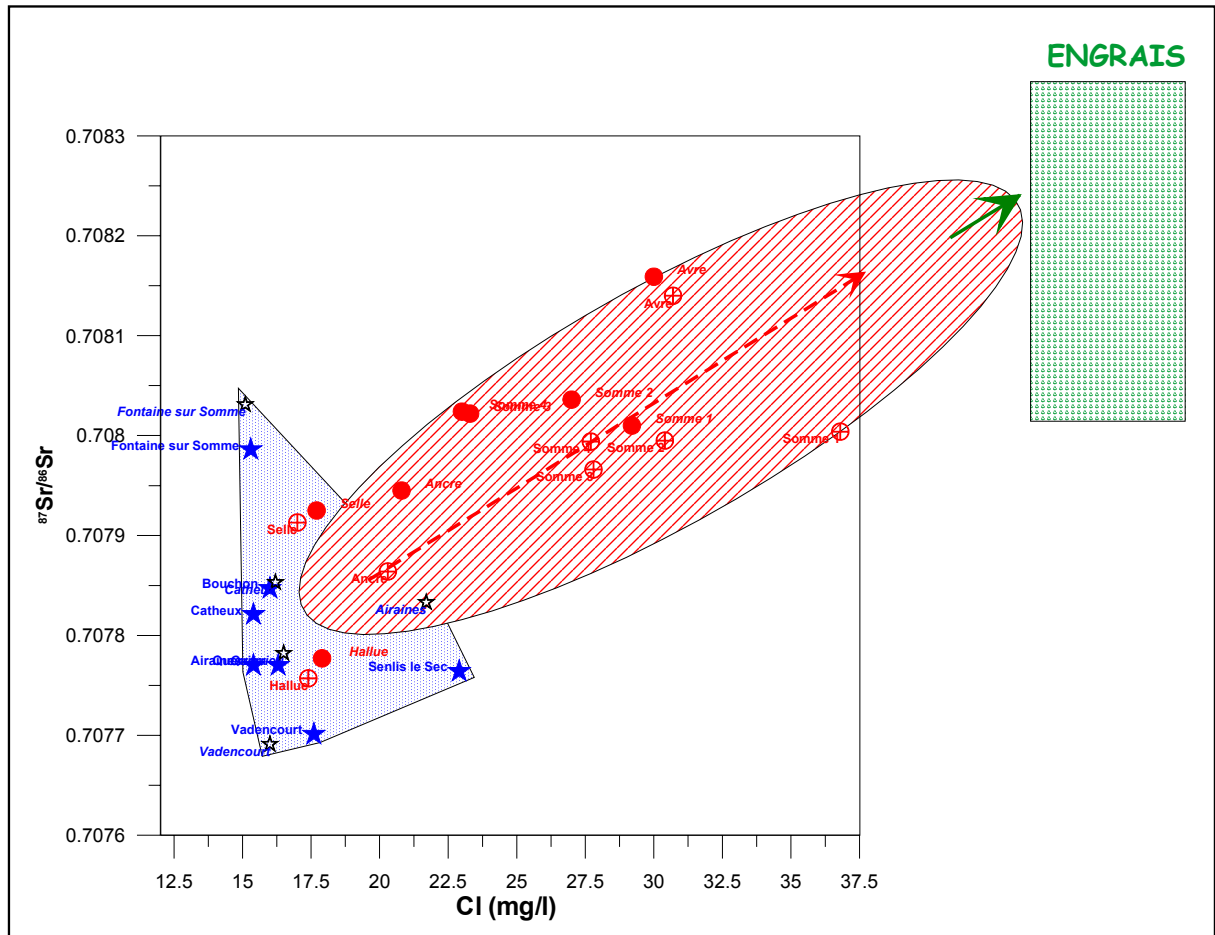


Fig. 23 - Relations nappe-rivières : apports naturels, apports anthropiques.

On retrouve, sous une pression anthropique de nature agricole, des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et des teneurs en Cl qui augmentent conjointement. Les eaux souterraines sont groupées dans un triangle identique à ceux des figures 22 et 23, les mêmes points constituant les sommets.

Dans les eaux de surface, apparaît une relation linéaire depuis un pôle marqué par le lessivage d'épandages agricoles (rivière Avre) et un terme qui est analogue au faciès de l'Hallue et de la Selle, rivières fortement alimentées par les eaux souterraines. L'Avre très marqué par le lessivage des engrais comme le cours amont de la Somme (Somme-1).

Les points de la Somme d'amont en aval (Somme-2, Somme-3, Somme-4) se positionnent dans un système de mélange entre les entrants amont (Avre et Somme-1), marqués par le ruissellement et l'influence anthropique, et les entrants soit de type eaux souterraines, soit affluents très influencés par les eaux souterraines. Ainsi, le point Somme-2 qui correspond au mélange complet Somme-1, Avre, Selle, Ancre et Hallue,

est décalé vers des concentrations plus faibles en Cl et un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus bas. Par contre, les deux autres points de la Somme, qui ne reçoivent pas d'affluents majeurs, montrent une diminution des teneurs en Cl (et Mg) ainsi qu'un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus bas que celui du point Somme-2, et ceci dans les deux séries d'échantillons. On peut dans ce cas envisager une contribution des eaux souterraines qui provoquerait ces variations dans les compositions chimiques et isotopiques des points de la Somme aval. Dans tous les cas, ces points de la Somme aval se ressemblent fortement entre avril et octobre.

7. Modèles globaux pluie-niveaux et pluie-débit GARDENIA

7.1. PRESENTATION DU MODELE GARDENIA

GARDENIA est un modèle global : il prend en compte les constantes de temps qui caractérisent les différentes composantes du cycle de l'eau depuis l'eau de pluie au sol 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 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 la chronique des précipitations et la chronique (issue de calcul) des évapotranspirations.

Les différents stades du cycle de l'eau, en surface comme en souterrain, sont assimilés à des fluctuations de réserves contenues dans des réservoirs successifs, le dernier correspondant au milieu hydrogéologique profond. Trois configurations sont possibles pour simuler ce dernier réservoir qui produit la composante la plus lente de l'écoulement : un à deux réservoirs avec sorties simples ou multiples.

a) Partie commune aux trois configurations

Le premier réservoir est alimenté par la pluie. Son niveau de remplissage, variable dans le temps est désigné R . Sa capacité maximum est appelée R_{max} . Il est alimenté par la pluie. Il va restituer une partie de l'eau reçue sous la forme d'évapo-transpiration réelle (ETR) déduite de l'évapotranspiration potentielle qui a été calculée d'après les données météorologiques. Ainsi si la lame d'eau à un instant t y est suffisante, l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle calculée : $ETR = ETP$. Si la lame d'eau disponible est inférieure à l'ETP, l'évapotranspiration réelle ne peut excéder le stock d'eau disponible : $ETR = R$. En revanche, si la réserve est excédentaire, ($R > R_{max}$), le surplus de ce réservoir va alimenter le réservoir suivant et va engendrer de la pluie efficace.

Cette pluie efficace atteint un deuxième réservoir de niveau H , de capacité maximum R_{uiper} , dans lequel s'opère la répartition non linéaire entre un écoulement lent (Th_g) et un écoulement rapide : plus le niveau est haut dans le réservoir, plus le ratio s'établira en faveur de l'écoulement rapide.

La composante rapide du débit est égale à $H / (Th_g R_{uiper}/H)$. La composante rapide est donc d'autant plus prépondérante que le niveau H est élevé.

Le débit qui atteint le réservoir souterrain est égal à H/Th_g .

b) Les différentes configurations du réservoir souterrain

• Configuration à un réservoir

L'écoulement lent rejoint le réservoir souterrain dont le niveau est R_s . Le débit instantané issu de ce réservoir est égal à R_s/T_s (fig. 24).

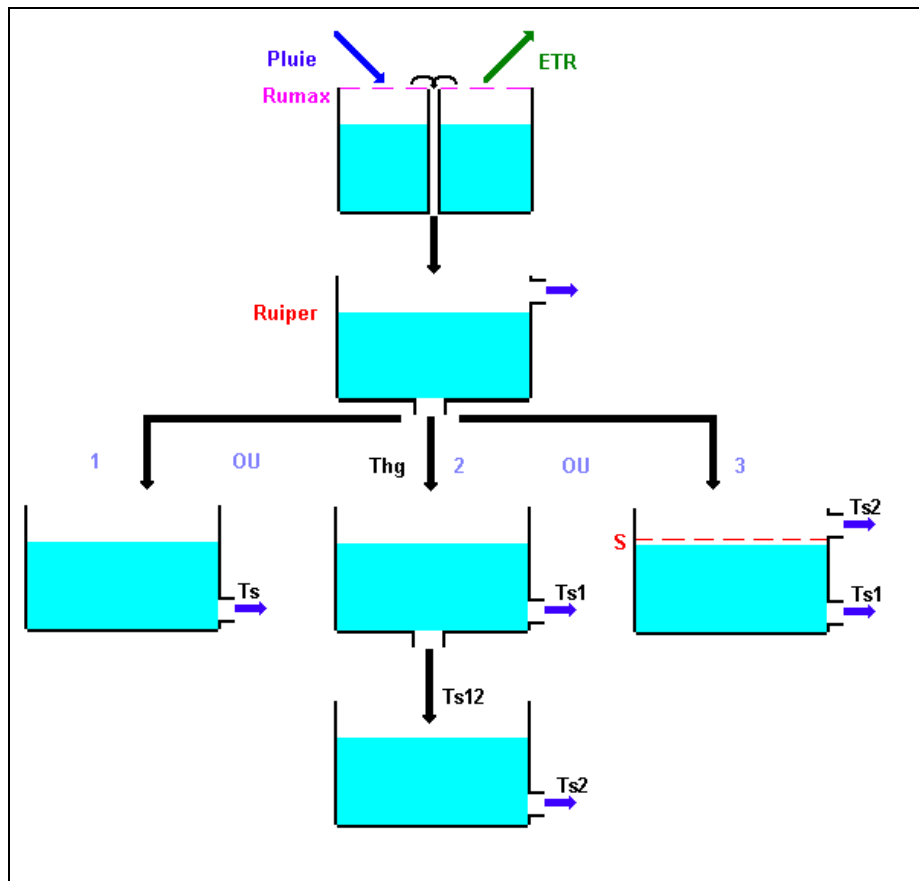


Fig. 24 - Architecture du logiciel GARDENIA. Les différents compartiments des milieux naturels sont représentés à l'aide de réservoirs successifs.

• Configuration à deux réservoirs

L'écoulement lent rejoint le réservoir souterrain dont le niveau est R_s . Le débit instantané issu de ce réservoir est égal à $R_s1/Ts1$.

Le débit instantané d'alimentation du second réservoir est égal à $R_s1/Ts12$.

Le débit instantané issu du second réservoir est égal à $R_s2/Ts2$.

Cette configuration ne s'applique qu'aux simulations pluie/débit.

• Configuration à un réservoir avec deux sorties

L'écoulement lent rejoint le réservoir souterrain dont le niveau est R_s .

Si R_s est inférieur au niveau seuil S , le débit instantané issu de ce réservoir est égal à $R_s/Ts1$.

Si R_s est supérieur au niveau seuil S , la deuxième sortie (de constante de temps $Ts2$) du réservoir est activée. Le débit instantané issu du réservoir est la somme des deux débits $R_s/Ts1$ et $R_s/Ts2$.

Pour ces trois configurations :

- en simulation pluie/débit, la surface du bassin permet de passer de la lame d'eau au débit ;
- en simulation pluie/niveau, le niveau d'eau dans le réservoir est transformé en cote NGF par division par le coefficient d'emménagement et addition à l'altitude locale.

7.2. DONNEES DISPONIBLES

La figure 25 indique la position des postes météorologiques, des stations hydrométriques et des piézomètres.

7.2.1. Données climatiques

- Les précipitations sont disponibles au pas de temps journalier au niveau de 9 stations de données pluviométriques.

Position des postes météorologiques, coordonnées de Rouvroy-en-Santerre et Cottenchy complétées :

<i>Localité</i>	<i>X en L2</i>	<i>Y en L2</i>	<i>1ère valeur</i>
Bernaville	587.5	2570.4	01/01/1988
Epehy	657	2557.3	01/10/1988
Vron	558.3	2590.6	01/08/1988
Oisemont	559.2	2551	01/01/1988
Meaulte	622.4	2556	01/01/1988
Abbeville	564.1	2567.9	01/01/1961
Rouvroy-en-Santerre	626.5	2530.2	01/09/1993
Cottenchy-Boves	603.2	2534.7	01/01/1961
Glisy	603.4	2541.6	01/01/1988

Huit stations ont un suivi automatique. Les données sont transmises journalièrement. La station de Cottenchy est une station manuelle, dont les données sont transmises à un rythme proche de mensuel.

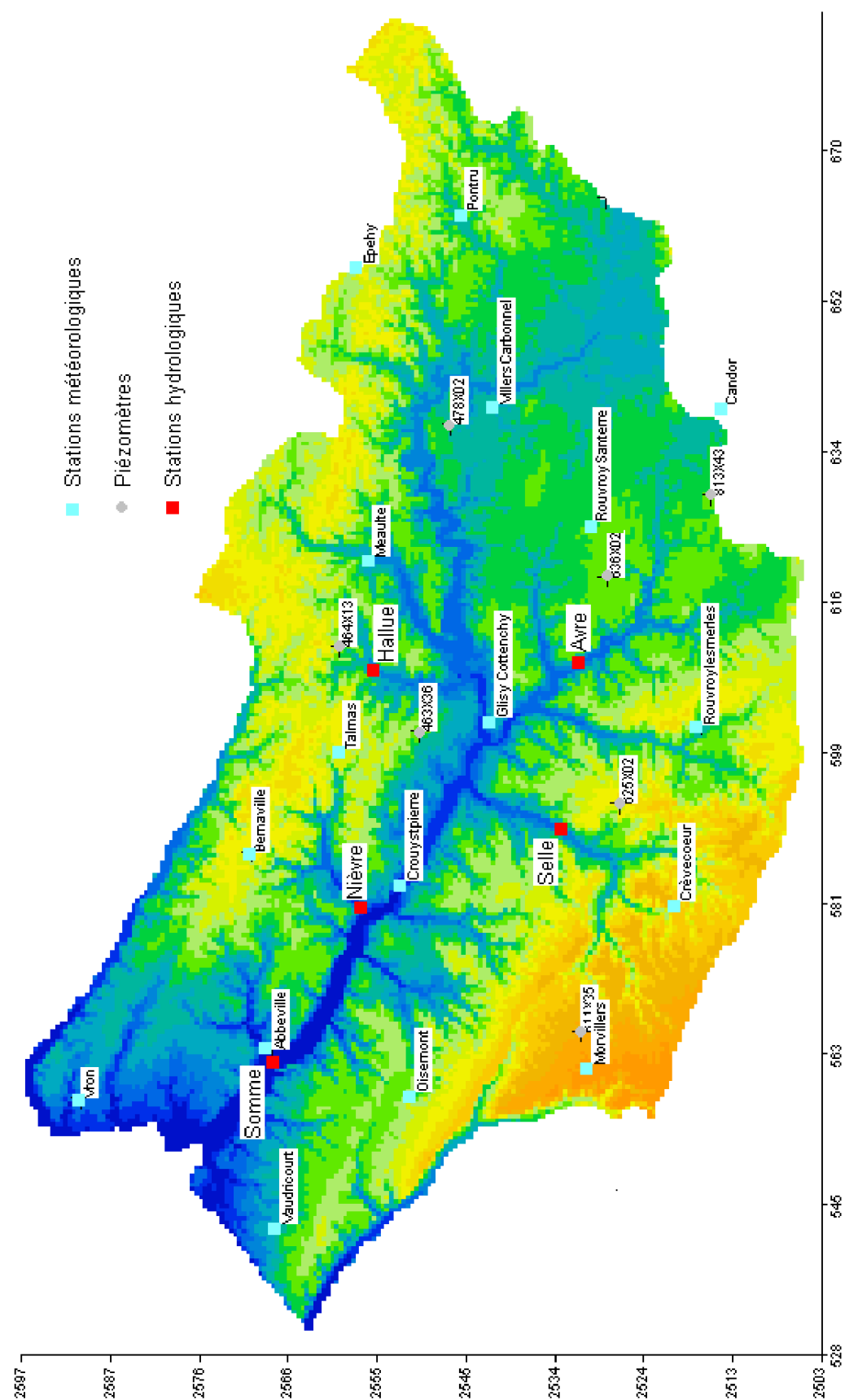


Fig. 25 - Localisation des stations météorologiques, piézométriques et hydrologiques, sur fond topographique.
 (Les axes correspondent aux coordonnées dans le système de projection Lambert 2 étendu).

- Les évapotranspirations potentielles (ETP) sont calculées par la méthode de Penman³. Elles ont été établies au niveau des 8 stations automatiques, à partir de la même date initiale que les précipitations, exception faite de la station d'Abbeville, où elles ne sont disponibles qu'à partir de juillet 1963.

Les données ont été arrêtées au 21 novembre 2001. Elles ont été obtenues auprès du Centre départemental de Météo France à Abbeville.

7.2.2. Données hydrologiques (fig. 25)

Six stations de mesures du débit existent sur le bassin :

<i>Rivière</i>	<i>Ville</i>	<i>Surface BV</i>	<i>Début chronique</i>
Somme	Peronne	842 km ²	depuis 1998
Somme	Abbeville	5 560 km ²	depuis 1963
Hallue	Bavelincourt	115 km ²	depuis 1976, lacune de 1984 à 1989
Avre	Moreuil	630 km ²	depuis 1968
Nièvre	Étoile	269 km ²	depuis 1980
Selle	Plachy	524 km ²	depuis 1981

À fin novembre les plus récentes données disponibles s'arrêtent à mi-novembre 2001. Elles ont été recueillies auprès des DIREN Picardie et Nord-Pas-de-Calais.

Les données de débit de l'Avre à l'Échelle-Saint-Aurin sont entachées d'une incertitude en raison de l'instabilité locale des berges, cette station ne sera donc pas utilisée pour la modélisation (information DIREN).

La courbe de tarage de la Somme à Péronne a été modifiée au début de l'année 2001, des niveaux d'eau en rivière aussi hauts n'ayant jamais été observés auparavant (information DIREN).

On peut remarquer que les différents bassins réagissent différemment aux deux épisodes de hautes eaux du printemps 1995 et du printemps 2001 :

	Ordre de grandeur du débit maximum	
	Printemps 1995	Printemps 2001
Hallue	2 500 l/s	2 900 l/s
Avre	3 700 l/s	8 300 l/s
Nièvre	4 700 l/s	5 500 l/s

³ Origine Météo France.

L'effet du dernier épisode de crue se fait assez peu sentir sur les débits de l'Hallue, contrairement à l'effet sur les débits de l'Avre, et les réponses de la Nièvre et de l'Avre sont inversées : débits plus forts pour la Nièvre en 1995 et plus faibles en 2001. Ces réponses différentes aux exutoires, outre une variabilité spatiale importante des pluies, peuvent s'expliquer par un comportement différent d'un bassin à l'autre qui transparaîtra au travers des modèles (fig. 26).

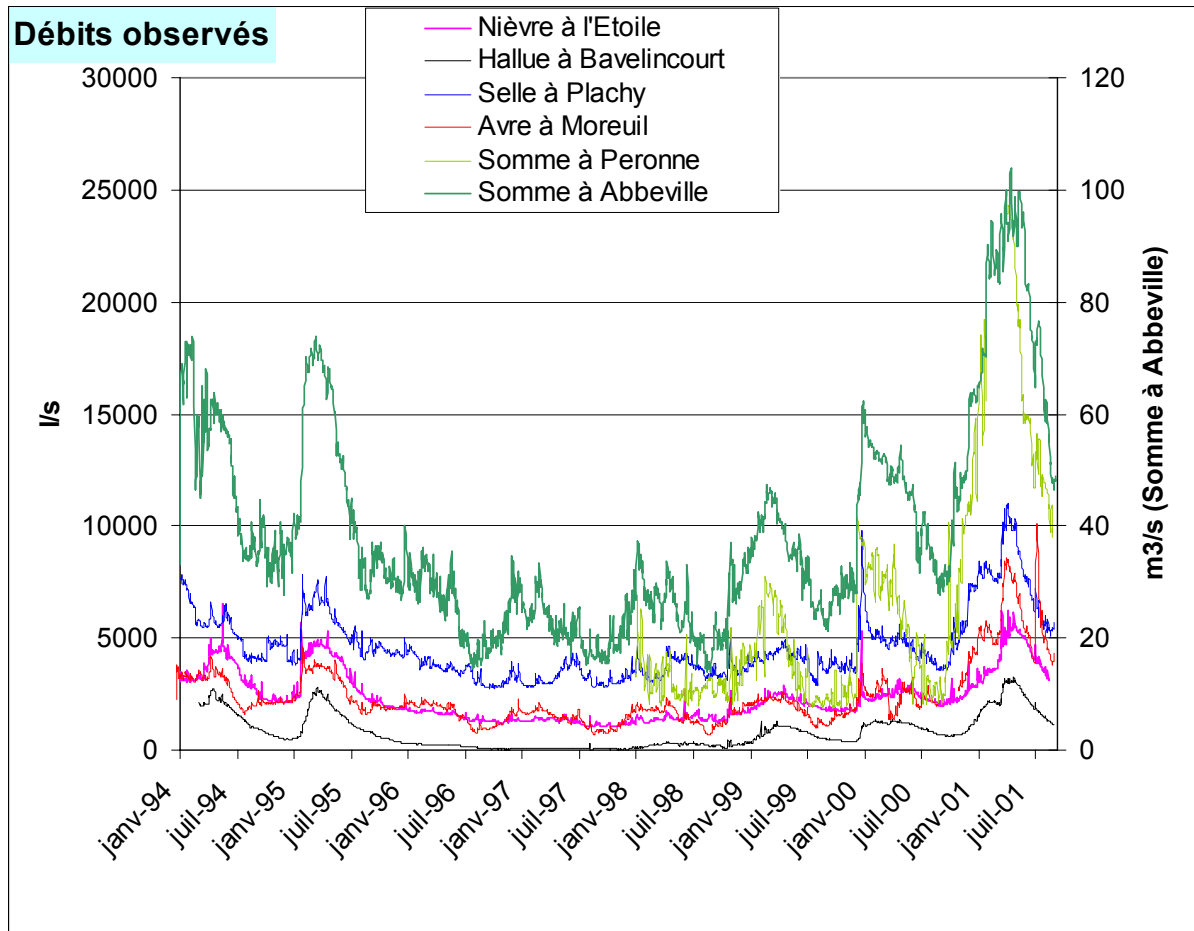


Fig. 26 - Comparaison des débits des principaux cours d'eau de janvier 1994 à septembre 2001.

On remarque très distinctement pour l'Hallue, la Nièvre, et à un moins degré la Selle que les hydrogrammes de tarissement suivent très rapidement après les pics de hautes eaux des courbes de décroissance qui obéissent à une même loi exponentielle d'une année à l'autre, traduisant un soutien important, voire exclusif, par les nappes.

7.2.3. Données piézométriques

Sur le bassin, on dénombre 22 points assortis d'une chronique piézométrique continue de plus de 10 ans (voir situation sur les cartes à grande échelle produites dans le premier rapport BRGM/RP-51030-FR).

<i>Code BSS</i>	<i>X L2 m</i>	<i>Y L2E m</i>	<i>Début chronique</i>
00332X0007	572132	2576702	1967
00335X0005	562039	2563357	1965
00341X0012	592497	2572127	1966
00346X0011	599529	2567980	1965
00444X0008	558475	2558328	1974
00463X0036	601673	2550493	1966
00464X0013	611618	2559997	1965
00471X0010	617427	2558724	1966
00478X0002	637946	2546842	1979
00482X0063	649347	2557034	1965
00486X0015	647399	2542713	1965
00487X0015	652968	2545495	1965
00487X0026	657036	2550100	1965
00608X0028	560957	2529908	1970
00611X0035	566214	2531431	1971
00632X0023	621400	2538464	1979
00634X0039	636531	2534915	1964
00636X0020	619927	2528390	1979
00638X0116	634176	2529098	1974
00813X0043	629597	2516002	1964
00625X0002	539140	1226580	1965
00813x0043	626870	1237410	1990

Les points inscrits en gras sont ceux où l'on peut remarquer une montée importante du niveau piézométrique lors du dernier épisode de crue et qui ont fait l'objet d'une modélisation globale à l'aide du logiciel GARDENIA.

7.3. SIMULATION DE LA PERIODE JANVIER 1995 - NOVEMBRE 2001

7.3.1. Remarque sur les phénomènes observés

- **Pluviométrie**

Dans son rapport sur la crue et les inondations de la vallée de la Somme de mars à avril 2001, Pierre Hubert a analysé les plus longues séries de précipitations disponibles. Concernant la pluie à Abbeville, il observe que l'année 2000 a connu la plus forte

pluviométrie de la période 1945-2000 avec un total annuel de 1 146 mm, pour une moyenne de 747 mm. Il souligne également la forte pluviosité de la période allant d'avril 2000 à mars 2001 avec un cumul de précipitations de 1 286 mm.

Le caractère exceptionnel de ces précipitations se fait ressentir sur l'ensemble du bassin avec la succession de deux années fortement excédentaires (1999-2000) et des maximums absolus relevés à Abbeville et dans la partie aval du bassin, ainsi qu'à Herbecourt et dans le bassin de la haute Somme.

- **Hydrologie**

Les observations du début de l'année 2001 donnent des débits journaliers maximaux de la Somme à Abbeville de l'ordre de 110 m³/s jamais observés jusqu'alors. Lors des précédents épisodes de crues en 1994 et 1995, les débits maximaux observés étaient de l'ordre de 75 m³/s.

Ces débits importants se sont, entre autres, traduits par des submersions durables de la plaine alluviale qui ne sont pas pris en compte directement dans le modèle. Le débit qui, sans inondations, aurait été mesuré à Abbeville a été estimé à quelques 130 m³/s sur une période de deux mois environ (cf. rapport de Pierre Hubert⁴ page 10).

Rappelons que les inondations ont débuté en mars 2001, et que la situation n'est revenue à la normale que début juin 2001, période pendant laquelle les débits de la Somme à Abbeville dépassaient 80 à 85 m³/s.

On peut noter également lors de la décrue de l'été 2001, une nette remontée du débit en juillet 2001 : de 55,8 m³/s le 5 juillet à 68,5 m³/s le 7 juillet. Cette remontée qui fut rapide a été occasionnée par de très importantes précipitations : 67 mm le 6 juillet et 19 mm le 7 juillet mesurés à la station de Cottenchy-Amiens. Elle a cette fois probablement fait jouer le ruissellement des eaux de pluies préférentiellement. À cette même période des inondations se sont également produites autour de Montdidier et de Roye.

7.3.2. Simulations pluie/niveau

Les simulations ont été réalisées au pas de temps journalier. À chaque date où l'on a disposé d'une mesure de niveau, un niveau simulé lui est comparé. Les ETP utilisées sont toujours celles estimées à Abbeville, seule chronique sans lacune.

La simulation a consisté à caler les temps de réaction des différents réservoirs successifs du modèle. Néanmoins, un degré de liberté demeurerait dans la mesure où un suivi piézométrique ponctuel intègre la réaction de tout le sous-bassin situé à l'amont du

⁴ Pierre Hubert (2001), rapport sur la crue et les inondations de la vallée de la Somme de mars à mai 2001, rédigé à la demande du Conseil Général de la Somme.

point considéré, ce qui conduit à déterminer la station météo la mieux en relation avec le piézomètre considéré. Ainsi les associations de familles de données sont les suivantes :

<i>Piézomètre</i>	<i>Sous-bassin</i>	<i>Poste météo permettant le meilleur calage</i>
00463X0036	L'Hallue	Bernaville
00464X0013	L'Hallue	Albert-Meaulte
00478X0002	La Somme amont (rive gauche)	Glisy
00611X0035	La Selle amont	Bernaville
00636X0020	L'Avre rive droite	Hourdel
00625X0002	La Selle rive droite	Glisy
00813X0043	L'Avre amont	Glisy

À titre de référence, les valeurs numériques issues de calages pour les paramètres caractéristiques des modèles sont les suivantes (tabl. 2) :

Station	R	Coeff P en %	Rumaxen mm	Thgen mois	Ruiperen mm	Tsen mois	Coeff E mmag	Niveau de base en m
00463X0036	0,946	- 10	68,25	0,19	573,1	17,27	0,0861	36,147
00464X0013	0,962	10	130,9	0,15	336	3,604	0,0025	60,129
00478X0002	0,963	10	76,95	0,15	500	14,54	0,00607	41,591
00611X0035	0,993	- 10	80,32	0,4	336,2	14,54	0,0331	165
00636X0020	0,989	10	40,84	2,82	591,1	39,99	0,00288	28,837
00625X0002	0,941	- 10	80,32	0,15	574,9	36,4	0,00762	65,481
00813x0043	0,983	- 9,9	56,02	9,96	609,3	15,14	0,00179	62,017

Tabl. 2 - Simulations pluies/niveau : synthèse des paramètres utilisés.

Coeff P : est un coefficient de correction des pluies chargé de compenser une insuffisante représentation des données pluviométriques

R : est un coefficient d'ajustement aux observations, dont la valeur maximale est 1 (cf. définition en annexe 1).

Les simulations présentées en figure 27 ci-après montrent dans l'ensemble un bon ajustement à partir de l'une au moins des chroniques pluviométriques sélectionnées.

Ce constat montre que le comportement des nappes est reproductible par simulation, donc prévisible à partir de l'instant où l'on dispose d'une chronique pluviométrique probable. C'est ce résultat qui sera recherché dans l'outil de prévision.

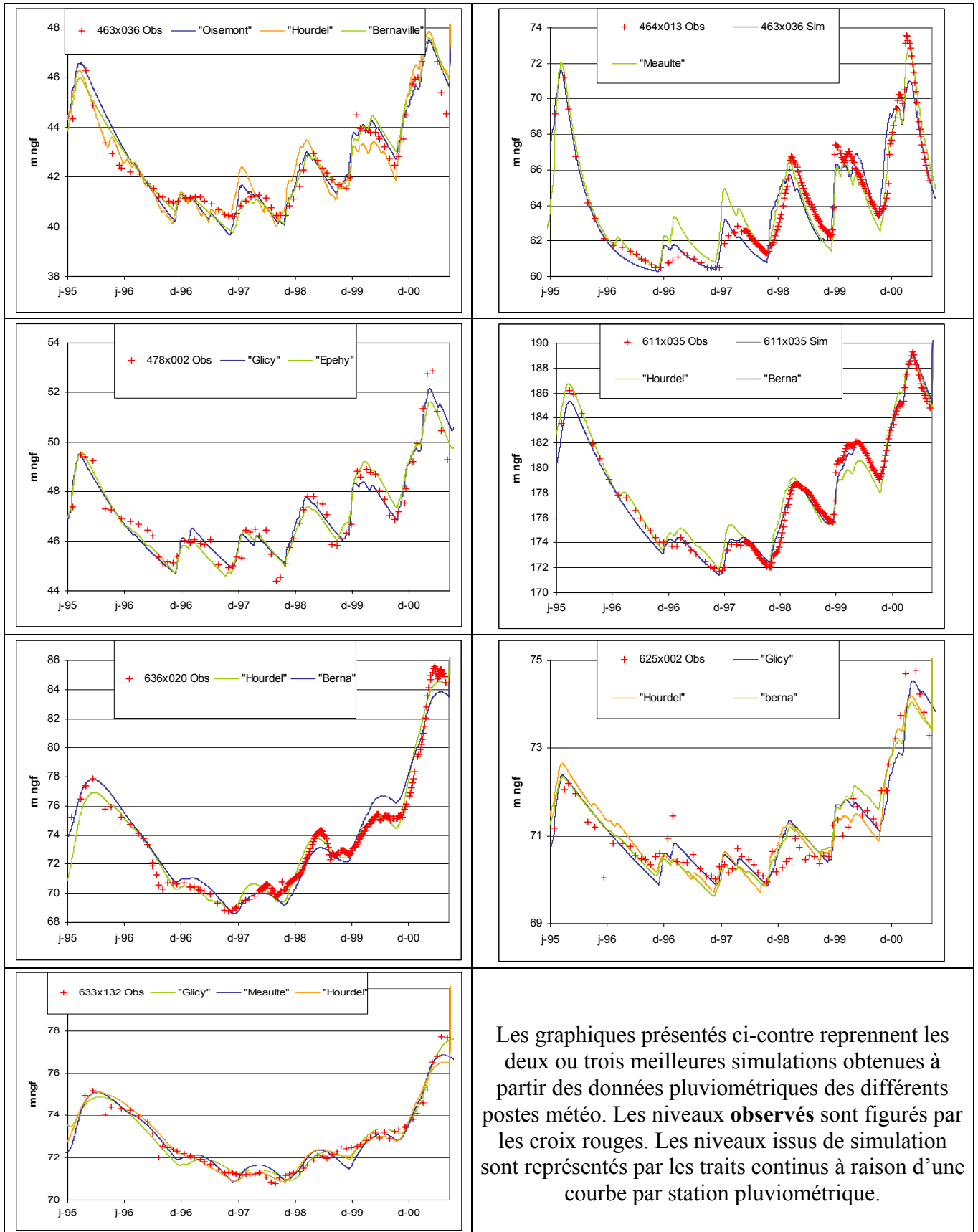


Fig. 27 - Essais de restitution par simulation GARDENIA des fluctuations piezométriques observées sur 7 ouvrages pour la période 1995-2001.
Recherche de la meilleure chronique pluviométrique explicative.

7.3.3. Simulations pluie/débit

Les simulations s'adressent cette fois à la reconstitution des hydrogrammes observés sur plusieurs stations de jaugeage des principaux cours d'eau, en réalisant les simulations au pas de temps journalier (tabl. 3).

Les ETP utilisées sont toujours celles mesurées à Abbeville, seule chronique sans lacune.

Une fois encore, et en raison du fait que l'hydrogramme observé est intégrateur du comportement d'un sous-bassin entier, il convenait de déterminer quel pluviomètre permettait de restituer par simulation les débits les plus proches des débits observés.

Les meilleurs ajustements sont ressortis pour les postes météo suivants, respectivement, pour chaque seuil de jaugeage :

Station de jaugeage

L'Hallue à Bavelincourt
La Nièvre à l'Etoile
L'Avre à Moreuil
La Selle à Plachy

Poste météo permettant le meilleur calage

Meaulte
Meaulte
Glisy
Glisy

On peut noter que le poste de Meaulte est situé sur la rive droite de la Somme, tout comme les deux stations de l'Hallue et de la Nièvre, alors que les stations en rive gauche sont mieux reproduites en utilisant les pluies du poste de Glisy.

Les surfaces de bassin sont toutes conformes à celle de la banque HYDRO, sauf celle qui entre dans la simulation des débits de l'Avre (1 024 km² trouvés au lieu de 630 km² donnés par la banque Hydro), la simulation des débits de l'Avre restant peu satisfaisante.

Station	R	Coeff P en %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts en mois	Surface du bassin en km ²
Hallue	0,978	9,9	0	250	0,31	4 969	3	115
Avre	0,857	+ 10	- 10	31,8	6	828	3	1 024
Nièvre	0,952	- 10	+ 10	82,72	2,79	797,5	7,97	269
Selle	0,911	+ 10	- 6,05	40,91	3,0	532	10,61	524

Tabl. 3 - Simulations pluie/débit : synthèse des paramètres utilisés.

Coeff ETP est un coefficient de correction des évapotranspirations potentielles chargé de compenser une insuffisante représentation des données climatiques.

Les paramètres obtenus reflètent des réserves en eau du sol plus ou moins importantes, à savoir étagées de 40 mm à 250 mm. Les mêmes bassins soumis à des conditions climatiques équivalentes produiraient davantage de pluies efficaces si la réserve en eau du sol était plus faible.

Les graphiques présentés sur la figure 28 reprennent les meilleures simulations obtenues à partir des données pluviométriques des différents postes (traits continus). Les débits observés sont figurés par les croix rouges. Les débits simulés sont figurés à l'aide des courbes en traits pleins à raison d'une courbe par station météo testée.

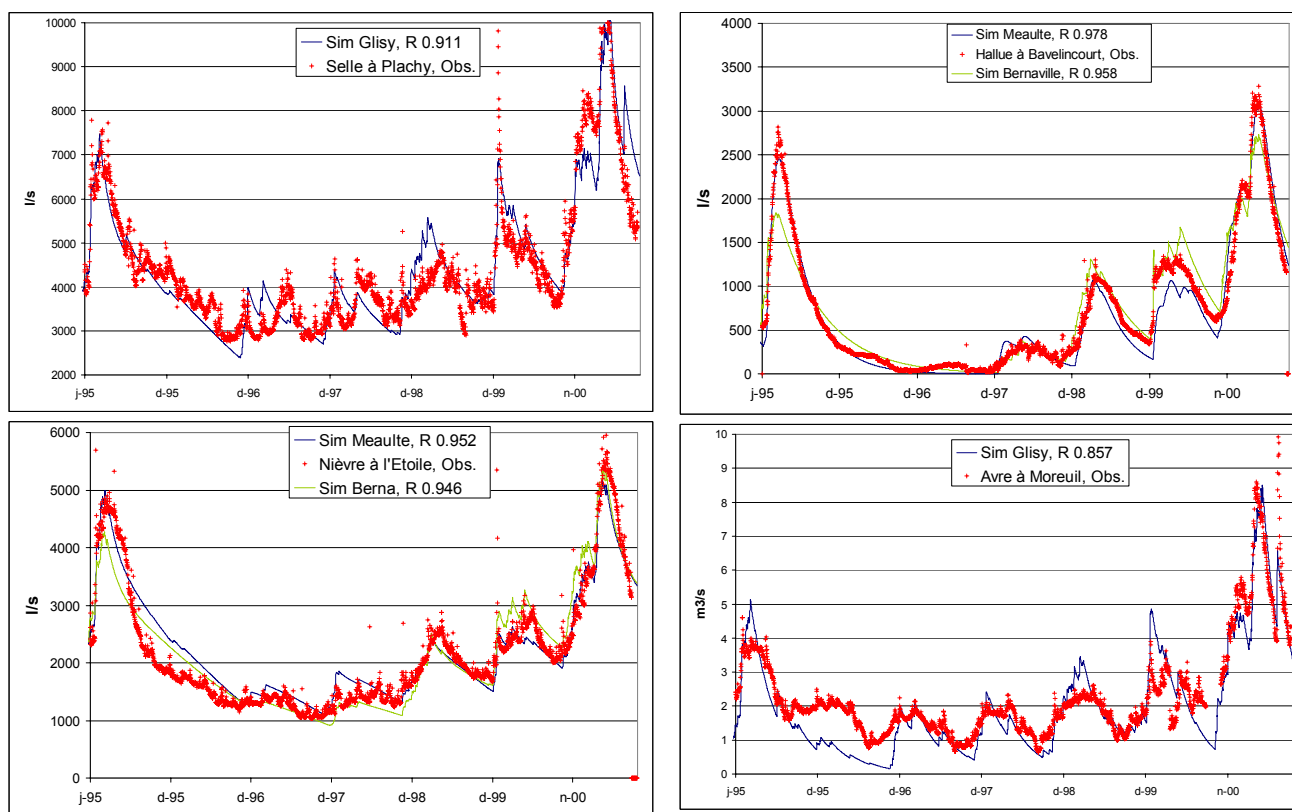


Fig. 28 - Essais de restitution par simulation GARDENIA des fluctuations de débits observées sur 4 stations de jaugeage des cours d'eau pour la période 1995-2001.
Recherche de la meilleure chronique pluviométrique explicative.

Les simulations montrent que la contribution au débit de la Somme apportée par les trois premiers sous-bassins, objets de ces simulations, s'interprète aisément par modèle. En revanche, les simulations qui ont été essayées pour l'Avre laissent penser qu'un effet d'inertie se superpose à la réponse directe du bassin à la pluie, laissant entrevoir une composante lente et assez importante, liée à l'aquifère sous-jacent.

Les trois premiers modèles sont utilisables, tels que, pour l'analyse des contributions de chaque sous-bassin au débit de la Somme.

7.4. SIMULATION DU DEBIT DE LA SOMME A ABBEVILLE

7.4.1. Recherche du poste pluviométrique permettant la meilleure simulation

Les simulations couvrent la période 1988-2001, la plupart des chroniques démarrant en 1988. Les sept premières années correspondent à une phase d'embrayage du modèle sur les situations observées. Elles n'apparaissent pas dans la restitution ci-après. La comparaison des débits simulés aux débits observés n'est effectuée que sur la période janvier 1995 - septembre 2001, tant au niveau de l'estimation des paramètres par calage automatique que pour le calcul du coefficient d'ajustement. La phase de démarrage permet notamment de ne pas subir l'influence de l'état initial du système.

En utilisant la configuration de GARDENIA avec un réservoir souterrain à sortie unique, nous avons testé les différents postes afin de chercher celui qui permettait le meilleur calage. La surface du bassin versant prise en compte est la surface totale mesurée du bassin versant. Les ETP sont calculées à partir des données météorologiques recueillies à Abbeville (seule station sans lacune).

	R	Coeff P en %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts en mois
Glisy	0,948	+ 1,98	- 3	50	3	322	7,904
Cottenchy	0,950	+ 10	1,29	51,3	3	340,7	7,812

Parmi les postes automatiques, dont les données sont mises à jour quotidiennement sur le serveur de Météo-France, le poste de Glisy donne la simulation la plus satisfaisante. Parallèlement, ceci a conduit à rechercher des données pluviométriques sur une plus longue période pour le poste de Cottenchy-Boves, à proximité de Glisy. La simulation qui en résulte est aussi satisfaisante que celle obtenue avec le poste de Glisy. Par ailleurs, la longueur de la chronique disponible pour ce poste permettra de simuler un plus grand nombre de possibilités lors de l'utilisation du modèle en mode prévision (fig. 29).

Le calage est satisfaisant dans les deux cas pour les ordres de grandeur. Il est inégal pour l'allure des courbes de décrue, les données de Glisy produisant les meilleurs résultats. Les résultats obtenus avec les autres postes pluviométriques sont présentés en annexe.

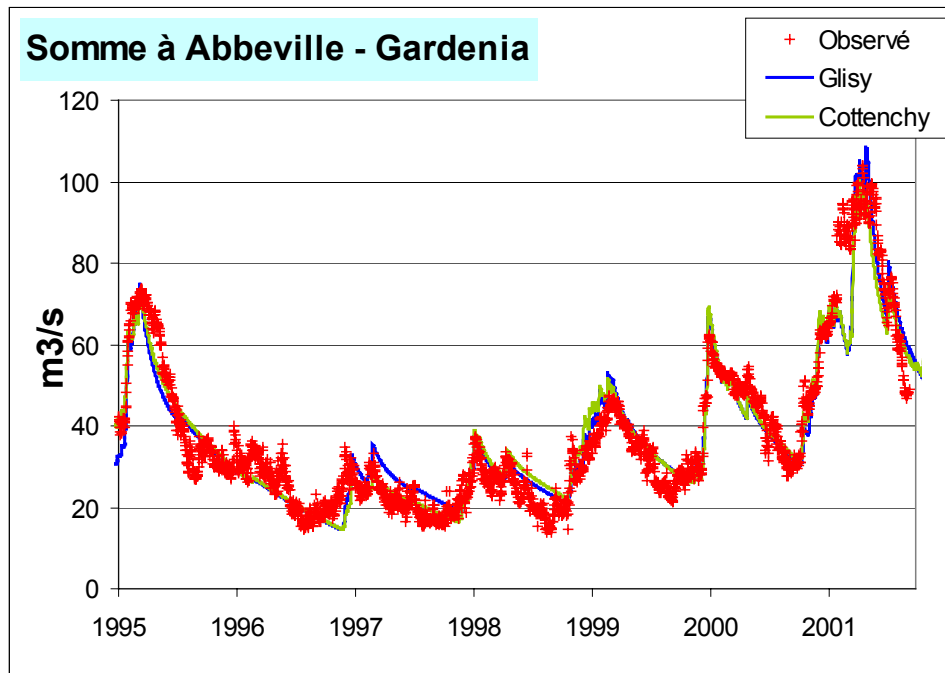


Fig. 29 - Restitution et calage des débits de la Somme à Abbeville au moyen des données pluviométriques recueillies à la station de Cottenchy-Boves et Glisy.

En deuxième étape, en conservant les pluies de la station de Cottenchy-Boves et les ETP d'Abbeville, on a testé les différents schémas de réservoirs proposés par GARDENIA afin d'améliorer la simulation (tabl. 4).

	R	débit simulé dernier jour en m ³	Coeff P en %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts1 en mois	T12 en mois ou seuil en mm	Ts2 en mois
4	0,919	51,25	2,34	- 8,02	45,00	2	280	7,82		
5	0,946	49,26	2,34	- 8,02	45,00	3	300	7,60	220	0,7

Tabl. 4 - Simulation du débit de la Somme à Abbeville : synthèse des paramètres utilisés.

4 Configuration à un réservoir souterrain à une sortie

5 Configuration à un réservoir souterrain à deux sorties

On rappelle que le débit observé le dernier jour est de 48,8 m³/s.

De façon générale, le modèle a du mal à reproduire la décrue (exemple simulation n° 4), le débit simulé redescend plus doucement que dans la réalité⁵. Seule la simulation n° 5

⁵ D'autres modèles globaux à réservoirs (GR4 et Amande) ont été testés sur cette station et ont conduit à la même difficulté avec une décrue moins rapide que dans la réalité.

permet de restituer une décrue aussi rapide que celle observée dans la réalité et limite ainsi la surestimation du débit observé début septembre 2001. Cette amélioration par rapport aux autres schémas est dû à l'activation de la deuxième sortie du réservoir souterrain, dont le temps de vidange est très court.

(Les résultats issus de cette phase de calage sont présentés en annexe).

La figure 30 compare les débits observés aux débits simulés en utilisant les jeux de paramètres des simulations 4 et 5.

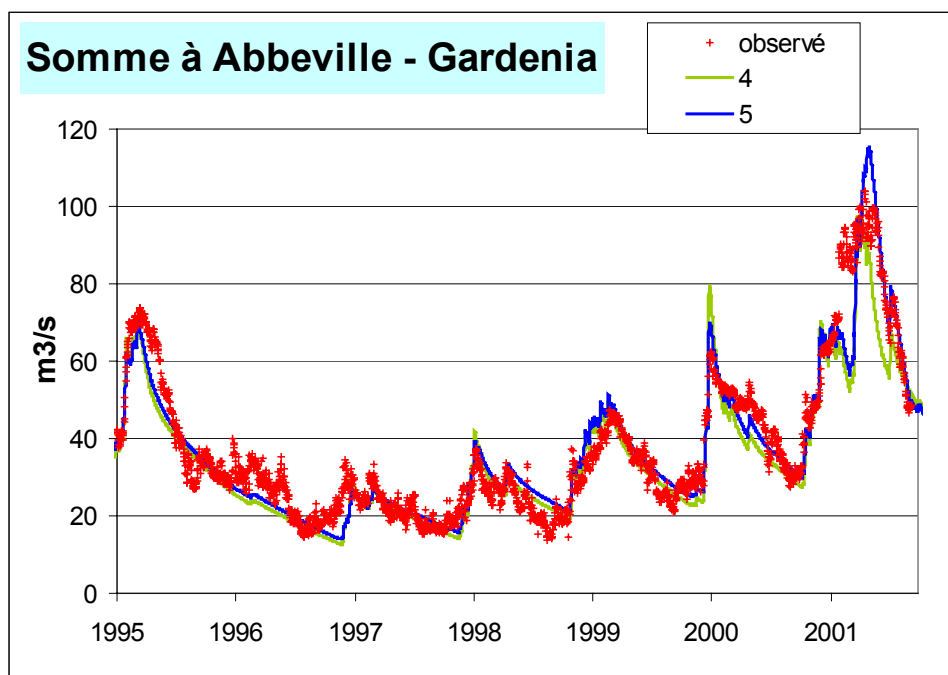


Fig. 30 - Simulations comparatives des débits de la Somme à Abbeville pour la période 1995-2001.

(au moyen des relevés météorologiques de la station de Cottenchy-Boves et prenant en compte deux configurations pour le réservoir profond du modèle (voir ci-dessus)).

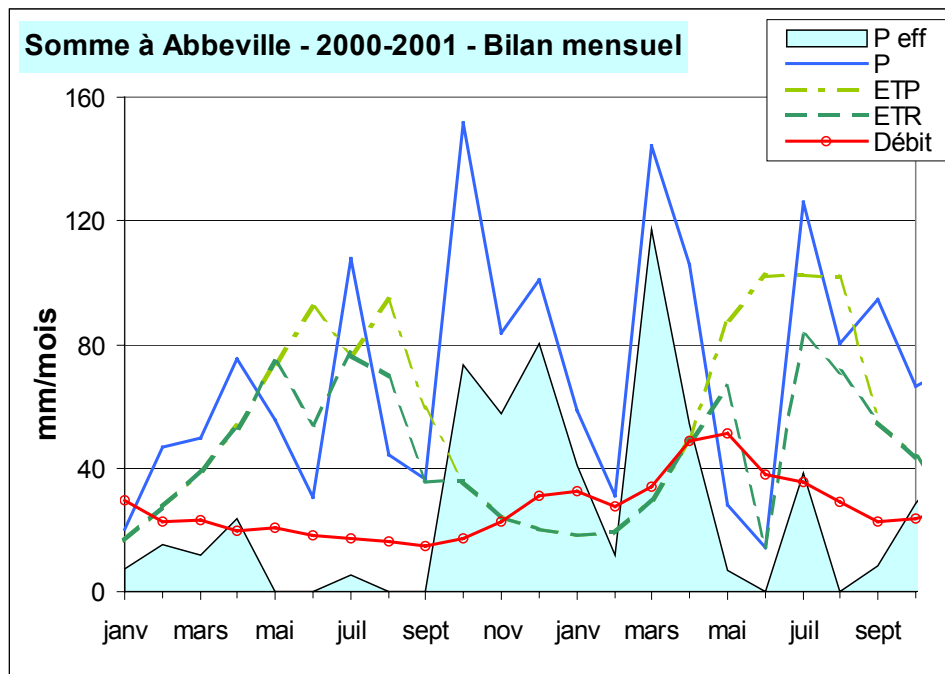
Les ETP étant disponibles à Abbeville à partir de 1964, nous avons effectué une simulation sur l'ensemble de la période 1964-2001, en prenant les paramètres obtenus ci-dessus (cf. détails en annexe 2). On obtient très souvent des débits simulés beaucoup plus élevés que les débits observés.

Si l'on fait un calage automatique sur la série de valeurs observées à partir de 1974 au lieu de 1995, on n'obtient pas un meilleur ajustement sur l'ensemble de la période et l'ajustement se dégrade pour les dernières années. Les débits sont ainsi fortement sous-estimés en 1995, 2000 et 2001.

Les paramètres de la simulation 5 seront donc conservés pour les travaux ultérieurs de simulations.

7.4.2. Bilan hydrologique du bassin calculé par GARDENIA

Une des applications du modèle global GARDENIA va consister à estimer le bilan hydrologique du bassin de la Somme à Abbeville. Si l'on considère les deux dernières années, on retrouve les pluies efficaces (Peff) importantes du printemps 2001, du mois de juillet (durant lequel ont eu lieu des inondations dans la région de Montdidier-Roye), et le redémarrage de l'alimentation de la nappe depuis octobre 2001 (fig. 31).



P : pluie
Peff : Pluie efficace
Débit : lame simulée écoulee à l'exutoire.

ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration réelle

Fig. 31 - Chronique des paramètres d'entrée du modèle de simulation des débits de la Somme à Abbeville, pour l'année 2001.

7.5. UTILISATION DU MODELE EN MODE PREVISION

7.5.1. Démarche retenue

39 cycles pluviométriques ont été reconstitués en utilisant les pluies mesurées à Cottency sur la période (1962-2001).

39 séries de débits simulés ont été reconstituées à partir de ces 39 séries pluviométriques, en conservant les valeurs des paramètres de GARDENIA obtenues pendant la phase de calage.

Ces 39 cycles ont permis de générer des séries statistiques qui répondent à des probabilités d'occurrence plus ou moins élevées en vue de simuler des scénarios de type « année humide » à « année sèche » pour 2002.

Les séries de statistiques sont alors traitées pour extraire la médiane et les centiles 10, 20, 80 et 90 %, que l'on peut ensuite traduire sous forme de probabilité de dépassement.

Notons que parmi ces 39 années, les trois dernières sont particulièrement pluvieuses et de nature à fausser l'approche statistique. Deux calculs de probabilités ont été testés en intégrant ou non les trois années humides. Les résultats ont été retranscrits sous la forme de moyennes mobiles par tranches de cinq jours.

7.5.2. Résultats obtenus

- Simulations des débits de la Somme exprimés en probabilités de dépassements, obtenues en conservant la totalité des 39 cycles hydrologiques

Le débit étant encore relativement élevé en novembre 2001 (autour de 55 m³/s), la probabilité d'atteindre, au début de l'année 2002, des débits de l'ordre de 100 m³/s reste assez élevée de l'ordre de 10 % (fig. 32).

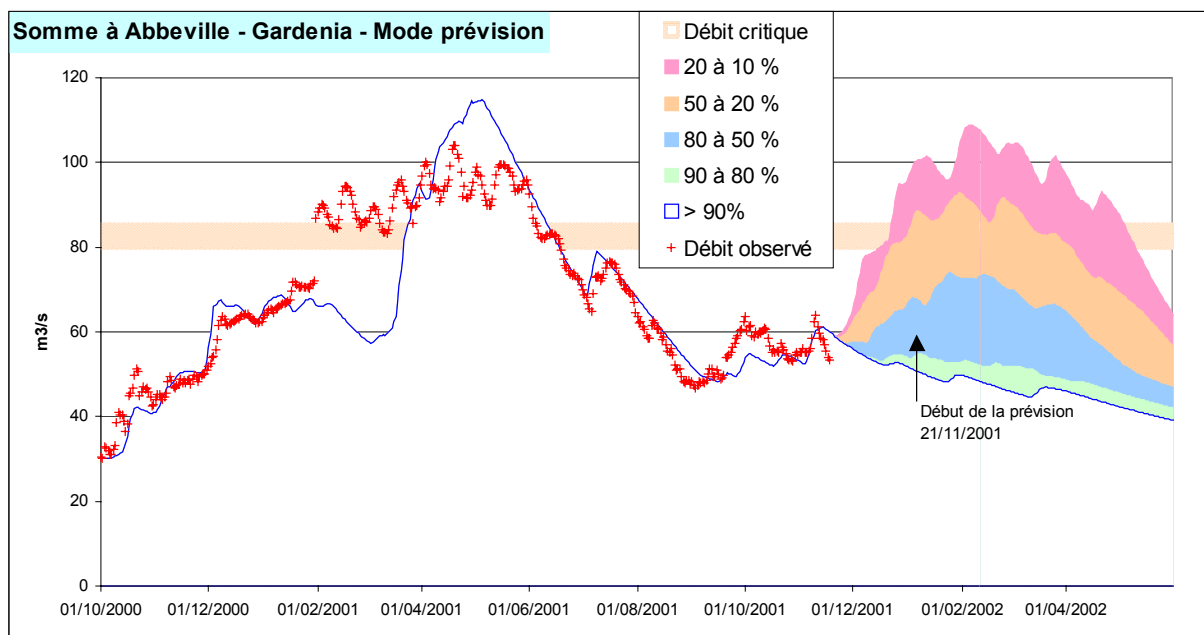


Fig. 32 - Simulation en mode « prévision » à compter du 21/11/2001.

La simulation prend pour référence la série de 39 ans (1962-2001) incluant les années humides. Au-delà du 21-11-01 il exprime les probabilités de dépassement pour différents scénarios de pluies à venir.

- Simulations des débits de la Somme exprimés en probabilités de dépassements, obtenues en éliminant les trois dernières années humides (36 cycles hydrologiques).

La figure 33 correspond à une série statistique corrigée (en excluant les séries correspondant aux simulations réalisées à partir des années observées 1998-1999, 1999-2000, et 2000-2001). La modification est toutefois peu sensible sur les débits à Abbeville. La principale différence porte sur la durée de la crue qui serait un peu moins longue.

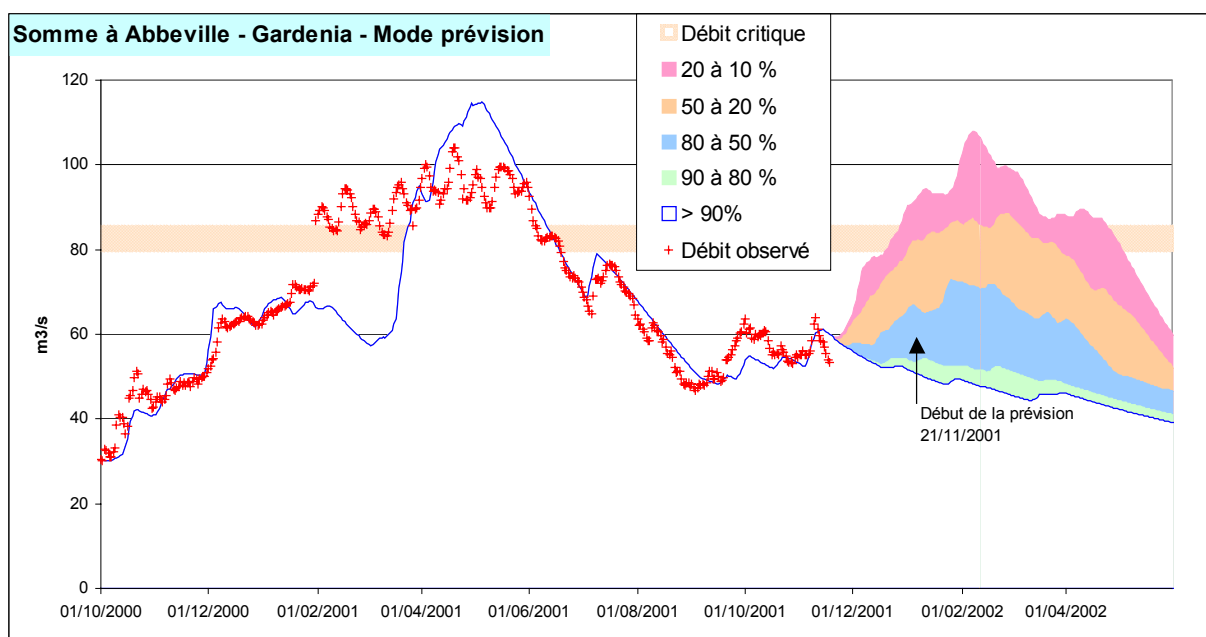


Fig. 33 - Simulation en mode « prévision » à compter du 21/11/2001. Probabilité de dépassement obtenues en excluant les années exceptionnelles.

Cette simulation est analogue à celle que traduit la figure 32 à la différence près que l'on retire de la série statistique de référence les trois dernières années, excessivement pluvieuses, qui conduisaient à majorer sensiblement les lames d'eau pour 2000.

7.6. SYNTHÈSE DES RESULTATS

D'une manière générale, les simulations qui ont été entreprises montrent que l'on parvient à reconstituer avec une précision satisfaisante les débits qui ont été observés sur les principaux cours d'eau, sur la Somme en particulier, ainsi que sur les grandes nappes de la craie.

Les simulations prédictives appliquées au débit de la Somme montrent que le débit critique de 80 m³/s sera atteint voire dépassé si les pluies à venir correspondent à des fréquences de retour quinquennales (1 année sur 5) ce qui est loin d'un scénario d'exception.

Pour une année strictement moyenne (50 % ou 5 années sur 10) le débit de la Somme atteindra vraisemblablement 70 m³/s.

Si l'hiver est celui d'une année quinquennale sèche, le débit de la Somme suivra une décroissance générale qui s'est amorcée dans le courant de l'été 2001.

Les différents scénarios testés, du plus sec jusqu'à l'apparition d'un cycle décennal humide, conduisent à une situation en automne 2002 qui sera plus basse que la situation à l'automne 2001. Seule l'éventualité d'une nouvelle année exceptionnelle entretiendrait l'état exceptionnellement haut des nappes et des débits de cours d'eau de l'automne 2001.

8. Simulations de contrôle

8.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Le modèle GARDENIA est dit paramétrique en ce sens qu'il impose une structure -réservoirs emboîtés- et des paramètres liés aux éléments de cette structure (des constantes de temps notamment). Les caractéristiques hydrodynamiques ne sont pas renseignées ce qui lui confère sa nature de modèle global.

Il a paru intéressant de confronter les résultats obtenus avec GARDENIA avec des résultats issus d'un calcul affranchi de paramètres descriptifs. Le logiciel TEMPO est de ce type. Il associe uniquement des signaux variables dans le temps : un signal d'entrée, la pluie et des signaux de sortie parmi lesquels les débits de cours d'eau. C'est un outil par conséquent statistique. La comparaison des résultats permet de conforter la modélisation globale dans son ensemble.

8.1.1. Présentation du modèle TEMPO

Le modèle TEMPO présente une grande diversité de structures possibles. Pour le cas présent, il est constitué de deux éléments en cascade.

Le premier élément est un modèle « pluie/niveau piézométrique » qui comporte un argument d'entrée, la pluie efficace calculée à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle, et un argument de sortie, un niveau piézométrique choisi comme représentatif de la nappe considérée.

Le second élément comporte deux entrées, la pluie efficace calculée et le niveau piézométrique de la nappe, et une sortie : un débit de cours d'eau. Dans le cas présent la nappe est la nappe de la craie et le débit de cours d'eau est le débit de la Somme à Abbeville.

L'utilisation de ces deux modèles en cascade doit permettre de fiabiliser la prévision du débit de la Somme sur un délai de 50 jours à compter de la dernière mesure enregistrée.

La simple observation du niveau de la nappe permet une assez bonne prévision du débit de la Somme à 50 jours car il existe une forte dépendance entre la situation de la nappe au jour 1 et le débit du cours d'eau au jour 50.

La pluviosité au cours de ce laps de temps n'intervient que pour une faible part dans l'estimation du débit prévu. Au-delà de 50 jours, le modèle en cascade fonctionne comme un modèle pluie - débit et s'appuie sur le niveau piézométrique qui a été calculé.

Le premier élément du modèle est destiné à expliquer et à prévoir le comportement de la nappe de la craie à partir de la pluviométrie et de l'ETP. Il est non linéaire : en effet la craie présente une double porosité, porosité de fractures et porosité de matrice. La recharge de la nappe résulte de deux phénomènes concomitants, une percolation rapide à travers les fractures conductrices, et une percolation lente à travers le réseau matriciel.

Le transfert rapide est non linéaire. Il pourrait être une des explications des montées très rapides du niveau piézométrique de la nappe observée après certains épisodes de pluie. Une autre explication fait intervenir une contribution de la zone non saturée qui surmonte la nappe.

Le transfert lent est linéaire et comporte à son tour deux arguments d'entrée, la pluie efficace calculée à partir de la pluviométrie et de l'ETP, et la charge hydraulique de la nappe. Le niveau piézométrique est exprimé par rapport au niveau des basses eaux qui fixe le gradient hydraulique. L'argument de sortie est le débit de la Somme.

Les deux éléments du modèle sont calculés par inversion : il s'agit donc d'un modèle inverse. Ces éléments sont définis grâce à :

- leur fonction de transfert : fonction de transfert linéaire Γ_l et non linéaire Γ_r pour le premier élément, et fonction de transfert à deux entrées pour le second ;
- le seuil de pluie efficace $\Omega(t)$ ou réserve utile des sols calculée à partir de la pluie et de l'ETP ;
- la fonction $\alpha(t)$ donnant la contribution de la pluie efficace participant au transfert rapide.

En mode prévision, le modèle simule le comportement de l'hydrosystème et fait appel à un générateur -statistique- de pluie et d'ETP.

Ce générateur utilise des fonctions caractéristiques de la pluie et de l'ETP établies à partir d'observations : pour la pluie, il s'agit de la probabilité d'occurrence des hauteurs de pluie, de la pluviométrie moyenne annuelle, de la saisonnalité, des moments d'ordre 1, 2 et 3 et de l'auto-corélogramme des pluies.

Concernant l'ETP, ou plus exactement les écarts de l'ETP par rapport à la moyenne mensuelle, les arguments sont la probabilité d'occurrence des écarts, leur auto-corrélogramme, leurs moments d'ordre 1 à 3 et le corrélogramme croisé pluie/écarts de l'ETP (par rapport à la moyenne mensuelle).

Un algorithme permet ensuite de générer des séquences aléatoires de pluie et d'ETP en nombre arbitraire. Le calcul de la pluie efficace, en entrée des deux modèles de transfert, permet alors d'exprimer le débit de la Somme à partir du niveau piézométrique de la nappe de la craie (fig. 34).

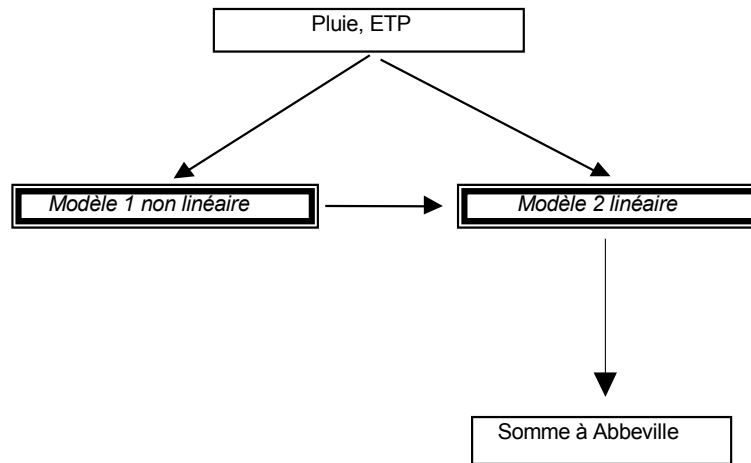


Fig. 34 - Schéma d'architecture du modèle inverse à deux éléments.

8.1.2. Modélisation inverse du niveau piézométrique de la nappe de la craie

Parmi les données issues de stations automatiques, la seule chronique de pluie suffisamment longue pour tirer parti de l'ensemble des chroniques de débit et de niveaux piézométriques est la pluie à Abbeville. Cette station ne peut à elle seule être représentative de l'ensemble du bassin. Par contre, l'utilisation conjointe de stations manuelles et automatiques proches permet d'obtenir de longues chroniques plus représentatives du bassin de la Somme. C'est le cas en particulier de la station d'Amiens - Glisy et de Bernaville. La chronique de pluie utilisée ci-après est constituée *pro-parte* des données fournies par la station manuelle d'Amiens, suivie depuis le 1^{er} janvier 1988, et des données fournies par la station automatique de Glisy. Les différents modèles sont calés à partir des pluies provenant de la station automatique de Glisy, puis validés en utilisant toute la chronique de pluie reconstituée à partir des deux stations.

Plusieurs piézomètres peuvent être utilisés pour modéliser les processus de crue par vidange gravitaire de la nappe de la craie. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le piézomètre 00463X0036 du bassin de l'Hallue et le piézomètre 00478X0002 du bassin amont de la Somme (situé en rive gauche de la Somme, près de Péronne).

Le pas d'échantillonnage utilisé pour les calculs est de 10 jours. Un suréchantillonnage n'apporterait rien car la fréquence d'échantillonnage des niveaux piézométriques est actuellement mensuelle. La période utilisée pour caler les modèles est 1992-2001.

La figure 35 illustre la restitution par simulation des fluctuations de niveau sur l'ouvrage 00463X0036 et permet d'apprécier visuellement la précision de la restitution par comparaison avec les débits observés.

Le seuil de pluie efficace $\Omega(t)$, la contribution de la pluie efficace au transfert rapide $\alpha(t)$ et les réponses impulsionnelles sont représentés respectivement sur les figures 36 à 38.

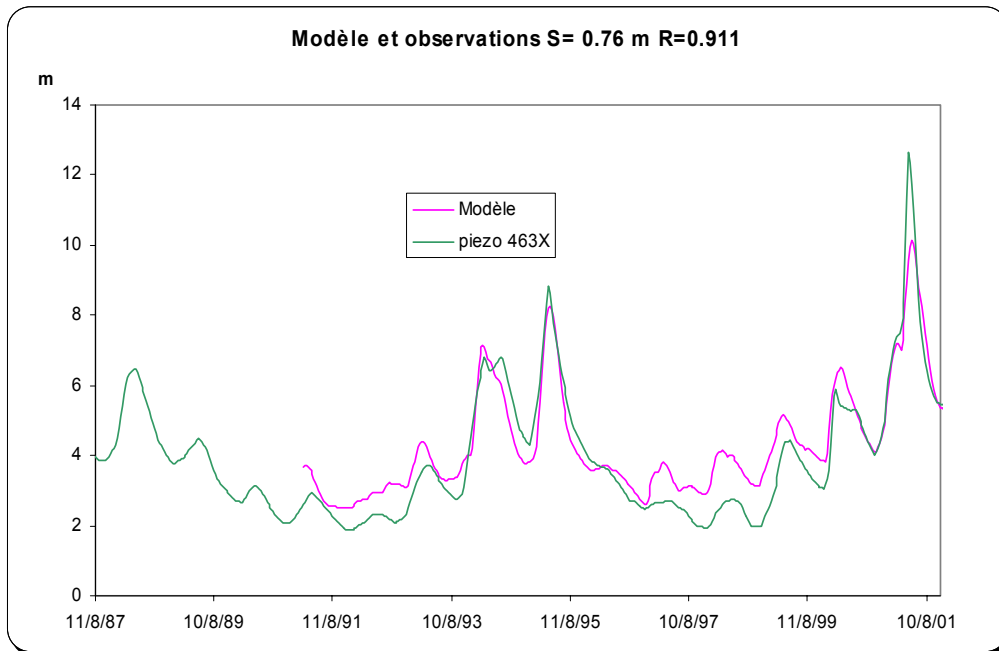


Fig. 35 - Observation et simulation des évolutions du niveau piézométrique au droit de l'ouvrage 00463X0036.

Le niveau de base (cote « zéro » du graphique) équivaut à la cote NGF 38,5 m. S est l'écart-type estimé à partir des écarts entre les observations et le modèle. R est la racine carrée du critère de Nash.

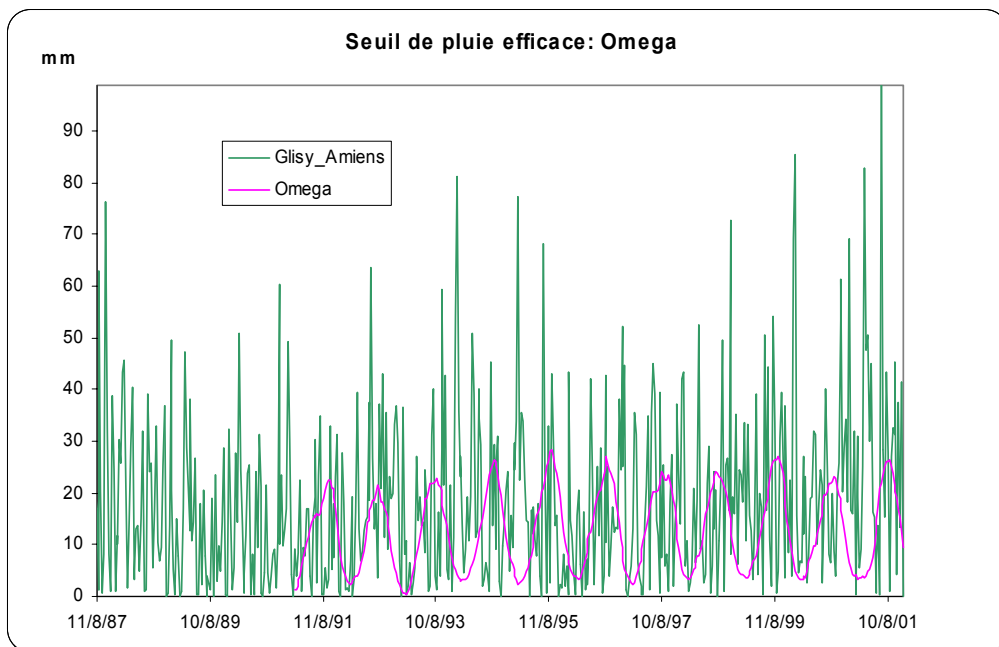


Fig. 36 - Représentation de la distribution des pluies efficaces de la zone Glisy → Bernaville.

La pluie efficace est calculée à partir du seuil $\Omega(t)$ de telle sorte que : pluie efficace = pluie - $\Omega(t)$ si pluie > $\Omega(t)$, et pluie efficace = 0 si pluie < $\Omega(t)$

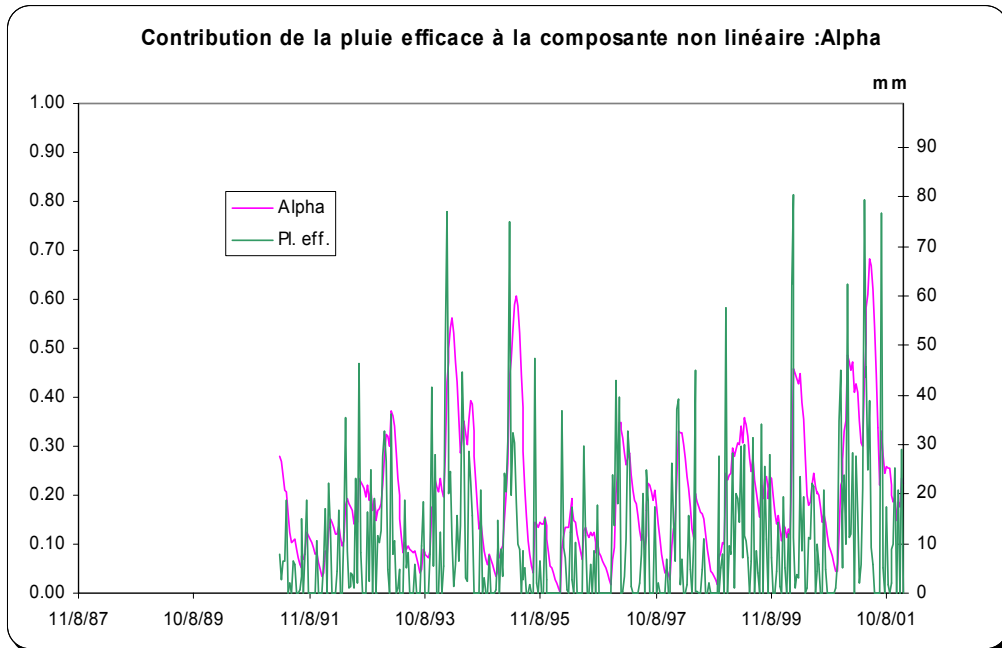


Fig. 37 - Expression de la fraction de la pluie efficace qui participe au transfert rapide via les fractures du réservoir aquifère.

La fonction $\alpha(t)$ (sans dimension) exprime la proportion de la pluie efficace participant au transfert rapide.

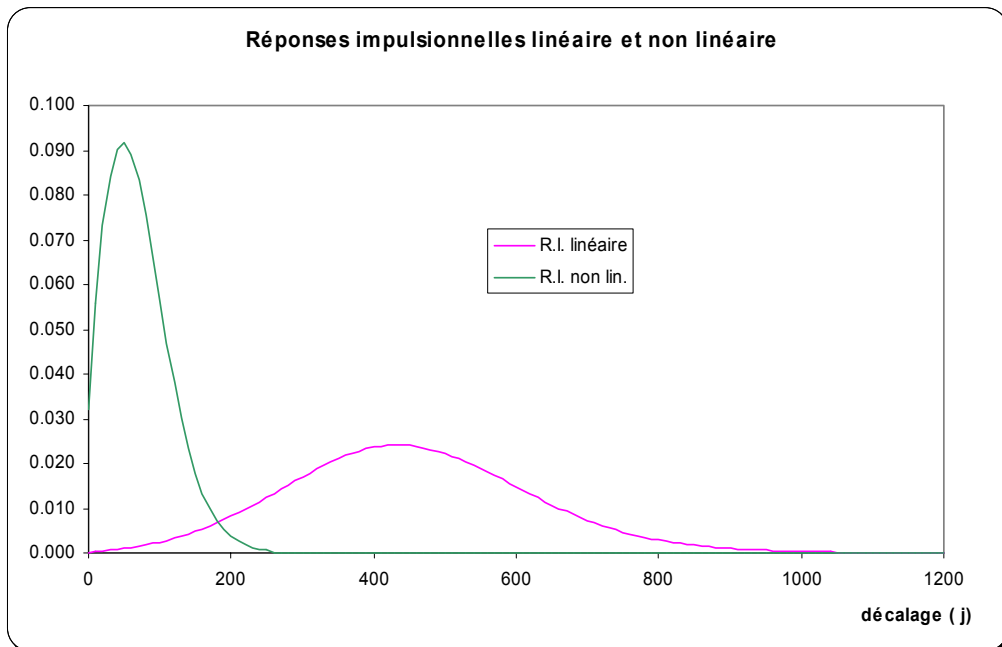


Fig. 38 - Exemples de réponses impulsionnelles linéaires et non linéaires.

La réponse impulsionnelle non linéaire exprime, au moins à son début, un transfert de pression dans la zone non saturée. La durée est ici de 250 jours. La réponse impulsionnelle linéaire exprime un transfert fortement différé et suppose l'existence d'une infiltration et d'une circulation lente dans l'aquifère.

8.1.3. Modélisation inverse du débit de la Somme à Abbeville.

La figure 39 permet de comparer les débits simulés et les débits observés de la Somme à Abbeville. On observe une légère surestimation du débit de crue par le modèle qui pourrait traduire un biais introduit par la courbe de tarage de la station hydrométrique d'Abbeville au droit de laquelle aucun jaugeage n'a été réalisé pour un débit dépassant 80 m³/s.

L'aire d'infiltration, introduite dans le modèle, qui permet le calage optimum, à savoir 3 600 km², est inférieure à la surface mesurée du bassin versant (5 400 km²).

Deux raisons peuvent être invoquées :

- les pluies présentent une forte variabilité spatiale en raison des reliefs, et les données à Abbeville sous-estiment la pluie totale sur le bassin versant ;
- la surface du bassin qui contribue effectivement à l'alimentation de la nappe est inférieure à la surface du bassin mesurée à partir du MNT. Ce point ne peut être résolu à ce stade.

La décomposition du débit de la Somme en deux composantes relatives au ruissellement de surface (composante pluie) et à la vidange gravitaire de la nappe de la craie (fig. 40) montre très clairement la contribution de la nappe aux phénomènes de crue. La composante « ruissellement » est très brève et n'intervient que dans l'initiation du processus de crue. Par la suite, l'accroissement du débit résulte exclusivement de la vidange de la nappe.

Le phénomène de crue exceptionnelle de 2001 est amplifié par la concomitance du ruissellement et de la vidange de la nappe de la craie alors que ces phénomènes étaient différés lors des crues de 1994 et 1995.

Là encore, le modèle inverse repose sur le calcul du seuil $\Omega(t)$ de pluie efficace (non représenté) et de la R.I. (fig. 41). La réponse impulsionnelle correspondant à un système à deux entrées (la pluie efficace à Glisy - Amiens et le niveau piézométrique de la nappe de la craie du bassin de l'Hallue) est relativement courte. La décroissance est rapide après 50 jours.

La fonction $\alpha(t)$ n'est pas calculée ici car le modèle est linéaire : toute la pluie efficace est transférée linéairement selon deux modes de transport, le ruissellement et la vidange de la nappe.

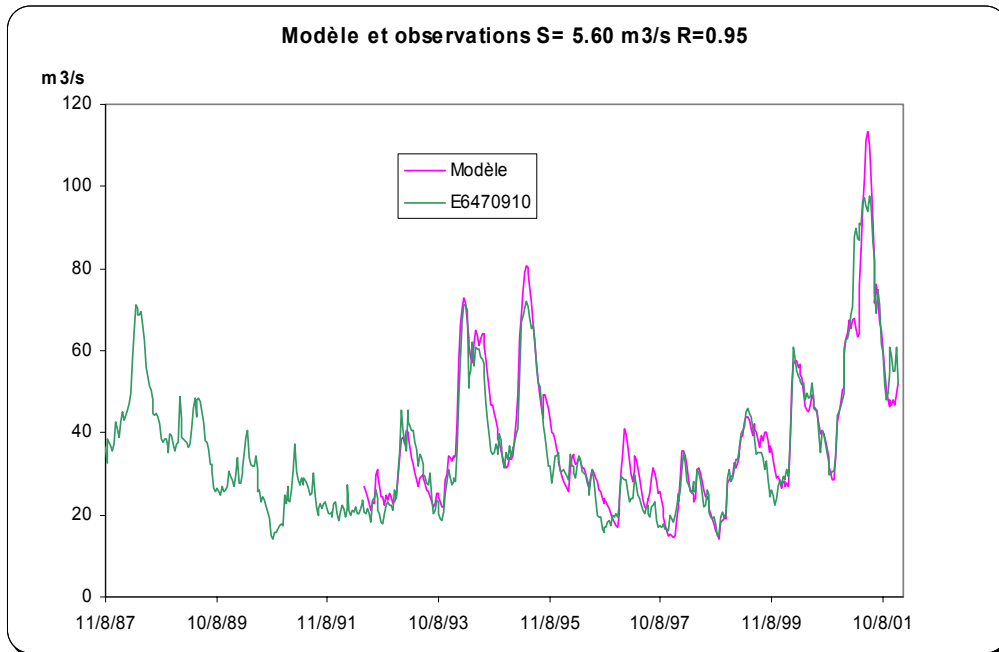


Fig. 39 - Simulation du débit de la Somme à Abbeville pour la période 1987-2001.
L'ajustement est satisfaisant ($R = 0,95$) bien que le débit de la crue du printemps 2001 soit légèrement surestimé. Un débit de 110 à 120 m^3/s corrobore les déductions précédentes (Rapport P. Hubert, juillet 2001).

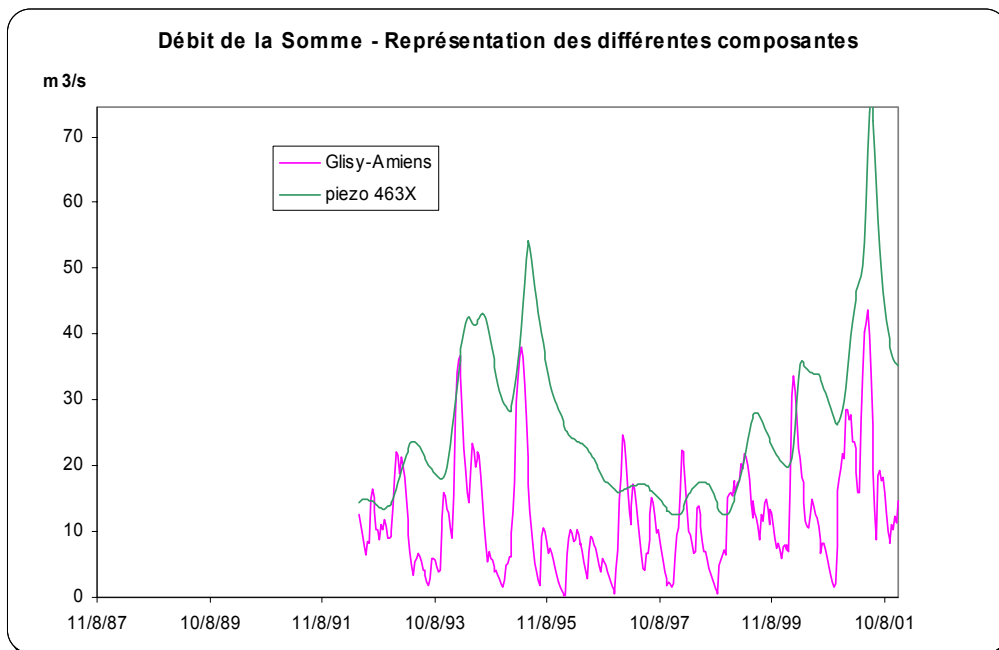


Fig. 40 - Analyse du débit de la Somme à Abbeville.
Le débit de la Somme comporte deux composantes : le ruissellement (courbe en rouge, valeurs issues des pluies à Glisy) et la vidange gravitaire de la nappe de la craie (courbe en vert, l'ouvrage de référence est le piézomètre 00463X0036 du sous-bassin de l'Hallue).

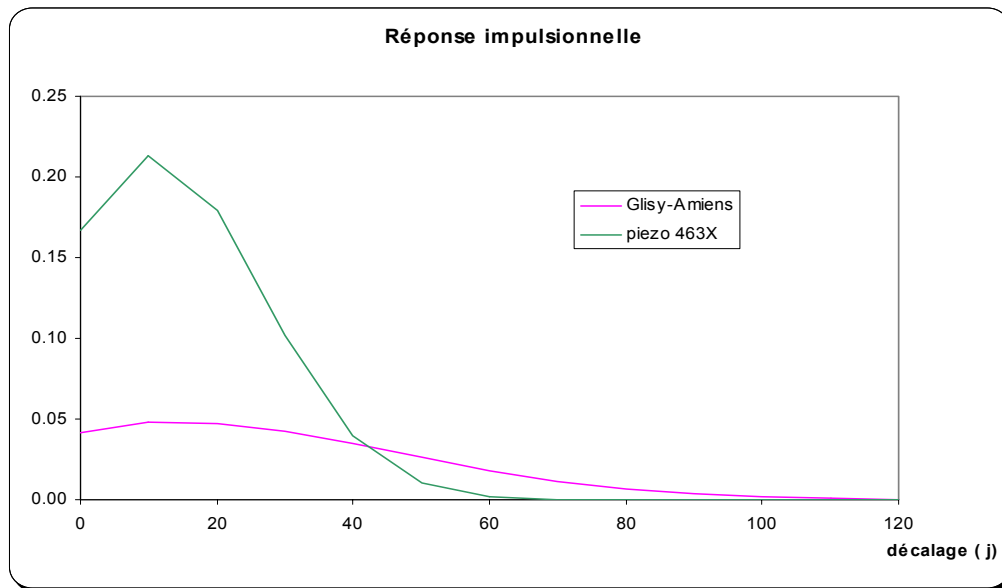


Fig. 41 - Réponse impulsionnelle du modèle à deux entrées restituant le débit de la Somme à Abbeville.

Ces réponses impulsionnelles sont courtes, elles décroissent rapidement après 50 jours.

8.2. VALIDATION DU MODELE SUR LA PERIODE 1980 - 2001

Les modèles ayant été calé sur la période 1992-2001 vont pouvoir être exploités sur la période 1980-2001 de manière à tester le réalisme des solutions obtenues (fig. 42, 43, 44).

Ces modèles utilisent les pluies d'Amiens - Glisy, ainsi que les niveaux piézométriques relevés sur l'ouvrage 00463X0036 situé dans le sous-bassin de l'Hallue (exprimé par rapport au niveau de référence 38,5 m).

Les écarts entre le modèle et les observations apparaissent essentiellement lors des périodes dont la pluviométrie est déficitaire (1992, 1997) et lors de l'épisode de crue exceptionnelle (2001). Le coefficient de corrélation passe de 0,91 (calage) à 0,85.

Le débit de la Somme est représenté sur les figures 43 et 44. Dans le premier cas, le niveau piézométrique utilisé par le premier élément du modèle en cascade est le niveau observé, alors que dans le second cas ce niveau est calculé.

Le coefficient de corrélation reste inchangé (respectivement 0,89 et 0,88). Les écarts observés entre le niveau piézométrique et le modèle (fig. 42) ont peu d'influence sur le calcul du débit de la Somme.

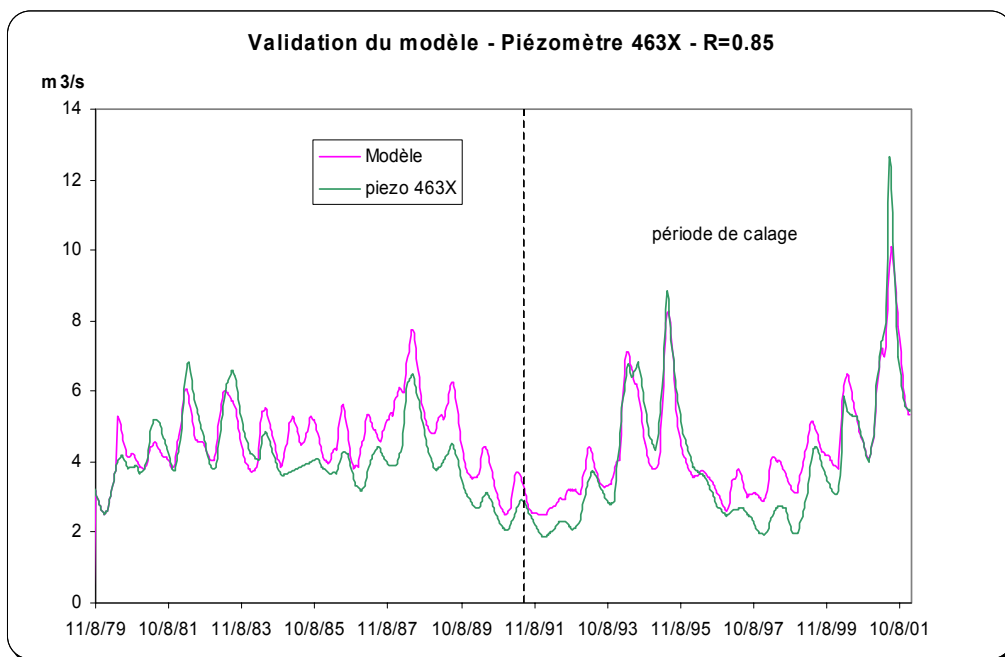


Fig. 42 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Piézomètre 463X - $R = 0,85$.
Le niveau piézométrique est utilisé dans le premier élément du modèle en cascade.

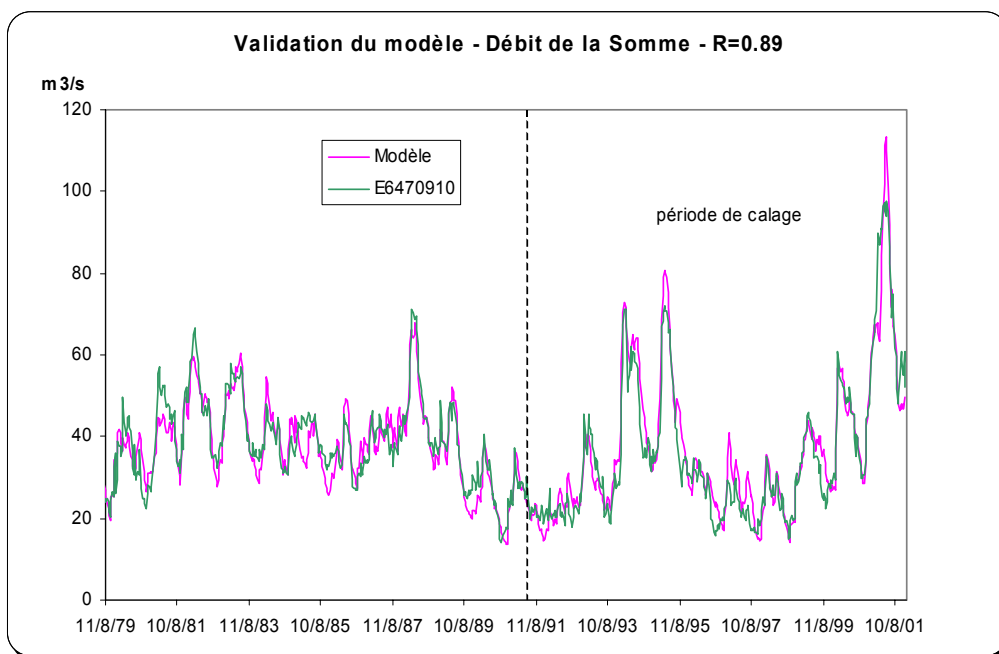


Fig. 43 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Débit de la Somme - $R = 0,89$.
Le niveau piézométrique utilisé par le premier élément du modèle en cascade est le niveau observé.

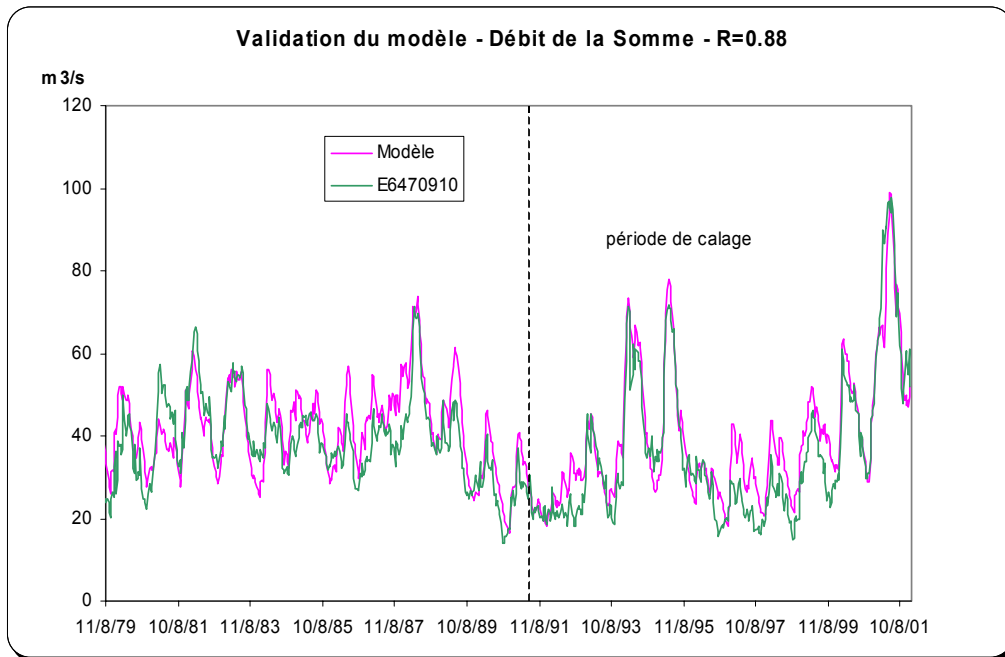


Fig. 44 - Validation du modèle sur la période 1980-2001 - Débit de la Somme - $R = 0,88$.
Le niveau piézométrique utilisé par le premier élément du modèle en cascade est maintenant calculé.

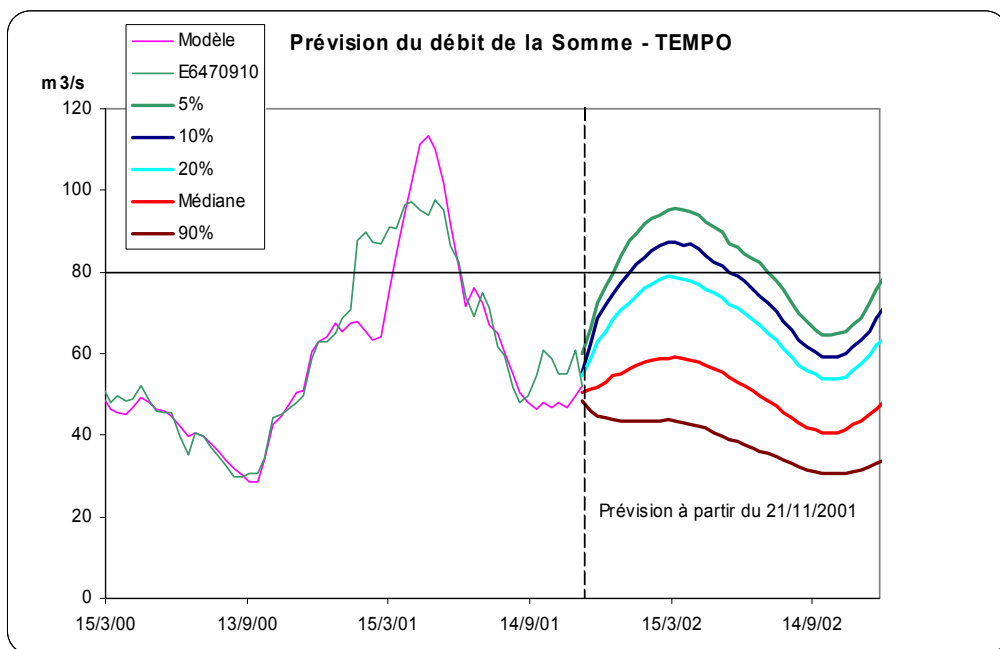


Fig. 45 - Prévision du débit de la Somme à Abbeville en hautes eaux 2001-2002.
Le modèle permet de représenter les différentes probabilités d'évolution des débits. Chaque chronique des débits correspond à une distribution statistique des pluies selon une probabilité d'occurrence donnée : 10 %, 20 %, 50 %, 90 %. Représentation des quantiles (4 096 simulations).

8.3. LES PREVISIONS DU DEBIT DE LA SOMME

La prévision des événements exceptionnels nécessite un grand nombre de réalisations. Une manière de représenter la probabilité d'occurrence des débits est l'utilisation des quantiles (fig. 45). Ces quantiles représentent, en fonction du temps, l'enveloppe inférieure des débits dont la probabilité d'occurrence est inférieure à 5 %, 10 %, 20 %.

La probabilité d'occurrence d'un débit de crue supérieur ou égal à $80 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2002 est de l'ordre de 18 à 20 %, la probabilité maximale étant atteinte à la mi-mars 2002.

8.4. ANALYSE DES RESULTATS DU MODELE TEMPO, ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS DES MODELES GLOBAUX

Le modèle TEMPO à deux entrées, s'appuie sur la chronique des pluies et des fluctuations piézométriques. En mode prévision, il permet de simuler des fluctuations de niveaux ou de débits de manière fiable sur un délai de 50 jours. Au-delà de 50 jours les simulations nécessitent le calcul du niveau piézométrique à partir de séquences de pluies hypothétiques et la non-linéarité des phénomènes observés amplifie la variabilité des débits prévus.

Le modèle inverse conduit à une qualité de restitution des débits antérieurs à 2001 comparable à la qualité des simulations GARDENIA. En mode prévision, il fournit des scénarios d'évolution du débit de la Somme comparable à ce qu'apportent les simulations par GARDENIA. En observant l'amplitude des fluctuations, l'ordre de grandeur des débits est sensiblement le même à probabilité d'occurrence égales, ce qui donne une garantie supplémentaire aux simulations prédictives.

Au 21 novembre 2001, la probabilité d'occurrence d'un débit de crue de la Somme supérieur ou égal à $80 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2002 est de l'ordre de 20 % la probabilité maximale étant atteinte à la mi-mars 2002.

Les écarts de calage sur les débits de la Somme pour la période simulée sont de même ordre de grandeur avec les approches méthodologiques propres à chacun des modèles, ce qui tend à confirmer la justesse des paramètres pris en compte par GARDENIA.

Pour la période de hautes eaux 2000-2001, un défaut de calage existe pour l'un et l'autre modèle sous forme d'un retard du palier de hautes eaux simulées et d'une surestimation du pic de hautes eaux. Ce décalage ne se présente que sur le débit de la Somme. Le même décalage s'observe sur les deux modèles. Il laisse entrevoir une hypothèse qui ne peut être prise en compte par les seuls écoulements en milieu saturé (cf. rap. BRGM RP-51030-FR) et qui implique une contribution possible de la zone non saturée du sol. On est ici devant une indétermination dans la mesure où il devient nécessaire de procéder à des mesures physiques pour contrôler les hypothèses que les modèles ont fait apparaître.

Les deux modèles, exploités en mode « prévision » sont valides. En exploitation de routine, un seul sera conservé -GARDENIA-. Il devra être alimenté par des séries de données actualisées, au moins au pas de temps décadaire.

9. Modèle maillé du bassin de la Somme

Pour analyser -puis prévoir- la contribution de chaque sous-bassin ou partie de sous-bassin aux débits de la Somme, qui constitue le principal exutoire du système hydraulique, il est nécessaire de recourir à une approche analytique qui consiste à décrire le milieu souterrain et le milieu de surface, et c'est le but du modèle maillé qui a été réalisé. La description du bassin versant dans son ensemble en vue d'une modélisation déterministe (analytique) conduit à préparer des jeux de données très denses qui couvrent l'ensemble du bassin. Les données recueillies sur le terrain sont en général ponctuelles : la pluie en un point, la perméabilité de la nappe au droit d'un forage, etc. Il faut donc procéder par interpolation pour couvrir la zone d'étude, par conséquent, s'appuyer sur la totalité des données disponibles.

- **Le logiciel utilisé**

Le logiciel MARTHE qui est utilisé a été développé au BRGM (actuellement version 6.1 d'avril 2001). C'est un logiciel complet de modélisation hydrodynamique pouvant traiter toutes les configurations d'écoulements justifiables de la méthode des différences finies : en 2 dimensions (plan ou coupe verticale), en 3 dimensions ou en multicouche, en zone saturée et/ou en zone non saturée, en régime permanent ou en régime transitoire. MARTHE permet aussi de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes. Des problèmes liés à la densité des fluides et à leur situation thermique peuvent être traités et couplés à l'hydrodynamique.

- **Représentation numérique**

Le modèle a été construit suivant un schéma aux différences finies. Il est du type monocouche. La couche est représentée en plan par un maillage constitué de mailles carrées de 500 m \times 500 m et discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la couche (dans ce cas la topographie) et la face inférieure au mur de la formation (nappe de la craie).

9.1. DONNEES CLIMATIQUES COMPLEMENTAIRES UTILES POUR LE MODELE MAILLE

Des séries pluviométriques supplémentaires ont été recueillies auprès du centre départemental de Météo France afin d'appréhender la variabilité spatiale des pluies sur le bassin.

Ces postes sont les suivants :

<i>Localité</i>	<i>X en L2</i>	<i>Y en L2</i>	<i>1^{ère} valeur</i>
Candor	640,3	2 514,6	16/11/1970
Pontru	663,2	2 545,1	01/01/1961
Crèvecœur	581,7	2 520	01/01/1962
Rouvroy-les-Merles	602,5	2 517,1	01/04/1989
Morvillers	562,4	2 530,1	01/01/1983
Crouy-Saint-Pierre	584,1	2 552,2	01/01/1971
Talmas	599,7	2 559,6	01/01/1961
Vaudricourt	543,5	2 567	01/02/1993
Villers	640,5	2 541,2	01/01/1961

Les différentes composantes du bilan hydrologique sont calculées par le modèle en fonction des entrées climatiques (pluie et ETP) et de paramètres liés au sol.

9.1.1. Répartition spatiale des précipitations

Une carte de répartition des cumuls annuels (valeurs moyennes sur la période 1971-2001) fait apparaître un certain nombre de traits caractéristiques de la distribution des pluies sur le bassin (cf. fig. 17) :

- une diminution des pluies en s'éloignant de la cote : de 800 mm à 700 mm ;
- des précipitations importantes sur les reliefs : jusqu'à 850 mm en rive droite, et 880 en rive gauche ;
- des précipitations plus faibles que sur l'ensemble du bassin au niveau de la vallée de l'Avre et du Santerre.

En s'appuyant sur les isohyètes tracées sur la figure 17, on aboutit à un découpage du bassin en huit zones météorologiques. Dans une zone météorologique, le modèle considérera que les mailles reçoivent toutes les mêmes précipitations.

Pour valider ce découpage, nous avons comparé les pluies mensuelles sur la période 1990-1992 mesurées aux différents postes disponibles. Dans les zones 3, 5, 6 et 7, les courbes des pluviomètres regroupés sont, comme attendu, très proches.

En ce qui concerne les autres zones :

- zone 1 : cette zone est d'extension limitée (pointe nord-ouest du bassin), elle est couverte par le poste de Vron ;
- zone 2 et 4 : on ne dispose pas de poste dans cette zone pour le moment, on prend les précipitations mesurées à Vron pour la zone 2 et 97 % des précipitations mesurées à Vron pour la zone 4 ;
- zone 8 : on ne dispose pas de poste dans cette zone pour le moment, on prend 95 % des précipitations mesurées à Glisy.

Nous conserverons donc les zones extraites de cette carte dans le modèle et retiendrons comme poste représentatif de ces zones les postes repris ci-après :

Zone	Poste météo
1	Vron
2	Vron
3	Bernaville
4	Vron modifié (2)
5	Abbeville
6	Villers
7	Glisy
8	Glisy modifié (3)

9.1.2. Répartition des évapotranspirations potentielles (ETP)

Pour ces premières simulations, seules les ETP d'Abbeville sont utilisées, car la chronique est complète sur toute la durée. Dans une étape ultérieure, on étudiera la variabilité des ETP sur le bassin, et si nécessaire on utilisera les ETP mesurées aux sept autres postes après avoir comblé les lacunes.

- **Répartition spatiale des paramètres de calcul du bilan hydrique**

Le module de calcul du bilan hydrique au sein de Marthe est basé sur le modèle GARDENIA. Ses paramètres sont : la réserve utile Rumax, le niveau d'équi-répartition ruissellement/infiltration Ruiper, et le temps de percolation Thg, qui dans le modèle maillé traduira le temps de traversée de la zone non saturée.

On rappelle ici les valeurs obtenues pour ces trois paramètres dans la modélisation globale :

Station	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm
Hallue	250	0,31	4 969
Avre *	32	6	828
Nièvre	83	2,79	797
Selle	41	3,0	532
Somme	45	3	300
00463X0036	68	0,19	573
00464X0013	131	0,15	336
00478X0002	77	0,15	500
00611X0035	80	0,4	336
00636X0020	41	2,82	591
00625X0002	80	0,15	575
00813X0043	56	9,96	609

Le calage du modèle en régime permanent nécessite une estimation des pluies efficaces réparties sur le bassin. Le contrôle du calcul des pluies efficaces par les valeurs du paramètre Rumax (fig. 46) (cf. schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA, chapitre 7).

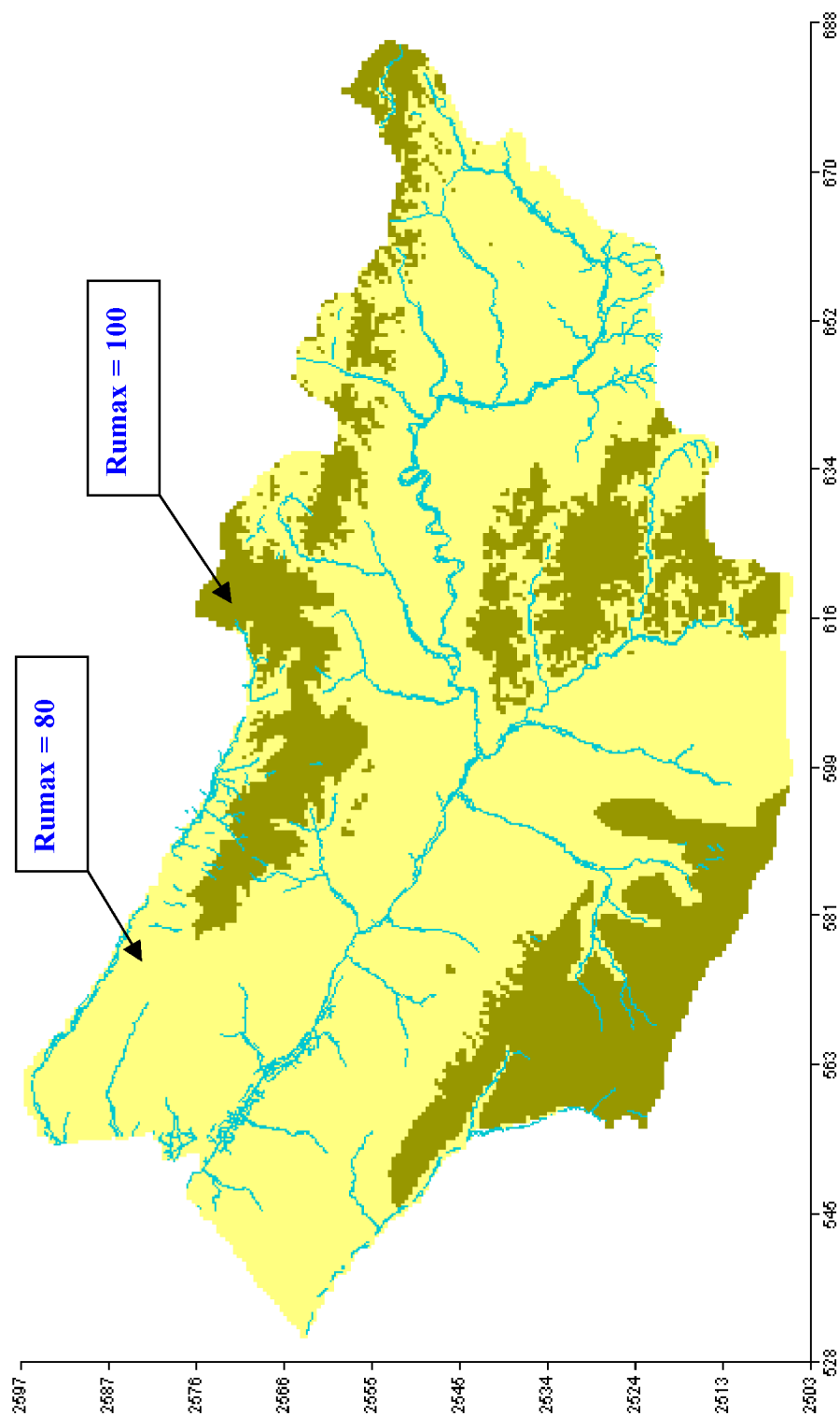


Fig. 46 - Délimitation de zones de valeurs de Rumax utilisées pour le calcul du bilan hydrique.

Ce découpage lié à la nature et à l'épaisseur du sol pourrait être affiné en réalisant des simulations complémentaires avec le modèle global pour combler les endroits encore peu couverts, notamment au niveau du bassin de la Somme amont.

Les valeurs de Rumax obtenues varient de 40 à 250 mm, traduisant une hétérogénéité du recouvrement de surface du bassin avec des possibilités plus ou moins importantes de stockage de l'eau dans le sol, que l'on pourrait relier notamment à l'épaisseur des limons. Les valeurs sont ainsi plutôt élevées sur les reliefs des rives gauche et droite dans le bassin de la Somme aval (80, 80, 130 et 250).

Les autres points ont des valeurs relativement faibles (40 à 77).

Sur le plateau du Santerre (entre la vallée de l'Avre, celle de la Somme et de l'Ignon), les plateaux sont recouverts d'une importante épaisseur de limons.

Par ailleurs, les collines entre Somme et Authie sont recouvertes de forêts qui sont généralement des zones où les précipitations efficaces sont moindres que dans les zones de prairies par exemple.

Une première répartition possible des valeurs de Rumax, est de prendre :

- une valeur de 100 mm sur les massifs dans la basse vallée et le plateau du Santerre ;
- une valeur de 80 mm sur le reste du bassin.

9.2. MAILLAGE DU MODELE ET CONDITIONS AUX LIMITES

Le domaine modélisé couvre tout le bassin de la Somme (la haute Somme et la Somme aval), la moitié sud-ouest du bassin de l'Authie au nord et la moitié nord-est du bassin de la Bresle au sud-ouest. Il est limité par l'Authie et les hauteurs du Cambrésis au nord, par le Vermandois à l'est, par les collines de Noyonnais au sud-est, la Bresle au sud-ouest et par la Manche à l'ouest

Le modèle de la Somme représente une superficie totale de 7 397 km² discrétisée en 29 428 mailles carrées de 500 m de côté (fig. 47). Il s'agit d'un modèle monocouche intégrant les interactions entre la nappe et les différentes rivières qui traversent le bassin. La nappe de la craie du Sénonien est supposée être en continuité hydraulique avec la nappe alluviale.

Les conditions aux limites introduites dans le modèle sont de trois types :

1. À charge imposée le long de l'Authie et la Bresle jusqu'à la confluence avec le Liger et à charge nulle du côté de la Manche (limite ouest du modèle). En dehors de ces limites des conditions à potentiel imposé ont été appliquées aux rivières suivantes : La Maye, Rivière des Iles, la Vimeuse et le Liger qui sont des rivières non connectées avec la somme.
2. À flux nul sur les limites latérales partout ailleurs.
3. À condition d'échange nappe rivière. Cette condition concerne la Somme et ses affluents.

L'extension du modèle et les conditions aux limites imposées sont montrées sur la figure 47.

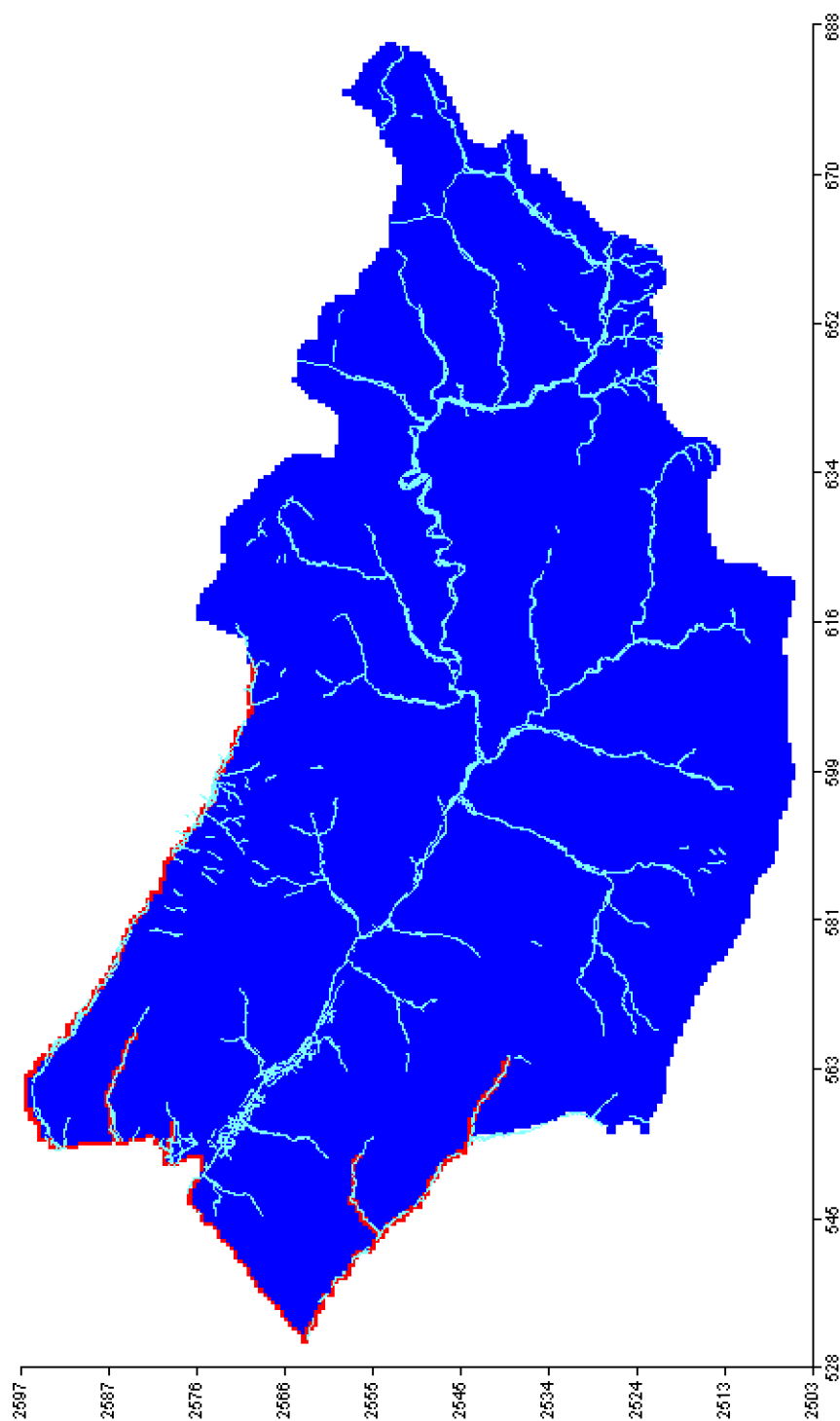


Fig. 47 - Extension du modèle maillé et conditions aux limites.

(En rouge, les limites à potentiel imposé, en bleu clair les zones d'échanges nappe-rivière, le reste du pourtour du bassin est à flux nul).

9.3. INTRODUCTION DES DONNEES DANS LE MODELE

9.3.1. Géométrie de l'aquifère (passage à la résolution du maillage et estimation de l'erreur perte d'information)

La topographie, calculée sur la base du MNT au pas de 50 m, a été ensuite moyennée sur un pas d'espace de 500 m × 500 m et intégrée dans le modèle. Ce passage à la résolution du maillage du modèle ne se fait pas sans perte d'information. Elle concerne essentiellement la vallée humide. La topographie moyenne du modèle de la Somme est de 98,4 m avec un maximum de 220 m au sud-ouest du département de la Somme entre Liger et Bresle. La figure 48 montre la topographie du modèle spatialisé de la Somme.

Les logs de forages de la BSS ne fournissant pas d'information systématique sur l'épaisseur de la zone fissurée de la craie du Sénonien, le substratum de la craie aquifère a été calculé à partir de la cote piézométrique issue de la carte piézométrique moyennes eaux de 1995 en supposant une profondeur productive de nappe de 25 m. Ce substratum a été ensuite corrigé par rapport au toit des dièves. De la même manière que la topographie, le substratum de la nappe a été intégré dans le modèle. La carte du substratum du modèle est présentée dans la figure 49.

9.3.2. Réseau hydrographique

a) Prise en compte du réseau hydrographique dans le logiciel MARTHE

Dans le logiciel MARTHE, le réseau hydrographique est organisé en affluents. Chaque affluent est découpé en un ensemble linéaire de tronçons, et peut avoir à son tour jusqu'à trois affluents amont. Un tronçon de rivière est défini par son numéro d'affluent et par son numéro de tronçon. Une maille rivière du modèle ne peut comporter qu'un seul tronçon.

b) Condition d'échange nappe-rivière

Dans la configuration actuelle du réseau hydrographique du modèle de la Somme, les données nécessaires à la prise en compte de cette condition dans chaque maille rivière sont :

- la longueur et la largeur du tronçon de cours d'eau ;
- la cote absolue de l'eau dans la rivière ;
- la cote absolue du fond de la rivière ;
- épaisseur du lit de la rivière ;
- perméabilité du lit de la rivière.

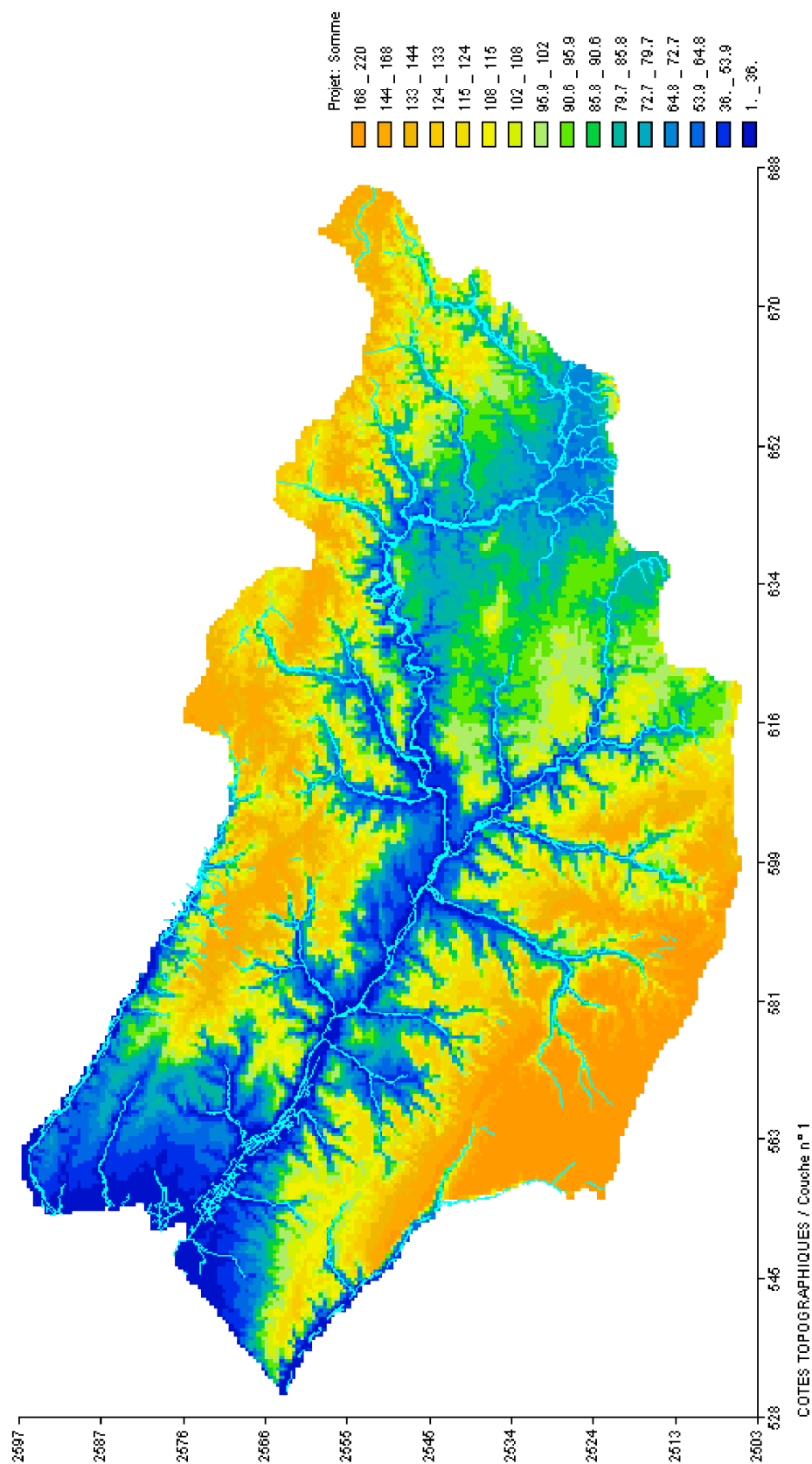


Fig. 48 - Carte topographique du modèle de la Somme.

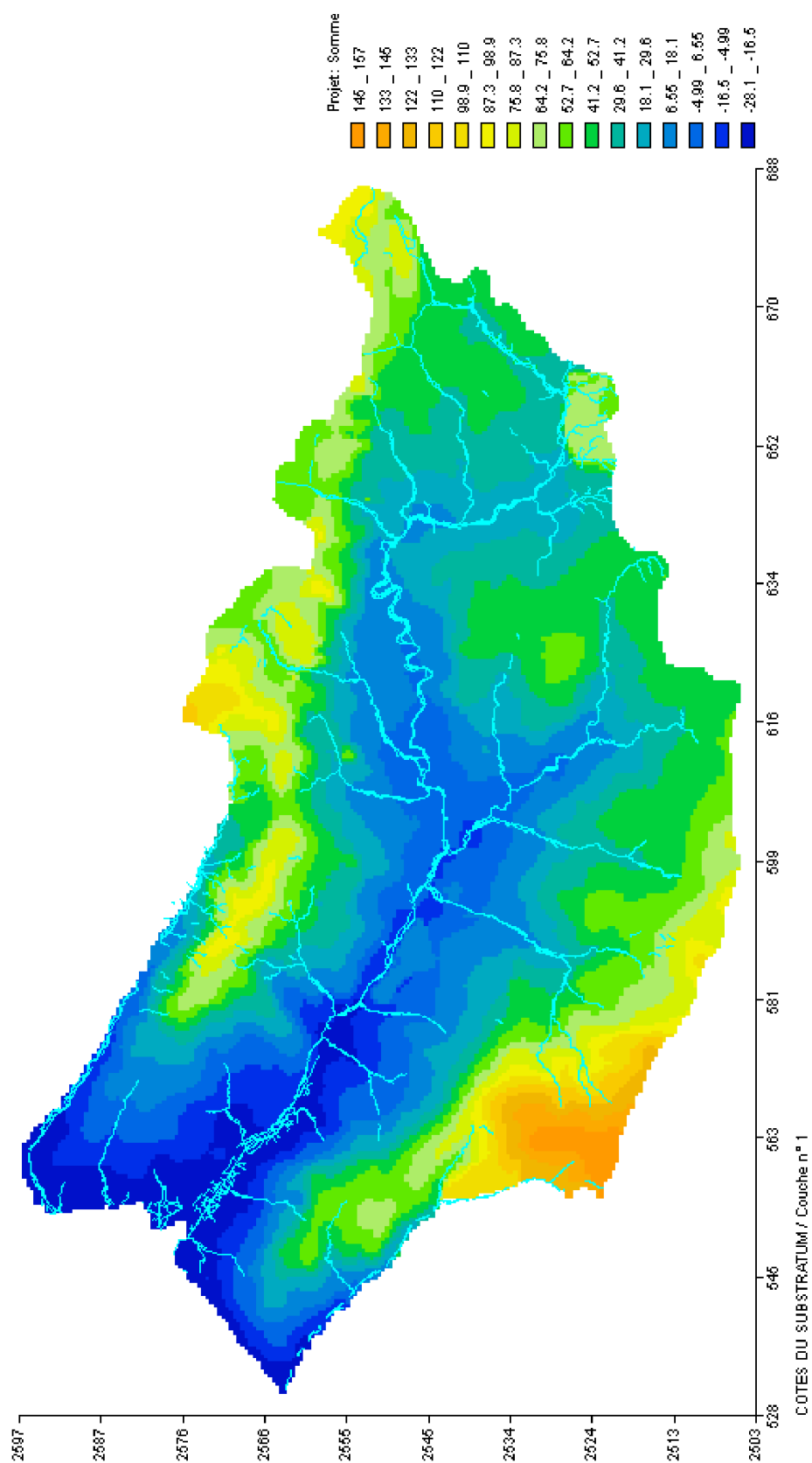


Fig. 49 - Carte du substratum de la nappe de la craie.

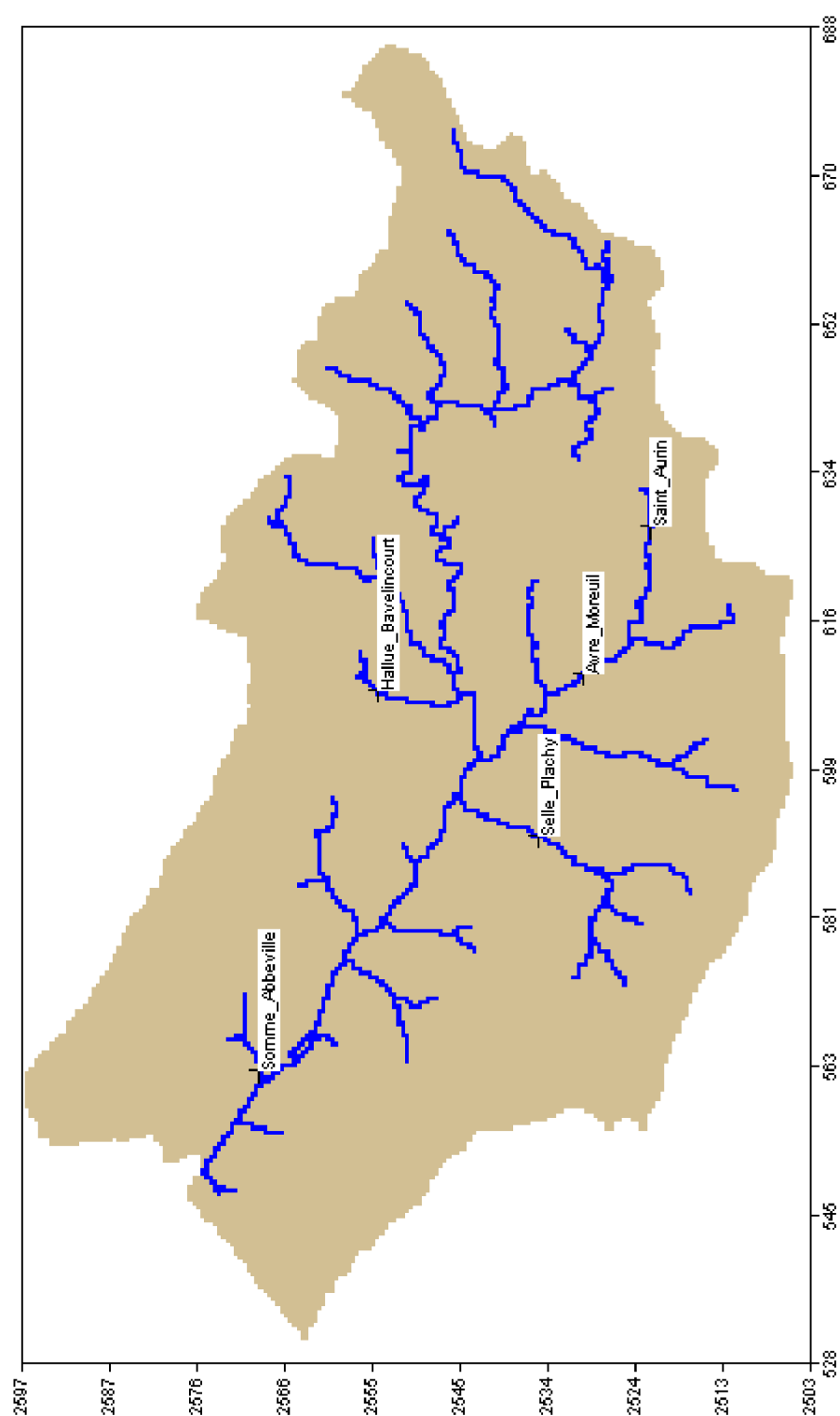


Fig. 50 - Réseau hydrographique du modèle de la Somme.

Le réseau hydrographique du modèle de la Somme a été défini sur la base du réseau hydrographique simplifié calculé à partir du MNT de 50 m. Le réseau ainsi défini a été intégré dans le modèle et corrigé sur la base de la carte de l'extension des alluvions et du réseau hydrographique obtenu à partir de BD-CARTHAGE. Les canaux traversant le bassin de la Somme n'ont pas été pris en compte dans le modèle, ni les étangs bordant la Somme et ses affluents.

Le réseau hydrographique du modèle a été découpé en plusieurs affluents, eux-mêmes découpés en tronçons. Ces affluents et tronçons ont été numérotés, et nous avons procédé à une hiérarchisation systématique du réseau hydrographique.

c) Caractérisation du réseau hydrographique (fig. 50)

- La longueur des tronçons de la rivière a été calculée sur chaque maille rivière à partir de l'intersection du segment de la ligne d'eau calculée avec la maille du modèle au pas d'espace de 500 m. Ces valeurs ont été ensuite intégrées dans le modèle (fig. 51).

Par ailleurs, et comme nous ne disposons pas de données sur la largeur des tronçons de la rivière, nous avons pris les valeurs suivantes :

- une largeur de 10 m en amont de la Somme (entre la source et la Somme à Amiens) et dans tous les affluents de la Somme ;
 - une largeur de 20 m entre la Somme à Amiens et sa confluence avec la Nièvre et enfin une largeur de 30 et 40 m de la confluence Sombellifère jusqu'à l'estuaire.
- La cote de l'eau dans la rivière est la cote du point le plus bas du MNT au pas de 50 m. Cette cote a été vérifiée sur chaque maille rivière et corrigée. Si, par exception, la cote de la maille aval se trouverait être supérieure à celle de la maille amont, afin de respecter le sens de l'écoulement de la rivière. Etant donné le manque d'information sur le fond du lit mineur, ce dernier a été calculé à partir de la cote de l'eau réduite de 1 m dans la partie amont de la Somme et ses affluents et de 2 m entre l'amont de Saint-Landon et l'exutoire de la Somme.

Quelques corrections ont dû être apportées au fichier des cotes du fond de la rivière uniquement dans les mailles rivière amont de la Nièvre, où l'aquifère est pratiquement inexistant. Les dièves sont subaffleurantes (maille où la cote du fond était inférieure à la cote du substratum).

- L'épaisseur réelle du lit de la rivière de la Somme et de ses affluents n'étant pas connue, nous l'avons fixée uniformément à la valeur de 50 cm dans tout le réseau hydrographique. Par ailleurs, on ne dispose pas de données sur la perméabilité du lit de la rivière : ce paramètre sera par la suite calé pour reproduire les débits observés dans la Somme et ses affluents.

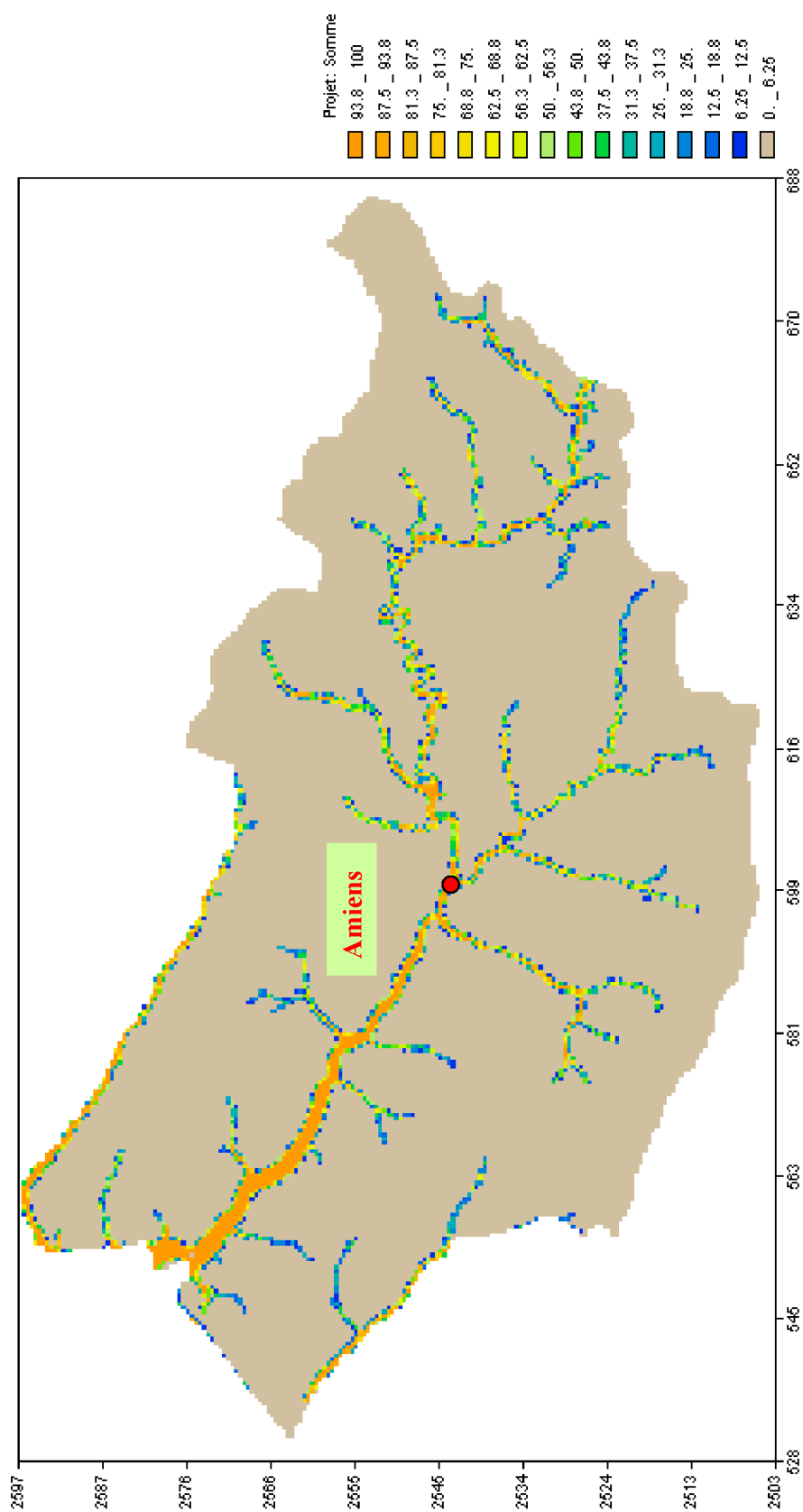


Fig. 51 - Carte du pourcentage de surface de la maille occupée par les alluvions.

9.3.3. Distribution des précipitations et zones de recharge

a) Distribution des précipitations : zones de pluies

Les zones de pluies (ou zones météorologiques) ont été déterminées en s'appuyant sur la carte des isohyètes établie par Météo France et validées par la suite par une série de comparaison des pluies mensuelles mesurées aux différents postes météorologiques disponibles (cf. § 7.2.1). On aboutit ainsi à un découpage du bassin en 8 zones météorologiques. Les postes météorologiques jugés représentatifs de ces zones sont montrés sur la figure 52 et sont listés dans le paragraphe 7.2.1. Le modèle considère que les mailles appartenant à une même zone météorologique reçoivent toutes les mêmes précipitations

b) Calcul de la recharge de la nappe

Les données qui ont servi pour calculer le flux de recharge de la nappe dans tous le bassin modélisé sont :

- les zones de pluies ;
- les chroniques journalières des précipitations des différents postes pluviométriques représentant les zones météorologiques et ceci sur une période de 6 ans (du 1^{er} janvier 1990 au 31 décembre 1995) ;
- la chronique de l'ETP Penman en Abbeville sur la même période ;
- la répartition de la réserve utile maximum du sol (Rumax) Il est important de noter qu'il est très difficile d'évaluer ce paramètre, une première répartition possible a été proposée dans le § 7.2.1.

Sur la base de ces données des simulations ont été réalisées avec le logiciel MARTHE pour calculer la recharge moyenne de la nappe sur la période du 1^{er} janvier 1990 au 31 décembre 1995. Le calcul du bilan hydrique dans Marthe est similaire à celui effectué dans Gardénia. La carte des flux de la recharge issus de ce calcul est montrée sur la figure 53.

9.3.4. Distribution initiale des perméabilités

Voir § 5.1.2.d.

9.3.5. Zones de débordement

Les zones potentielles de débordement de la nappe ont été déterminées en se basant sur les affleurements déterminés par la carte géologique, le MNT et de la carte de recouvrement de la nappe de la craie (fig. 54). Les zones ayant une épaisseur de recouvrement inférieur à 5 m constituent des zones potentielles de débordement de la nappe. Les zones qui présentent un potentiel de débordement (fig. 55) ont été validées en leur superposant la position des différentes sources répertoriées dans le bassin de la Somme.

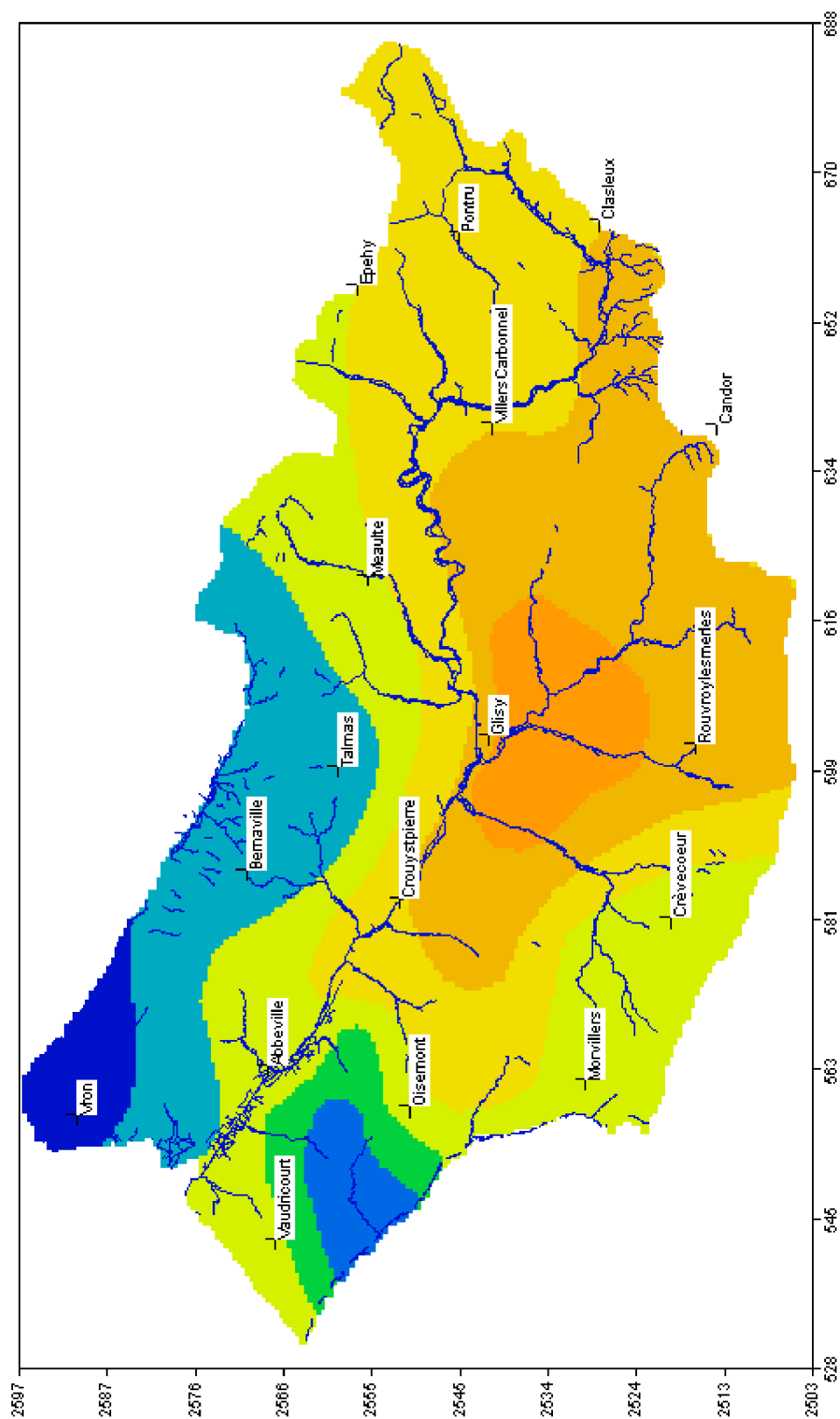


Fig. 52 - Carte des zones de pluies et position des postes utilisés dans le calcul de la recharge de la nappe.

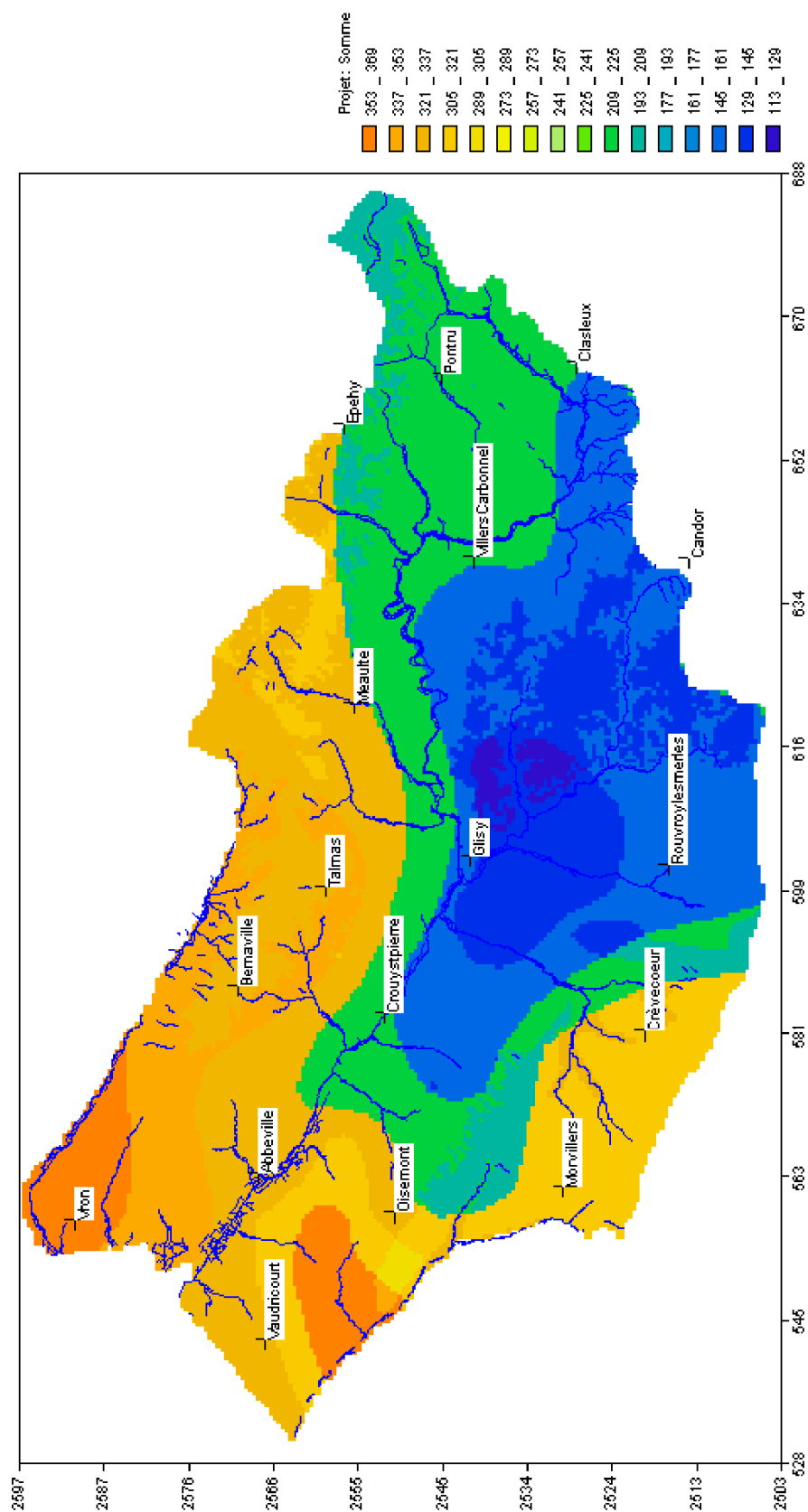


Fig. 53 - Carte des flux de la recharge moyenne sur la période janvier 1990 – décembre 1995.

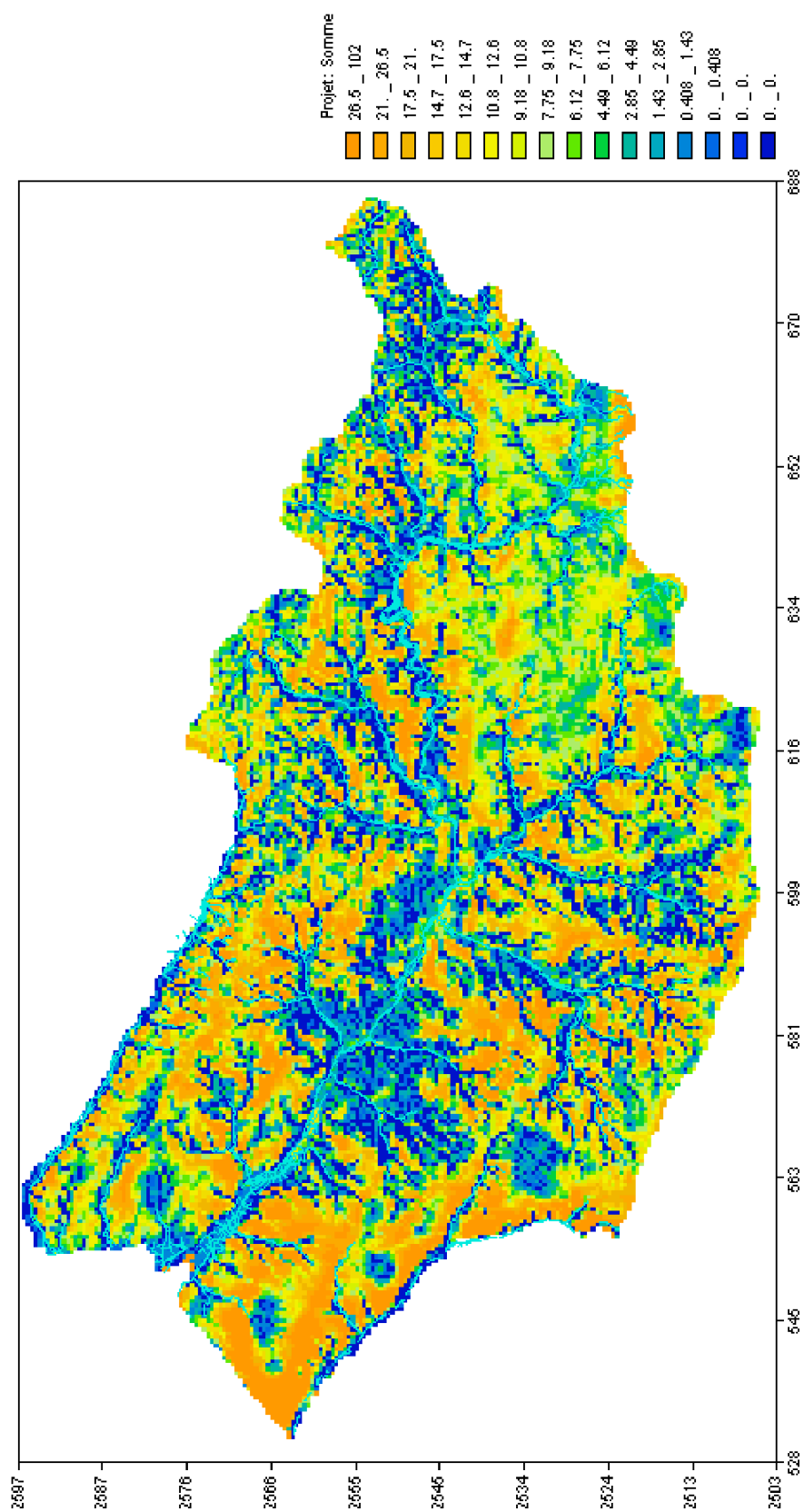


Fig. 54 - Carte de recouvrement de la nappe de la craie.

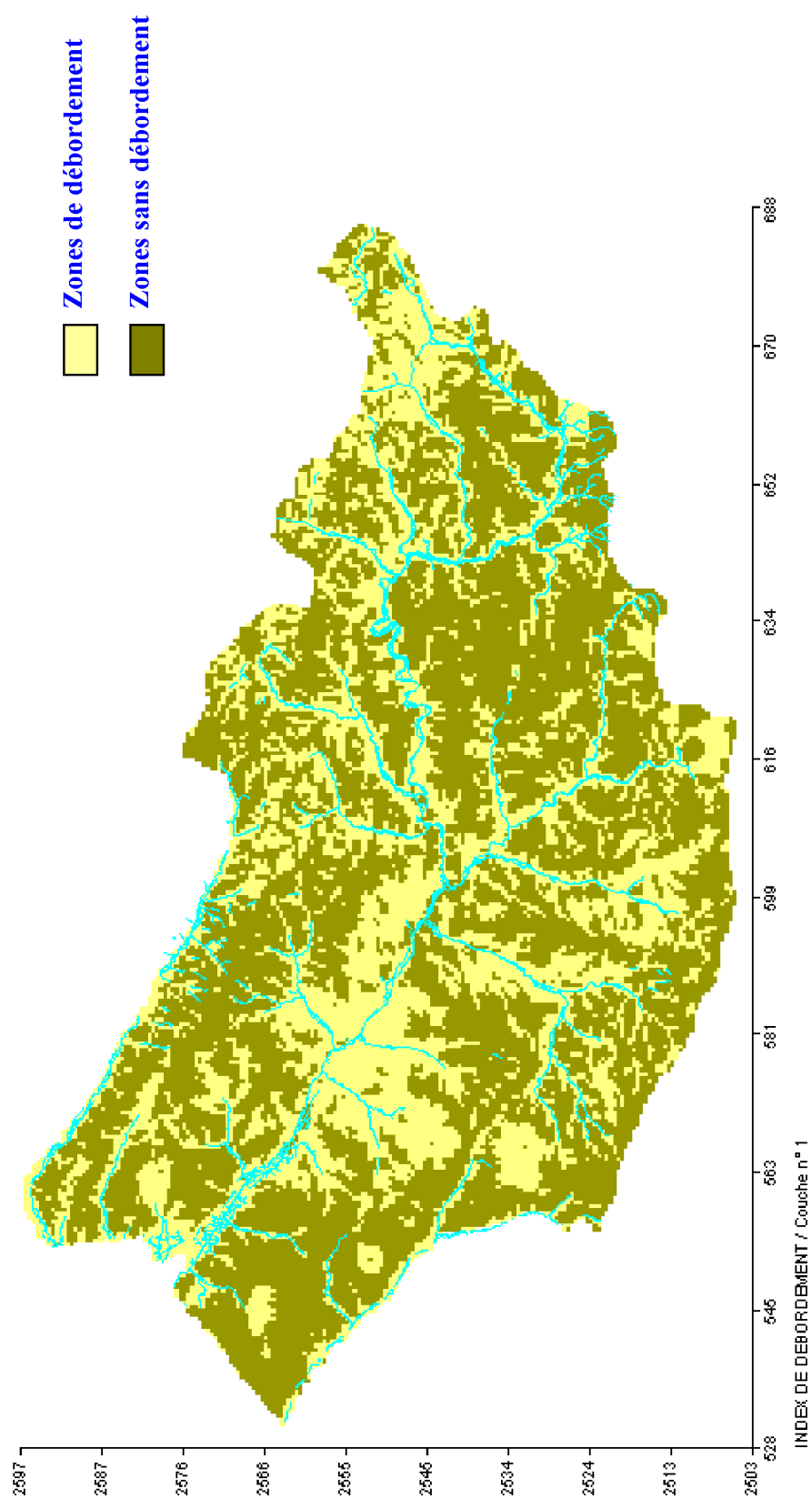


Fig. 55 - Zones ayant un potentiel de débordement.

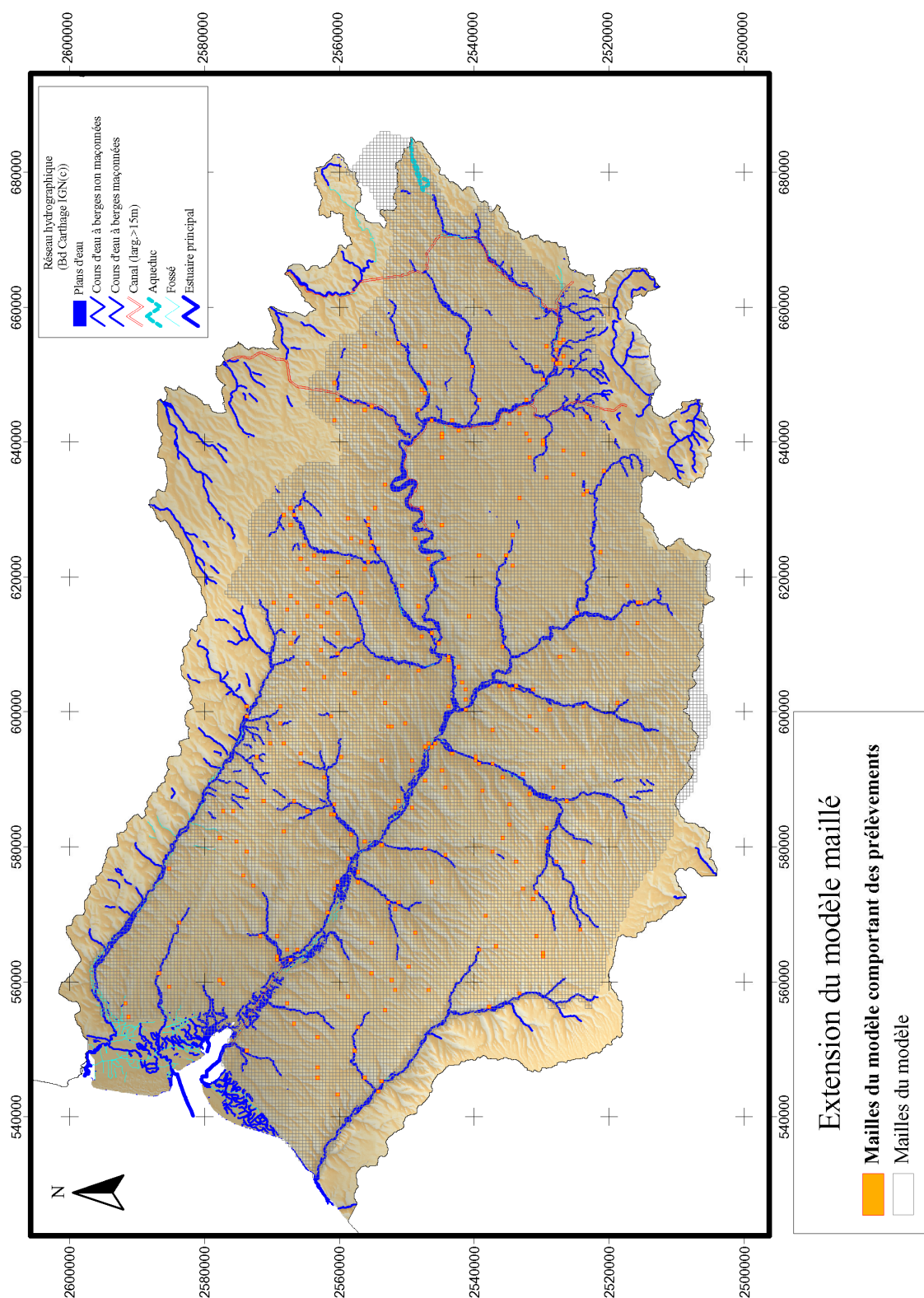


Fig. 56 - Prélèvements 1995 dans la nappe de la craie.

9.4. CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

L'objectif de cette phase de calage est d'obtenir un premier tracé de la carte des perméabilités et de la recharge par comparaison des charges hydrauliques calculées à la piézométrie observée.

Les paramètres à ajuster sont le champ des perméabilités de l'aquifère, les flux de recharge de la nappe et la perméabilité des berges du cours d'eau.

On s'est attaché à restituer au mieux :

- la carte piézométrique, ainsi qu'à reproduire les schémas d'écoulement et les axes de drainage mis en évidence par la carte de la piézométrie en moyennes eaux de 1995 ;
- une bonne corrélation entre les charges calculées et les charges mesurées ;
- le débit moyen correspondant aux mesures sur les différentes stations hydrométriques.

9.4.1. Choix et justification de la période de référence

Le calage du modèle de la Somme en régime permanent s'est effectué sur la base des valeurs moyennes de la recharge calculée sur une période de 6 ans entre janvier 1990 et décembre 1995. La période de référence utilisée pour le calage est la piézométrie « moyennes eaux » de l'année 1995.

9.4.2. Introduction de la recharge et des prélèvements

Le flux de recharge moyen calculé par Marthe a été introduit dans le modèle. Des zones de recharge ont été définies pour faciliter le calage du modèle. Nous avons repris dans chaque zone la valeur de la recharge moyenne calculée par Marthe sur 6 ans. Huit zones ont été définies dans lesquelles le flux de recharge varie entre 129,82 mm/an dans la zone 8 et 368,78 mm/an dans la zone 1 (cf. fig. 18).

Les prélèvements introduits dans le modèle pour son fonctionnement en régime permanent correspondent aux débits moyens prélevés en 1995 (fig. 56). Ces débits n'incluent pas les prélèvements effectués dans le département de l'Oise (on ne dispose pas de cette donnée). Les mailles comportant un ou plusieurs ouvrages de prélèvements dans la nappe sont figurées en rouge.

9.4.3. Données de calage du modèle en régime permanent

Les données de calage sont :

- la carte de la piézométrie Moyennes Eaux (ME) 1995 (fig. 57) ;

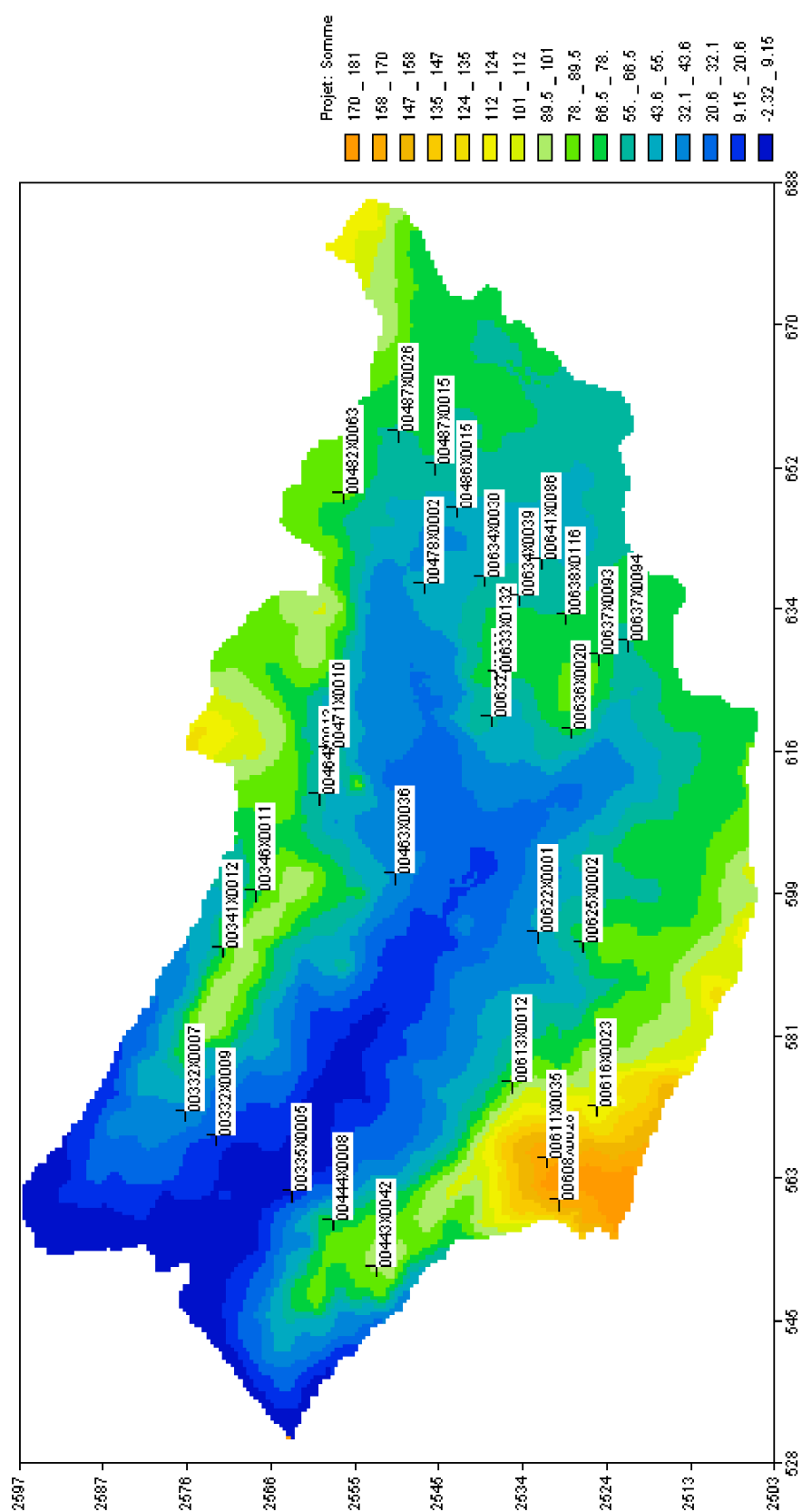


Fig. 57 - Carte de la piézométrie moyennes eaux 1995 et position des différents piézomètres.

- la charge « moyennes eaux » dans chaque piézomètre (30 piézomètres au total), calculée en moyennant la charge mesurée en période des hautes eaux (avril 1995) et la charge mesurée en basses eaux (août 1995) ;
- les débits mensuels mesurés dans 5 stations hydrométriques en HE (avril 1995) et en BE (août 1995).

9.4.4. Résultats du calage en régime permanent

La perméabilité des berges de la rivière issue du calage du modèle sur les différentes stations hydrométriques prend une valeur uniforme de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s sur le bassin de la Somme sauf dans l'Hallue qui présente une perméabilité plus forte ($1 \cdot 10^{-4}$ m/s).

La figure 58 montre la distribution des perméabilités calées en régime permanent. La répartition des perméabilités des alluvions y est restituée. Par contre elle a été réduite essentiellement dans le plateau de Santerre, au sud-ouest sur les hauts plateaux situés en amont de la Bresle, et ceux situés entre le Liger et la Vimeuse. Sur ces plateaux, la valeur de la perméabilité après calage varie entre $1 \cdot 10^{-4}$ et $2 \cdot 10^{-5}$ m/s. La perméabilité a été augmentée dans les plateaux situés entre la Selle et la Noye.

La recharge par infiltration de la nappe demeure une inconnue. Un bilan classique fournit systématiquement des valeurs nettement supérieures. En conséquence, la recharge introduite initialement dans le modèle, pour la **zone 4** a été réduite de **25 %**, passant de 321,93 mm/an à 241 mm/an.

La figure 59 montre les valeurs de la recharge après calage du modèle.

a) Piézométrie moyennes eaux 1995

Pour évaluer la qualité du calage, un diagramme de dispersion représentant la charge calculée en fonction de la charge observée à différents points de mesures a été établi. Il permet de quantifier plus précisément les écarts du calage (fig. 60).

On voit que le modèle reproduit de manière satisfaisante la piézométrie observée : la droite de régression qui relie la charge simulée à celle observée a une pente de 1.0006 avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.99 ; ce qui atteste de la bonne reproduction de la piézométrie ME 1995.

Les résultats du calage en régime permanent serviront à initialiser le modèle en régime transitoire (fig. 61).

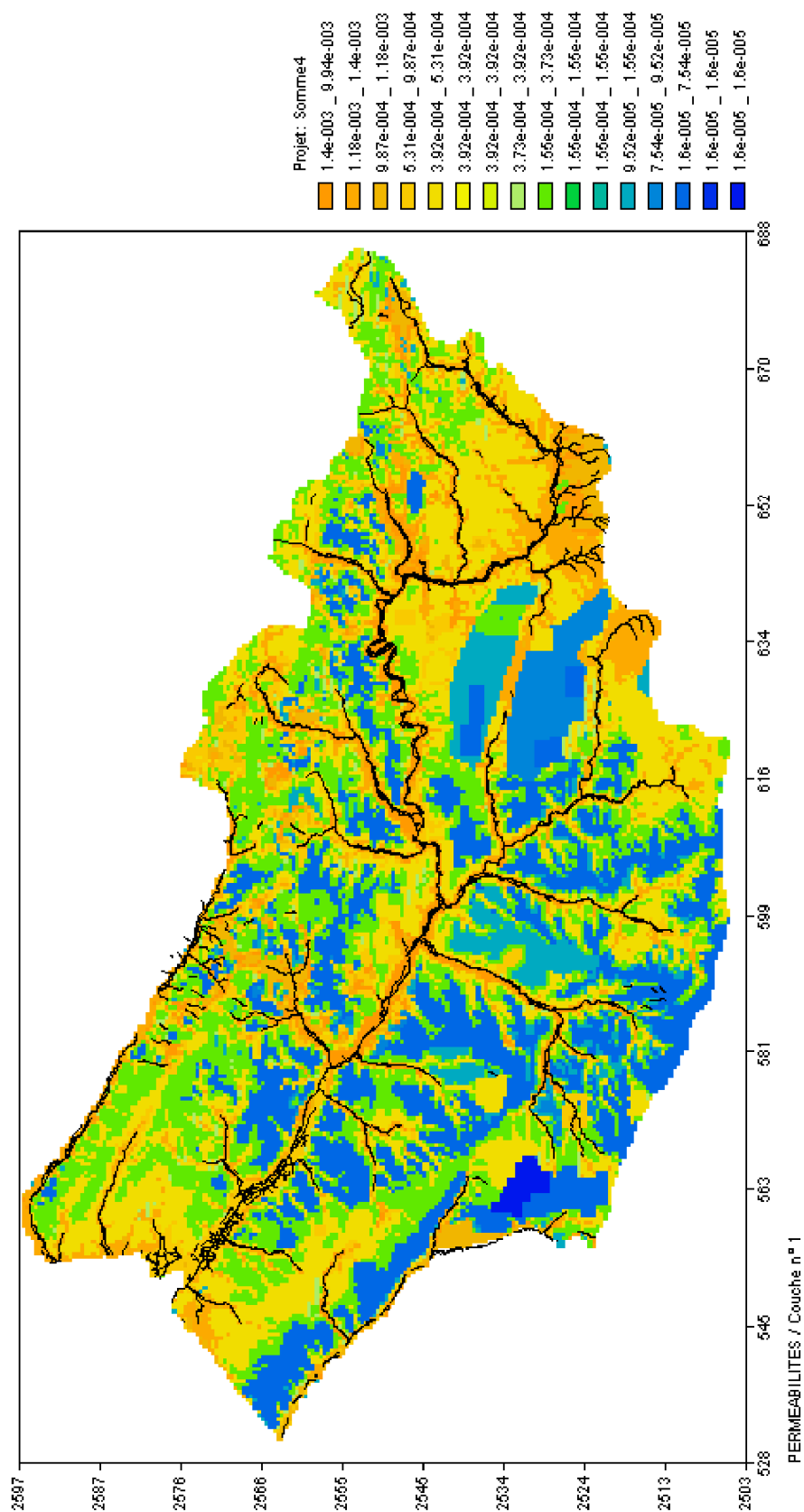


Fig. 58 - Carte des perméabilités après le calage en régime permanent ME 95.

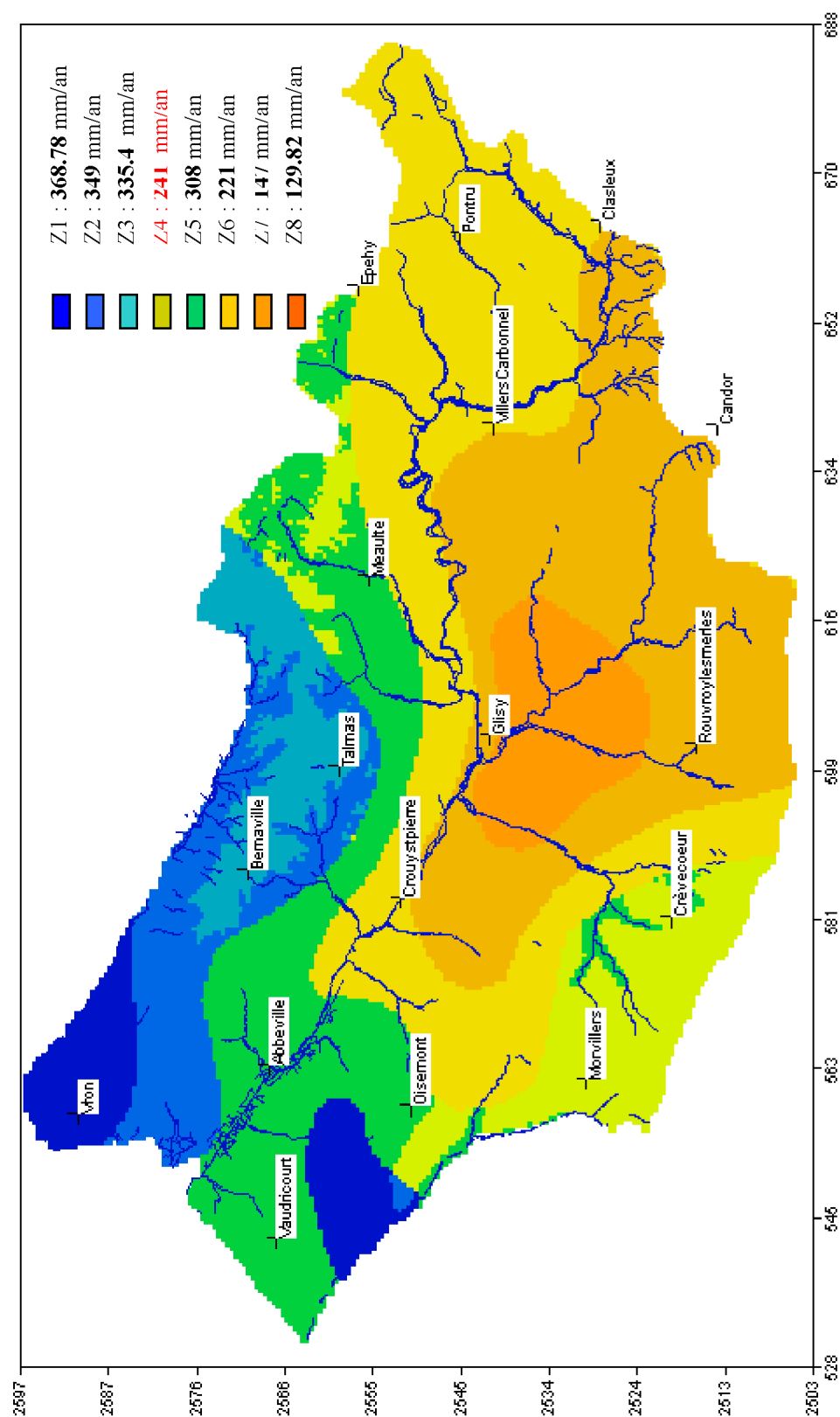


Fig. 59 - Carte de la répartition de la recharge après calage du modèle de la Somme en régime permanent ME 95.

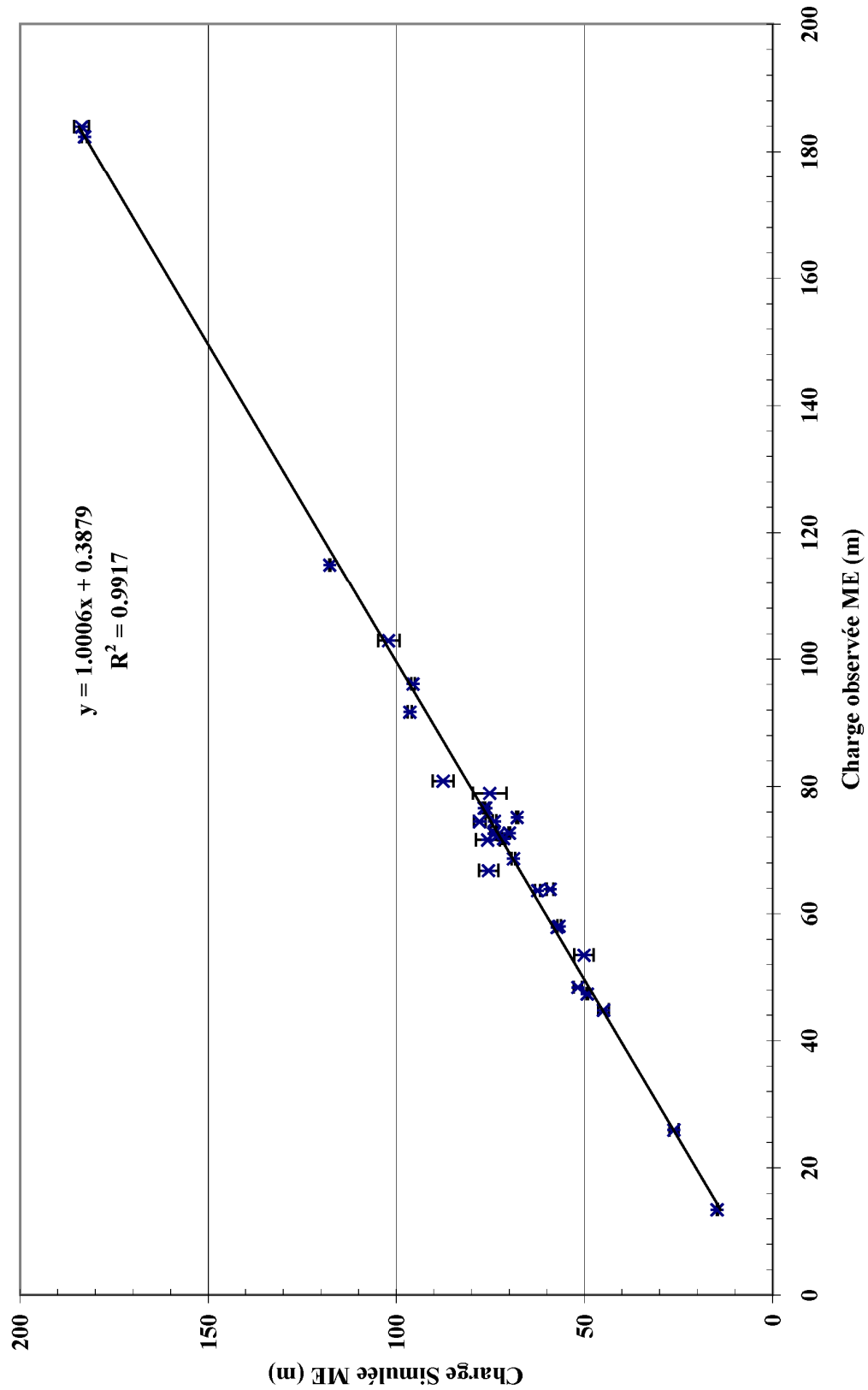


Fig. 60 - Charges calculées en fonction des charges observées en ME 1995 dans les différents piézomètres.

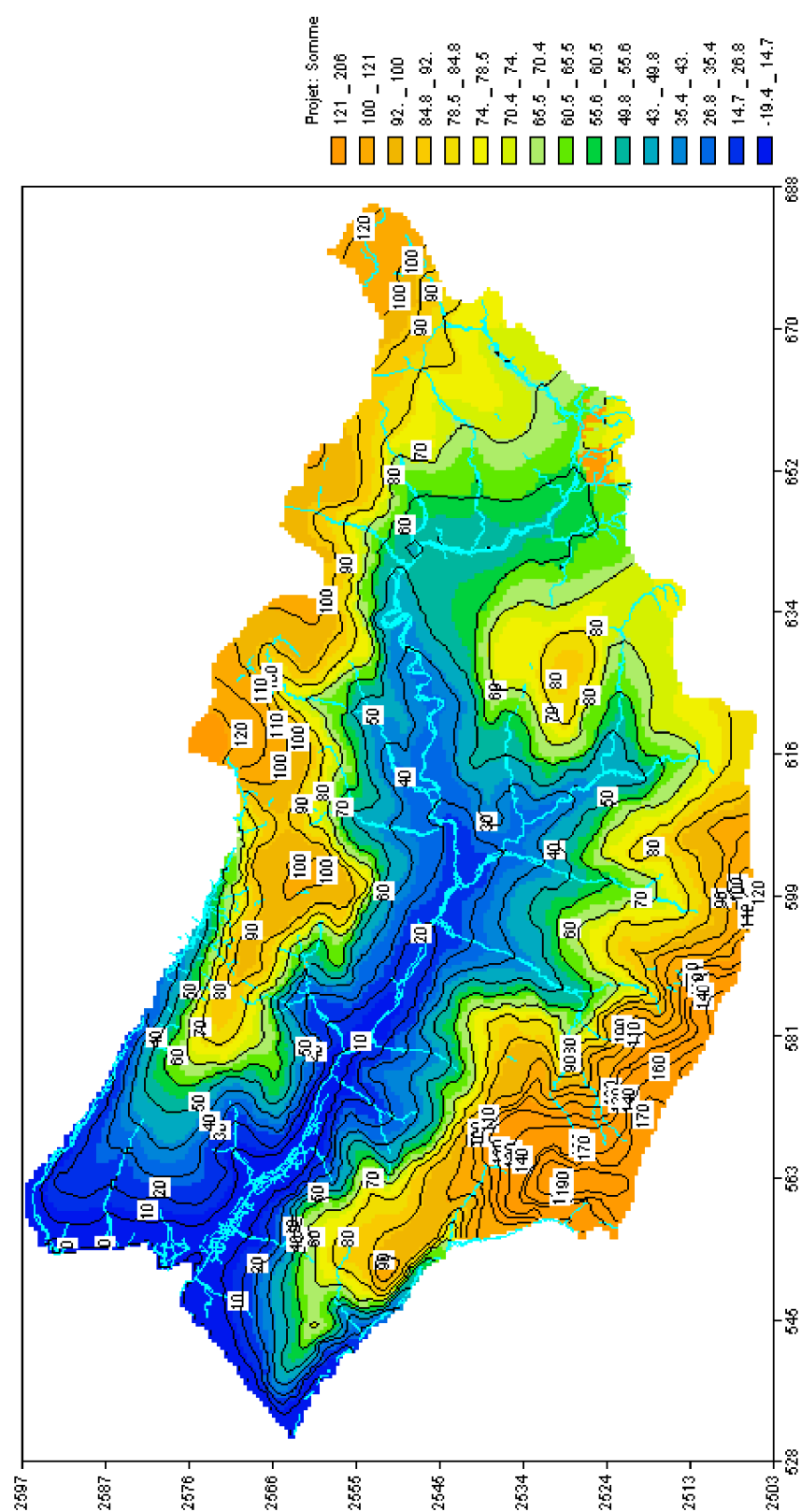


Fig. 61 - Carte de charges calculées en régime permanent pour la période ME 1995.

b) Débit des cours d'eau et des sources

Le tableau 5 compare les débits calculés par le modèle aux différentes stations hydrométriques aux débits moyens calculés dans les cinq stations de référence à partir des débits d'étiage (août 1995) et des débits hautes eaux (avril 1995).

Station hydrométrique	L'Hallue à Bavelincourt	La Nièvre à l'Etoile	L'Avre à Moreuil	La Selle à Plachy	La Somme à Abbeville
X Lambert II (km)	608,7	582,4	610,7125	591,275	563,407
Y Lambert II (km)	2 554,85	2 558,9	2 530,325	2 535,6	2 566,317
Débit moyen avr-1995 (m ³ /h)	8 190	16 564	13 193	23 653	2 40120
Débit moyen août-1995 (m ³ /h)	3 146	8 668	6 252	15 602	109 440
Moyenne des débits août-avril 1995 (m ³ /h)	5 668	12 616	9 723	19 628	174 780
Débit Simulé (m ³ /h)	3 743	8 738,9	9 581	19 835	13 1174

Tabl. 5 - Débits simulés en ME 95 et débits observés dans les 5 stations hydrométriques de référence (BE 95 et HE 95).

Le modèle reproduit bien les débits moyens de la Selle à Plachy et de l'Avre à Moreuil. Le calage reste satisfaisant pour la Somme à Abbeville.

Pour l'Hallue à Bavelincourt et la Nièvre à l'Etoile, le débit simulé reste très proche du débit mesuré à l'étiage (août 1995).

Parmi les 207 sources répertoriées dans le bassin de la Somme, seules 51 sources disposent d'une mesure de débit. La somme des débits mesurés dans ces 51 sources est de 8 619 l/s soit l'équivalent de 31 028 m³/h. Dans l'atlas de la Somme (BRGM 1978), 280 sources ont été recensées dont 63 ont un débit supérieur à 50 l/s.

Faute de disposer du débit total de toutes les sources du bassin de la Somme, on ne peut les confronter aux débits de débordements calculés par le modèle qui en tiennent lieu.

Par ailleurs, le modèle calcule 271 points de débordement avec un débit total de débordement dans le bassin de la Somme égal à 45 420 m³/h.

c) Bilan des flux

Le tableau 6 présente le bilan des flux du modèle en régime permanent correspondant à la situation des ME 1995.

DÉBIT Q (m ³ /h)	ENTRÉES		SORTIES	
	m ³ /h	%	m ³ /h	%
Q : charge imposée	6 016	2,15	43 070	15,38
Q : prélèvements			10 930	3,90
Q : infiltration	194 300	69,41		
Q : débordements			45 420	16,22
Q : rivières	79 620	28,44	180 600	64,5
Total	279 936	100	280 020	100

Tabl. 6 - Bilan des flux en régime permanent - ME 1995.

La rivière contribue aux apports à la nappe à hauteur de 28,4 %, le reste des apports étant directement assuré par l'infiltration directe, 64,5 % du débit total transitant dans le bassin retourne à l'exutoire du bassin par les échanges nappe-rivière.

L'apport net de la nappe vers la rivière est de 100 980 m³/h soit environ 68,8 % du débit dans la rivière pour cet état permanent sur une situation moyennes eaux 1995 et avec ces paramètres de calage (tabl. 7).

DÉBIT Q (m ³ /h)	ENTRÉES	SORTIES
	m ³ /h	m ³ /h
Q ruissellement superficiel	376,4	
Q venant de la nappe	180 600	79 620
Q débordement nappe	45 420	
Exutoire		146 670

Tabl. 7 - Bilan des débits dans le réseau hydrographique.

9.5. CALAGE DU MODELE DE LA SOMME EN REGIME TRANSITOIRE AVEC COUPLAGE NAPPE-RIVIERE

9.5.1. Choix de la période de référence

Le calage du modèle de la Somme en régime transitoire a été effectué sur la période juin 1995 - juillet 2001 avec un pas de temps de calcul de 30 jours. Initialement le calage était prévu avec un pas de temps semestriel. Ce pas de temps s'est révélé inadapté pour caler la piézométrie de la nappe libre qui, d'une part, est très influencée par les précipitations et, d'autre part, interagit de manière rapide et importante avec la rivière.

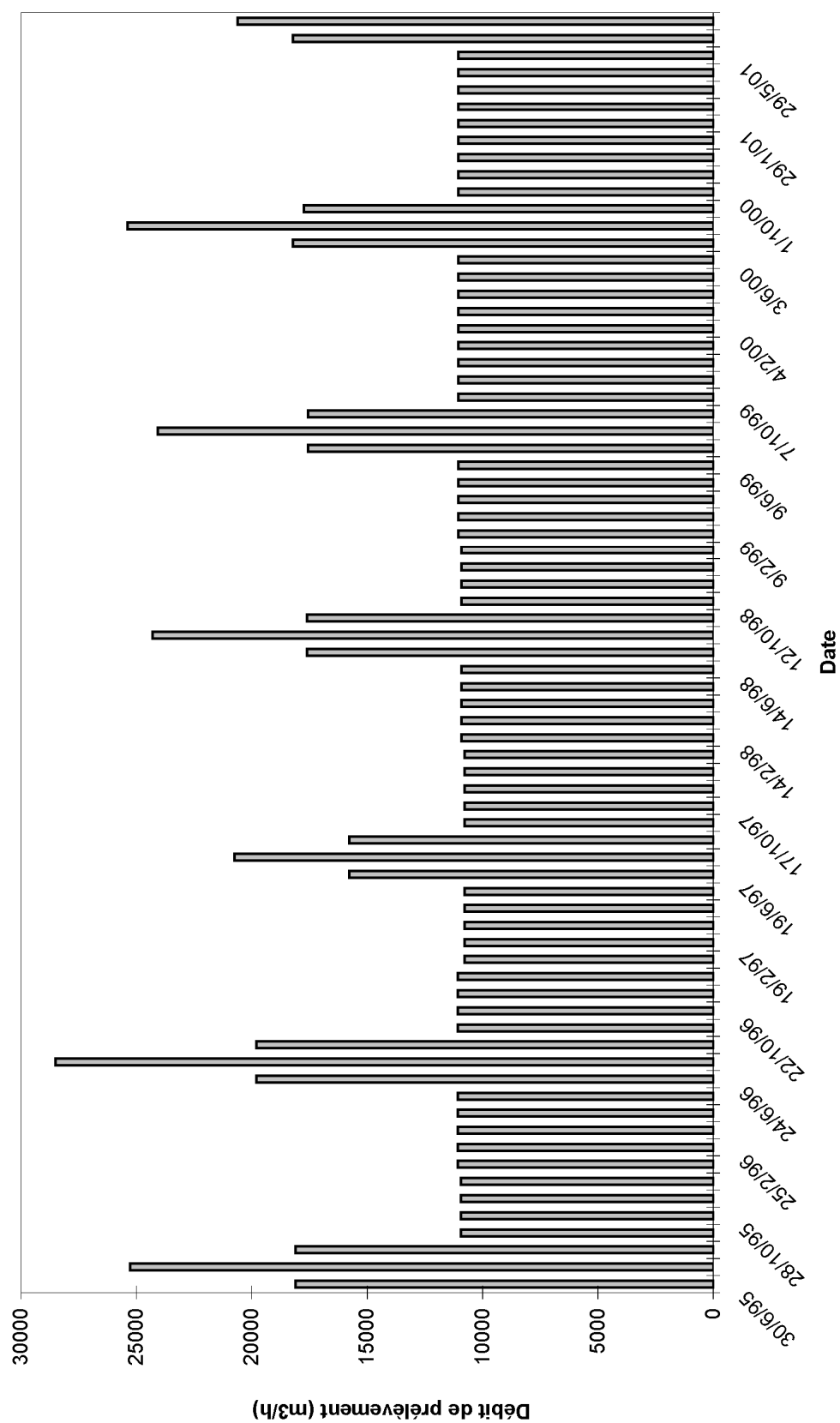


Fig. 62 - Prélèvements mensuels dans la nappe de la craie.

9.5.2. Données d'entrée du modèle pour le régime transitoire

- **Précipitations et évapotranspirations** : on dispose de pluies mensuelles de six stations pluviométriques (Vron ; Talmas, Abbeville, Villers, Glisy et Morvillers). Les données mensuelles de l'ETP à Abbeville ont été appliquées au modèle.

La zonation des pluies fournie par Météo France a été conservée sauf dans le sud-ouest du bassin où une nouvelle zone a été définie, caractérisée par la pluie à Morvillers.

- **Paramètres de sol** : le code Marthe permet de calculer le bilan hydrique dans le sol à partir des données météorologiques et pédologiques.

Dans un premier temps un bilan pluie/ETP est calculé. Il permet d'évaluer l'excédent des pluies à partir de la réserve utile maximale. Cet excédent est décomposé en une infiltration vers la nappe et un ruissellement qui gagne la maille rivière la plus proche.

Pour calculer ce bilan, les paramètres caractéristiques sont :

- Rumax : la réserve utile maximale du sol (mm) ;
- Ruiper : niveau du réservoir H correspondant à 50 % d'infiltration et 50 % de ruissellement (équipercolation) (mm) ;
- THG : la durée de demi-percolation du réservoir H (unité de temps) ;
- CETP : coefficient correcteur global de l'ETP (en %) ;
- CPLU : coefficient correcteur global de la pluie (en %).

a) Prélèvement dans la nappe

Les prélèvements dans les eaux souterraines sont disponibles, exprimés en volumes annuels par usage (agriculture, AEP et industrie), sauf dans le département de l'Oise. La distribution mensuelles des prélèvements a été décrite au paragraphe 5.1.2.

Rappelons toutefois qu'on ne dispose pas de données de prélèvements sur l'année 2000 et 2001 et en conséquence les prélèvements AEP et usages industriels de l'année 1999 ont été utilisés pour 2000 et 2001.

Les valeurs des prélèvements en m³/h appliquées au modèle sont reportées sur la figure 62. Les prélèvements pour l'irrigation sont importants de juin à août. Les volumes destinés à l'irrigation ont été répartis de la manière suivante : 25 % en juin et en août, et 50 % en juillet.

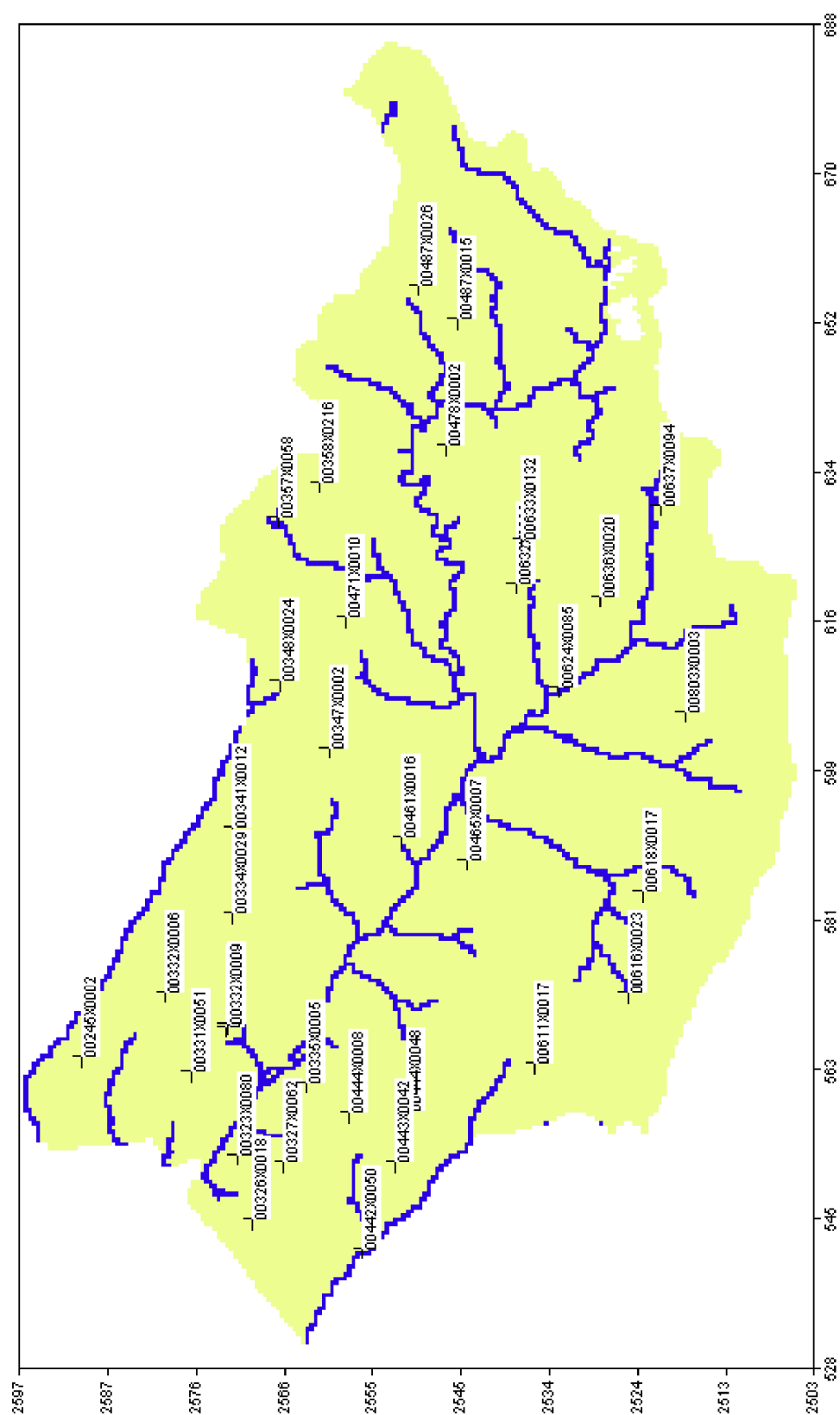


Fig. 63 - Localisation des piézomètres de référence.

b) Coefficient d'emmagasinement

Pour l'ensemble du bassin, on dispose de 45 valeurs du coefficient d'emmagasinement, localisées essentiellement le long des rivières (vallées humides). Elles varient globalement entre 1 % et 10 %. Les évaluations du coefficient d'emmagasinement sont inexistantes sur les plateaux et dès que l'épaisseur de la zone non saturée devient importante.

Comme pour la perméabilité, l'expérience de terrain montre que plus l'épaisseur de la zone non saturée est importante, plus les valeurs de coefficient d'emmagasinement sont faibles. La répartition initiale utilisée dans le modèle reprend par analogie avec d'autres bassins les ordres de grandeurs observés lors de pompages d'essai :

- pour une épaisseur de la ZNS inférieure à 20 m : $5 \% < S < 9 \%$
- pour une épaisseur de la ZNS comprise entre 20 et 40 m : $2 \% < S < 3 \%$
- pour une épaisseur de la ZNS comprise entre 40 et 60 m : $1 \% < S < 2 \%$
- pour une épaisseur de la ZNS supérieure à 60 m : $S = 1 \%$

La première catégorie correspond aux axes des vallées. Le plateau du Santerre appartient à la deuxième catégorie. Dans le cas où la nappe est captive, le coefficient d'emmagasinement spécifique est pris égal à 0,1 %.

9.5.3. Données de contrôle du calage du modèle en régime transitoire

- **Piézométrie** : on dispose d'une trentaine de points de mesures de chroniques piézométriques. Ces points sont répartis d'une manière homogène sur l'ensemble du bassin versant de la Somme. La localisation des piézomètres qui ont servi de référence pour le calage est indiquée sur la figure 63.
- **Débits des rivières** : on dispose des évolutions des débits dans les principales rivières du bassin de la Somme au droit de cinq stations de jaugeage (la Somme à Abbeville ; la Nièvre à l'Etoile ; l'Avre à Moreuil ; la Selle à Plachy et l'Hallue à Bavelincourt).

9.5.4. Principales phases de calage du modèle maillé en régime transitoire

Le calage du modèle maillé en régime transitoire s'est fait en deux étapes.

La première consiste à faire un précalage du bilan hydrique avec le modèle global (GARDENIA). Les paramètres du sol (Rumax, THG, Ruiper, CETP et enfin le CPLU) sont calés par comparaison avec la série des débits des rivières calculés et mesurés.

La seconde étape consiste à caler le coefficient d'emmagasinement avec un retour sur la perméabilité de la nappe et éventuellement sur la recharge.

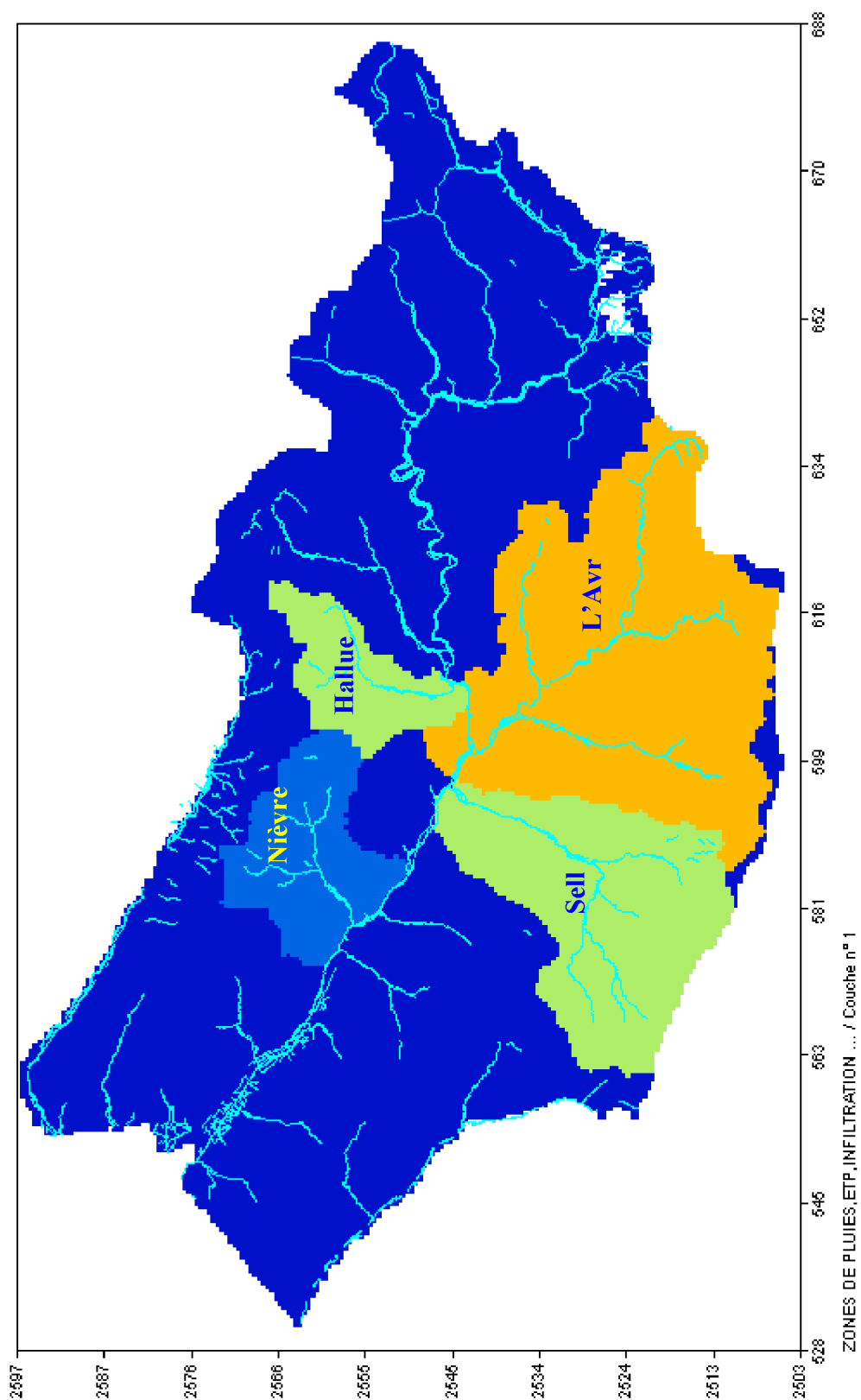


Fig. 64 - Bassins pour lesquels un précalage du bilan hydrique avec GARDENIA a été réalisé.

- **Remarques**

Compte tenu des hypothèses faites sur les paramètres caractérisant le réseau hydrographique (cf. § 9.3.2), le calage de la perméabilité des berges des rivières est global.

a) Précalage du bilan hydroclimatique avec GARDENIA

Un précalage du bilan hydroclimatique du bassin de la Somme a été réalisé avec un modèle global type GARDENIA. Le principe de fonctionnement de GARDENIA a été détaillé dans le paragraphe 7.1. Il concerne les paramètres du sol des principaux sous-bassins. Il s'appuie sur les longues séries de pluies, d'ETP et de débits de la rivière.

Une simulation pluie/débit au pas de temps mensuel a été réalisée de janvier 1988 à novembre 2001 en utilisant la pluie à Glisy et l'ETP à Abbeville. Les résultats sont résumés dans le tableau 8.

Des simulations pluie/débit du même type ont été réalisées sur les bassins versants de la Nièvre, l'Hallue la Selle et l'Avre (fig. 64) afin de déterminer les paramètres de calage propres à ces différents bassins. Les stations pluviométriques utilisées pour chaque bassin versant et les paramètres issus du calage sont indiqués dans le tableau 8.

Les graphiques représentant débits observés et débits simulés à hauteur des cinq stations de jaugeage sont reportés en annexe 3.

Stations	Hallue à Bavelincourt	Nievre à l'Etoile	Selle à Plachy	Avre à Moreuil	Somme à Abbeville
Poste Pluvio	Talmas	Talmas	Morvillers	Glisy	Glisy
Rumax (mm)	268,92	114,15	50	57,75	42
Ruiper (mm)	4 969	2053	746	500	1 284
THG (mois)	3	2,99	6	3	3
CETP (%)	5	0	- 2,33	20	0
CPLU (%)	0	0	- 9	-3 ,35	0
R	0,94	0,93	0,9	0,95	0,95

Tabl. 8 - Synthèses des paramètres utilisés dans le calcul du bilan dans les 5 bassins versants.

On peut noter que pour chacun des sous-bassins, les résultats des simulations sont satisfaisants avec des coefficients d'ajustement variant de 0,9 à 0,95.

Les valeurs ajustées serviront à initialiser les paramètres d'entrée du modèle maillé et pourront être éventuellement modulées ultérieurement. En effet, dans un modèle global,

le comportement hydrologique d'un bassin versant est simulé à partir des données d'un seul poste pluviométrique alors que dans un modèle distribué (maillé) ce même bassin peut être soumis à l'influence de 2 ou plusieurs pluviomètres.

Comparées aux simulations GARDÉNIA réalisées sur les mêmes bassins avec des pluies et des ETP journalières, les simulations réalisées à des pas de temps mensuels fournissent des valeurs de Rumax assez semblables. Cependant, on note des différences sur Ruiper et sur Thg. Le modèle au pas de temps mensuel est en effet moins sensible à la composante rapide.

b) Calage du modèle maillé en régime transitoire

Dans cette phase de calage, on a tenté d'améliorer le calage des perméabilités et de caler les coefficients d'emmagasinement.

S'y ajoutent le calage global des perméabilités des berges de rivière et les interactions nappe-rivière dans les bassins versants à l'amont des points de contrôle que constituent les 5 stations de jaugeage.

Le calage en régime transitoire a fait apparaître des anomalies dans la géométrie du système aquifère dans sa partie nord (bassins de la Nièvre et de l'Hallue), ce qui a amené à revoir l'interprétation hydrogéologique de chacune des données géologiques. Le substratum de la nappe a été corrigé de manière à intégrer le niveau géologique du Turonien qui semble être perméable dans ce secteur. Les estimations disponibles indiquent que le niveau de la nappe se situerait au sein du Turonien.

9.5.5. Résultats

a) Bilan hydroclimatique

Les paramètres de sol issus du calage du modèle au pas de temps mensuels sur la période de juin 1995 à juillet 2001 sont reportés dans le tableau 9. Seuls les paramètres de sol du bassin de l'Avre ont été recalés pour mieux reproduire la piézométrie dans le Santerre.

Stations	Hallue à Bavelincourt	Nievre à l'Etoile	Selle à Plachy	Avre à Moreuil	Somme à Abbeville
Rumax (mm)	268,92	114,15	50	42	42
Ruiper (mm)	4 969	2 053	746	1 284	1 284
THG (mois)	3	2,99	6	3	3
CETP (%)	5	0	-2,33	0	0
CPLU (%)	0	0	-9	0	0

Tabl. 9 - Synthèses des paramètres utilisés dans le calcul du bilan dans les 5 bassins versants après calage du modèle.

Les zones pluviométriques issues du calage du modèle sont montrées sur la figure 65. Comme il a été dit auparavant, nous avons ajouté une autre zone météo en amont du bassin de la Selle caractérisée par la pluie à Morvillers. Cette zone était antérieurement caractérisée par le fait qu'elle présentait une pluie annuelle moyenne établie sur la période de 1971 à 2000 identique à celle du poste d'Abbeville.

Le calage en régime transitoire a montré que la distribution mensuelle de la pluie à Abbeville ne permet pas de simuler correctement les variations piézométriques au sud-ouest du bassin de la Somme. Ci-dessous, les numéros des zones et les postes pluviométriques auxquels ils se réfèrent :

Zone météo	Station de pluie	Coefficient appliqué sur la pluie (%)	Coefficient appliqué sur l'ETP (%)
Z1	Vron		
Z2	Glisy	4,6	- 14
Z3	Talmas		
Z4	Glisy		
Z5	Abbeville		
Z6	Villers		
Z7	Glisy	4,6	- 14
Z8	Glisy	- 5	
Z9	Morvillers		

b) Paramètres hydrodynamiques

• Champ de perméabilité

La carte de perméabilité obtenue après le calage du modèle est présentée sur la figure 66. La plage de variation de la perméabilité s'étend de $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s à $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. La perméabilité est forte le long de la vallée humide (de l'ordre de 10^{-3} m/s) et faible sur les reliefs (de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s). Au total 46 % des mailles ont une perméabilité variant entre $1,5 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-4}$ m/s et 37 % des mailles ont une perméabilité entre $2 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

• Coefficient d'emménagement

La carte du coefficient d'emménagement libre « S » obtenue après calage du modèle est montrée sur la figure 67. Ce coefficient varie globalement entre 1 et 9 %. On trouve des valeurs faibles 1 à 2 % sur les reliefs et le plateau du Santerre. Des valeurs de 9 % se trouvent essentiellement dans la vallée humide où l'épaisseur des alluvions est importante. La nappe est d'ailleurs très productive dans ces zones. Des valeurs intermédiaires se trouvent dans les vallées sèches.

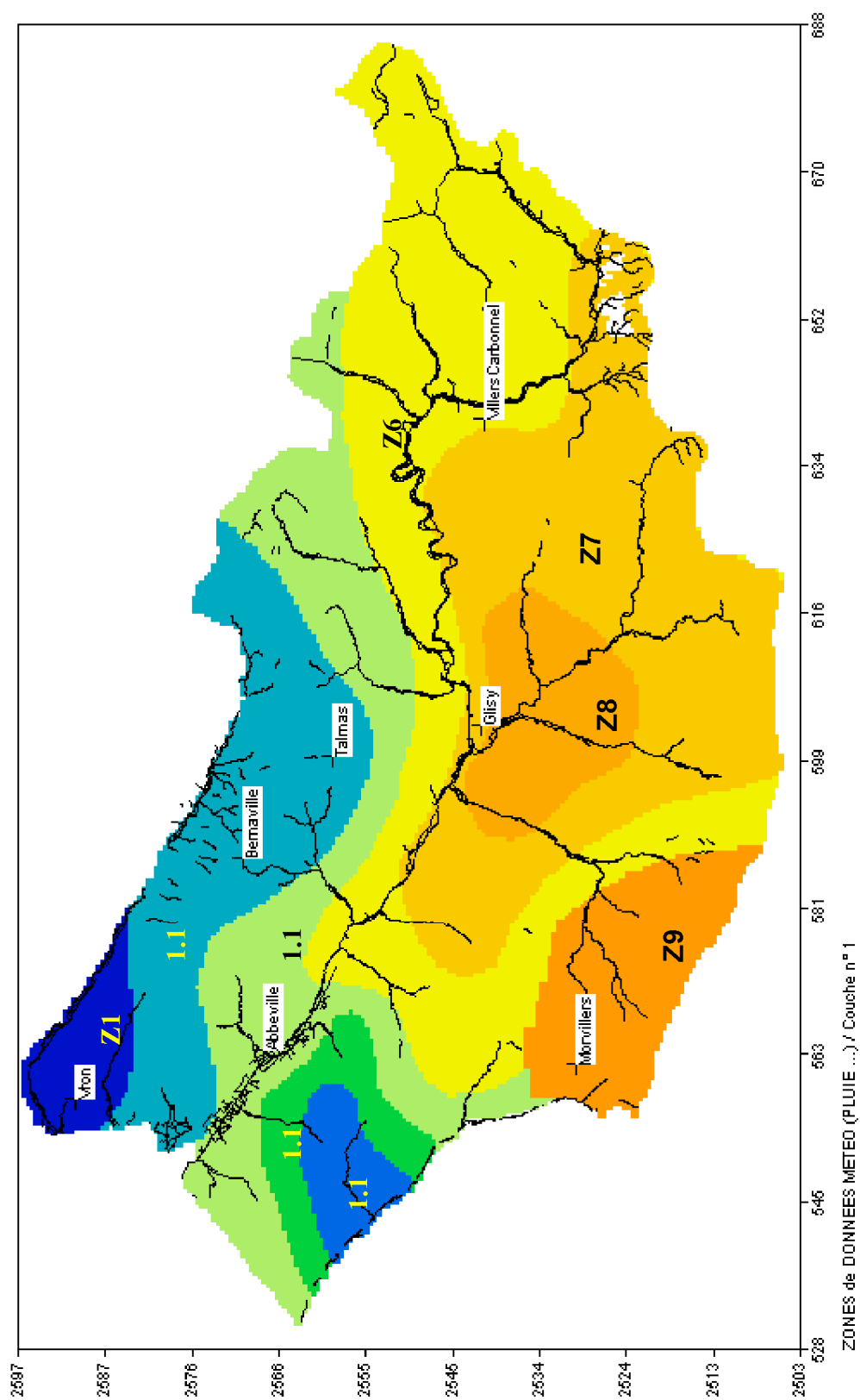


Fig. 65 - Zones météorologiques après calage en régime transitoire.

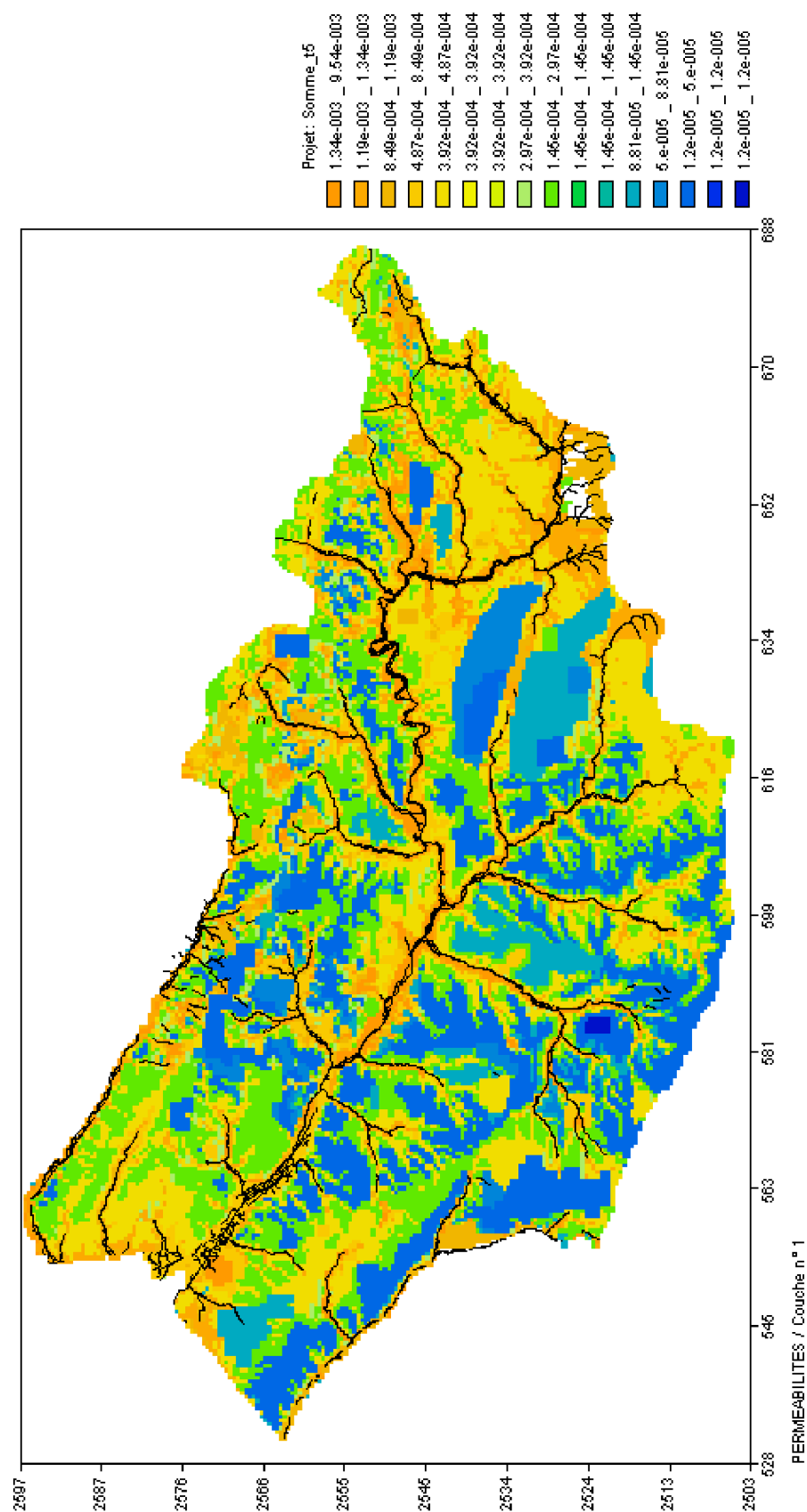


Fig. 66 - Champ de perméabilité issu du calage du modèle de la Somme en régime transitoire.

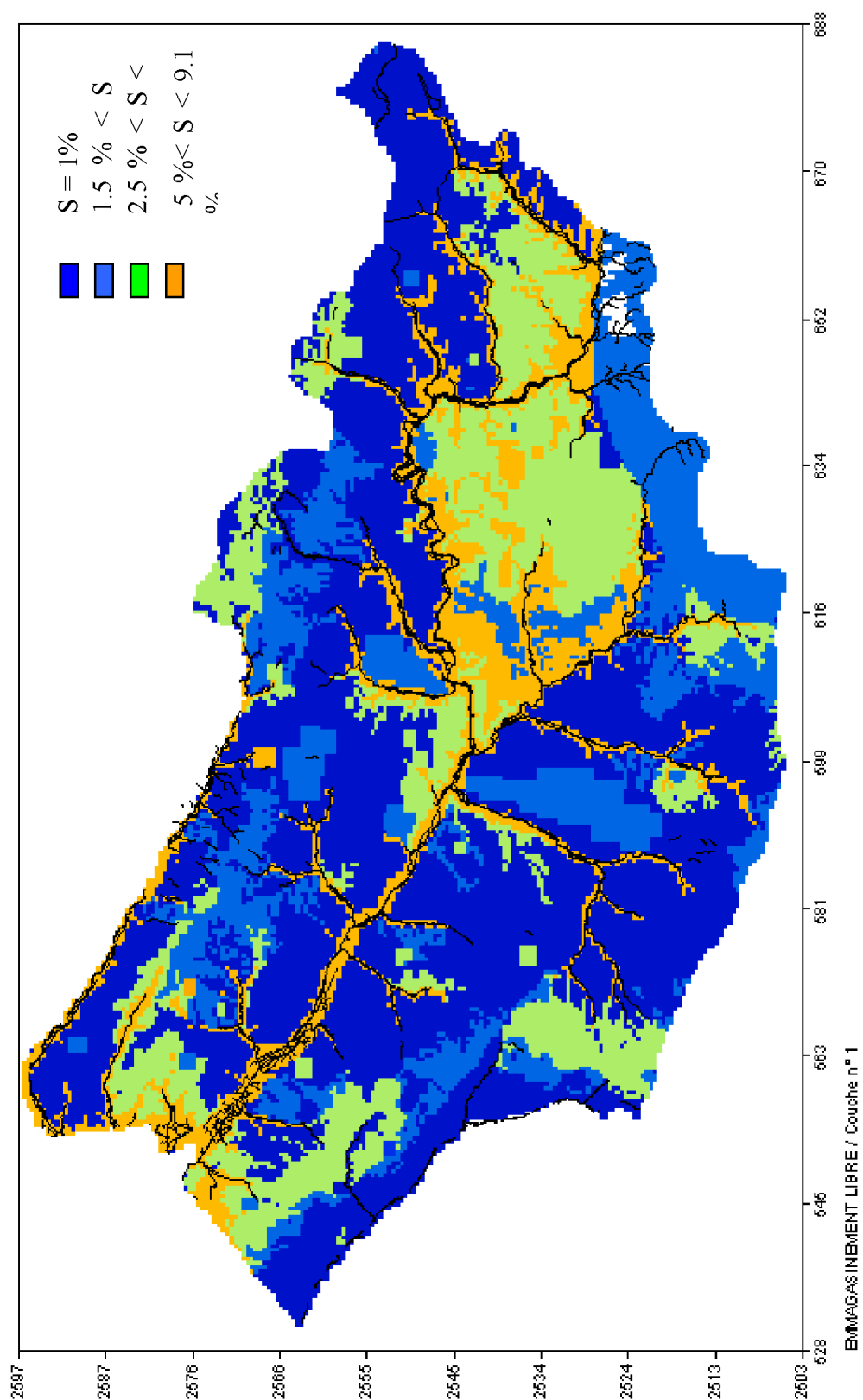


Fig. 67 - Carte de coefficient d'emmagasinement après calage du modèle en transitoire.

- **Calage de la piézométrie**

Sur les figures 68 à 71 sont reportées la charge hydraulique observée dans les piézomètres et les charges simulées par le modèle. Les autres résultats sont reportés en annexe 4.

Globalement, le modèle reproduit de manière très satisfaisante la piézométrie observée, en termes d'amplitude et de variation.

Dans la partie aval du bassin, dans le bassin de la Selle et sur le plateau de Santerre, le modèle est bien calé.

Sur la partie amont du bassin de la Somme, la piézométrie est un peu plus haute que celle observée (fig. 70). Ceci est probablement lié au manque de données sur la cote de l'eau et aussi à la non prise en compte du canal (canal de Saint-Quentin et canal du Nord...).

Dans le bassin de la Nièvre, le modèle sous-estime la cote piézométrique (fig. 69) et la nappe ne soutient pas assez le débit de la rivière en période d'étiage (cf. fig. 72).

Dans ce bassin la géométrie du système est complexe et il semble utile de disposer de données de forages complémentaires, ainsi que d'une analyse lithologique des faciès du Turonien sub-affleurant pour mieux cerner son fonctionnement.

- **Calage des débits des rivières**

Les débits observés dans les 5 stations de jaugeage et les débits simulés par le modèle à un pas de temps mensuel sont présentés sur les figures 73 à 77.

Le modèle reproduit de manière très satisfaisante le débit de la Somme à Abbeville et globalement de manière satisfaisante sur les autres stations de jaugeage.

Les débits de la Nièvre sont sous-estimés en période d'étiage, dû à une piézométrie calculée par le modèle légèrement plus basse que celle observée.

Par rapport au modèle global, le modèle maillé intègre la variabilité spatiale des précipitations. Tout débit général calculé par le modèle est la résultante du débit d'échange nappe rivière, du débit de débordement de la nappe et du débit de ruissellement issu du calcul de bilan à chaque pas de temps.

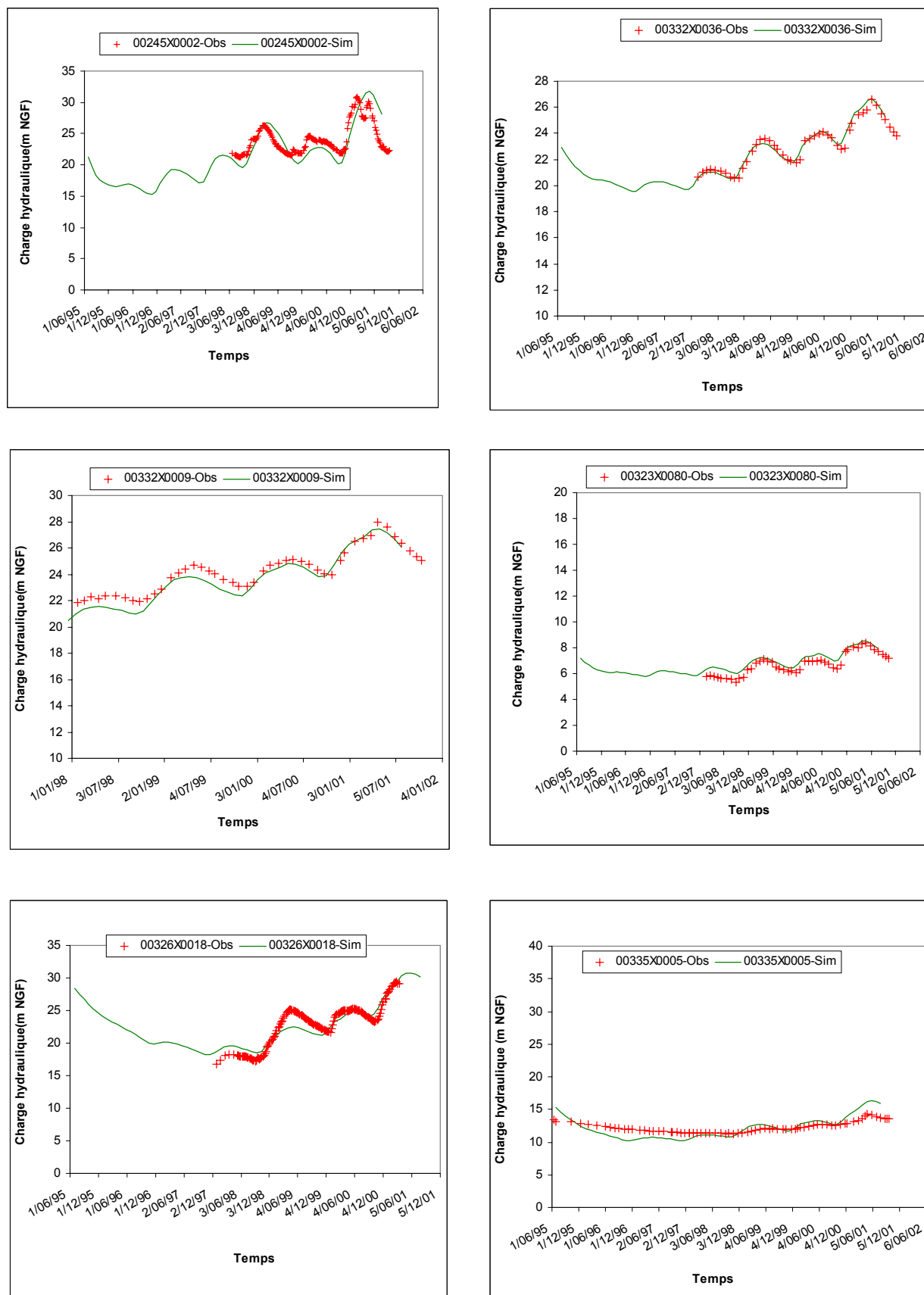


Fig. 68 - Historiques de la piézométrie simulée et de la piézométrie observée dans la Somme aval.

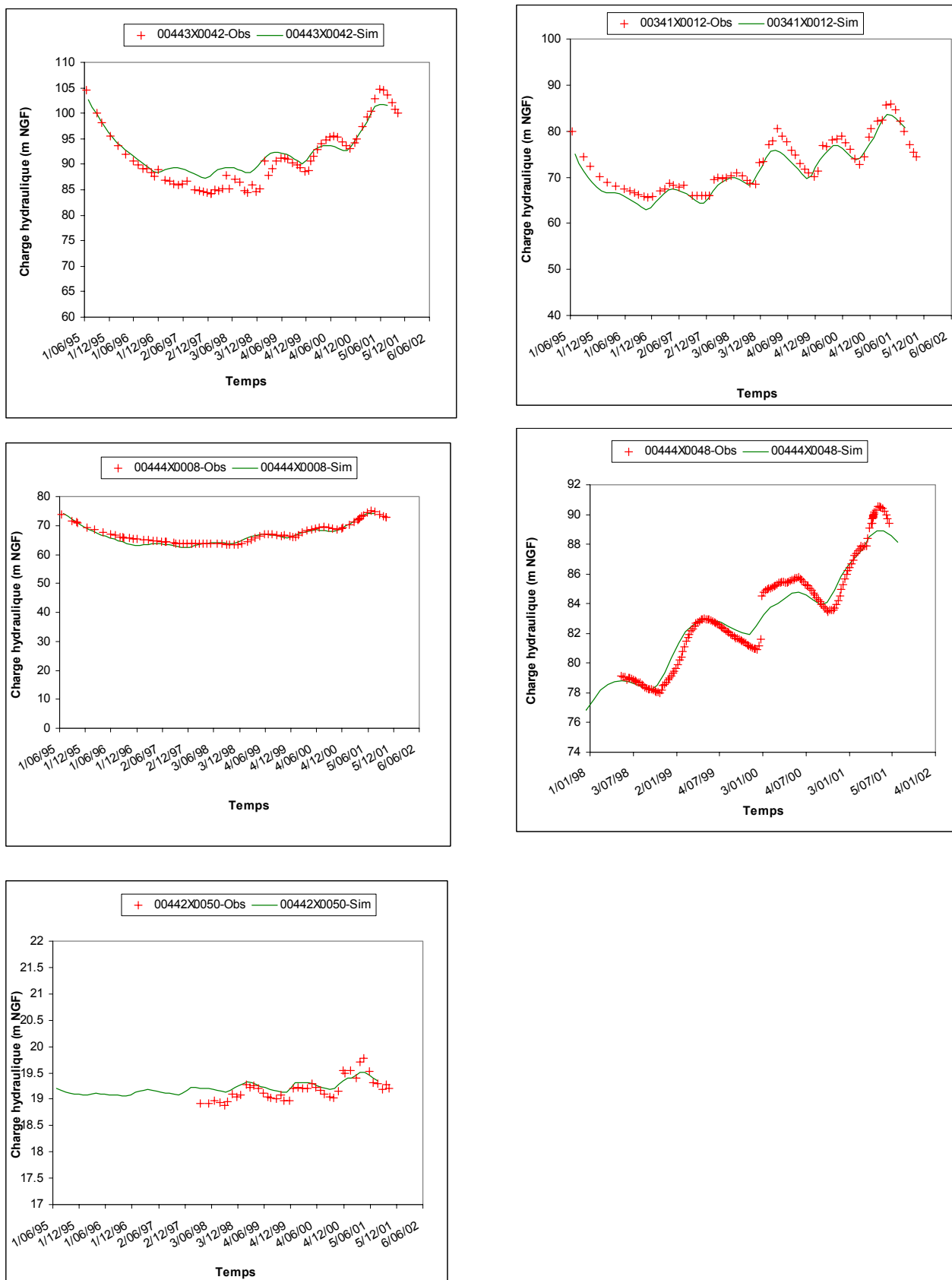


Fig. 68 (suite) - Historiques de la piézométrie simulée et de la piézométrie observée dans la Somme aval.

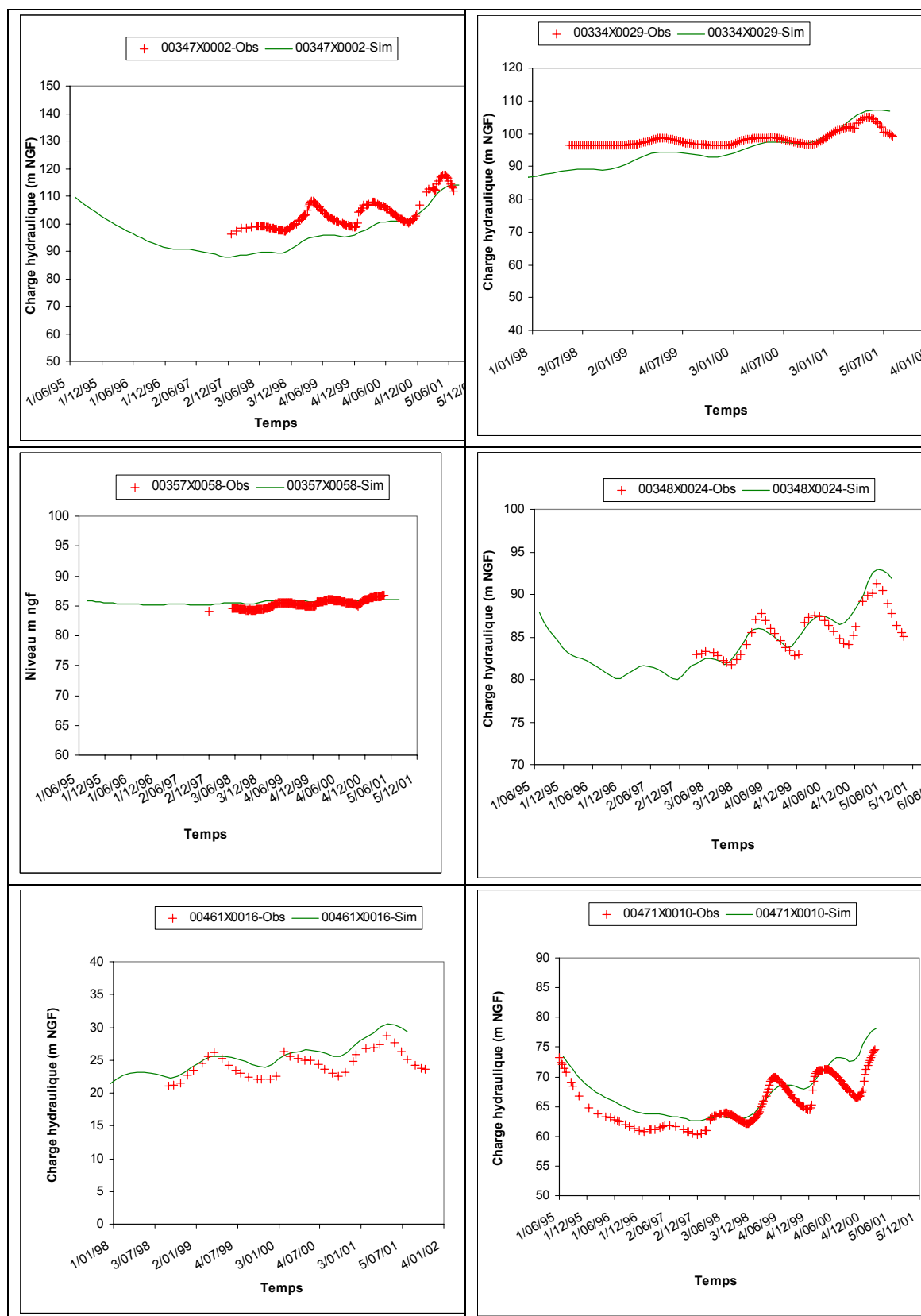


Fig. 69 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans les bassins de la Nièvre et de l'Hallue.

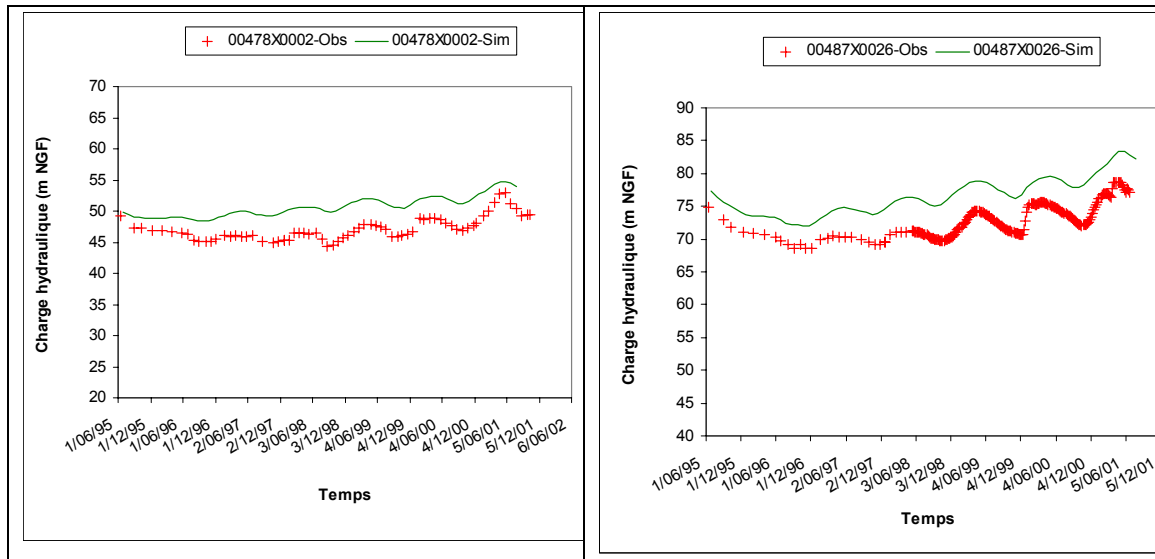


Fig. 70 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans la Somme amont.

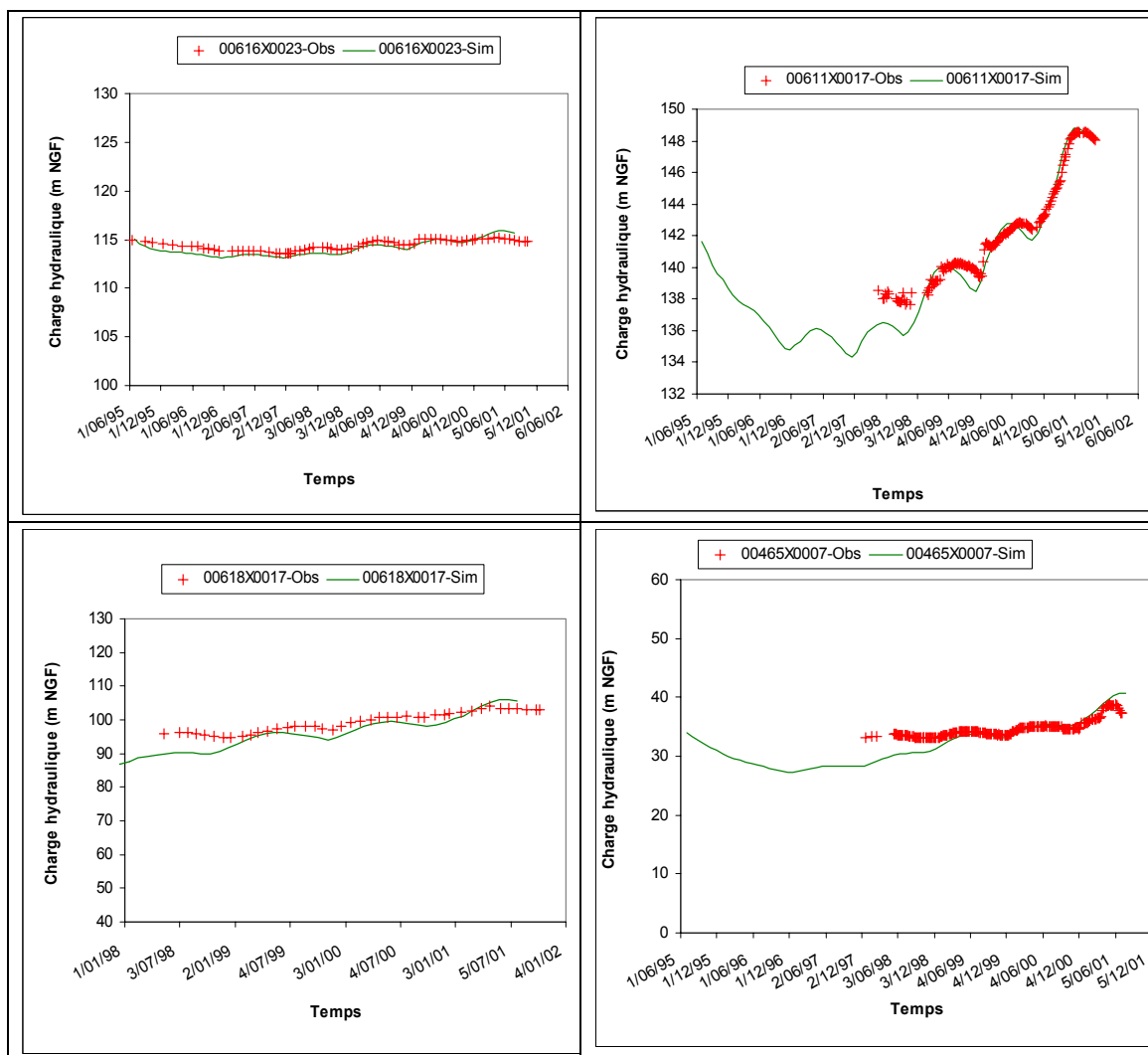


Fig. 71 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans le bassin de la Selle.

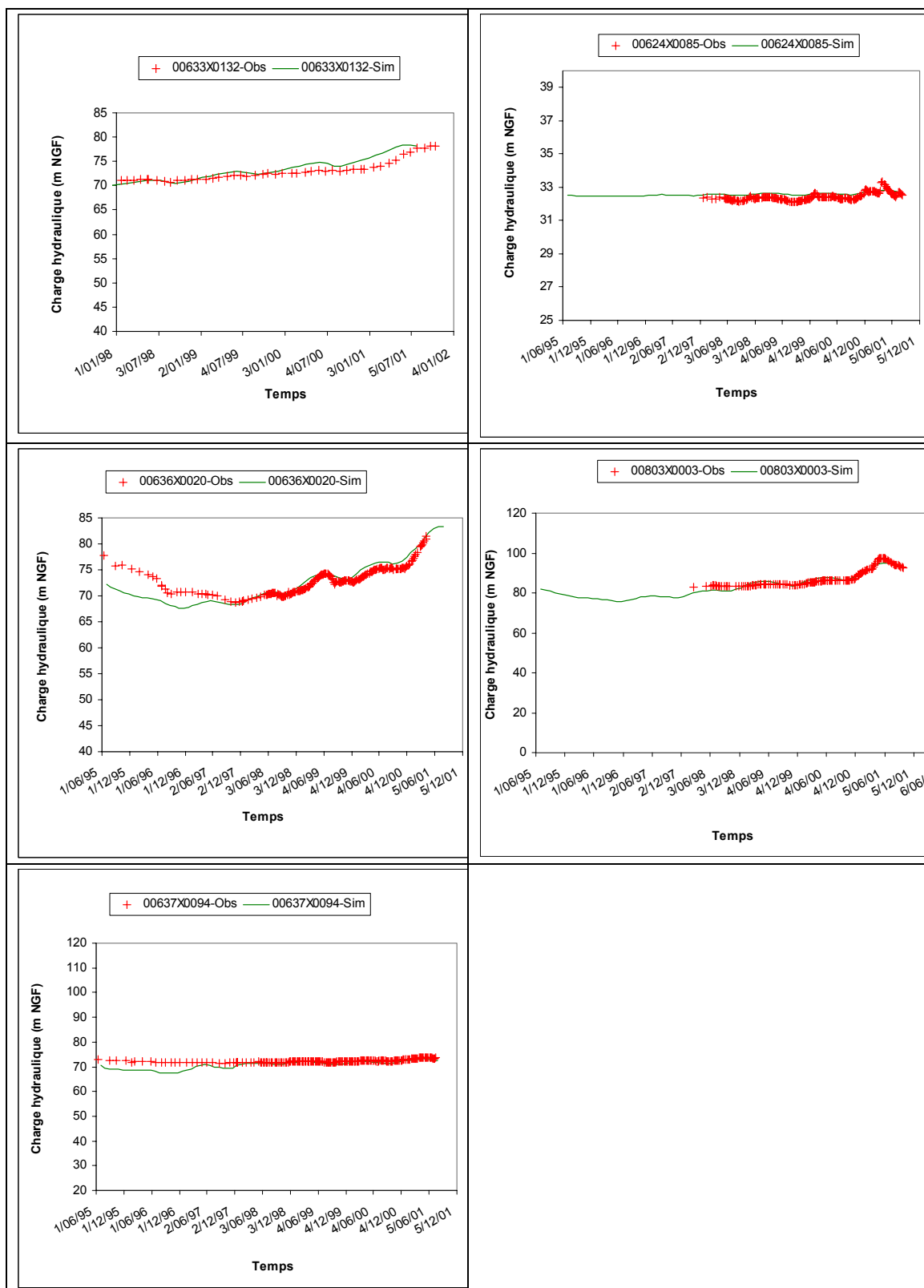


Fig. 72 - Historiques de la piézométrie simulée et celle observée dans le bassin de l'Avre.

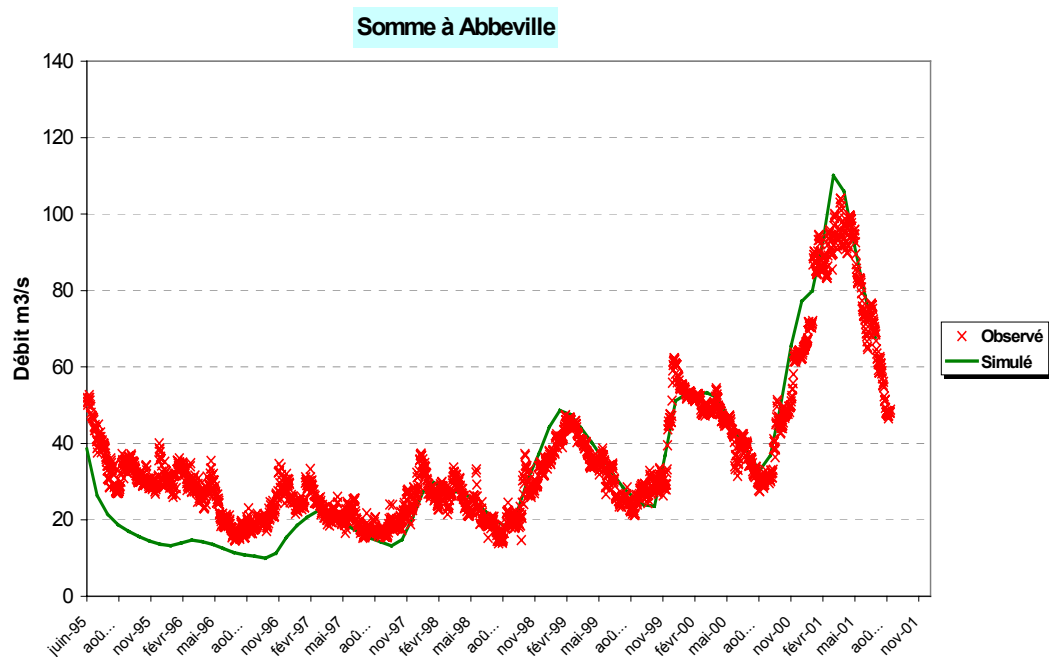


Fig. 73 - La Somme à Abbeville : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.

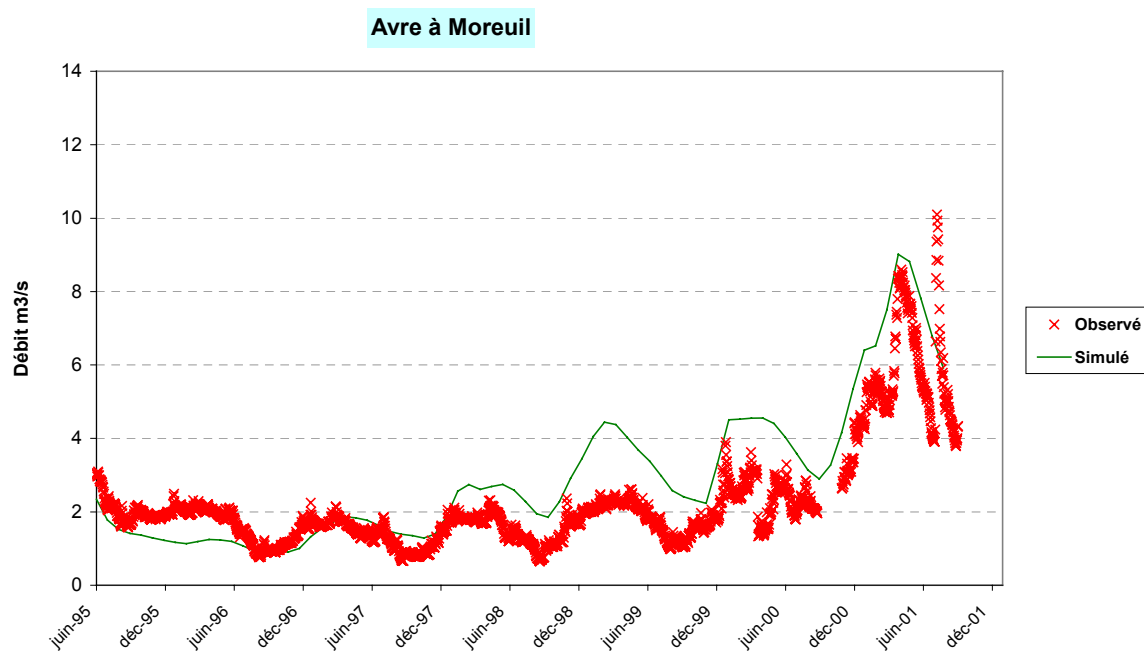


Fig. 74 - L'Avre à Moreuil : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.

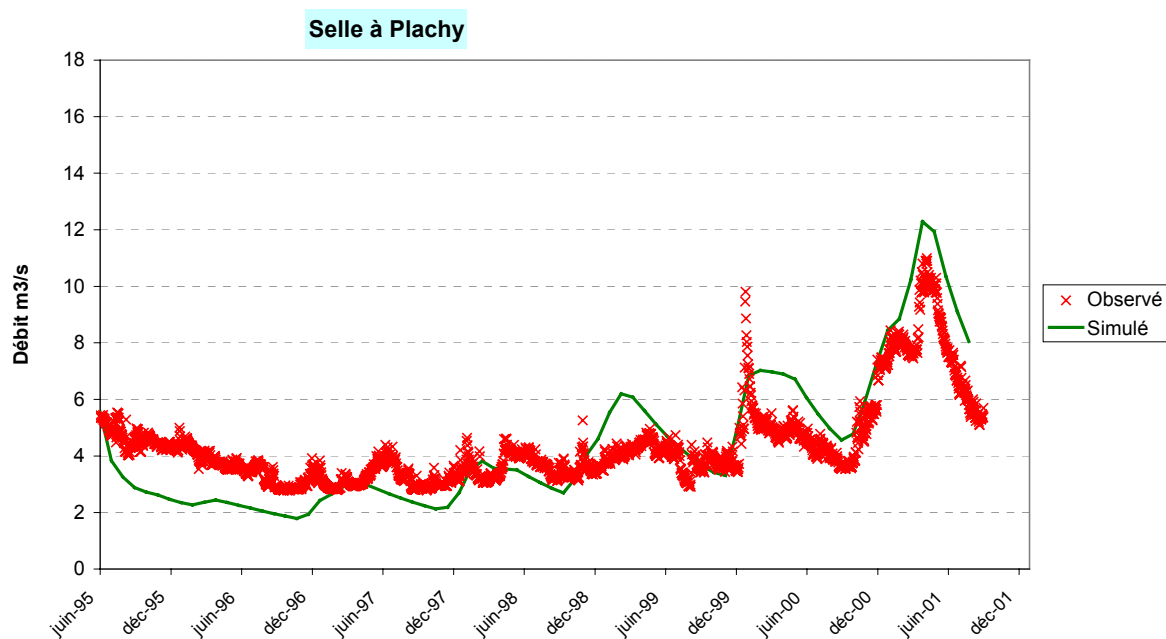


Fig. 75 - La Selle à Plachy : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.

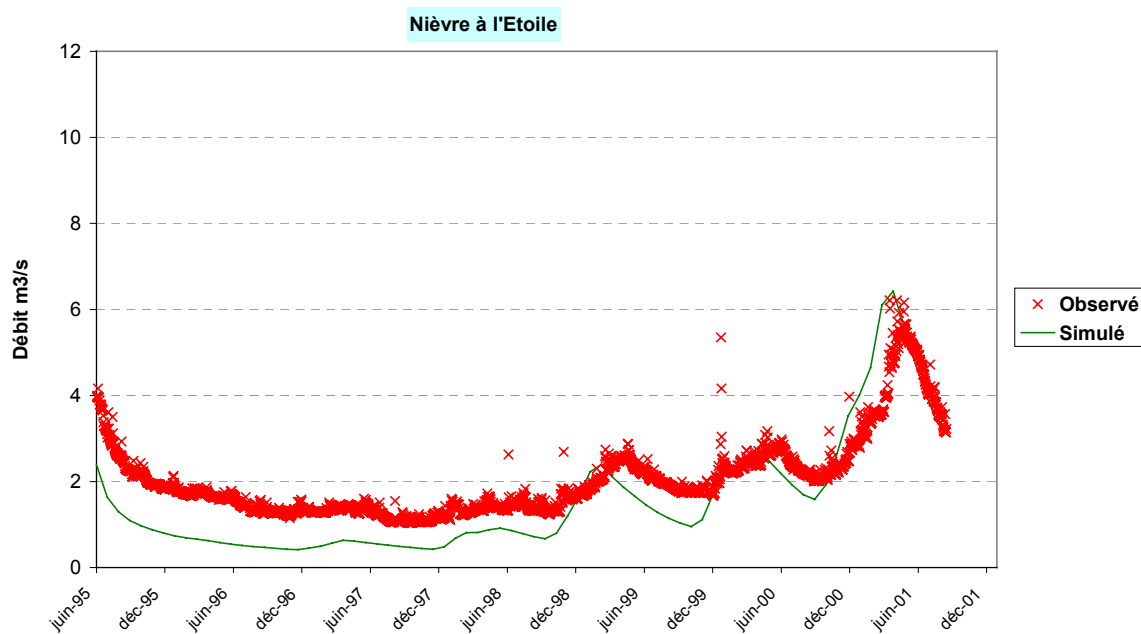


Fig. 76 - La Nièvre à l'Etoile : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.

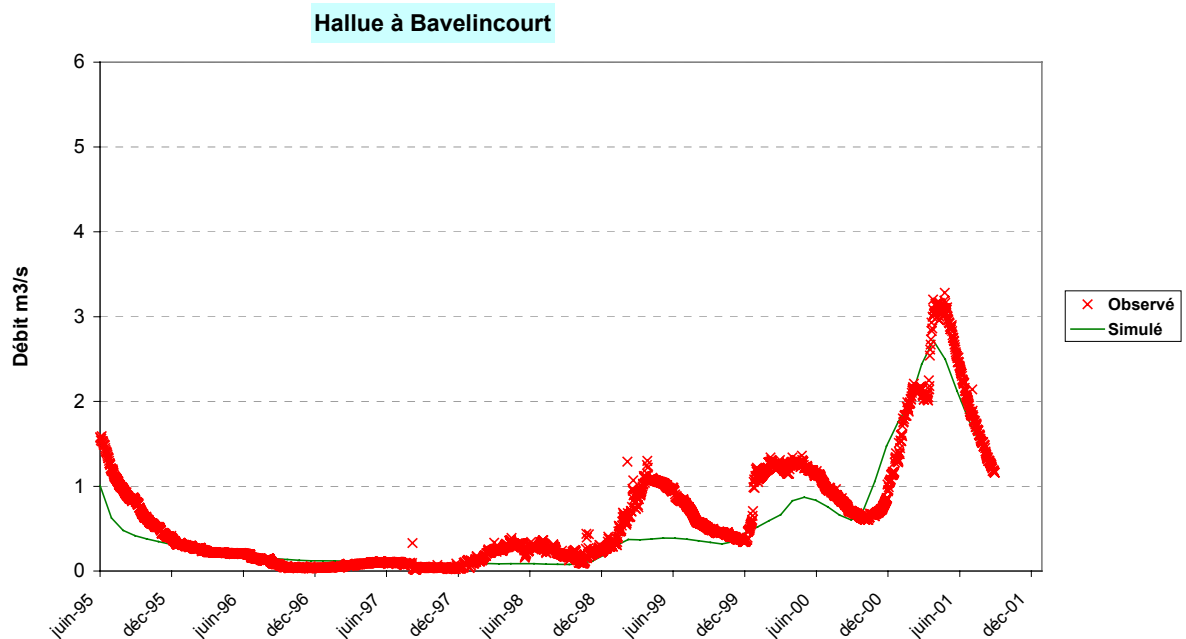


Fig. 77 - L'Hallue à Bavelincourt : comparaison du débit observé et celui calculé par le modèle maillé.

c) Contribution de la nappe aux débits de la Somme à Abbeville

La contribution de la nappe au débit de la Somme inclut le débordement de la nappe et les échanges nappe rivière dans la Somme et ses différents affluents.

La figure 78 représente l'évolution en fonction du temps du débit de la Somme à Abbeville, du débit de débordement de la nappe « Qd », du débit d'échange nappe rivière « Qn-r » et du débit d'alimentation globale de la rivière par la nappe « Qd + Qn-r ». Cette figure montre que le débit de la rivière est totalement soutenu par la nappe en période de basses eaux.

Les débits d'échange nappe rivière et le débit de débordement en avril 2001 ont doublé par rapport à la même date en 2000. En effet, Qn-r est passé de 33 m³/s en avril 2000 à 56,5 m³/s en avril 2001 et Qd est passé de 14,7 m³/s à 31,5 m³/s.

Au moment des inondations (avril 2001) l'apport de la nappe (débordement + échange nappe rivière) au débit de Somme s'élève à lui seul à **89 m³/s** soit 80 % du débit total de la Somme.

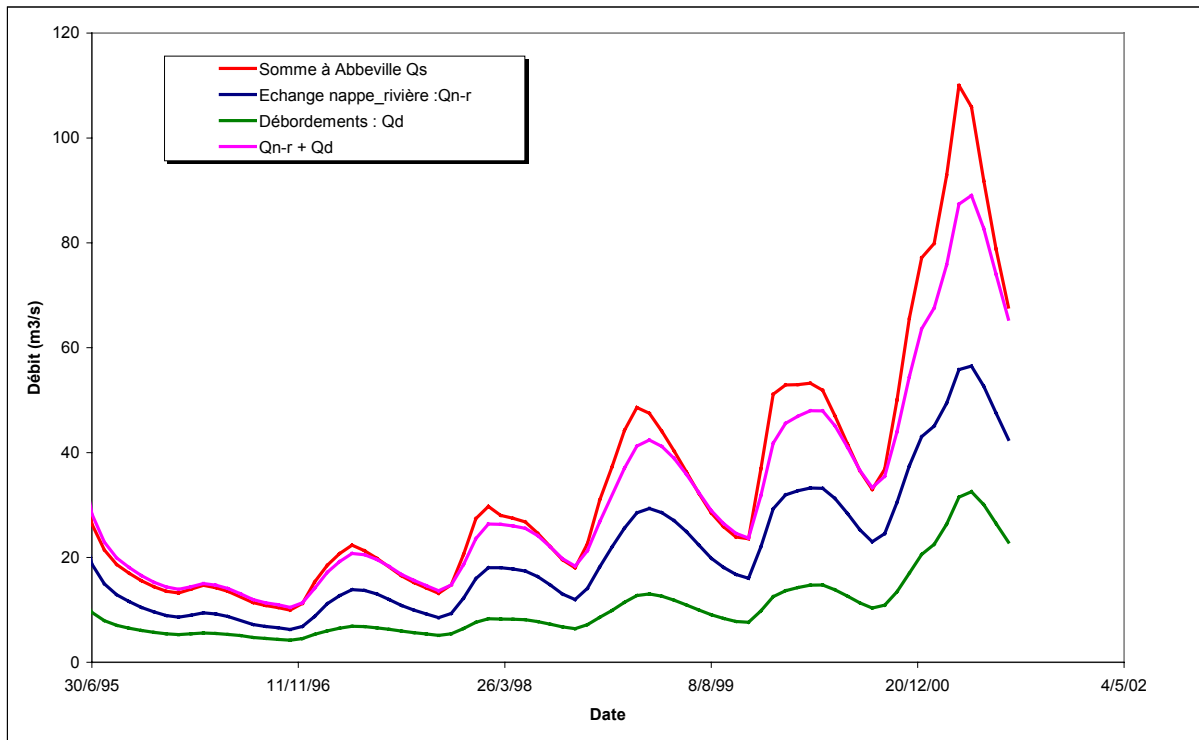


Fig. 78 - Contribution de la nappe au débit de la Somme à Abbeville.

- **Analyse des flux et bilan de stockage de la nappe**

Le bilan des flux pour la période de juin 1995 à juillet 2001 est reporté dans le tableau 10.

Les termes négatifs représentent les flux sortant du système aquifère, par prélèvement, débordement, échanges nappe rivière ou par les limites du modèle. Les termes positifs représentent les flux entrant dans le système aquifère (la recharge par exemple).

Le débit global aux limites du modèle représente la somme des débits entrants et sortants du système par les limites. Le global des échanges nappe rivière représente la somme des échanges nappe rivière dans le système. Pour faciliter la lecture du tableau 10, nous avons reporté sur la figure 77, les flux de recharge, le stockage et le déstockage de la nappe.

Les différents termes du flux (entrant et sortant) permettent de calculer le stockage et le déstockage de l'eau dans l'aquifère. L'analyse du tableau 11 montre que globalement la nappe stocke l'eau entre mi-novembre et avril de chaque année avec un maximum en janvier (sauf pour l'année 1996, déficitaire). La vidange de la nappe se fait entre mai et octobre.

Date	Recharge 1 000 m ³ /j	Débit global aux limites 1 000 m ³ /j	Prélèvements 1 000 m ³ /j	Débordement 1 000 m ³ /j	Global échange nappe/ rivière 1 000 m ³ /j	Stockage (+) déstockage (-) 1 000 m ³ /j
30-06-1995	0,0	- 611,6	- 434,4	- 824,8	- 1 618,8	- 3 489,6
30-07-1995	0,0	- 513,0	- 606,5	- 687,5	- 1 293,3	- 3 100,2
29-08-1995	0,0	- 453,2	- 434,4	- 609,6	- 1 112,1	- 2 609,3
28-09-1995	107,0	- 430,5	- 262,4	- 562,0	- 1 000,8	- 2 148,7
28-10-1995	186,6	- 413,8	- 262,4	- 525,0	- 905,2	- 1 919,9
27-11-1995	151,8	- 384,1	- 262,4	- 491,9	- 829,5	- 1 816,1
27-12-1995	222,7	- 366,8	- 262,4	- 468,7	- 773,5	- 1 648,8
26-01-1996	489,2	- 365,6	- 265,5	- 456,9	- 747,1	- 1 345,8
25-02-1996	1 190,2	- 391,6	- 265,5	- 470,9	- 775,1	- 712,9
26-03-1996	1 502,9	- 406,5	- 265,5	- 483,4	- 815,4	- 467,9
25-04-1996	1 200,4	- 387,3	- 265,5	- 475,0	- 797,7	- 725,0
25-05-1996	963,0	- 363,1	- 265,5	- 460,7	- 756,0	- 882,2
24-06-1996	774,2	- 332,3	- 474,7	- 439,8	- 688,9	- 1 161,4
24-07-1996	621,9	- 299,0	- 684,0	- 411,7	- 623,8	- 1 396,3
23-08-1996	500,4	- 276,3	- 474,7	- 392,8	- 590,1	- 1 233,2
22-09-1996	403,3	- 259,8	- 265,5	- 378,9	- 570,2	- 1 070,6
22-10-1996	331,8	- 244,9	- 265,5	- 365,9	- 541,0	- 1 085,0
21-11-1996	1 459,7	- 315,4	- 265,5	- 390,8	- 590,2	- 101,6
21-12-1996	3 283,7	- 434,5	- 265,5	- 464,1	- 759,2	1 360,9
20-01-1997	3 549,0	- 475,0	- 258,4	- 518,0	- 964,4	1 333,5
19-02-1997	3 681,4	- 500,6	- 258,4	- 560,6	- 1 098,9	1 263,2
21-03-1997	3 718,6	- 516,0	- 258,4	- 594,6	- 1 198,3	1 151,4
20-04-1997	2 952,2	- 488,2	- 258,4	- 588,9	- 1 186,2	430,7
20-05-1997	2 351,6	- 453,4	- 258,4	- 569,8	- 1 126,5	- 56,4
19-06-1997	1 912,2	- 420,5	- 378,2	- 543,8	- 1 035,7	- 465,8
19-07-1997	1 562,2	- 387,3	- 498,0	- 514,7	- 934,7	- 772,2
18-08-1997	1 253,5	- 354,8	- 378,2	- 489,0	- 859,9	- 828,0
17-09-1997	1 008,1	- 326,1	- 258,4	- 466,5	- 799,6	- 842,2
17-10-1997	812,4	- 298,6	- 258,4	- 444,6	- 735,0	- 923,7
16-11-1997	1 839,7	- 351,9	- 258,4	- 469,6	- 806,1	- 45,9
16-12-1997	3 916,4	- 486,0	- 258,4	- 557,2	- 1 056,7	1 558,6
15-01-1998	5 348,9	- 601,1	- 258,4	- 660,5	- 1 379,2	2 449,9
14-02-1998	5 140,1	- 634,7	- 261,7	- 718,0	- 1 562,0	1 964,7
16-03-1998	4 095,9	- 608,1	- 261,7	- 711,4	- 1 562,0	956,9
15-04-1998	3 842,7	- 603,6	- 261,7	- 709,7	- 1 538,7	734,1
15-05-1998	3 569,8	- 593,4	- 261,7	- 703,1	- 1 504,2	512,8
14-06-1998	2 838,3	- 551,2	- 261,7	- 671,0	- 1 413,7	- 53,8
14-07-1998	2 264,3	- 502,7	- 422,4	- 628,8	- 1 273,7	- 557,7
13-08-1998	1 811,4	- 453,6	- 583,0	- 583,6	- 1 123,1	- 926,1
12-09-1998	1 579,3	- 440,6	- 422,4	- 553,7	- 1 034,3	- 865,9
12-10-1998	3 491,4	- 558,7	- 261,7	- 620,0	- 1 218,7	837,9
11-11-1998	5 691,0	- 722,4	- 261,7	- 743,0	- 1 573,4	2 396,0
11-12-1998	6 510,6	- 826,3	- 261,7	- 855,2	- 1 901,7	2 671,0
10-01-1999	7 420,7	- 927,2	- 261,7	- 988,7	- 2 215,1	3 033,3
09-02-1999	7 592,0	- 976,3	- 265,0	- 1 099,6	- 2 464,2	2 790,0
11-03-1999	6 596,7	- 941,0	- 265,0	- 1 126,3	- 2 536,7	1 730,6
10-04-1999	5 442,4	- 877,5	- 265,0	- 1 089,6	- 2 468,8	744,4

Tabl. 10 - Termes du bilan des flux de 1995 à 1999 (calage).

Date	Recharge 1 000 m ³ /J	Débit global aux limites 1 000 m ³ /J	Prélèvements 1 000 m ³ /J	Débordement 1 000 m ³ /J	Global échange nappe/rivière 1 000 m ³ /J	Stockage (+) déstockage (-) 1 000 m ³ /J
10-05-1999	4 460,4	- 804,9	- 265,0	- 1 025,5	- 2 334,7	33,1
09-06-1999	3 545,6	- 729,3	- 265,0	- 946,8	- 2 152,3	- 545,0
09-07-1999	2 829,4	- 654,6	- 421,4	- 863,1	- 1 935,4	- 1 042,2
08-08-1999	2 261,8	- 583,7	- 577,8	- 784,7	- 1 715,9	- 1 397,4
07-09-1999	1 860,9	- 529,1	- 421,4	- 723,1	- 1 564,4	- 1 374,1
07-10-1999	1 598,5	- 496,9	- 265,0	- 674,7	- 1 449,9	- 1 284,8
06-11-1999	2 211,7	- 545,9	- 265,0	- 660,3	- 1 385,4	- 641,6
06-12-1999	5 986,1	- 717,7	- 265,0	- 846,1	- 1 900,8	2 259,4
05-01-2000	8 221,8	- 847,9	- 265,0	- 1 082,1	- 2 528,7	3 500,8
04-02-2000	7 495,6	- 877,8	- 265,0	- 1 178,5	- 2 759,5	2 417,2
05-03-2000	6 945,3	- 887,4	- 265,0	- 1 230,6	- 2 828,2	1 736,4
04-04-2000	6 685,1	- 898,7	- 265,0	- 1 273,0	- 2 872,8	1 377,9
04-05-2000	6 114,1	- 880,3	- 265,0	- 1 273,3	- 2 867,8	829,9
03-06-2000	4 898,2	- 818,9	- 265,0	- 1 197,3	- 2 701,2	- 82,1
03-07-2000	3 882,2	- 743,7	- 437,0	- 1 090,3	- 2 450,2	- 836,6
02-08-2000	3 089,5	- 667,6	- 609,0	- 978,3	- 2 183,7	- 1 346,7
01-09-2000	2 620,0	- 629,5	- 425,6	- 892,2	- 1 988,8	- 1 313,6
01-10-2000	4 246,6	- 720,1	- 265,0	- 943,4	- 2 122,3	198,3
31-10-2000	7 224,6	- 916,8	- 265,0	- 1 163,2	- 2 637,5	2 244,6
30-11-2000	9 463,2	- 1 108,9	- 265,0	- 1 469,1	- 3 239,5	3 382,8
30-12-2000	10 430,8	- 1 235,2	- 265,0	- 1 778,3	- 3 717,2	3 436,8
29-01-2001	10 057,4	- 1 292,2	- 265,0	- 1 945,3	- 3 891,9	2 664,6
28-02-2001	11 539,2	- 1 403,1	- 265,0	- 2 276,9	- 4 269,2	3 326,5
30-03-2001	13 144,5	- 1 496,1	- 265,0	- 2 723,7	- 4 824,1	3 836,7
29-04-2001	11 506,8	- 1 441,1	- 265,0	- 2 812,2	- 4 880,2	2 109,2
29-05-2001	8 943,4	- 1 314,1	- 265,0	- 2 598,5	- 4 551,6	215,1
28-06-2001	7 006,7	- 1 179,1	- 437,0	- 2 287,2	- 4 107,2	- 1 002,8
28-07-2001	5 524,0	- 1 054,6	- 494,3	- 1 981,9	- 3 672,0	- 1 677,8

Tabl. 11 - Termes du bilan des flux de 1999 à 2001.

En 2000, la nappe a commencé à augmenter son stock d'eau à partir de **décembre 1999** jusqu'en avril 2000. Le volume sur-stocké (ce volume est un différentiel qui s'ajoute à l'important stock permanent moyen de la nappe) est de 364 millions de m³ (stockage journalier × 30 et somme sur les 5 mois que dure l'événement). Pour 2001, la nappe a commencé à accroître sur stock d'eau à partir de **septembre 2000** jusqu'en mai 2001. Le volume sur-stocké durant cette période est près du double de celui de l'an 2000 soit 642 millions de m³ répartis sur une période d'environ 8 mois. Ceci est lié aux fortes précipitations enregistrées en février et mars 2001 et donc un **flux de recharge très important** vers la nappe (fig. 79). Cette augmentation très importante du stock d'eau fait suite aux conditions météorologiques très particulières. L'augmentation des échanges nappe rivière et des débordements observés en mars 2001 sont à l'origine des inondations qui se sont produites en mars et avril de l'année 2001.

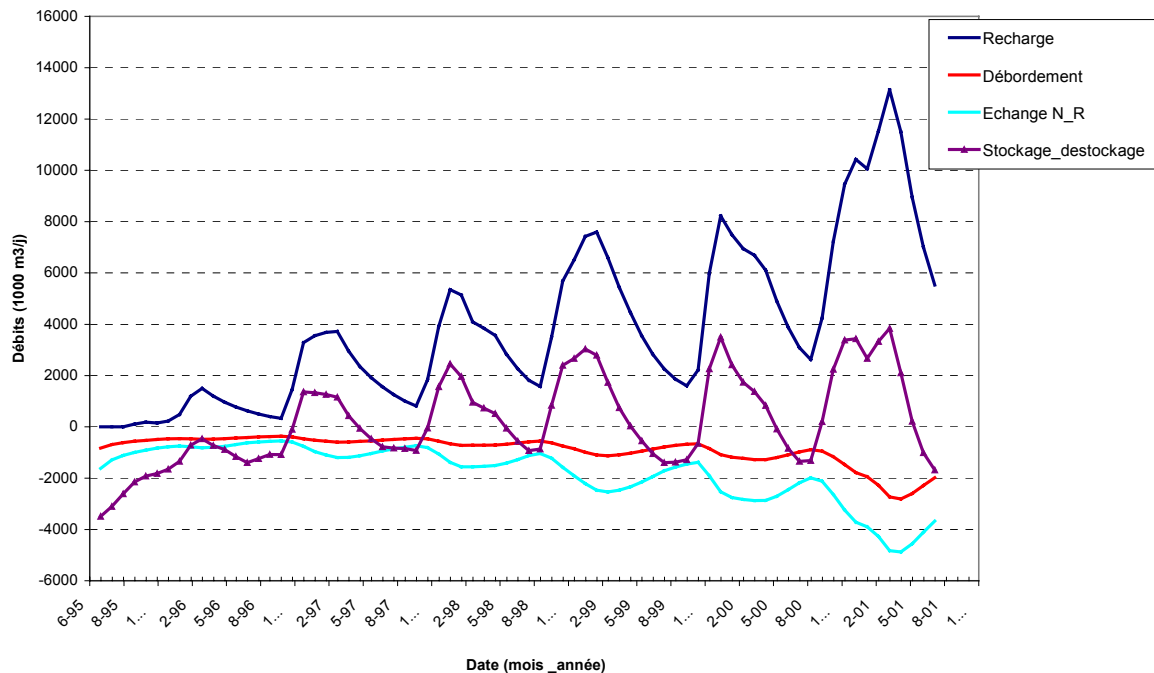


Fig. 79 - Quelques termes du bilan des flux calculés par le modèle.

• Conclusion sur le modèle distribué

Le modèle distribué de la Somme couvre une superficie de 7 397 km² discrétisée en 29 428 mailles carrées de 500 m de côté. Ce modèle a été calé en régime transitoire sur une période de 6 ans au pas de temps de 30 jours, à partir de 35 chroniques piézométriques et de chroniques de débits mesurés sur 5 stations de jaugeage portant sur la période juin 1995- juillet 2001.

Sa conception actuelle permet :

- un calcul du bilan hydroclimatique et,
- la simulation des écoulements d'eau en surface et dans le domaine souterrain ainsi que les échanges d'eau entre ces deux domaines.

Le modèle actuel constitue une première approche de la connaissance et de la simulation du fonctionnement du système aquifère, et des écoulements dans les rivières. Il permet une première évaluation de l'importance respective des échanges nappe rivière et des débordements de nappe au cours des différents stades de la crue de l'hiver 2000-2001, ainsi que celle de la contribution de la nappe à cet événement catastrophique.

Le modèle a été construit de manière à reproduire les différentes composantes de l'écoulement en surface (ruissellement, débordement, échange nappe rivière, débit amont) à chaque pas de temps et dans chaque maille rivière.

Le CETMEF a intégré ces données dans un modèle de propagation des écoulements de surface (rapport spécifique, avril 2002).

Sur la période de calage le modèle reproduit de manière très satisfaisante :

- l'évolution de la piézométrie,
- les débits dans les rivières.

Les résultats du modèle ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les précipitations très importantes enregistrés durant l'automne 2000 et l'hiver 2000-2001 et les conditions météorologiques très particulières de cette période ont eu pour conséquence une recharge très importante de la nappe répartie sur longue période (8 mois au lieu de 4 en 1999-2000). Ce phénomène a entraîné une augmentation du volume d'eau stocké dans la nappe, deux fois plus grand que le volume équivalent stocké en 1999-2000 et, consécutivement, une augmentation très forte des débits d'échanges de la nappe vers la rivière ainsi que des débits de débordements propres de la nappe.
- L'analyse de l'évolution des débits d'échange nappe rivière et des débits de débordement calculés par le modèle montre que la contribution de la nappe au débit de la Somme constitue la totalité du débit à l'étiage. Cette contribution ne descend pas au-dessous de 80 % en période de crue.

Le modèle indique que lors de la crue de mars-avril 2001, les débits d'échanges nappe-rivières et les débits de débordements sont près de deux fois plus importants que ceux calculés pour mars-avril 2000. Au moment des inondations (avril 2001) l'apport de la nappe au débit de la Somme s'élève à $89 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 80 % du débit total de la Somme.

10. Amélioration de l'outil de prévision

10.1. AMELIORATIONS A APPORTER AU MODELE MAILLE

L'amélioration du modèle doit porter sur 3 axes :

- la prise en compte des écoulements dans les canaux ;
- une meilleure connaissance des profils en long et en travers des rivières pour améliorer le calage du modèle notamment dans sa partie amont ;
- une validation du modèle sur la période 2000 - 2002 . Actuellement, le modèle est calé sur une période relativement courte. Pour simuler des scénarios prévisionnels relatifs à des situations extrêmes ou portant sur la faisabilité d'aménagements de protection ou de prévention, le modèle gagnerait à être calé sur une période plus longue (1988 - 1999 par exemple) puis validé sur la période de 2000 - 2002. Ce travail devrait être parachevé par l'exécution de tests de sensibilité.

10.2. AMELIORATION ET EXTENSION DU DISPOSITIF DE SUIVI

Le dispositif de suivi actuel des nappes est constitué de 62 ouvrages, 31 d'entre eux disposent de mesures hebdomadaires et 18 de mesures mensuelles en 2001. Il existe cinq stations de jaugeage disposées sur quatre affluents de la Somme (fig. 80).

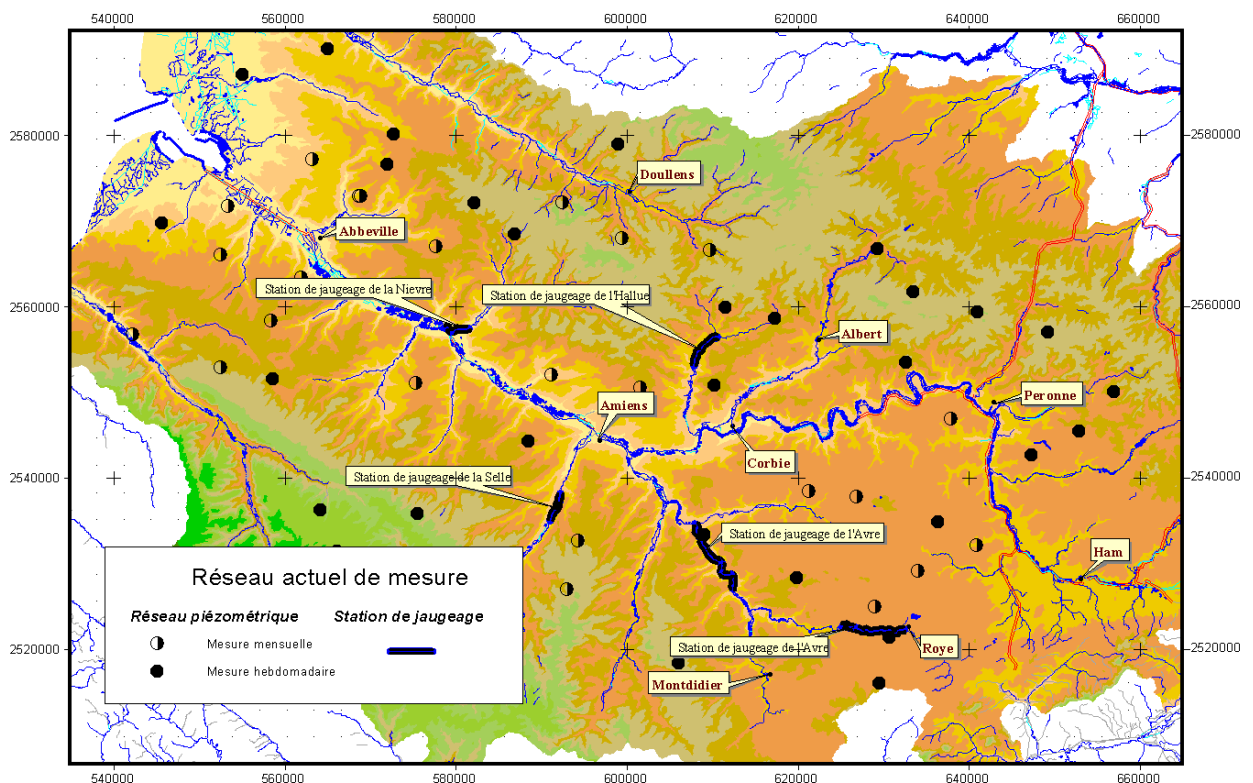


Fig. 80 - Dispositif actuel de suivi des nappes et des rivières.

10.2.1. Amélioration du dispositif de suivi des nappes

La répartition des piézomètres correspond à un objectif de connaissance générale des aquifères présents. Pour compléter le dispositif actuel en lui associant un objectif d'alerte ou de contrôle dans le temps du phénomène des crues, il est nécessaire d'envisager la mise en place de nouveaux ouvrages.

Les cartes suivantes (fig. 81 et 82) ont été établies en mars et juin 2001, sur la base des résultats fournis par le modèle maillé. Elles confirment la dissymétrie du fonctionnement hydrodynamique des sous-unités des systèmes aquifères selon qu'ils sont situés en rive droite ou gauche de la Somme.

Par rapport au moment du déclenchement des crues :

- en rive droite, les volumes maximaux sont atteints en mars ;
- en rive gauche, les maximums seront atteints plus tardivement, en juin.

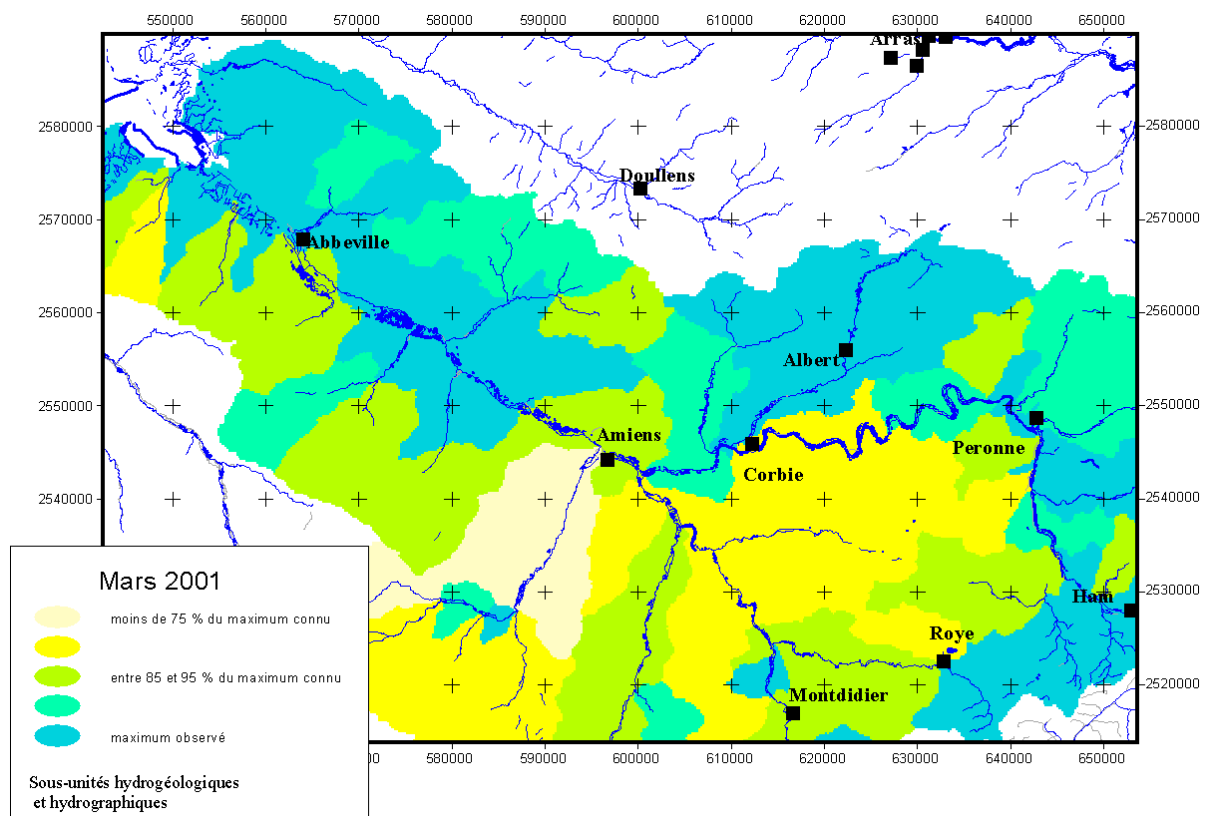


Fig. 81 - État de charge relative des sous-entités hydrogéologiques - mars 2001.

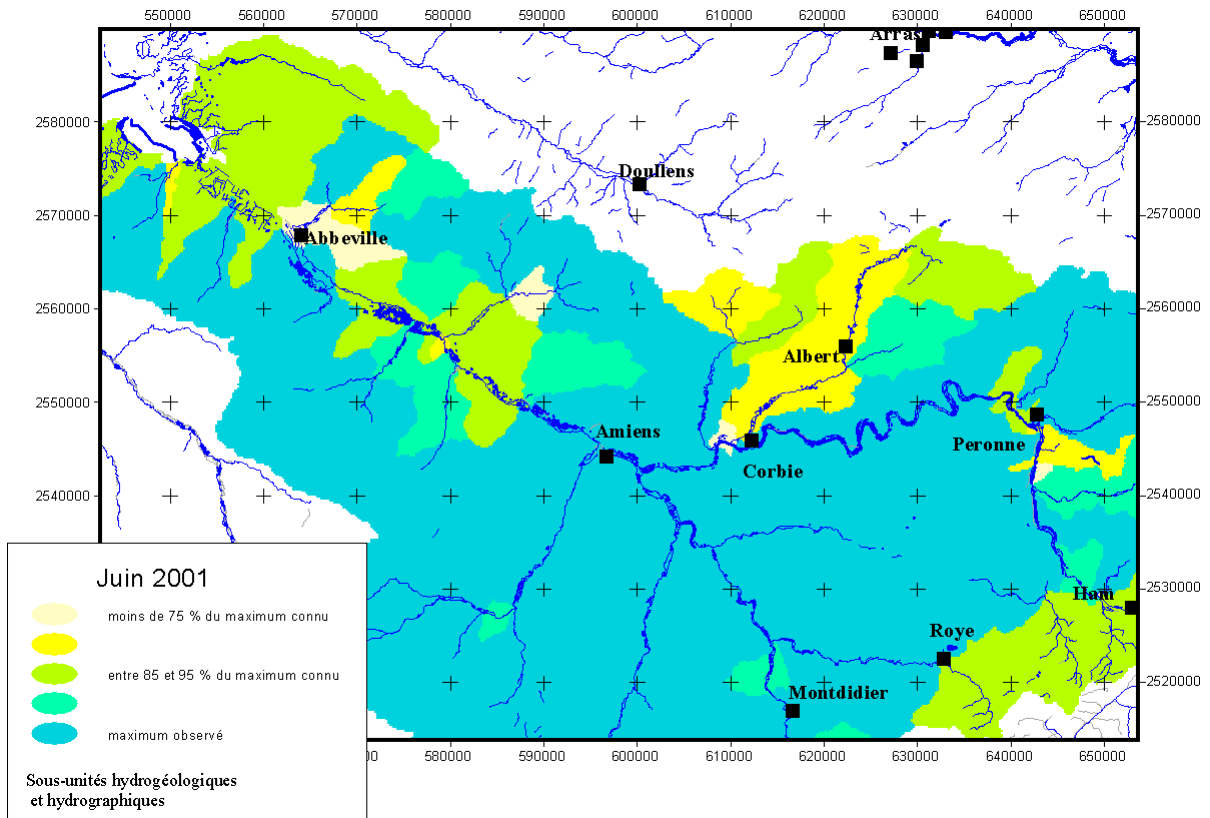


Fig. 82 - État de charge relative des sous-entités hydrogéologiques - juin 2001.

Par rapport à la durée du phénomène :

- la majeure partie des eaux souterraines en rive droite a atteint sa cote maximale de manière quasi-synchrone avec les crues de rivières. Au mois de juin la décrue de la nappe est déjà engagée ;
- en rive gauche, les eaux souterraines atteignent leur cote maximale plus tardivement et semblent accompagner le phénomène des crues dans sa durée.

Cinq nouveaux piézomètres sont proposés, ils permettront d'affiner la surveillance des nappes dans un objectif de suivi des phénomènes de déclenchement et de persistance des crues. Ils permettront une meilleure connaissance des aquifères dans les interfluvés concernés.

- Deux piézomètres sont proposés en rive droite de la Somme, en aval d'Amiens. Ils permettront de suivre l'évolution de l'entité hydrogéologique 004c.
- Deux piézomètres sont proposés en rive gauche de la Somme, toujours en aval d'Amiens. Ils permettront de suivre l'évolution des eaux des entités 008a et 008b.
- Un nouveau piézomètre est situé en amont d'Amiens, il suit les eaux de l'entité 007a.

La figure 83 présente la localisation de ces ouvrages, situés dans un rayon de 2,5 km.

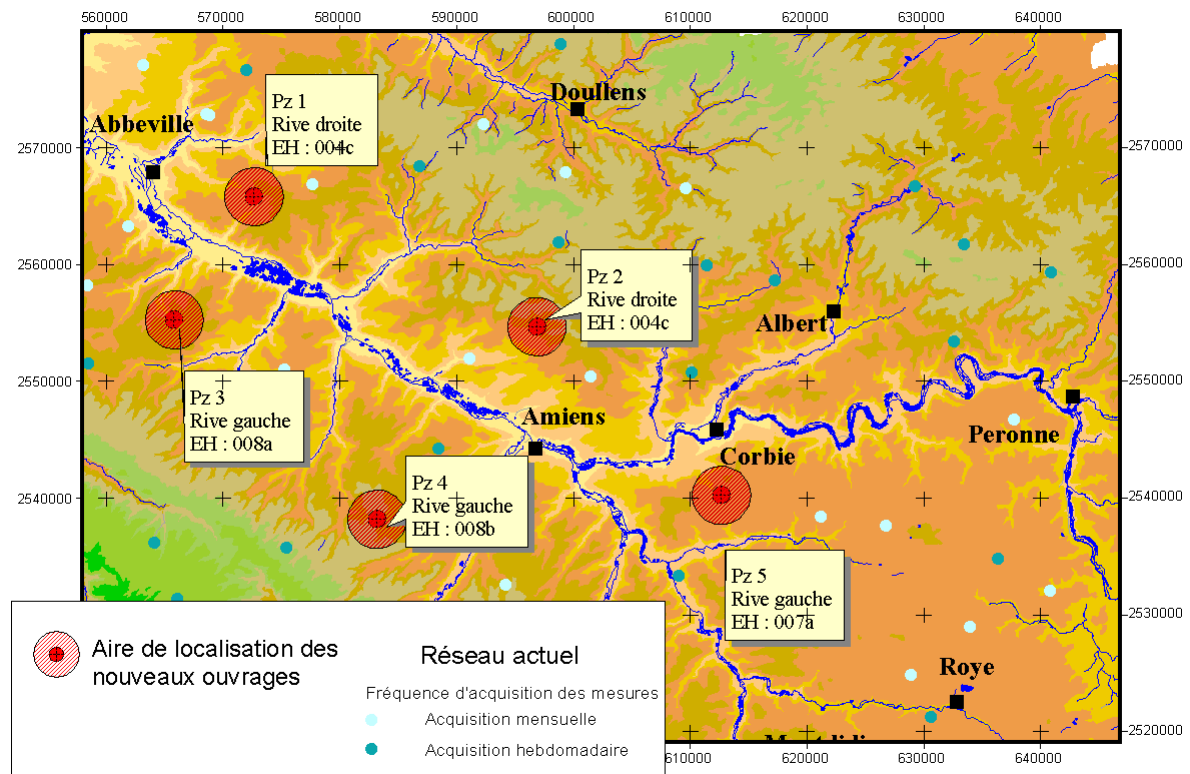


Fig. 83 - Localisation des cinq piézomètres proposés pour l'amélioration et l'extension du dispositif de suivi des nappes.

10.2.2. Mise en place du dispositif de suivi de la zone non saturée

Le suivi du rôle de la zone non saturée dans les remontées rapides du niveau de nappe, par conséquent dans les « crues de nappe », implique la mise en place de sites de suivi et de mesure. Deux sites peuvent être proposés. Le premier dans le bassin de l'Hallue (rive droite de la Somme), le second, en rive gauche de la Somme, sur les plateaux du bassin versant de la Selle.

Ces sites se composent :

- d'un ouvrage traversant la nappe de la craie et équipé d'un appareil d'enregistrement automatique du niveau de la nappe ;
- d'une série de tensiomètres installés à des profondeurs spécifiques (0,25 m ; 0,60 m ; 1,0 m ; 1,50 m ; 2,0 m ; 3,0 m ; 5,0 m, voir au-delà selon la technologie mise en œuvre) ;
- d'une série de sondes pour la mesure de la teneur en eau volumique installées aux mêmes profondeurs.

10.2.3. Amélioration du dispositif de suivi des rivières

Il conviendrait d'augmenter la densité des stations de suivi des eaux de surface par la mise en œuvre de nouvelles stations limnigraphiques, essentiellement sur le cours de la Somme et des bassins les plus contributifs.

11. Conclusion

La représentation du bassin versant de la Somme à l'aide de modèles numériques permet de disposer d'un outil de prévision pour analyser par anticipation les réactions du bassin et les débits des cours d'eau en période de hautes eaux. Ces modèles nous ont appris que les réactions du bassin sont fortement marquées par la dynamique des nappes. Jusqu'à 80 % du flux des rivières en crue peut avoir pour origine des eaux de nappes.

Les débits observés en un instant donné sont contraints en large part par les événements -météorologiques notamment- qui ont précédé au cours d'une période d'une durée au moins annuelle. Ceci tient au transit de ces eaux à travers le milieu souterrain, ce qui renvoie à l'importance que prend l'hydrodynamique des nappes qui se caractérise par des temps de réaction généralement longs. C'est ce que l'on peut qualifier de réaction des nappes de « basse fréquence ». C'est un atout qui permet de dire qu'à tout moment la connaissance des événements passés permet de cerner avec une précision déjà appréciable les événements à venir.

À court terme la réaction des nappes aux événements pluvieux récents est la réaction de type « haute fréquence ». Elle intègre une réaction particulière d'un horizon souterrain dit de zone non saturée qui peut conduire sous certaines conditions à des écoulements importants, interférant avec la réaction lente de la nappe. La part d'incertitude qui tient aux pluies à venir sur le court terme n'est, par conséquent, pas aussi importante qu'on pouvait le penser tant que l'on ne s'intéressait qu'aux seuls débits des cours d'eau.

Les scénarios de pluies d'hiver ne sont pas aléatoires. Une étude statistique, comme il a pu être fait, des chroniques de pluies enregistrées sur 40 ans, incluant des années exceptionnellement humides, permet d'afficher des scénarios pluviométriques possibles avec un bon niveau de probabilité.

Enfin l'inertie des nappes, qui place sur une échelle pluriannuelle le passage d'une période de hautes eaux à une période de basses eaux, fait qu'à une année exceptionnellement pluvieuse comme 2001 succède une année nécessairement de hautes eaux même si les pluies retrouvent un régime quasi-normal. C'est ce que nous observons en 2002, selon un effet mémoire des nappes issu de la situation 2001.

Les modèles globaux qui ont été produits permettent de passer directement d'un signal d'entrée -la pluie en une station- à un signal de sortie significatif : par exemple le débit de la Somme en un point, un niveau local de nappe. Cet outil qui peut être actualisé avec facilité permet de suivre des points caractéristiques et donner des indications de l'état du bassin. Les simulations s'appliquent à tout point de la nappe, et à son environnement immédiat, ou à telle section jaugée de la Somme ou d'un de ses affluents et son environnement amont ou aval immédiat. Ces simulations ne sont pas mathématiquement

corrélables entre elles. C'est pourquoi, il est aussi nécessaire de recourir à un modèle maillé pour atteindre une approche spatiale.

Le modèle maillé de 29 400 mailles a été réalisé et calé en régime permanent d'abord, ce qui a permis de préciser la répartition spatiale des *perméabilités*, en mettant en évidence la conductivité hydraulique particulière des vallées humides et sèches. En faisant appel aux chroniques saisonnières, un calage en région transitoire a permis de préciser la variabilité spatiale du *coefficient d'emmagasinement* qui est le paramètre qui gère la capacité de stockage et de déstockage de la nappe, paramètre qui prend toute son importance dans le problème présent.

Cette approche analytique conduit à la compréhension des mécanismes hydrauliques dans leur détail et surtout leur distribution spatiale. Elle a permis d'identifier les zones fortement contributives sur lesquelles des moyens de contrôle ciblés pourront être mis en œuvre. Elle a conduit à cerner les facteurs qui ont conduit à la situation exceptionnelle de 2001, notamment le surstockage important d'eau en nappes.

Le modèle peut désormais être *exploité*. Il est possible de lui fournir des scénarios qui s'écarteront des situations réelles de 1998 à 2001 :

- différents scénarios pluviométriques ;
- différents états de « départ », par exemple des états de novembre en très hautes eaux ou très basses eaux ;
- différents scénarios de prélèvement d'eau dans la nappe, avec le détail des implantations, etc.

Il est désormais possible d'extraire du modèle différentes réponses, portant sur les stocks d'eau dans la nappe, sur les temps d'amortissement, sur la distribution spatiale des débits, etc. Les scénarios seront à définir dans les actions suivantes pour bien utiliser l'outil de prévision dans son ensemble.

ANNEXE 1

Critère statistique (critère de Nash) utilisé pour estimer la qualité d'une simulation

Si l'on considère deux séries de n observations O_i de moyenne \bar{O} , et de n valeurs simulées P_i , le critère de Nash est égal à :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (O_i - \bar{O})^2}$$

Le critère de Nash peut varier de $-\infty$ à 1. La valeur maximale est 1 pour une simulation identique aux observations. Une valeur nulle signifie que le modèle n'est pas meilleur que si l'on avait remplacé la valeur simulée par la moyenne des observations.

Le coefficient utilisé par GARDENIA est égal à :

- Racine carrée (EF), si le critère de Nash est positif.
- Racine carrée (-EF), si le critère de Nash est négatif.

ANNEXE 2

Résultats complémentaires de simulation du débit de la Somme à Abbeville - Modèle GARDENIA

1. RÉSULTATS OBTENUS À PARTIR DES DIFFÉRENTS POSTES MÉTÉOROLOGIQUES

En utilisant la configuration de GARDENIA avec un réservoir souterrain à une sortie unique, nous avons testé les jeux de données émanant de différentes stations pluviométriques afin de sélectionner la station qui permettait le meilleur calage, dans une limite de vraisemblance géographique (tabl. 1). La surface de bassin versant est égale à celle du bassin associé à la station (sans correction). Les ETP ont été calculées pour Abbeville, seule station fournissant une chronique de données pluviométriques sans lacune.

	R	Coeff P en %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts en mois
Bernaville	0,93	- 8,7	10	132	3	464	23,4
Meaulte	0,91	- 6,81	6	56,8	3	423	6,08
Oisemont	0,90	- 4,53	10	77,3	3	464	9,729
Hourdel	0,88	- 8,7	6	77,3	3	628	15,2
Vron	0,85	- 8,7	8,7	159	0,18	792	10,64
Glisy	0,948	+ 1,98	- 3	50	3	322	7,904
Abbeville	0,84	- 9,6	6	77,3	3	464	17,93
Epehy	0,945	- 6,05	10	59	3	382	9,73

Tabl. 1 - Résultats obtenus à partir des différents postes météorologiques.

La figure 1 confronte les débits simulés et les débits observés, en utilisant les pluies mesurées aux différents postes sur la période 1995-2001 (pour que cette figure reste lisible les simulations obtenues avec les postes de Glisy et de Cottenchy n'ont pas été reprises).

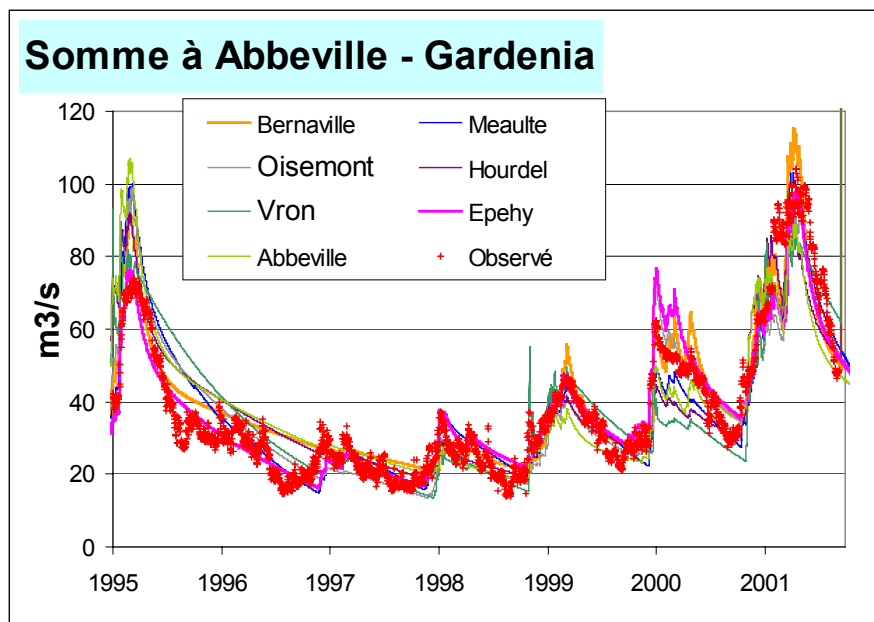


Fig. 1 - Simulation des débits de la Somme à Abbeville en prenant en entrée les données pluviométriques de différentes stations du bassin versant.

2. RÉSULTATS OBTENUS EN TESTANT LES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DU MODÈLE GARDENIA

En conservant les pluies de la station de Cottenchy-Boves et les ETP d'Abbeville, nous avons testé les différents schémas de réservoirs proposés par GARDENIA afin d'améliorer la simulation (tabl. 2).

	R	débit simulé dernier jour en m ³ /s	Coeff P En %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts1 en mois	T12 en mois ou seuil en mm	Ts2 en mois
1	0,948	56,48	5,9	- 4,92	48,02	3	336	7,62		
2	0,948	54,55	5,9	- 4,92	48,02	3	312,1	7,21	4,21	9,39
3	0,958	60,65	2,34	- 8,02	45,03	3	336,4	8,15	194	4,14
4	0,919	51,25	2,34	- 8,02	45,00	2	280	7,82		
5	0,946	49,26	2,34	- 8,02	45,00	3	300	7,60	220	0,7

- 1 Configuration 1 réservoir calage automatique
- 2 Configuration 2 réservoirs calage automatique
- 3 Configuration 1 réservoir à deux sorties calage automatique
- 4 Calage manuel à partir de la simulation 1
- 5 Calage manuel à partir de la simulation 3

Tabl. 2 - Synthèse des paramètres utilisés.

On rappelle que le débit observé le dernier jour est de 48,8 m³/s.

La figure 2 fait la comparaison entre les débits simulés et les débits observés en s'appuyant sur les différentes configurations de réservoirs pour la période 1995-2001 (pour que cette figure reste lisible les simulations obtenues avec les configurations 4 et 5 n'ont pas été reprises).

3. SIMULATIONS SUR LA PÉRIODE 1964-2001

Les ETP étant disponibles à Abbeville à partir de 1964, nous avons effectué une simulation sur l'ensemble de la période 1964-2001, en prenant les paramètres obtenus ci-dessus.

On obtient très souvent des débits simulés beaucoup plus élevés que les débits observés (fig. 3).

Les paramètres de la simulation 5 seront donc conservés pour les travaux ultérieurs de simulations.

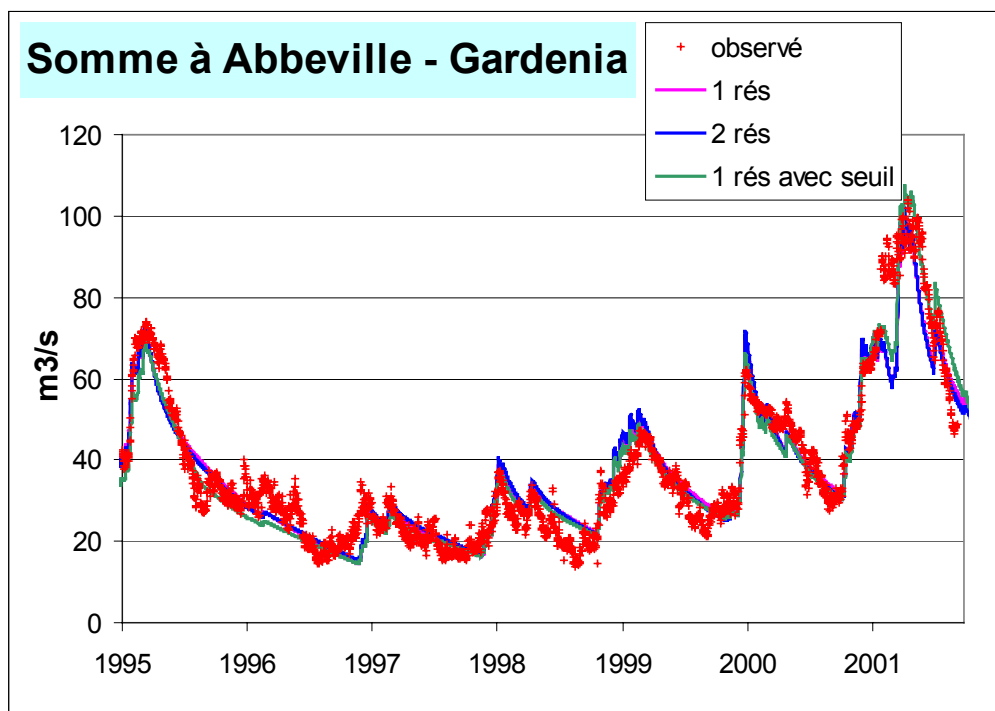


Fig. 2 - Simulations des débits de la Somme à Abbeville en prenant les différentes configurations de réservoir que permet le logiciel GARDENIA.

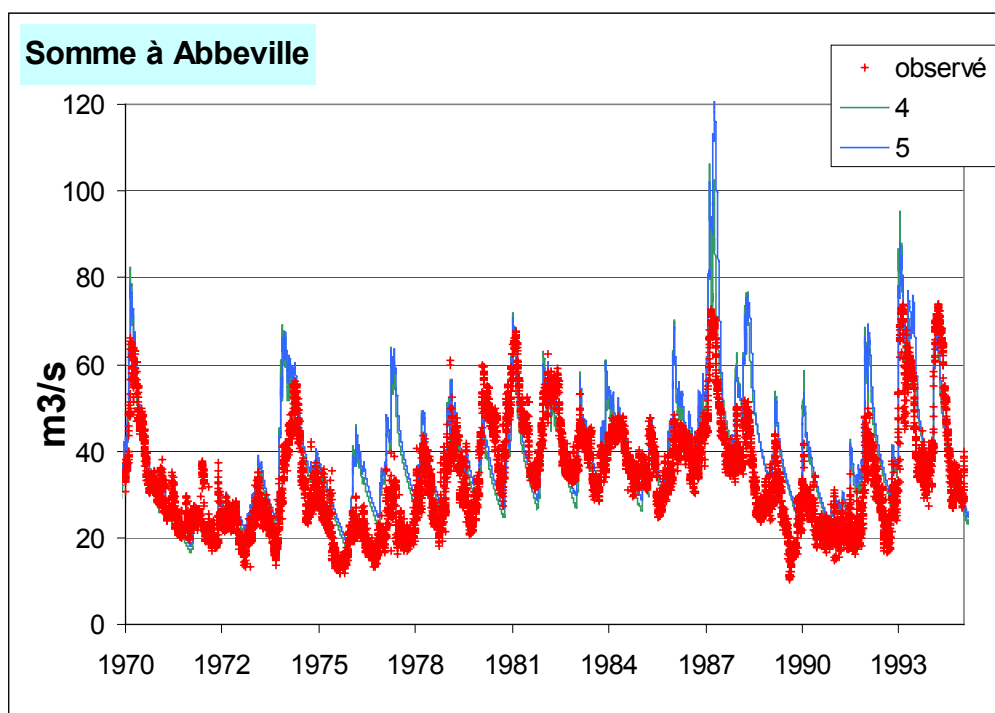


Fig. 3 - Comparaison des débits observés aux débits simulés obtenus pour la période 1970-1995, tout en conservant les paramètres des simulations 4 et 5.

Par calage automatique -le modèle optimise de lui-même les valeurs des paramètres-, sur la série de valeurs observées à partir de 1974 au lieu de 1995, on n'obtient pas un meilleur ajustement sur l'ensemble de la période, et l'ajustement se dégrade pour les dernières années. Les débits sont ainsi fortement sous-estimés en 1995, 2000 et 2001 (tabl. 3).

	R	Coeff P en %	Coeff ETP en %	Rumax en mm	Thg en mois	Ruiper en mm	Ts1 En mois	T12 en mois ou seuil en mm	Ts2 en mois
3	0,793	1,61	1,04	51,78	3	300	9,87		
1	0,803	0,34	- 3,51	54,06	3	354,6	7,675	220	1,91

Tabl. 3 - Paramètres obtenus par calage automatique du modèle sur la période 2001.

ANNEXE 3

Résultats complémentaires - Générateur de pluie et d'ETP - Modèle TEMPO

1. MODÉLISATION INVERSE DES ÉCOULEMENTS : GÉNÉRALITÉS

Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain). Ces réponses impulsionnelles sont estimées à partir de séries chronologiques pluie/débit, pluie/niveau.

D'une manière générale, la modélisation des écoulements consiste à calculer les réponses impulsionnelles lente Γ_l et rapide Γ_r , associées aux différents types d'écoulement.

Le transfert rapide (non linéaire) peut être dû au ruissellement de surface ou à l'effet de chasse résultant du comportement de la zone non saturée.

Le transfert lent (linéaire) met en jeu les différents processus d'infiltration induisant un retard plus ou moins important entre la pluie et le débit (ou la variation d'un niveau piézométrique) observés en sortie : infiltration lente et rapide, ruissellement différé,...

L'utilisation de deux réponses impulsionnelles rend le problème non linéaire, et sa résolution nécessite un processus itératif. L'équation du transport s'écrit :

$$S(t) = Surface.(\Gamma_r * P_r + \Gamma_l * P_l) + a.t + b \text{ (débit)}$$

ou

$$S(t) = (\Gamma_r * P_r + \Gamma_l * P_l) / Porosité + a.t + b \text{ (niveau piézométrique)}$$

où $*$ représente le produit de convolution discret $(f * g)(k) = \sum_{i=0,1} f(i).g(k-i)$, t le

temps, $S(t)$ la sortie de l'hydrosystème (débit, niveau piézométrique), le terme $a.t + b$ la tendance, *Surface* la surface du bassin d'alimentation, P_r et P_l les composantes de la pluie induisant le transfert rapide et lent, respectivement. Les réponses impulsionnelles Γ_l et Γ_r sont normalisées (aire unité) et sont donc sans dimension. Dans le cas où la sortie $S(t)$ représente un niveau piézométrique (exprimé par rapport au niveau de base), la notion de surface est remplacée par celle de porosité. Il s'agit en fait de la porosité efficace responsable des variations piézométriques.

La somme $P_{eff} = P_r + P_l$ représente la pluie efficace P_{eff} . Elle est calculée à partir d'un seuil $\Omega(t)$ de telle sorte que :

$$\begin{aligned} P_{eff} &= Pluie - \Omega(t) & \text{si } Pluie > \Omega(t) \\ P_{eff} &= 0 & \text{si } Pluie \leq \Omega(t) \end{aligned}$$

Le seuil $\Omega(t)$ est lui-même calculé à partir de la pluie et de l'ETP (ou température journalière) passées de sorte que :

$$\Omega(t) = \Gamma_P * Pluie + \Gamma_{ETP} * ETP + Cste$$

Les réponses impulsionnelles Γ_p et Γ_{ETP} sont représentées par des trapèzes (modèle à 2 x 4 degrés de liberté) :

$$\begin{array}{c} \text{---} / \text{---} \backslash \text{---} \\ \text{---} \backslash \text{---} / \end{array} \quad \begin{array}{c} \Gamma_{ETP} \\ \Gamma_p \end{array}$$

de sorte que $\Gamma_{ETP} > 0$ et $\Gamma_p < 0$: l'ETP augmente le seuil $\Omega(t)$ alors que la pluie le fait diminuer.

La part relative $\alpha(t) = P_r / (P_r + P_l)$ de la pluie impliquée dans le transfert rapide est donnée par la fonction $\alpha(t)$ qui, elle-même, dépend de la pluie efficace passée :

$$\alpha(t) = \Gamma_{Peff} * P_{eff} = \Gamma_{Peff} * (P_r + P_l)$$

La réponse impulsionnelle Γ_{Peff} est, là encore, représentée par un trapèze (modèle à 4 degrés de liberté) :

$$\text{---} / \text{---} \backslash \text{---} \quad \Gamma_{Peff}$$

Les solutions du modèle inverse sont les réponses impulsionnelles Γ_l et Γ_r , $\Omega(t)$ ($\Gamma_p, \Gamma_{ETP}, Cste$) et $\alpha(t)$ (Γ_{Peff}).

a) Le seuil de pluie efficace $\Omega(t)$

La prise en compte de la loi de conservation :

$$\begin{aligned} \sum P_{eff} \times Surface &= \sum S(t) \\ \text{ou} \\ \sum P_{eff} / Porosité &= \sum S(t) \end{aligned}$$

suppose le calcul de la pluie efficace, qui doit prendre en compte les pertes dues à l'évapotranspiration ainsi qu'à la recharge des sols.

Le calcul de la pluie efficace à partir de la pluie et de l'ETP (ou la température moyenne journalière) est réalisé grâce au seuil de pluie efficace $\Omega(t)$. Cette fonction du temps a la même dimension que la pluie (hauteur d'eau par unité de temps).

À un temps t donné, la hauteur de pluie efficace est...

- égale à la différence entre la hauteur de pluie et ce seuil si la hauteur de pluie est supérieure ou ...
- égale au seuil, ou...
- zéro si la hauteur de pluie est inférieure au seuil.

Comme on l'a vu, la fonction $\Omega(t)$ est obtenue à partir du produit de convolution de la pluie et de l'ETP (éventuellement T) et d'une réponse impulsionnelle constituée de 2 trapèzes de part et d'autre de l'axe des X . Le produit de convolution de l'ETP par la partie positive de la R.I. donne la contribution de l'ETP au seuil de pluie efficace (l'ETP ou T ont une contribution positive sur le seuil car l'une et l'autre de ces grandeurs caractérise la perte en eau des sols et de la végétation). Le produit de convolution de la pluie par la partie négative de la R.I. donne la contribution de la pluie au seuil $\Omega(t)$: la pluie a une contribution négative sur le seuil, suite à la recharge des sols.

b) Contribution de la pluie au transfert rapide $\alpha(t)$

Les processus de transfert intervenant à l'échelle de bassins font généralement intervenir plusieurs réponses impulsionnelles (ou fonctions de transfert). Deux réponses impulsionnelles peuvent être utilisées simultanément :

- une courte réponse impulsionnelle dite rapide, destinée à caractériser le ruissellement de surface d'un bassin versant ou la vidange gravitaire d'une nappe par « effet de chasse », c'est-à-dire après que se soit établie une continuité hydraulique entre la zone non saturée et la nappe (ce phénomène intervient principalement dans certains aquifères karstiques et dans des milieux à double porosité tels que la craie) ;
- une réponse impulsionnelle lente, nécessairement plus longue que la précédente, décrivant à la fois les processus de transferts rapides (s'ils sont linéaires) et différés : infiltration,...

Pour cela, la pluie efficace est décomposée en une composante rapide P_r et une composante lente P_l , chacune de ces composantes étant transférée à l'exutoire ou dans la nappe au moyen de la réponse impulsionnelle correspondante. La contribution de la pluie efficace au transfert rapide est décrite au moyen de la fonction $\alpha(t)$ dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Cette fonction donne, au temps t , la contribution de la pluie efficace impliquée dans le transfert rapide. Comme on l'a vu, elle est obtenue à partir du produit de convolution de la pluie efficace et d'une réponse impulsionnelle en trapèze dont le front de montée caractérise la durée du processus conduisant à la modification de l'état du bassin : en effet, le transfert rapide résulte généralement de phénomènes transitoires induits par un régime pluviométrique de forte intensité ou de longue durée. Ces processus comprennent la saturation en eau des sols, l'extension de zones humides dans les bas-fonds ou l'accroissement de la charge hydraulique dans un aquifère karstique.

La longueur de la plus petite base du trapèze régit l'amplitude des phénomènes de transfert rapide. En particulier, la fonction $\alpha(t)$ peut prendre d'importantes valeurs lorsque la longueur de cette base est supérieure à la durée moyenne séparant deux événements de pluie efficace consécutifs, en raison du phénomène d'empilement observé lors du produit de convolution de la pluie efficace par ce trapèze (un événement de pluie efficace fait monter la fonction $\alpha(t)$ alors que celle-ci n'était pas encore redescendue à 0, suite à l'événement pluie précédent).

2. PRINCIPE DU GÉNÉRATEUR DE PLUIE ET D'ETP

a) Générateur de pluie

Il permet de générer une séquence de pluie à partir d'une série observée. Le pas d'échantillonnage de la série simulée est celui de la série observée. La séquence générée peut prolonger la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée. La simulation d'une séquence de pluie doit en effet satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des hauteurs de pluie que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent. Ce sont :

- la probabilité marginale des hauteurs de pluie (sans considération de distribution dans le temps). La loi de distribution empirique peut éventuellement être remplacée par une loi log-normale ou de Gumbel, lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80 % pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique est significativement différente de l'une de ces 2 lois, en particulier lorsque la loi de distribution observée est bimodale (ce phénomène s'observe lorsque la pluie résulte de mécanismes météorologiques variés : crachin breton, orages,...). Toutefois, ces lois hypothétiques peuvent être substituées à la distribution observée au-delà d'un certain seuil : la modification du comportement asymptotique de la loi empirique peut améliorer la simulation d'événements exceptionnels lorsque leur distribution est bien décrite par l'une ou l'autre des deux lois (log-normale ou de Gumbel) ;
- la densité des événements (nombre d'événements par unité de temps) ;
- la fonction d'auto-corrélation des événements ;
- la loi d'échelle définie à partir de ces trois premiers moments. Cette loi d'échelle suppose la véracité de la relation suivante, pour chaque k :

$$M_j(k.dt) = k^{\lambda(j)} . M_j(dt)$$

où le moment $M_j(k.dt)$ est la somme sur le segment de temps $k.dt$ des hauteurs de pluie élevées à la puissance j . Seules les hauteurs de pluie strictement positives sont comptabilisées de manière à considérer la moyenne des hauteurs de pluie (sinon on aurait un résultat trivial $\lambda(1) = 1$ car $M_j(dt)$ représenterait la hauteur de pluie moyenne et non la moyenne des hauteurs de pluie).

Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée.

Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments $k.dt$ correspondant à 1,2,3,6,12,24 heures, 2, 8, 16 et 32 jours. Elle a pour but de structurer la manière dont les hauteurs de pluie varient sur des segments de temps de longueur variable.

La notion de moment appliquée aux séries temporelles peut être rapprochée des moments associés aux variables aléatoires : le premier moment est la moyenne, le second moment centré est caractéristique de la dispersion (variance), le troisième moment de l'asymétrie de la loi de probabilité associée à la variable aléatoire.

Dans le cas des séries temporelles le premier moment représente la somme des hauteurs de pluie sur des segments de temps de longueur variable ; l'exposant $\lambda(1)$ est généralement voisin de 0,7 pour un pas journalier. Dans ce cas, l'exposant étant inférieur à 1, la hauteur de pluie cumulée sur 2, 8, 16, 32 jours consécutifs croît moins vite que la moyenne journalière des hauteurs de pluie multipliée par 2, 8, 16, 32 jours ce qui est logique car toute séquence de pluie s'interrompt nécessairement lorsque la durée de la période d'observation augmente. Le second moment structure la dispersion des hauteurs de pluie sur différentes périodes de temps.

- La saisonnalité des pluies

La séquence de pluies est générée de la manière suivante. Une période de temps T étant définie (la série simulée peut succéder à la séquence observée, mais ce n'est pas obligatoire), un nombre d'événements est tiré au hasard autour d'une valeur moyenne qui représente la densité observée (densité calculée à partir de la série observée). Ce nombre d'événements suit une loi de Poisson. Par conséquent, la variance de la densité simulée est égale à la moyenne de la densité observée.

- Ces événements sont distribués suivant une loi uniforme sur la période T .
- À chaque événement est affectée une hauteur de pluie tirée au hasard à partir de la distribution marginale empirique qui résulte des observations. On obtient ainsi une séquence de pluie dont les hauteurs sont distribuées à la manière de la série observée, mais qui ne présente aucune structure temporelle (distribution marginale).
- Ces événements sont organisés en réalisant des permutations successives (ces permutations affectent de la même manière les « non-événements » correspondant à l'absence de pluie). Ces permutations visent à minimiser une fonction objectif choisie de telle sorte que les différents critères qui définissent la structuration temporelle de la série simulée se rapprochent de ceux qui caractérisent la série observée. Toute permutation qui améliore la structure temporelle, ce qui se traduit par une décroissance de la fonction objectif, est entérinée. Dans le cas contraire, la permutation n'est entérinée qu'avec la probabilité :

$$\exp(\text{Objectif}_0 - \text{Objectif}) / \text{Température}$$

où la différence $Objectif_0 - Objectif$ mesure la « dégradation » des propriétés temporelles de la série simulée (différence des fonctions objectif avant et après permutation). La température est un nombre qui décroît régulièrement, après que l'équilibre thermodynamique du système ait été constaté (cet équilibre est atteint lorsque les permutations qui se réalisent effectivement, laissent la fonction objectif inchangée). Ce « refroidissement » permet de minimiser la fonction objectif progressivement, tout en évitant d'atteindre un minimum local, condition qui bloquerait l'évolution du système.

Cette diminution progressive de la température confère à ce générateur une analogie complète avec la technique du recuit bien connue des métallurgistes. Ce générateur est d'autant plus performant que la série à simuler contient un grand nombre d'événements, ce qui autorise un grand nombre de permutations.

En règle générale, plusieurs centaines d'événements sont nécessaires pour assurer un bon accord entre les propriétés temporelles des séries simulées et observées. La longueur de la série observée doit couvrir plusieurs années lorsqu'elle présente une saisonnalité marquée. Ceci se vérifie en particulier lors de la génération directe d'une séquence de pluie efficace, sans passer par son calcul à partir de l'ETP.

La technique du recuit, basée sur la minimisation d'une fonction objectif (algorithme de Metropolis - Hastings, 1953, 1970) à partir de permutations successives d'événements, se prête particulièrement bien à la prise en compte de prévisions météorologiques, qui peuvent être aisément exprimées au moyen d'une fonction objectif (hauteur de pluie prévue pendant un certain laps de temps). Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, la continuité, entre les deux séquences, résultant de la structure temporelle commune aux séries observées et simulées.

La technique du recuit peut toutefois nécessiter des moyens de calcul importants car, pour posséder les caractéristiques de la pluie observée, un nombre relativement important d'événements doivent être simulés pour permettre de nombreuses combinaisons de permutation, que la prévision couvre une période de temps importante ou non.

b) Générateur d'Evapo-Transpiration Potentielle (ETP)

Ce générateur permet également de simuler une température moyenne journalière. La technique du recuit est utilisée, comme pour le générateur de pluie. Il s'agit en fait de générer le « bruit » constitué par les variations thermiques (ou d'ETP) autour d'une valeur moyenne mensuelle. Puisque ces écarts sont toujours structurés temporellement, la technique du recuit permet de faire en sorte que les fonctions d'auto-corrélation et de corrélation croisée ETP - pluie des séries observées et simulées soient les plus proches possibles l'une de l'autre, de même que les variations mensuelles observées et simulées de l'écart - type du bruit.

- La fonction de corrélation ETP - pluie est considérée pour des décalages à la fois positifs et négatifs, ce qui permet de simuler aussi bien une relation causale de l'ETP

(ou la température moyenne journalière) sur la pluie que de la pluie sur l'ETP. Là encore, les prévisions météorologiques peuvent être prises en compte.

- L'écart - type du bruit subit généralement une variation mensuelle importante, en particulier lorsque l'ETP est utilisée, car sa valeur reste très proche de zéro en période hivernale (zones tempérées) alors qu'elle peut varier avec beaucoup d'amplitude en été.
- Les trois premiers moments sont calculés à partir de la valeur absolue du bruit (les écarts de l'ETP par rapport à la moyenne mensuelle étant positifs ou négatifs, le calcul des moments à partir de la valeur algébrique du bruit conduirait à des valeurs tendant vers 0 lorsque la période d'observation augmente car les écarts ont tendance à s'équilibrer. Le calcul des exposants $\lambda(j)$ perdrait alors tout son sens, car on serait en présence de formes indéterminées). Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée. Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Contrairement à la pluie dont le premier moment est inférieur à 1 (au pas journalier), l'exposant $\lambda(j)$ est ici voisin de 1, ce qui signifie que l'ETP peut s'écarter de la moyenne mensuelle aussi longtemps que dure la période d'observation (alors que la pluie cessait nécessairement).
- La probabilité marginale du bruit (sans considération de distribution dans le temps) peut éventuellement être remplacée par une loi normale lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80 % pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique est significativement différente de la loi normale. Toutefois, cette loi hypothétique peut être substituée à la distribution observée au-delà d'un certain seuil, comme dans le cas de la pluie.
- Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, ce qui sous-entend la prise en compte d'un effet de continuité grâce aux fonctions d'auto-corrélation et de corrélation croisée.

3. APPLICATION DU GENERATEUR DE PLUIE ET D'ETP A LA SOMME

Les fonctions de transfert étant établies au même titre que les R.I. permettant le calcul de la réserve utile $\Omega(t)$ et de la fonction $\alpha(t)$, les deux éléments du modèle prévisionnel peuvent fonctionner en cascade pour générer le débit de la Somme via la recharge de la nappe de la craie.

La prévision du débit repose sur la génération de séquences aléatoires de pluie et d'ETP. Ce générateur doit produire des données vraisemblables (les moyennes pluviométriques annuelles et leur dispersion,...). En fait tout un ensemble de fonctions caractéristiques est requis ; les fonctions expérimentales sont représentées sur les figures 3 à 6 pour la pluie, 7 à 10 pour l'ETP, de même que les fonctions simulées à l'aide du générateur (les fonctions obtenues à partir d'une séquence de pluie et d'ETP simulée sur une

période de 10 ans au pas décadaire ; cette période n'est pas adaptée au problème posé mais est imposée pour un bon fonctionnement du générateur).

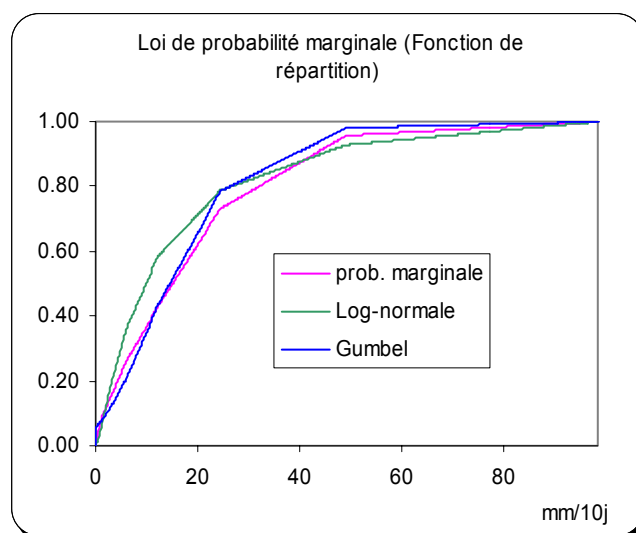


Fig. 3 - La loi de probabilité marginale n'obéit à aucun modèle. C'est la loi empirique qui sera utilisée dans le générateur.

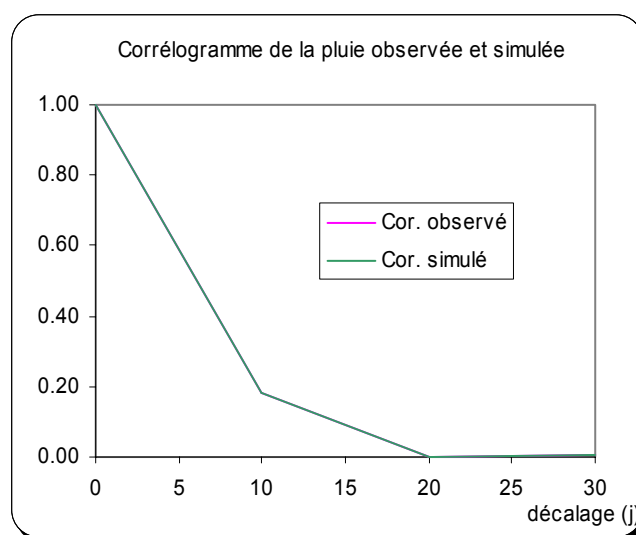


Fig. 4. - L'auto - corrélation est très faible au pas décadaire.

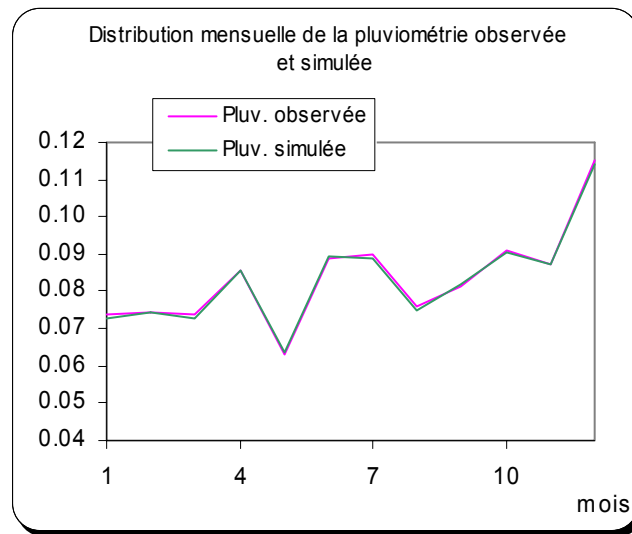


Fig. 5 - La pluie marque une saisonnalité importante.

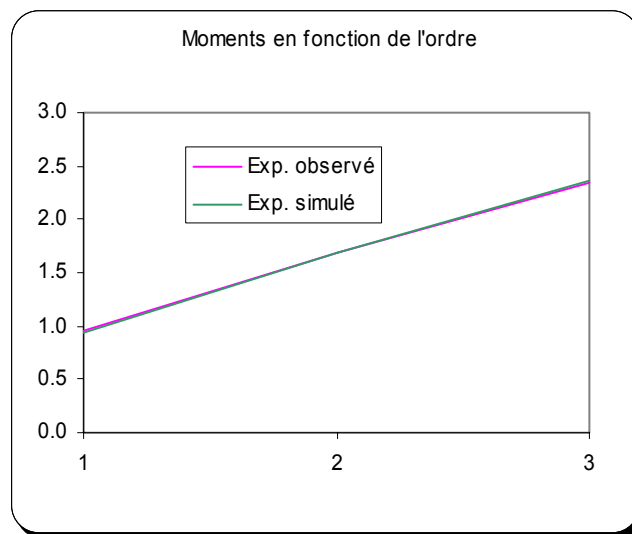


Fig. 6 - Les premiers moments définissent la structure temporelle de la pluie.

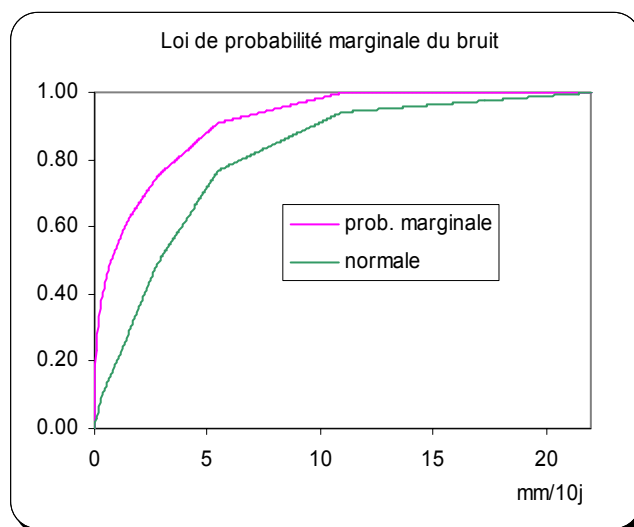


Fig. 7 - La loi de probabilité du bruit (écart de l'ETP par rapport à la moyenne mensuelle) ne suit pas une loi normale. Le générateur utilise la loi empirique.

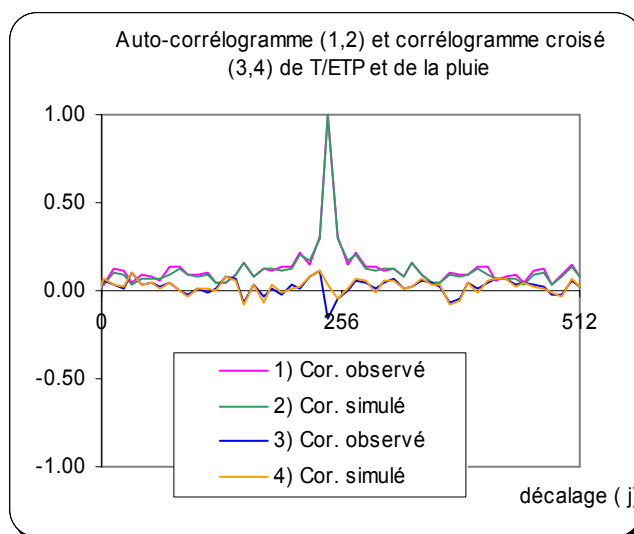


Fig. 8 - Auto-corrélogramme de l'ETP et corrélogramme croisé pluie/ETP au pas décadaire.

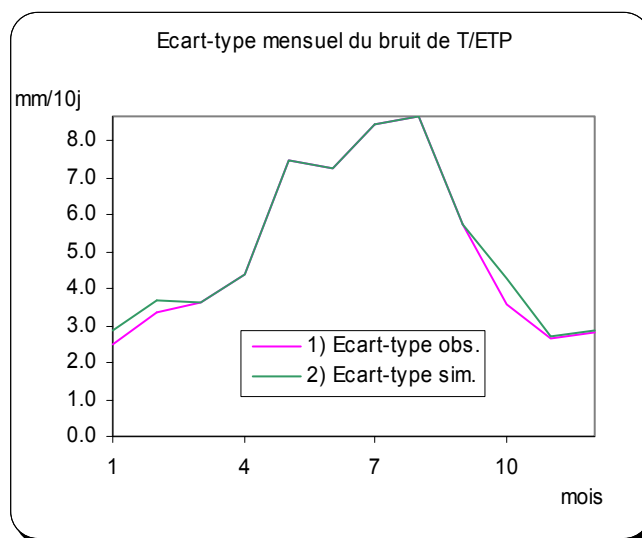


Fig. 9 - Les écarts de l'ETP par rapport à la moyenne mensuelle sont fortement marqués par le phénomène de saisonnalité.

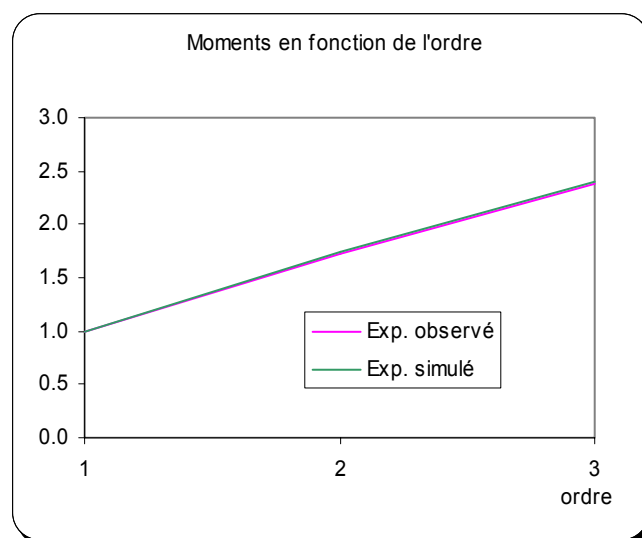
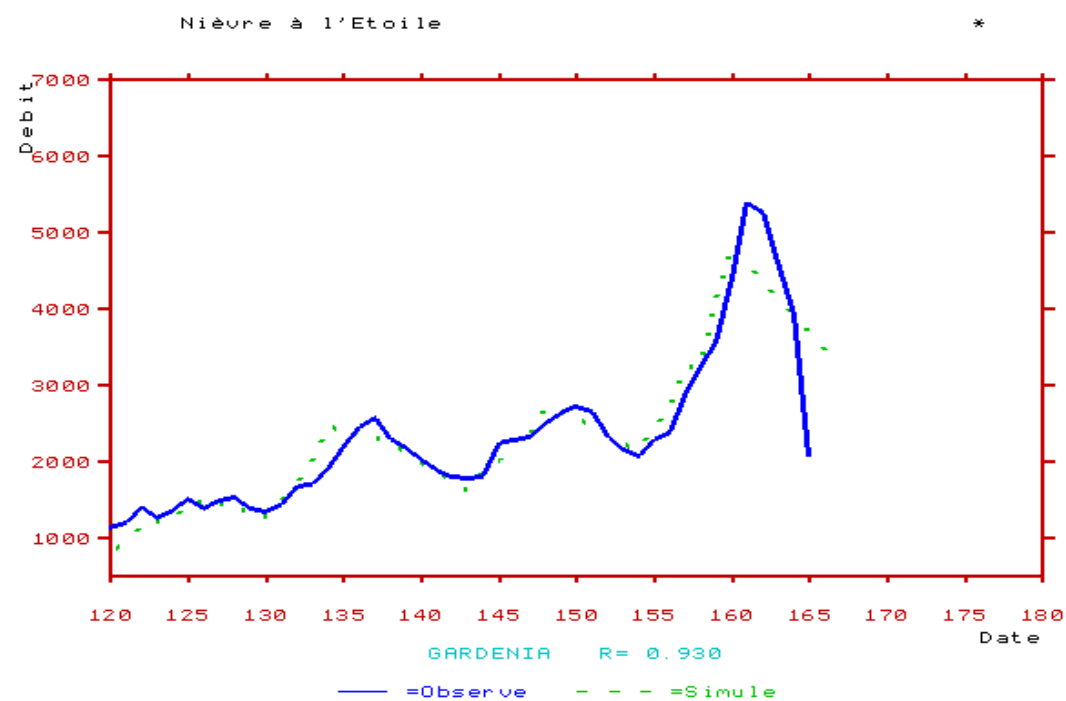
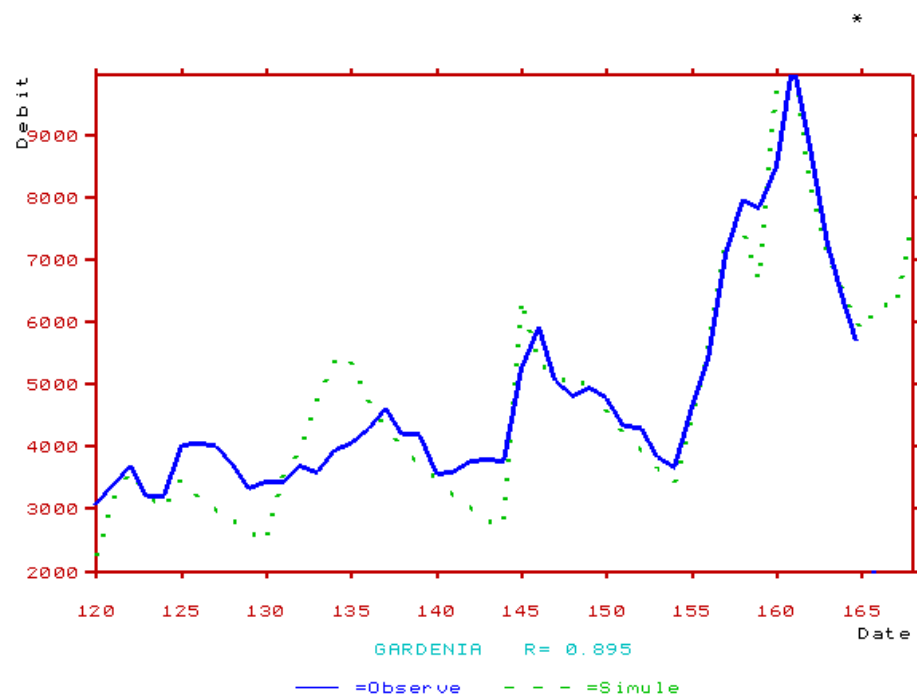
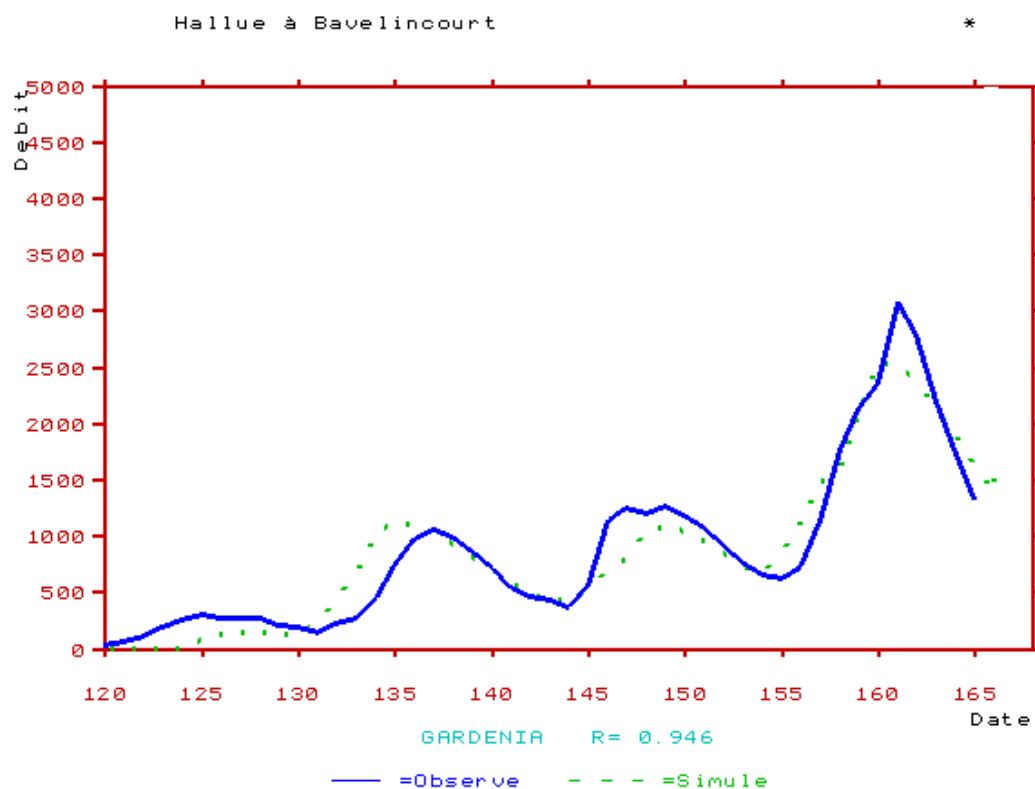


Fig. 10 - Les moments de l'ETP définissent sa structure temporelle.

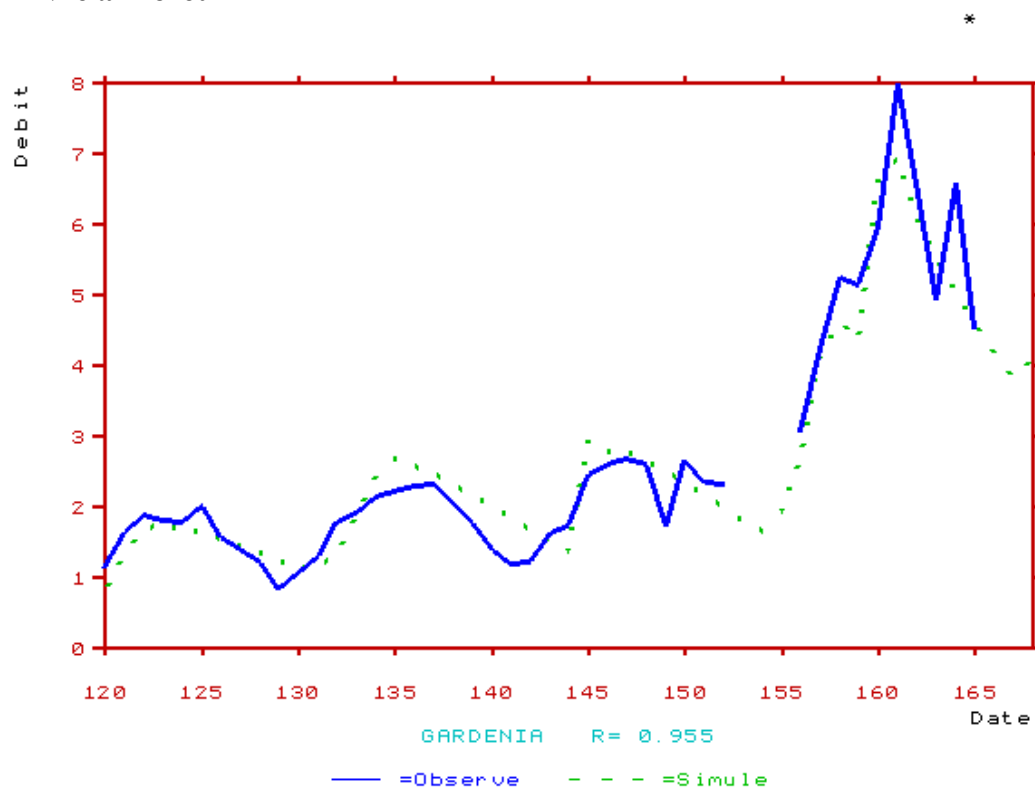
ANNEXE 4

Résultats du précalage du bilan hydroclimatique des différents bassins de la Somme avec le modèle GARDENIA





L'Avre à Moreuil



La Selle à Plachy

ANNEXE 5

Complément de résultats du calage de la piézométrie en régime transitoire

