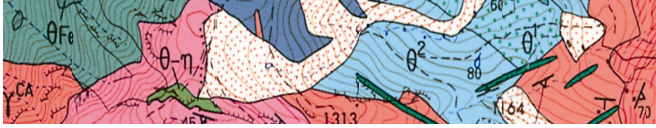
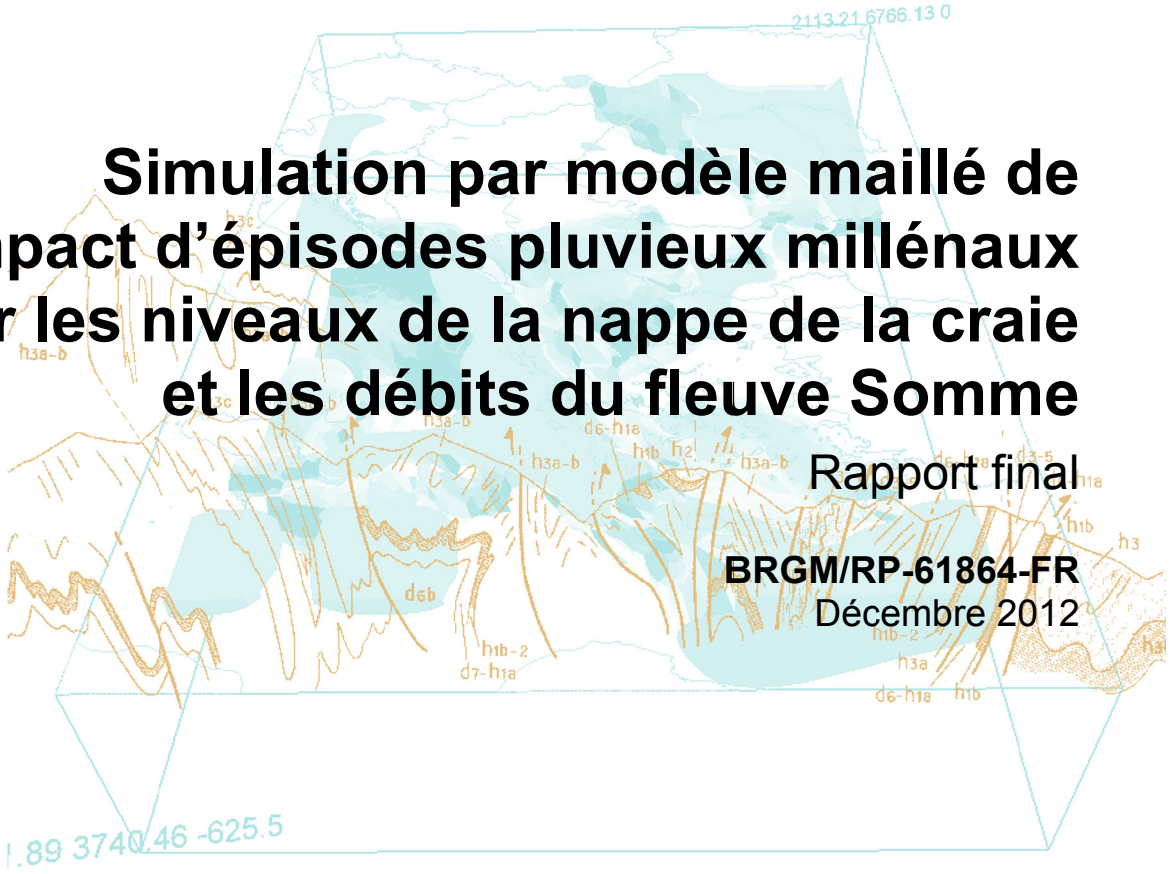


Document public

Document à accès différé au 31 janvier 2014



Simulation par modèle maillé de l'impact d'épisodes pluvieux millénaux sur les niveaux de la nappe de la craie et les débits du fleuve Somme

Rapport final

BRGM/RP-61864-FR
Décembre 2012

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET DE LA RÉGION PICARDIE
DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Document à accès différé
au 31 janvier 2014

Simulation par modèle maillé de l'impact d'épisodes pluvieux millénaux sur les niveaux de la nappe de la craie et les débits du fleuve Somme

Rapport final

BRGM/RP- 61864-FR
Décembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP12PIC28

Amraoui N. & Seguin J.J.

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : A. Wuilleumier	Nom : D. Maton
Date : 08/02/2013	Date : 26/02/2013
Signature :	Signature :

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

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET DE LA RÉGION PICARDIE
DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communication ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978.

Passé un délai d'une année (31 janvier 2014), ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : bassin versant de la Somme, Artois-Picardie, crues millénales, modélisation hydrodynamique, analyse probabiliste, événements extrêmes, loi GEV

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

Amraoui N. et Seguin J.J. (2012) – Simulation par modèle maillé de l'impact d'épisodes pluvieux millénaux sur les niveaux de la nappe de la craie et les débits du fleuve Somme. Rapport final. BRGM/RP-61864-FR, 85 p., 54 ill., 4 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la mise en application de la directive « inondation » dans le bassin Artois Picardie, la DREAL Picardie a sollicité le BRGM pour évaluer, dans un contexte d'événement climatique millénal, les niveaux piézométriques hautes eaux de la nappe de la craie et ses apports potentiels au débit du fleuve Somme, notamment dans les zones urbaines d'Amiens et Abbeville. L'étude doit permettre à la DREAL Picardie d'obtenir des éléments quantitatifs nécessaires à l'élaboration des cartes de surfaces inondables représentant l'aléa pour les Territoires à Risques Importants, ou TRI.

Dans un premier temps, une approche probabiliste a été utilisée pour élaborer des scénarios climatiques "extrêmes" basés sur des pluies cumulées de période de retour 1000 ans. A partir de cette analyse et d'une modélisation globale du bassin à l'aide du logiciel Tempo, trois scénarios ont été retenus, en concertation avec le Comité de Pilotage de l'étude :

Scénario 1 : on considère des pluies cumulées sur 180 jours de période de retour 1000 ans, séquence pluvieuse déclenchée en partant de l'état de la nappe tel qu'il était avant la crue de 2000-20001 (début Octobre 2000) et en utilisant une distribution des pluies semblable à celle de l'automne-hiver 2000-2001. Deux variantes ont été simulées, la première utilise des valeurs de pluies cumulées sur 180 jours correspondant à la moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute de l'analyse probabiliste et la seconde utilise la valeur de la borne haute des pluies cumulées sur 180 jours.

Scénario 2 : on considère des pluies cumulées sur 180 jours de période de retour 1000 ans, consécutives à celles de l'année 2000-2001, avec une distribution temporelle similaire à celle de l'automne-hiver 2001-2002. La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours correspond à la moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute et l'état initial de la nappe et celui des basses eaux de 2001.

Scénario 3 : ce scénario a été choisi pour évaluer l'impact de la répartition des pluies sur le débit maximal de crue. On considère aussi des pluies cumulées sur 180 jours de période de retour 1000 ans, avec une répartition temporelle semblable à celle de l'automne-hiver 1994 – 1995 et une valeur correspondant à la borne haute de l'analyse probabiliste. L'état initial de la nappe est celui des basses eaux de 1994.

Ces différents scénarios ont été simulés à l'aide du modèle hydrodynamique des hautes eaux de la Somme pour évaluer leur impact sur les niveaux de la nappe et sur les débits de la Somme. Les simulations ont permis d'obtenir pour chaque scénario :

1. les hydrogrammes de la Somme au droit des stations de Lamotte-Brebière, d'Hangest et d'Abbeville situées à proximité des TRI d'Amiens et d'Abbeville et l'évaluation du débit maximal à chacune de ces stations,
2. les cartes piézométriques de hautes eaux associées à la crue de période de retour millénale,
3. les cartes des zones de débordement de la nappe avec les valeurs des débits de débordement.

Les résultats de l'étude ont permis de mettre en évidence l'importance de la distribution des pluies sur les maxima de débit et l'influence de la valeur du débit de base de la rivière au moment du déclenchement de l'épisode pluvieux. Il ressort aussi de l'étude que, pour de tels événements climatiques, la contribution de la nappe au débit de la Somme est importante, comprise entre 65% et 72% du débit selon le scénario traité.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Analyse probabiliste préliminaire aux simulations hydrodynamiques 11

2.1. ANALYSE PRELIMINAIRE DES PLUIES JOURNALIERES ET DES MAXIMA ANNUELS 12

2.1.1. Précipitations annuelles 12

2.1.2. Pluies maximales journalières relevées chaque année sur la période 1961-2011 13

2.1.3. Analyse des pluies du 1er octobre 2000 au 31 mars 2001 14

2.2. ANALYSE DES DÉBITS DE LA SOMME A ABBEVILLE ET MISES EN RELATION AVEC LES PLUIES CUMULÉES SUR N JOURS 15

2.2.1. Débits journaliers et débits maxima annuels 15

2.2.2. Correspondance pluies-débits et pluies efficaces-débits 17

2.3. AJUSTEMENT D'UNE LOI GEV SUR LES DÉBITS MAXIMA ANNUELS ET LES PLUIES CUMULÉES. PÉRIODES DE RETOUR 20

2.3.1. Loi généralisée des valeurs extrêmes 20

2.3.2. Ajustement d'une loi GEV sur les débits maxima annuels de la Somme à Abbeville 21

2.3.3. Ajustement d'une loi GEV sur les pluies cumulées de 180 jours à la station de Glisy-Amiens. 23

2.3.4. Ajustement d'une loi GEV sur les pluies cumulées de 180 jours à la station de Bernaville. 24

2.3.5. Calcul avec une pluie globale, combinaison des pluies de la station de Bernaville et de Glisy 25

2.3.6. Relation entre débits de la Somme et pluies cumulées (Bernaville-Glisy) sur 180 jours pour différentes périodes de retour 27

2.4. SIMULATION AVEC LE LOGICIEL TEMPO DE L'IMPACT DES PLUIES CUMULÉES SUR LES DEBITS DE LA SOMME 28

2.4.1. Calage au pas de temps journalier et validation 28

2.4.2. Simulations 29

3. Simulation par modèle maillé de l'impact d'événements pluvieux millénaux sur le nivau de la nappe et le débit du fleuve Somme. 33

3.1. LE MODÈLE MAILLÉ DU BASSIN DE LA SOMME 33

3.2. SCÉNARIOS SIMULÉS 34

3.2.1. Scénario 1 34

3.2.2. Scénario 2 35

3.2.3. Scénario 3 35

3.2.4. Résumé 35

3.3. PLUIES CUMULÉES (180 JOURS) DE PÉRIODE DE RETOUR MILLÉNALE, CALCULÉES AUX DIFFÉRENTES STATIONS CLIMATIQUES UTILISÉES DANS LA MODÉLISATION 36

3.4. SIMULATION DU SCÉNARIO 1 36

3.4.1. Hypothèse du scénario1 36
3.4.2. Hydrogrammes simulés de la Somme en amont d'Amiens et d'Abbeville. 37
3.4.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques. 39
3.4.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe. 40
3.5. SIMULATION DU SCÉNARIO 2 42
3.5.1. Hypothèse du scénario 2. 42
3.5.2. Hydrogrammes de la Somme simulés en amont d'Amiens et d'Abbeville. 42
3.5.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques. 43
3.5.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe. 44
3.6. SIMULATION DU SCÉNARIO 3. 46
3.6.1. Hypothèse du scénario 3. 46
3.6.2. Hydrogrammes simulés de la Somme en amont d'Amiens et d'Abbeville. 46
3.6.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques 46
3.6.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe. 48
4. Conclusion 51
5. Bibliographie 53

Liste des illustrations

Illustration 1- Le bassin de la Somme 10
Illustration 2 – Evolution des précipitations annuelles de 1961 à 2011 aux stations d'Abbeville, de Glisy-Amiens et de Bernaville. 12
Illustration 3 – Pluies journalières maximales relevées sur la période 1961-2011 13
Illustration 4 – Pluies journalières à Glisy-Amiens sur la période du 01/10/2000 au 31/03/2001 14
Illustration 5 - Pluies journalières à Bernaville sur la période du 01/10/2000 au 31/03/2001 14
Illustration 6 - Débits journaliers de la Somme à Abbeville du 01/01/1963 au 02/07/2012 15
Illustration 7 - Débits journaliers de la Somme à Abbeville en 2000 et 2001 16
Illustration 8 - Débits maxima annuels de la Somme à Abbeville de 1963 à 2012 16
Illustration 9 - Débits de la Somme et pluies cumulées sur 120 jours et 180 jours - "Zoom" sur la période 1998-2004 17
Illustration 10 - Débits de la Somme et pluies cumulées sur 180 jours, période 1963-2012 17
Illustration 11 - Débits de la Somme et différence pluie-ETP cumulée sur 180 jours, "zoom" sur la période 1998-2004 18
Illustration 12 - Débits de la Somme et différence pluie-ETP cumulée sur 120 jours. "Zoom" sur la période 1998-2004 18
Illustration 13 - Débits de la Somme et pluie efficace cumulée sur 180 jours, "zoom" sur la période 1998-2004 19
Illustration 14 - Débits de la Somme et pluie efficace cumulée sur 120 jours, "zoom" sur la période 1998-2004 19

Illustration 15 - Corrélogramme croisé entre pluie efficace cumulée sur 180 jours (station de Glisy-Amiens) et débit de la Somme 20
Illustration 16 - Fonction de répartition des débits maxima annuels de la Somme, empirique (cercles noirs) et de la loi GEV ajustée (trait rouge) 22
Illustration 17 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les débits maxima annuels de la Somme 22
Illustration 18 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours à Glisy-Amiens : 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge) 23
Illustration 19 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie cumulée sur 180 jours à la station de Glisy 23
Illustration 20 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours à Bernaville : 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge) 24
Illustration 21 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie cumulée sur 180 jours à la station de Bernaville 25
Illustration 22 – Valeurs maximales annuelles de la pluie "optimale" cumulée sur 180 jours comparées à celles calculées à la station de Glisy 25
Illustration 23 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours pour la pluie "optimale" cumulée sur 180 jours. 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge) 26
Illustration 24 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie "optimale cumulée sur 180 jours. 26
Illustration 25 – Relation entre débits de la Somme et pluies cumulées (Bernaville-Glisy) sur 180 jours pour 9 périodes de retour selon les fonctions de répartition ajustées 27
Illustration 26 – Modélisation des débits de la Somme à Abbeville avec le logiciel Tempo 28
Illustration 27 - Modélisation des débits de la Somme à Abbeville avec le logiciel Tempo. Validation du calage 28
Illustration 28 – Simulation du scénario T1a avec le logiciel Tempo 29
Illustration 29 –Séquence de pluie uniforme sur 180 jours 30
Illustration 30 – Influence de la répartition des pluies dans le temps 30
Illustration 31 - Simulation du scénario T1b avec le logiciel Tempo 31
Illustration 32 - Simulation du scénario T2a avec le logiciel Tempo 32
Illustration 33 - Simulation du scénario T2b avec le logiciel Tempo 32
Illustration 34 - Extension du modèle de la Somme avec son réseau hydrographique et localisation stations hydrométriques. 33
Illustration 35 - Comparaison des débits observés à la sation d'Abbeville aux débits simulés par le modèle 34
Illustration 36 - Localisation des stations hydrométriques de la Somme au droit desquelles les hydrogrammes sont calculés 37
Illustration 37 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario1a). 38
Illustration 38 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario1b). 38
Illustration 39 : Cumul des pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scenario 1b). 39
Illustration 40 : Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de la Somme pour le scénario1b. 40

Illustration 41 : Carte piézométrique des hautes eaux d'avril 2001 obtenue pour le scénario1b. 41
Illustration 42 : Carte des écarts de niveaux entre la piézométrie des hautes eaux d'avril 2001 obtenue avec le scénario1b et celle issue de la simulation de référence (carte des hautes eaux d'avril 2001). 41
Illustration 43 : Carte des débits de débordement de la nappe ($m^{3/}$s) « d'Avril 2001 » : scénario 1b. 42
Illustration 44 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scénario2). 43
Illustration 45 - Cumul des pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scénario 2). 43
Illustration 46 : Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de la Somme pour le scénario2. 44
Illustration 47 - Carte piézométrique des hautes eaux de mars 2002 obtenue pour le scénario 2 45
Illustration 48 - Carte des débits de débordement de la nappe (m^3/s) de mars 2002 : scénario 2 45
Illustration 49 : Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario3). 46
Illustration 50 - Cumul de pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scénario 3) 47
Illustration 51 - Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de a Somme : scénario 3 48
Illustration 52 - Carte piézométrique des hautes eaux de mars 1995 obtenue avec le scénario 3. 49
Illustration 53 - Carte des écarts de niveaux entre la piézométrie des hautes eaux de mars 1995 obtenue avec le scénario 3 et celle issue de la simulation de référence (carte des hautes eaux de mars 1995.) 49
Illustration 54 - Carte des débits de débordement de la nappe ($m^{3/}$s) mars 1995 : scénario 3. 50

Liste des tableaux

Tableau 1- Caractérisation statistique des précipitations annuelles calculées aux stations d'Abbeville, de Glisy-Amiens et de Bernaville sur la période 1961-2011 12
Tableau 2 – Caractérisation statistique des pluies maximales journalières relevées sur la période 1961-2011 13
Tableau 3 – Caractérisation statistique des débits de la Somme à Abbeville sur la période du 01/01/1963 au 02/07/2012 15
Tableau 4 - Pluies cumulées sur 180 jours (70% Bernaville + 30% Glisy) et débits de la Somme pour différentes périodes de retour 27
Tableau 5 – Caractéristiques des scénarios climatiques simulés 35
Tableau 6 - Calcul de pluies cumulées sur 180 jours pour les 6 stations utilisées dans le modèle maillé 36

Liste des annexes

Annexe 1 Résultats complémentaires des scénarios simulés par le modèle hydrodynamique des hautes eaux de la Somme 55

Annexe 2 Ajustement d'une loi GEV sur les maxima annuels des débits de la Somme 65

Annexe 3 Ajustement de lois GEV sur les maxima annuels des pluies cumulées 71

Annexe 4 Le logiciel TEMPO 83

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre dans le bassin Artois Picardie de la directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, dite « directive inondation ».

La transposition de la directive en droit français s'est faite à travers deux textes de loi : la Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dans son Titre V sur la prévention des risques et le Décret n° 2011-277 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation qui complète les dispositions législatives. La mise en œuvre de cette directive comporte les étapes suivante :

- L'évaluation préliminaire des risques d'inondation à l'échelle de chaque district (décembre 2011),
- L'établissement de cartes des zones inondables et des risques d'inondation pour les crues de faible, moyenne et forte probabilité à l'échelle des territoires à risque important d'inondation (décembre 2013),
- L'élaboration d'un plan de gestion des risques d'inondation à l'échelle de chaque district présentant les objectifs de gestion fixés et les mesures retenues pour les atteindre (décembre 2015).

A l'échelle du bassin Artois-Picardie, l'Évaluation Préliminaire du Risque Inondation pour chaque district, ou EPRI a été approuvée le 22 décembre 2011 par le Préfet coordonnateur de bassin. Elle a permis d'identifier les Territoires à Risques Importants, ou TRI, qui seront précisés et cartographiés dans la deuxième phase. Pour le bassin versant de la Somme, les zones urbaines d'Abbeville et d'Amiens ont été identifiées comme "concentration d'enjeux" répondant aux critères des TRI.

L'objectif assigné à la présente étude est l'évaluation, **dans un contexte pluviométrique de type millénal**, des niveaux piézométriques de la nappe de la craie dans le bassin de la Somme et de ses apports au débit du fleuve Somme, notamment dans les zones urbaines d'Amiens et d'Abbeville. Le travail doit déboucher sur une cartographie de la piézométrie de la nappe induite par des épisodes climatiques exceptionnels, permettant ainsi la localisation des zones où la nappe affleurerait.

L'étude s'appuie sur les travaux de modélisation spatialisée antérieurement réalisés avec le logiciel MARTHE pour simuler les hautes eaux dans le bassin versant de la Somme (financement Ministère en charge de l'Ecologie et BRGM). Le modèle réalisé permet de simuler les évolutions de la surface libre de la nappe et les débits des cours d'eau ainsi que les interactions entre ces deux systèmes dynamiques. Le territoire du bassin de la Somme est présenté par l'illustration 1.

Le présent rapport comporte deux parties :

- la première porte sur l'analyse probabiliste préliminaire aux modélisations hydrodynamiques, pour définir des scénarios climatiques de période de retour 1000 ans ;
- la seconde présente les résultats des simulations obtenus avec le modèle hydrodynamique spatialisé de la Somme, à savoir l'impact des scénarios retenus, au nombre de trois, sur le niveau de la nappe de la craie et les débits du fleuve Somme.

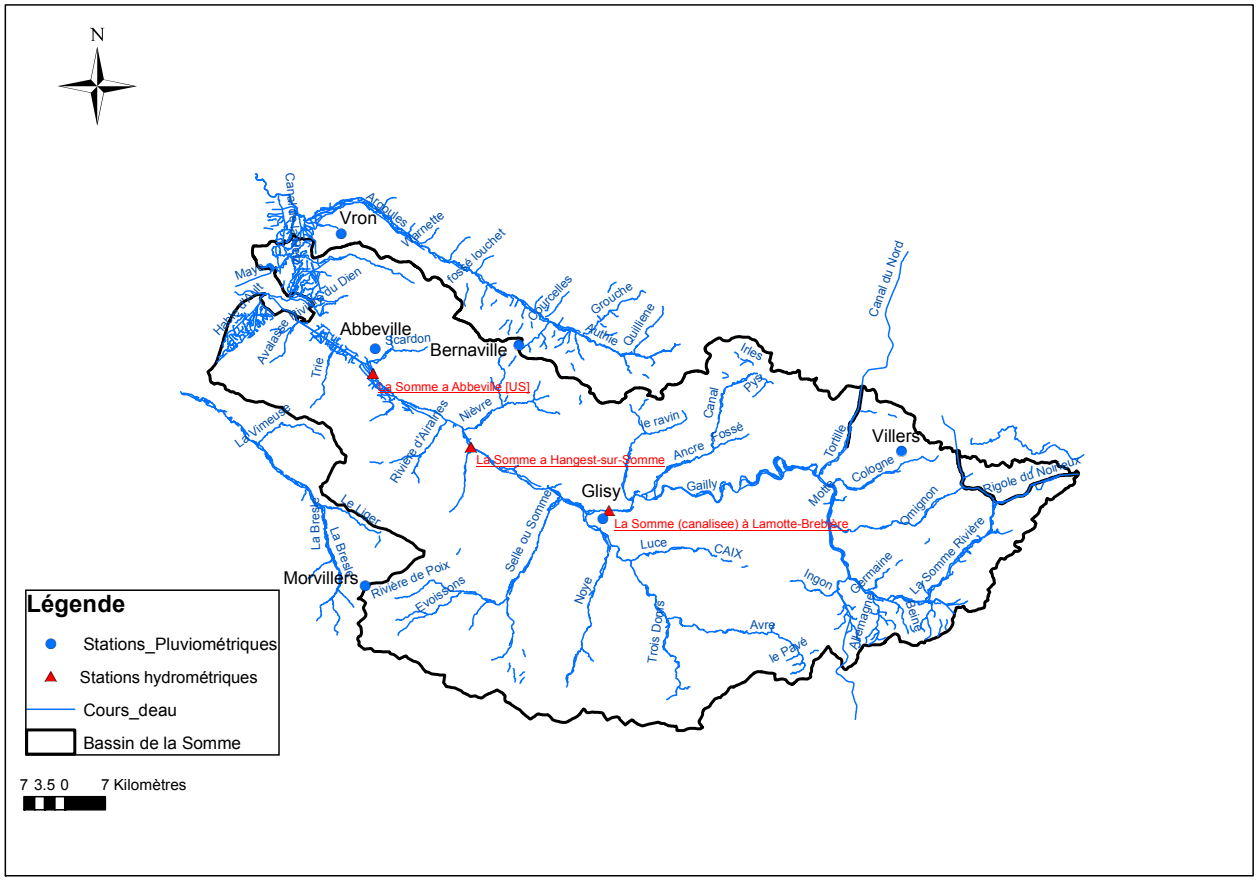


Illustration 1- Le bassin de la Somme

2. Analyse probabiliste préliminaire aux simulations hydrodynamiques

On présente dans ce chapitre des éléments de calculs destinés à faciliter le choix de scénarios climatiques qui seront pris en compte dans le modèle hydrodynamique de la Somme pour calculer leur impact sur les niveaux de la nappe et sur les débits de la Somme.

La démarche suivie pour élaborer un scénario climatique de période de retour 1000 ans repose, pour chacun des scénarios retenus, sur l'enchaînement des opérations suivantes :

1. une analyse préliminaire des chroniques de pluie de longue durée, avec au moins 50 ans de mesures ;
2. une analyse des débits de la Somme à Abbeville, à partir de la chronique de mesures journalières disponible ;
3. une recherche de la correspondance la plus étroite, sur la période de temps 1963-2011, entre les débits de la Somme et les pluies cumulées sur n jours (n= 30, 60, 90, 120, 150, 180) ;
4. le même travail que le point 3 mais, pour affiner, avec les pluies efficaces (issues d'une modélisation globale pluies-débits réalisée avec le logiciel Tempo) cumulées aussi sur n jours ;
5. une estimation du débit de période de retour 1000 ans par ajustement d'une loi de probabilité adaptée aux événements extrêmes (loi GEV) ;
6. l'ajustement de lois GEV aux pluies cumulées retenues et l'identification des quantiles de période de retour 1000 ans avec intervalle d'incertitude ;
7. l'injection dans un modèle global "pluies-débits" (logiciel Tempo) des pluies cumulées de période de retour 1000 ans pour simuler leur impact sur les débits de la Somme et vérifier que les débits calculés ont bien une période de retour égale ou supérieure à 1000 ans.

Cette démarche permet ainsi d'éviter la multiplication de simulations avec le modèle maillé de la Somme pour trouver les scénarios climatiques déclencheurs de crues millénales. La recherche d'une pluviométrie millénale vise en effet à simuler une crue millénale.

2.1. ANALYSE PRELIMINAIRE DES PLUIES JOURNALIERES ET DES MAXIMA ANNUELS

2.1.1. Précipitations annuelles

Les précipitations annuelles aux stations d'Abbeville, de Bernaville et de Glisy Amiens (cf. illustration 1 ci-avant pour leur localisation) ont été calculées à partir des données journalières relevées par Météo-France sur la période 1961-2011 (51 ans). Le graphique de l'illustration 2 et le tableau 1 montrent qu'il existe une variabilité spatiale importante de la pluviométrie dans le bassin de la Somme.

La moyenne des précipitations sur la période 1961-2011 est de 835 mm à Bernaville alors qu'elle n'est que de 636 mm à Glisy-Amiens, soit un écart de 199 mm.

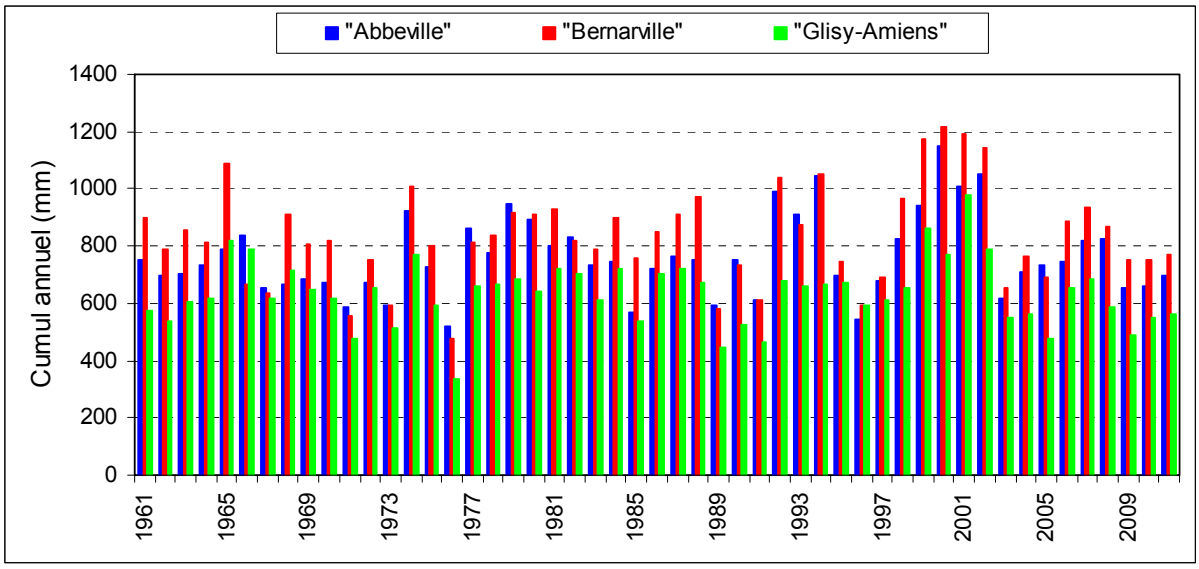


Illustration 2 – Evolution des précipitations annuelles de 1961 à 2011 aux stations d'Abbeville, de Glisy-Amiens et de Bernaville.

	Abbeville 1961-2011	Glisy-Amiens 1961-2011	Bernaville 1961-2011
Nb. d'observations	51	51	51
Minimum	521.4	339.1	476.9
Maximum	1146.4	975.8	1214.0
Amplitude	625.0	636.7	737.1
1er Quartile	672.8	561.1	746.8
Médiane	735.8	647.1	817.9
3ème Quartile	828.4	693.9	915.3
Moyenne	**761.7**	**635.7**	**834.6**
Ecart-type (n)	137.1	112.2	165.9
Coefficient de variation	0.18	0.18	0.20

Tableau 1- Caractérisation statistique des précipitations annuelles calculées aux stations d'Abbeville, de Glisy-Amiens et de Bernaville sur la période 1961-2011.

Période ante 1961

Les données disponibles avant 1961 n'ont pas pu être utilisées dans l'analyse probabiliste en raison de nombreuses lacunes.

Abbeville : 5 années manquent dans la chronique : 1940 à 1944

Amiens : 2 années manquent : 1940 et 1941, et plusieurs mois en 1944,1946 et 1956

2.1.2. Pluies maximales journalières relevées chaque année sur la période 1961-2011

Les pluies maximales journalières aux 3 stations d'Abbeville, de Glisy-Amiens et de Bernaville ont été extraites chaque année sur la période 1961-2011 (illustration 3). Le tableau 2 les caractérise au plan statistique.

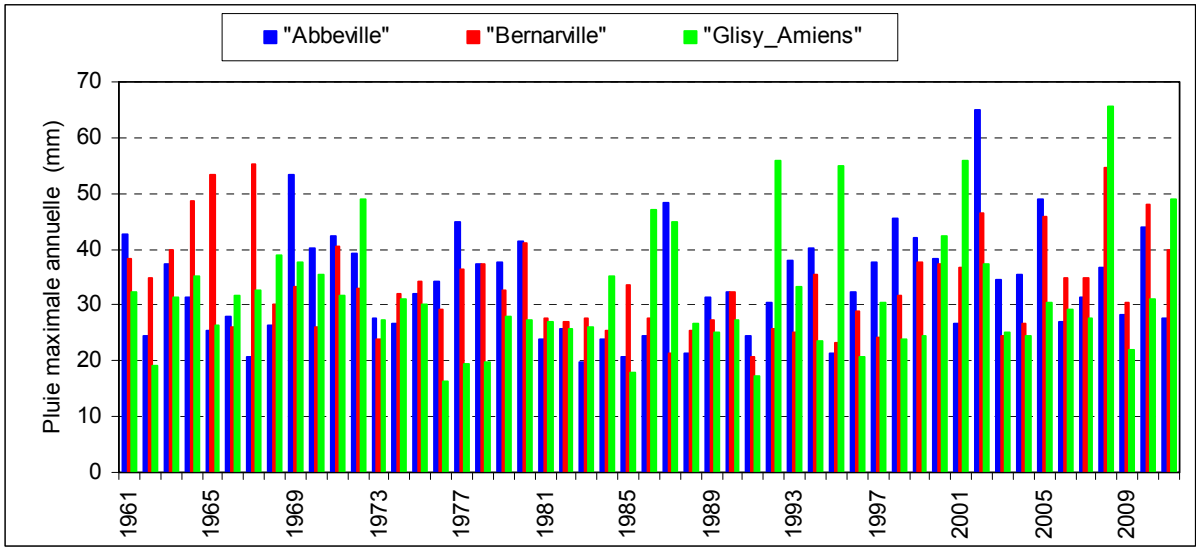


Illustration 3 – Pluies journalières maximales relevées sur la période 1961-2011

	Abbeville	Glisy-Amiens	Bernaville
Nb. d'observations	51	51	51
Minimum	19.7	16.2	20.8
Maximum	65.0	65.7	55.3
Amplitude	45.3	49.5	34.5
1er Quartile	26.7	25.2	26.8
Médiane	32.2	30.2	32.6
3ème Quartile	39.8	35.4	37.6
Moyenne	**33.8**	**31.9**	**33.6**
Ecart-type (n)	9.4	10.9	8.5
Coefficient de variation	0.3	0.3	0.3

Tableau 2 – Caractérisation statistique des pluies maximales journalières relevées sur la période 1961-2011

2.1.3. Analyse des pluies du 1er octobre 2000 au 31 mars 2001

Sur cette période pendant laquelle le processus de crue s'est déroulé, la répartition et l'intensité des pluies diffèrent suivant les stations :

A Glisy : 589 mm sur les 6 mois de la période critique, dont 325 mm au dernier trimestre 2000 et 264 mm au 1er trimestre 2001 (illustration 4).

A Bernaville : 860 mm sur les 6 mois de la période critique (46 % de plus), dont 469 mm au dernier trimestre 2000 et 391 mm au 1er trimestre 2001 (illustration 5).

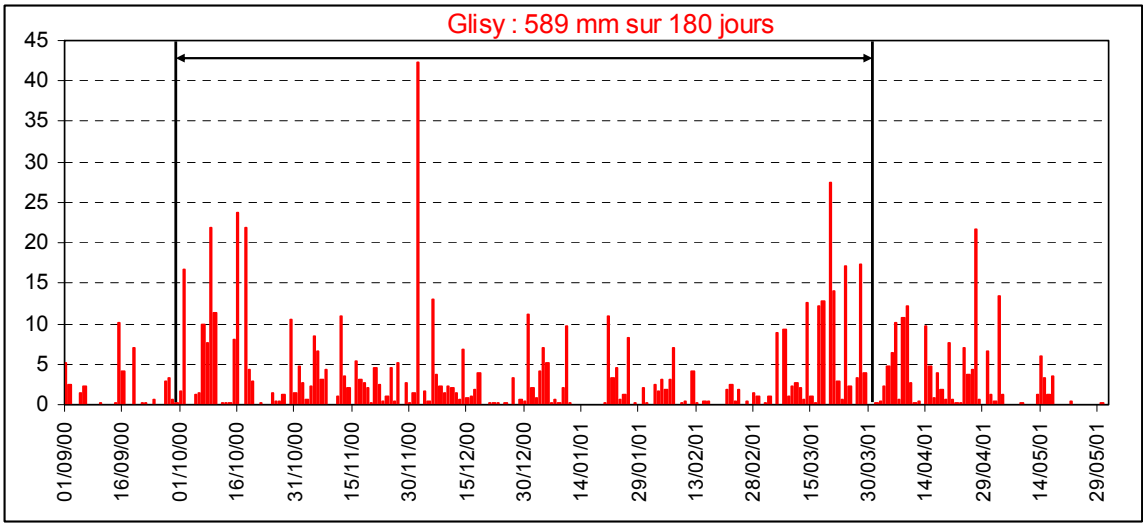


Illustration 4 – Pluies journalières à Glisy-Amiens sur la période du 01/10/2000 au 31/03/2001

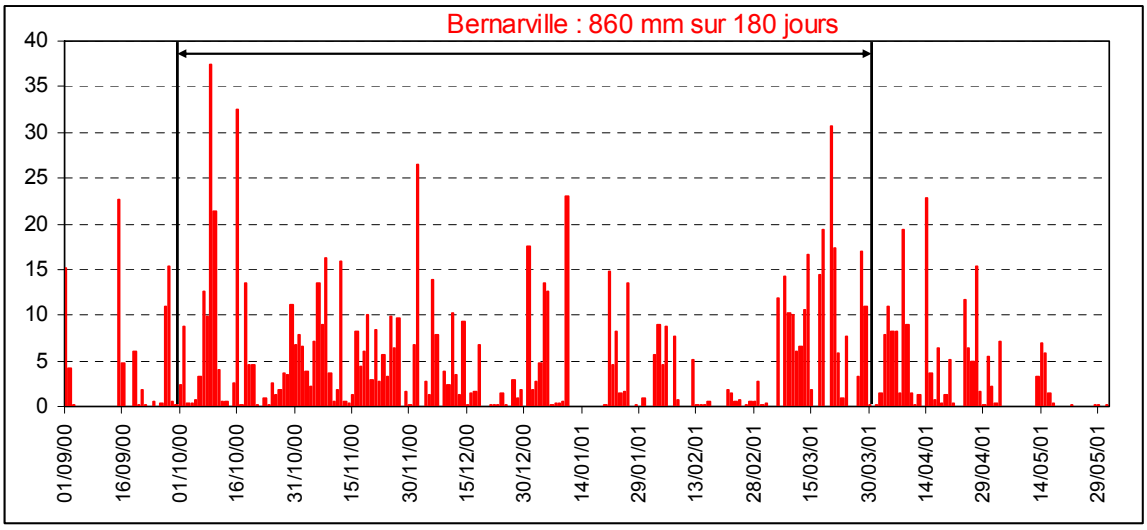


Illustration 5 - Pluies journalières à Bernaville sur la période du 01/10/2000 au 31/03/2001

2.2. ANALYSE DES DÉBITS DE LA SOMME A ABBEVILLE ET MISES EN RELATION AVEC LES PLUIES CUMULÉES SUR N JOURS

2.2.1. Débits journaliers et débits maxima annuels

Les statistiques de base sur les débits de la Somme à Abbeville sont résumées dans le tableau 3 ci-dessous (débits journaliers et débits maxima journaliers relevés chaque année de Janvier 1963 à Juin 2012).

	Débits journaliers (m3/s)	Débits maxima journaliers (m3/s) sur la période 1963-2012
Nb. d'observations	18081	50
Minimum	10.3	29.4
Maximum	**104.0**	**104.0**
Amplitude	93.7	74.6
1er Quartile	24.7	40.0
Médiane	31.9	48.2
3ème Quartile	41.2	62.3
Moyenne	**34.55**	**52.3**
Ecart-type (n)	13.3	15.2
Coefficient de variation	0.385	0.29

Tableau 3 – Caractérisation statistique des débits de la Somme à Abbeville sur la période du 01/01/1963 au 02/07/2012

L'évolution dans le temps des débits journaliers du 01/01/1963 au 02/07/2012 est retracée par l'illustration 6.

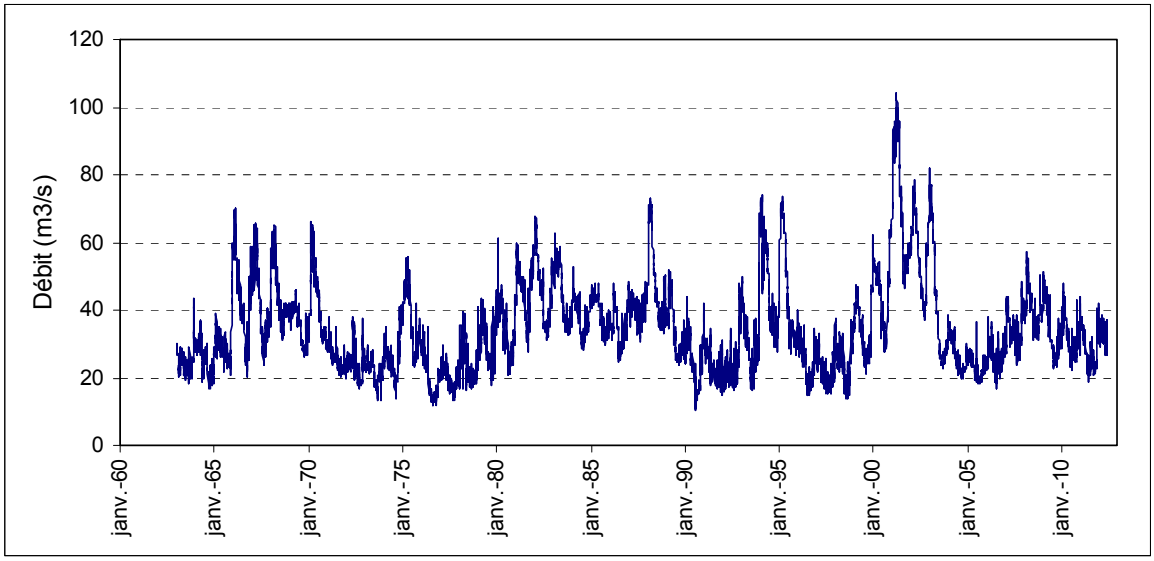


Illustration 6 - Débits journaliers de la Somme à Abbeville du 01/01/1963 au 02/07/2012

Le maximum de 104 m^3/s a été atteint le 19 avril 2001 après une phase de montée qui a débuté fin septembre 2000 (29.6 m^3/s le 28 Septembre) soit une durée de 6 mois et demi (illustration 7).

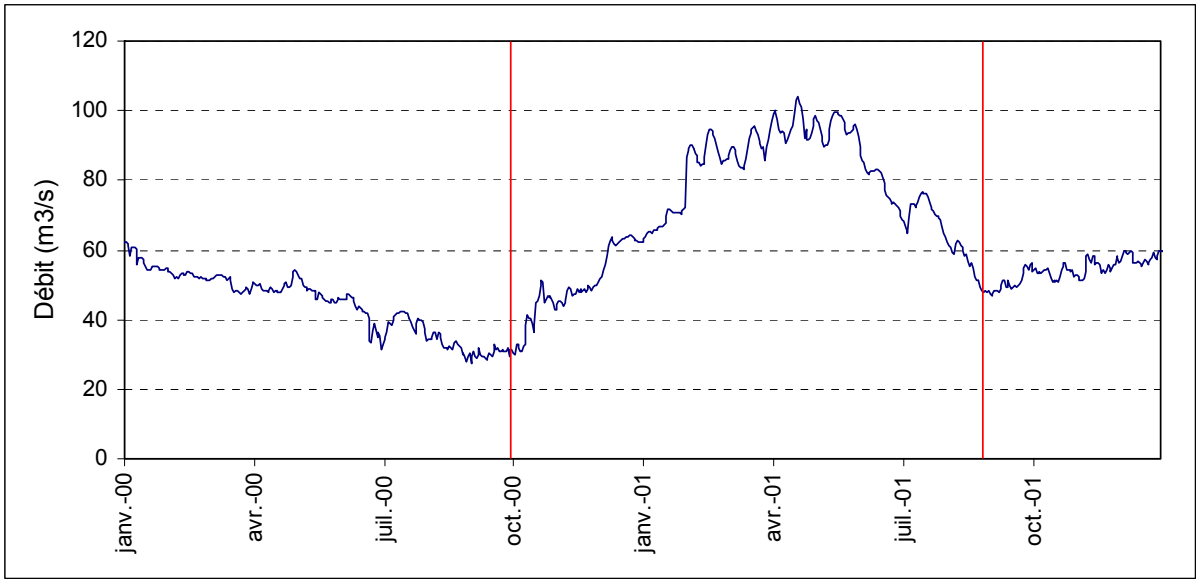


Illustration 7 - Débits journaliers de la Somme à Abbeville en 2000 et 2001

La durée de la phase de décroissance a été de 4 mois et demi (débit de 46.6 m^3/s atteint le 3 septembre avant la remontée de moindre importance qui a suivi).

La distribution temporelle des débits maxima journaliers relevés chaque année sur la période 1963-2012 est décrite par l'illustration 8.

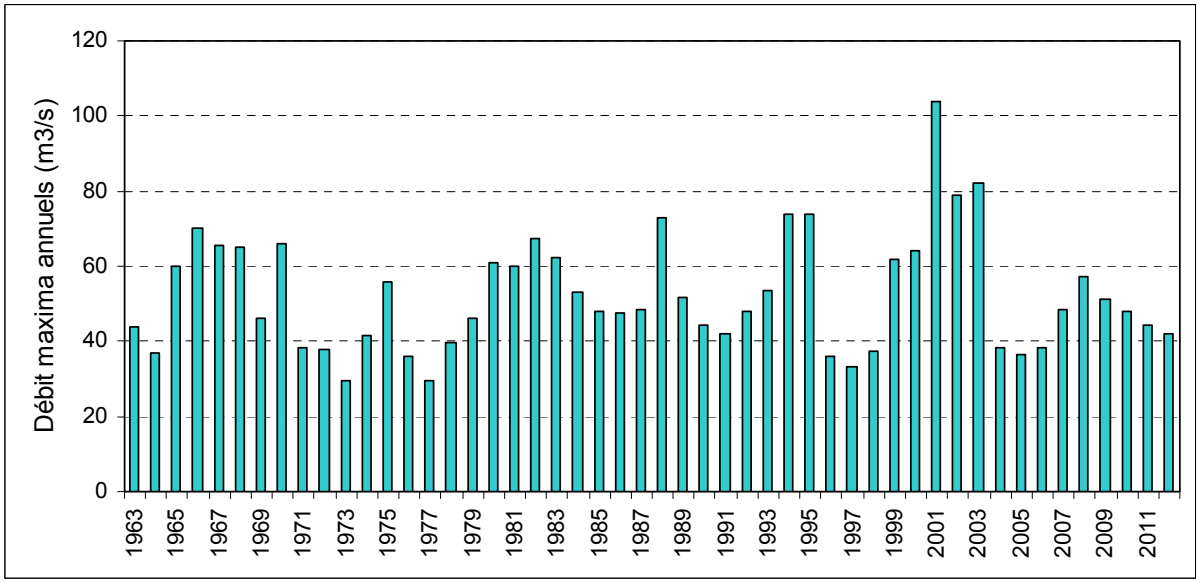


Illustration 8 - Débits maxima annuels de la Somme à Abbeville de 1963 à 2012

En 50 ans, le débit a dépassé 15 fois le seuil de 60 m^3/s (le $3^{ième}$ quartile est à 62.3 m^3/s, tableau 3).

2.2.2. Correspondance pluies-débits et pluies efficaces-débits

2.2.2.1. Mise en relation des débits de la somme et du cumul des pluies journalières sur n jours de la station de Glisy-Amiens

Le cumul des pluies journalières a été fait pour n=30, 60, 90, 120, 150, 180 jours (soit un cumul allant de 1 à 6 mois) sur la période 1963-2012, avec les données de la station de Glisy-Amiens.

Les essais de mise en relation de ces cumuls de pluies avec les débits de la Somme montrent que la meilleure correspondance s'obtient avec un cumul sur 180 jours.

Le graphique ci-dessous (illustration 9) superpose 2 de ces cumuls (120 jours et 180 jours) à l'évolution des débits de la Somme sur la période 1998-2004 encadrant la crue de 2001. L'illustration 10 superpose sur l'ensemble de la période débit et cumul sur 180 jours.

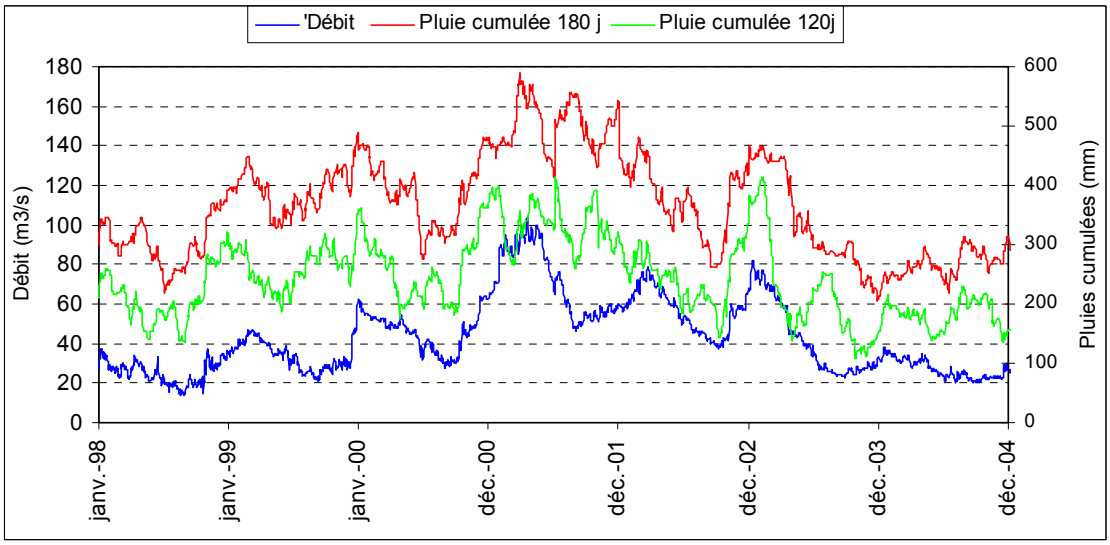


Illustration 9 - Débits de la Somme et pluies cumulées sur 120 jours et 180 jours - "Zoom" sur la période 1998-2004

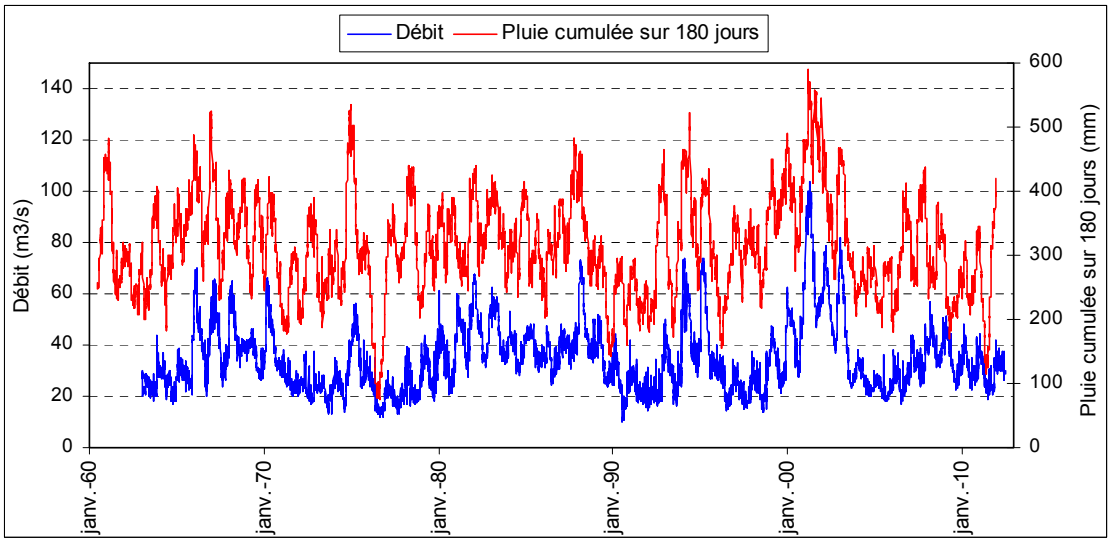


Illustration 10 - Débits de la Somme et pluies cumulées sur 180 jours, période 1963-2012

2.2.2.2. Mise en relation des débits de la somme avec la différence pluie-ETP cumulée sur n jours

Le même travail a été fait avec la différence (positive) pluie (Glisy) - ETP (Abbeville). La figure qui suit (illustration 11) met en évidence une bonne correspondance avec les débits pour n=180 jours.

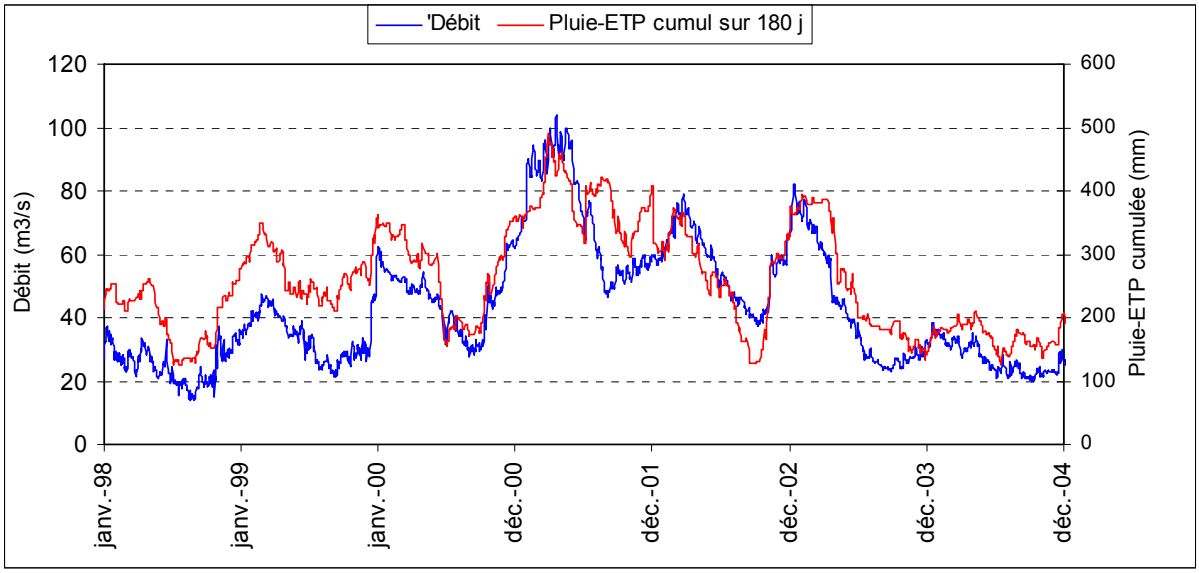


Illustration 11 - Débits de la Somme et différence pluie-ETP cumulée sur 180 jours, "zoom" sur la période 1998-2004

La correspondance est moins nette avec 120 jours (illustration 12).

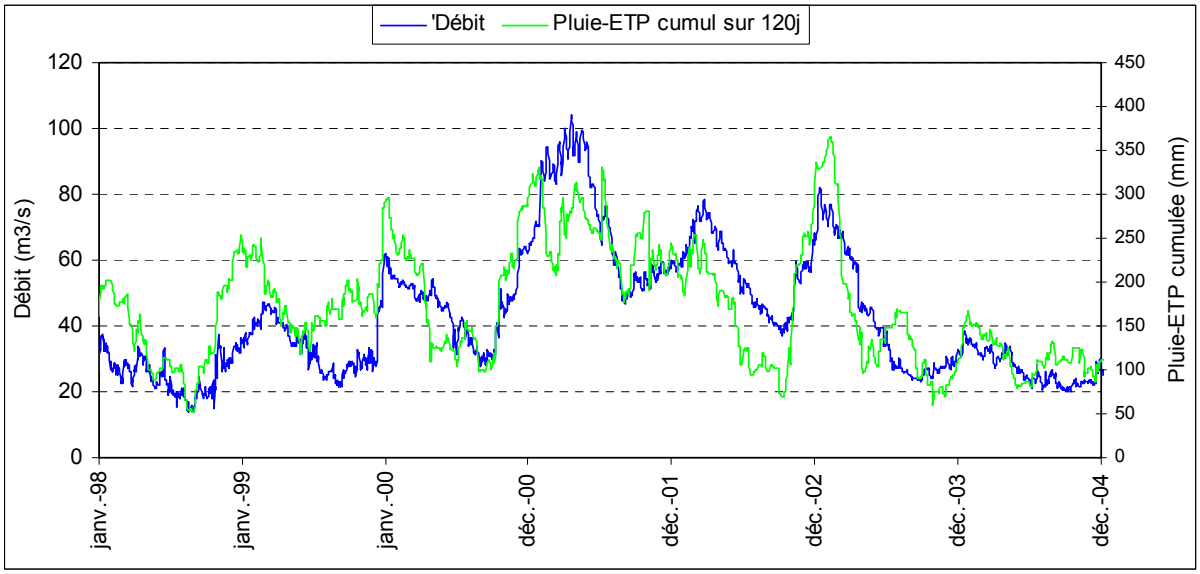


Illustration 12 - Débits de la Somme et différence pluie-ETP cumulée sur 120 jours. "Zoom" sur la période 1998-2004

2.2.2.3. Mise en relation des débits de la somme avec la pluie efficace cumulée sur n jours

Pour affiner, le même travail (figures ci-après) a été fait ensuite avec la pluie efficace calculée avec le logiciel TEMPO, logiciel du BRGM permettant de réaliser des modélisations globales (non maillées).

La correspondance avec la pluie efficace cumulée apparaît très nettement sur le graphique ci-dessous (illustration 13). Elle est moins nette avec la pluie efficace cumulée sur 120 jours (illustration 14).

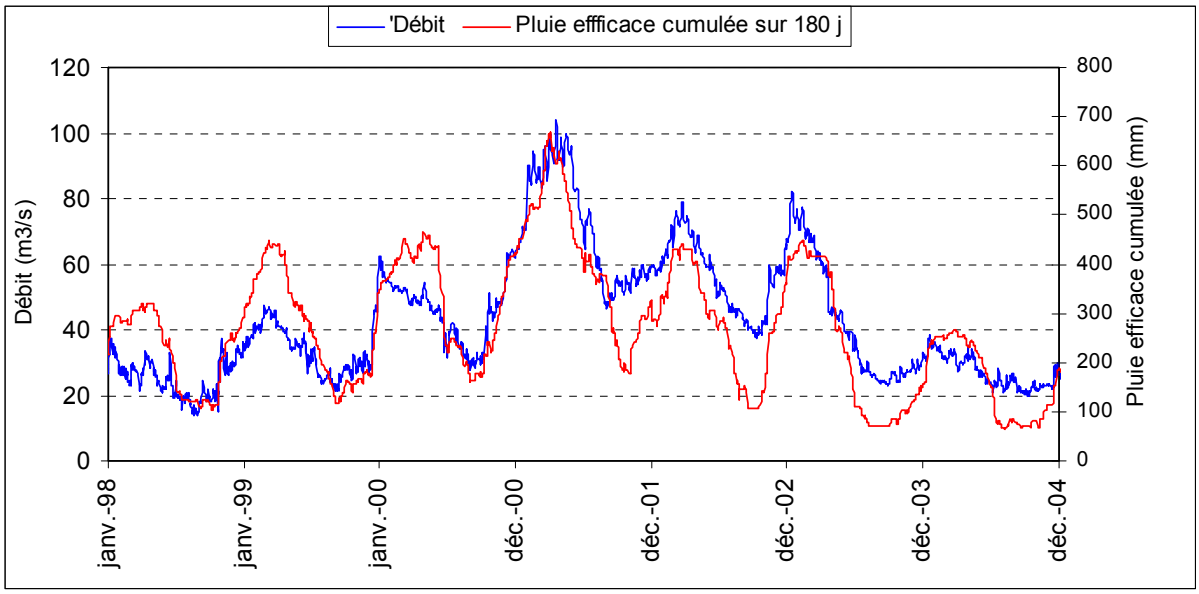


Illustration 13 - Débits de la Somme et pluie efficace cumulée sur 180 jours, "zoom" sur la période 1998-2004

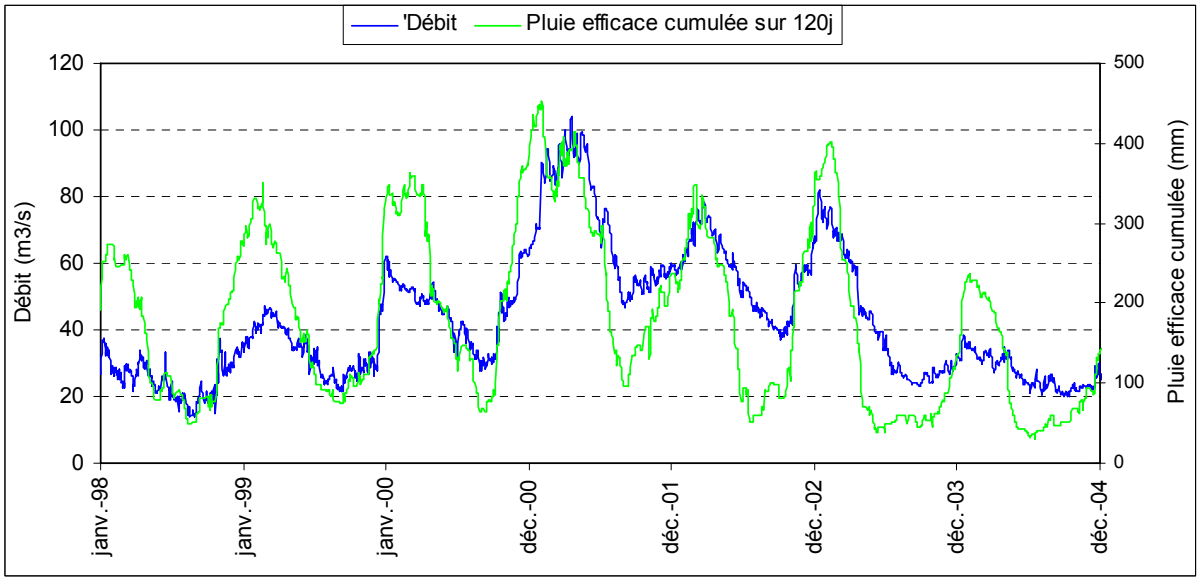


Illustration 14 - Débits de la Somme et pluie efficace cumulée sur 120 jours, "zoom" sur la période 1998-2004

Cette étroite correspondance entre la pluie efficace cumulée sur 180 jours et le débit est traduite aussi par le corrélogramme croisé suivant (illustration 15) :

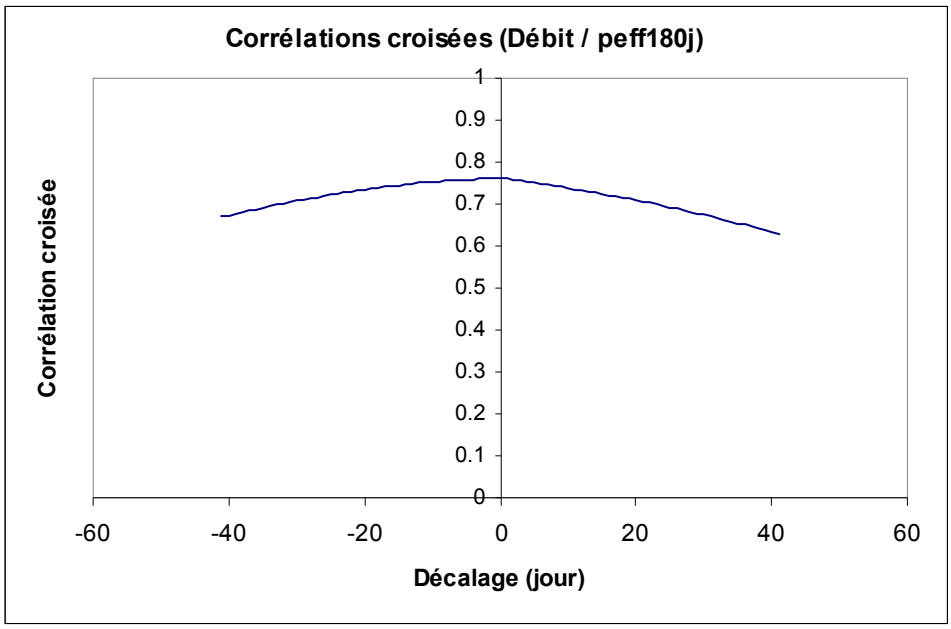


Illustration 15 - Corrélogramme croisé entre pluie efficace cumulée sur 180 jours (station de Glisy-Amiens) et débit de la Somme

La corrélation est maximale sans décalage temporel, avec un coefficient de corrélation de 0.75.

2.3. AJUSTEMENT D'UNE LOI GEV SUR LES DÉBITS MAXIMA ANNUELS ET LES PLUIES CUMULÉES. PÉRIODES DE RETOUR

2.3.1. Loi généralisée des valeurs extrêmes

Pour des événements météorologiques extrêmes (précipitations très importantes, vents violents) ou hydrologiques (fortes crues) des méthodes et des lois statistiques spécifiques sont utilisées.

Pour constituer l'échantillon statistique à modéliser, on sélectionne les valeurs extrêmes de la chronique de mesures disponible. Deux méthodes de sélection sont a priori possibles :

- la méthode des maxima : seules les valeurs maximales du phénomène, atteintes chaque année (par exemple), sont utilisées. La loi utilisée est alors la loi dite GEV ou "*Loi généralisée des valeurs extrême*s" (GEV, *Generalized Extreme Values*).
- la méthode des excès (au-delà d'un seuil). Dans ce cas ce sont les valeurs du phénomène supérieures à un seuil donné qui sont utilisées. La loi utilisée est alors la loi appelée "*Loi généralisée de Pareto*" (GPD, *Generalized Pareto Distribution*)

Dans cette étude, c'est la méthode des maxima qui a été utilisée. La modélisation statistique repose alors sur la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV).

La loi GEV est une loi à trois paramètres qui regroupe en fait 3 lois : Gumbel, Frechet et Weibull. Sa fonction de répartition est :

$$G(x) = \exp\left[-\left(1+\xi\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right]$$

μ est un paramètre de position

σ est un paramètre de dispersion (ou d'échelle)

ξ est un paramètre de forme ($\neq 0$)

- Si $\xi = 0$, on obtient la loi de Gumbel (loi de type I), dont la fonction de répartition est :

$$G(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)\right]$$

- Si $\xi > 0$, on a la loi de Frechet (loi dite de type II)

- Si $\xi < 0$, on a la loi de Weibull (loi dite de type III)

Il existe une très abondante littérature sur la théorie des valeurs extrêmes et ses applications. On pourra se référer à l'ouvrage suivant, très cité :

Coles S. (2001) - *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Editions Springer.

La démarche d'ajustement est décrite en annexe 2 (débits) et en annexe 3 (pluies cumulées).

Tous les traitements ont été réalisés avec le logiciel R :http://www.r-project.org

On ne présente dans ce chapitre que la comparaison des fonctions de répartition empirique et GEV et les résultats obtenus pour les périodes de retour.

Remarque : l'extrapolation à 1000 ans représente 20 fois la taille de l'échantillon, ce qui conduira donc à de fortes incertitudes sur les résultats (ce que mettent d'ailleurs en évidence les intervalles de confiance).

2.3.2. Ajustement d'une loi GEV sur les débits maxima annuels de la Somme à Abbeville

Il s'agit des débits maxima présentés par l'illustration 8 ci-avant.

2.3.2.1. Comparaison des fonctions de répartition (empirique et théorique)

Le graphique ci-après (illustration 16) permet de comparer la fonction de répartition empirique des débits maxima annuels de la Somme et celle de la loi GEV ajustée à l'échantillon de ces débits maxima.

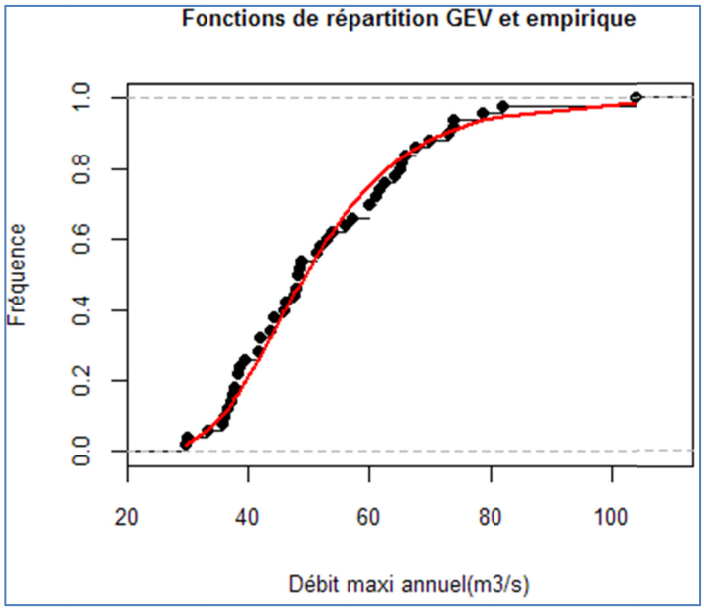


Illustration 16 - Fonction de répartition des débits maxima annuels de la Somme, empirique (cercles noirs) et de la loi GEV ajustée (trait rouge)

2.3.2.2. Périodes de retour et intervalles de confiance

Les résultats obtenus (arrondis à l'unité) sont synthétisés par l'illustration 17.

Période de retour	Valeur probable	Borne inf.	Borne sup.
10	72	63	82
20	82	68	96
30	87	70	105
40	91	71	112
50	94	71	117
100	**104**	72	136
200	114	70	158
500	127	65	189
1000	**138**	59	217

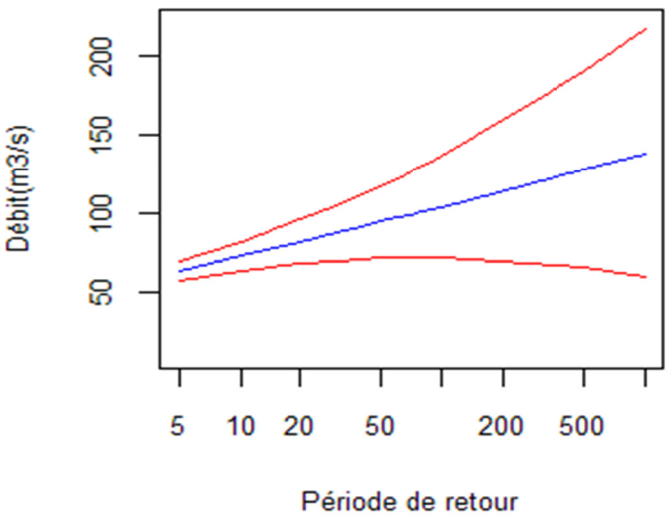


Illustration 17 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les débits maxima annuels de la Somme

Pour une période de retour millénale, le débit est estimé à 138 m^3/s avec une borne haute de l'intervalle de confiance de 217 m^3/s.

Le débit de 104 m^3/s mesuré le 19/04/2001 correspond à une période de retour centennale.

2.3.3. Ajustement d'une loi GEV sur les pluies cumulées de 180 jours à la station de Glisy-Amiens.

Les pluies cumulées sont calculées par "jours glissants". On obtient donc une chronique de pluies cumulées au pas de temps journalier. De cette chronique, on extrait les valeurs maximales annuelles. Le détail du processus d'ajustement sur ces valeurs maximales annuelles est reporté en annexe 3.

2.3.3.1. Comparaison des fonctions de répartition (empirique et théorique)

Le graphique ci-dessous (illustration 18) permet de comparer la fonction de répartition empirique des débits maxima annuels de la Somme et celle de la loi GEV ajustée à l'échantillon de ces débits maxima.

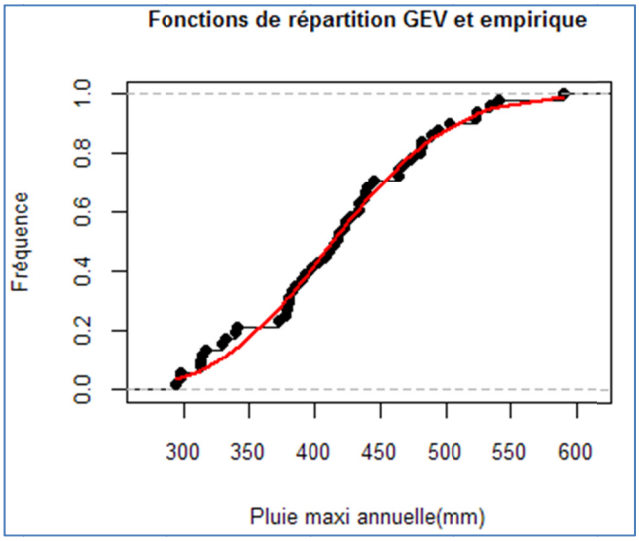


Illustration 18 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours à Glisy-Amiens : 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge)

2.3.3.2. Périodes de retour et intervalles de confiance

Les résultats en termes de période de retour sont synthétisés par l'illustration 19.

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf. (mm)	Borne sup. (mm)
10	508	482	534
20	534	503	566
30	547	512	583
40	556	517	595
50	562	520	604
100	580	528	631
200	594	532	656
500	610	534	686
1000	620	534	707

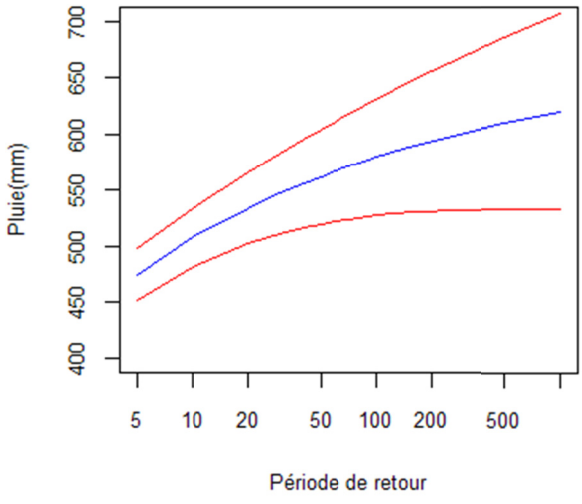


Illustration 19 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie cumulée sur 180 jours à la station de Glisy

La valeur de la période de retour millénale est de 620 mm. Pour comparaison, la valeur maximale de l'échantillon 1961-2011(cumul sur 180 jours), de 589 mm (en 2001), correspond à une période de retour de 160 ans.

2.3.4. Ajustement d'une loi GEV sur les pluies cumulées de 180 jours à la station de Bernaville.

Les pluies cumulées sont calculées par "jours glissants". On obtient donc une chronique de pluies cumulées au pas de temps journalier. De cette chronique, on extrait les valeurs maximales annuelles.
Le détail du processus d'ajustement sur ces valeurs maximales annuelles est reporté en annexe 3.

2.3.4.1. Comparaison des fonctions de répartition (empirique et théorique)

Le graphique ci-dessous (illustration 20) permet de comparer la fonction de répartition empirique des débits maxima annuels de la Somme et celle de la loi GEV ajustée à l'échantillon de ces débits maxima.

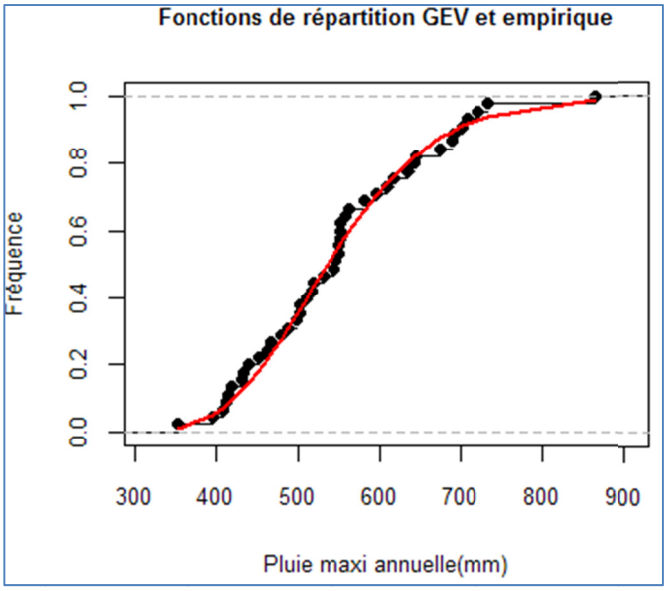


Illustration 20 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours à Bernaville : 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge)

2.3.4.2. Périodes de retour et intervalles de confiance

Les résultats en termes de période de retour sont synthétisés par l'illustration 21.

La valeur de la période de retour millénale est de 976 mm.

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf. (mm)	Borne sup. (mm)
10	692	637	747
20	745	671	818
30	773	685	862
40	793	692	893
50	807	697	917
100	851	707	995
200	891	709	1074
500	941	702	1180
1000	976	690	1261

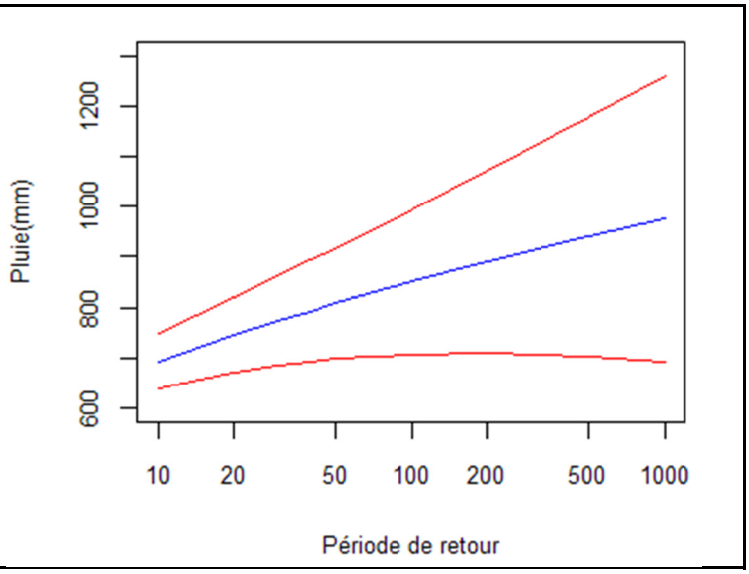


Illustration 21 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie cumulée sur 180 jours à la station de Bernaville

2.3.5. Calcul avec une pluie globale, combinaison des pluies de la station de Bernaville et de Glisy

Une modélisation des débits de la Somme avec le logiciel Tempo (une brève description en est fournie en annexe 4) montre que le meilleur calage est obtenu avec une pluie "optimale", combinaison linéaire des pluies de Bernaville (70%) et de Glisy-Amiens (30%). Les pourcentages sont obtenus par maximisation de l'aire du corrélogramme croisé pluies-débits pour une combinaison linéaire donnée.

A partir de cette pluie "optimale" journalière, un cumul sur 180 jours a été effectué par "jours glissants" et les maxima annuels ont été extraits de la chronique ainsi constituée (illustration 22).

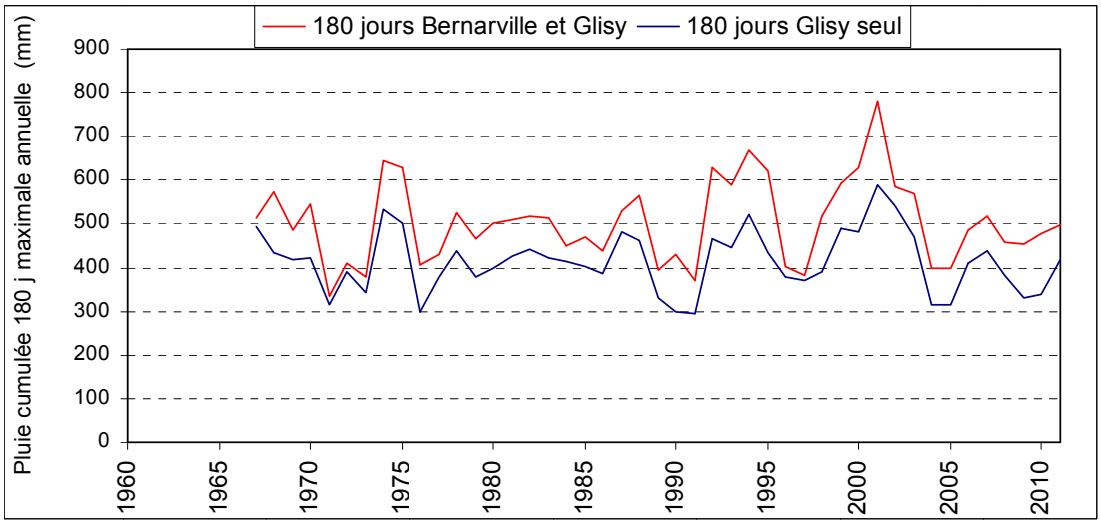


Illustration 22 – Valeurs maximales annuelles de la pluie "optimale" cumulée sur 180 jours comparées à celles calculées à la station de Glisy

Le détail du processus d'ajustement sur ces valeurs maximales annuelles est reporté en annexe 3.

2.3.5.1. Comparaison des fonctions de répartition (empirique et théorique)

Le graphique ci-dessous (illustration 23) permet de comparer la fonction de répartition empirique des débits maxima annuels de la Somme et celle de la loi GEV ajustée à l'échantillon de ces débits maxima.

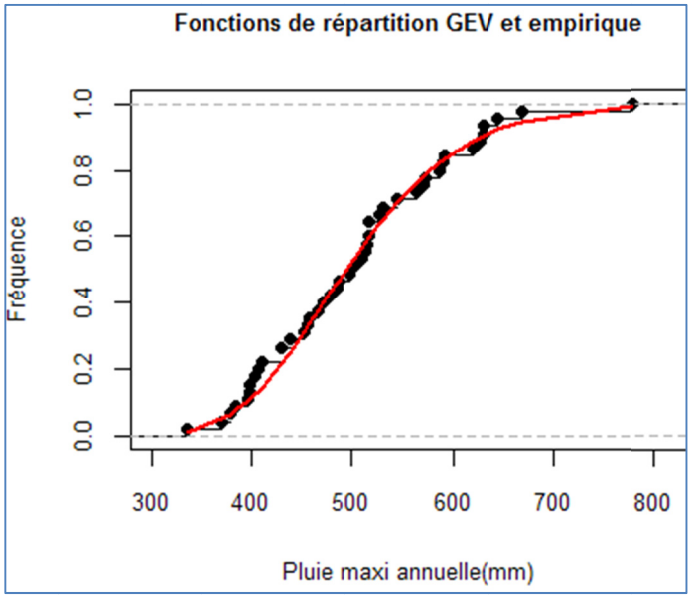


Illustration 23 - Fonctions de répartition des pluies cumulées sur 180 jours pour la pluie "optimale" cumulée sur 180 jours. 1) empirique (cercles noirs) 2) loi GEV ajustée (trait rouge)

2.3.5.2. Périodes de retour et intervalles de confiance

Les résultats en termes de période de retour sont synthétisés par l'illustration 24.

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf. (mm)	Borne sup. (mm)
10	628	582	674
20	673	611	734
30	697	623	770
40	713	630	796
50	725	634	817
100	**762**	**643**	**880**
200	795	646	945
500	836	641	1031
1000	**864**	**633**	**1095**

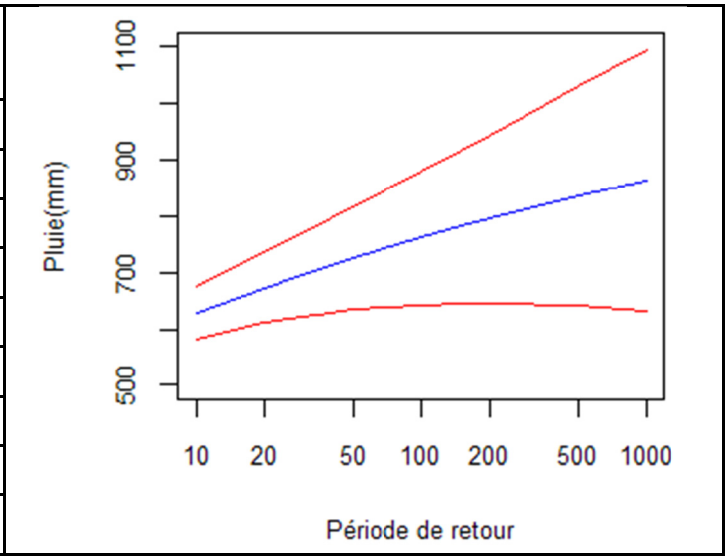


Illustration 24 - Périodes de retour et quantiles correspondant pour les valeurs maximales annuelles de la pluie "optimale cumulée sur 180 jours.

La valeur de la péiode de retour millénale est de 864 mm. La valeur maximale de l'échantillon 1967-2011 est de 779 mm (en 2001), correspondant à une période de retour de 150 ans.

2.3.6. Relation entre débits de la Somme et pluies cumulées (Bernaville-Glisy) sur 180 jours pour différentes périodes de retour

Cette relation est présentée par l'illustration 25 obtenue à partir des valeurs du tableau 4.

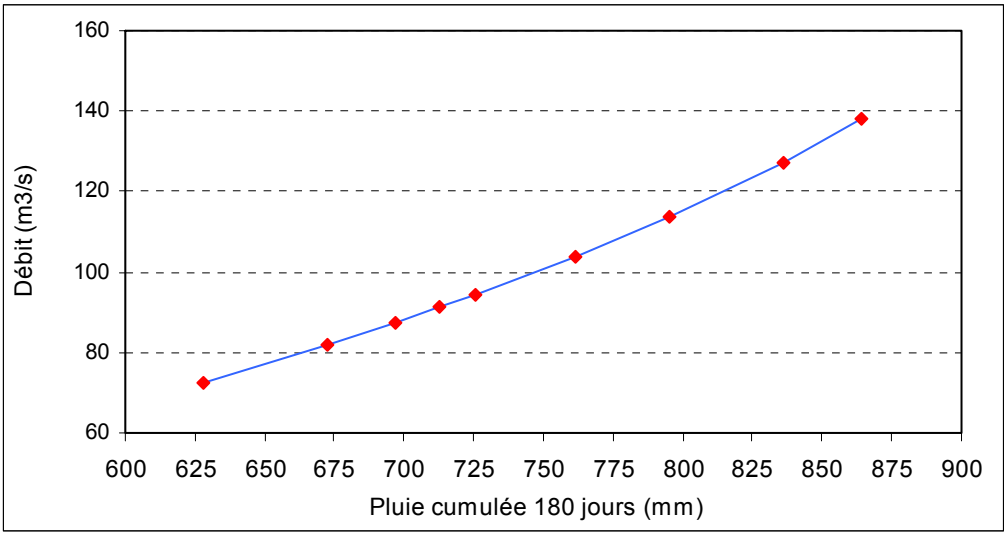


Illustration 25 – Relation entre débits de la Somme et pluies cumulées (Bernaville-Glisy) sur 180 jours pour 9 périodes de retour selon les fonctions de répartition ajustées

Période de retour (année)	Pluie 180j 0.7Pl_Bernaville +0.3 Glisy-Amiens	Débit Somme (m3/s)
10	628	72
20	673	82
30	697	87
40	713	91
50	725	94
100	762	**104**
200	795	114
500	836	127
1000	**864**	**138**

Tableau 4 - Pluies cumulées sur 180 jours (70% Bernaville + 30% Glisy) et débits de la Somme pour différentes périodes de retour

2.4. SIMULATION AVEC LE LOGICIEL TEMPO DE L'IMPACT DES PLUIES CUMULÉES SUR LES DEBITS DE LA SOMME

2.4.1. Calage au pas de temps journalier et validation

2.4.1.1. Calage

Les données d'entrée sont les pluies de Glisy et de Bernaville, à partir desquelles une pluie "optimale" (au sens de meilleur calage obtenu avec cette pluie) est calculée. Le calage a été fait sur la période 1972-2005 (illustration 26).

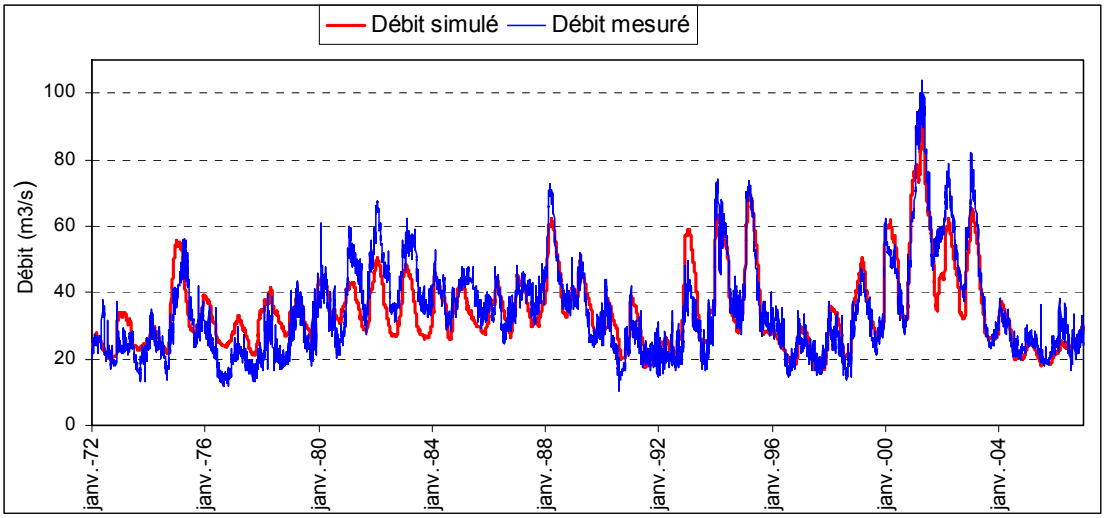


Illustration 26 – Modélisation des débits de la Somme à Abbeville avec le logiciel Tempo.

Le coefficient de Nash (critère de calage) est de 0.775. Il n'a pas été possible de reproduire le pic de débit de 104 m^3/s du 19 Avril 2001, le modèle restituant un pic de 94 m^3/s le 14 Avril, soit 10 m^3/s de moins (10%).

2.4.2.2. Validation

Pour vérifier la "robustesse" du calage, les périodes non prises en compte dans le calage ont été simulées (1970-1971 et 2006—2011).

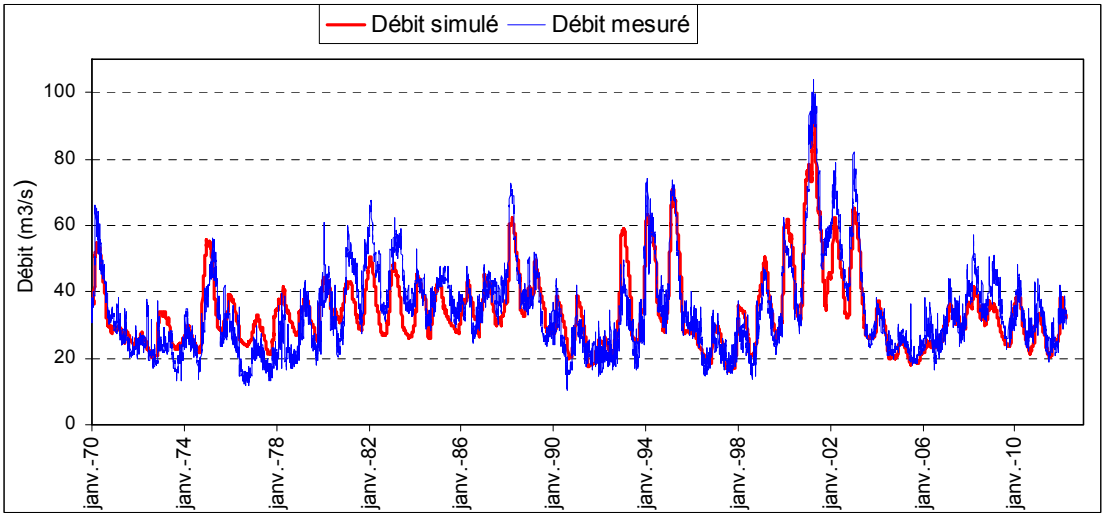


Illustration 27 - Modélisation des débits de la Somme à Abbeville avec le logiciel Tempo. Validation du calage

Le coefficient de Nash obtenu est de 0.760 (donc calage non dégradé sur l'ensemble de la période de reconstitution).

2.4.2. Simulations

2.4.2.1. 6 mois de pluies cumulées millénales (simulation 1)

● Simulation T1a

Elle correspond à une injection de 6 mois de pluie cumulée millénale à partir du 30 septembre 2000. On considère d'abord la borne haute de l'intervalle de confiance, **1095 mm**. Par rapport au cumul calculé sur cette période qui était de 779 mm (combinaison Bernaville-Glisy), cela représente une augmentation de 40 %, coefficient qui a été appliqué à chacune des pluies journalières observées sur la période fin Septembre 2000 à fin Mars 2001.

Le débit maximum est de **146 m^3/s** atteint le 6 avril 2001 et de 145 m^3/s le 14 Avril.

Ce débit est donc supérieur au débit de période de retour 1000 ans (estimé à 138 m^3/s). Il serait en fait plus élevé, sachant que le modèle ne parvient pas à restituer le pic observé de 104 m^3/s (écart de 10 %).

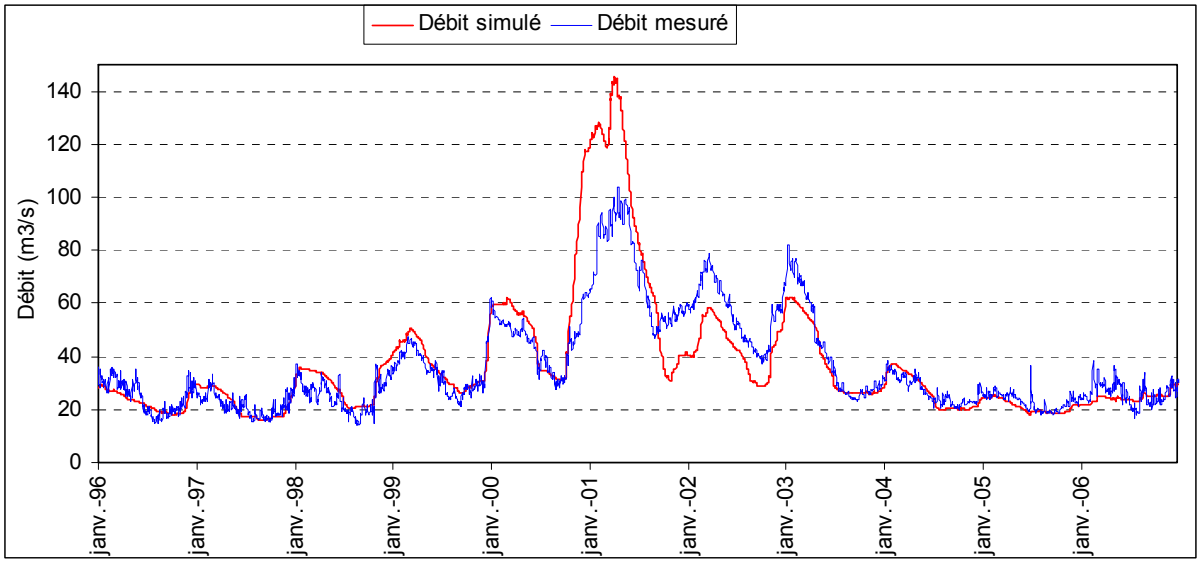


Illustration 28 – Simulation du scénario T1a avec le logiciel Tempo

Remarque : influence de la répartition de la pluie

Une variante de cette simulation a été effectuée afin de montrer l'influence de la répartition et de l'intensité des pluies journalières sur la période de 180 jours.

Injection de la borne haute des pluies cumulées (**1095 mm**), mais avec une pluie identique sur les 180 jours, soit 6.1 mm/jour (figure ci-dessous).

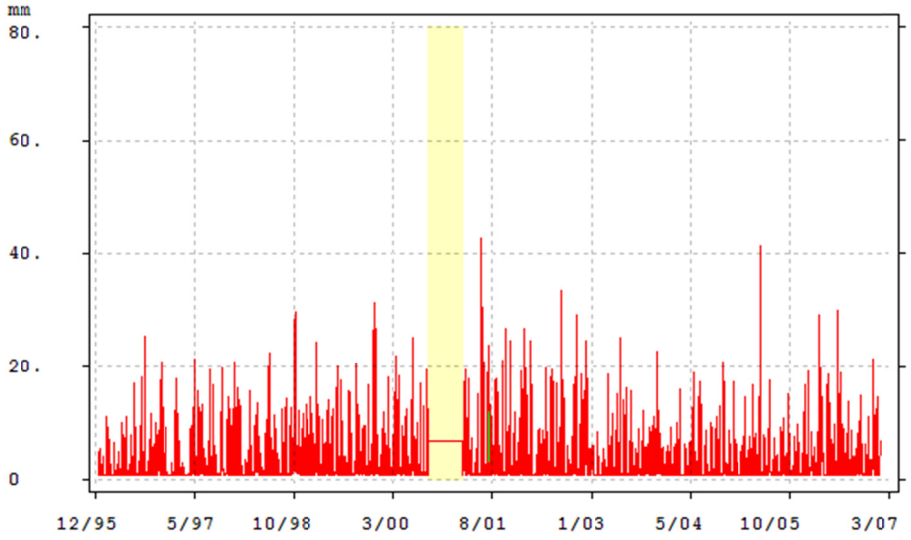


Illustration 29 –Séquence de pluie uniforme sur 180 jours

Le débit maximum atteint est de **159 m^3/s**, supérieur de 13 m^3/s au précédent (la régularité des pluies se traduit par un pic très "lisse", par rapport à celui de la simulation n°1).

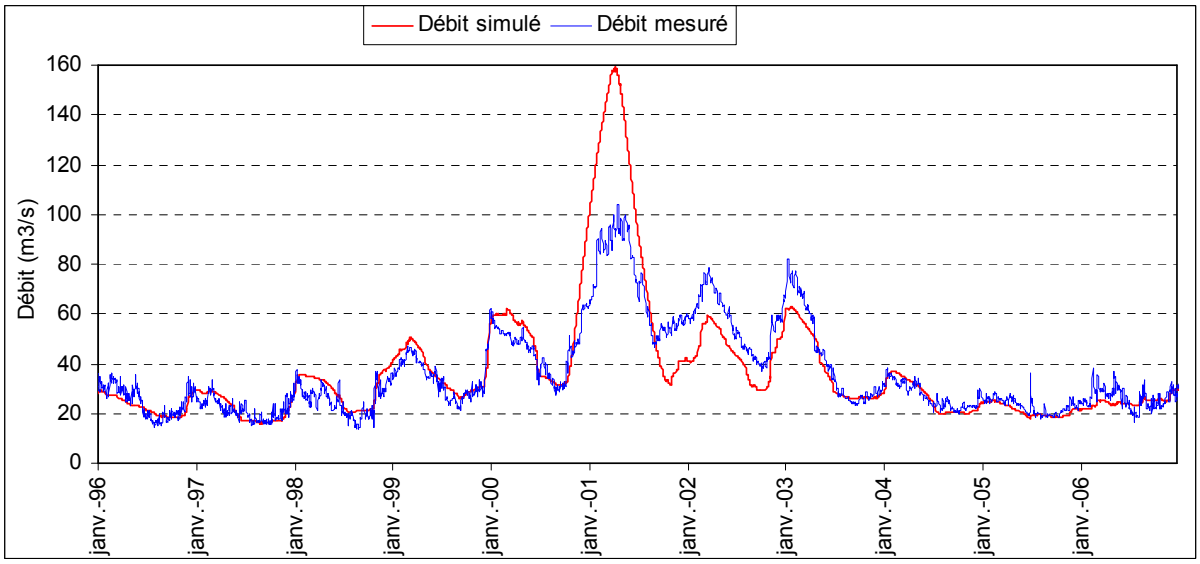


Illustration 30 – Influence de la répartition des pluies dans le temps

Le débit est donc là aussi supérieur au débit de période de retour 1000 ans (138 m^3/s) et serait aussi sans doute plus élevé sachant que le modèle ne parvient pas à restituer le pic observé de 104 m^3/s. (écart de 10 %).

● Simulation T1b

Injection de 6 mois de pluies cumulées, valeur probable de **864 mm**. Par rapport au cumul observé de 779 mm, cela représente une augmentation de 11 %, coefficient qui a été appliqué à chacune des pluies journalières observées sur la période fin Septembre 2000 à fin Mars 2001.

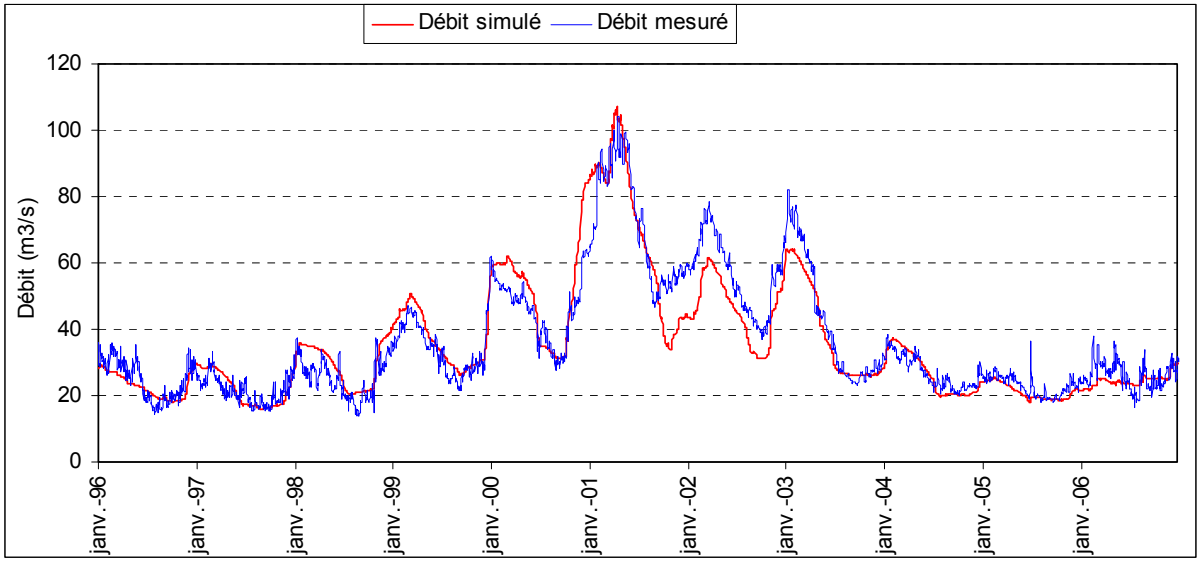


Illustration 31 - Simulation du scénario T1b avec le logiciel Tempo

Débit nettement moins important, **107 m^3/s**, inférieur au débit millénal, même s'il est augmenté de 10% (en supposant que l'écart reste constant en %), ce qui le porterait à 118 m^3/s.

2.4.2.2. 3 mois de pluies cumulées millénales

● **Simulation T2a**

La valeur probable de la pluie cumulée sur 3 mois de période de retour 1000 ans, **510 mm**, est injectée dans le modèle global Tempo au 1er janvier 2001. Cette séquence trimestrielle suit la période pluvieuse du dernier trimestre 2000.

Par rapport au cumul calculé le premier trimestre 2001, qui était de 353 mm (combinaison Bernaville-Glisy), cela représente une augmentation de 44 %, coefficient qui a été appliqué à chacune des pluies journalières observées sur la période début janvier 2001 à fin mars 2001.

Le débit maximum atteint est de **123 m^3/s**, inférieur au débit millénal de 138 m^3/s. S'il est augmenté de 10% (en supposant que l'écart constaté au calage reste constant en %), il resterait légèrement inférieur (135 m^3/s) à ce débit de crue (138 m^3/s).

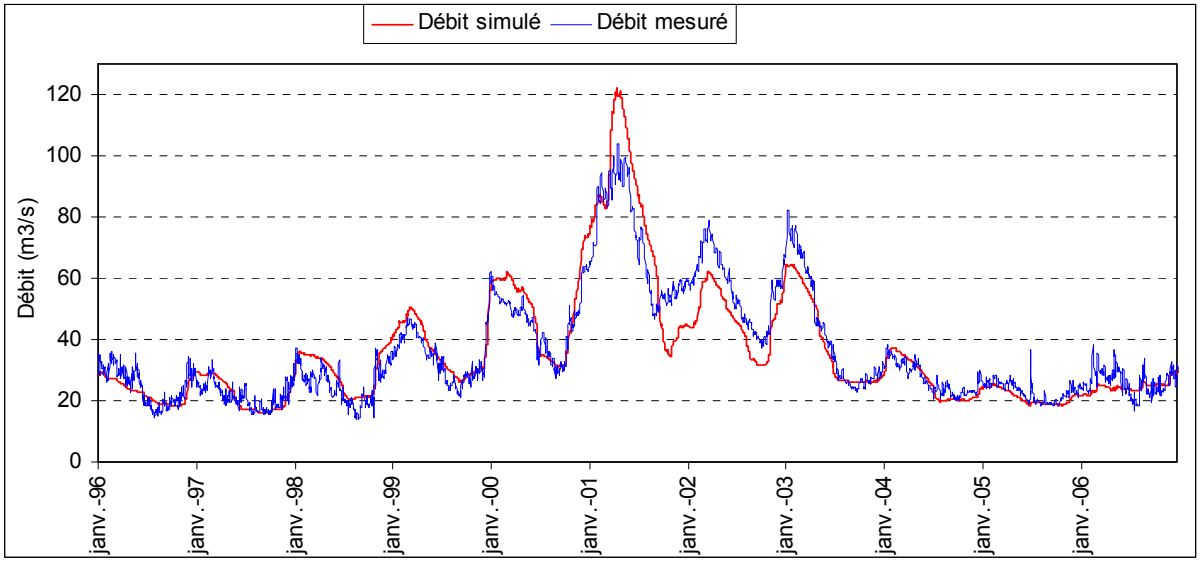


Illustration 32 - Simulation du scénario T2a avec le logiciel Tempo

● Simulation T2b

Injection de la borne haute de la pluie cumulée sur trois mois, 625 mm, soit une augmentation de 77 %. Le débit atteint est de 143 m^3/s, supérieur au débit de crue milléniale.

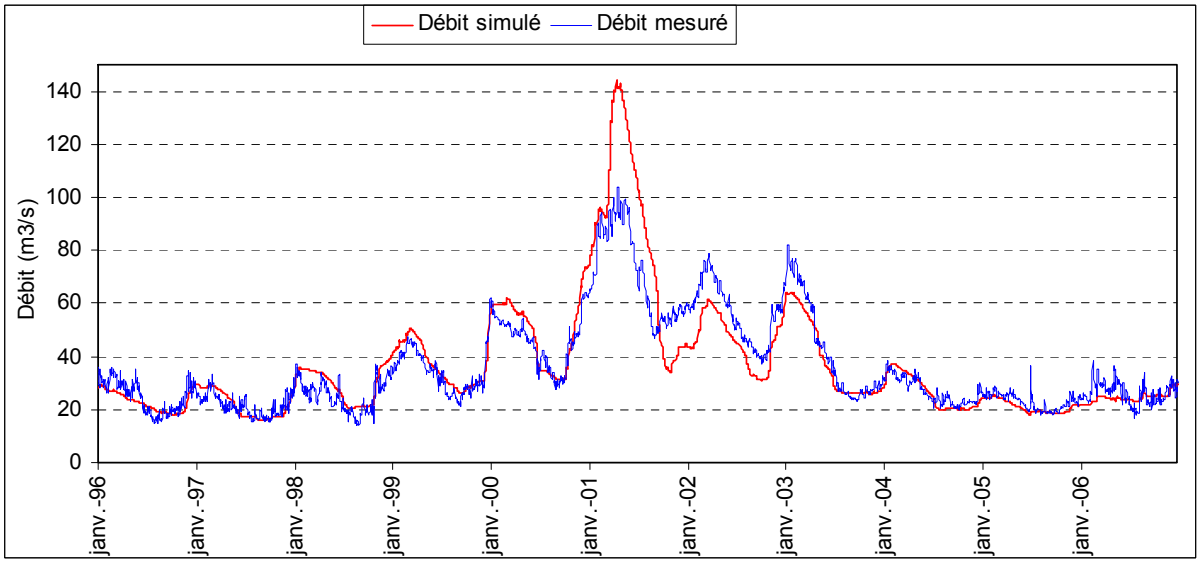


Illustration 33 - Simulation du scénario T2b avec le logiciel Tempo

3. Simulation par modèle maillé de l'impact d'événements pluvieux millénaux sur le nivau de la nappe et le débit du fleuve Somme.

Le modèle hydrodynamique de l'aquifère crayeux du bassin de la Somme a été utilisé pour simuler l'impact d'épisodes pluvieux millénaux sur les niveaux de la nappe de la craie et le débit du fleuve Somme et de ses principaux affluents. Trois scénarios ont été simulés dans le but de prendre en compte différentes situations relatives :

- à l'état des niveaux de la nappe et du débit de la Somme au moment du déclenchement des précipitations,
- à la répartition des pluies journalières et à l'intensité des épisodes pluvieux de période de retour 1000 ans.

3.1. LE MODÈLE MAILLÉ DU BASSIN DE LA SOMME

Le modèle hydrodynamique de la nappe de la craie du bassin de la Somme a été développé en 2002 avec le code de calcul MARTHE du BRGM. Il a été amélioré par la suite dans le cadre du projet de Service Public intitulé « Simulation des hautes eaux dans la vallée de la Somme » (rapports BRGM/RP-54386-FR (2005) ; BRGM/RP-53211-FR (2004) ; BRGM/RP-51827-FR (2002)). Il s'étend sur une superficie de 7400 km^2 et couvre tout le bassin de la Somme (Somme amont et Somme aval), la moitié sud-ouest du bassin de l'Authie au nord et la moitié nord-ouest 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 (illustration 34).

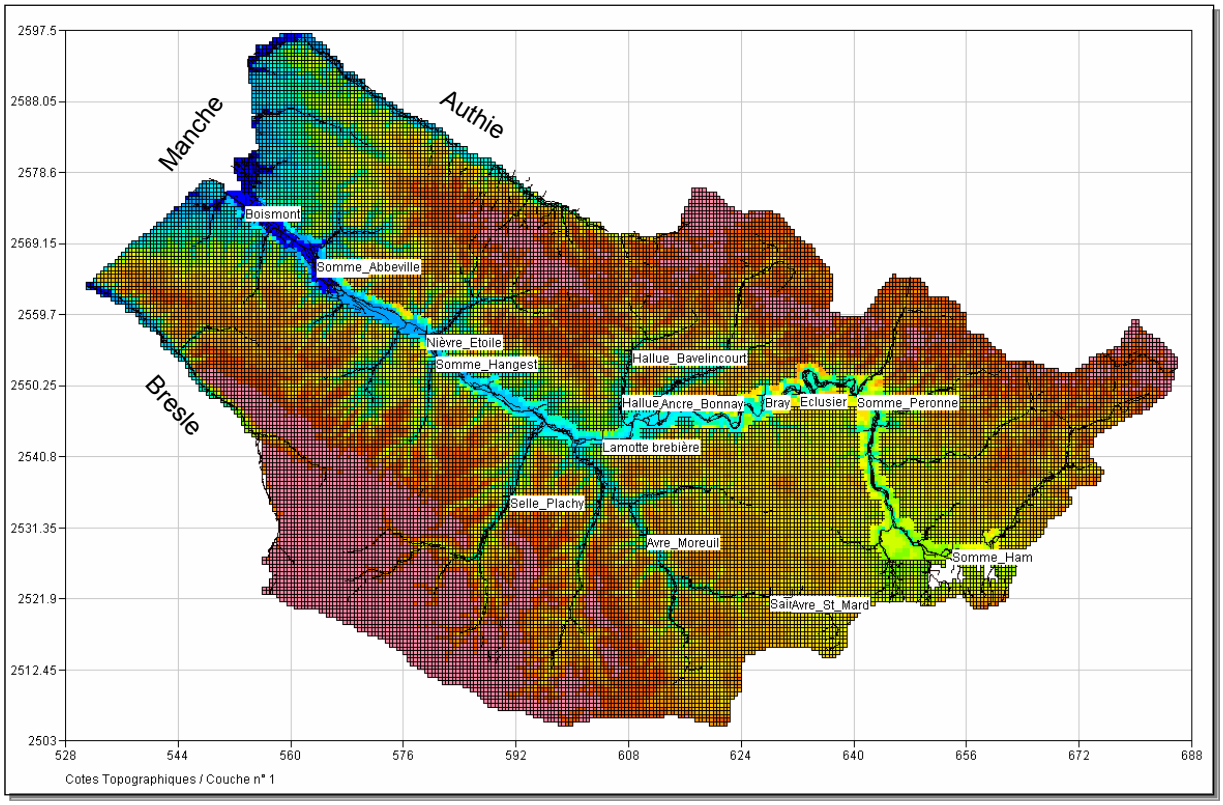


Illustration 34 - Extension du modèle de la Somme avec son réseau hydrographique et localisation stations hydrométriques.

La nappe de la craie est modélisée en monocouche avec une grille de calcul régionale à mailles carrées de 500m x 500m affinée au niveau de la vallée humide de la Somme où les mailles ont une dimension de 100m x100m. La nappe est couplée avec le réseau hydrographique. Au total, le modèle comporte plus de 66 000 mailles de calcul dont plus de 4500 tronçons de rivières : chaque tronçon de cours d'eau est en relation avec une maille et échange des flux avec celle-ci.

Le bilan hydro-climatique est calculé à partir des données spatialisées de pluie et d'ETP journalières et des paramètres de sol (notamment la réserve utile). L'infiltration (ou recharge) vers la nappe et les flux de ruissellement, rejoignant les cours d'eau, sont calculés au pas de temps journalier.

Le modèle fonctionne avec un pas de temps de journalier pour les calculs hydro-climatiques et un pas de temps hebdomadaire pour les calculs hydrodynamiques (écoulements souterrains). Il a été calibré sur la période 1989-2006 pour inclure dans le processus de calage des événements climatiques contrastés.

Le modèle permet de simuler les évolutions du niveau de la nappe et aussi les débits en chaque point du réseau hydrographique. L'illustration 35 montre un exemple de résultats obtenu avec le modèle : il s'agit du débit simulé de la Somme à Abbeville comparé aux données d'observation. Cet exemple montre bien la bonne restitution par le modèle des débits de crues enregistrés en 1994, 1995 et 2001.

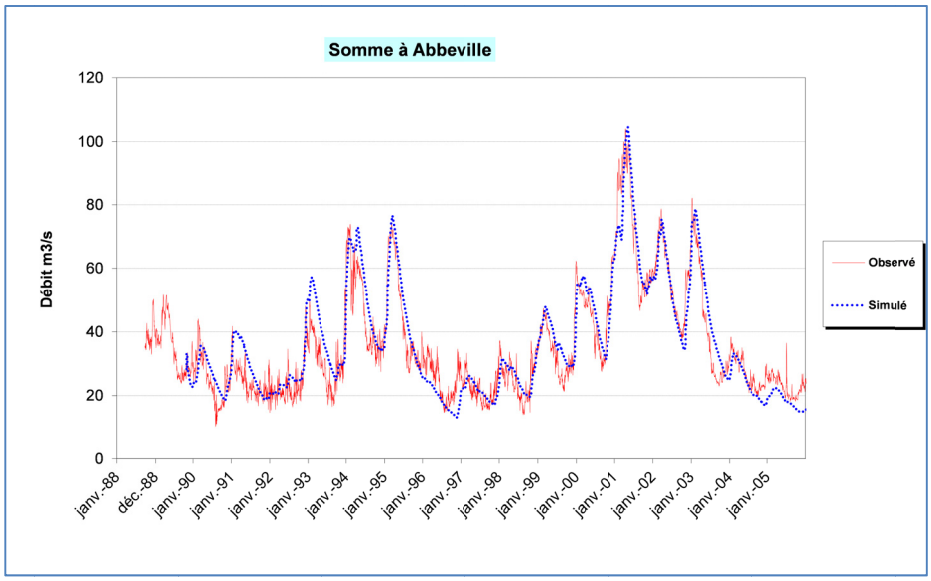


Illustration 35 - Comparaison des débits observés à la sation d'Abbeville aux débits simulés par le modèle

3.2. SCÉNARIOS SIMULÉS

Sur la base de l'analyse probabiliste détaillée ci-dessus et des résultats de la modélisation globale effectuée avec le logiciel Tempo, trois scénarios ont été étudiés.

3.2.1. Scénario 1

Simulation d'un épisode pluvieux d'intensité plus importante que celle de l'épisode 2000-2001, en partant du niveau de la nappe de l'époque (au 1er Octobre 2000). Les caractéristiques du scénario sont les suivantes :

- **Pluie cumulée** sur **180 jours** (1er octobre année n au 30 mars année n+1) de période de retour **millénale** ;

- La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours utilisée est une **moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute** de l'analyse probabiliste effectuée sur les pluies cumulées (cf § 3.3 pour les calculs). Une variante de ce scénario a été effectuée en considérant la borne haute de la pluviométrie ;
- La répartition des pluies est identique à celle de **l'automne-hiver 2000-2001** ;
- L'état initial de la nappe est celui des **basses eaux de 2000**.

3.2.2. Scénario 2

Il s'agit de pluies cumulées de période de retour millénale succédant à celles de l'année 2000-2001. Les caractéristiques du scénario sont les suivantes :

- **Pluie cumulée** sur **180 jours** de période de retour **millénale** ;
- La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours correspond à la **moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute** de l'analyse probabiliste (cf § 3.3 pour les calculs) ;
- La répartition des pluies est identique à celle de **l'automne-hiver 2001-2002** ;
- L'état initial de la nappe est celui des **basses eaux de 2001**.

3.2.3. Scénario 3

Ce scénario a été retenu pour évaluer l'impact de la répartition des pluies sur le processus de crue. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- **Pluie cumulée** de **180 jours** de période de retour **millénale** ;
- La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours utilisée correspond à la **borne haute** de l'analyse probabiliste (cf § 3.3 pour les calculs) ;
- La répartition des pluies est identique à celle de **l'automne-hiver 1994 - 1995**.
- L'état initial de la nappe est celui des **basses eaux de 1994**.

3.2.4. Résumé

	Pluie millénale	Intensité (basée sur l'analyse probabiliste)	Répartition des pluies	Etat initial de la nappe
Scénario 1	Cumul sur 180 jours	Moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute	Celle de l'automne-hiver 2000-2001	Basses eaux de 2000
Scénario 2	Cumul sur 180 jours	Moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute	Celle de l'automne-hiver 2001-2002	Basses eaux de 2001
Scénario 3	Cumul sur 180 jours	Borne haute de l'analyse probabiliste	Celle de l'automne-hiver 1994-1995	Basses eaux de 1994

Tableau 5 – Caractéristiques des scénarios climatiques simulés

3.3. PLUIES CUMULÉES (180 JOURS) DE PÉRIODE DE RETOUR MILLÉNALE, CALCULÉES AUX DIFFÉRENTES STATIONS CLIMATIQUES UTILISÉES DANS LA MODÉLISATION

Les pluies cumulées sur 180 jours correspondant à la période octobre 2000-mars 2001 ont été calculées pour chacune des stations utilisées dans le modèle (tableau 6).
Aux stations de Glisy et de Bernaville, ces valeurs sont calculées à l'aide d'un coefficient multiplicatif appliqué à chaque pluie journalière de façon à obtenir la valeur probable et celle de la borne haute des pluies cumulées sur 180 jours de période de retour millénale, issues de l'analyse probabiliste (cf § 2.3 et § 2.4 ci-dessus et tableau 6 où ces valeurs sont reportées en caractères gras).
Pour les 4 autres stations, la valeur probable et la borne haute des pluies cumulées sur 180j de période de retour 1000 ans ont été calculées à partir d'une interpolation linéaire des valeurs obtenues aux stations de Glisy et de Bernaville. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 6 en "italique souligné".

		Pluies cumulées sur 180 jours de période de retour 1000 ans		
Station pluviométrique	Cumul de pluie sur 180j (Oct. 2000-Mars 2001) en mm	Valeur probable (VP)	Borne haute (BH)	Moyenne de VP et BH
Glisy	589	**620**	**706**	**663**
Villers Carbonnel	645	*689*	*807*	*748*
Morvillers	743	*813*	*998*	*906*
Abbeville	777	*858*	*1069*	*963*
Bernaville	865	**976**	**1261**	**1118.5**
Vron	946	*1088*	*1451*	*1270*

Tableau 6 - Calcul de pluies cumulées sur 180 jours pour les 6 stations utilisées dans le modèle maillé

3.4. SIMULATION DU SCÉNARIO 1

3.4.1. Hypothèse du scénario1

La répartition des pluies cumulées sur 180 jours est similaire à celle de l'automne-hiver 2000-2001. L'état initial de la nappe est celui des basses eaux de 2000.

Deux variantes de ce scénario ont été simulées : la première **(simulation 1a)** en injectant dans les 6 stations météo du modèle, **la moyenne de la valeur probable et de la borne haute des pluies cumulées sur 180 jours** selon la répartition des pluies d'**octobre 2000-mars 2001** et la seconde **(simulation 1b)** en injectant dans les 6 stations météo du modèle **la valeur de la borne haute des pluies cumulées sur 180 jours** selon la répartition des pluies d'**octobre 2000-mars 2001**.

Pour la simulation 1a, les coefficients appliqués aux pluies mesurées dans les stations pluviométriques utilisées par le modèle varient entre 1.12 et 1.34. Pour la simulation 1b, ces coefficients varient entre 1.2 et 1.53.

3.4.2. Hydrogrammes simulés de la Somme en amont d'Amiens et d'Abbeville.

Les hydrogrammes de la Somme ont été simulés au droit des stations hydrométriques de Lamotte Brebière, Hangest sur Somme et Abbeville. Leur localisation est reportée sur l'illustration 36.

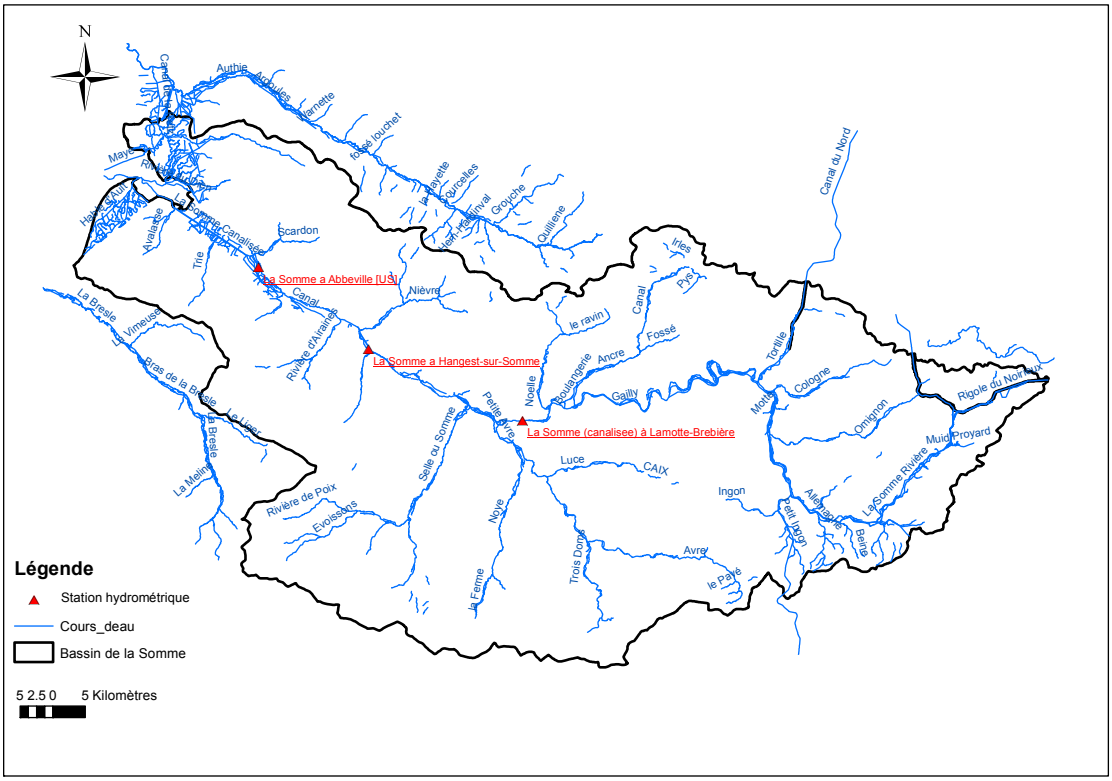


Illustration 36 - Localisation des stations hydrométriques de la Somme au droit desquelles les hydrogrammes sont calculés.

3.4.2.1. Scénario 1a

L'hydrogramme simulé à Abbeville (illustration 37) montre que le débit maximal est atteint le 18 Avril avec une valeur de **126 m^3/s**. ce débit est inférieur au débit probable de période de retour 1000 ans estimé à **138 m^3/s**. Ce scénario ne permet donc pas d'atteindre le débit de crue millénale de la Somme. Des débits maxima de 63 m^3/s et de 101 m^3/s sont obtenus respectivement au droit des stations de Lamotte Brebière et d'Hangest. Les hydrogrammes simulés pour ces deux stations sont reportés en annexe1.

3.4.2.2. Scénario 1b.

Pour cette variante du scénario1, l'hydrogramme simulé à Abbeville (Illustration 38) montre que le débit maximal obtenu à Abbeville est de **141 m^3/s.** Ce débit est légèrement supérieur au débit probable de période de retour 1000 ans (estimé à **138 m^3/s)**. Rappelons que le débit obtenu avec la modèle Tempo est de 146 m^3/s.
Des valeurs de débit maximal de 70 m^3/s et 113 m^3/s sont obtenues respectivement à Lamotte Brebière et à Hangest. Les hydrogrammes correspondants sont reportés en annexe 1.

Ce scénario permet donc de générer un débit de crue millénal.

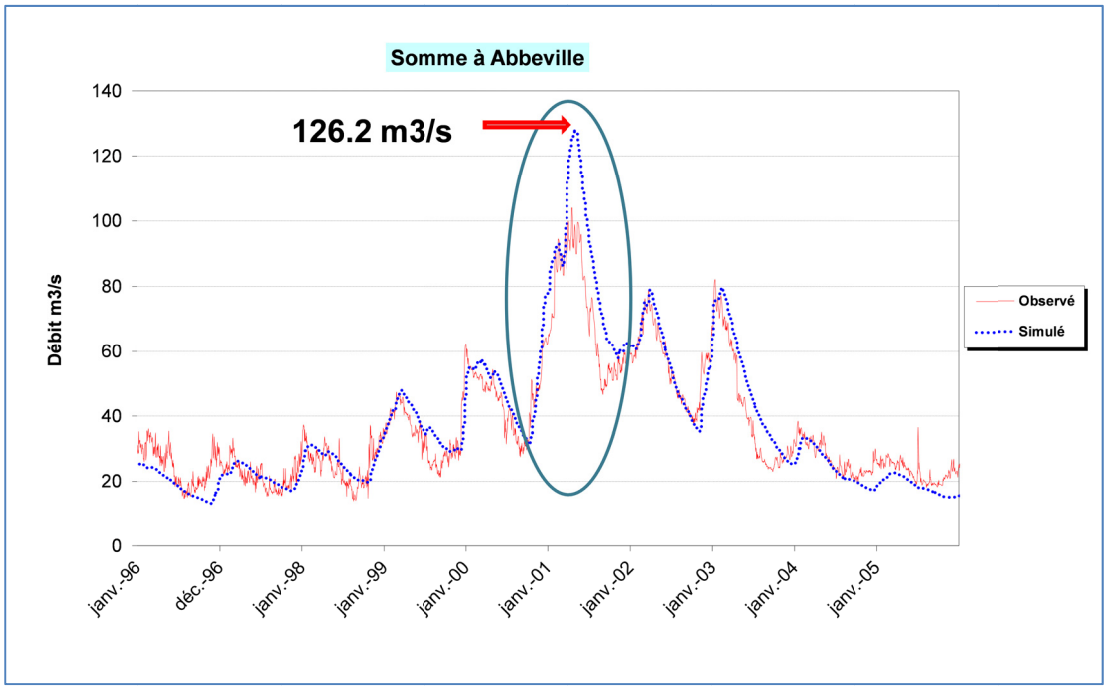


Illustration 37 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario1a).

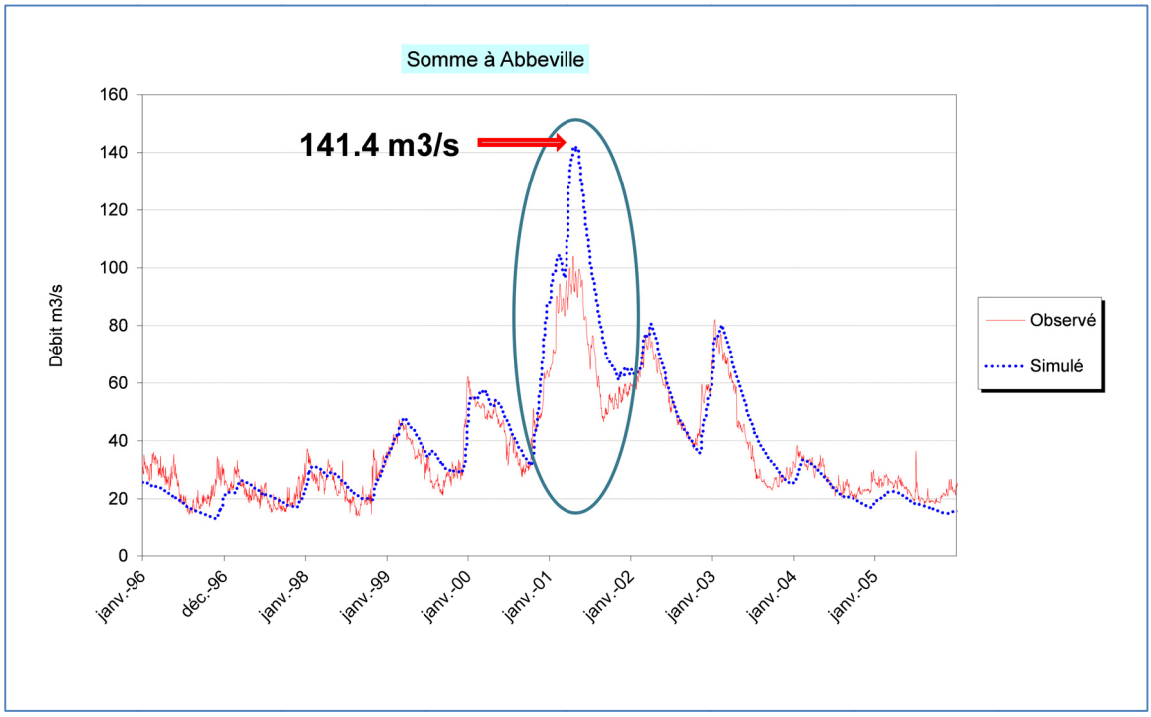


Illustration 38 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario1b).

3.4.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques.

Sachant que c'est le scénario 1b qui permet de générer un débit de crue millénal, l'analyse des bilans climatiques et hydrologiques a été faite sur les résultats de la simulation de ce scénario.

L'illustration 39 montre le cumul sur 180 jours des pluies et de la lame d'eau ruisselée sur l'ensemble du bassin (moyenne sur le bassin des différentes lames d'eau calculées dans chaque zone climatique du modèle et selon la répartition des pluies d'octobre 2000 à mars 2001). Elle montre que les précipitations étaient soutenues sur toute la période sauf au mois de février où il y a eu peu de pluie. Le cumul de la lame d'eau ruisselée montre que le ruissellement ne devient important qu'à partir de décembre avec une pente qui reste presque constante.

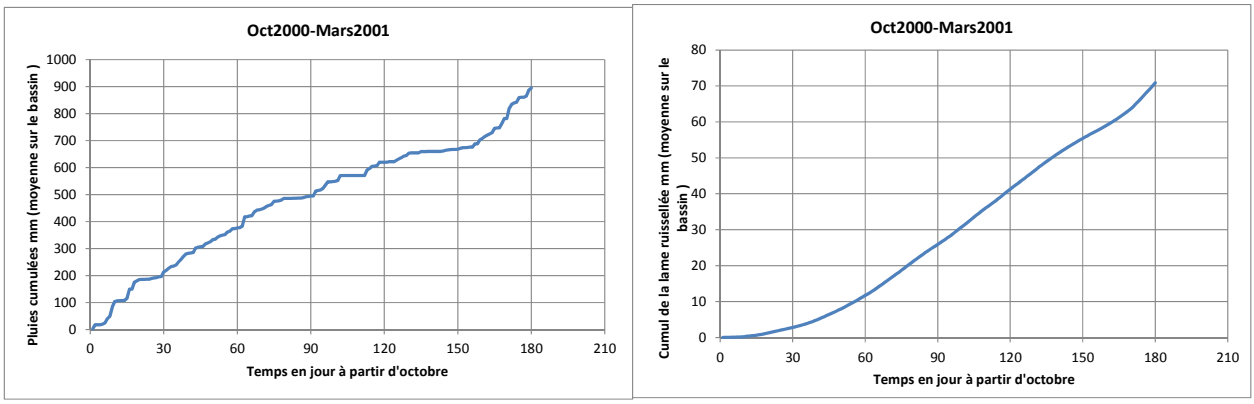


Illustration 39 : Cumul des pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scenario 1b).

L'évolution en fonction du temps du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface (somme des échanges nappe-rivière et du débordement) à l'échelle du bassin de la Somme est montrée sur l'illustration 40 ; le débit à la station de Boismont est montré à titre indicatif. L'écart entre le débit simulé à Boimont et la somme du ruissèlement et de l'apport de la nappe s'explique par le fait que certains cours d'eau ne se déversent pas dans la Somme (par exemple la Maye) et d'autres ont leurs exutoires en aval de Boismont.

L'analyse des termes du bilan hydrologique montre que l'apport de la nappe reste largement plus important que le ruissellement en période de crue. A titre d'exemple, à fin mars, période durant laquelle le ruissellement atteint son maximum, la contribution de la nappe est de 67% contre 33% pour le ruissellement.

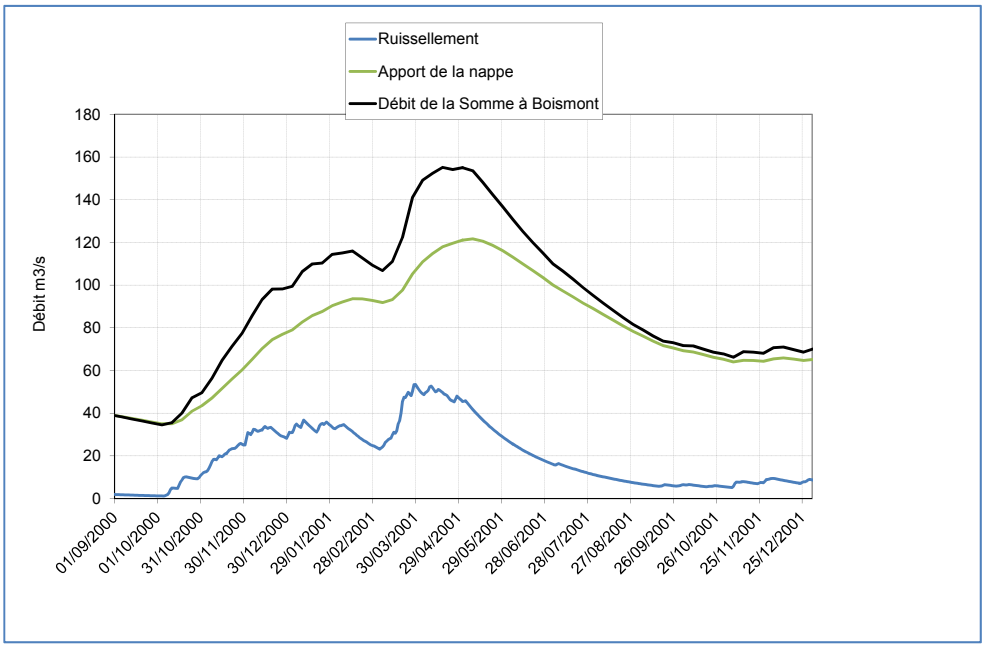


Illustration 40 : Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de la Somme pour le scénario1b.

3.4.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe.

L'illustration 41 présente la carte piézométrique pour les « hautes eaux d'avril 2001 » simulées avec les pluies millénales du scénario 1b. Si l'on compare cette carte à celle des niveaux de la nappe lors des inondations d'avril 2001, l'augmentation des niveaux par rapport à cette situation d'avril 2001 (illustration 42) serait de 5 à 10 m sur les plateaux des bassins situés en rive droite de la Somme et un peu moins sur les plateaux des bassins situés en rive gauche. Par ailleurs, sur les vallées sèches les niveaux augmentent d'environ 10 à 80 cm. Plus l'on s'approche des vallées humides plus les écarts deviennent faibles.

L'illustration 43 montre la carte des débits de débordement de la nappe. Les zones de débordement correspondent aux mailles du modèle où la nappe est intersectée par la cote topographique. Cette carte est calculée sur la base d'une topographie moyenne à l'échelle de mailles de 500 m de côté et ne prétend pas reproduire avec précision les zones d'affleurement de la nappe. La nappe déborde principalement dans les vallées sèches avec des débits pouvant atteindre 500l/s.

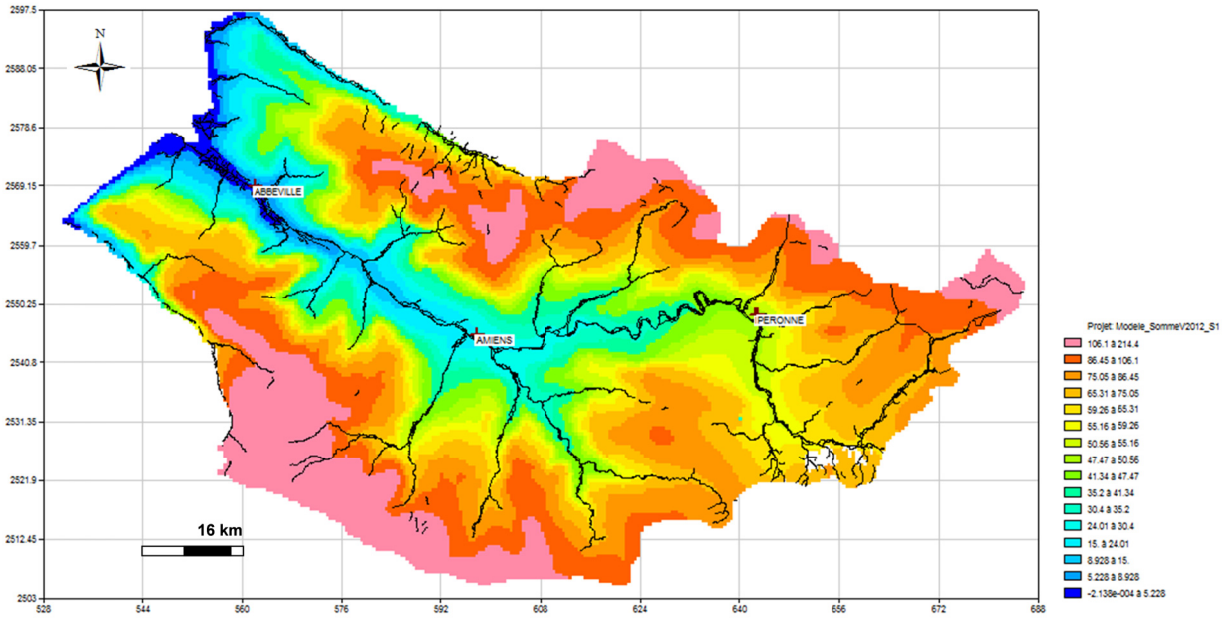


Illustration 41 : Carte piézométrique des hautes eaux d'avril 2001 obtenue pour le scénario1b.

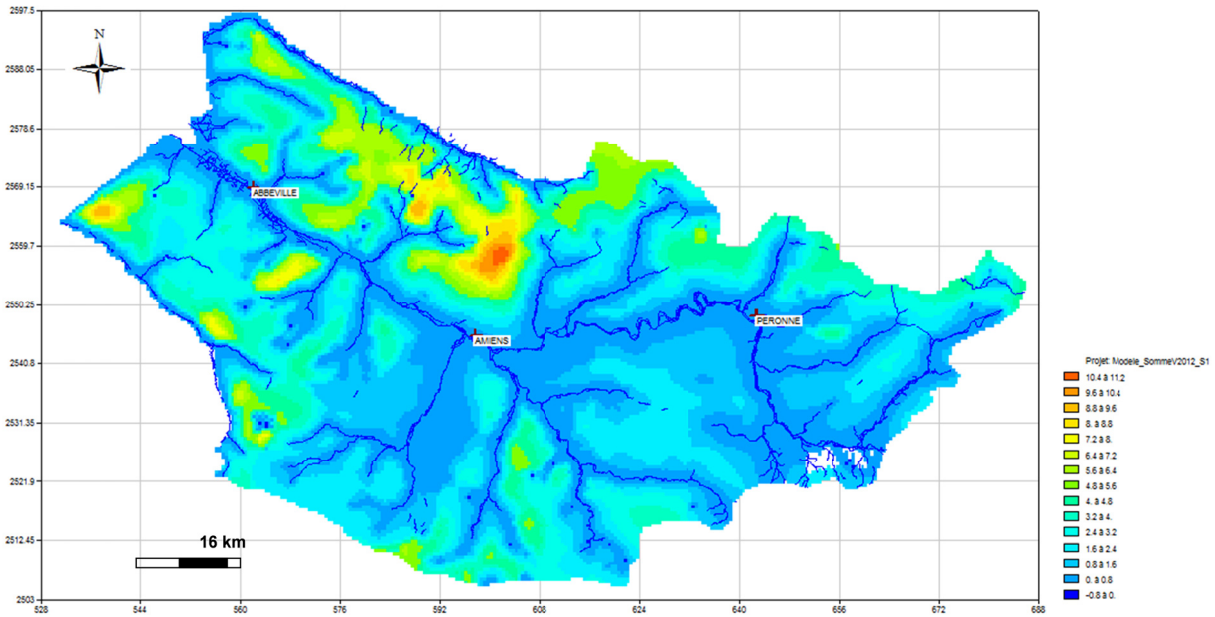


Illustration 42 : Carte des écarts de niveaux entre la piézométrie des hautes eaux d'avril 2001 obtenue avec le scénario1b et celle issue de la simulation de référence (carte des hautes eaux d'avril 2001).

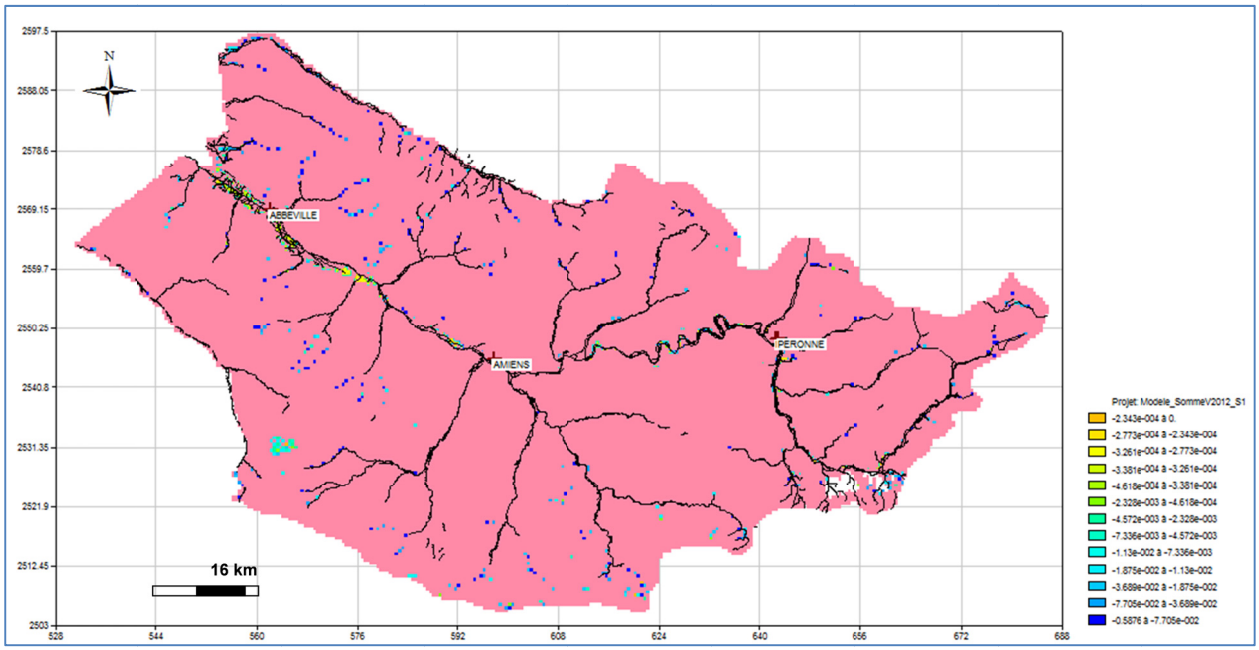


Illustration 43 : Carte des débits de débordement de la nappe (m^3/s) « d'Avril 2001 » : scénario 1b.

3.5. SIMULATION DU SCÉNARIO 2

3.5.1. Hypothèse du scénario 2.

Dans ce scénario, on considère un cumul de pluie sur 180 jours de période de retour millénale et consécutive aux pluies de l'année 2000-2001. La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours appliquée au modèle est la moyenne entre la valeur probable et la valeur de la borne haute avec une répartition similaire à celle de l'automne-hiver 2001-2002. L'état initial de la nappe est celui des basses eaux de 2001.

Pour ce scénario, le débit de base de la Somme enregistré en 2001 est supérieur à celui enregistré en 1994 et 2000.

Pour ce scénario les coefficients appliqués aux pluies mesurées dans les stations pluviométriques utilisées par le modèle varient entre 1.55 et 1.86.

3.5.2. Hydrogrammes de la Somme simulés en amont d'Amiens et d'Abbeville.

Les maxima de débits sont atteints vers la fin mars 2001 avec des valeurs de 69 m^3/s à la station de Lamotte Brebière, 120 m^3/s à la station d'Hangest et **148 m^3/s à Abbeville**. L'hydrogramme simulé à Abbeville est présenté par l'illustration 43 et ceux simulé à Lamotte Brebière et à Hangest sont reportés en annexe 1.

Ce scénario fournit un débit supérieur de 10 m^3/s au débit probable de période de retour 1000 ans estimé à **138 m^3/s à Abbeville**.

Si l'on compare ce débit à celui issu du scénario 1a (126 m^3/s), établi aussi sur la base d'une moyenne entre valeur probable de la pluie cumulée et valeur de la borne haute, on trouve un écart d'environ 21 m^3/s. Cet écart peut s'expliquer principalement par le débit de base de la Somme plus important pour le scénario 2 (30 m^3/s en Août 2000 contre 49 m^3/h en Août 2001. illustration 44). Par ailleurs, la distribution des pluies a joué un rôle, mais néanmoins négligeable devant le débit de base comme on le verra dans les paragraphes qui suivent.

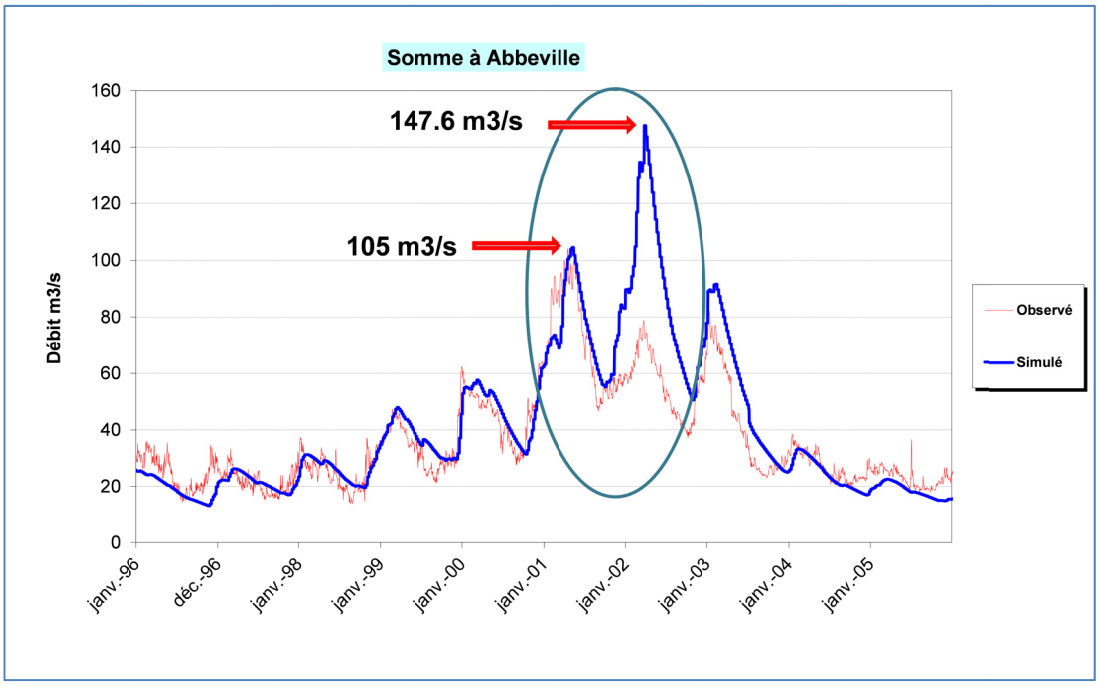


Illustration 44 - Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scénario2).

3.5.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques.

Les évolutions de la lame d'eau cumulée sur 180 jours et de la lame ruisselée pour ce scénario ont été comparées à celles du scénario 1a (illustration 45) afin d'apprécier l'impact de la distribution des pluies sur le débit maximum de crue.

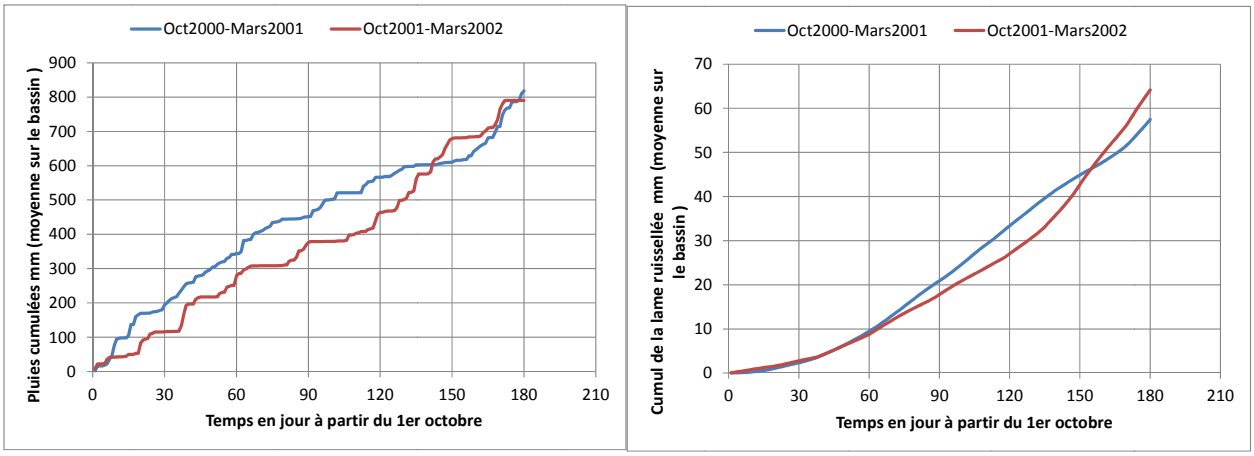


Illustration 45 - Cumul des pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scénario 2).

La distribution des pluies diffère légèrement entre ces deux scénarios avec cependant une période moins pluvieuse enregistrée avant la crue (février pour le scénario 1 et début mars pour le scénario 2), ce qui a joué favorablement par écrêtement de la crue (illustration 46). Pour le scénario 2, le ruissellement est plus important.

L'analyse des termes du bilan hydrologique (illustration 46) montre que l'apport de la nappe aux eaux superficielles reste largement plus important que le ruissellement. En

période de crue (fin mars 2002) la contribution des eaux souterraines et du ruissellement au débit de surface est respectivement de 69% et 31%.

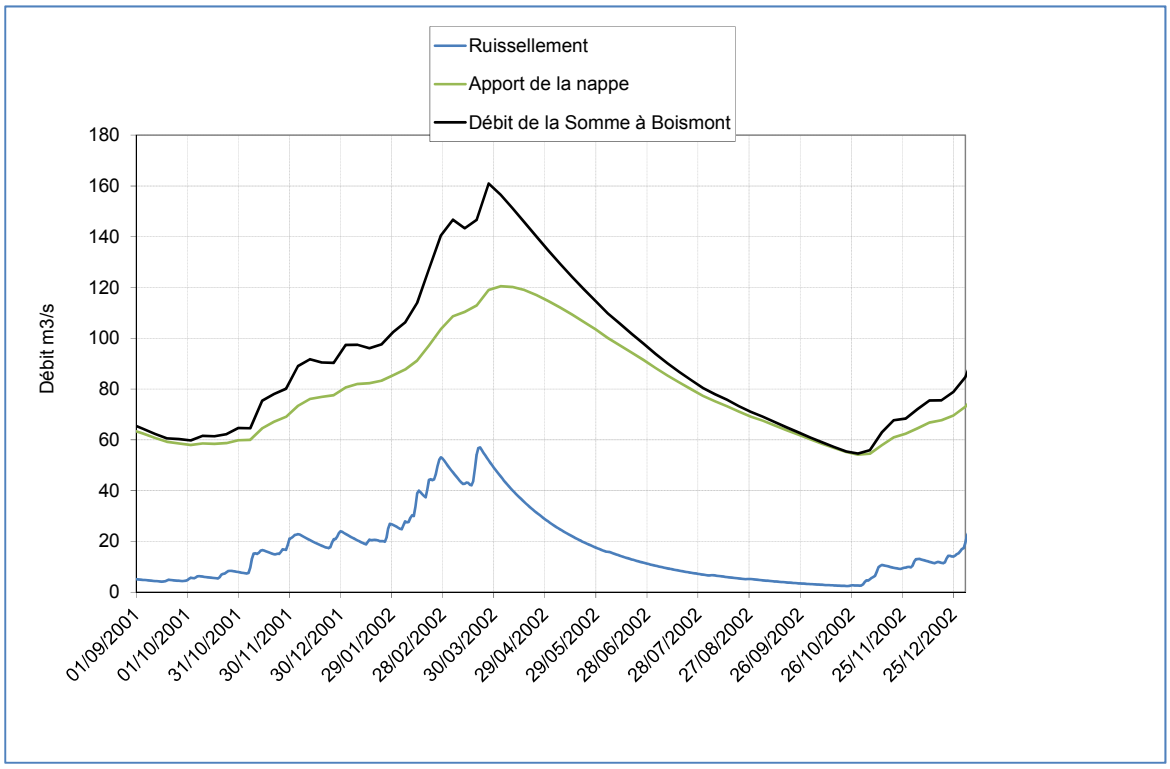


Illustration 46 : Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de la Somme pour le scénario2.

3.5.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe.

La carte des hautes eaux obtenue fin mars 2002 et la carte des débits de débordement à la nappe à la même date sont montrées par les illustrations 47 et 48. Là encore, les zones concernées par le débordement de la nappe sont principalement les vallées sèches et humides avec des débits de débordement qui sont similaires à ceux du scénario précédent.

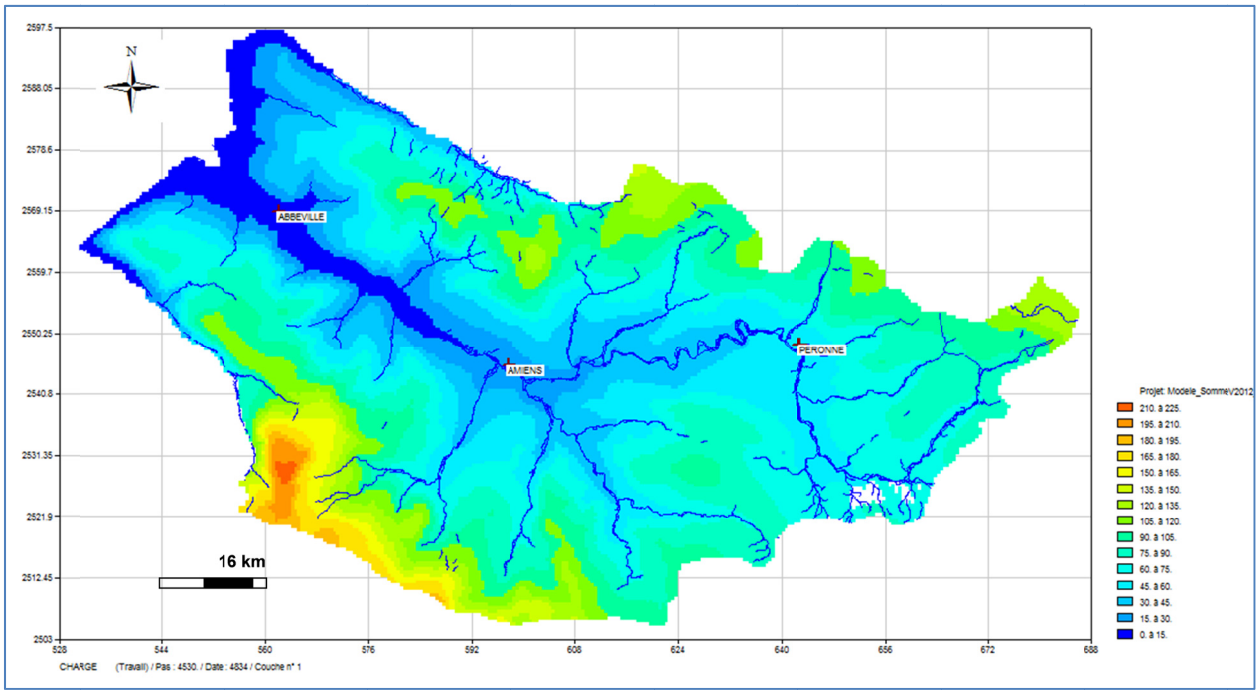


Illustration 47 - Carte piézométrique des hautes eaux de mars 2002 obtenue pour le scénario 2

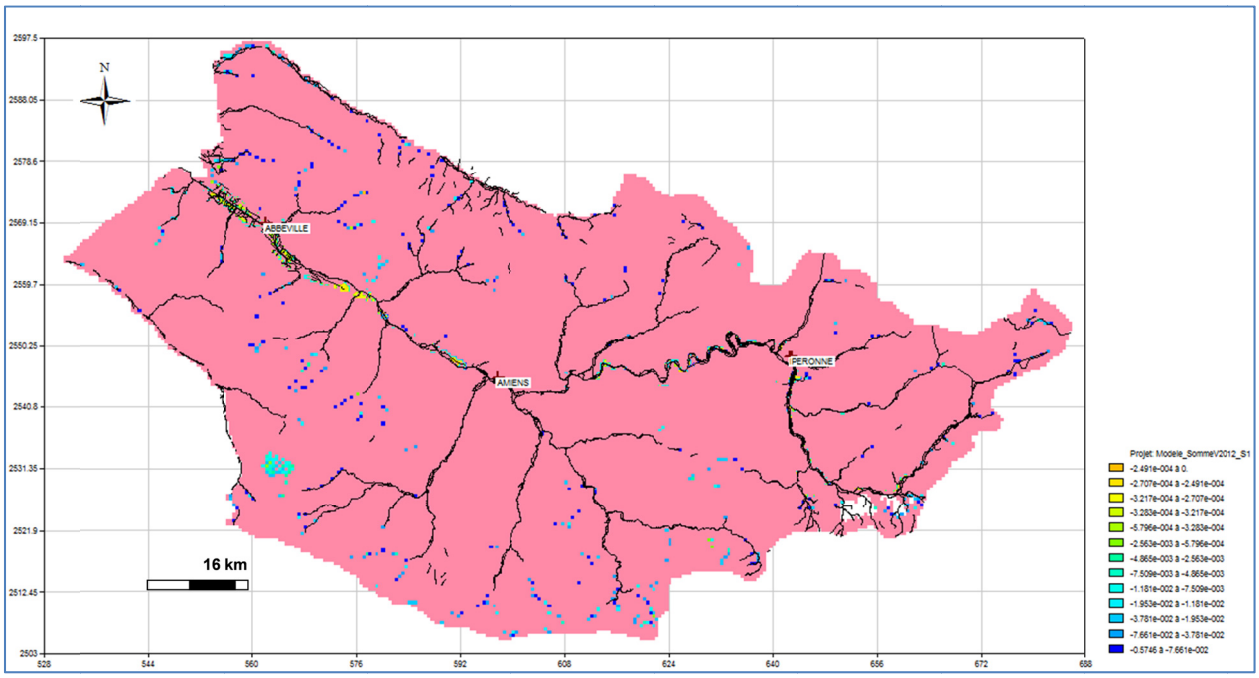


Illustration 48 - Carte des débits de débordement de la nappe (m^3/s) de mars 2002 : scénario 2

3.6. SIMULATION DU SCÉNARIO 3.

3.6.1. Hypothèse du scénario 3.

Ce scénario a été choisi pour d'étudier l'impact de la répartition des pluies cumulées sur le débit maximal. La valeur de la pluie cumulée sur 180 jours est celle de la borne haute de l'analyse probabiliste. La répartition des pluies est semblable à celle de l'automne-hiver 1994-1995. L'état initial de la nappe est celui des basses eaux de 1994.

Pour ce scénario, les coefficients appliqués aux pluies mesurées aux stations pluviométriques utilisées dans la modélisation varient entre 1.53 et 1.96.

3.6.2. Hydrogrammes simulés de la Somme en amont d'Amiens et d'Abbeville.

Pour ce scénario, le débit maximum de la Somme à Abbeville est atteint le « 15 mars 1995 » avec une valeur de **168 m^3/s** (illustration 49), soit une valeur supérieure d'environ 30 m^3/s à la valeur du débit probable de la crue estimée à 138 m^3/s. Cette valeur s'explique surtout par la distribution des pluies et met clairement en évidence l'importance de cette dernière sur la valeur du début de crue. L'utilisation de la valeur de la borne haute du cumul de pluies sur 180 jours a moins d'impact vu que le scénario 1b donne un débit maximum de 141 m3/s.

Les hydrogrammes simulés à Lamotte Brebière et à Hangest (annexe 1) montrent que le débit de crue obtenu au droit de ces deux stations est respectivement de 85 m^3/s et 134 m^3/s.

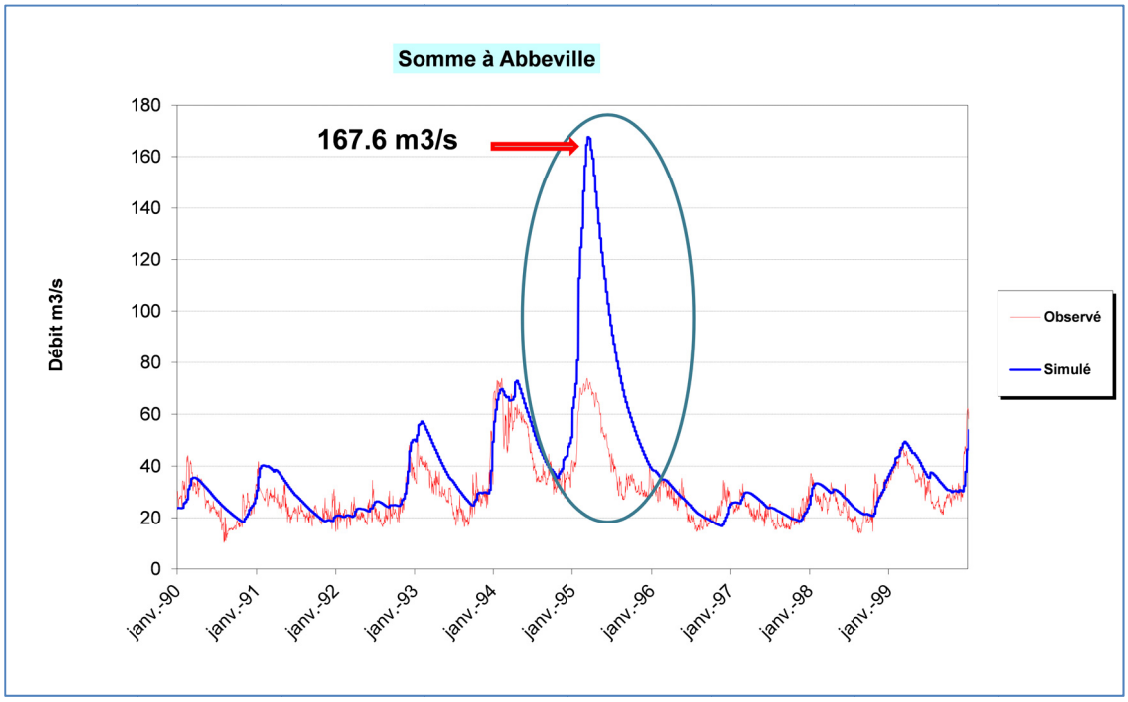


Illustration 49 : Hydrogramme simulé de la Somme à Abbeville (scenario3).

3.6.3. Analyse des bilans climatiques et hydrologiques

Afin de mettre en évidence l'importance de la distribution de la pluie sur le débit, nous avons superposé les résultats du bilan hydrologique de ce scénario avec ceux du scénario 1b (illustration 50) ; en effet ces deux scénarios utilisent le même cumul des

pluies sur 180 jours. Rappelons que pour le scénario1b le débit maximal de crue calculé est de 141 m^3/s.

L'analyse du cumul de la pluie montre qu'en 1995, environ 55% de ce cumul est tombé en 2 mois (février et mars) contre environ 33% pour la même période en 2001. Ceci a engendré un ruissellement plus important en 1995 avec un changement de pente assez brutal et une lame d'eau ruisselée sur deux mois beaucoup plus importante qu'en 2001. Par ailleurs en 1995, il n y a pas eu de période peu pluvieuse avant la crue contrairement à 2001.

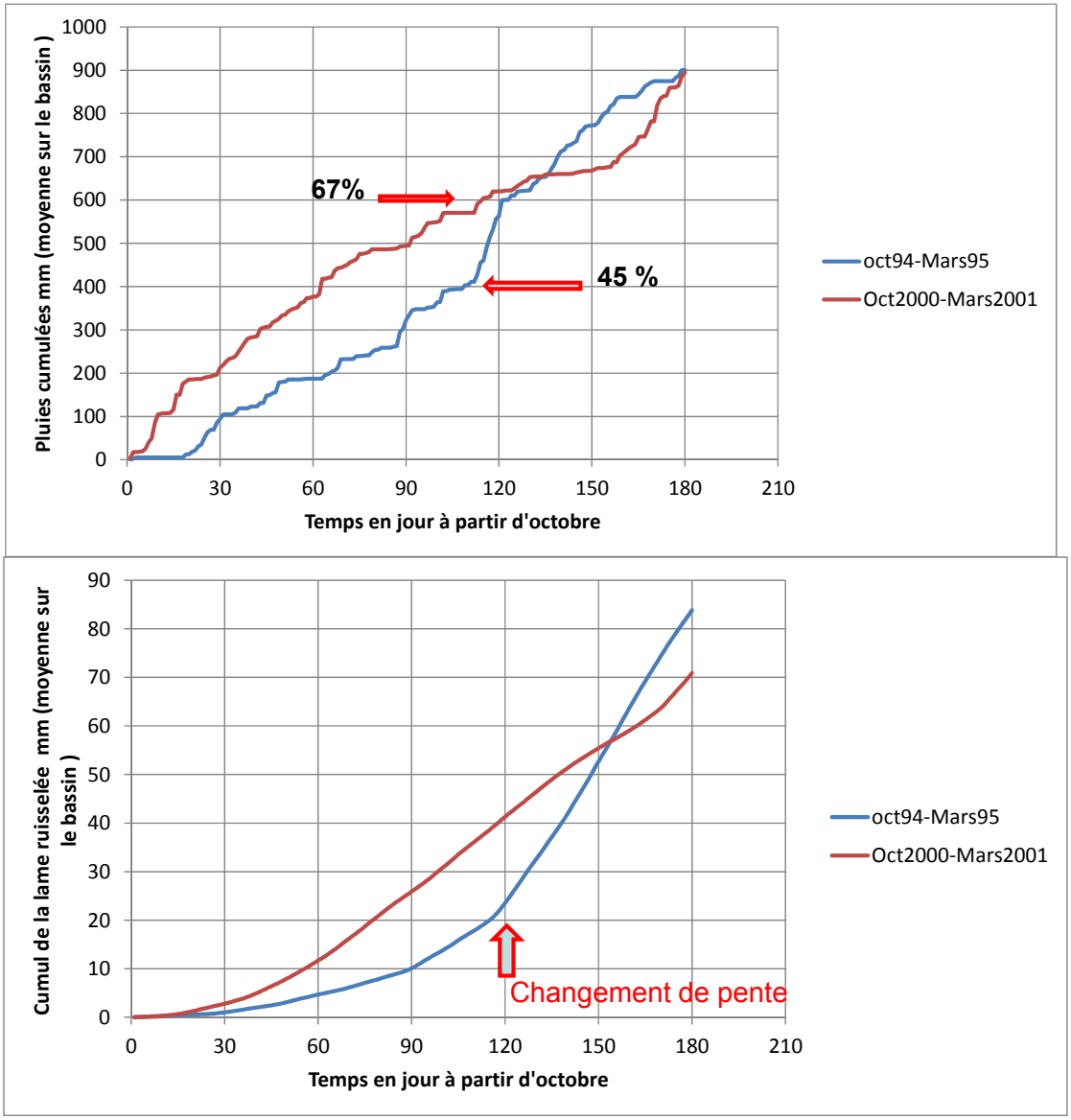


Illustration 50 - Cumul de pluies et de la la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scénario 3)

L'analyse de l'évolution au cours du temps et de l'apport de la nappe aux eaux superficielles par échange nappe rivière et débordement de la nappe (illustration 51) montre que la contribution du ruissellement à cette crue est plus importante que pour les autres scénarios avec une contribution du ruissellement au débit de crue d'environ 35%.

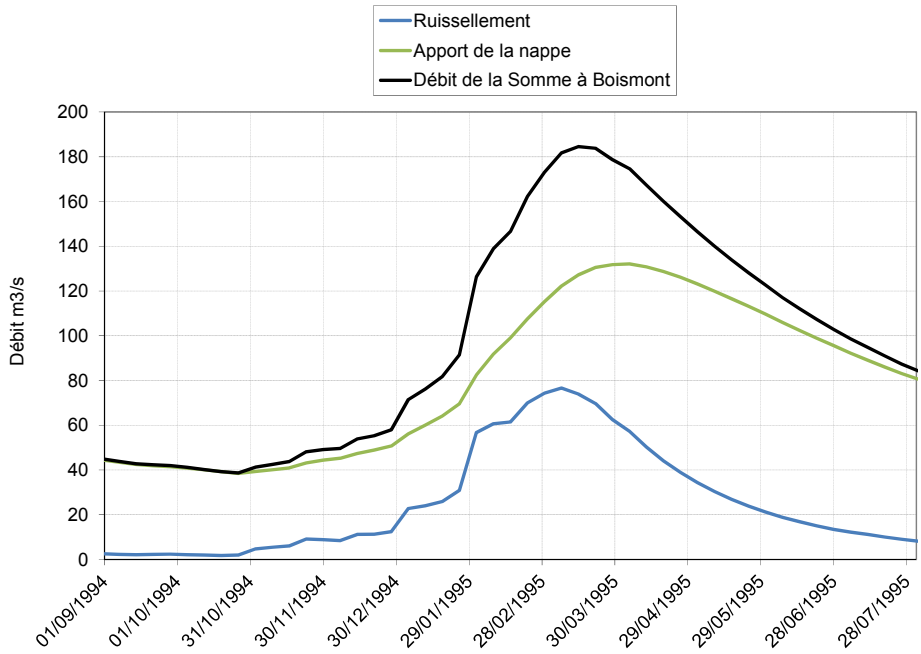


Illustration 51 - Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de a Somme : scénario 3

3.6.4. Cartographie du niveau de hautes eaux de la nappe et des zones débordement de la nappe.

L'illustration 52 présente la carte piézométrique pour les hautes eaux simulées au « 15 mars 1995 ». Si l'on compare cette carte à celle des niveaux mesurés lors de la crue de mars 1995, on constate que l'augmentation des niveaux (illustration 53) est de 10 à 15 m sur les plateaux des bassins situés en rive droite de la Somme et un peu moins sur les plateaux des bassins situés en rive gauche. Par ailleurs, sur les vallées sèches, les niveaux augmentent d'environ 1 à 2 m.

La carte des débits de débordement de la nappe est présentée par l'illustration 54. La nappe déborde principalement dans les vallées sèches et les vallées humides avec des débits pouvant atteindre par endroit 620 l/s.

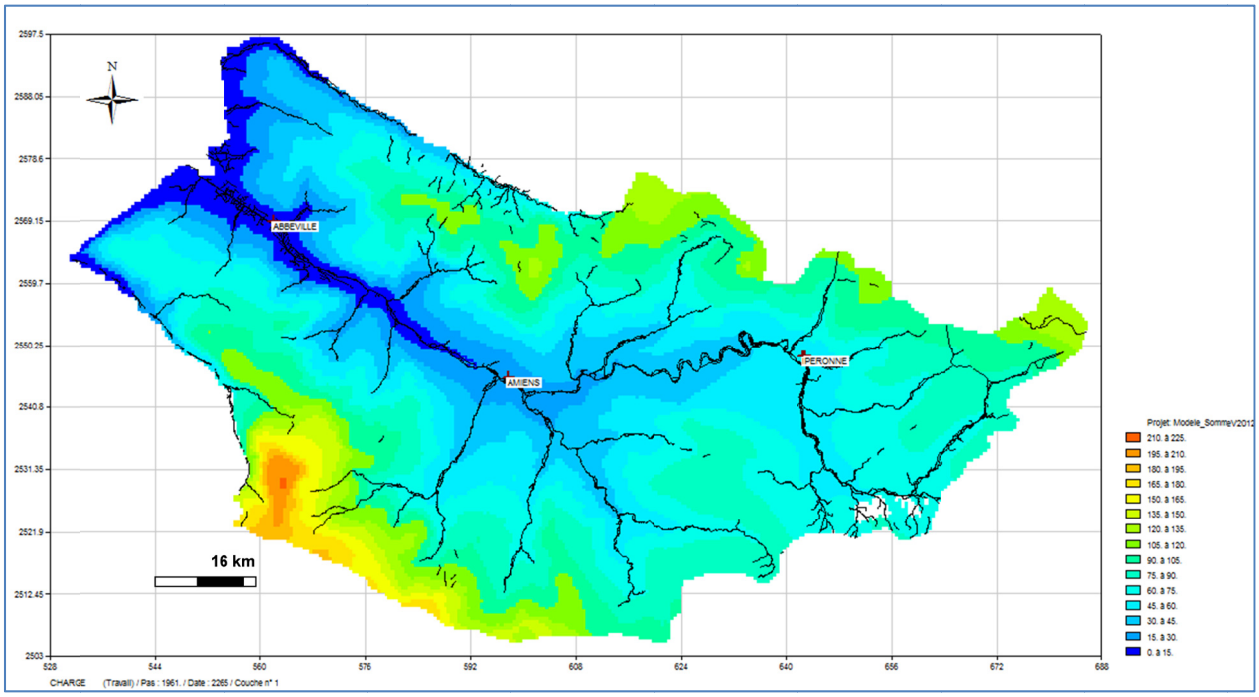


Illustration 52 - Carte piézométrique des hautes eaux de mars 1995 obtenue avec le scénario 3.

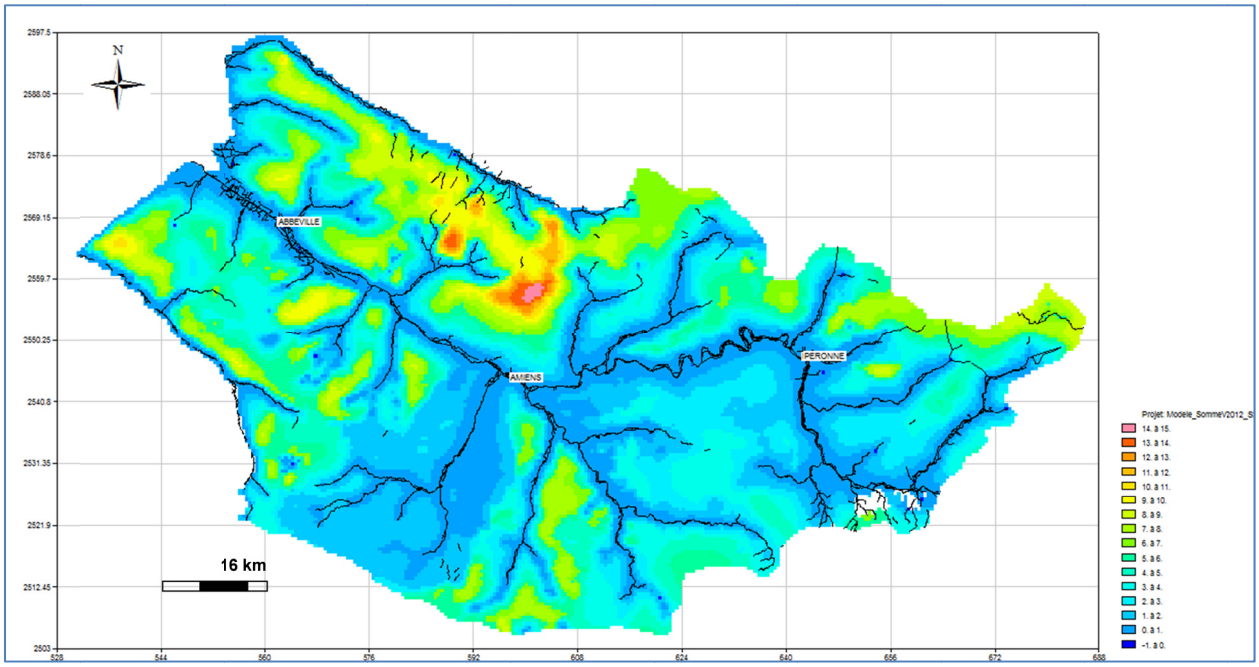


Illustration 53 - Carte des écarts de niveaux entre la piézométrie des hautes eaux de mars 1995 obtenue avec le scénario 3 et celle issue de la simulation de référence (carte des hautes eaux de mars 1995.)

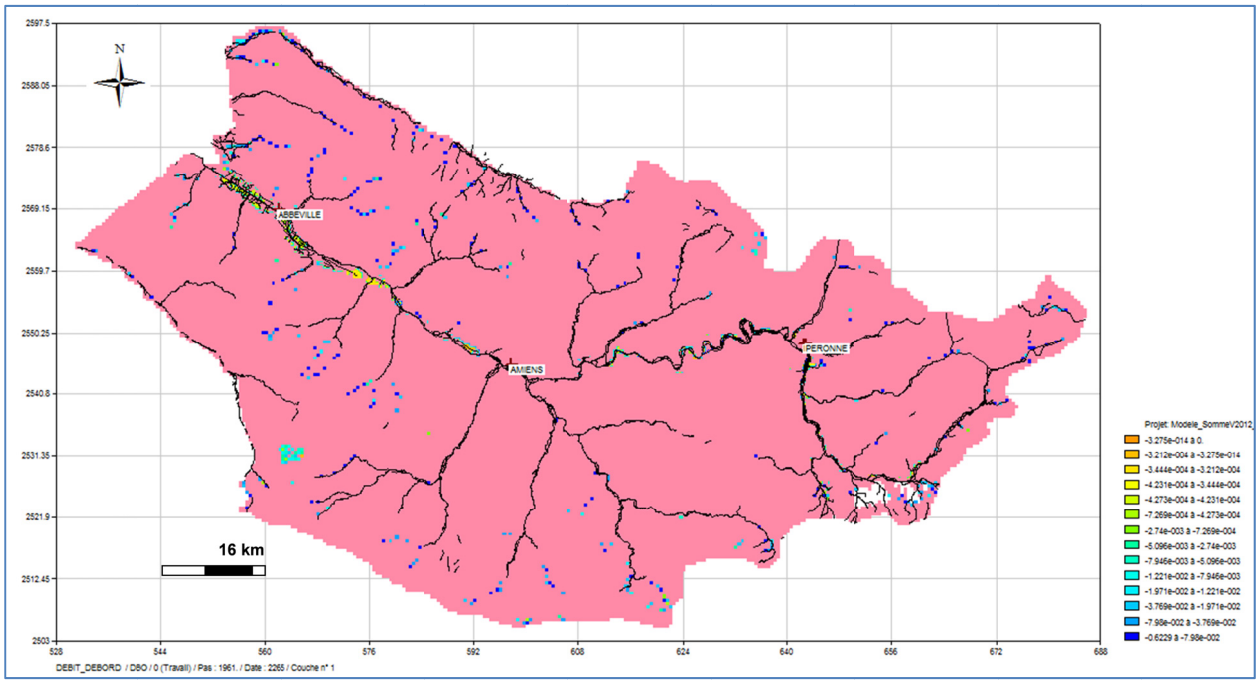


Illustration 54 - Carte des débits de débordement de la nappe (m^3/s) mars 1995 : scénario 3.

4. Conclusion

Dans cette étude, l'analyse probabiliste préliminaire opérée sur de longues séries de pluies a permis de définir des événements pluvieux de période de retour 1000 ans. L'analyse corrélatoire pluies-débits de la Somme à Abbeville effectuée avec des pluies cumulées sur n jours (90, 120, 150, 180 jours) a montré que la meilleure corrélation est obtenue avec un cumul de pluies sur 180 jours. Par ailleurs l'estimation du débit de période de retour 1000 ans a été faite par ajustement d'une loi de probabilité adaptée aux événements extrêmes (loi GEV) et a fourni une valeur probable du débit de 138 m^3/s à la station d'Abbeville.

Grâce à cette analyse probabiliste, trois scénarios avec des pluies cumulées sur 180 jours de période de retour 1000 ans ont été identifiés et simulés avec le modèle hydrodynamique des hautes eaux du bassin de la Somme. Ils diffèrent par :

- la répartition temporelle des pluies journalières sur la période de 180 jours,
- l'état initial de la nappe au moment du déclenchement de l'épisode pluvieux millénal,
- la valeur du débit de base de la Somme au moment du déclenchement de l'épisode pluvieux millénal.

Les hydrogrammes simulés de la Somme à Abbeville montrent que le scénario 1 et le scénario 2 permettent de reproduire la crue de période de retour millénale avec des débits de crues (respectivement 142 m^3/s et 148 m^3/s) légèrement supérieurs à la valeur probable estimée à 138 m^3/s. Ces deux premiers scénarios ont mis en évidence l'impact de la situation de la nappe et du débit de base de la Somme au moment du déclenchement de l'épisode pluvieux millénal ; en effet, plus le débit de base de la rivière est grand, plus la valeur du débit maximal de crue est importante. Le scénario 3 quant à lui permet de générer une crue supérieure d'environ 30 m^3/s à la valeur probable millénale ; il met en évidence l'importance de la distribution temporelle des pluies sur la valeur maximale du débit de crue, avec une composante de ruissellement plus importante.

L'analyse des bilans hydrologiques des différents scénarios simulés montre que selon la distribution des pluies, la contribution du ruissellement au débit de la rivière peut être plus ou moins importante. La contribution de la nappe reste dominante avec des valeurs qui varient entre 65% et 72% selon les scénarios étudiés.

5. Bibliographie

Amraoui N., Wuilleumier A., Thiéry D., Caous J.Y., Noyer M.L. avec la collaboration de Feret M.J. (2004) – Mise à jour du modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport final des travaux de la phase 2. Rapport BRGM/RP-53211-FR.

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

Mardhel, V., Négrel, Ph., Pointet, T. 2001. Première analyse des composantes des écoulements souterrains du bassin versant de la Somme en période des Crues. BRGM/RP-51030-FR. 85 pages.

Pinault, J.L., Amraoui, N., Golaz, C. 2005. Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resources Research*. 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169

Roux, J.C. 1978. Notice de l'Atlas Hydrogéologique de la Somme, Synthèse générale des données sur les nappes. Document BRGM, 98p..

Roux, J.C. 1965. Hydrogéologie du bassin de la Somme, Bull. BRGM, (1er série) 3 : 1-44.

Thiéry, D. (1990) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiéry D. (2006) – Didacticiel du préprocesseur WinMarthe v4.0. Rapport BRGM/RP-54652-FR

Annexe 1

Résultats complémentaires des scénarios simulés par le modèle hydrodynamique des hautes eaux de la Somme

Scénario 1a

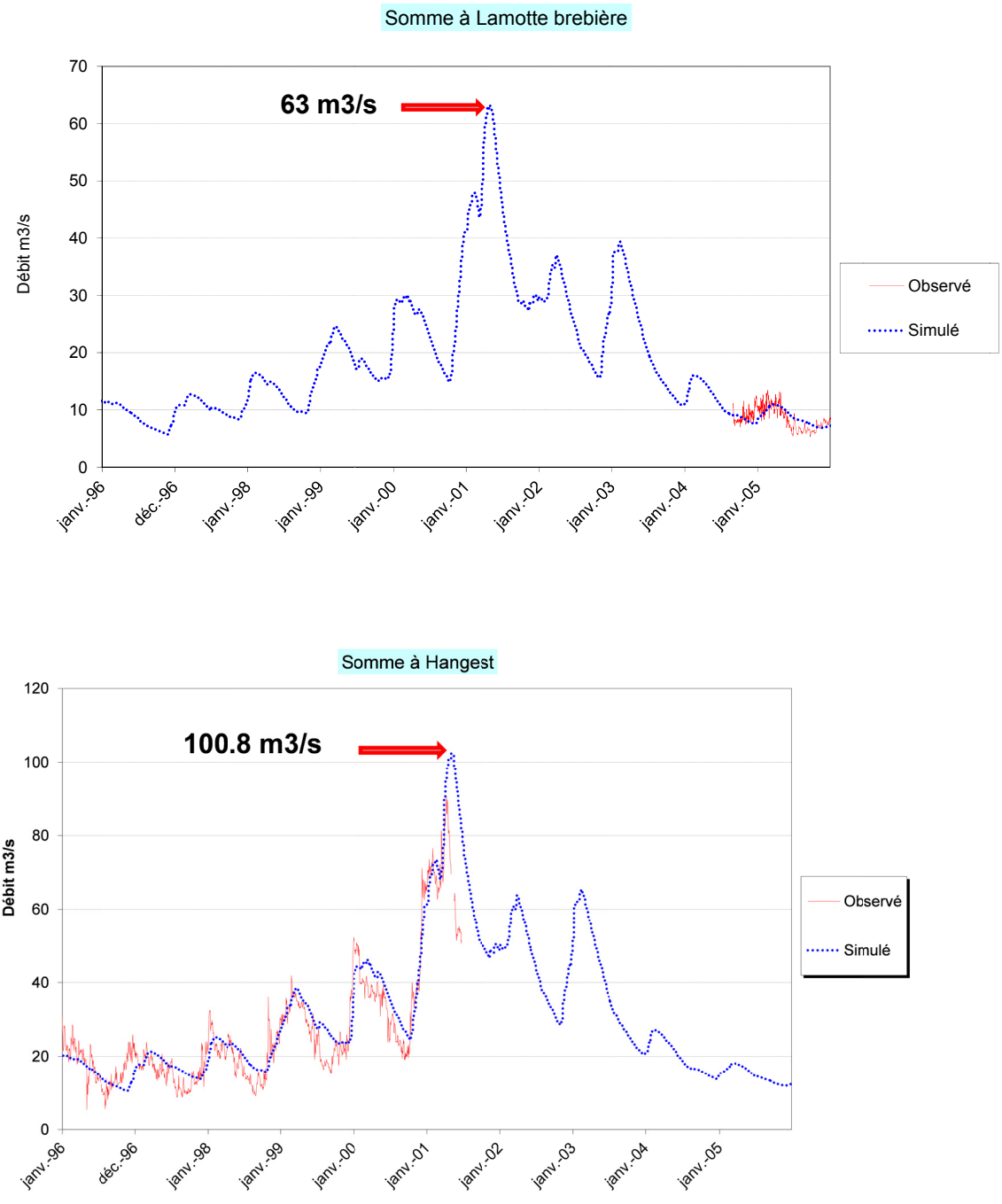


Illustration 1 : Hydrogrammes de la Somme au droit des stations de Lamotte Brebière et d'Hangest (scénario 1a).

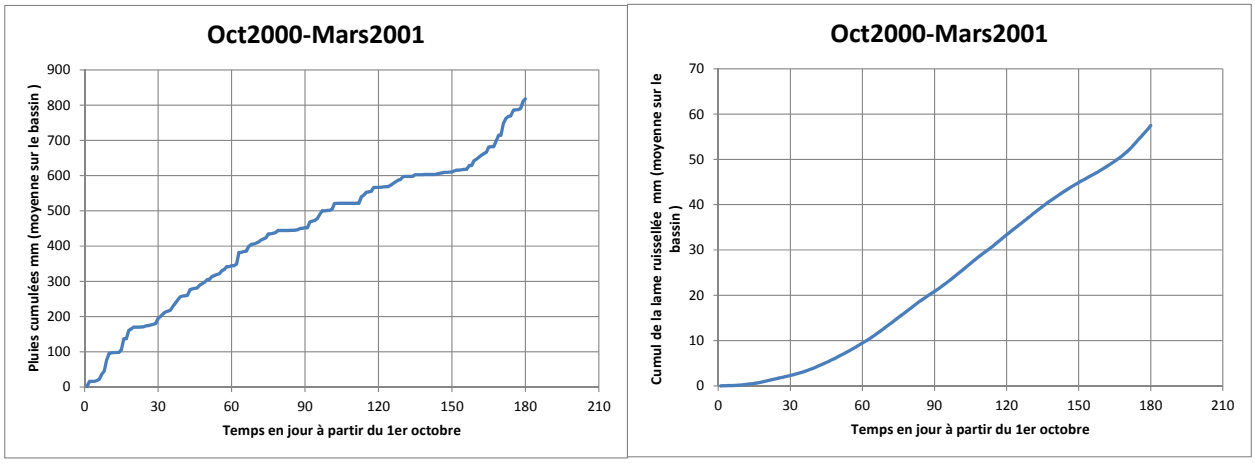


Illustration 2 : Cumul des pluies et de la lame d'eau ruisselée (en mm) moyennée sur le bassin de la Somme (scenario 1a).

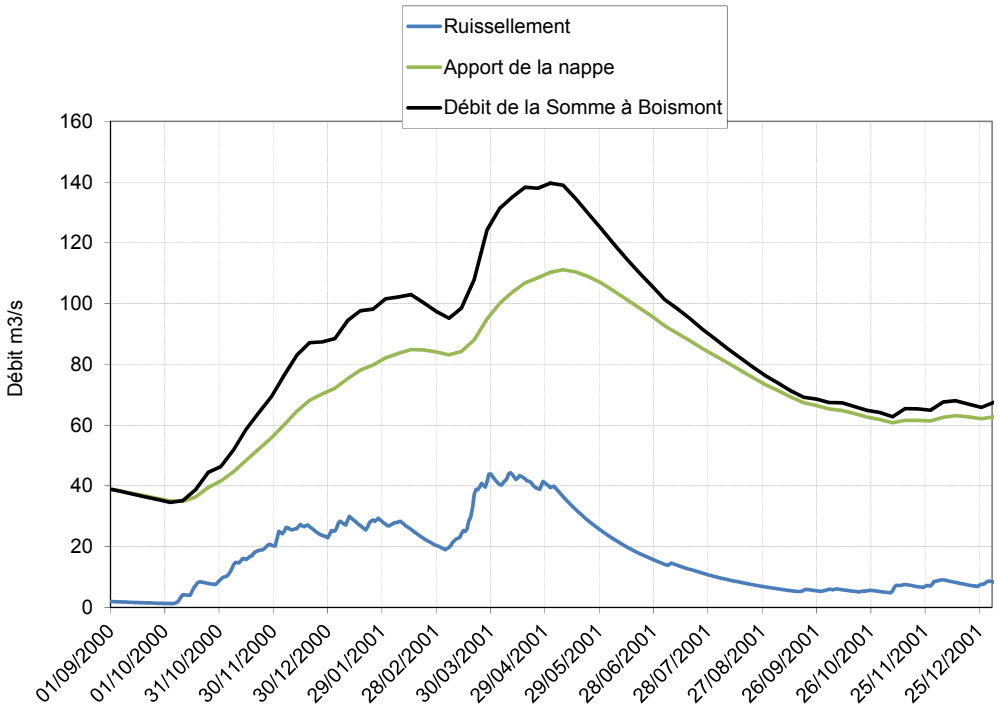


Illustration 3 : Evolution du ruissellement et de l'apport de la nappe aux eaux de surface à l'échelle du bassin versant de la Somme pour le scénario1a.

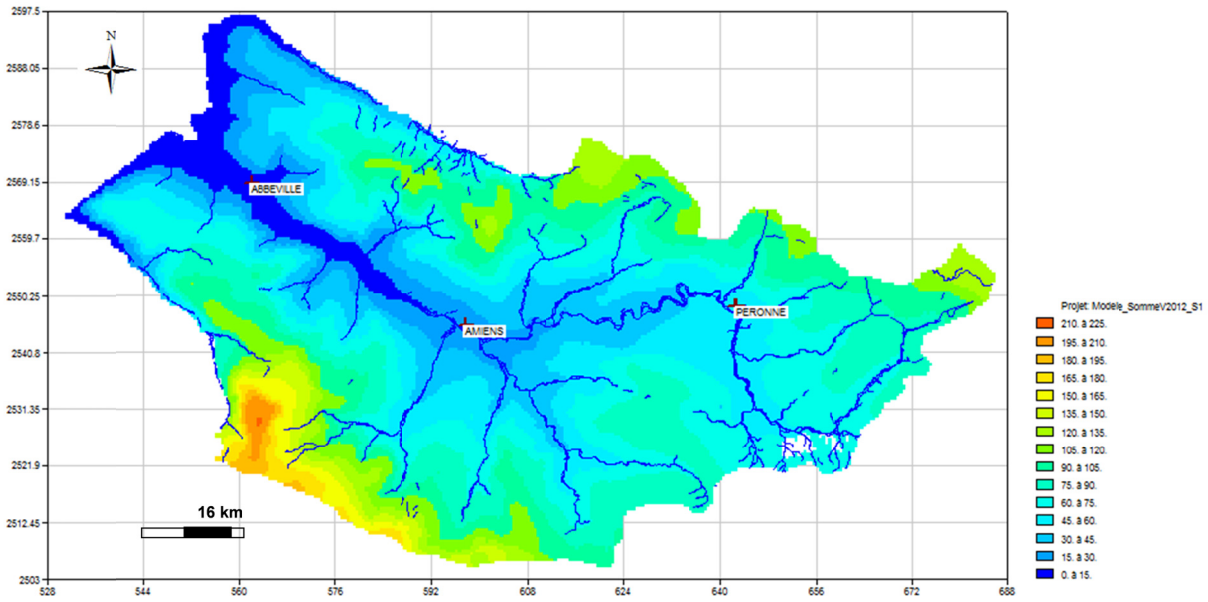


Illustration 4 : Carte piézométrique des hautes eaux d'avril 2001 obtenue pour le scénario1a.

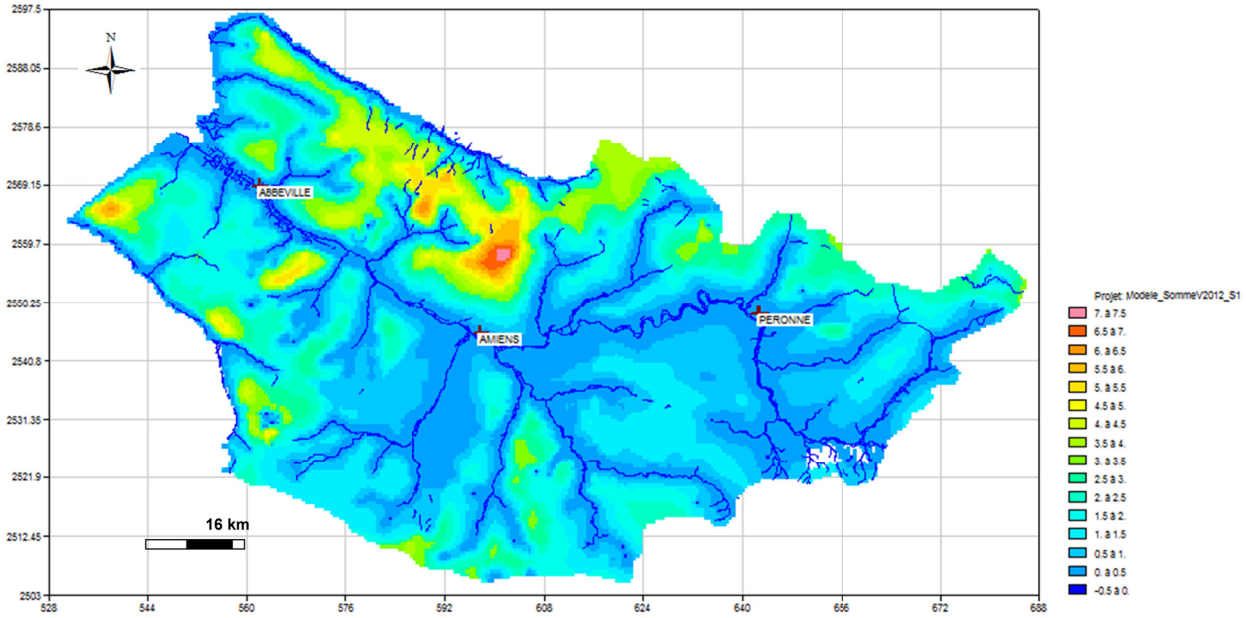


Illustration 5 : Carte des écarts de charge entre la piézométrie des hautes eaux d'avril 2001 obtenue avec le scénario1a et celle issue de la simulation de référence (carte des hautes eaux d'avril 2001).

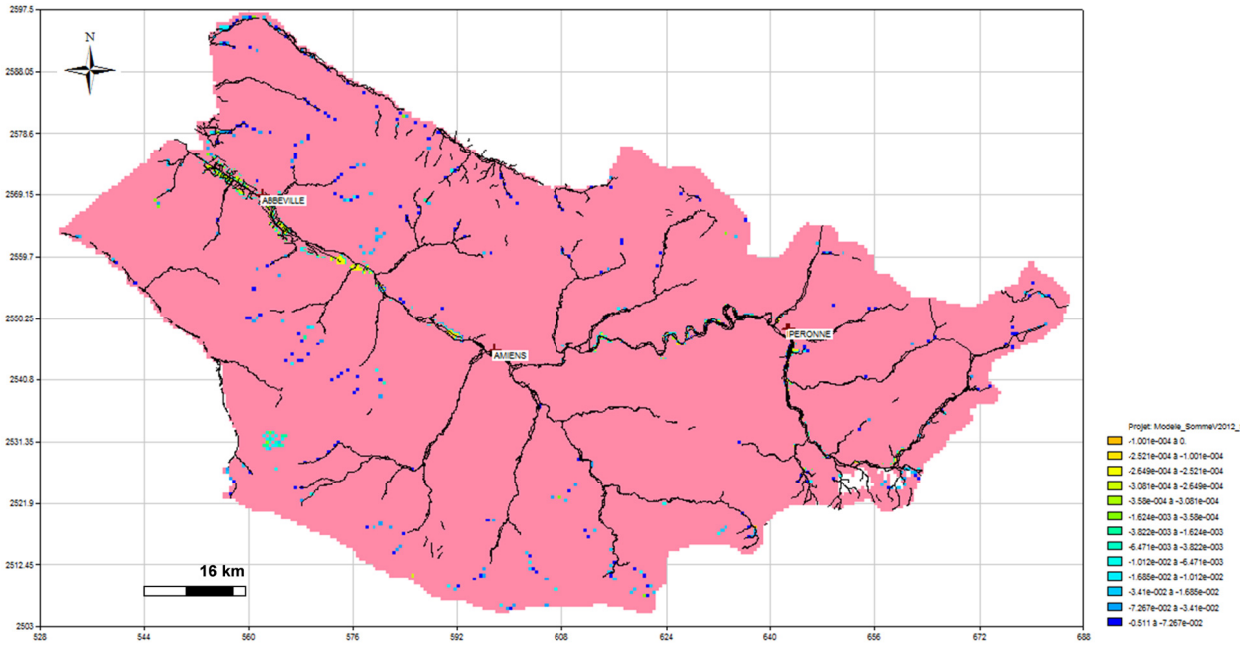


Illustration6 : Carte des débits de débordement de la nappe (m^3/s) d'Avril 2001 : scénario 1a.

Scénario 1b

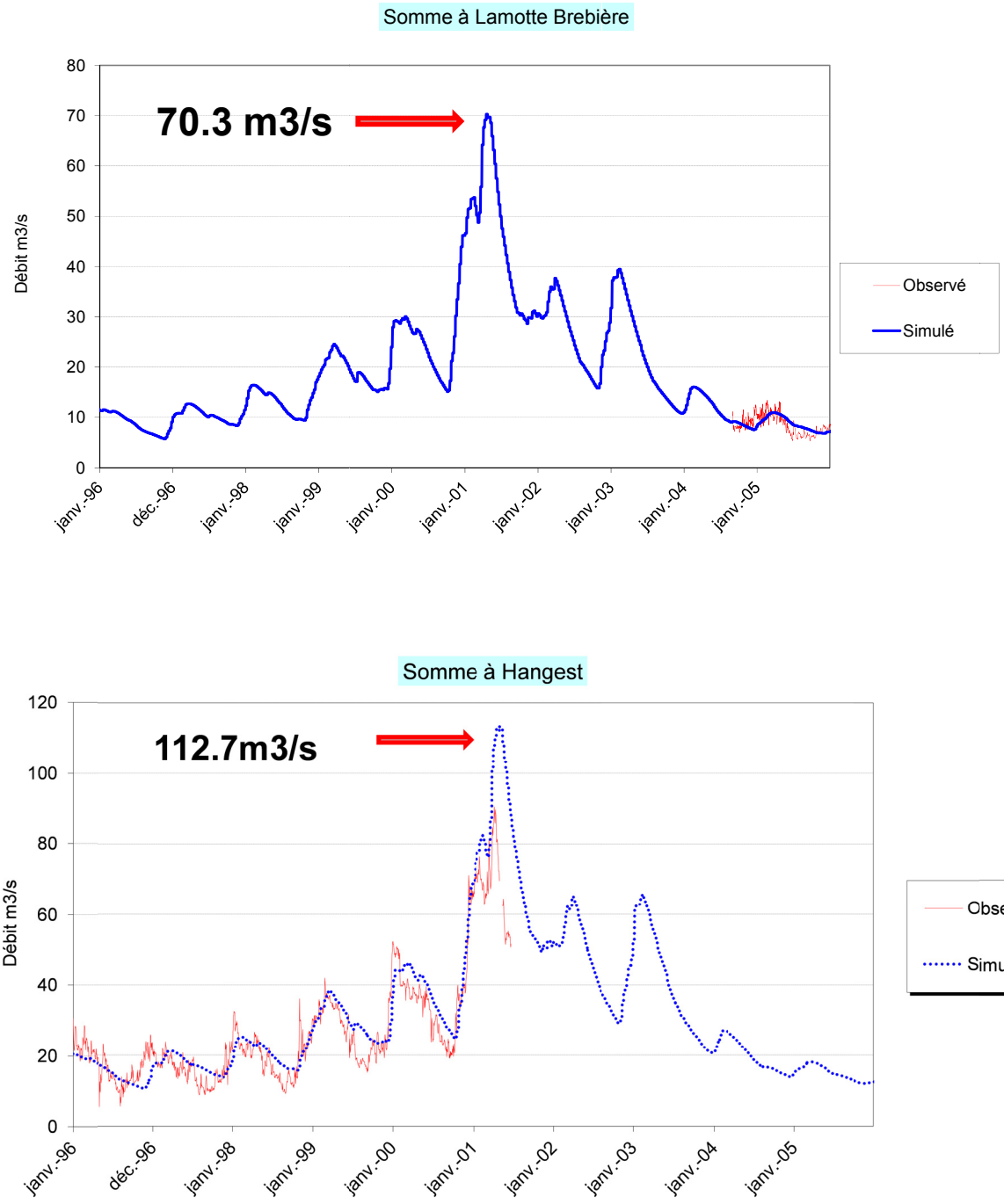


Illustration 7 : Hydrogrammes de la Somme au droit des stations de Lamotte Brebière et d'Hangest (scénario 1b).

Scénario 2

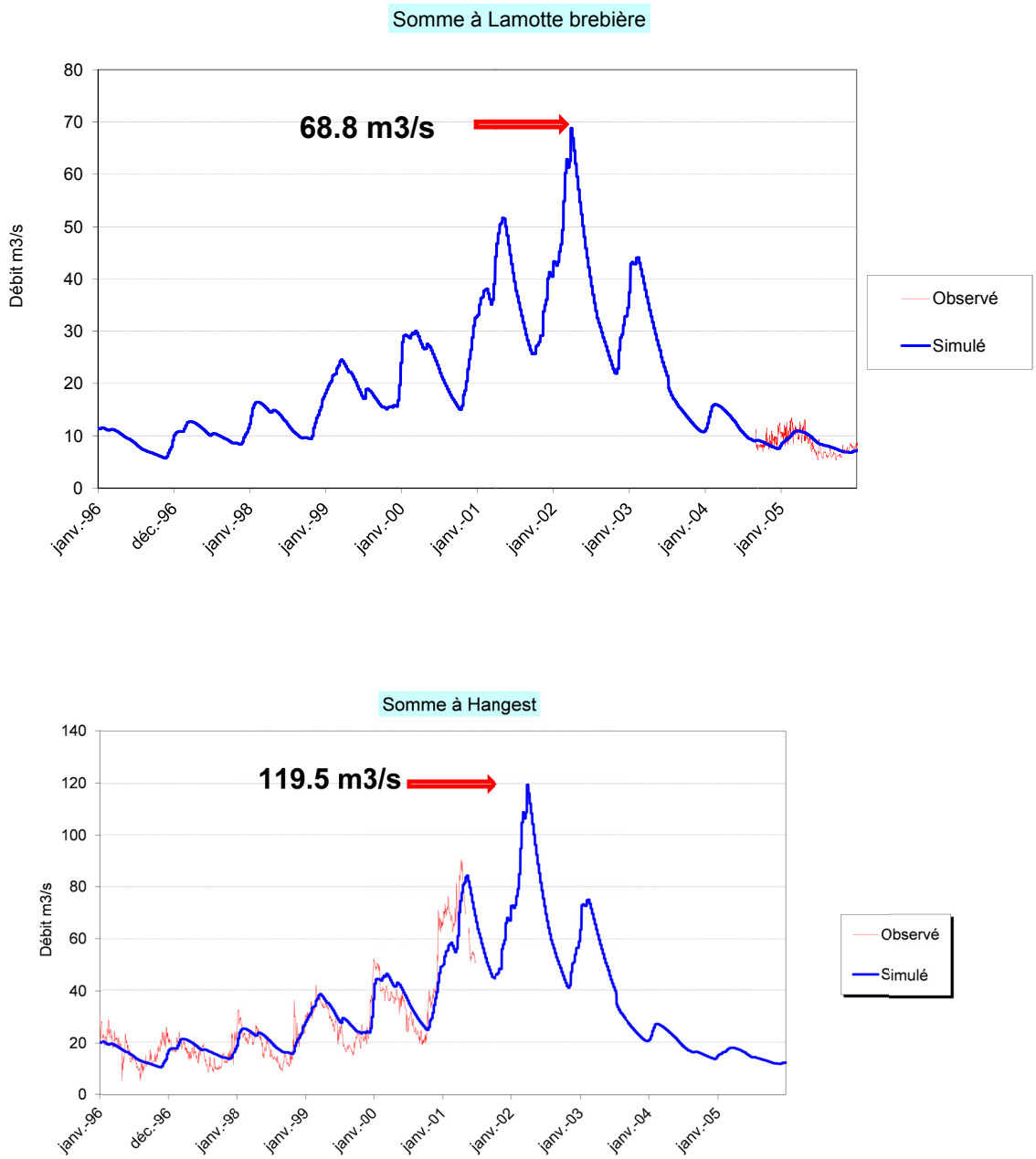


Illustration 8 : Hydrogrammes de la Somme au droit des stations de Lamotte Brebière et d'Hangest (scénario 2).

Scénario 3

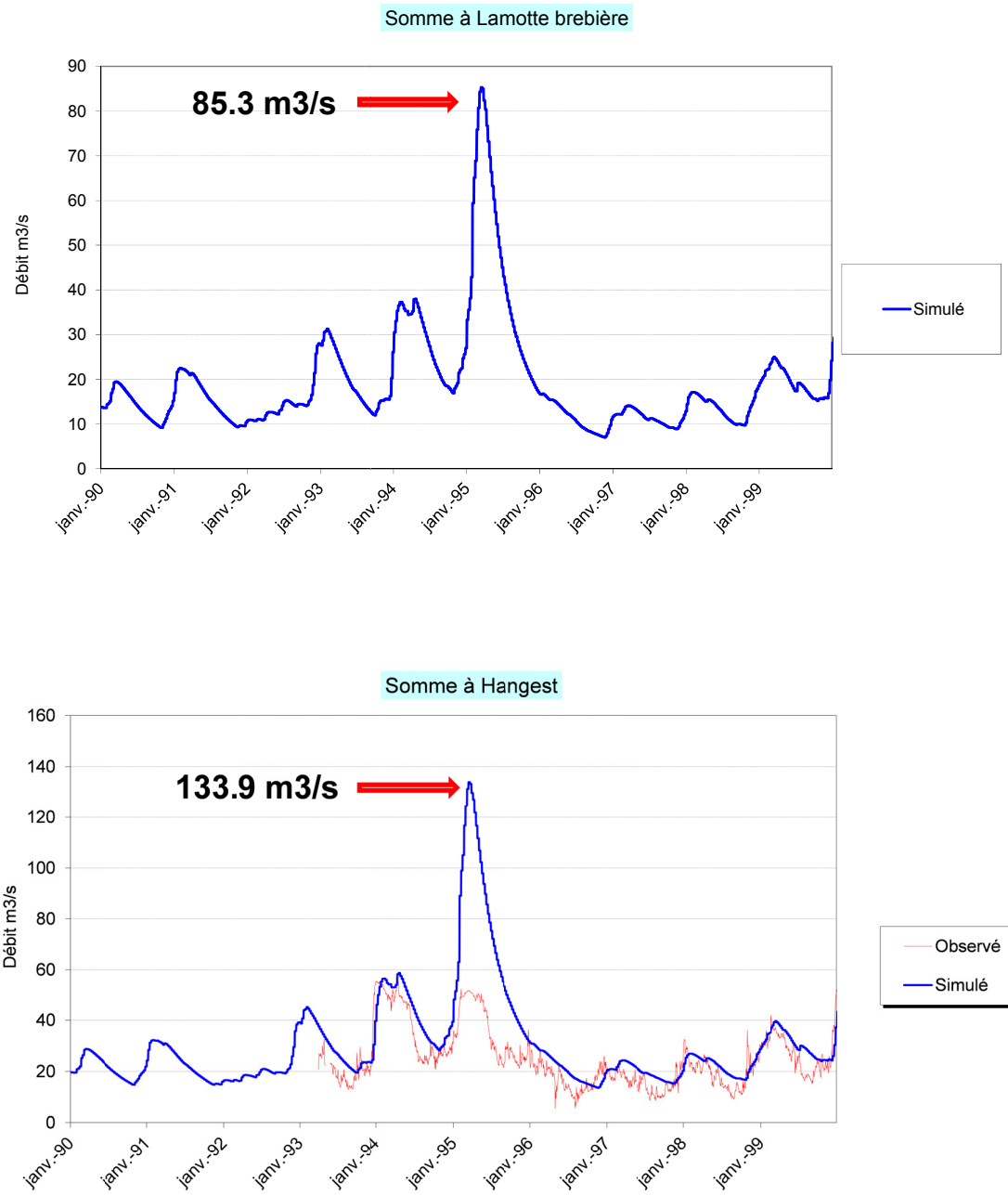
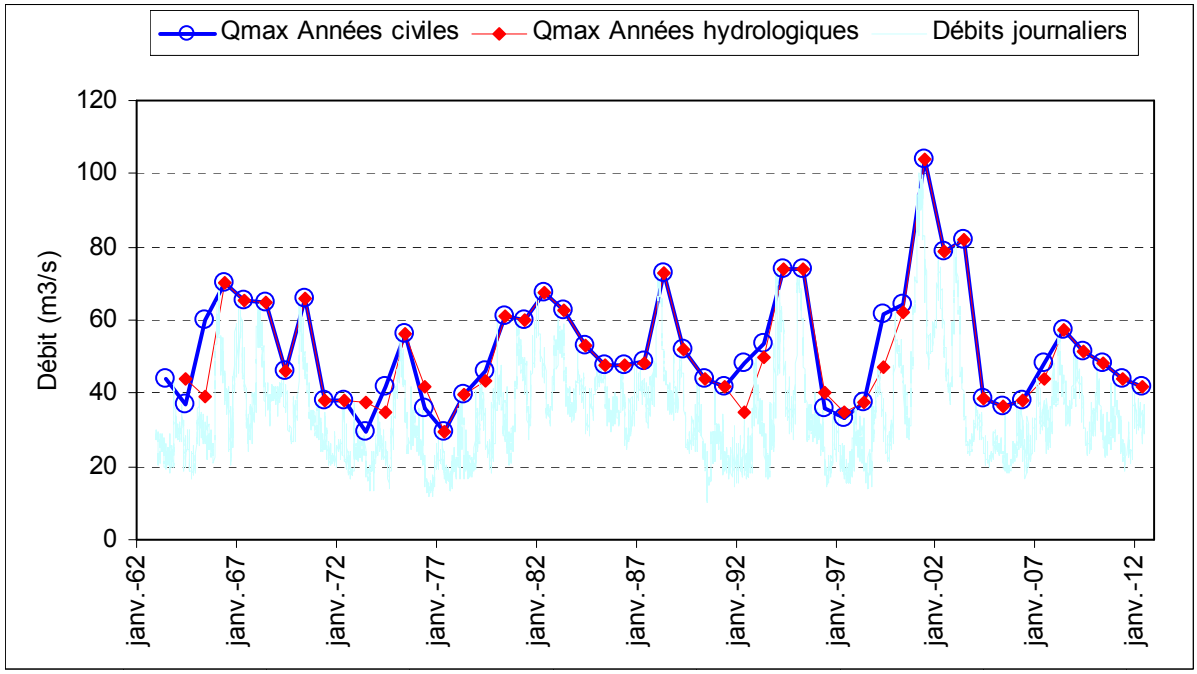


Illustration 9 : Hydrogrammes de la Somme au droit des stations de Lamotte Brebière et d'Hangest (scénario 3).

Annexe 2

Ajustement d'une loi GEV sur les maxima annuels des débits de la Somme

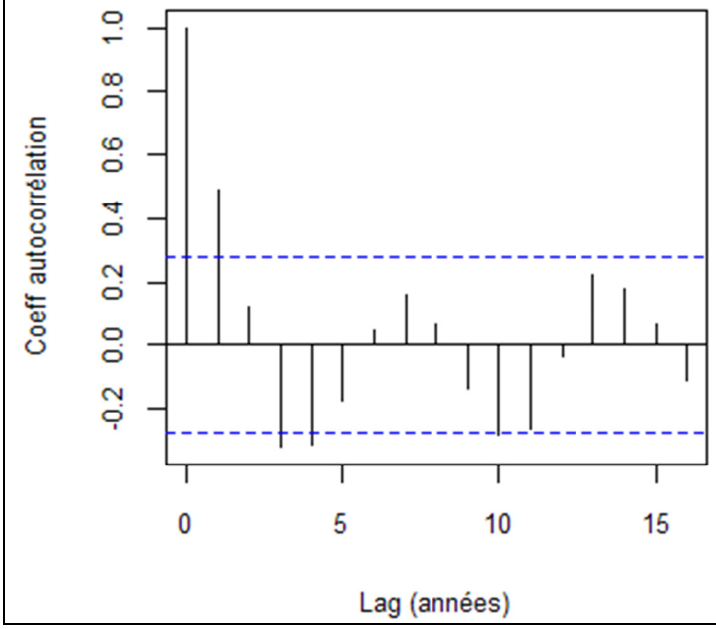
1. Débits maxima annuels



L' analyse a été faite sur les débits maxima des "années civiles".

2. Analyse de la chronique avant ajustement d'une loi GEV

Corrélogramme



Décalage (année)	Coefficient. autocorrélation
0	1.000
1	0.488
2	0.121
3	-0.312
4	-0.314
5	-0.175
6	0.046
7	0.157
8	0.068
9	-0.138

Il existe une légère autocorrélation entre valeurs annuelles successives.

● Test de Mann-Kendall : test de stationnarité

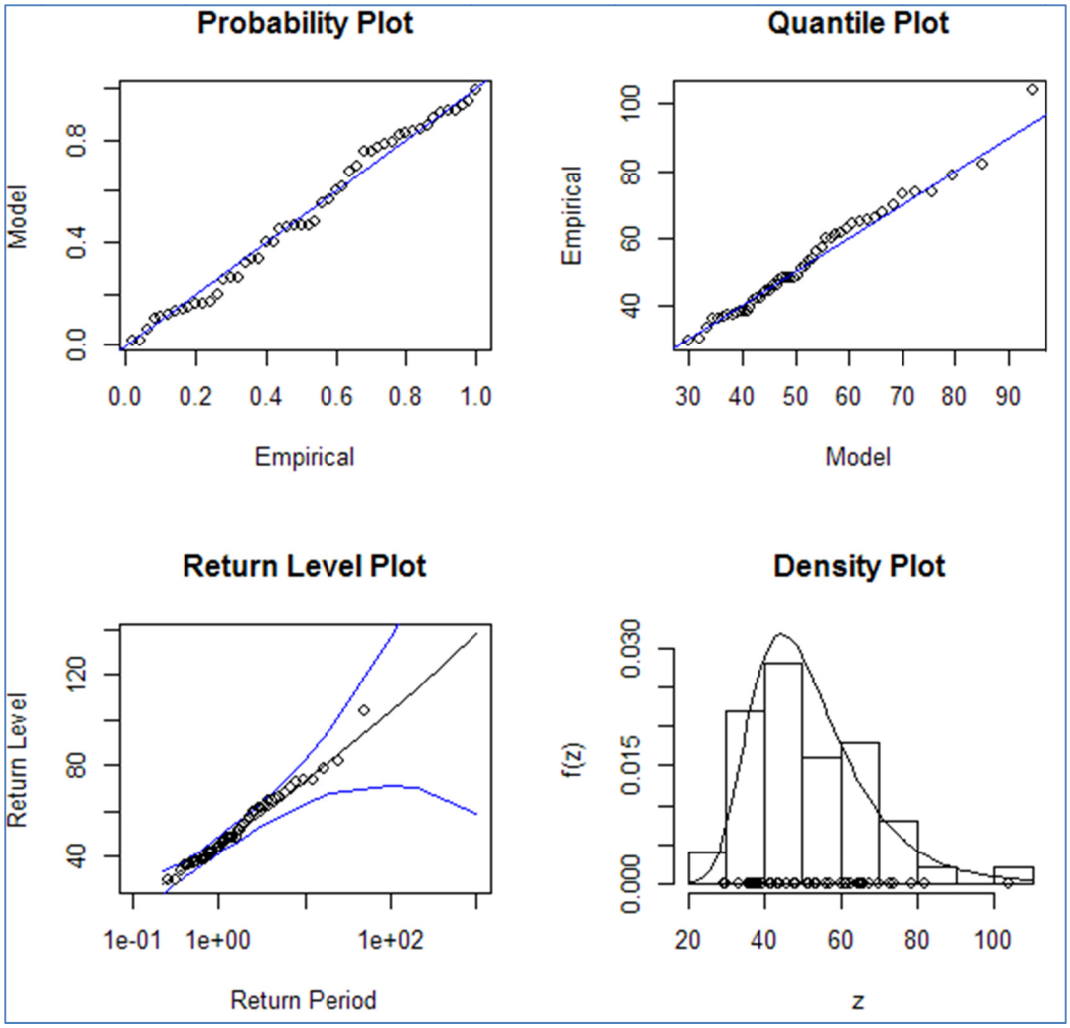
La p-value étant de 0.68, l'hypothèse de stationnarité (pas de tendance dans la série) est très probable. Elle est donc acceptée.

3. Ajustement à une loi GEV

● Estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

	Position	Echelle	Forme
Valeur des paramètres	45.122	11.567	0.04225
Erreur standard	1.901	1.437	0.1290

● Diagnostic graphique de la qualité de l'ajustement



Tests d'adéquation

L'hypothèse testée ("hypothèse nulle") est qu'il y a adéquation.

● Test de Kolmogorov-Smirnov

La p-value est de 0.798, supérieure au seuil de risque de 5% ; l'hypothèse d'adéquation est acceptée.

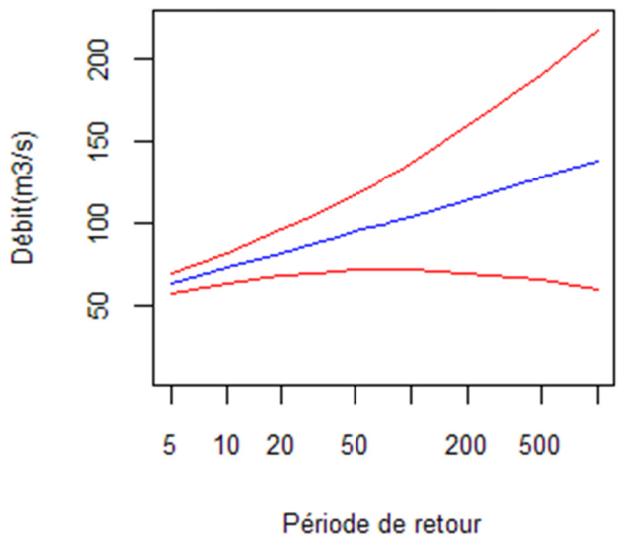
● Test du Khi2

p-value = 0.0518

La p-value restant supérieure (légèrement) au seuil de risque 5%, l'hypothèse d'adéquation est acceptée.

Périodes de retour

Période de retour	Valeur probable (m^3/s)	Borne inf.	Borne sup.
10	72	63	82
20	82	68	96
30	87	70	105
40	91	71	112
50	94	71	117
100	**104**	72	136
200	114	70	158
500	127	65	189
1000	**138**	59	217

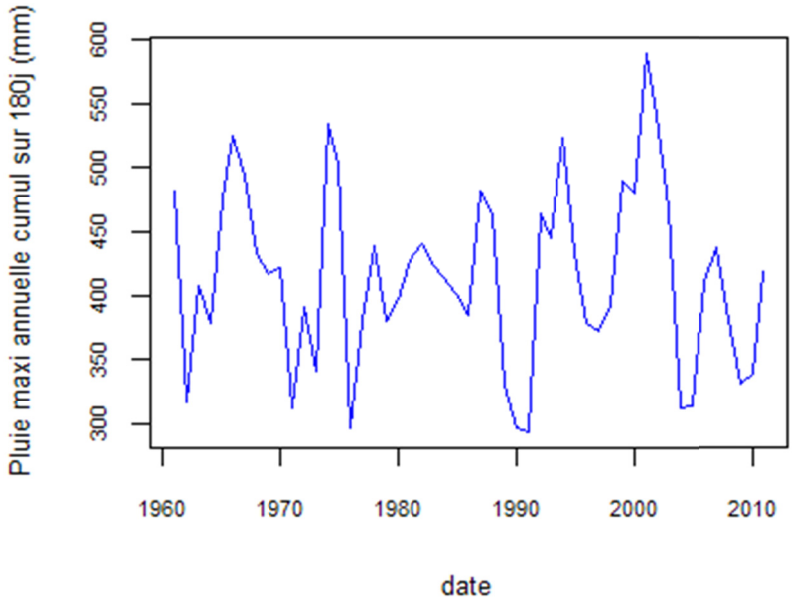


Annexe 3

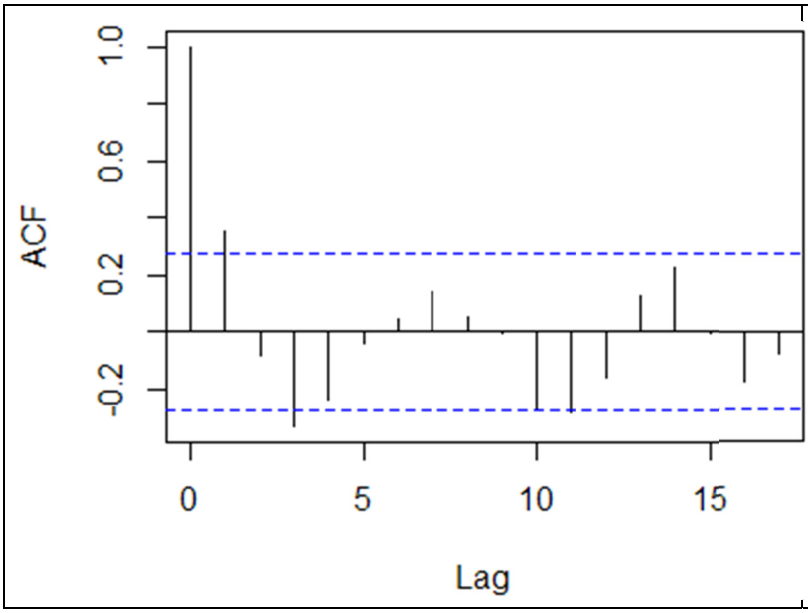
Ajustement de lois GEV sur les maxima annuels des pluies cumulées

1. Pluies cumulées sur 180 jours à Glisy-Amiens

La série de valeurs construite est présentée par l'illustration suivante



Corrélogramme



Décalage (année)	Autocorrélation
1	1.000
2	0.350
3	-0.086
4	-0.330
5	-0.239
6	-0.040
7	0.042
8	0.138
9	0.051
10	-0.007

Il existe une très légère autocorrélation que le test de Wald-Wolfowitz confirme en fournissant une p-value de 0.0036, inférieure au niveau de confiance de 1%.

Test de Mann-Kendall (stationnarité)

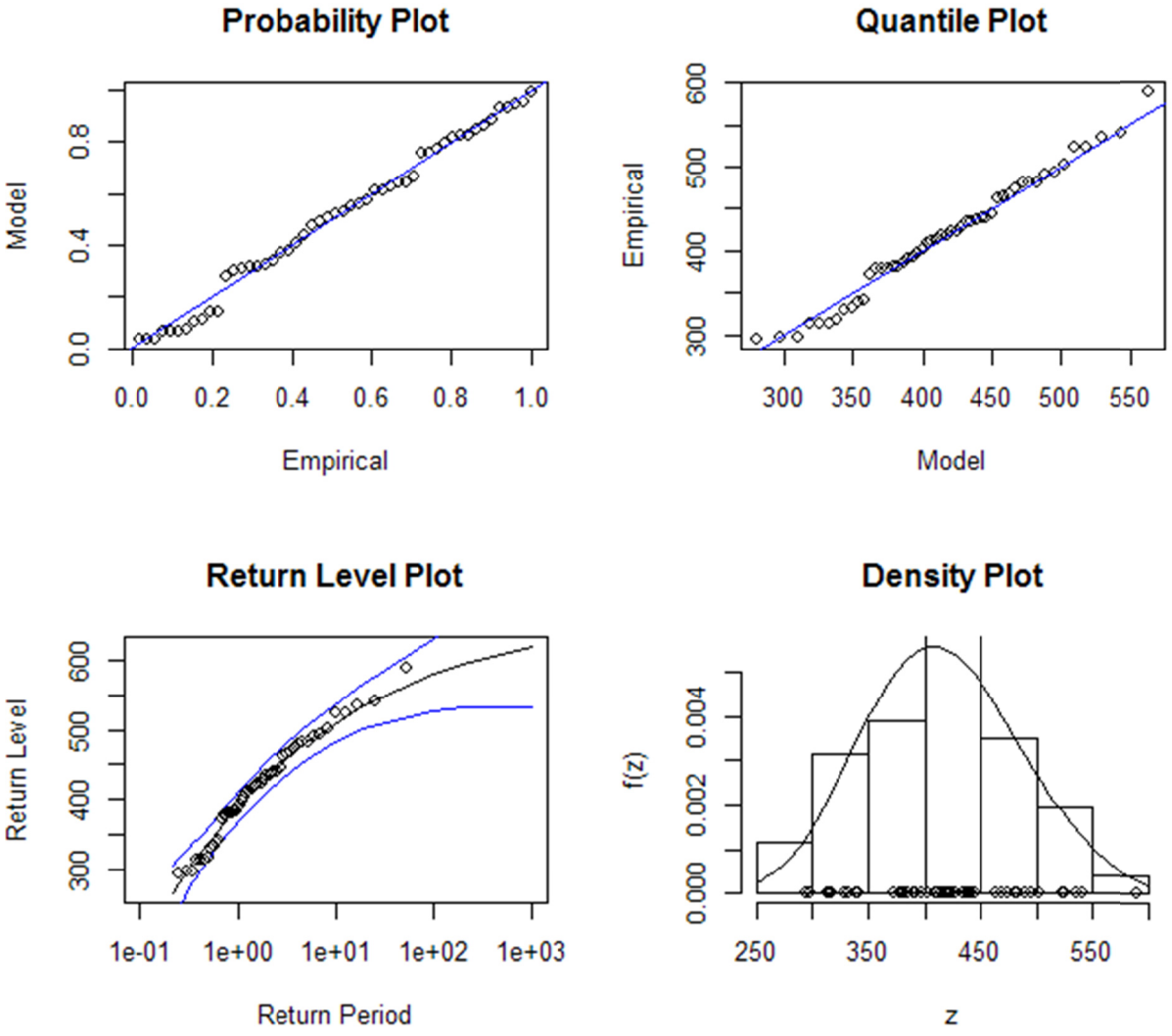
Le test fournit une p-value de 0.661, nettement supérieure au niveau de confiance de 5% ; l'hypothèse de stationnarité est donc acceptée.

Ajustement d'une loi GEV

- Estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

	Position	Echelle	Forme
Valeur des paramètres	389.746	67.759	-0.2370
Erreur standard	10.571	7.556	0.09668

- Diagnostic graphique de la qualité de l'ajustement



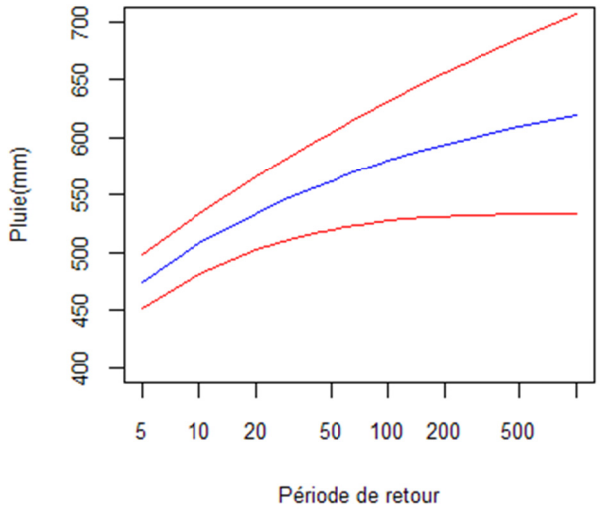
- Tests d'adéquation

Chi2 : la p-value est de 0.282, supérieure à 5% ; l'hypothèse d'adéquation est donc acceptée.

Kolmogorov-Smirnov : la p-value est de 0.927, encore plus forte, confirmant la conclusion du test précédent.

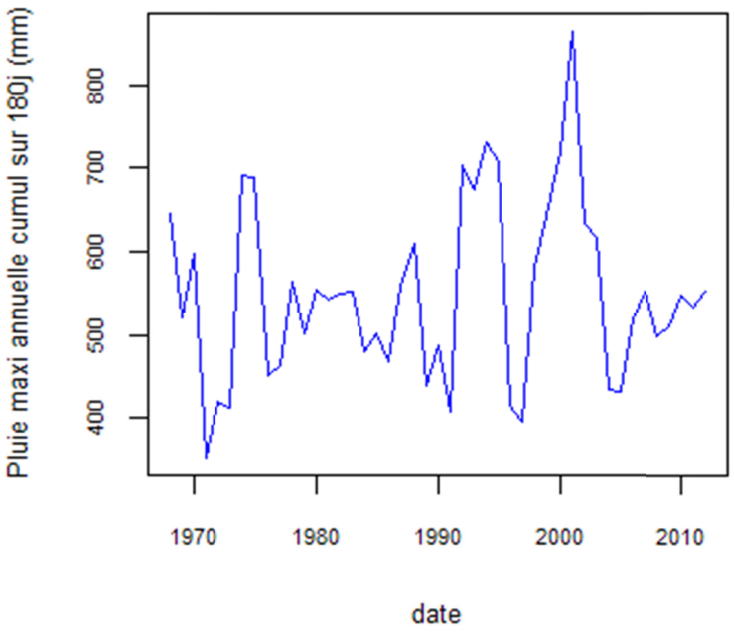
Périodes de retour et intervalles de confiance

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf.	Borne sup.
10	508	482	534
20	534	503	566
30	547	512	583
40	556	517	595
50	562	520	604
100	580	528	631
200	594	532	656
500	610	534	686
1000	620	534	707

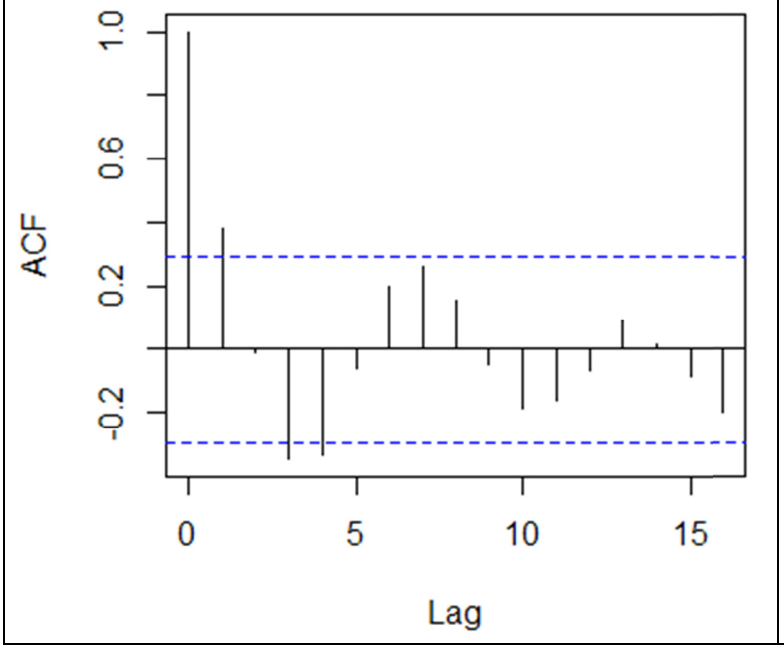


2. Pluies cumulées sur 180 jours à Bernaville

La série de valeurs maximales annuelles est tracée sur l'illustration ci-dessous :



Corrélogramme



Décalage (année)	Autocorrélation
1	1.000
2	0.383
3	-0.012
4	-0.345
5	-0.332
6	-0.059
7	0.195
8	0.262
9	0.152
10	-0.049

Légère autocorrélation que le test de Wald-Wolfowitz confirme en fournissant une p-value de 0.0026, inférieure au niveau de confiance de 1%.

Test de Mann-Kendall (stationnarité)

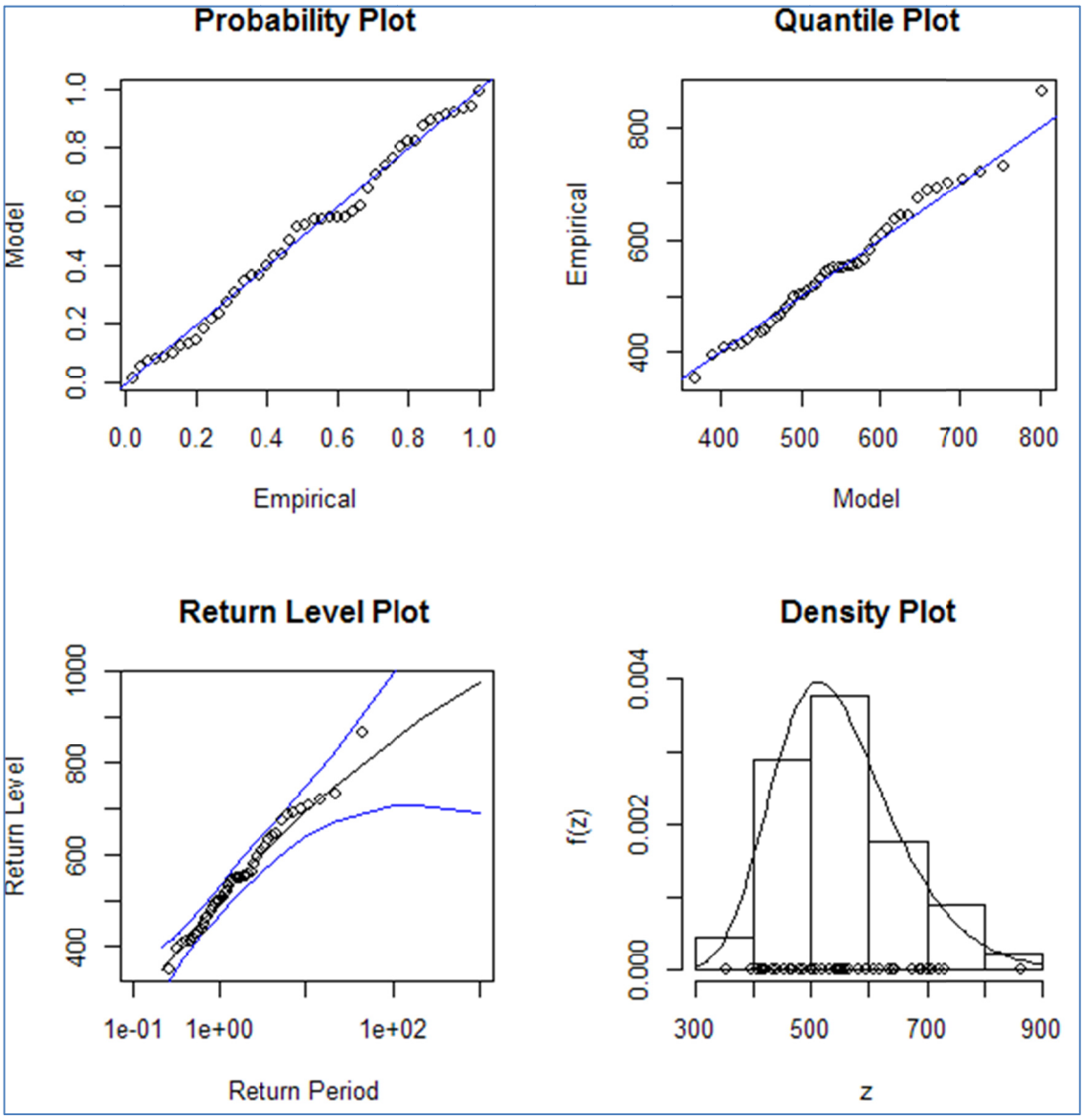
Le test fournit une p-value de 0.551, nettement supérieure au seuil de 5% ; l'hypothèse de stationnarité est donc acceptée.

Ajustement d'une loi GEV

- Estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

	Position	Echelle	Forme
Valeur des paramètres	502.957	93.356	-0.0951
Erreur standard	15.744	11.336	0.1138

● Diagnostic graphique de la qualité de l'ajustement



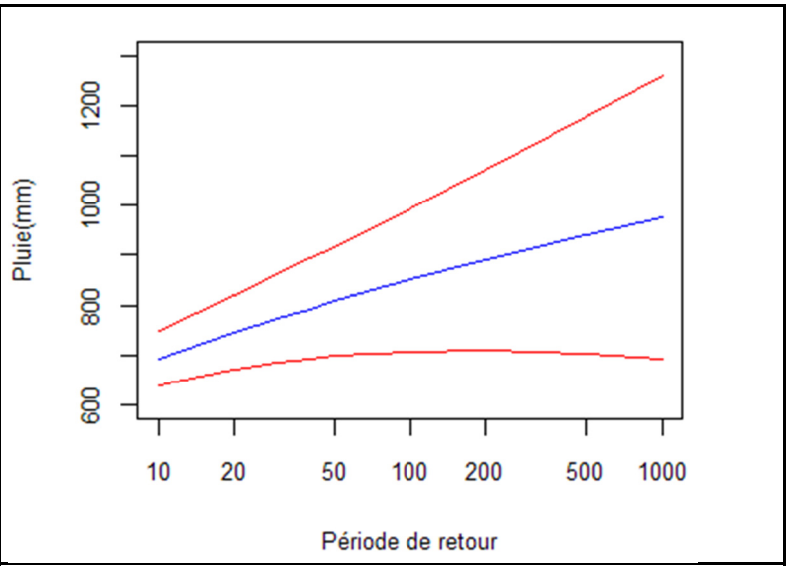
● Tests d'adéquation

Chi2 : la p-value est de 0.311, supérieure à 5% ; l'hypothèse d'adéquation est donc acceptée.

Kolmogorov-Smirnov : la p-value est de 0.981, encore plus forte, confirmant la conclusion du test précédent.

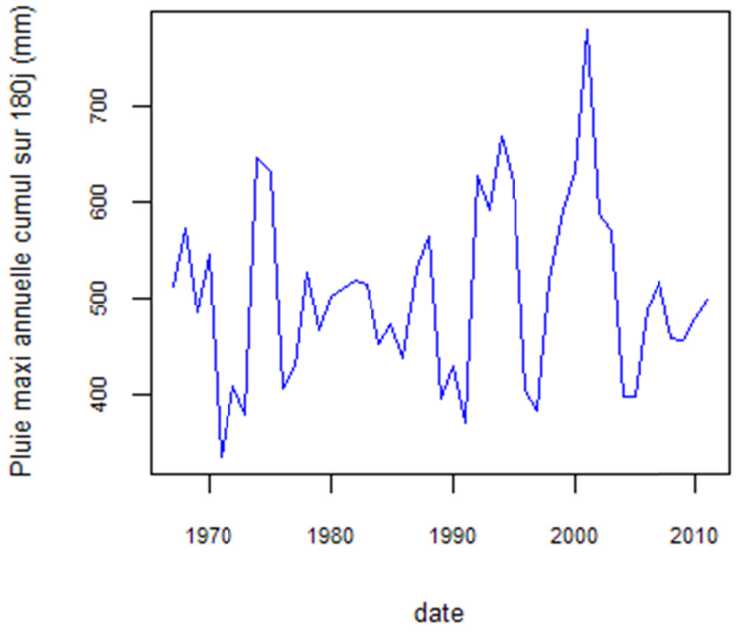
Périodes de retour et intervalles de confiance

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf.	Borne sup.
10	692	637	747
20	745	671	818
30	773	685	862
40	793	692	893
50	807	697	917
100	851	707	995
200	891	709	1074
500	941	702	1180
1000	976	690	1261

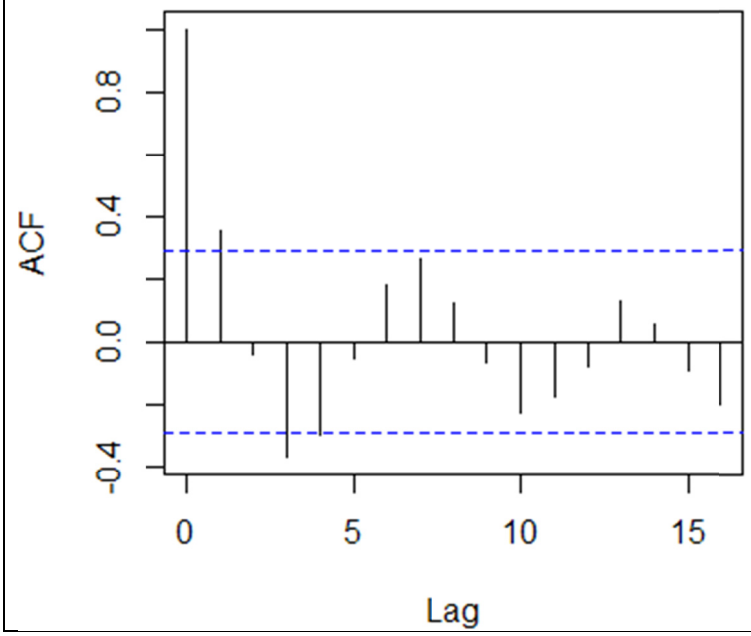


3. Pluies "optimales" Tempo cumulées sur 180 jours (70% Bernaville + 30% Glisy)

La série de valeurs maximales est présentée par l'illustration ci-dessous



Corrélogramme



Décalage (année)	Autocorrélation
1	0.355
2	-0.041
3	-0.369
4	-0.297
5	-0.054
6	0.183
7	0.267
8	0.124
9	-0.067
10	0.355

Légère autocorrélation que le test de Wald-Wolfowitz confirme en fournissant une p-value de 0.0047, nettement inférieure au niveau de confiance de 1%.

Test de Mann-Kendall (stationnarité)

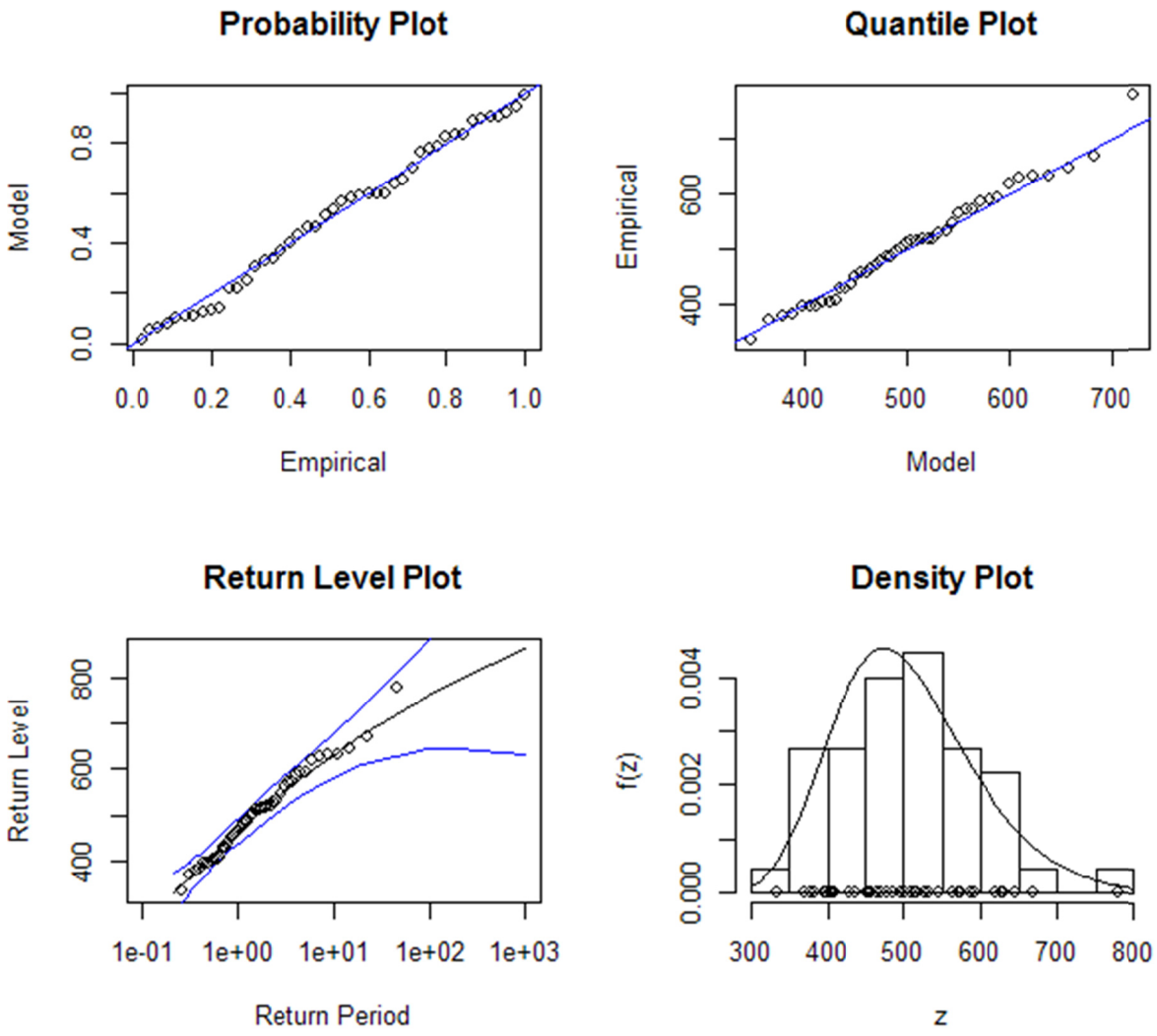
Le test fournit une p-value de 0.717, nettement supérieure au seuil de 5% ; l'hypothèse de stationnarité est donc acceptée.

Ajustement d'une loi GEV

- Estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

	Position	Echelle	Forme
Valeur des paramètres	464.840	81.514	-0.105974
Erreur standard	13.724	9.879	0.11167

● Diagnostic graphique de la qualité de l'ajustement



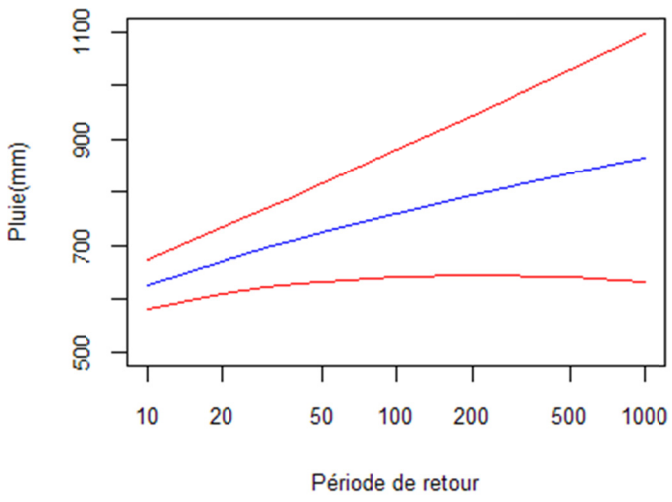
● Tests d'adéquation

Chi2 : la p-value est de 0.209, supérieure à 5% ; l'hypothèse d'adéquation est donc acceptée.

Kolmogorov-Smirnov : la p-value est de 0.948, encore plus forte, confirmant la conclusion du test précédent.

Périodes de retour et intervalles de confiance

Période de retour	Valeur probable (mm)	Borne inf.	Borne sup.
10	628	582	674
20	673	611	734
30	697	623	770
40	713	630	796
50	725	634	817
100	762	643	880
200	795	646	945
500	836	641	1031
1000	**864**	**633**	**1095**



Annexe 4

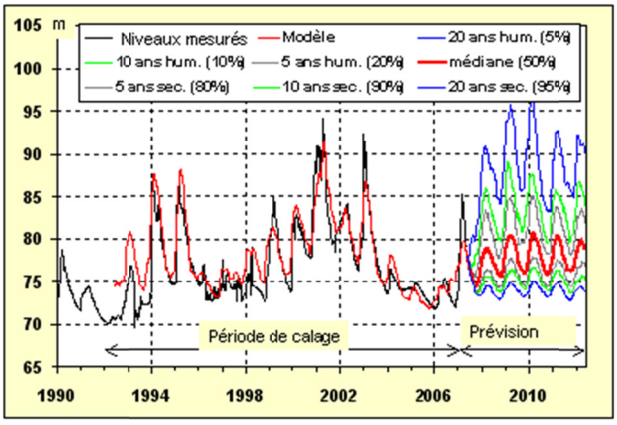
Le logiciel TEMPO

Brève description

Tempo, développé par le BRGM, est un logiciel de modélisation globale d'un hydrosystème (bassin versant de surface et souterrain). A la différence du logiciel Gardénia (décrit par ailleurs), les modèles construits avec Tempo se rangent dans la catégorie des modèles de type "boîte noire".
La modélisation est en effet réalisée à l'aide de fonctions de transfert (ou réponses impulsionnelles) qui relient des "entrées" (pluies, ETP par exemple) à des "sorties" (niveaux de nappes et/ou débits de cours d'eau). Ces fonctions de transfert permettent de s'affranchir de tous les paramètres inconnus du bassin superficiel et souterrain. Elles doivent permettre de reproduire le fonctionnement de l'hydrosystème: ruissellement sur le bassin versant, écoulements souterrains "lents" (porosité matricielle) et/ou "rapides" (macroporosité, fissures, conduits karstiques), après calage sur une chronique de niveaux et/ou de débits. Les processus étant complexes (coexistence d'écoulements "lents" et "rapides") et certains non linéaires (effets de seuils, débordements), plusieurs fonctions de transfert sont nécessaires pour simuler au mieux l'hydrosystème. De même, plusieurs entrées peuvent être introduites dans le processus de modélisation: ainsi, un débit à l'exutoire d'un bassin peut être reproduit à partir d'une séquence de pluies et d'ETP et à partir d'une chronique de niveaux piézométriques permettant par exemple de prendre en compte un soutien des débits d'étiage, ou plus généralement des échanges nappe-cours d'eau. Les différentes contributions à l'écoulement global (à l'exutoire) sont calculées par le logiciel, une fois déterminées les fonctions de transfert.

Application : prévision de niveaux et/ou de débits

Une fois le modèle calé, et donc les fonctions de transfert calculées, la phase de prévision (débits, niveaux) peut être mise en œuvre.
Grâce à un générateur de pluies (et d'ETP), TEMPO peut produire un grand nombre de scénarios climatiques suivant un processus aléatoire mais reproduisant néanmoins les caractéristiques des séquences climatiques passées (moyenne, saisonnalité, …). Pour que les fréquences calculées soient significatives, plusieurs centaines de scénarios sont nécessaires.
Pour chacun des n scénarios climatiques Tempo calcule la variable de sortie (débit ou niveau) sur la période de prévision choisie et à un pas de temps défini (par exemple décade par décade sur 5 ans).
Les résultats de toutes les simulations sont ensuite regroupés intervalle de temps par intervalle de temps (par exemple par décade)



Sur chacun de ces intervalles de temps les niveaux sont classés par ordre croissant, ce qui revient à construire une distribution cumulée des fréquences et permet de calculer une fréquence de dépassement (ou de non dépassement) de telle ou telle valeur dans chaque intervalle de temps (une fréquence de dépassement. Les valeurs correspondant à ces différentes fréquences sont calculées pas de temps par pas de temps et reportées ensuite sur un graphique (ci-contre)

Remarque: il est aussi possible d'introduire des scénarios climatiques prédéfinis

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

Direction régionale Picardie
Polytech de Rivery
7 rue Anne Frank
80136 – Rivery - France
Tél. : 03 22 91 42 47: