



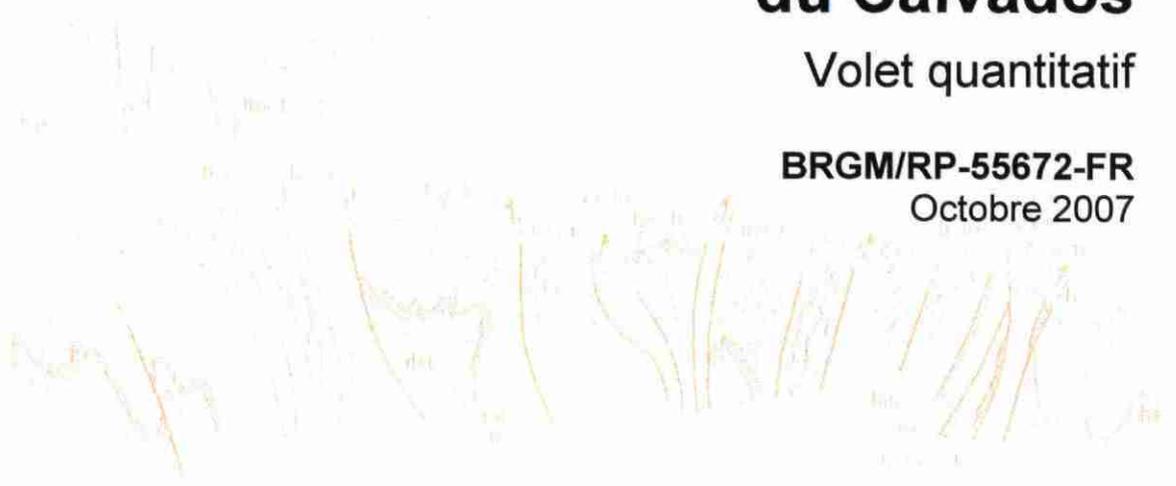
Document public

Atlas hydrogéologique numérique du Calvados

Volet quantitatif

BRGM/RP-55672-FR

Octobre 2007



Document public



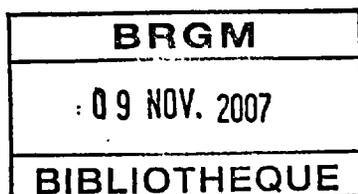
Atlas hydrogéologique numérique du Calvados

Volet quantitatif

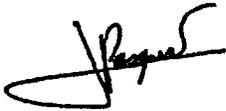
BRGM/RP-55672-FR
Octobre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 06 EAU A05

Arnaud L.



Vérificateur :
Nom : THIERY D.
Date : 13 août 2007
Signature : 

Approbateur :
Nom : PASQUET J.-F.
Date : 20 août 2007
Signature : 

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : AEP, Bajocien, Bathonien, Bilan hydrologique, Dives, logiciel GARDENIA, Mue, Pluie efficace, Piézométrie, Prélèvements, Recharge, Ruissellement, Seules, Socle, Calvados, Basse-Normandie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Arnaud L. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet quantitatif. Rapport BRGM/RP-55672-FR, 110 p, 64 illustrations, 3 annexes.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Conseil Général du Calvados, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), la DIREN Basse-Normandie et le brgm se sont associés pour la réalisation d'un Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. La nouvelle version de l'Atlas se décline en trois volets :

- un volet cartographique (Rapport BRGM/RP-55670-FR) ;
- un volet relatif aux aquifères de socle (Rapport BRGM/RP-55671-FR) ;
- un volet quantitatif, objet du présent rapport, avec modélisation hydrologique globale des bassins versants de la Seulles, de la Mue et de la Dives amont à l'aide du logiciel GARDENIA, développé par le brgm.

Les trois bassins versants étudiés ont été sélectionnés en raison des enjeux quantitatifs et qualitatifs liés à la masse d'eau souterraine des calcaires bajo-bathoniens (classée en Zone de Répartition des Eaux). La présente étude a pour principal objectif de dresser un premier bilan quantitatif des bassins versants. Sur cette base, il pourra ensuite être envisagé de mettre en œuvre des règles de gestion volumique simples de la ressource en eau souterraine. Cette démarche s'inscrit parfaitement dans le cadre de la ZRE qui doit permettre à l'Etat d'assurer une gestion plus fine des demandes de prélèvements.

Des modélisations satisfaisantes ont pu être obtenues, et plus particulièrement pour les modélisations pluie-débit. Pour chacun des bassins versants, il a, par conséquent, été possible de calculer un bilan hydrologique fiable, dont les principaux enseignements sont :

- des fonctionnements hydrologiques proches pour les bassins versants de la Seulles et de la Dives amont avec des parties amont aux reliefs plus marqués et aux terrains plus ruisselants. Sur ces dernières, les cours d'eau se montrent beaucoup plus sensibles aux étiages en raison d'un soutien modéré par les eaux souterraines. En période de crue, l'alimentation des cours d'eau par le ruissellement de ces secteurs amont devient prépondérante ;
- le fonctionnement hydrologique de la Mue apparaît plus homogène avec une contribution des eaux souterraines à l'alimentation du cours d'eau qui fluctue moins dans le temps (entre 60 et 80 % en moyenne) ;
- les précipitations efficaces moyennes calculées par le modèle sont respectivement de l'ordre de 320 mm pour le bassin versant de la Seulles (période 1972-2003), de 180 mm pour le bassin de la Mue (période 1971-2005) et de 190 mm pour la Dives amont (période 1993-2005) ;
- le calcul du bilan hydrologique moyen sur le bassin versant de la Mue fait apparaître un déséquilibre quantitatif important avec un débit de fuite moyen de 220 L/s (40 % de la pluie efficace moyenne).

Compte tenu de l'enjeu quantitatif lié à la masse d'eau souterraine du bajo-bathonien, le brgm a recommandé d'améliorer la connaissance des prélèvements (localisation, indice BSS des ouvrages, volumes mensuels) sur les trois bassins versants pour la réalisation de bilans hydrologiques plus fins et donc plus fiables.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Le modèle hydrologique global GARDENIA du BRGM.....	13
2.1. PRINCIPE DU MODELE	13
2.2. FONCTIONNEMENT DU MODELE	14
2.3. EQUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE	16
3. Application au bassin versant de la Seulles	19
3.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA SEULLES	19
3.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS.....	23
3.2.1. Les données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie	23
3.2.2. Les données de la DDAF du Calvados.....	25
3.3. DONNEES METEOROLOGIQUES	26
3.4. DONNEES DE DEBIT	30
3.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE	33
3.6. MODELISATION SUR LE BASSIN VERSANT DE LA SEULLES.....	34
3.6.1. Modélisation pluie-débit.....	34
3.6.2. Modélisation pluie-niveau.....	37
3.7. BILAN HYDROLOGIQUE.....	39
3.7.1. Recharge hivernale	39
3.7.2. Bilan hydrologique moyen	41
3.7.3. Décomposition des écoulements.....	43
4. Application au bassin versant de la Mue	45
4.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	45
4.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS.....	45
4.3. DONNEES METEOROLOGIQUES	47
4.4. DONNEES DE DEBIT	48

4.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE.....	49
4.6. MODELISATION GARDENIA.....	51
4.6.1. Modélisation pluie-débit.....	51
4.6.2. Modélisations pluie-niveau	53
4.7. BILAN HYDROLOGIQUE.....	55
4.7.1. Recharge hivernale	56
4.7.2. Bilan hydrologique.....	58
4.7.3. Décomposition des écoulements.....	60
5. Application au bassin versant de la Dives	63
5.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	63
5.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS.....	66
5.2.1. Les données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie	66
5.2.2. Les données de la DDAF du Calvados.....	67
5.3. DONNEES METEOROLOGIQUES	68
5.4. DONNEES DE DEBIT	71
5.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE.....	75
5.6. MODELISATION GARDENIA.....	76
5.6.1. Modélisations pluie-débit.....	76
5.6.2. Modélisation pluie-niveau.....	79
5.7. BILAN HYDROLOGIQUE.....	81
5.7.1. Recharge hivernale	82
5.7.2. Bilans hydrologiques	83
5.7.3. Décomposition des écoulements.....	85
6. Conclusions / Perspectives.....	87
7. Références bibliographiques	89

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des bassins versants sélectionnés pour le calcul des bilans hydrologiques (source : AESN)	12
Illustration 2 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant	13
Illustration 3 : Fonctionnement du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (Schéma classique)	15
Illustration 4 : Modèle Numérique de Terrain pour les bassins versants de la Seulles et de la Mue (source : IGN)	20
Illustration 5 : Carte géologique des bassins versants de la Seulles et de la Mue (carte géologique harmonisée au 1 / 50 000, brgm©).....	21
Illustration 6 : Carte piézométrique des bassins versant de la Seulles et de la Mue (brgm©, 2007)	22
Illustration 7 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seulles entre 1994 et 2004 (source : AESN)	23
Illustration 8 : Répartition des prélèvements par usage en 2004 (source : AESN).....	24
Illustration 9 : Carte des prélèvements par commune (source : AESN, 2004)	24
Illustration 10 : Répartition géographique des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seulles (sources : AESN, DDAF du Calvados)	25
Illustration 11 : Stations de mesures utilisées pour la modélisation des bassins versants de la Seulles et de la Mue (sources : Météo France, DIREN, brgm)	26
Illustration 12 : Comparaison des précipitations sur St-Gabriel-Brécy, St-Vigor-le-Grand et Caen Carpiquet (source : Météo France).....	28
Illustration 13 : Répartition annuelle des précipitations et de l'ETP sur la station climatique de Caen-Carpiquet (source : Météo France).	29
Illustration 14 : Répartition de la pluie efficace annuelle moyenne (1946-2001) sur les bassins versants de la Seulles et de la Mue (source : MEDAD).....	30
Illustration 15 : Caractéristiques des deux stations de jaugeage suivies par la DIREN Basse-Normandie sur la Seulles	31
Illustration 16 : Comparaison des lames d'eau journalières ruisselées à Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)	31
Illustration 17 : Débits et lames d'eau ruisselées caractéristiques de la Seulles aux stations hydrologiques de Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)	32
Illustration 18 : Comparaison entre les débits à Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)	32
Illustration 19 : Comparaison entre les niveaux piézométriques à Martragny et à Amblie entre 1974 et 1994 (source : DIREN BNO, brgm).....	33
Illustration 20 : Double cumul des niveaux piézométriques à Martragny et à Amblie (source : DIREN BNO, brgm)	34
Illustration 21 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Seulles à Tierceville sur la période 1972-2003	35

Illustration 22 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles sur la période 1982-2003.....	36
Illustration 23 : Visualisation sur la période 1985-2003 du calage pluie-niveau à Martragny sur la période 1974-2003.....	38
Illustration 24 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation sur le bassin versant de la Seulles).....	40
Illustration 25 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1972 à 2003 (en jaune : les valeurs mensuelles minimales, en bleu : les valeurs maximales)	41
Illustration 26 : Eléments du bilan hydrologique de la Seulles à Tierceville (1972-2003) d'après les résultats de la modélisation GARDENIA pluie-débit	42
Illustration 27 : Contribution des écoulements lents (souterrains) au débit de la Seulles à Tierceville (1972-2003)	43
Illustration 28 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Mue entre 1994 et 2004 (source : AESN).....	46
Illustration 29 : Carte des prélèvements par commune sur le bassin versant de la Mue (source : AESN, 2004)	47
Illustration 30 : Comparaison des précipitations décennales à Bernières-sur-Mer et Caen Carpiquet (source : Météo France)	48
Illustration 31 : Débits caractéristiques de la Mue à la station hydrologique de Reviers (source : DIREN BNO).....	48
Illustration 32 : Débits de la Mue à la station hydrologique de Reviers (source : DIREN BNO)	49
Illustration 33 : Evolution des niveaux piézométriques à Cairon et à Fresne-Camilly entre 1977 et 2004 (source : brgm)	50
Illustration 34 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Mue à Reviers sur la période 1971-2005.....	52
Illustration 35 : Calage pluie-niveau à Fresne-Camilly sur la période 1997-2005.....	53
Illustration 36 : Calage pluie-niveau à Cairon sur la période 1972-1979 transposé à la période 1972-2004.....	54
Illustration 37 : Calage pluie-niveau à Cairon sur la période 1993-2004.....	55
Illustration 38 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation sur le bassin versant de la Mue).....	56
Illustration 39 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1971 à 2005 (en jaune : les valeurs mensuelles minimales, en bleu : les valeurs maximales)	57
Illustration 40 : Evolution de l'ETR par rapport à l'ETP pour le bassin versant de la Mue sur la période simulation 1971-2005.....	58
Illustration 41 : Eléments du bilan hydrologique de la Mue à Reviers (1971-2005) d'après les résultats de la modélisation GARDENIA pluie-débit	59
Illustration 42 : Contribution des écoulements lents (souterrains) au débit de la Mue à Reviers (1971-2005)	60
Illustration 43 : Carte géologique sur le bassin versant de la Dives amont (carte géologique simplifiée, brgm©)	64

Illustration 44 : Carte piézométrique sur le bassin versant de la Dives amont (brgm, 2007).....	65
Illustration 45 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Dives amont entre 1994 et 2004 (source : AESN).....	66
Illustration 46 : Carte des prélèvements par commune (source : AESN, 2004)	67
Illustration 47 : Stations de mesures disponibles sur le bassin versant de la Dives amont (sources : Météo France, DIREN, brgm).....	68
Illustration 48 : Comparaison des précipitations à l'Oudon et Caen Carpiquet sur la période 1963-2005 (source : Météo France).....	69
Illustration 49 : Comparaison de l'ETP à l'Oudon et Caen Carpiquet sur la période 1994-2005 (source : Météo France).....	69
Illustration 50 : Répartition des pluies efficaces annuelles moyennes (1946-2001) sur le bassin versant de la Dives amont (source : MEDAD).....	70
Illustration 51 : Caractéristiques des 3 stations de jaugeage suivies par la DIREN Basse-Normandie sur la Dives amont.....	71
Illustration 52 : Comparaison des lames d'eau journalières ruisselées à Beaumais, Bieville-Quetieville et Mesnil-Mauger (source : DIREN BNO).....	72
Illustration 53 : Débits et lames d'eau ruisselées caractéristiques de la Dives aux stations hydrologiques de Beaumais, Mesnil-Mauger et Bieville-Quetieville (source : DIREN BNO)	72
Illustration 54 : Chroniques de débits à Beaumais, Mesnil-Mauger et Bieville-Quetieville (source : DIREN BNO)	74
Illustration 55 : Evolution des niveaux piézométriques de 1978 à 2001 sur Percy-en-Auge (source : DIREN BNO).....	76
Illustration 56 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Dives à Beaumais sur la période 1972-2005	77
Illustration 57 : Calage pluie-débit de la Dives à Mesnil-Mauger sur la période 1993-2005.....	78
Illustration 58 : Reconstitution des débits de la Dives à Mesnil-Mauger sur la période 1971-1992	79
Illustration 59 : Calage pluie-niveau à Percy-en-Auge sur la période 1978-1989.....	80
Illustration 60 : Calage pluie-niveau à Percy-en-Auge sur la période 1978-1989 transposé à la période 1978-2001.....	81
Illustration 61 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation pluie-débit à Mesnil-Mauger).....	82
Illustration 62 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1993 à 2005 (en jaune : les valeurs minimales, en bleu : les valeurs maximales)	83
Illustration 63 : Eléments du bilan hydrologique de la Dives à Mesnil-Mauger (1993-2005) d'après les résultats de la modélisation globale GARDENIA pluie-débit.....	84
Illustration 64 : Contributions des écoulements lents (souterrains) au débit de la Dives à Mesnil-Mauger (1993-2005).....	85

Liste des annexes

Annexe 1 - Bassin versant de la Seulles : résultats des calages	91
Annexe 2 - Bassin versant de la Mue : résultats des calages	97
Annexe 3 - Bassin versant de la Dives amont : résultats des calages	103

1. Introduction

Le Conseil Général du Calvados, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), la DIREN Basse-Normandie et le brgm se sont associés pour la réalisation d'un Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Chaque organisme est représenté dans le Comité de Pilotage du projet.

La dernière version de l'Atlas hydrogéologique du Calvados, sur support papier, date de 1991. Cette version est épuisée et n'a pas été accompagnée d'une notice explicative. Elle méritait, par conséquent, d'être mise à jour au format numérique.

La nouvelle version de l'Atlas se décline en trois volets :

- un volet cartographique avec caractérisation géométrique des principaux aquifères départementaux, élaboration des cartes piézométriques pour les nappes du Cénomaniens, du Bathonien et du Bajocien et de la carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Calvados (Rapport BRGM/RP-55670-FR) ;
- un volet relatif aux aquifères de socle du Calvados avec une étude des débits de forages et une cartographie de l'épaisseur actuelles des altérites (Rapport BRGM/RP-55671-FR) ;
- un volet quantitatif, objet du présent rapport, avec modélisation hydrologique globale des bassins versants de la Seulles, de la Mue et de la Dives amont.

Les trois bassins versants étudiés ont été sélectionnés, en collaboration avec le Comité de Pilotage, en raison des enjeux quantitatifs et qualitatifs liés à la masse d'eau souterraine des calcaires bajo-bathoniens concernée. Il est rappelé que cette dernière a été classée en Zone de Répartition des Eaux (Z.R.E.).

Les modélisations ont été réalisées à l'aide du logiciel GARDENIA, développé par le BRGM, qui permet des modélisations pluie-débit et pluie-niveau piézométrique. La présente étude repose sur les données disponibles issues des différentes stations de mesures (données climatiques, piézométriques, hydrologiques et de prélèvements).

Les principaux objectifs de ce volet quantitatif sont pour chacun des bassins versants :

- d'évaluer les précipitations efficaces et leurs variations saisonnières et interannuelles ;
- de calculer les différents termes du bilan hydrologique moyen et d'évaluer ainsi l'impact des prélèvements sur la ressource en eau.

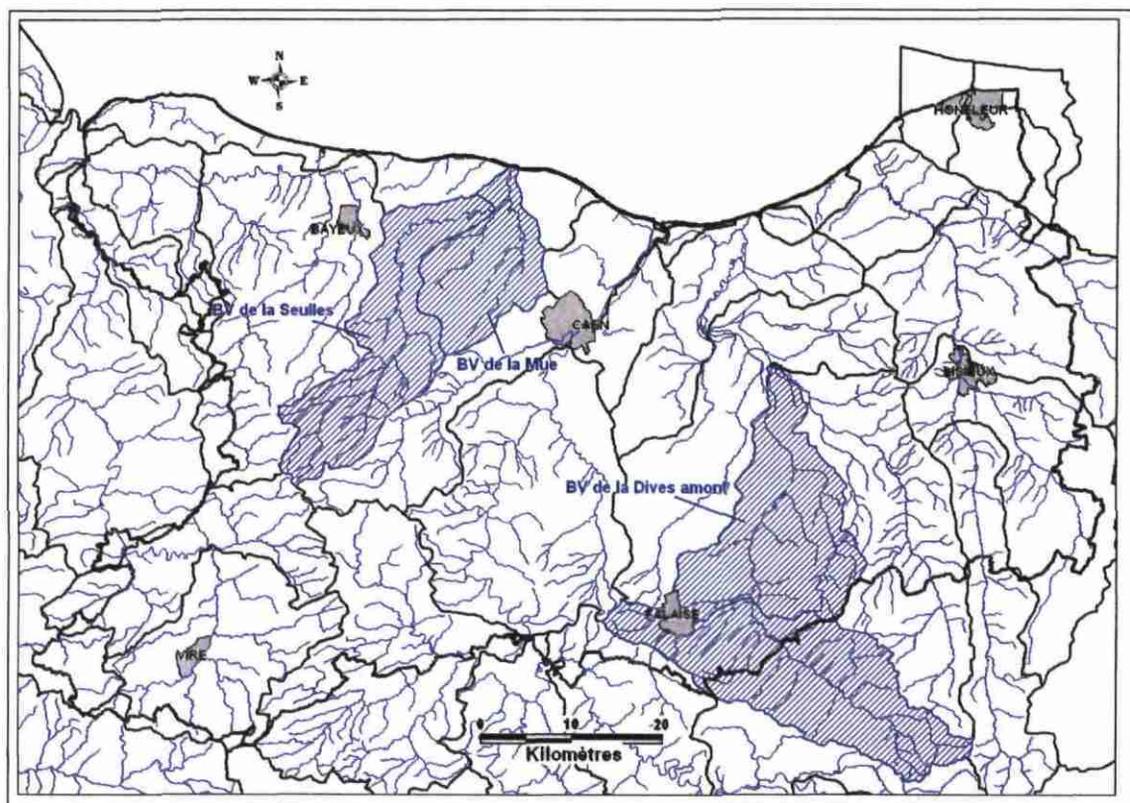


Illustration 1 : Localisation des bassins versants sélectionnés pour le calcul des bilans hydrologiques (source : AESN)

2. Le modèle hydrologique global GARDENIA du BRGM

2.1. PRINCIPE DU MODELE

Le modèle hydrologique global GARDENIA (Thiéry, 2003) est un modèle hydrologique global développé par le BRGM. Ce logiciel simule le cycle de l'eau (Illustration 2), depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique).

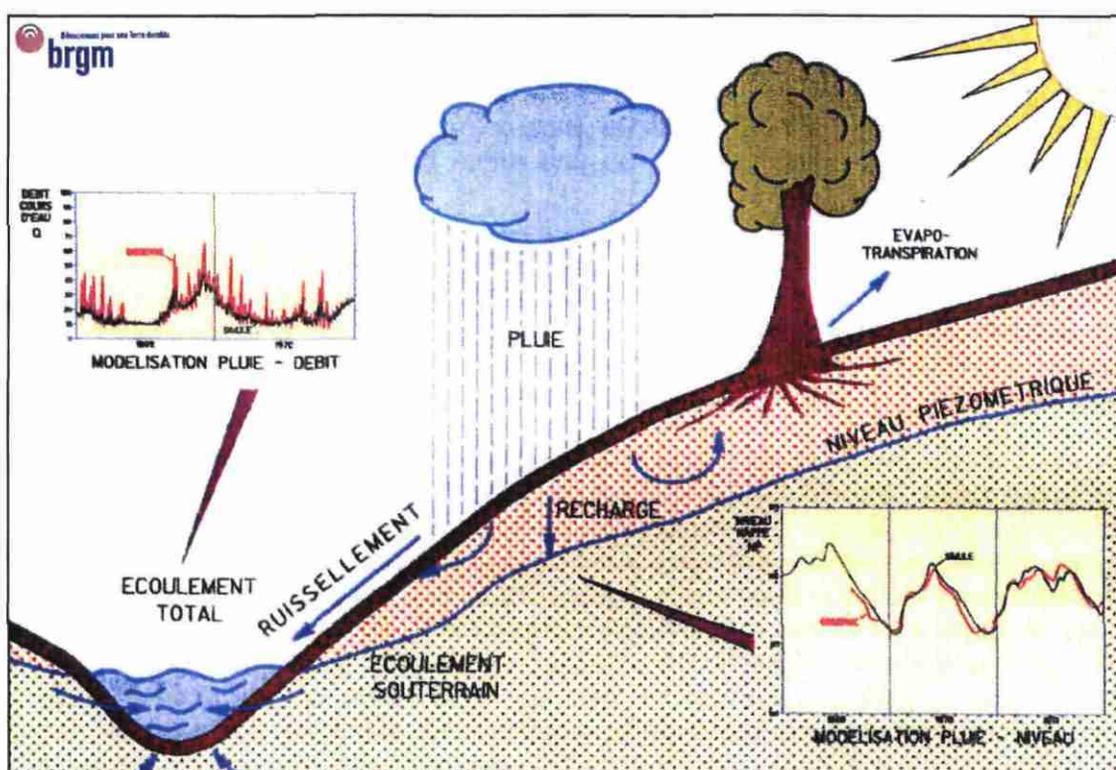


Illustration 2 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

Ce modèle est global, car il considère des « données d'entrée » globales en pluie et évapotranspiration potentielle et une sortie unique qui est, suivant le cas, le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. GARDENIA simule le cycle de l'eau par plusieurs réservoirs en cascade.

2.2. FONCTIONNEMENT DU MODELE

Plusieurs schémas hydrauliques peuvent être utilisés :

- le schéma type GARDENIA au sens strict avec son module de production propre. Plusieurs configurations sont possibles avec notamment 1 (Illustration 3) ou 2 réservoirs souterrains. Dans la présente étude, nous avons utilisé la configuration avec un seul réservoir souterrain. Dans la configuration à 1 réservoir souterrain, les différents réservoirs (3) représentent alors schématiquement :
 - la zone superficielle du sol sujette à la reprise par évaporation ;
 - la zone non saturée siège des écoulements rapides (Ruissellement et composante rapide des écoulements karstiques) ;
 - la zone saturée siège des écoulements lents de l'aquifère.
- le schéma mixte type GARDENIA avec le module de production type GR4 ;
- le schéma type GR4 développé par Edijatno et Michel (1989).

Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir généralement 4 à 6 paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant.

Pour initialiser l'état de remplissage des réservoirs, il est nécessaire, en modélisation hydrologique globale, de prendre en compte une période d'initialisation. Celle-ci doit être d'autant plus longue que l'inertie ou « mémoire » de l'aquifère est grande. Cela suppose de disposer de chroniques de pluie et d'ETP sur une période aussi longue que possible antérieurement à la période de calage.

Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les données d'entrée (pluie, ETP) et les données de sortie (débit ou niveau piézométrique) avec un jeu de paramètres aussi réaliste que possible, calé sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles. **Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés.** L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock. Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées. Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur qui peut le contraindre, notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Une fois calé, le modèle peut être utilisé pour :

- Etablir un bilan hydrologique, et/ou vérifier la cohérence entre les différentes données (pluie, ETP, débit et/ou niveau), en permettant notamment, dans une certaine mesure, de différencier les deux composantes de l'écoulement :
 - celle rapide que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel et à la composante rapide des écoulements karstiques ;
 - celle lente que l'on peut assimiler à la composante lente des écoulements souterrains.

- Simuler des débits ou des niveaux résultant d'épisodes climatiques exceptionnels. Ces simulations permettent le dimensionnement d'ouvrages tels que retenues pour l'irrigation, aménagement de sources, fondations de bâtiments, niveaux de sous-sol, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour l'évacuation des crues ou pour la régulation des débits (barrages), etc ;
- Faire une extension ou reconstituer des valeurs manquantes dans une chronique de débits (rivière ou source), ou de niveau piézométrique (nappe). Les séries ainsi complétées peuvent être utilisées dans d'autres calculs ou modélisations ;
- Réaliser une prévision de débits ou de niveaux piézométriques. Il est possible de prolonger une série observée pour les semaines, mois ou années à venir en considérant différents scénarii possibles (étiage, niveau piézométrique de hautes eaux, changement climatique,). De telles prévisions représentent un outil d'aide à la gestion volumique de la ressource en eau souterraine.

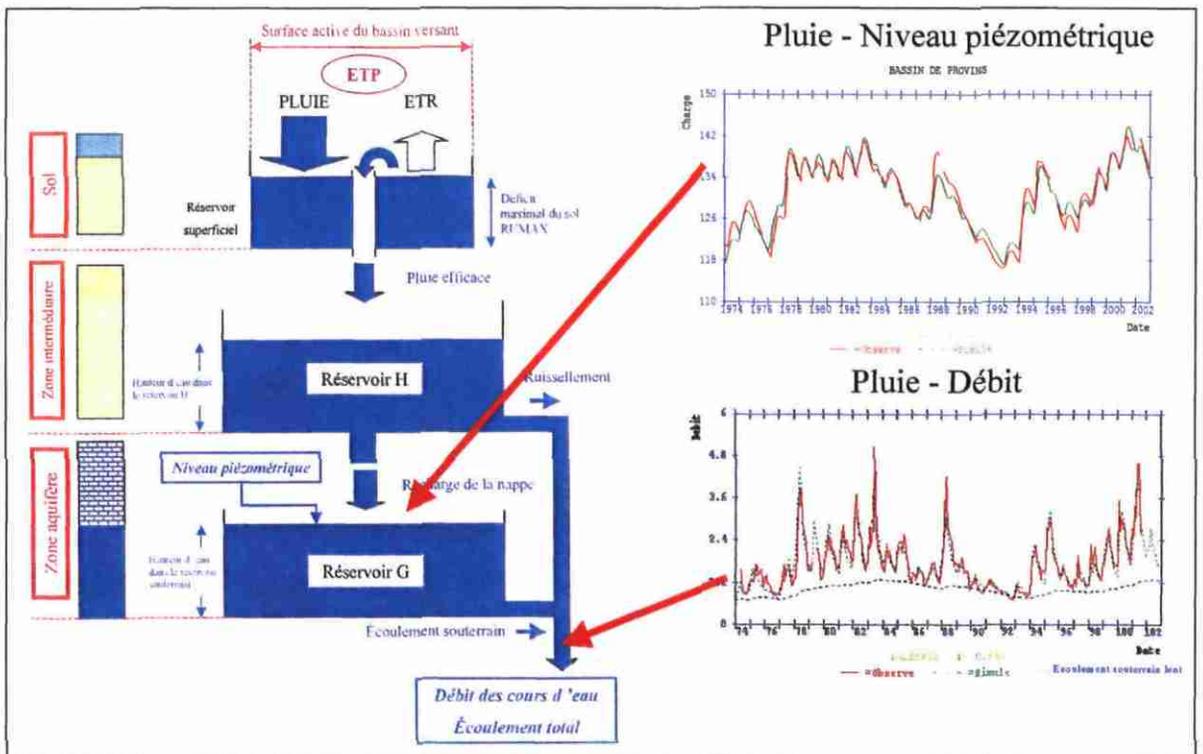


Illustration 3 : Fonctionnement du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (Schéma classique)

2.3. EQUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE

L'exploitation des modèles hydrologiques globaux GARDENIA pluie-débit et pluie-niveau piézométrique permet de quantifier les différents termes du bilan hydrologique. Les équations du bilan hydrologique global pluie-débit sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 PLUIE &= ETR + PEF \\
 PEF &= Q_{RAP} + Q_{SOUT} + dSTO \\
 QRivière &= (Q_{RAP} + Q_{SOUT}) + Q_{Echange}
 \end{aligned}$$

avec :

- PLUIE Lame d'eau précipitée sur le bassin
 - ETR Lame d'eau évapotranspirée réellement sur le bassin, est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la limite de la quantité d'eau disponible
 - PEF Hauteur de pluie efficace ou écoulement global
 - Q_{RAP} Lame d'eau écoulee correspondant à l'écoulement rapide (ruissellement superficiel + écoulement karstique rapide)
 - Q_{SOUT} Lame d'eau écoulee correspondant à l'écoulement lent (souterrain)
 - dSTO Variations de stock (stockage/déstockage d'eau principalement au niveau de la zone non saturée). On essaye en général de s'affranchir de ce paramètre en calculant le bilan sur une année hydrologique
 - $Q_{Echange}$ Débit d'échange : prélèvements non restitués au bassin + écoulements souterrains au droit de la station de jaugeage + échanges potentiels sur le périmètre du bassin avec les bassins voisins
- $Q_{Echange} > 0$ si apport extérieur au bassin
 $Q_{Echange} < 0$ si sortie d'eau bassin

Dans les modélisations hydrologiques globales pluie-niveau piézométrique le niveau piézométrique est déduit de la hauteur d'eau dans le réservoir souterrain (G) par la relation :

$$NP = \frac{G}{SG} + NB$$

avec :

NP	Niveau piézométrique
G	Hauteur d'eau dans le réservoir souterrain
SG	Coefficient d'emménagement global
NB	Niveau de base (niveau qui serait atteint en l'absence totale d'alimentation au bout d'un temps infini)

Les termes du bilan hydrologique peuvent être calculés à des pas de temps différents (pentadaire, décadaire, mensuel).

La signification et l'utilisation des différents paramètres de GARDENIA sont explicitées dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Unité	Dénomination
BV	km ²	Surface du bassin versant contrôlé par la station de jaugeage.
Débit d'échange ou débit de fuite	m ³ /s	Débit d'échange avec d'autres systèmes hydrologiques : $Q_{Echange} > 0$ si apport extérieur au bassin $Q_{Echange} < 0$ si sortie d'eau bassin
Coef. PLUIE	%	Coefficient correcteur global de la pluie (éventuellement si les postes climatiques utilisés sont éloignés de la zone d'étude, mais une corrélation avec une station plus proche est à démontrée).
Coef. ETP	%	Coefficient correcteur global de l'ETP (non utilisé dans cette étude).
RUMAX	mm	Capacité de rétention maximale du sol.
RUMAX_PROG	mm	Capacité de la réserve superficielle Progressive, cette alternative à la RUMAX permet de rendre compte des variations de l'ETR en fonction du taux d'humidité du sol. Dans notre cas, de meilleurs calages ont été obtenus avec la prise en compte de ce paramètre.
RUIPER	mm	Hauteur dans le réservoir correspondant à la

		ZNS pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation d'égal ruissellement percolation. Quand le niveau dans ce réservoir est égal à n fois cette hauteur RUIPER, l'écoulement rapide instantané est égale à n fois la percolation.
THG	Pas de temps	Temps de demi-percolation : vitesse de réponse entre une pluie efficace et un accroissement de la composante lente du débit.
TG1	Pas de temps	Temps de demi-tarissement rapide du réservoir souterrain : temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par deux.
Coef. Ajustement	Sans unité	Coefficient d'ajustement.
Pondération	Sans unité	Pondération des débits (0=non, 1=oui).

Tous ces paramètres peuvent être imposés ou optimisés par le modèle. Dans le cas de notre étude, différentes hypothèses ont été retenues pour ajuster les calages :

- la superficie du bassin versant hydrogéologique a été prise égale à celle du bassin versant topographique contrôlée par les stations de jaugeage et calculée à partir de la carte topographique au 1 / 25 000 de l'IGN. Cette valeur a bien entendu été imposée sans possibilité d'optimisation ;
- les paramètres laissés libres à l'optimisation sont les différents paramètres de calage standard du modèle GARDENIA c'est-à-dire : la capacité de la hauteur d'égal ruissellement percolation (mm), la réserve superficielle progressive (mm), le temps de percolation (mois), le temps de demi-tarissement (mois). L'optimisation est, cependant, contrainte pour obtenir un jeu de données cohérent et réaliste. Dans le but d'appréhender au mieux l'impact des prélèvements en eau, le débit de fuite a également été ajusté automatiquement par le modèle.

3. Application au bassin versant de la Seulles

3.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA SEULLES

Selon le découpage transmis par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le bassin versant de la Seulles a une superficie de 266 km² : de sa source à la confluence avec la Thue (Illustration 1). Sur l'emprise de ce bassin versant, les principaux affluents de la Seulles sont le Bordel, le Calichon, le Caudon et la Seullines (tous dans la moitié amont du bassin versant).

L'altitude moyenne du bassin versant est de 106 m NGF avec une altitude minimale de 5 m NGF et une altitude maximale de 354 m NGF.

La Seulles prend sa source sur les hauteurs de la commune de Jurques (Pays du Pré Bocage) dans le domaine du Massif Armoricaïn. Elle rencontre ensuite les premières couches du bassin parisien : galets et argiles du Trias dans une large dépression humide, marnes du Lias, calcaires bajociens et enfin les calcaires bathoniens avant de se jeter dans la Manche (Illustration 5). Aussi, en fonction de la nature géologique du sous-sol, le bassin versant de la Seulles est caractérisé par deux domaines bien distincts :

- l'amont avec une forte densité du réseau hydrographique et un relief vallonné et nettement plus élevé qu'à l'aval (Illustration 4) ;
- l'aval avec une faible densité de drainage et un relief de plateau.

D'un point de vue hydrogéologique, le bassin versant de la Seulles est concerné par 3 grands domaines :

- un domaine de socle (partie amont), où le débit de la Seulles est fortement dépendant de la pluviométrie. Des étiages sévères peuvent ainsi être observés lors des années sèches avec possible assèchement de certains petits affluents. Le sous-sol est, en effet, constitué de schistes briovériens, dont les caractéristiques hydrodynamiques restent médiocres : circulations d'eau à la faveur du réseau de fissures / fractures ;
- l'aquifère du Bajocien (partie centrale), où la Seulles joue le rôle de drain vis-à-vis de la nappe (Cf. figures de drainance sur Illustration 6). Son débit est ainsi soutenu par la nappe, et plus particulièrement en période d'étiage ;
- l'aquifère du Bathonien (partie aval) qui permet également de soutenir le cours d'eau.

Entre le socle et les calcaires bajociens, la Seulles s'écoule sur des formations liasiques non aquifères constituant une limite étanche à l'aquifère de socle : il n'existe donc quasiment aucun échange entre ces deux systèmes aquifères.

Ensuite, la nappe du Bajocien passe en captivité sous la formation des Marnes de Port-en-Bessin. L'affleurement des Marnes de Port-en-Bessin constitue ainsi une limite d'alimentation à condition de flux de la nappe libre du Bajocien par sa partie captive à charge hydraulique supérieure.

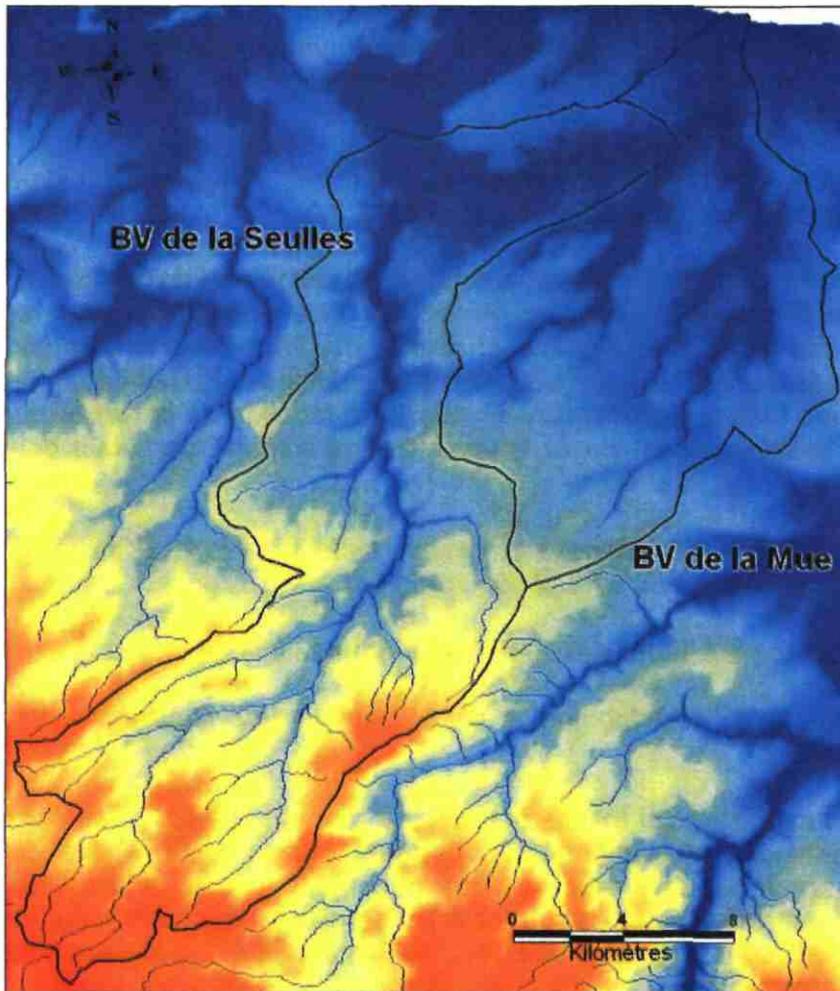


Illustration 4 : Modèle Numérique de Terrain pour les bassins versants de la Seulles et de la Mue (source : IGN)

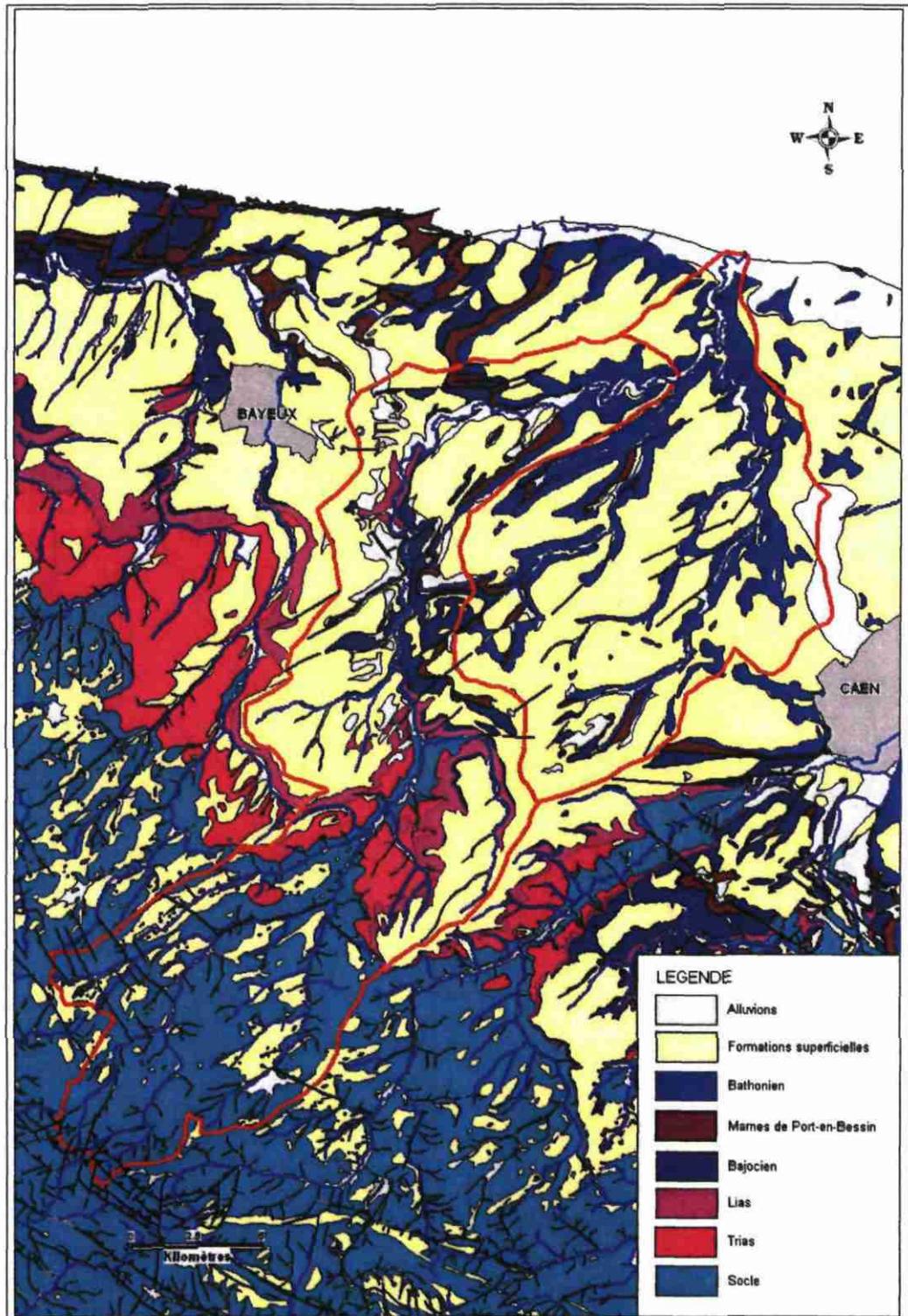


Illustration 5 : Carte géologique des bassins versants de la Seulles et de la Mue (carte géologique harmonisée au 1 / 50 000, brgm©)

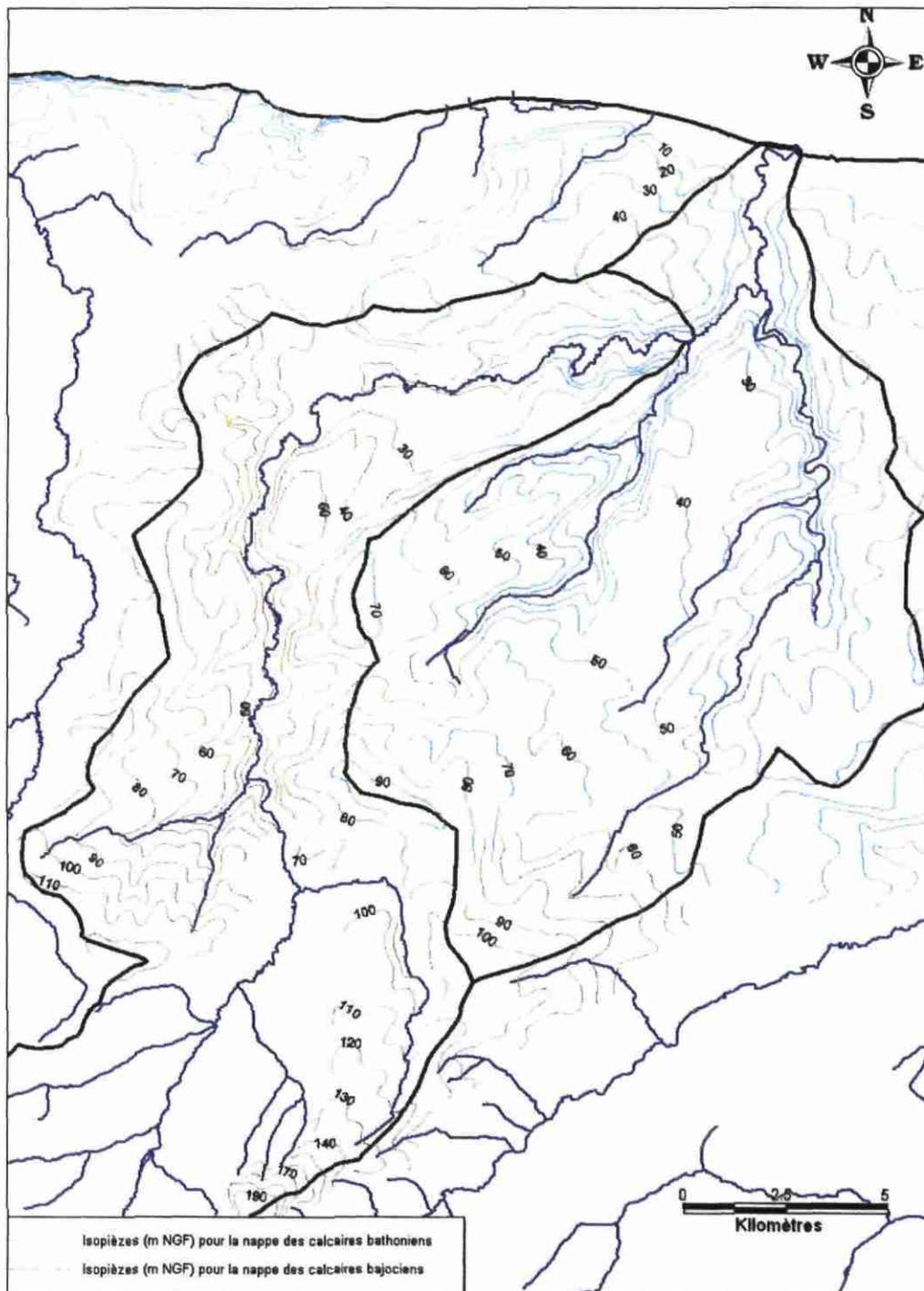


Illustration 6 : Carte piézométrique des bassins versant de la Seulles et de la Mue (brgm©, 2007)

3.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS

3.2.1. Les données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie

Les volumes annuels d'eaux souterraines et d'eaux superficielles prélevés de 1994 à 2004 ont été fournis par l'AESN pour les usages AEP, industriels et agricoles (Illustrations 7 et 8). Ils résultent des prélèvements déclarés au titre des redevances AESN et risquent donc d'être globalement sous-estimés. L'usage agricole correspond en fait uniquement à ceux répondant aux besoins de l'irrigation.

Pour les besoins de l'étude, ces données de prélèvement ont été géoréférencées au centroïde des communes d'implantation (risque d'erreur dans l'attribution du bassin versant concerné). Compte tenu de ces éléments de précision, les données sont à prendre avec précaution.

Entre 1994 et 2004, les prélèvements ont connu une légère augmentation : de 3.1 Mm³ à 3.95 Mm³ par an, soit une croissance de 27 %. Ceci est en particulier dû à l'apparition de prélèvements en rivière en 1997 (usage industriel sur la commune de Creully). Pour l'AEP, aucun prélèvement n'est effectué dans les eaux de surface.

La part des prélèvements en eau souterraine est prédominante avec 88 % des prélèvements totaux en 2004.

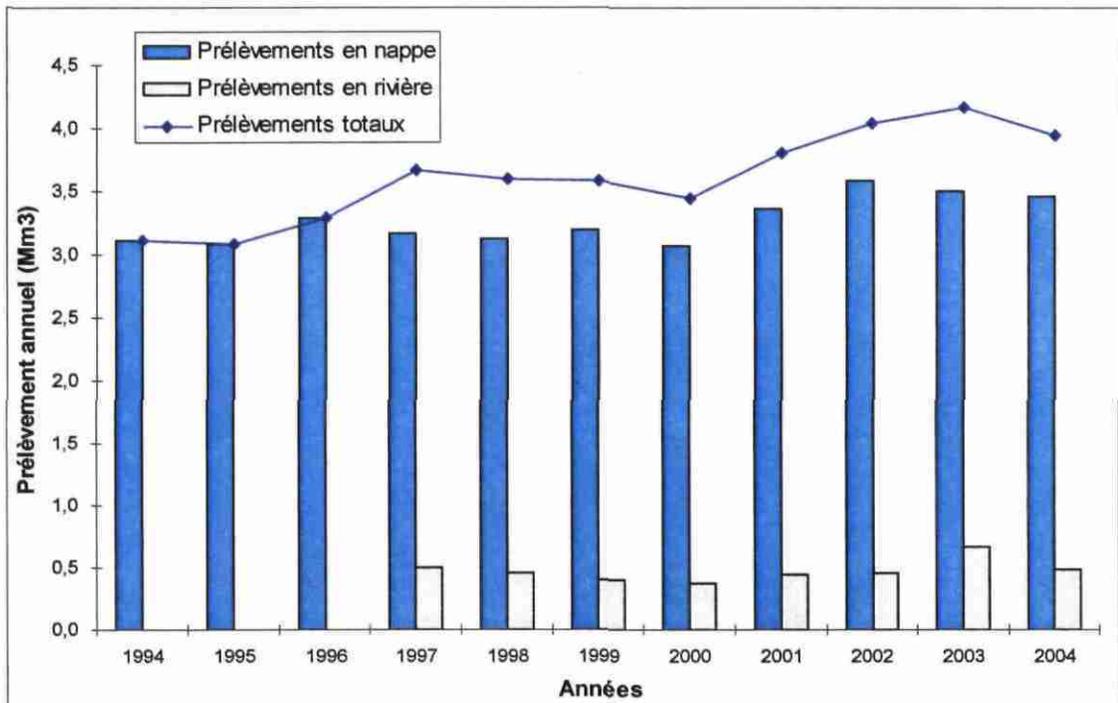


Illustration 7 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seulles entre 1994 et 2004 (source : AESN)

En ce qui concerne l'usage des prélèvements en 2004, 79 % sont destinés à l'alimentation en eau potable et les 21 % restant répondent aux besoins de l'industrie. Des prélèvements agricoles ne sont mentionnés que pour l'année 1998 avec un volume annuel de 3 640 m³.

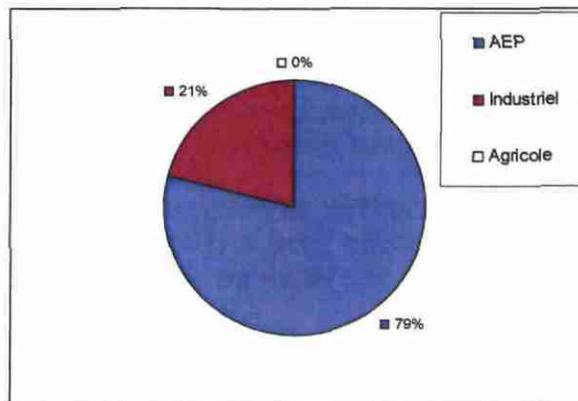


Illustration 8 : Répartition des prélèvements par usage en 2004 (source : AESN)

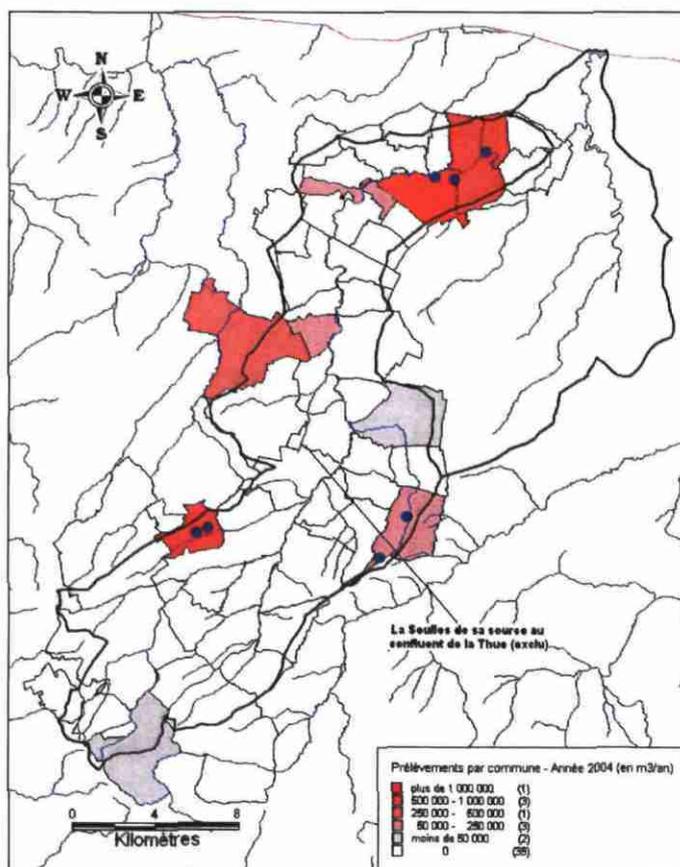


Illustration 9 : Carte des prélèvements par commune (source : AESN, 2004)

Les communes dont la ressource en eau est la plus sollicitée correspondent logiquement aux communes d'implantation des captages AEP : Tierceville, Creully, Saint-Gabriel-Brécy, Saint-Germain-d'Ectot et Noyers-Bocage (Illustration 9).

3.2.2. Les données de la DDAF du Calvados

En 2005, la DDAF du Calvados a réalisé une enquête auprès des préleveurs potentiels du département dans le but d'affiner la connaissance. Sur le bassin versant de la Seulles, il ressort de cette enquête un prélèvement annuel de 101 758 m³. Les données ont également été géoréférencées au centroïde des communes d'implantation.

Les prélèvements concernent 23 des 48 communes du bassin versant. Ils varient de 40 m³/an à 36 000 m³/an pour une moyenne de 2 420 m³/an.

Dans le cadre des modélisations GARDENIA, il a été décidé de prendre en compte les résultats de cette enquête, pour l'interprétation, même si ces données sont à prendre avec précautions. **Ainsi, pour l'année 2004, la pression anthropique en terme de prélèvements peut être évaluée à 4.05 Mm³, soit 125 l/s, sur le bassin versant de la Seulles. Ce débit sera comparé au débit de fuite optimisé par le modèle.**

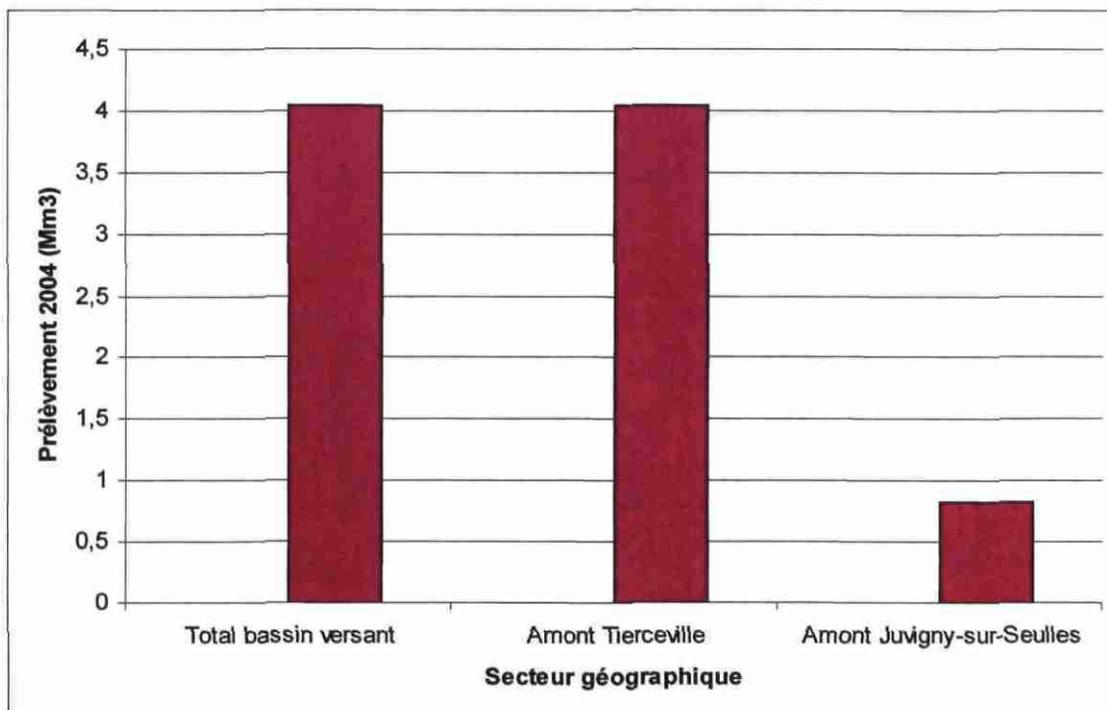


Illustration 10 : Répartition géographique des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Seulles (sources : AESN, DDAF du Calvados)

3.3. DONNEES METEOROLOGIQUES

Il est rappelé que les données d'entrée du modèle hydrologique global GARDENIA sont, pour cette étude, les données de précipitations et d'ETP. Les données climatologiques ont été obtenues auprès de Météo France pour les stations disposant d'historiques les plus longs possibles (Illustration 11) :

- Saint-Gabriel-Brecy : précipitations de janvier 2000 à décembre 2005 ;
- Saint-Vigor-le-Grand : précipitations de janvier 1992 à décembre 2005 ;
- Bernières-sur-Mer : précipitations et ETP d'août 2001 à décembre 2005 ;
- Caen Carpiquet : précipitations et ETP d'août 1951 à décembre 2005.

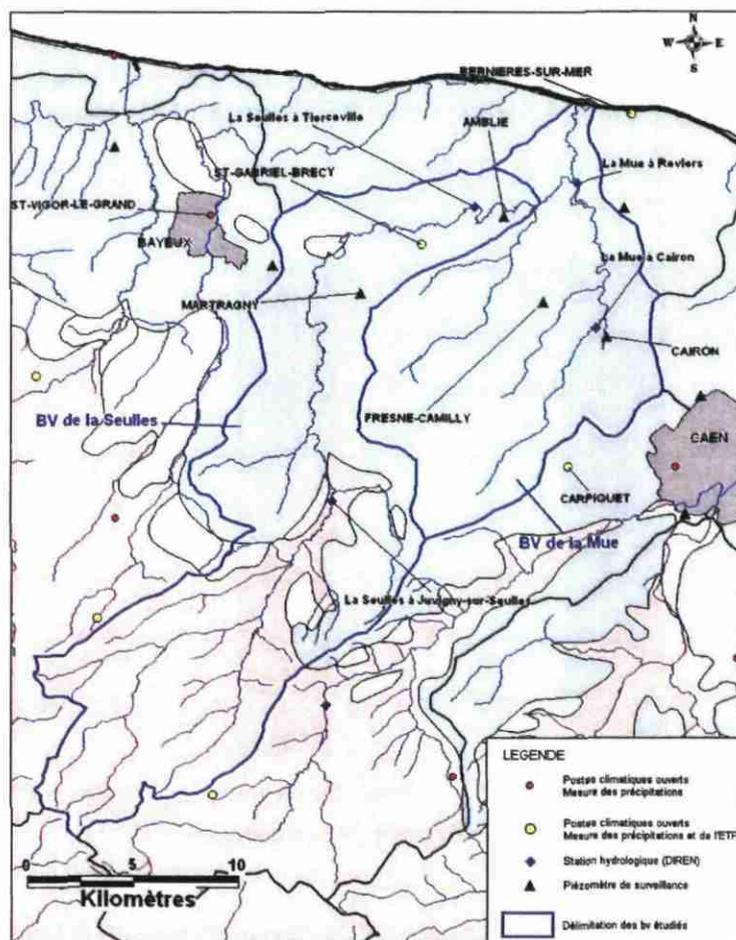


Illustration 11 : Stations de mesures utilisées pour la modélisation des bassins versants de la Seulles et de la Mue (sources : Météo France, DIREN, brgm)

Les données de précipitations des postes de Saint-Gabriel-Brecy, Saint-Vigor-le-Grand et Caen Carpiquet ont été comparées par une étude de corrélation et par la méthode des doubles cumuls. Cette dernière méthode, propre à l'hydrologie, compare plusieurs échantillons acquis à différentes stations afin de détecter une éventuelle hétérogénéité. Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité de la somme des valeurs mesurées aux deux stations.

Comme indiqué par l'illustration 12, les précipitations des trois stations se corrélaient très bien sur leur période d'observations commune.

Les hauteurs de pluie mesurées à la station de Saint-Gabriel-Brecy, implantée dans l'emprise du bassin versant de la Seulles, sont quasiment toujours supérieures d'environ 10 % à celles mesurées à Caen-Carpiquet.

L'illustration 13 représente les cumuls annuels (année civile) des précipitations et de l'ETP pour la station de Caen Carpiquet sur la période 1970-2005. Pour ce qui est des précipitations annuelles, on enregistre une valeur minimale de 455 mm en 1989, maximale de 992 mm en 1960 pour une moyenne inter-annuelle de 721 mm. Sur les dernières décennies, ce graphique montre :

- des années particulièrement sèches en 1972, 1976, 1989 et 1996 avec des précipitations annuelles inférieures à 550 mm ;
- et des années très humides en 1982, 1994 et 2000 avec des précipitations annuelles supérieures à 900 mm.

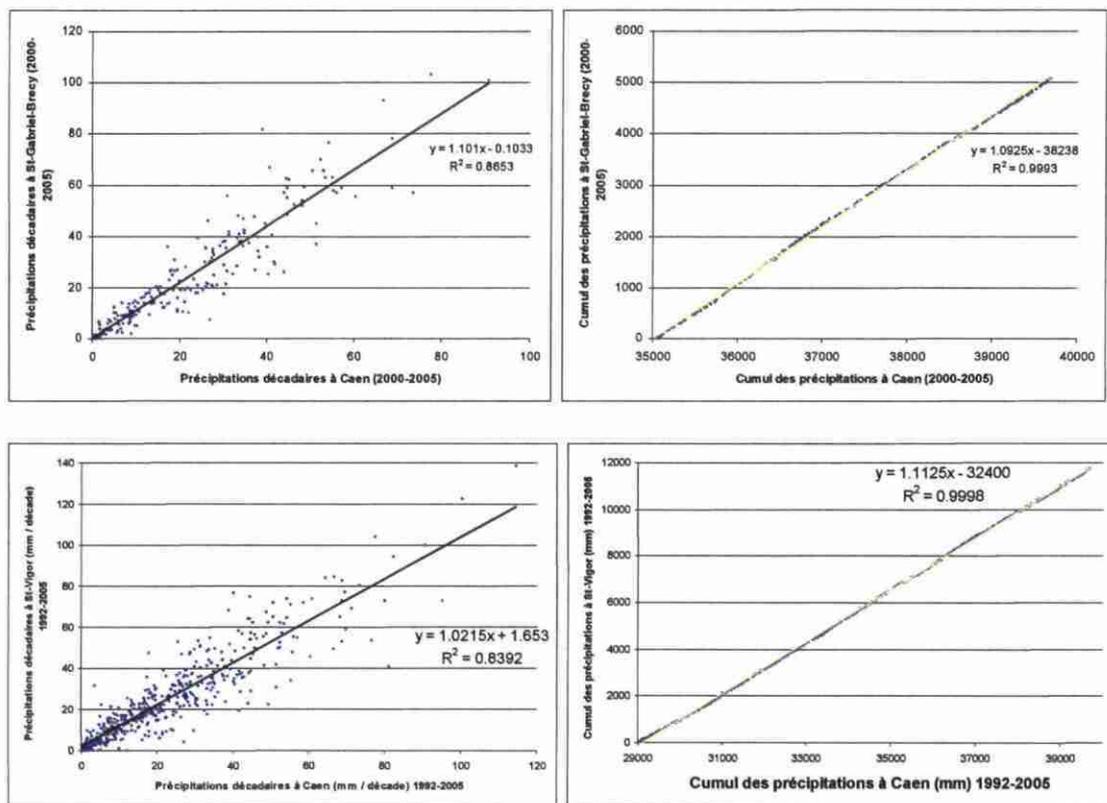


Illustration 12 : Comparaison des précipitations sur St-Gabriel-Brécy, St-Vigor-le-Grand et Caen Carpiquet (source : Météo France)

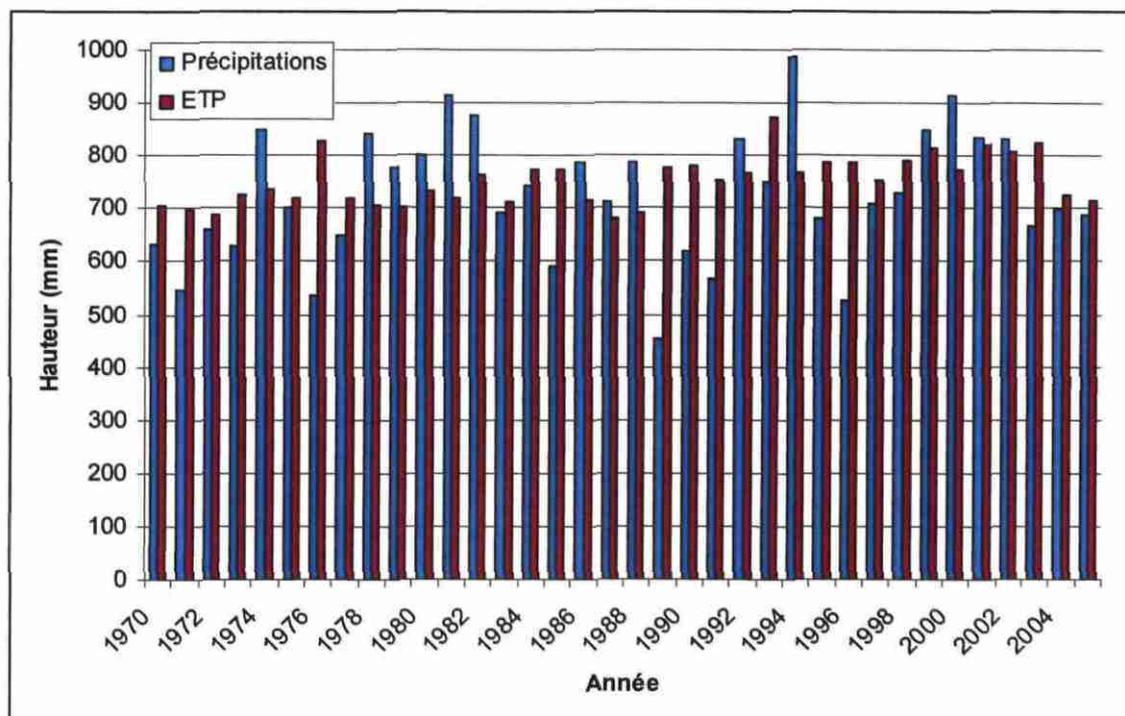


Illustration 13 : Répartition annuelle des précipitations et de l'ETP sur la station climatique de Caen-Carpiquet (source : Météo France).

Dans le cadre de la gestion d'une ressource en eau souterraine, il est nécessaire de différencier les précipitations d'hiver (entre octobre et avril) des précipitations d'été (entre mai et septembre) : les précipitations d'hiver donnent lieu à une précipitation efficace qui alimente les nappes. Les précipitations d'été ne produiront pas de précipitations efficaces (sauf évènement pluvieux exceptionnel) mais seront utiles pour l'agriculture dont les besoins sont alors maximums.

Les modélisations pluie-débit et pluie-niveau permettront ultérieurement d'évaluer mois par mois la pluie efficace sur le bassin versant.

Néanmoins, en première approximation, on peut se référer à la carte de France des précipitations efficaces moyennes annuelles calculées sur la période 1946-2001 établie par le MEDD (Illustration 14). Sur le bassin versant de la Seulles, la lame d'eau moyenne annuelle des précipitations efficaces se répartit en 3 grands domaines :

- de 180 à 200 mm sur la bordure Est ;
- de 250 à 400 mm sur la bordure Ouest ;
- et de 400 à 500 à l'extrémité amont du bassin versant (reliefs en domaine de socle).

On note ainsi une forte variabilité des précipitations, essentiellement dictée par les reliefs et la distance à la mer.

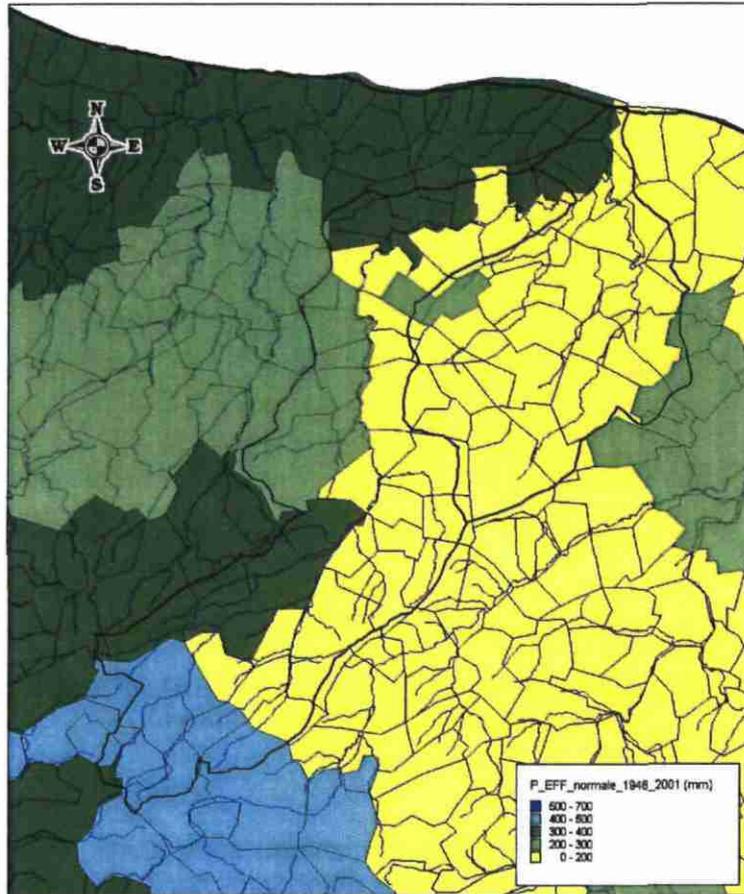


Illustration 14 : Répartition de la pluie efficace annuelle moyenne (1946-2001) sur les bassins versants de la Seulles et de la Mue (source : MEDAD)

Pour les modélisations GARDENIA, il a été décidé de retenir la station de Carpiquet qui dispose des chroniques de pluie et d'ETP les plus longues et à un pas de temps plus fin. L'utilisation de cette station est justifiée compte tenu des bonnes corrélations obtenues avec les stations plus proches de la zone d'étude. Un coefficient de correction global compris entre 10 et 15% a, cependant, du être affecté aux valeurs de pluie (Illustration 12).

3.4. DONNEES DE DEBIT

Pour la Seulles, les valeurs de débits moyens journaliers sont disponibles au droit de deux stations hydrométriques gérées par la DIREN Basse-Normandie (Illustration 11) : à **Juvigny-sur-Seulles (amont)** et à **Tierceville (aval)**. Les fiches signalétiques de ces stations sont consultables sur internet (<http://www.hydro.eaufrance.fr>).

Station	Début suivi	Fin de suivi	Superficie BV (km ²)
Juvigny-sur-Seulles	29/09/1981	En cours	133
Tierceville	28/09/1971	En cours	254

Illustration 15 : Caractéristiques des deux stations de jaugeage suivies par la DIREN Basse-Normandie sur la Seulles

Un contrôle d'homogénéité des débits a été effectué en réalisant des études de corrélation et de doubles cumuls sur leur période commune d'observation (du 29/09/1981 au 31/12/2005) (Illustration 16).

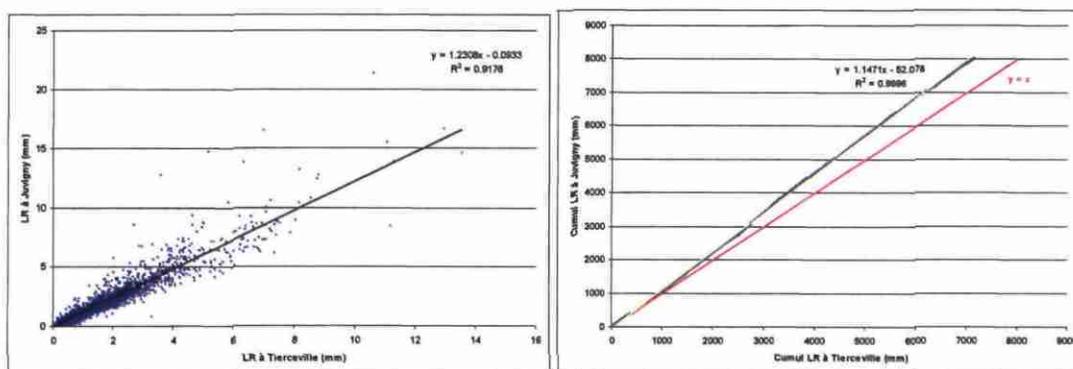


Illustration 16 : Comparaison des lames d'eau journalières ruisselées à Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)

Les graphiques résultats montrent une bonne corrélation entre les deux stations avec des lames d'eau ruisselées journalières (débits rapportés à la superficie du bassin versant contrôlé) supérieures d'environ 15 % à la station, amont, de Juvigny-sur-Seulles. Cette dernière contrôle, en effet, un bassin versant en domaine de socle, beaucoup moins infiltrant que les terrains sédimentaires présents à l'aval.

Les débits caractéristiques de la Seulles au niveau de ces deux stations de jaugeage sont reportés dans le tableau suivant :

Définition	Juvigny-sur-Seulles		Tierceville	
	Q(m3/s)	LR (mm)	Q(m3/s)	LR (mm)
Journalier moyen	1.54	1	2.57	0.87
Journalier minimal	0.012 (03/09/90)	0.0078	0.115 (19/08/76)	0.039
Journalier maximal	32.9 (26/01/95)	21.4	38.1 (25/01/95)	13.0
Instantané maximal	38.1 (05/12/1988)	24.7	38.8 (26/12/99)	13.2

Illustration 17 : Débits et lames d'eau ruisselées caractéristiques de la Seulles aux stations hydrologiques de Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)

Aucun assec ne semble avoir été observé au droit des deux stations de jaugeage étudiées. Comme annoncé précédemment, le cours d'eau se montre, cependant, beaucoup plus sensible aux étiages en domaine de socle avec une baisse très rapide du débit (Illustration 18). En revanche, en période de crue, la contribution de ce bassin versant amont devient prépondérante.

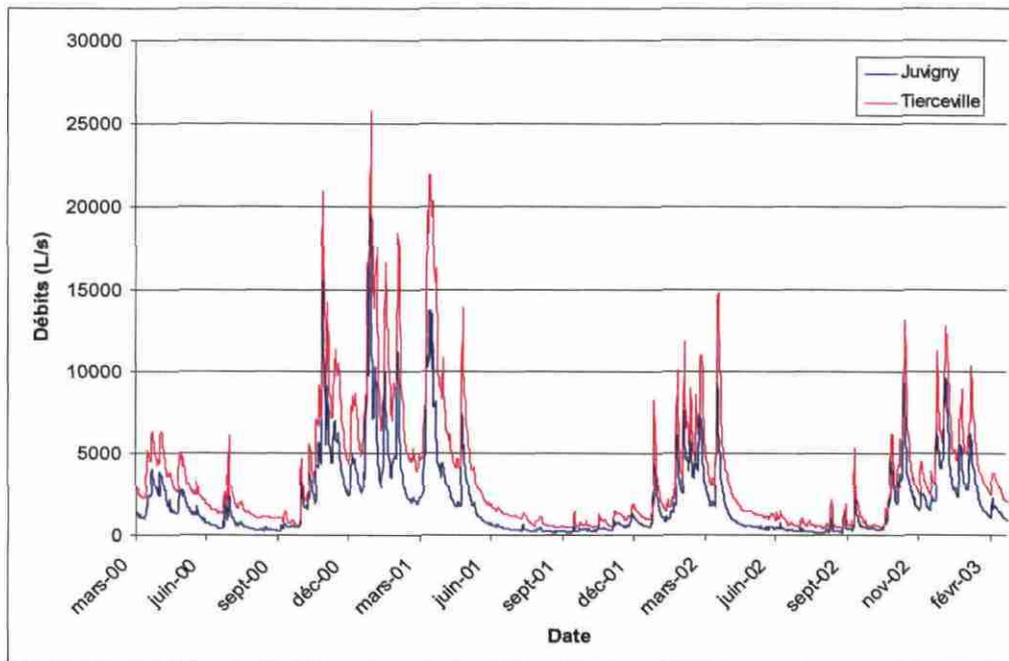


Illustration 18 : Comparaison entre les débits à Juvigny-sur-Seulles et Tierceville (source : DIREN BNO)

3.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE

Un piézomètre du réseau de surveillance patrimonial Seine-Normandie, à Martragny, suit la nappe des calcaires du Bajocien à l'intérieur du bassin versant de la Seulles. Ce dernier est suivi depuis 1974. Pour cet aquifère, il est également à noter le piézomètre d'Amblie qui a été suivi par la DIREN de 1974 à 2001.

Ces deux ouvrages captant le même aquifère et présentant le même comportement (Illustrations 19 et 20), il a été décidé de retenir uniquement celui de Martragny pour une modélisation pluie-niveau (chronique plus longue).

Le piézomètre de Martragny, d'une profondeur de 22 m, est implanté en plateau, à une altitude de 51 m, et à une distance de la Seulles de l'ordre de 2 km. Le pas de temps d'acquisition des données est mensuel. Cet ouvrage sera équipé en 2007 pour une acquisition quotidienne.

Les fluctuations piézométriques enregistrées au droit de ces deux puits présentent un régime de fluctuation annuel : les variations saisonnières sont nettement plus marquées que les variations pluri-annuelles. Les niveaux piézométriques ne sont pas plafonnés, ni en valeur minimale ni en valeur maximale ; et les années de très hautes eaux (1982-1983 ; 1988, 1995 et 2001) et les principaux étiages (1976, 1990, 1996 et 2004-2005) sont bien mis en évidence.

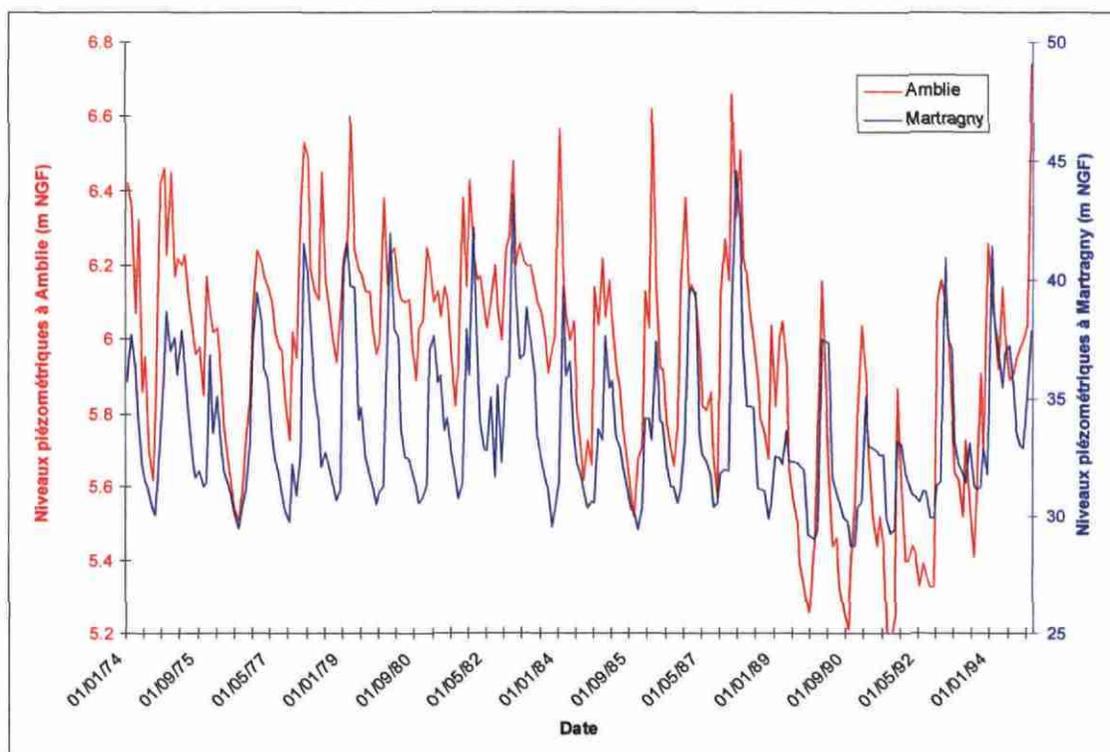


Illustration 19 : Comparaison entre les niveaux piézométriques à Martragny et à Amblie entre 1974 et 1994 (source : DIREN BNO, brgm)

Des fluctuations annuelles très marquées indiquent localement un aquifère transmissif. Dans le cas de Martragny, il est probable que les calcaires bajociens soient karstifiés.

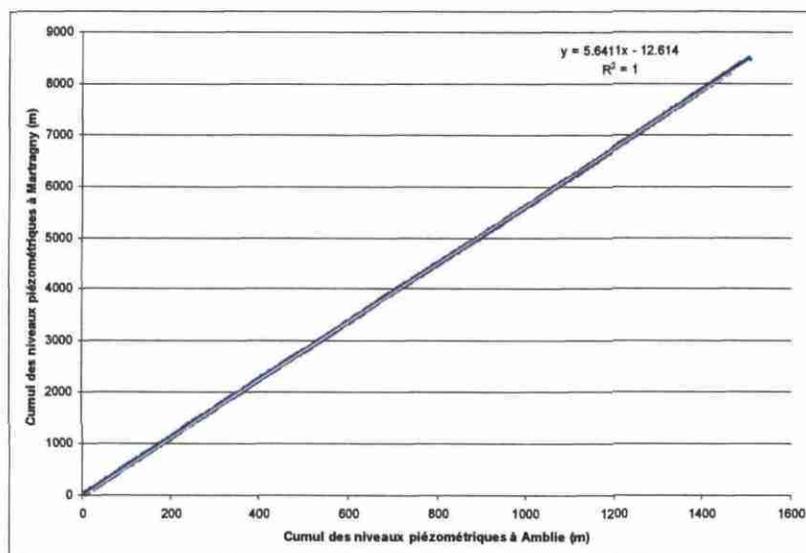


Illustration 20 : Double cumul des niveaux piézométriques à Martragny et à Amblie (source : DIREN BNO, brgm)

A noter qu'aucun piézomètre ne suit les aquifères de socle sur le bassin versant de la Seulles.

3.6. MODELISATION SUR LE BASSIN VERSANT DE LA SEULLES

Le pas de calcul retenu pour la modélisation GARDENIA est décadaire. Il permet d'avoir une évaluation suffisante de la pluie efficace sur les bassins versants et de répondre aux objectifs de notre étude.

3.6.1. Modélisation pluie-débit

Pour les modélisations pluie-débit, l'aire de représentativité du modèle correspond à la surface du bassin versant défini par rapport à la localisation de la station de jaugeage. Les superficies des bassins versants topographiques contrôlés par les stations de Tierceville et de Juvigny-sur-Seulles sont respectivement de 254 km² (soit 95 % du bassin versant total) et de 133 km² (soit 50 % du bassin versant total).

Le calage du modèle a été effectué sur les valeurs décadaires des débits de la Seulles entre 1982 et 2005 pour la station de Juvigny-sur-Seulles et entre 1972 et 2003 pour Tierceville. Les données climatiques antérieures (depuis 1952) ont servi à amorcer le modèle hydrodynamique.

Les paramètres de calage sont reportés en Annexe 1 avec le graphe résultat sur l'ensemble de la période de modélisation.

Calage à Tierceville

Avec un coefficient de corrélation de 0.908 sur la période 1972-2003, la restitution des débits observés (Illustration 21) est satisfaisante. Les débits calculés se superposent, en effet, bien aux débits observés.

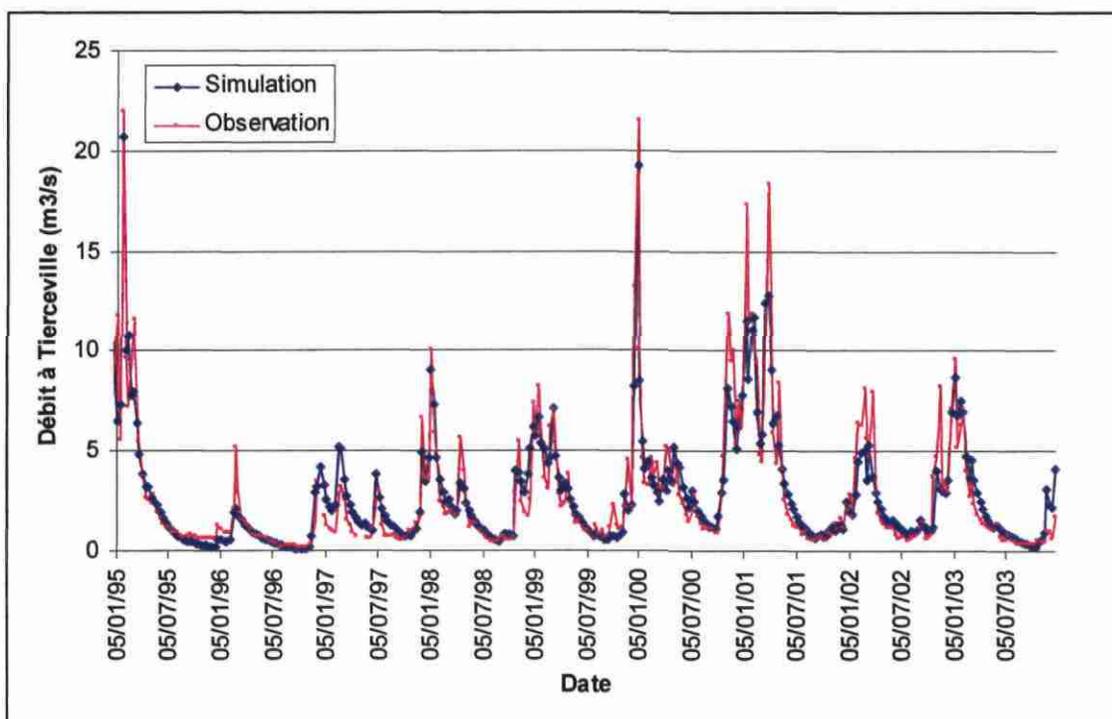


Illustration 21 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Seulles à Tierceville sur la période 1972-2003

Les périodes d'étiage sont très bien reproduites exceptée pour l'année 1997 où les débits simulés restent supérieurs aux débits observés. Les plus gros pics de crue sont, en revanche, un peu moins bien simulés avec une sous-estimation des débits de pointe. Ce dernier point s'explique par le choix du pas de temps décadaire qui ne permet pas de tenir compte des fortes variations journalières. Lorsque l'objectif d'une modélisation est l'étude des débits de crue, le calcul doit systématiquement se faire au pas de temps journalier.

Le calage pluie-débit sur la Seulles à Tierceville a permis d'identifier les données non mesurées tels que la pluie efficace et le débit de fuite. On obtient sur la période de simulation (1972-2003) **un débit de fuite de 28 L/s (négligeable) et une pluie efficace annuelle moyenne de 323 mm.**

Les variations saisonnières de la pluie efficace seront examinées par la suite (§ 3.7.1)

Le débit de fuite, ajusté automatiquement par le modèle, est supposé constant tout au long de l'année et correspond au flux non contrôlé à l'exutoire (débit souterrain + prélèvements en nappe). Dans le cas présent, le débit de fuite calculé peut être considéré comme négligeable, car il correspond à une lame d'eau annuelle de 3.4 mm ce qui est, en effet, très faible comparé aux incertitudes sur la pluie moyenne et l'ETP sur le bassin.

Le volume annuel des prélèvements pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie sur le bassin versant de la Seulles en amont de Tierceville qui s'élève à 4.05 Mm³, correspond à 128 L/s soit 5 % du débit moyen. Une importante partie de ces prélèvements retournant au milieu, il n'est pas surprenant que le débit de fuite calculé soit inférieur aux prélèvements, en particulier pour ces ordres de grandeur.

Calage à Juvigny-sur-Seulles

Avec un coefficient de corrélation de 0.912 sur la période 1982-2003, la restitution des débits observés est également satisfaisante. L'illustration 22 présente la représentation graphique des débits simulés et observés sur la période 1995-2003 (période identique à celle représentée pour Tierceville).

La comparaison des deux chroniques amène au même constat que sur Tierceville : très bonne représentation des débits d'étiage et légère sous-estimation des débits de pointe.

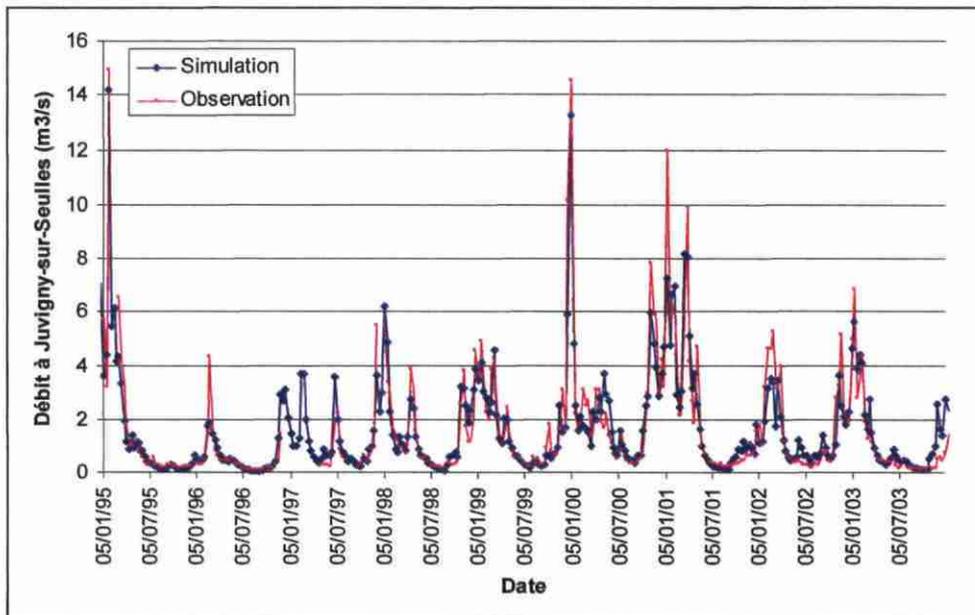


Illustration 22 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles sur la période 1982-2003

Le calage pluie-débit sur la Seules à Juvigny-sur-Seules a permis d'identifier sur la période de simulation (1982-2005) **un débit de fuite de 11 L/s (négligeable) et une pluie efficace annuelle moyenne de 360 mm**. Etant données des précipitations plus abondantes sur l'amont du bassin, cette dernière valeur est normalement supérieure à celle calculée par la modélisation pluie-débit à Tierceville.

Le volume annuel des prélèvements en amont de Juvigny-sur-Seules qui s'élève à 0.83 Mm³ correspond à 26 L/s, soit seulement 1.8 % du débit moyen.

De façon encore plus marquée que pour Tierceville, le débit de fuite pour le bassin versant à l'amont de Juvigny-sur-Seules apparaît négligeable.

3.6.2. Modélisation pluie-niveau

La modélisation pluie-niveau a été réalisée pour le piézomètre de Martragny (nappe des calcaires bajociens) sur la période 1974-2003 au pas de temps décadaire. Les données climatiques antérieures (depuis 1952) ont servi à amorcer le modèle hydrodynamique.

Les paramètres de calage sont reportés en Annexe 1 avec le graphe résultat sur l'ensemble de la période de modélisation.

Le meilleur calage a été obtenu avec un coefficient d'ajustement de 0.914.

L'illustration 23 présente les résultats du calage sur la période 1985-2003. On peut constater que les fluctuations piézométriques sont globalement bien reproduites par le modèle à quelques exceptions près :

- les niveaux piézométriques sont légèrement sous-estimés sur les pics des plus hautes eaux (84-85, 86-87, 92-93, 94, 2000 et 2001) ;
- les niveaux piézométriques sont surestimés sur les périodes d'étiage 1991 et 1996 ;
- les niveaux piézométriques sont, au contraire, sous-estimés sur les périodes d'étiage 1993 et 1999.

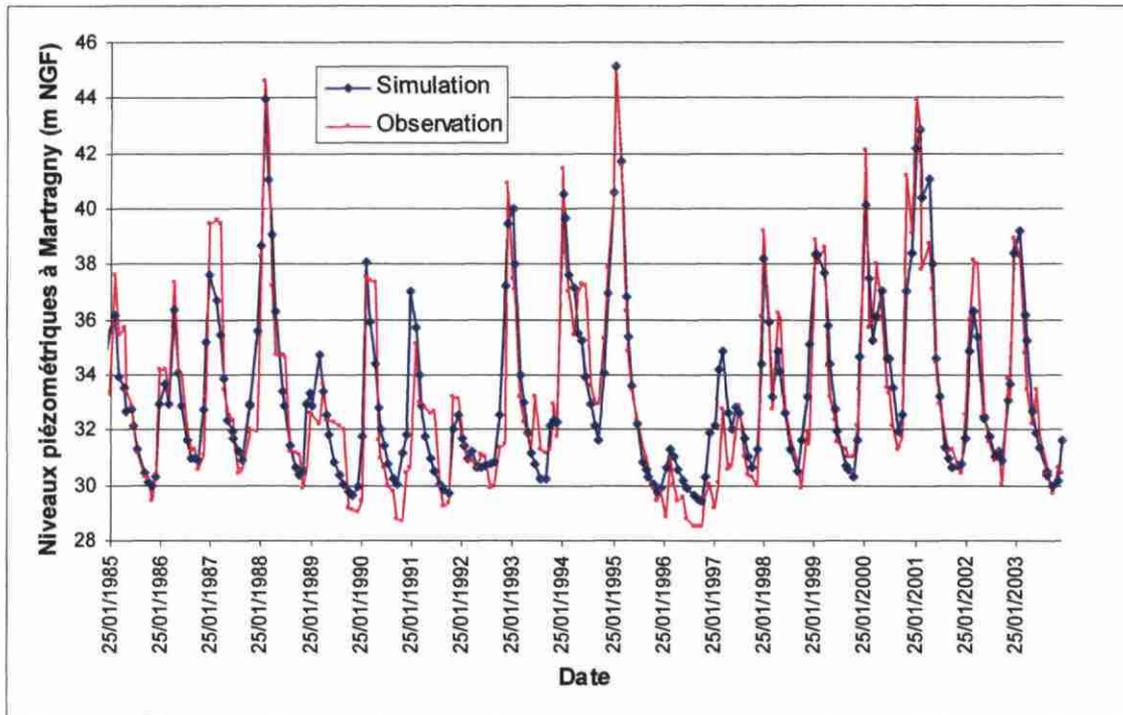


Illustration 23 : Visualisation sur la période 1985-2003 du calage pluie-niveau à Martragny sur la période 1974-2003

Sur la base de ce calage, la **pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1974-2003 est de 241 mm**. Le piézomètre de Martragny est situé dans la partie aval du bassin versant où les précipitations sont moins importantes (Illustration 14).

Enfin, le calage a été obtenu avec un coefficient d'emmagasinement global de $7 \cdot 10^{-4}$. A titre indicatif, une seule valeur d'emmagasinement est disponible en BSS pour l'aquifère bajocien sur le bassin versant de la Seulles : $2.5 \cdot 10^{-4}$ au droit de l'ouvrage référencé 01193X0189 sur la commune d'Amblie (extrémité amont du bassin versant de la Seulles). Attention, le coefficient d'emmagasinement GARDENIA, correspondant plus à un coefficient d'influence globale des fluctuations de stock sur le niveau piézométrique à Martragny, ne peut être relié à une interprétation de pompage d'essai dont la validité reste locale et très souvent réalisé sur une courte période. Le coefficient d'emmagasinement GARDENIA peut éventuellement être égal au coefficient d'emmagasinement moyen de la nappe si le point d'observation est situé loin de tout cours d'eau. En tout état de cause, le coefficient d'emmagasinement global calculé par GARDENIA apparaît réaliste.

3.7. BILAN HYDROLOGIQUE

En définitive, les trois modélisations présentées précédemment font apparaître des calages tout à fait satisfaisants et cohérents entre eux du point de vue des débits de fuite, de l'estimation de la pluie efficace et des paramètres de calage.

Les temps de demi-percolation et de demi-tarissement, respectivement compris entre 1 et 2.5 mois et 0.2 et 1.2 mois, indiquent une inertie relativement faible des aquifères du bassin versant. Ces paramètres de calage sont en accord avec le contexte hydrogéologique du bassin : nappe peu profonde, calcaires fissurés à karstiques.

Le bilan hydrologique proposé dans le présent paragraphe repose sur le calage pluie-débit de la Seules à Tierceville (période de simulation 1972-2003). En effet, le calage pluie-débit est représentatif de l'ensemble du bassin versant contrôlé par la station de jaugeage, tandis que le calage pluie-niveau reste une représentation plus ponctuelle. La superficie du bassin versant en amont de Tierceville représente 95 % de la superficie totale du bassin versant de la Seules, les résultats peuvent ainsi être étendus à l'ensemble du bassin sans trop de difficulté.

3.7.1. Recharge hivernale

Les résultats de la modélisation comprennent une chronique de précipitation efficace au pas de temps mensuel sur la période 1972-2003 (Illustration 24). Les précipitations efficaces obtenues, à l'échelle de l'année hydrologique (octobre à septembre), varient entre un minimum de 71 mm (hiver 95-96) et un maximum de 637 mm (hiver 200-2001) pour une moyenne interannuelle de 326 mm.

Il est à signaler que cette valeur moyenne de 326 mm n'est pas forcément comparable avec les valeurs proposées par le MEDAD (de l'ordre de 260 mm sur la période 1946-2001) et par la DIREN Basse-Normandie (de l'ordre de 280 mm).

Sur les 32 années modélisées, on compte :

- 7 hivers humides, où la précipitation efficace annuelle a été supérieure à 400 mm : 1974-1975, 1982-1983, 1987-1988, 1993-1994, 1994-1995, 1999-2000 et 2000-2001 ;
- 9 hivers secs, où la pluie efficace annuelle a été inférieure à 250 mm : 1972-1973, 1973-1974, 1975-1976, 1984-1985, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991, 1991-1992 et 1995-1996 ;
- 15 hivers « moyens », où la pluie efficace a été comprise entre 250 et 400 mm.

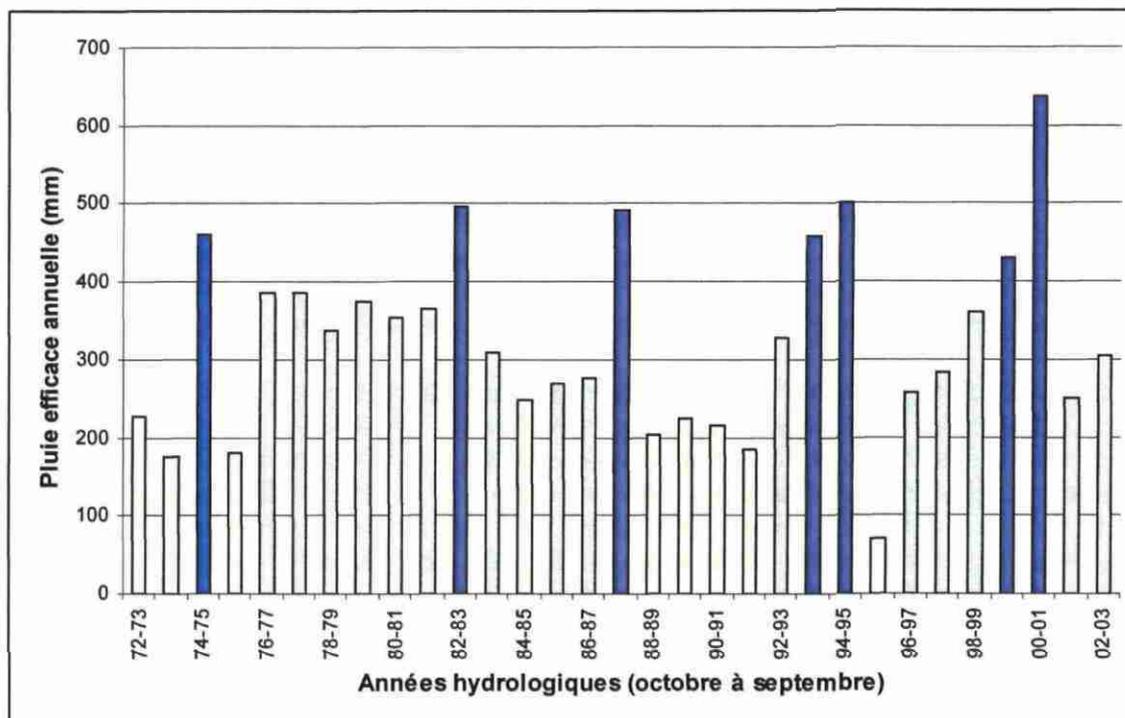


Illustration 24 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation sur le bassin versant de la Seulles)

L'illustration 25 présente les variations mensuelles des précipitations efficaces. En moyenne, plus de 80 % des précipitations efficaces calculées se répartissent entre les mois d'octobre et mars. Les pluies efficaces les plus importantes sont en général enregistrées en décembre et janvier avec des valeurs mensuelles moyennes respectives de 65 et 58 mm.

Le modèle calcule de légères pluies efficaces en période estivale, mais les pluies efficaces mensuelles moyennes ne dépassent alors pas 10 mm de juin à septembre. Elles sont dues à des événements pluvieux exceptionnels : par exemple, les 164 mm d'eau précipités en juin 1997 (dont 95 mm pendant la troisième décade) ont engendré une pluie efficace mensuelle de 54 mm d'après le modèle. Ces pluies efficaces estivales sont justifiées par des augmentations des débits et des niveaux piézométriques.

Année	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année hydrologique	Total
1972	43.7	66.7	27.2	17.1	4.4	0	0	0	16.1	6.9	95.6	12.2		
1973	24.2	39	0	4.1	17	6	3.3	0.1	18.7	10.6	30.2	33.1	72-73	227
1974	31.5	5.4	11.9	0.4	0	20.6	0	0.1	32.9	146.4	97.2	26.6	73-74	177
1975	41.5	9.5	72.8	19.5	23.4	0	0	7.7	17.6	13.6	71.2	30.7	74-75	462
1976	20.9	25.7	6.2	0	0	0	0	0	11.6	53.8	63.4	70.4	75-76	180
1977	80.2	44	33	26.3	14.3	0.6	0.5	0.3	0	0	39	28.3	76-77	387
1978	67.4	94	68.3	14.6	5.6	5	52.4	12.6	0	0	0.1	84.1	77-78	387
1979	37.4	84.7	88.6	7.4	10.4	23.6	0	0.2	0	1.5	44.3	105.6	78-79	337
1980	36.8	69.7	68.3	0.8	4.9	13	27.9	1	0.6	26.6	29.2	56.6	79-80	374
1981	56.7	22.3	45.7	1.4	59.4	38.3	1.4	2.4	12.9	94.9	13.8	115.3	80-81	353
1982	42	8.8	40.3	9	0.9	8	31.2	1.4	0.7	58	68.4	136.4	81-82	366
1983	32.6	45.6	26.3	59.4	56	0	0	3.2	10.3	9.7	13.4	25.1	82-83	496
1984	143.5	21.4	40.4	1.3	22.8	0	0	0	31.6	22	72.1	35.6	83-84	309
1985	51.2	12.3	24.4	9.4	7.3	12	0	0.7	0	0	21	19.7	84-85	247
1986	84.2	11.2	75.5	24	5.2	0.1	3.6	1.5	24.4	16.5	50.4	89.6	85-86	270
1987	22	46.8	16.2	9	0.1	11.1	10.6	2	2.5	72.7	64.5	25.9	86-87	277
1988	147.7	84.9	81.8	2.9	11.3	0	0.4	0	0.2	9.4	26.7	63.1	87-88	492
1989	23.2	36.6	27.2	16.3	0	0	0.1	0	0	0	2.2	27.5	88-89	203
1990	61.8	118	0	15.5	0	0.2	0	0	0	5.7	58.6	50.8	89-90	225
1991	75.6	11.8	4.1	1.6	4.3	1.3	0	0	1.5	11	85.8	8.5	90-91	215
1992	0.2	3.3	17.7	6.1	4.6	7.6	9	21.5	9.8	82.6	72.2	70.4	91-92	185
1993	60.5	0	0	4	0	10.7	0.1	0	26.1	69.5	0.5	142.7	92-93	327
1994	65.1	40.4	17.8	45.2	27.6	8.5	14.3	14.3	11.9	26.8	72.9	117.4	93-94	458
1995	158.8	59.5	38.2	11.8	9.1	0	0	0	6	0	0.5	15.8	94-95	501
1996	0.7	45	4.1	0.7	2.9	0	0	0	1.2	0.7	58.6	47.2	95-96	71
1997	7.3	77.1	0	0	10.2	53.9	0	3.4	0	7.9	36.9	75.7	96-97	258
1998	80.1	0	12.1	48.9	0	0.9	0	0	21	56.3	31.4	82.7	97-98	284
1999	60.2	42.3	42.5	24.7	0	1.5	0	8.8	11	6.3	43	191.8	98-99	361
2000	4	27.4	32.8	35.1	55.9	0	24	1.5	8.1	64.6	104.9	76.5	99-00	430
2001	129.9	50.3	148.1	44.7	4.7	0	0.7	1.2	12.1	9.5	21.4	33.9	00-01	637
2002	28.5	73.2	33.9	0	2.9	12.4	1.4	17.1	16.4	12.1	62	78.3	01-02	251
2003	90.3	22.4	25	0.2	4.3	7.7	2.3	0	0	11.2	53.5	42	02-03	305
MIN.	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	8.5	MIN.	71
MAX.	158.8	118	148.1	59.4	59.4	53.9	52.4	21.5	32.9	146.4	104.5	191.6	MAX.	637
MOYENNE	58	42	38	15	13	9	7	4	10	31	47	65	MOYENNE	326

Illustration 25 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1972 à 2003 (en jaune : les valeurs mensuelles minimales, en bleu : les valeurs maximales)

3.7.2. Bilan hydrologique moyen

L'illustration 26 présente les différents termes du bilan hydrologique (§ 2.3) sur le bassin versant de la Seulles. Il s'agit d'un bilan annuel calculé à partir des données moyennes résultant du calage pluie-débit à Tierceville (période de simulation 1972-2003).

La moyenne des précipitations annuelles sur la période 1972-2003 est de 844 mm. La valeur moyenne de la pluie efficace annuelle calculée par le modèle est de **323 mm** pour une évapotranspiration réelle (ETR) moyenne de **521 mm**. Le calage du modèle a également permis de calculer l'écoulement rapide (131 mm) et l'écoulement lent (191 mm). Nous reviendrons sur la décomposition de l'écoulement, et ses variations saisonnières, dans le paragraphe suivant (§ 3.7.3). Attention, la lame d'eau du réservoir souterrain ne peut être interprétée comme un stock physique.

Le modèle calcule enfin un écoulement annuel moyen de **319 mm** à Tierceville pour un débit de fuite de **3 mm (non significatif)** (débit non contrôlé par la station de jaugeage = prélèvements + écoulement souterrain).

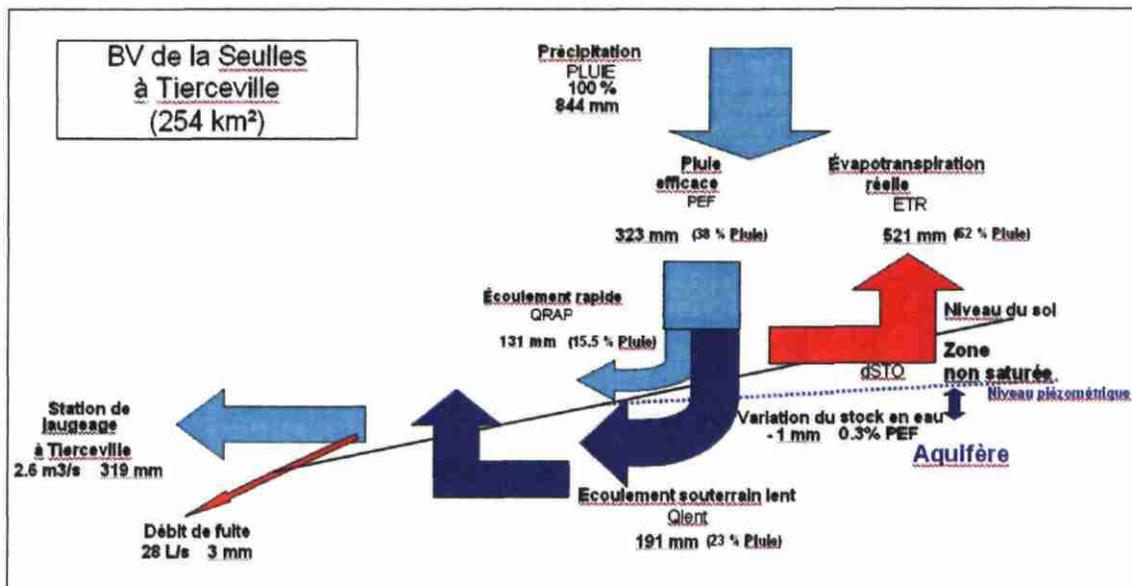


Illustration 26 : Eléments du bilan hydrologique de la Seulles à Tierceville (1972-2003) d'après les résultats de la modélisation GARDENIA pluie-débit

Le débit moyen interannuel de la Seulles, sur la période d'observation 1972-2003, est égal à **2.58 m³/s** à Tierceville. Cela correspond à un volume annuel écoulé de 81.4 Mm3 soit une lame d'eau de **317 mm**. Cette valeur est très proche de celle estimée par le calage du modèle.

En définitive, ce bilan moyen montre que les prélèvements en eau n'ont quasiment pas d'impact sur l'équilibre de la ressource en eau du bassin versant de la Seulles (de sa source à la confluence avec la Thue) en année moyenne.

A titre comparatif, le bilan hydrologique calculé à la station de Juvigny-sur-Seulles sur la période 1982-2005 donne les résultats suivants :

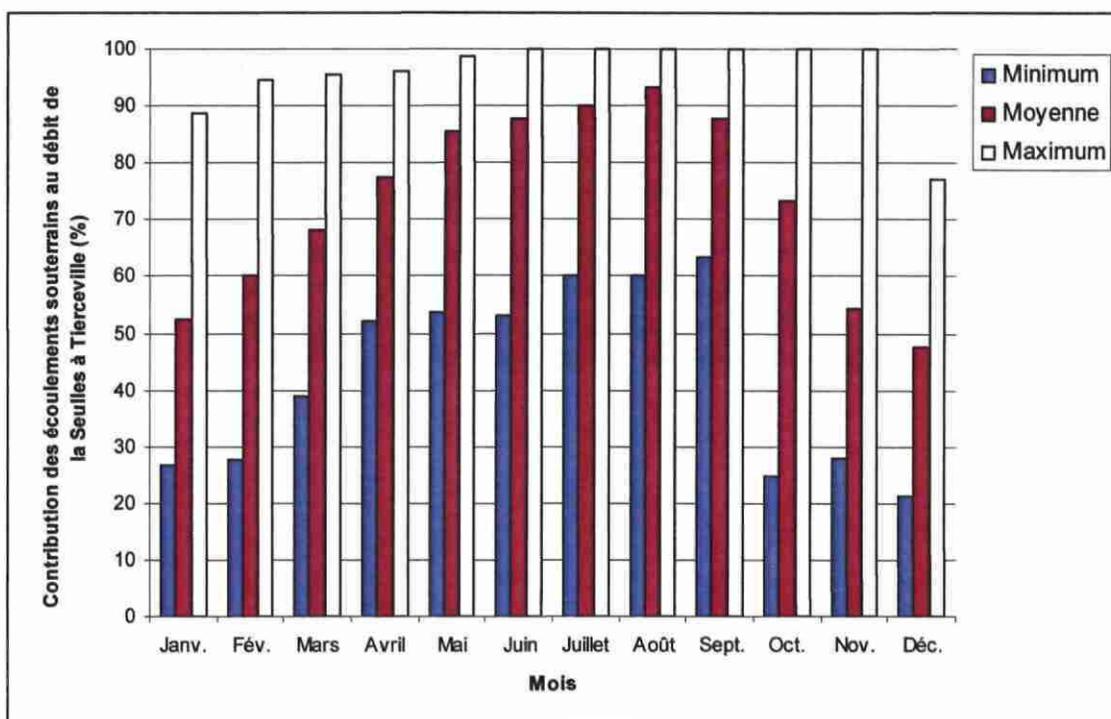
- une précipitation annuelle moyenne de 876 mm pour une pluie efficace de 360 mm (41 % pluie) et une ETR de 516 mm (59 % Pluie) ;
- une composante lente de l'écoulement de 133 mm (15 % Pluie) et une composante rapide de 227 mm (26 % Pluie) soit une contribution moyenne des écoulements lents à l'alimentation du cours d'eau de 37 % ;
- un débit de fuite de 11 L/s, soit une lame d'eau annuelle de 3 mm.

La station de Juvigny-sur-Seulles contrôle un bassin versant essentiellement composé de terrains cristallins. C'est pourquoi, contrairement au bilan calculé à Tierceville, on retrouve une prédominance des écoulements rapides (ruissellement).

3.7.3. Décomposition des écoulements

Le calage du modèle pluie-débit permet de décomposer l'écoulement à la rivière en écoulement rapide (ruissellement rapide + écoulement karstique rapide) et en écoulement lent souterrain (contribution des aquifères au débit de la rivière).

Ces résultats doivent être pris avec précautions, car il n'y a pas de certitude dans le fait d'assimiler les écoulements identifiés comme lents aux écoulements souterrains. Cette décomposition permet, cependant, de dégager des informations tendancielle sur l'alimentation du cours d'eau par la nappe.



	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Min.	27	28	39	52	54	53	60	60	63	25	28	21
Max.	89	95	95	96	99	100	100	100	100	100	100	77
Moyenne	52	60	68	77	85	88	90	93	88	73	54	47
Ecart-Type	15.9	16.5	14.1	12.8	11.7	10.9	11.2	9.2	11.9	23.8	20.2	12.9

Illustration 27 : Contribution des écoulements lents (souterrains) au débit de la Seulles à Tierceville (1972-2003)

A l'analyse des variations saisonnières des écoulements lents (Illustration 27), plusieurs constats peuvent être faits à titre indicatif :

- pour la période 1972-2003, le modèle calcule une contribution minimale des écoulements souterrains lents au débit de la Seulles de 21 %, une contribution maximale de 100% et une contribution moyenne de 73 % ;

- en période d'étiage (mai à septembre), le débit de la Seulles est en grande partie assuré par les écoulements souterrains : de 85 à 93 % en moyenne. L'analyse statistique des données montre que les écarts interannuels sont les plus faibles pour ces périodes : en effet, quelque soient les précipitations (sauf pluies exceptionnelles), la part du ruissellement reste en général faible ;
- en période de recharge hivernale, la contribution des écoulements souterrains au débit de la Seulles est logiquement plus faible : de 47 à 60 % en moyenne. Les écarts interannuels sont, en revanche, plus importants : la part du ruissellement est fortement dépendante des précipitations hivernales. La part du ruissellement peut, par exemple, varier entre 5% (février 1992) et 72 % (février 1990).

A titre comparatif, d'après le calage pluie-débit obtenu à Juvigny-sur-Seulles, la contribution mensuelle des écoulements lents au débit de la rivière varie de 19 à 92 % pour une moyenne de 50 %. Ces plus faibles valeurs traduisent des ruissellements plus importants sur l'amont du bassin versant dont le sous-sol est constitué de schistes briovériens (moins perméables que les calcaires présents à l'aval).

Comme annoncé précédemment, les nappes bajociennes et bathoniennes permettent de soutenir le débit de la Seulles en période d'étiage. Aucun assec ne semble avoir été observé sur les deux stations de jaugeage étudiées même pour les étiages les plus sévères où les ruissellements ont été nuls pendant plusieurs mois (1976, 1989, 1990, 1996).

4. Application au bassin versant de la Mue

4.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant de la Mue, comme identifié par l'AESN, est composé de la Mue de sa source à son embouchure et de la Thue, son principal affluent (Illustration 1). La Mue prend sa source sur la commune de Cheux à une altitude approximative de 80 m NGF.

L'altitude moyenne du bassin versant est de 58 m NGF avec une altitude minimale de 0 m NGF et une altitude maximale de 120 m NGF. Le relief est très peu marqué sur ce bassin versant (Illustration 4).

D'un point de vue géologique et hydrogéologique, le bassin versant est caractérisé par trois domaines distincts (Illustrations 5 et 6) :

- l'extrémité amont du bassin où les calcaires bajociens affleurent : ils abritent une nappe libre dont la Mue et la Thue sont des résurgences. Plus en aval, cette nappe passe en captivité sous la formation des Marnes de Port-en-Bessin ;
- en bordure sud-ouest du bassin, on retrouve les Marnes de Port-en-Bessin à l'affleurement. La Thue et son affluent la Gronde circulent dans leur partie amont sur cette formation où elles sont alors déconnectées de la nappe du Bajocien ;
- enfin, la plus grande partie du bassin versant repose sur les calcaires bathonien qui abritent une nappe libre dont le plancher correspond aux Marnes de Port-en-Bessin.

Les nappes du Bajocien et du Bathonien permettent de soutenir les cours d'eau du bassin de la Mue, notamment en période d'étiage (excepté amont de la Thue et de la Gronde). A noter la présence de deux pertes karstiques au droit de la Chironne, affluent de la Mue en rive gauche (Illustration 6). Sur tout un tronçon, le ruisseau est ainsi perché par rapport à la nappe, drainée par un réseau karstique.

4.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS

Les données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie

D'après l'AESN, aucun prélèvement en eau de surface n'est à noter sur le bassin versant de la Mue entre 1994 et 2004. Quelque soit l'usage, il s'agit exclusivement de prélèvements en eaux souterraines.

Entre 1994 et 2004, l'exploitation de la ressource en eaux souterraine a connu différentes phases d'évolution : augmentation des prélèvements entre 1994 et 1996, diminution entre 1996 et 2001 et enfin croissance jusqu'en 2004. Ces tendances sont liées à l'évolution des prélèvements pour l'alimentation en eau potable.

En 2004, les prélèvements annuels se sont élevés à 5.2 Mm³, dont 99 % était destiné à l'AEP.

Les données de la DDAF du Calvados

D'après l'enquête de la DDAF du Calvados, les prélèvements hors AEP pourraient s'élever à 320 540 m³ (contre 59 890 pour l'AESN en 2004). Ces prélèvements concernent 15 des 34 communes du bassin versant et varient de 80 m³/an à 100 000 m³/an pour une moyenne de 11 872 m³/an.

Si on reporte ce volume aux prélèvements AEP de l'AESN pour l'année 2004, on obtient un prélèvement total de 5.44 Mm³, soit 172 l/s.

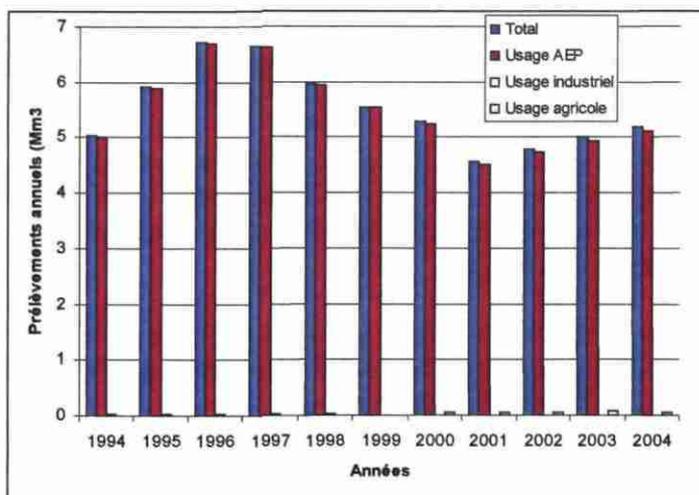


Illustration 28 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Mue entre 1994 et 2004 (source : AESN)

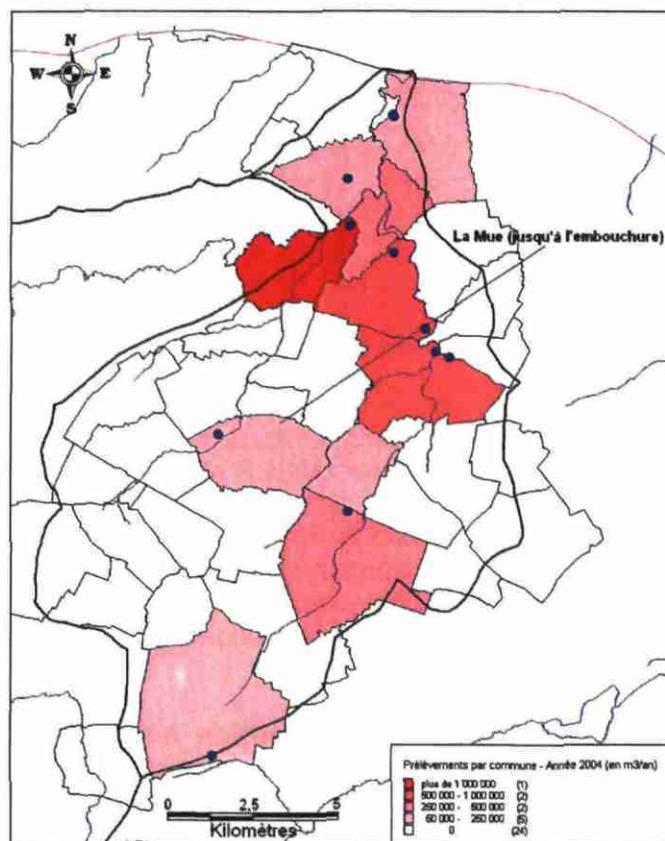


Illustration 29 : Carte des prélèvements par commune sur le bassin versant de la Mue (source : AESN, 2004)

4.3. DONNEES METEOROLOGIQUES

Les deux stations météorologiques les plus proches du bassin versant de la Mue sont (Illustration 11) :

- Bernières-sur-Mer à l'aval du bassin : précipitations et ETP d'août 2001 à décembre 2005 ;
- Caen Carpiquet à l'amont du bassin : précipitations et ETP d'août 1951 à décembre 2005.

Malgré la courte durée d'observation à Bernières-sur-Mer, les données de précipitations des deux postes ont été comparées par une étude de corrélation et par la méthode des doubles cumuls sur leur période commune d'observation (2001-2005). Comme indiqué par l'illustration 30, les résultats montrent une bonne corrélation et une bonne homogénéité des précipitations. Il semble, cependant, qu'une légère augmentation de la pluie à Bernières soit observée à partir de fin 2004 (changement de pente).

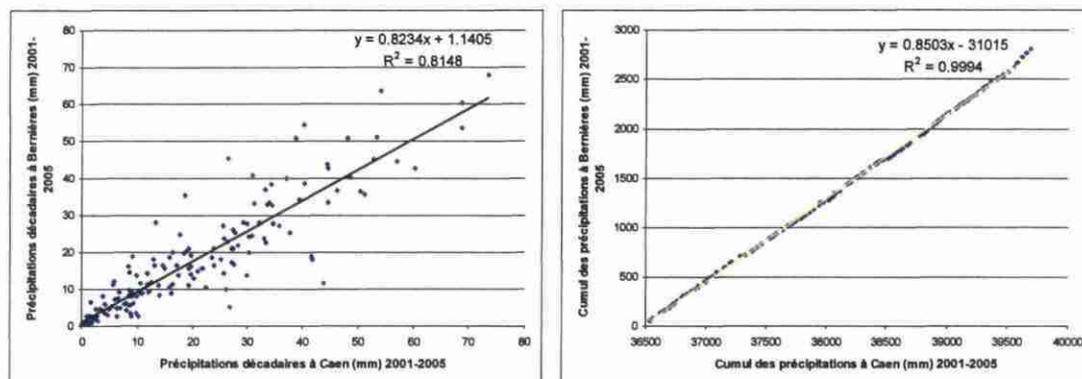


Illustration 30 : Comparaison des précipitations décennales à Bernières-sur-Mer et Caen Carpiquet (source : Météo France)

Comme dans le cas du bassin versant de la Seulles, les modélisations pluie-niveau et pluie-débit seront réalisées à partir des précipitations et ETP enregistrées à la station climatique de Caen-Carpiquet. En revanche, pour le bassin de la Mue, aucun coefficient correcteur ne sera appliqué car la station reste très proche de la zone d'étude.

L'illustration 14 présente par ailleurs une répartition homogène des précipitations efficaces sur l'ensemble du bassin versant.

4.4. DONNEES DE DEBIT

Le débit de la Mue est mesuré à la station de Reviers, gérée par la DIREN Basse-Normandie. Cette station est implantée à l'amont immédiat de la confluence entre la Seulles et la Mue, à une altitude de 10 m NGF. Elle enregistre les débits de la Mue depuis août 1970.

Les débits caractéristiques de la Mue au niveau de cette station de jaugeage sont reportés dans le tableau suivant :

Définition	Reviers (m ³ /s)
Débit journalier moyen	0.34
Débit journalier minimal	0
Débit journalier maximal	2.01 (02/05/01)
Débit instantané maximal	2.8 (16/12/04)

Illustration 31 : Débits caractéristiques de la Mue à la station hydrologique de Reviers (source : DIREN BNO)

L'illustration 32 présente la chronique des débits journaliers à Reviers sur la période 1969-2005. On peut observer des étiages très sévères dont une période d'assec du 4 au 9 janvier 1997. Sur la haute Mue, les périodes d'assec sont plus fréquentes avec une période de retour vicennale.

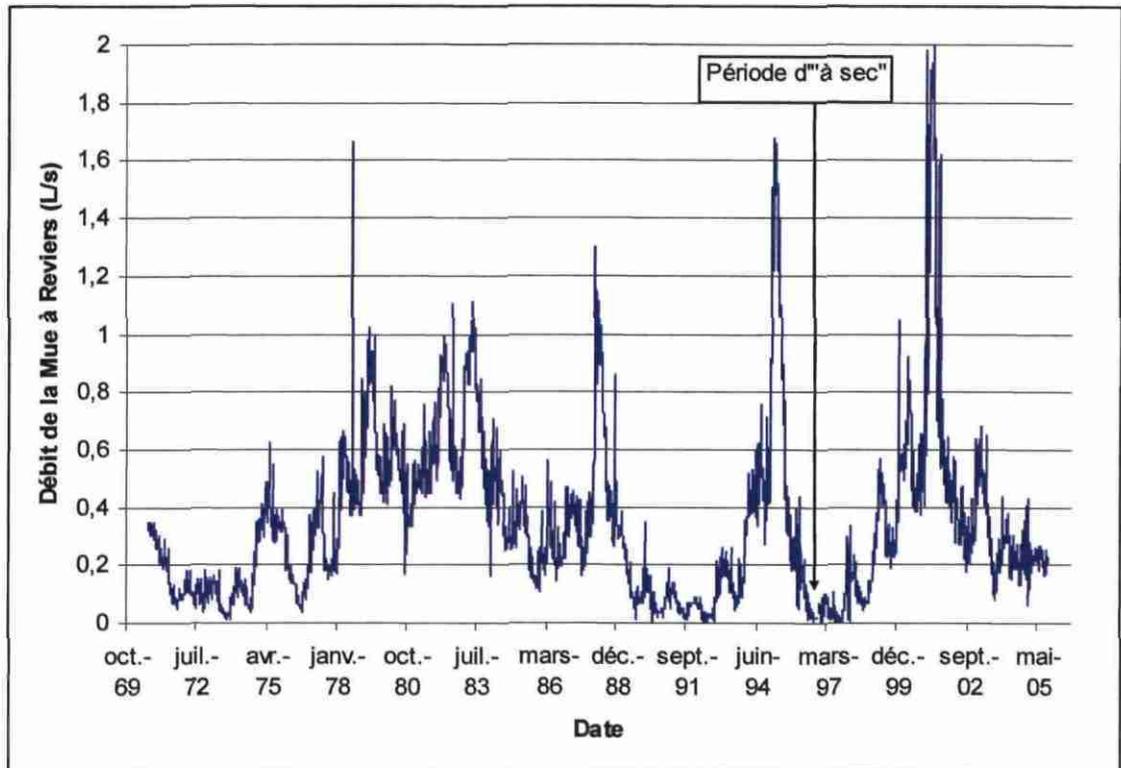


Illustration 32 : Débits de la Mue à la station hydrologique de Reviers (source : DIREN BNO)

4.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE

Sur le bassin versant de la Mue, la nappe des calcaires bathoniens est suivie par deux piézomètres du réseau de bassin Seine-Normandie (Illustration 11) : Cairon suivi depuis 1971 et Fresne-Camilly depuis 1977. L'évolution des niveaux piézométriques au droit de ces deux ouvrages est présentée sur l'illustration 33.

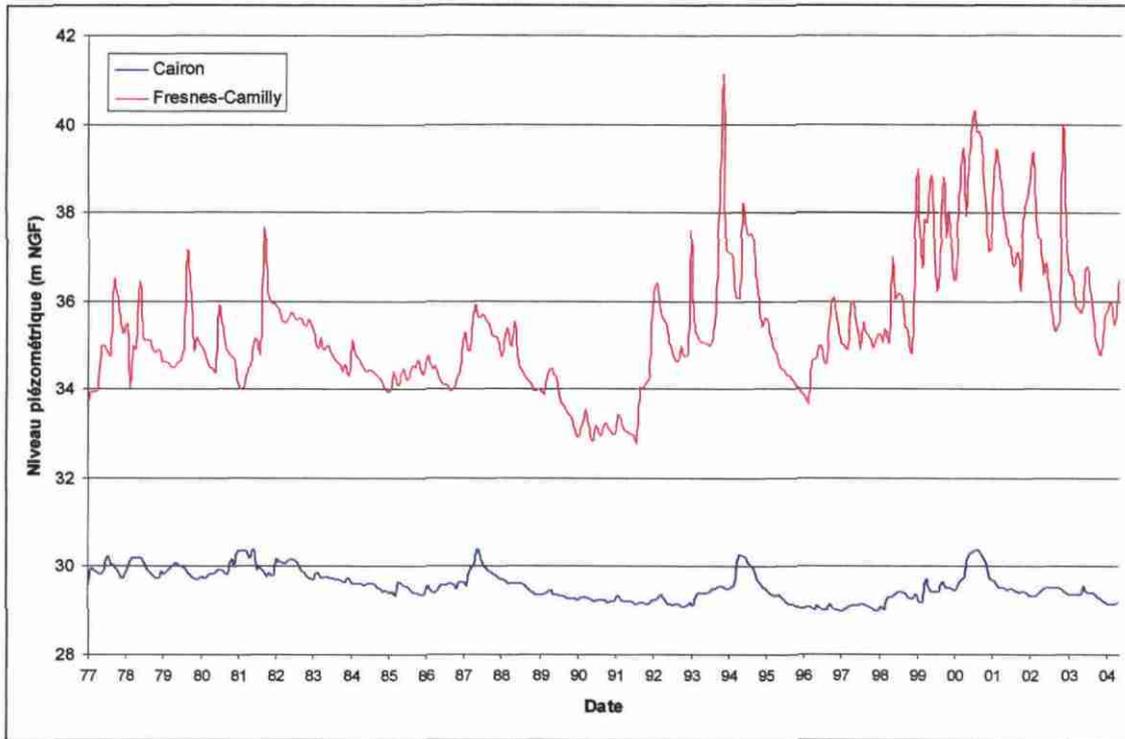


Illustration 33 : Evolution des niveaux piézométriques à Cairon et à Fresne-Camilly entre 1977 et 2004 (source : brgm)

Le piézomètre de Cairon est implanté en rive droite du ruisseau du Vey (affluent de la Mue) à une altitude de 34 m NGF et à une distance du ruisseau de l'ordre de 120 m. Ce ruisseau draine localement la nappe du Bathonien (Illustration 6).

Etant donné la proximité de l'exutoire, l'amplitude maximale des fluctuations piézométriques au droit de Cairon est faible : d'ordre métrique. Le régime de fluctuation de ce piézomètre correspond à un régime mixte, c'est-à-dire des fluctuations marquées aussi bien en fréquence annuelle qu'en fréquence pluri-annuelle.

A la vue de la chronique piézométrique, on constate une nette tendance à la baisse du niveau piézométrique, et notamment pendant les années 80 et le début des années 90. Cette baisse locale de la nappe est très probablement due aux pressions anthropiques exercées sur la ressource en eau souterraine. Ce point pourra être affiné lors de la modélisation pluie-niveau.

Le piézomètre de Fresne-Camilly est implanté en plateau, à une altitude de 48 m NGF, au sommet de l'interfluve séparant la Thue et la Chironne (rive gauche de la Mue). Le battement de la nappe au droit de ce piézomètre est plus important que pour Cairon : l'amplitude maximale des fluctuations piézométriques est de l'ordre de 7 m. L'ouvrage de Fresne-Camilly étant plus éloigné d'un cours d'eau drainant, la capacité de la nappe à fluctuer est, en effet, plus importante. Le régime de fluctuation de ce piézomètre correspond globalement à un régime mixte (superposition de cycles annuels et pluri-

annuels), mais on peut noter des alternances rapides de baisses et de hausses de niveau sur une même période de recharge. Ces fluctuations subites peuvent être indicatrices d'un aquifère localement karstique.

Une modélisation pluie-niveau sera testée pour chacun des piézomètres.

4.6. MODELISATION GARDENIA

4.6.1. Modélisation pluie-débit

La superficie du bassin versant topographique contrôlé par la station de Reviers est de 98 km². Le calage du modèle a été effectué sur les valeurs décennales des débits entre 1971 et 2005. A partir des données de précipitations et d'ETP à Caen-Carpiquet, le modèle a pu être amorcé sur une période de 19 ans (1952-1970).

Les paramètres de calage sont reportés en Annexe 2 avec le graphe résultat sur l'ensemble de la période de modélisation.

Calage à Reviers

Avec un coefficient de corrélation de 0.936 sur la période 1971-2005, la restitution des débits observés (Illustration 34) est très satisfaisante. Globalement, les débits calculés se superposent en effet bien aux débits observés.

Quelques écarts sont, cependant, constatés :

- les fluctuations des débits simulés apparaissent plus lissées en raison du choix du pas de temps décennal ;
- contrairement à la modélisation réalisée sur la Seulles, les principales crues sont bien reproduites, exceptés deux pics très courts dans le temps, celui de janvier 2001 et, dans une moindre mesure, celui d'août 2001 ;
- comme pour la Seulles, les débits simulés sont surestimés pour les étiages très marqués de 1997 et 1998.

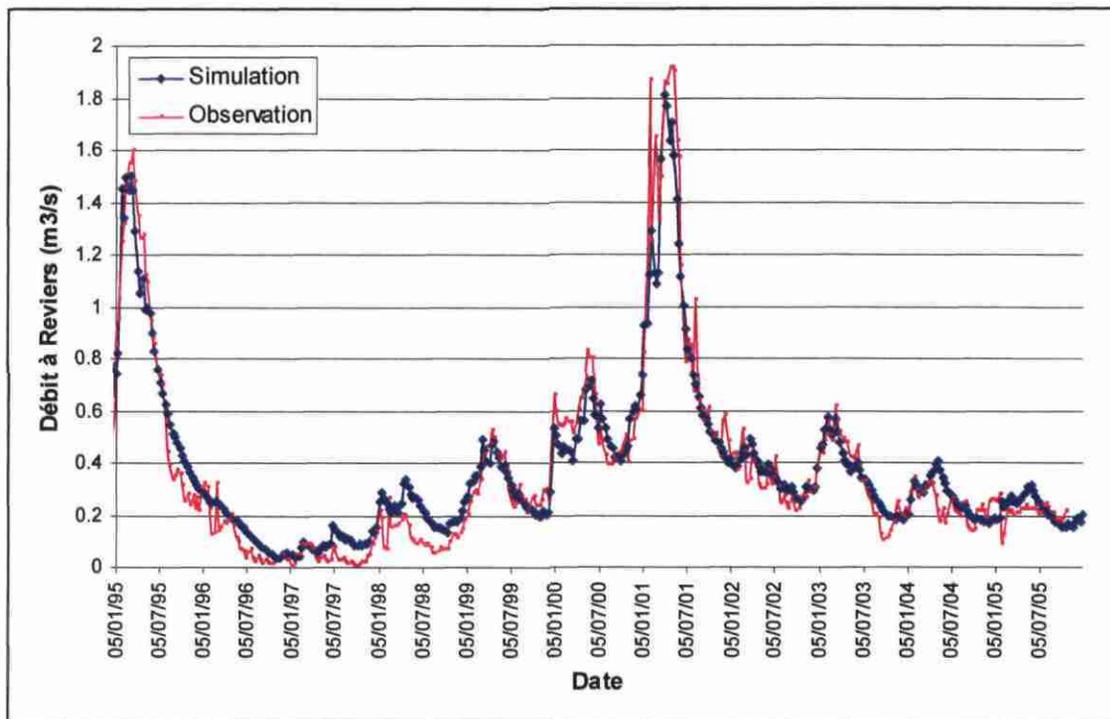


Illustration 34 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Mue à Revières sur la période 1971-2005

Le calage pluie-débit de la Mue à Revières a permis d'identifier, sur la période de simulation (1971-2005) **un débit de « fuite et prélèvement » de 222 L/s et une pluie efficace annuelle moyenne de 181 mm.**

Les variations saisonnières de la pluie efficace seront examinées par la suite (§ 4.7.1)

Il est rappelé que le débit de fuite a été ajusté automatiquement par le modèle (optimisation du paramètre). Sans prise en compte d'un tel débit de fuite, on obtient des calages fortement dégradés. Dans le cas présent, il correspond à une lame d'eau annuelle de 71 mm ce qui représente 39 % de la pluie efficace annuelle moyenne.

Le volume annuel des prélèvements pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie sur le bassin versant de la Mue en amont de Revières s'élevait en 2004 à 2.91 Mm³, ce qui correspond à 92 L/s soit 17 % de la pluie efficace moyenne. Il est à signaler que ce volume prélevé a peut-être été sous-estimé, car, dans cette évaluation, le forage F8 sur Amblie, implanté en limite extérieure du bassin versant topographique, n'est, par exemple, pas pris en compte (AEP pour l'agglomération de Caen avec un prélèvement annuel de 2.15 Mm³ en 2004). Si on ajoute à cela la part de l'écoulement souterrain non contrôlé par la station de jaugeage de Revières, l'ordre de grandeur du débit de fuite, calculé par le modèle, apparaît réaliste.

4.6.2. Modélisations pluie-niveau

Les simulations des deux piézomètres, Fresne-Camilly et Cairon, ont été réalisées au pas de temps décadaire.

Calage à Fresne-Camilly

La chronique piézométrique de Fresne-Camilly n'a pu être modélisée de façon satisfaisante. Le meilleur coefficient d'ajustement obtenu avec des paramètres de calage réalistes est, en effet, de 0.699 sur la période 1997-2005 (Illustration 35). Sur la période antérieure, la chronique piézométrique n'apparaît pas exploitable (Illustration 33)

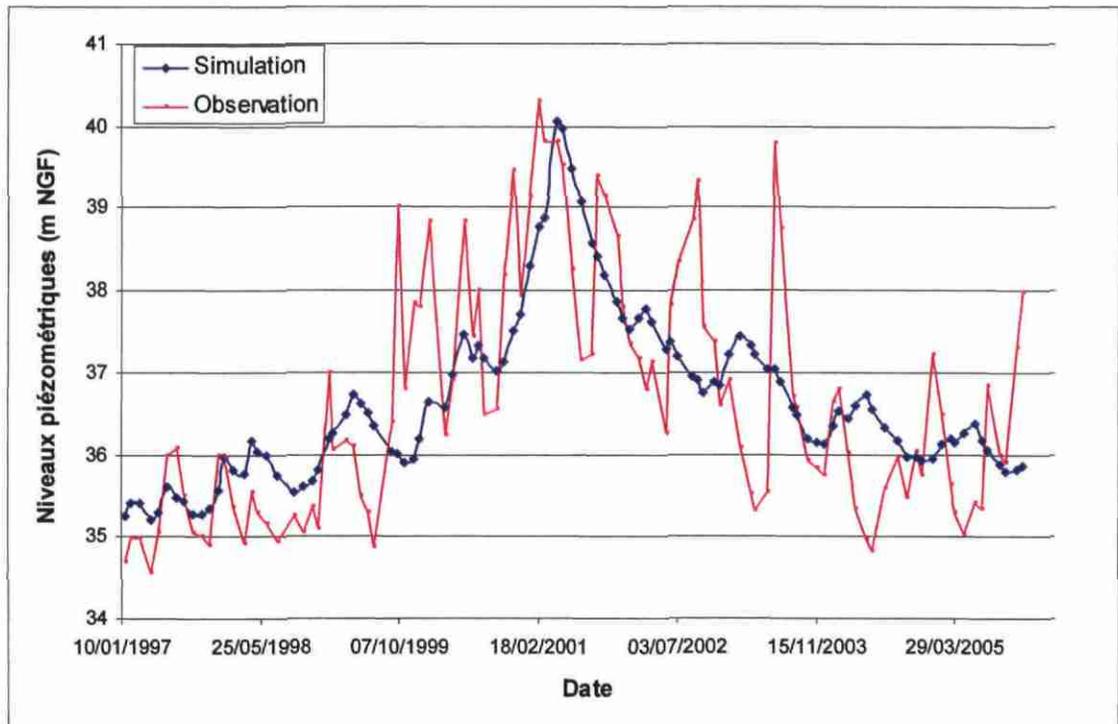


Illustration 35 : Calage pluie-niveau à Fresne-Camilly sur la période 1997-2005

Quelques soient les pistes de calage entreprises, le modèle ne parvient pas à reproduire correctement les fluctuations piézométriques en amplitude comme en fréquence. Seules les grandes tendances du cycle pluri-annuel 1997-2005 (remplissage du réservoir de 1997 à 2001 et vidange de l'aquifère de 2001 à 2005) sont correctement simulées.

Au vu de la forte hétérogénéité des fluctuations, le piézomètre de Fresne-Camilly ne semble pas modélisable, soit en raison d'influence anthropique (pompage), soit d'un aquifère localement très hétérogène dans la profondeur et/ou karstifié.

De plus, la fréquence d'acquisition mensuelle empêche toute analyse plus poussée du comportement de la nappe à Fresne-Camilly. Il serait intéressant d'équiper cet ouvrage afin d'enregistrer des mesures quotidiennes.

Calage à Cairon

La chronique piézométrique ne peut être modélisée sur toute sa durée compte tenu de l'influence des prélèvements sur le piézomètre à partir de 1980. A titre indicatif, il a été procédé au calage de la chronique sur la période 1972-1979 (coefficient d'ajustement de 0.918), *a priori* non influencée, et les paramètres de calage ont ensuite été transposés à la période 1972-2004 (Illustration 36).

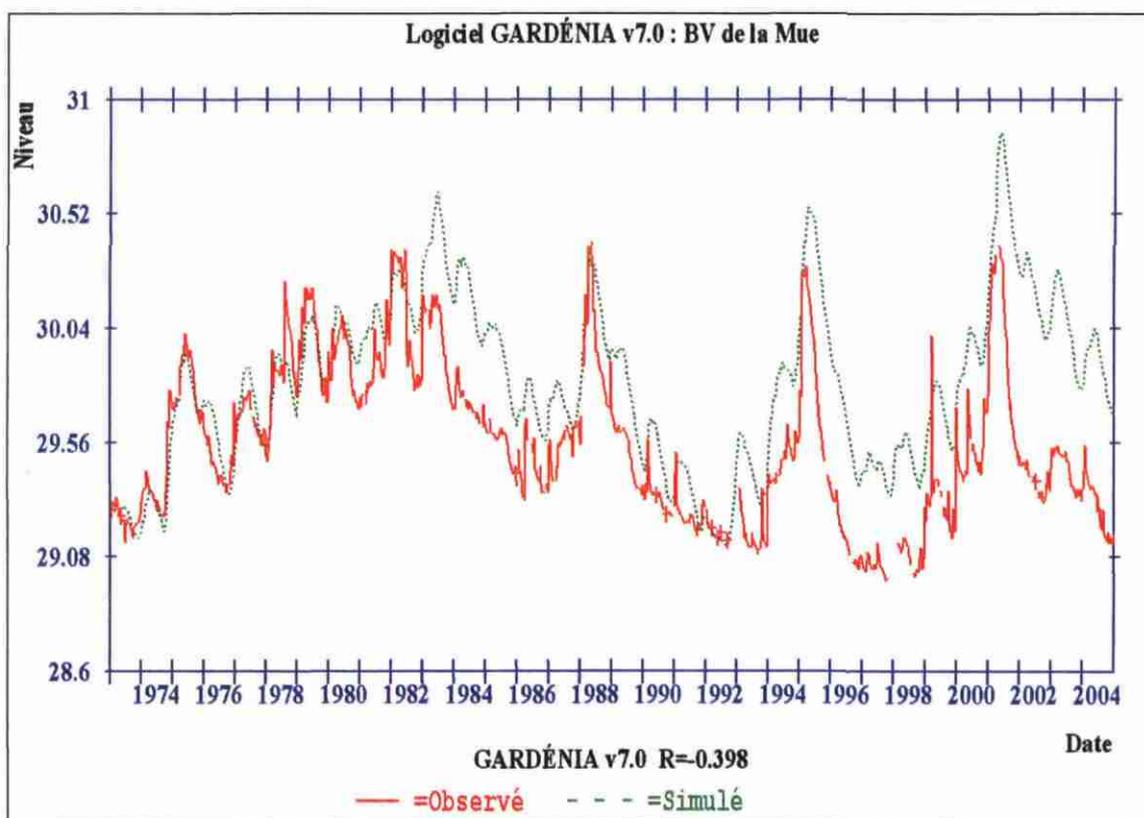


Illustration 36 : Calage pluie-niveau à Cairon sur la période 1972-1979 transposé à la période 1972-2004

La chronique piézométrique est bien reproduite dans les années 70 et le décalage commence à apparaître lors des décrues estivales de 1980 et 1982. Par la suite, l'amplitude et la fréquence des fluctuations piézométriques sont reproduites de façon satisfaisante mais quasiment toujours avec des niveaux piézométriques supérieurs. Attention, la période de calage 1972-1979 est trop courte pour garantir la fiabilité de la modélisation pluie-niveau, cette manipulation n'est, par conséquent, proposée qu'à titre indicatif.

Il serait intéressant de pouvoir disposer des chroniques de débit de prélèvements à proximité du piézomètre afin de réaliser une modélisation pluie-niveau avec prise en compte des pompages (possibilité offerte par GARDENIA).

Il est à signaler qu'à partir de 1993, il a été de nouveau possible d'obtenir une modélisation tout à fait satisfaisante avec un coefficient d'ajustement de 0.946 (Illustration 37).

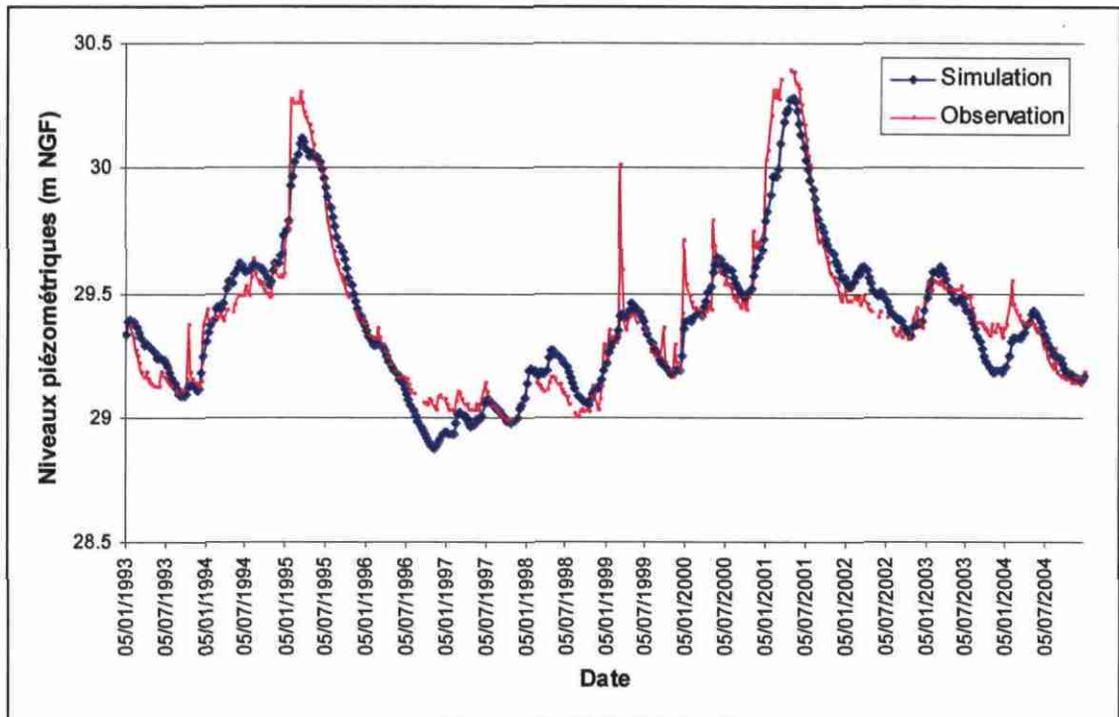


Illustration 37 : Calage pluie-niveau à Caïron sur la période 1993-2004

Sur la base de ce dernier calage, la **pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1993-2004 est de 200 mm (valeur cohérente avec celle calculée pour la modélisation pluie-débit).**

4.7. BILAN HYDROLOGIQUE

Les temps de demi-tarissement, optimisés par le modèle, sont compris entre 6 et 8.6 mois pour les trois calages réalisés. Ces ordres de grandeur, nettement supérieur à ceux de la Seules, soulignent l'effet capacitif plus important de l'aquifère bathonien. Les temps de demi-percolation ne sont en revanche très différents pour les modélisations pluie-niveau (0.15 et 0.5 mois) et la modélisation pluie-débit (5.5 mois). Compte tenu du contexte hydrogéologique et des calages obtenus, l'ordre de grandeur proposé par la modélisation pluie-débit apparaît plus réaliste même si il ne peut être retenu comme une estimation précise.

Le bilan hydrologique proposé dans le présent paragraphe repose sur le calage pluie-débit de la Mue à Reviens (période de simulation 1971-2005), seul calage s'étant avéré suffisamment fiable pour un tel calcul.

La superficie du bassin versant en amont de Reviens ne représente que 60 % de la superficie totale du bassin versant de la Mue, il ne prend pas en compte notamment le sous-bassin versant de la Thue. Les résultats ne pourront donc pas être étendus à cette partie du bassin, par ailleurs moins exploité pour l'alimentation en eau potable.

4.7.1. Recharge hivernale

Les résultats de la modélisation comprennent une chronique de précipitation efficace au pas de temps mensuel sur la période 1971-2005 (Illustration 39). Les précipitations efficaces obtenues, à l'échelle de l'année hydrologique (octobre à septembre), varient entre un minimum de 40 mm (hiver 95-96) et un maximum de 412 mm (hiver 2000-2001) pour une moyenne interannuelle de 183 mm.

La valeur moyenne est en accord avec celle proposée par le MEDAD (de l'ordre de 185 mm sur la période 1946-2001) et un peu moins avec celle de la DIREN Basse-Normandie (de l'ordre de 210 mm).

La répartition des pluies efficaces annuelles permet de retrouver aisément les années de référence (sèche ou humide) déjà évoquées pour le bassin versant de la Seulles : deux années très sèches en 75/76 et 95/96 et deux années humides de référence en 94/95 et 2000/2001 (Illustration 38).

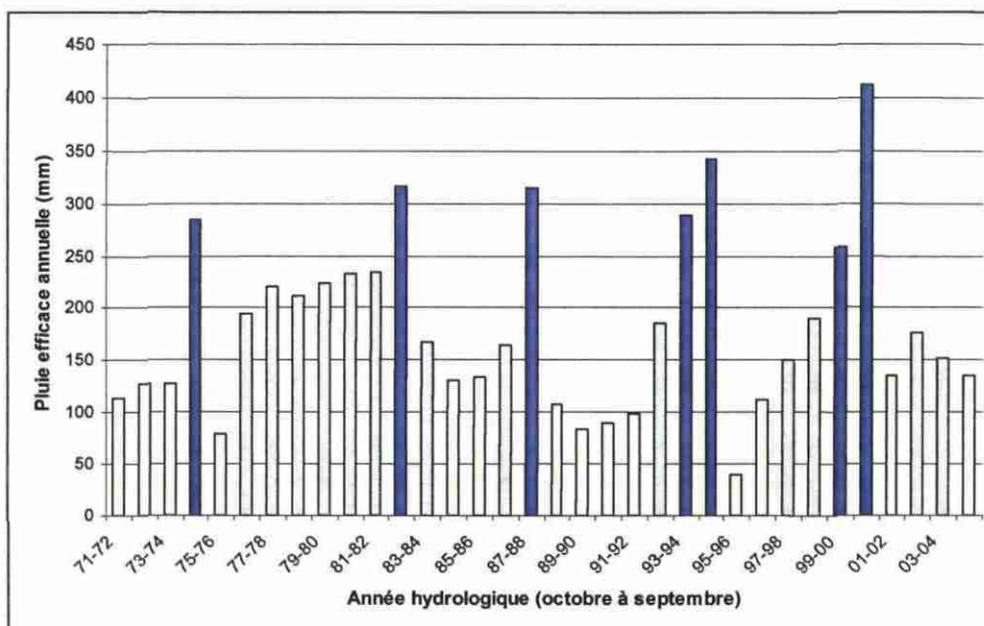


Illustration 38 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation sur le bassin versant de la Mue)

L'illustration 39 présente les variations mensuelles des précipitations efficaces. En moyenne, 80 % des précipitations efficaces calculées se répartissent entre les mois d'octobre et avril. Les valeurs mensuelles les plus importantes sont en général calculées de décembre à mars.

Le modèle calcule de légères recharges en période estivale. Les pluies efficaces significatives sont alors dues à des événements pluvieux exceptionnels : on peut encore une fois noter l'exemple du mois de juin 1997 avec des précipitations de 164 mm qui ont engendré une pluie efficace mensuelle de 30 mm d'après le modèle.

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année hydrologique	Total
1971	9.1	6.8	5	7.4	11.7	3.8	0.8	3.9	2.3	1.7	15.8	2.7		
1972	13.2	25.9	14	17.7	11.3	1.5	0.3	1.7	7.9	5.3	29.7	5.3	71-72	114
1973	12.2	17.4	2.1	9.9	19.2	8.6	7.2	1.7	9.8	4.9	12	11.8	72-73	128
1974	16.6	23.7	17.2	4.2	2.7	15.5	0.7	2.7	15.4	52.7	50	19.4	73-74	127
1975	27.8	9.4	51.1	20.3	31.9	2.3	3.9	6	9.9	7.2	24.1	12.1	74-75	285
1976	10.7	12.4	7.5	2	0	0	0.3	0.1	3	11.7	16.5	24	75-76	79
1977	33.8	27.9	27	21.6	19.2	5.3	5.1	1.9	0.6	1	15.2	9.9	76-77	195
1978	22.8	42.2	42	20.3	9.6	16.2	30.4	8.8	1.6	2.2	2.3	35.3	77-78	220
1979	17	39.6	54.1	12.6	21.8	20.5	0.2	4.3	0.9	3.8	15.5	38.4	78-79	211
1980	17.9	37.7	41.8	4.8	15.7	18.2	21.2	4.2	3.8	17.2	13.3	23.4	79-80	223
1981	25.5	16.3	28.5	7.6	45.2	32	5.5	6.9	11.5	36.8	9.5	54.5	80-81	233
1982	25.8	11.6	30.2	9.5	8.9	17.2	19.9	6.4	4	27.4	27.4	63.7	81-82	234
1983	21.8	32	24.5	50.2	46.6	3.1	2.3	7.1	9.5	8.1	6.4	11	82-83	316
1984	56.4	17.3	26.5	5	27.8	0.4	0	0	8	7.6	19.3	13.7	83-84	167
1985	20.2	7.4	20.1	10.9	12.8	11.8	2	4.3	0.9	1	9.2	6.4	84-85	131
1986	26.5	8.7	32.9	20.7	6.9	2.7	6.5	2.7	8.9	8.2	17.7	33.8	85-86	133
1987	12.4	24.8	16.1	8.3	3	17.6	11.5	4.8	6.4	29.6	27.2	13.8	86-87	165
1988	74.5	59.6	62.8	10.4	24.6	2.4	5.5	1.7	3	8.2	11.1	20.4	87-88	315
1989	10	17.8	16.4	18.2	1.4	2.6	1.7	0	0.3	0.4	1.6	6.6	88-89	106
1990	12.5	39.9	2.7	14	0.6	4.7	0	0.2	0.2	2.6	11.4	12.1	89-90	83
1991	24.9	7.5	8.1	8.4	5.1	7.4	0.5	0.1	1.2	4.4	19.4	4.5	90-91	89
1992	2.3	4.1	8.9	7.8	7.8	9.5	8.9	13.3	8.3	35.2	33.1	38.6	91-92	99
1993	32.2	5.5	0	14.3	2.7	12.1	2.1	0	9.1	18.9	3.7	52.9	92-93	185
1994	35.8	27.2	19.3	34	33.3	13	21.2	16	12.9	16.3	30.8	56.4	93-94	288
1995	96.6	50.8	37	21.6	20.2	2.8	3.3	0.9	5.5	0.2	1.7	6.6	94-95	342
1996	1.7	14.4	4.6	2.1	6.4	0.3	0	0.2	1.4	1.3	13.3	11.8	95-96	40
1997	3.8	27.6	1.4	0.9	14.2	30.3	0.5	6.9	0.1	7.1	13.8	24.6	96-97	112
1998	34.7	2.9	12.2	37.1	2	7	0.9	0.1	8.1	16.1	13	28.6	97-98	151
1999	29.1	25.1	23.1	30.5	3	8	0.1	6.2	6.6	4.8	13.9	72.1	98-99	189
2000	6.6	20.8	25.5	31.7	45.4	0	22.4	5.8	8.9	27.5	44.6	40.5	99-00	258
2001	74.9	39	108	51.6	11.7	0	3.7	2.8	7.6	6.6	8.4	10.5	00-01	412
2002	10.4	31.6	19.9	1.1	10.9	12.9	3.9	12	7.4	10.6	23.8	29.8	01-02	136
2003	42.7	17.9	16.5	3.9	13.4	8.9	7.6	0.9	0.6	5.9	13.2	11.9	02-03	177
2004	40.7	8.1	18.4	29.2	8.5	0.7	4.3	10.9	0.5	9.2	8.9	14.5	03-04	152
2005	25.7	14.1	9.9	20.2	21.7	0.6	4.4	4.3	2.4	11.8	13.5	18.4	04-05	136
MIN.	1.7	2.9	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.6	2.7	MIN.	39.6
MAX.	96.6	59.6	108.0	51.6	46.6	32.0	30.4	16.0	15.4	52.7	50.0	72.1	MAX.	411.9
MOYENNE	26.5	22.1	23.9	16.3	15.1	8.6	6.0	4.3	5.4	11.8	16.9	24.0	MOYENNE	183.3

Illustration 39 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1971 à 2005 (en jaune : les valeurs mensuelles minimales, en bleu : les valeurs maximales)

A titre indicatif, le graphique de l'illustration 40 montre les variations de l'ETR par rapport à l'ETP : l'ETR représente environ 95 % de l'ETP en hiver et globalement 60 % en été. Ce rapport peut descendre à 25-30 % pour les étés les plus secs (1976, 1990 et 1996).

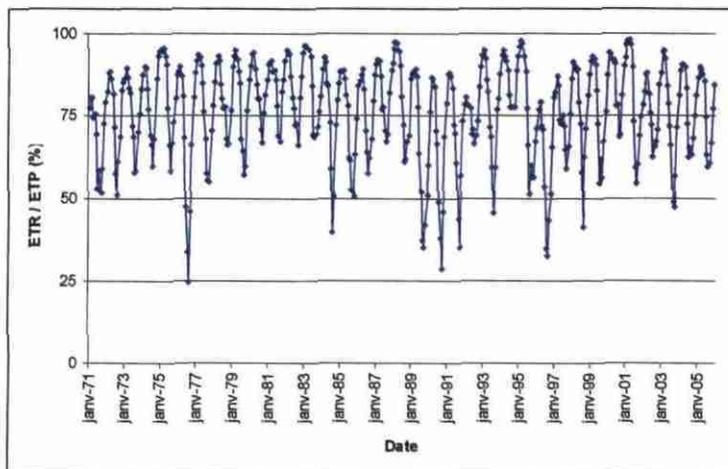


Illustration 40 : Evolution de l'ETR par rapport à l'ETP pour le bassin versant de la Mue sur la période simulation 1971-2005

4.7.2. Bilan hydrologique

Bilan hydrologique moyen

L'illustration 41 présente les différents termes du bilan hydrologique (§ 2.3) pour le bassin versant de la Mue. Il s'agit d'un bilan annuel calculé à partir des données moyennes résultant du calage pluie-débit à Revières (période de simulation 1971-2005).

La moyenne des précipitations annuelles sur la période 1971-2005 est de 726 mm. La valeur moyenne de la pluie efficace annuelle calculée par le modèle est de **181 mm** pour une évapotranspiration réelle (ETR) moyenne de **543 mm**. Le calage du modèle a également permis de calculer l'écoulement rapide (113 mm) et l'écoulement lent (67 mm). Nous reviendrons sur cette décomposition de l'écoulement dans le paragraphe suivant (§ 4.7.3). Le modèle calcule enfin un écoulement annuel moyen de **109 mm** à Revières pour un débit de « fuite et prélèvement » de **71 mm** (débit non contrôlé par la station de jaugeage).

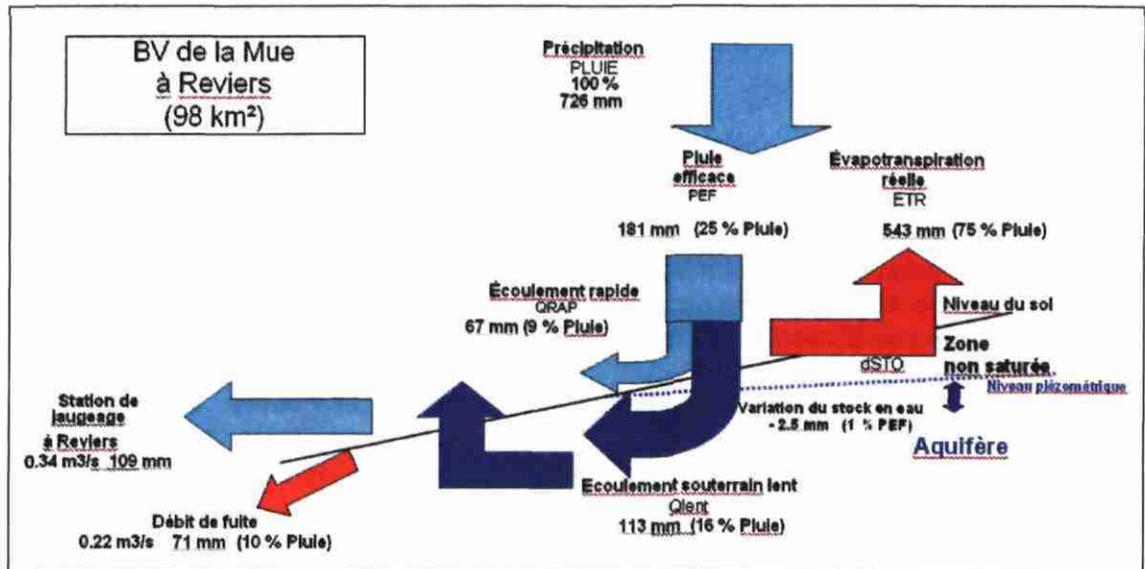


Illustration 41 : Eléments du bilan hydrologique de la Mue à Revières (1971-2005) d'après les résultats de la modélisation GARDENIA pluie-débit

Le débit moyen interannuel de la Mue, sur la période d'observation 1971-2005, est égal à **0.338 m³/s** à Revières. Cela correspond à un volume annuel écoulé de 10.7 Mm³ soit une lame d'eau de **109 mm**. Cette valeur est identique à celle estimée par le calage du modèle.

Il est à noter qu'une partie des prélèvements effectués sur ce bassin versant sont destinés à l'alimentation en eau potable de l'agglomération caennaise. Pour les volumes correspondants, il n'y a donc aucun retour au milieu au sein du bassin versant.

L'établissement du bilan hydrologique confirme le poids important des prélèvements par rapport à la ressource en eau du bassin de la Mue. Pour les années de basses eaux, les prélèvements apparaissent, en effet, largement supérieurs à la réserve disponible. Il est rappelé, par exemple, que la Mue s'est asséchée à Revières en janvier 1997.

Encore une fois, une connaissance plus fine des prélèvements sur ce bassin versant permettrait d'affiner ce bilan hydrologique et, dans une étape ultérieure, de proposer des règles de gestion.

Bilan hydrologique en année sèche

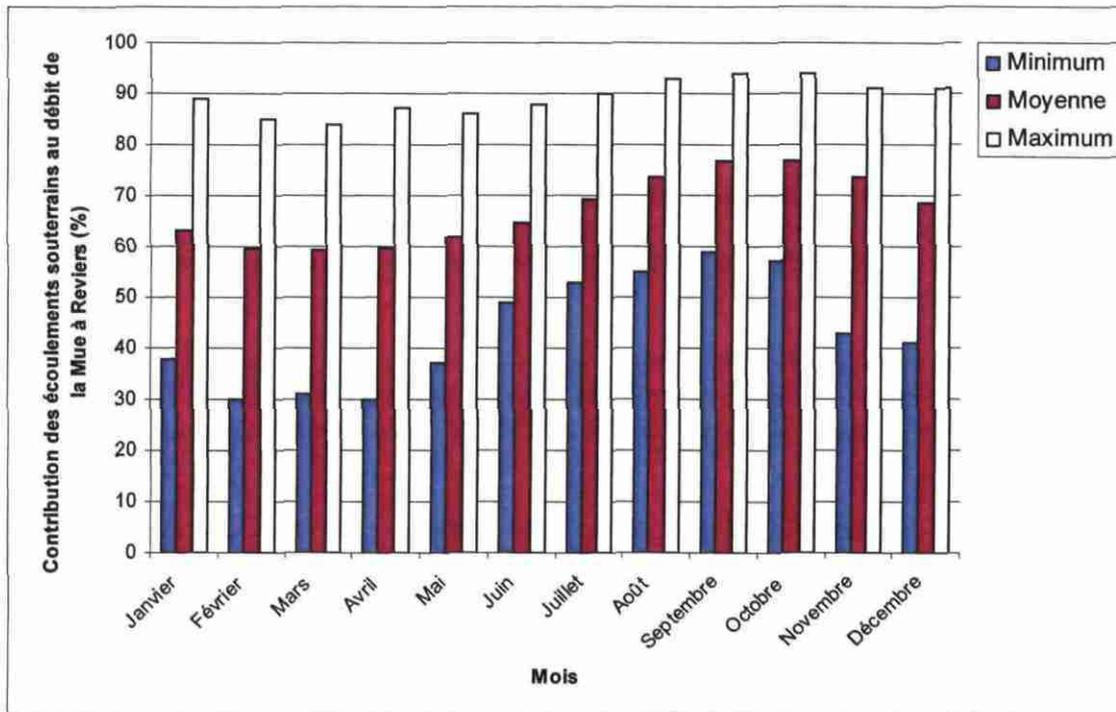
D'après le modèle, l'année hydrologique (d'octobre à septembre) la plus sèche correspond à 1995-1996 avec des précipitations efficaces de 40 mm. Il est rappelé que les prélèvements représentent une lame d'eau de l'ordre de 30 mm (probablement sous-estimée), soit 75 % de la pluie efficace. En période d'étiage sévère, le

déséquilibre quantitatif mis en évidence précédemment devient, par conséquent, très important.

4.7.3. Décomposition des écoulements

L'illustration 42 présente les variations mensuelles de la contribution des écoulements lents au débit de la Mue à Reviens. Il est rappelé qu'il s'agit ici de dégager des tendances et non pas d'interpréter les résultats comme des flux précis.

Pour la période 1971-2005, le modèle calcule une contribution minimale des écoulements souterrains lents de 30 %, une contribution maximale de 94 % et une contribution moyenne de 67 %.



	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
MIN	38	30	31	30	37	49	53	55	59	57	43	41
MAX	89	85	84	87	86	88	90	93	94	94	91	91
MOYENNE	63	60	59	60	62	65	69	74	77	77	74	68
ECART-TYPE	14.5	13.2	13.2	13.2	12.3	10.2	9.1	8.6	7.5	9.2	11.0	12.6

Illustration 42 : Contribution des écoulements lents (souterrains) au débit de la Mue à Reviens (1971-2005)

Comparativement au bassin versant de la Seulles, traité précédemment, on remarque quelques différences notables :

- la variation de la contribution des écoulements lents est moins contrastée pour le bassin versant de la Mue. Ce dernier étant moins sujet au ruissellement (relief de plateau et terrain infiltrant), les précipitations et leurs variations saisonnières auront ainsi moins d'impact sur la contribution des écoulements lents ;
- pour les mêmes raisons, la contribution des eaux souterraines semble plus importante en période de recharge pour le bassin versant de la Mue. En effet, pendant cette période, l'alimentation par les eaux ruisselées sur l'amont du bassin de la Seulles est prépondérante (§3.4) ;
- la contribution des écoulements souterrains en période d'étiage est par contre moins importante dans le cas du bassin de la Mue (de l'ordre de 90% pour celui de la Seulles). La différence de valeur peut s'expliquer en partie par la présence d'écoulements karstiques sur le bassin versant de la Mue (assimilés à des écoulements rapides par le modèle) mais aussi par l'impact des prélèvements sur le débit des écoulements souterrains.

5. Application au bassin versant de la Dives

5.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

Dans le cadre de la présente étude, nous nous intéressons au bassin versant de la Dives amont : de sa source à sa confluence avec la Vie (exclue) sur la commune de Bieville-Quetieville. Les marais de la Dives, plus à l'aval, ne sont donc pas compris dans le bassin versant étudié. Sa superficie est de 661 km².

La Dives prend sa source dans le département de l'Orne sur la commune de Courmenil, à une altitude approximative de 250 m NGF. Dans sa première partie, le tracé de la Dives suit une direction parallèle aux hauteurs du Synclinal bocain (orientée vers le nord-ouest). Quelques kilomètres après son entrée dans le Calvados, elle subit un changement de direction vers le Nord qui la conduit vers la mer en bordant la campagne de Caen qu'elle délimite en rive gauche.

D'un point de vue géologique (Illustration 43), la Dives amont circule pour l'essentiel sur les calcaires bathoniens, excepté aux extrémités amont et aval où elle repose sur les marnes calloviennes. La rive gauche du bassin versant est composée des roches dures du Paléozoïque (schistes, grès) formant les crêtes de la Zone bocaine (en bordure Sud) et des calcaires bathoniens de la Plaine de Caen. Les hauteurs de la rive droite sont elles composées des marnes calloviennes (cuesta).

L'aquifère des calcaires bathoniens plonge ainsi vers l'Est sous les marnes calloviennes où la nappe devient captive.

Dans la moitié amont du bassin versant étudié, de nombreux ruisseaux viennent rejoindre la Dives, en rive gauche comme en rive droite. Son principal affluent dans cette zone est l'Ante en rive gauche. Dans la moitié aval, la Dives n'est plus alimentée qu'en rive droite, notamment par l'Oudon. Les terrains calcaires de la rive gauche sont, en effet, infiltrants.

L'altitude du bassin versant étudié varie entre 5 et 300 m NGF pour une altitude moyenne de 115 m NGF. Les plus fortes pentes sont observées sur la cuesta du Pays d'Auge (bordure est) et sur les terrains du socle (bordure sud-ouest).

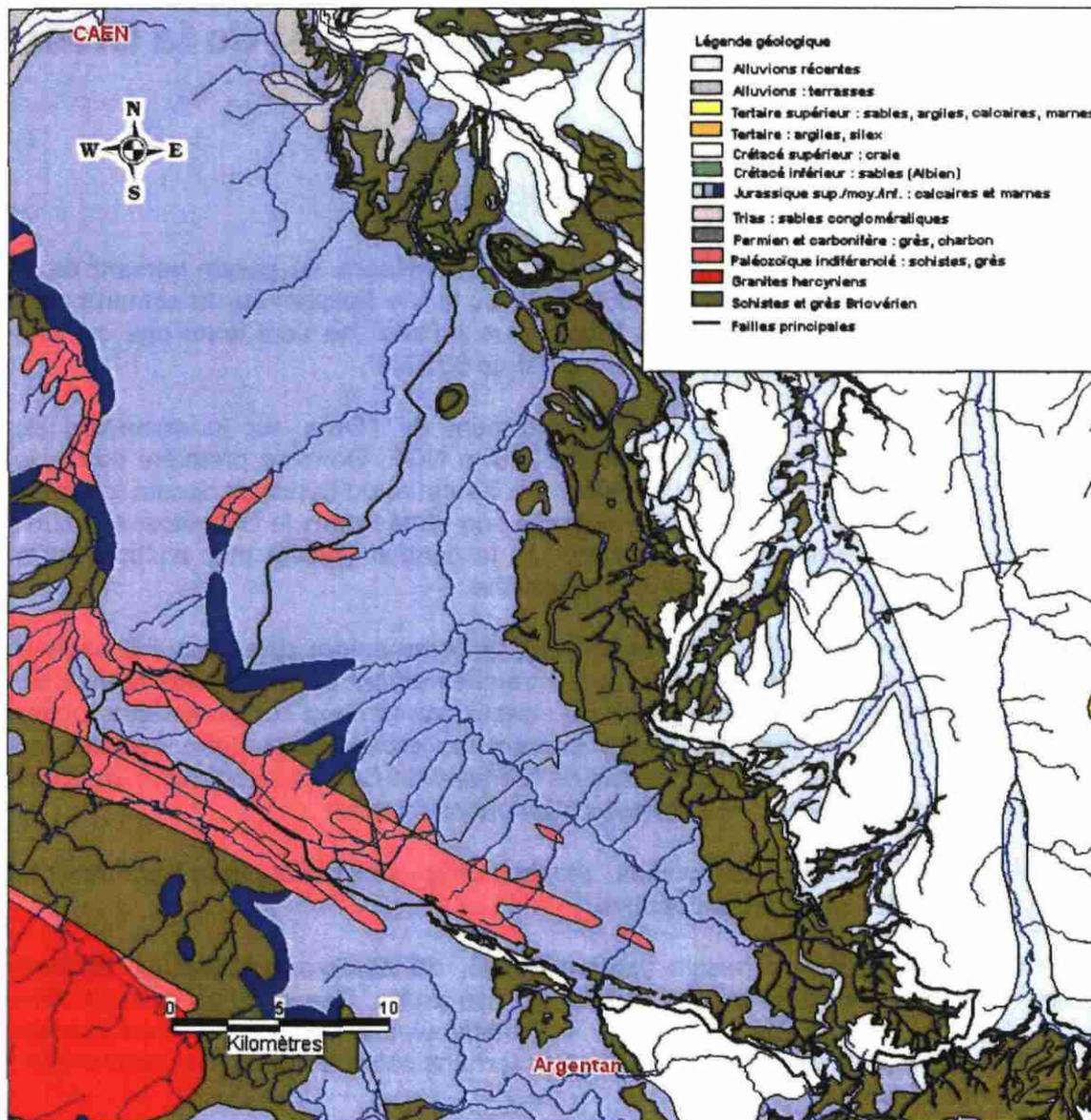


Illustration 43 : Carte géologique sur le bassin versant de la Dives amont (carte géologique simplifiée, brgm©)

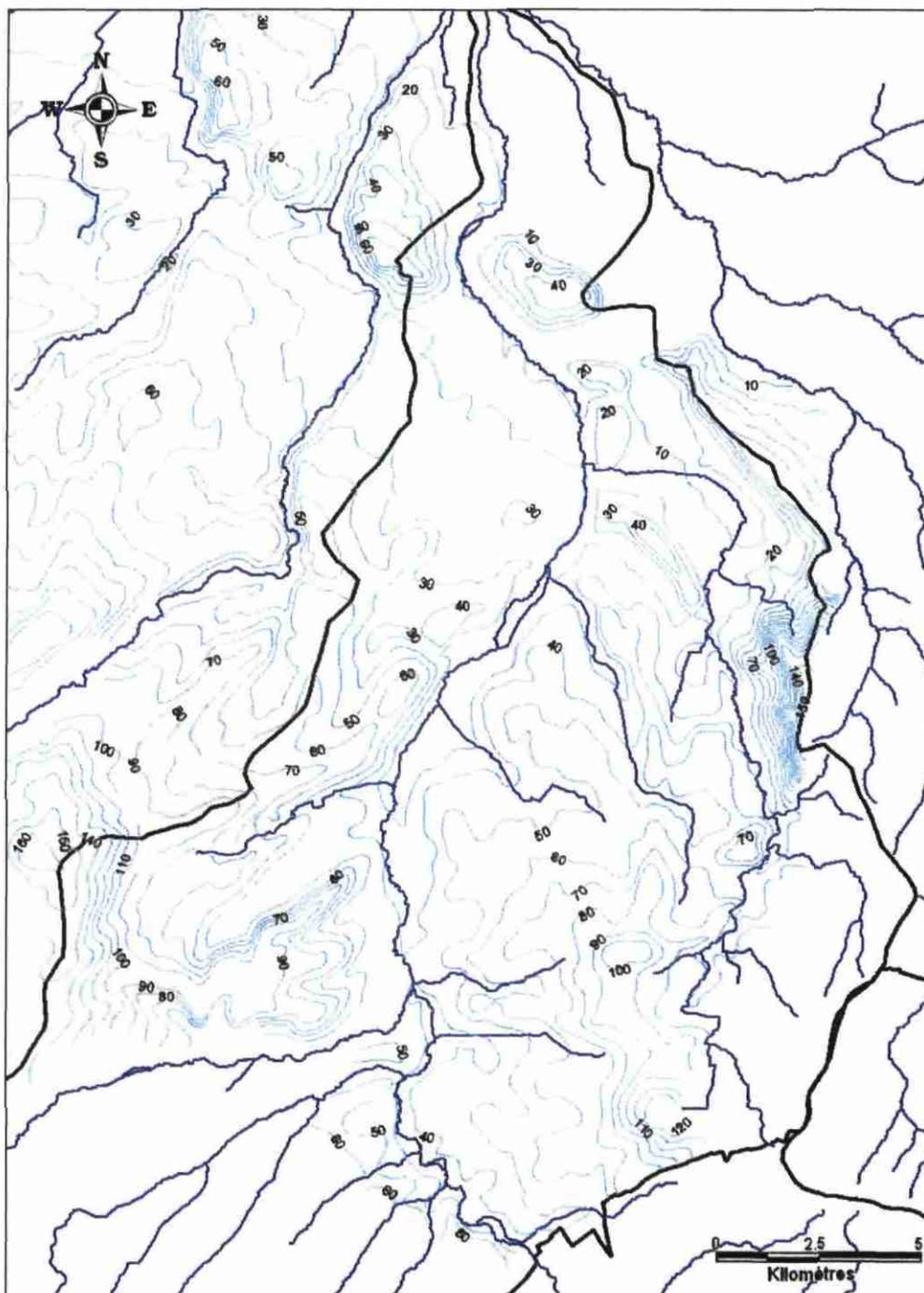


Illustration 44 : Carte piézométrique sur le bassin versant de la Dives amont (brgm, 2007)

5.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS

5.2.1. Les données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie

Entre 1995 et 2004, les prélèvements n'ont quasiment pas cessé d'augmenter : de 3.0 Mm³ en 1995 à 5.3 Mm³ en 2004, soit une croissance de 77 % (Illustration 45). Ceci est en particulier dû à l'augmentation des prélèvements AEP et à la prise en compte des prélèvements agricoles à partir de 1997. Seuls ces derniers sont concernés par l'exploitation d'eau de surface : à hauteur de 250 000 m³ en 2004.

La part des prélèvements en eau souterraine reste donc largement prédominante avec 95 % des prélèvements totaux en 2004.

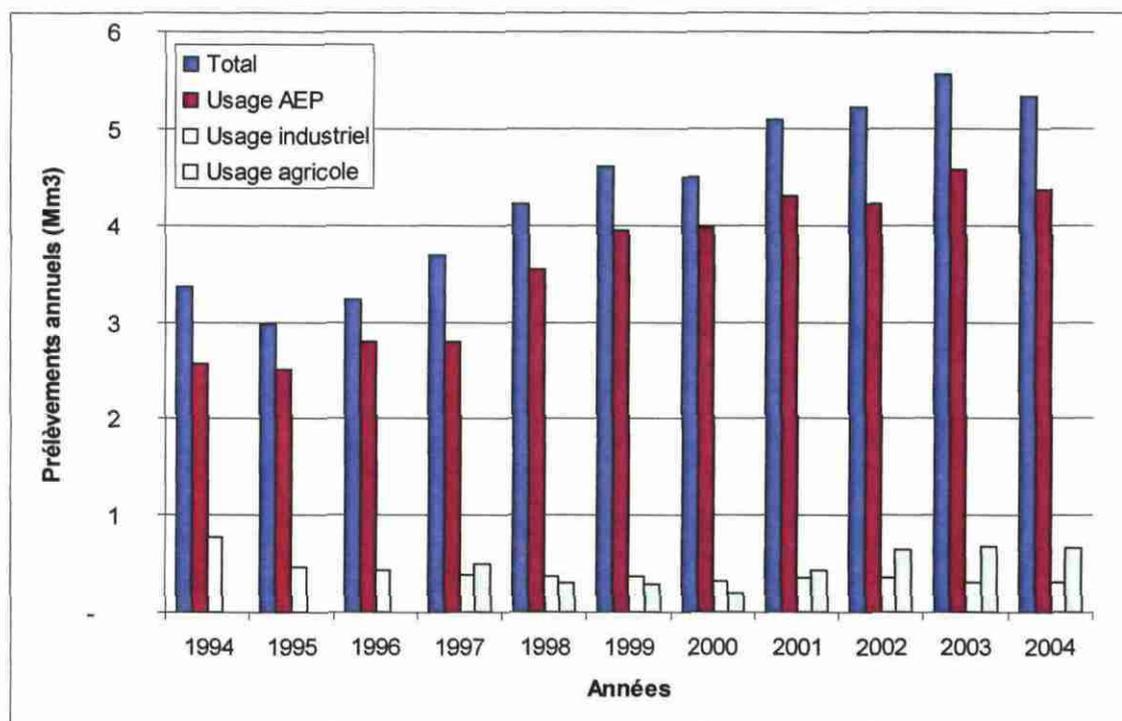


Illustration 45 : Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de la Dives amont entre 1994 et 2004 (source : AESN)

En ce qui concerne l'usage des prélèvements en 2004, 82 % sont destinés à l'alimentation en eau potable selon les déclarations de l'AESN.

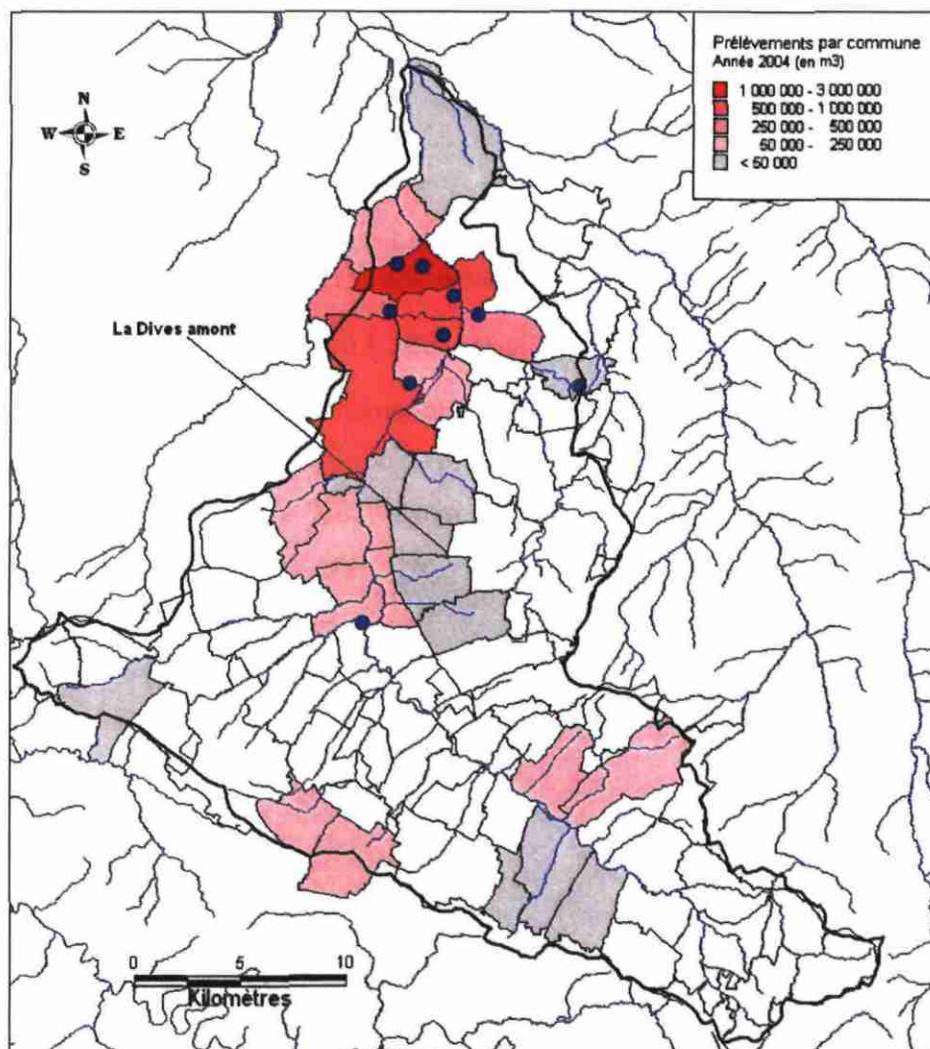


Illustration 46 : Carte des prélèvements par commune (source : AESN, 2004)

Les communes dont la ressource en eau est la plus sollicitée correspondent logiquement aux communes d'implantation des principaux captages AEP : Thieville, Vendevre, Ouveille-la-Bien Tournée et Percy-en-Auge.

5.2.2. Les données de la DDAF du Calvados

D'après l'enquête de la DDAF, pour la partie du bassin de la Dives amont située dans le Calvados, les prélèvements hors AEP s'élèveraient à 1 145 500 m³ en 2005 (le département de l'Orne n'a pas fait l'objet d'une enquête similaire) contre 664 000 m³ pour les données de l'AESN.

Ces prélèvements varient de 100 m³/an à 255 000 m³/an pour une moyenne de 16 134 m³/an.

Ainsi, pour l'année 2004, le total des prélèvements sur le bassin versant de la Dives amont peut être évalué à 5.81 Mm³, soit 184 l/s (après croisement des données DDAF et AESN).

5.3. DONNEES METEOROLOGIQUES

Les postes climatiques Météo France, situés dans le bassin versant de la Dives amont, disposant des plus longs historiques sont (Illustration 47) :

- Mézidon-Canon : précipitations de juillet 1992 à décembre 2005 ;
- L'Oudon : précipitations d'août 1963 à décembre 2005 et ETP de juin 1994 à décembre 2005 ;
- Damblainville : précipitations et ETP de janvier 1997 à décembre 2005.

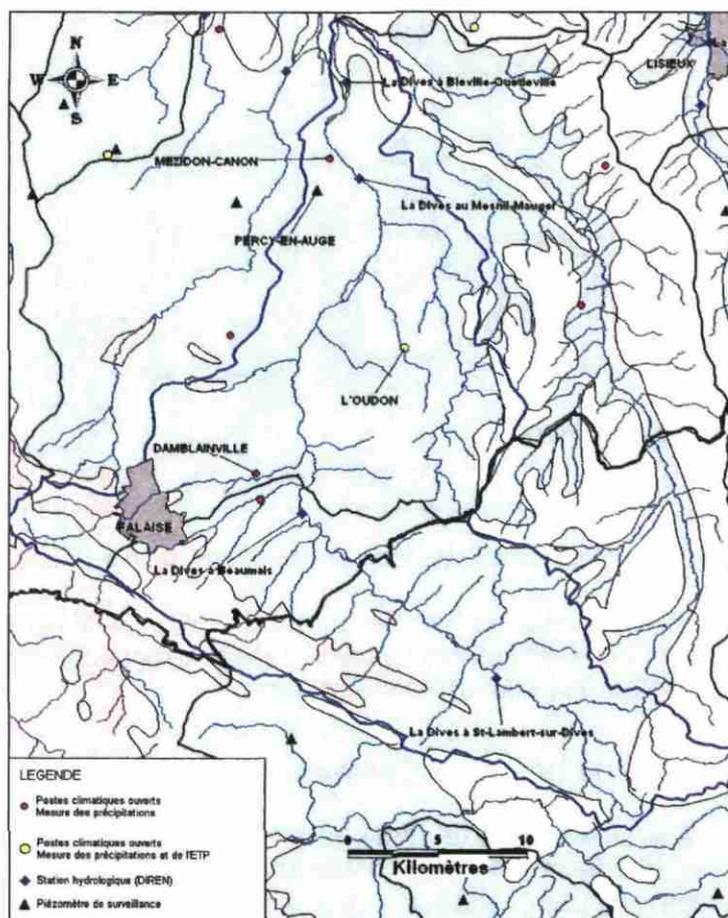


Illustration 47 : Stations de mesures disponibles sur le bassin versant de la Dives amont (sources : Météo France, DIREN, brgm)

En ce qui concerne les précipitations, seule la station de l'Oudon dispose d'un historique suffisamment long pour permettre une modélisation correcte du bassin versant. Un contrôle d'homogénéité a été réalisé sur ces données par comparaison avec les données collectées à Caen Carpiquet sur la période 1963-2005 (études de corrélation et des doubles cumuls). Les graphiques de l'illustration 48 montre une très bonne homogénéité des données qui justifie leur utilisation dans le cadre des modélisations GARDENIA.

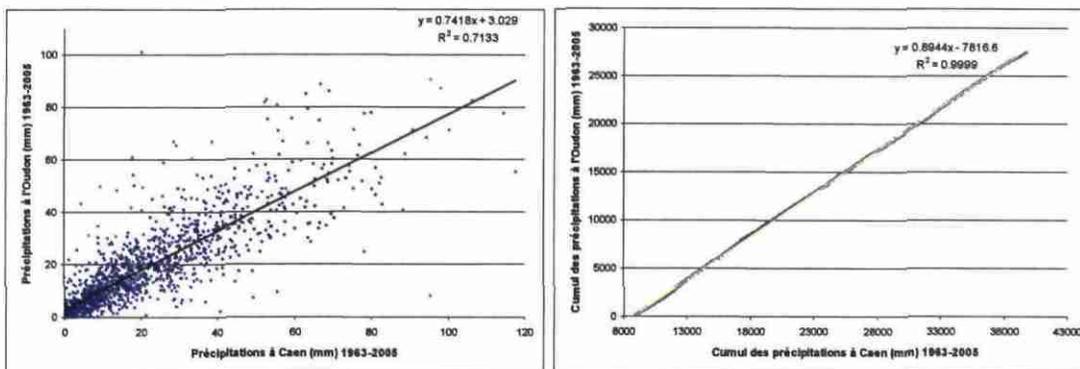


Illustration 48 : Comparaison des précipitations à l'Oudon et Caen Carpiquet sur la période 1963-2005 (source : Météo France)

En revanche, l'historique des mesures de l'ETP sur l'Oudon ne s'avère pas suffisamment long. Mais, compte tenu de la très bonne corrélation mise en évidence pour les valeurs de l'ETP mesurées à l'Oudon et à Caen Carpiquet sur leur période commune d'observation 1994-2005 (Illustration 49), il apparaît justifié d'utiliser les valeurs de cette dernière station pour les modélisations GARDENIA.

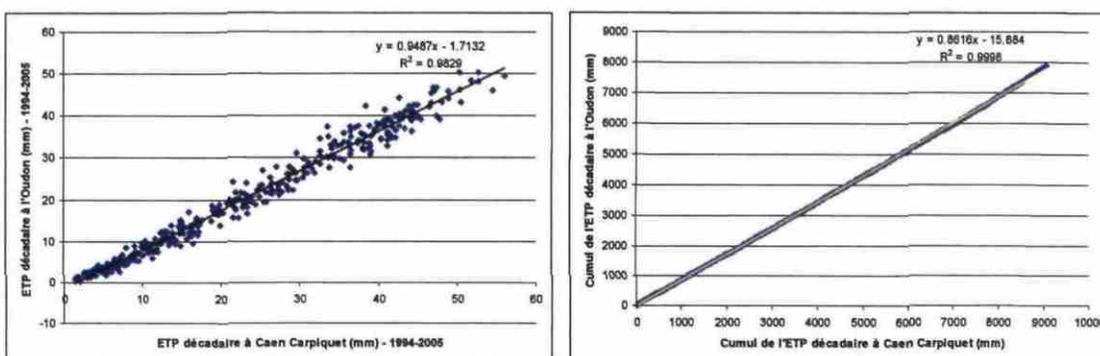


Illustration 49 : Comparaison de l'ETP à l'Oudon et Caen Carpiquet sur la période 1994-2005 (source : Météo France)

La carte de France des précipitations efficaces moyennes annuelles calculées sur la période 1946-2001 établie par le MEDD (Illustration 50) indique une répartition relativement homogène sur le bassin versant de la Dives amont. On peut, cependant, distinguer deux grands domaines :

- < 200 mm à l'extrémité amont du bassin versant ;
- de 200 à 300 mm pour le reste.

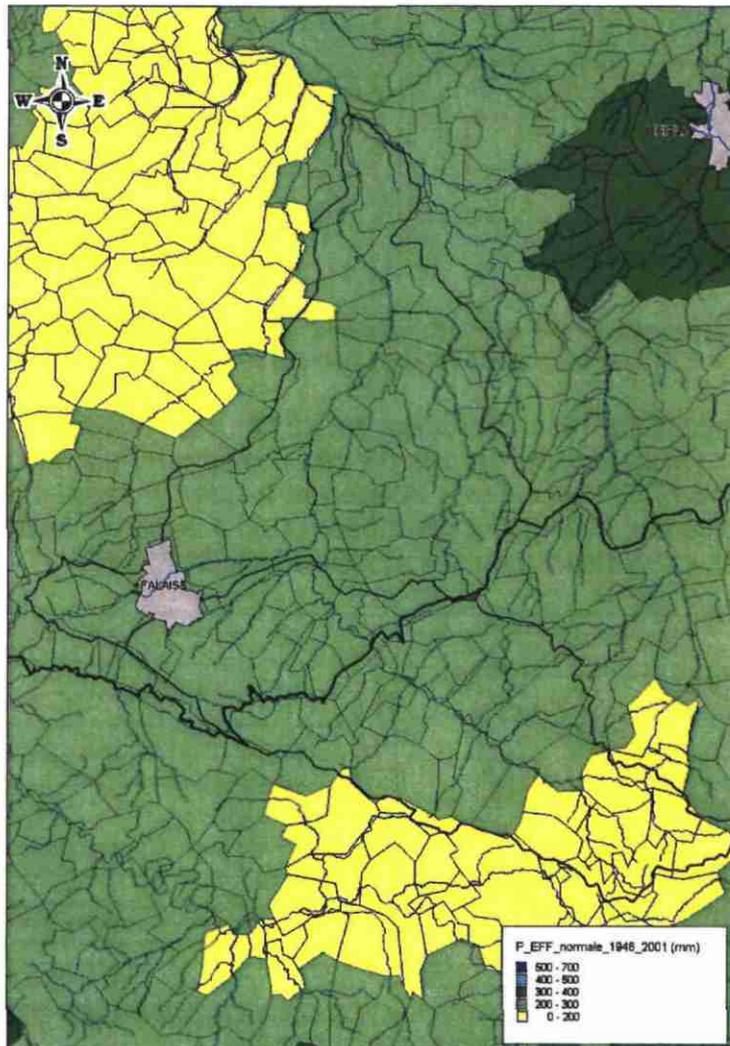


Illustration 50 : Répartition des pluies efficaces annuelles moyennes (1946-2001) sur le bassin versant de la Dives amont (source : MEDAD)

5.4. DONNEES DE DEBIT

Pour la Dives amont, les valeurs de débits moyens journaliers sont disponibles au droit de trois stations hydrométriques gérées par la DIREN Basse-Normandie (Illustration 47), d'amont en aval : à **Beumais**, au **Mesnil-Mauger** et à **Bieville-Quetieville**.

Station	Début suivi	Fin de suivi	Superficie BV (km ²)
Beumais	18/09/1969	En cours	287
Mesnil-Mauger	02/09/1993	En cours	638
Bieville-Quetieville	20/12/1972	06/09/1993	659

Illustration 51 : Caractéristiques des 3 stations de jaugeage suivies par la DIREN Basse-Normandie sur la Dives amont

Un contrôle d'homogénéité des lames d'eau journalières ruisselées à chaque station (débits rapportés à la superficie du bassin versant contrôlé) a été réalisé sur les périodes d'observation communes : de 1972 à 1993 pour Beumais et Bieville-Quetieville et de 1993 à 2005 pour Beumais et Mesnil-Mauger (Illustration 52). On constate une très bonne homogénéité des données enregistrées sur les trois stations.

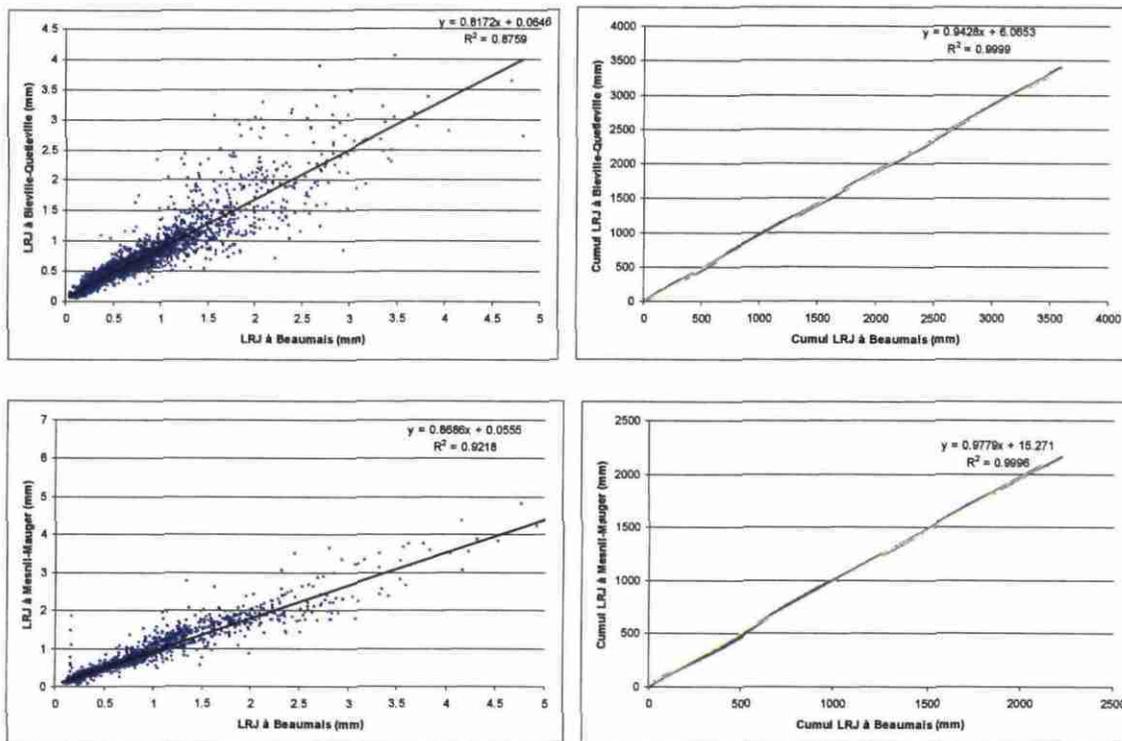


Illustration 52 : Comparaison des lames d'eau journalières ruisselées à Beaumais, Bieville-Quetieville et Mesnil-Mauger (source : DIREN BNO)

Les débits caractéristiques de la Dives au niveau de ces trois stations de jaugeage sont reportés dans le tableau suivant :

Définition	Beaumais		Mesnil-Mauger		Bieville-Quetieville	
	Q(m3/s)	LR (mm)	Q(m3/s)	LR (mm)	Q(m3/s)	LR (mm)
Journalier moyen	1.61	0.48	3.68	0.48	3.53	0.45
Journalier minimal	0.11 (15/07/92)	0.033	0.40 (23/08/94)	0.054	0.50 (22/09/91)	0.066
Journalier maximal	20.5 (25/03/01)	6.17	43.3 (06/01/01)	5.86	31.0 (17/11/74)	4.06
Instantané maximal	24.6 (25/03/2001)	7.4	45.0 (06/01/01)	6.09	31.4 (18/11/74)	4.11

Illustration 53 : Débits et lames d'eau ruisselées caractéristiques de la Dives aux stations hydrologiques de Beaumais, Mesnil-Mauger et Bieville-Quetieville (source : DIREN BNO)

La Dives à Beaumais connaît des étiages plus sévères, on peut notamment citer ceux de 1990 à 1992 (Illustration 54). Plus à l'aval, à Mesnil-Mauger et Bieville-Quetieville, le cours d'eau est davantage soutenu par la nappe des calcaires bathoniens.

En revanche, en période de crue, l'alimentation de la Dives sur la partie amont du bassin versant devient prépondérante. En effet, comme le montre la densité importante du réseau hydrographique dans cette zone, les terrains y sont beaucoup plus ruisselants.

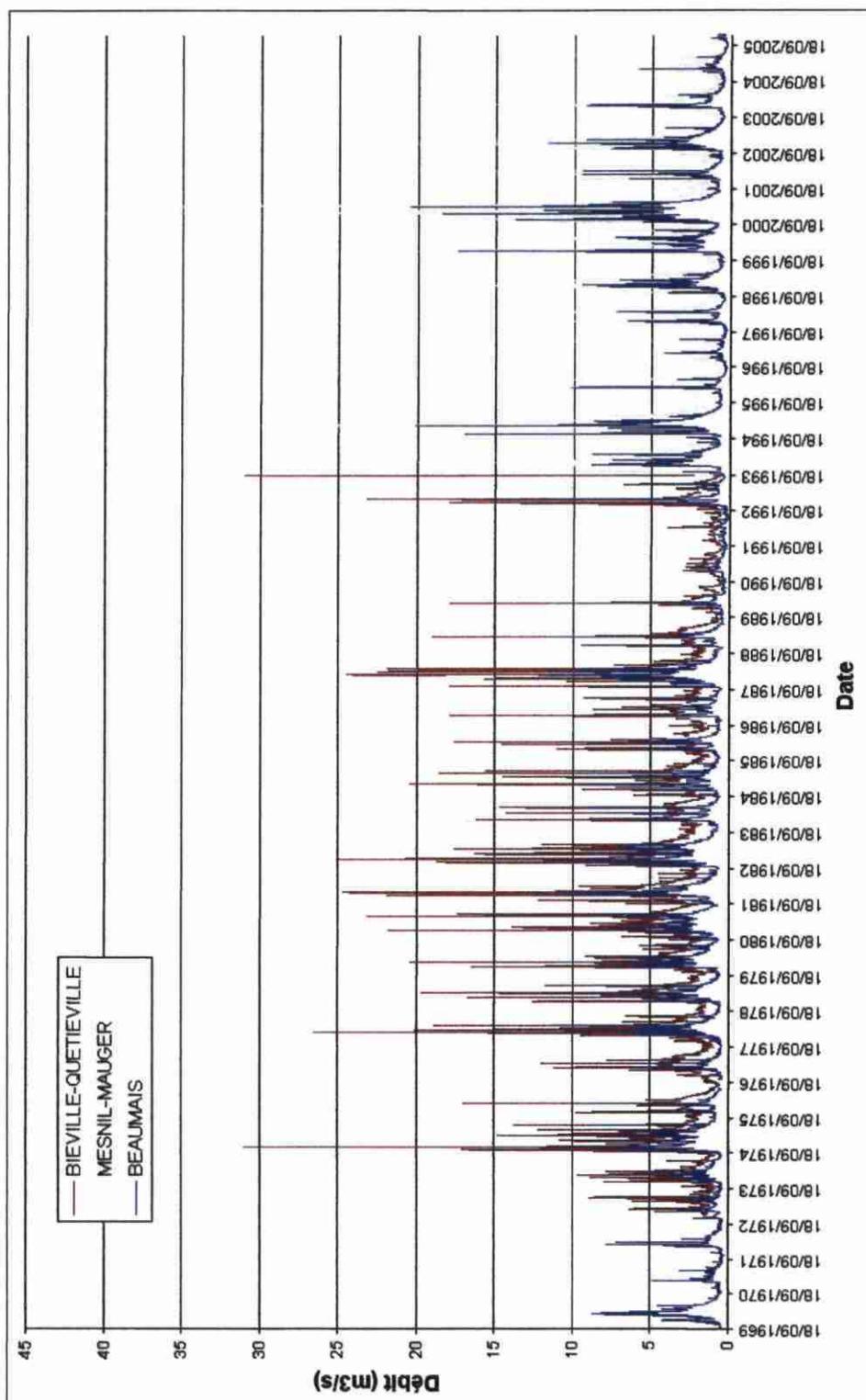


Illustration 54 : Chroniques de débits à Beaumais, Mesnil-Mauger et Bieville-Quetieville (source : DIREN BNO)

5.5. DONNEES DE NIVEAU DE NAPPE

Sur le bassin versant de la Dives amont, seul le piézomètre de Percy-en-Auge (01464X0018) dispose d'une chronique suffisamment longue pour satisfaire à une modélisation globale. Cet ouvrage a fait partie du réseau de surveillance de la DIREN Basse-Normandie de juin 1978 à juin 2001. Les données ont été récupérées sur le portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines ADES (<http://www.ades.eaufrance.fr>).

Il est à noter que pour compléter le suivi de la nappe du Bathonien dans ce secteur, deux nouveaux piézomètres ont été mis en service en 2006 par le brgm sur les communes d'Omméel (Orne) et de Morteaux-Couliboeuf (Calvados).

Le piézomètre de Percy-en-Auge est situé en rive gauche de la Dives, dans la partie aval du bassin versant étudié. Il suit la nappe du Bathonien sous plateau, à une distance de l'ordre de 2.2 km de la Dives.

L'illustration 55 présente l'évolution des niveaux piézométriques enregistrés entre 1978 et 2001. Le régime de fluctuation permet d'identifier chaque recharge hivernale et les grands cycles pluriannuels. En revanche, à la lecture de ce graphique, le piézomètre semble être influencé : on devine, en effet, une tendance générale à la baisse et une chute brutale du niveau piézométrique de janvier à octobre 1991. La DIREN Basse-Normandie nous a confirmé cette influence. Il est rappelé que les communes de Percy-en-Auge ou encore de Magny-la-Campagne (immédiatement au sud) font l'objet de prélèvements AEP importants.

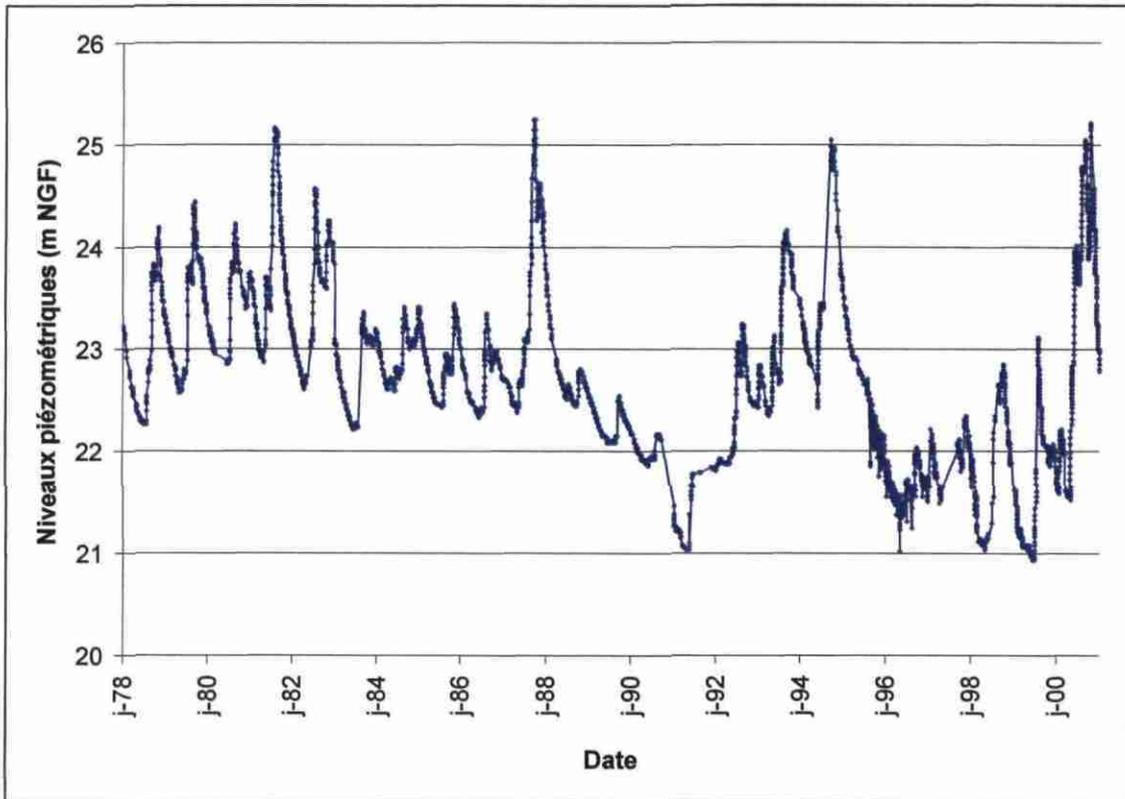


Illustration 55 : Evolution des niveaux piézométriques de 1978 à 2001 sur Percy-en-Auge (source : DIREN BNO)

Les niveaux piézométriques influencés de Percy-en-Auge annoncent, par conséquent, une modélisation pluie-niveau délicate.

5.6. MODELISATION GARDENIA

5.6.1. Modélisations pluie-débit

Des modélisations, au pas de temps décadaire, ont été réalisées à partir des données enregistrées aux stations de jaugeage de Beaumais pour la période 1972-2005 et de Mesnil-Mauger pour la période 1993-2005. Dans chacun des cas, les données climatiques antérieures (depuis 1964) ont servi à amorcer le modèle hydrodynamique.

Les superficies des bassins versants contrôlés par les stations de Beaumais et de Mesnil-Mauger sont respectivement de 287 km² et de 638 km².

Les paramètres de calage sont reportés en Annexe 3 avec le graphe résultat sur l'ensemble de la période de modélisation.

Calage à Beaumais

Le meilleur calage a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 0.894 sur la période 1972-2005 (Illustration 56).

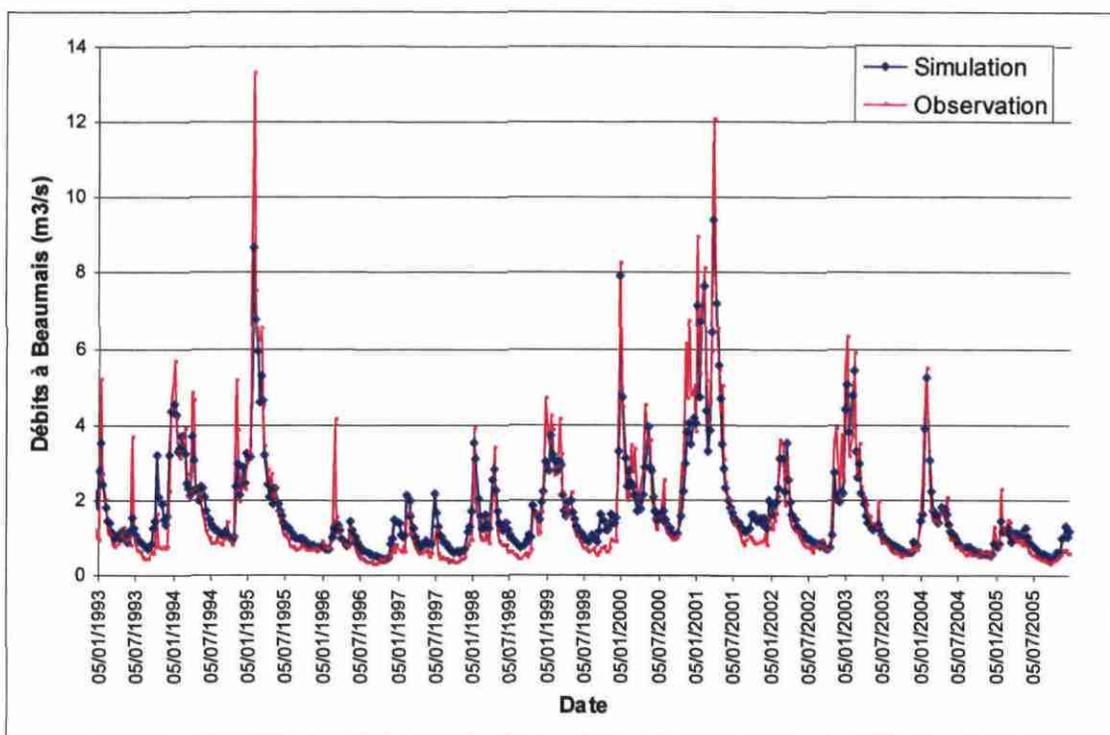


Illustration 56 : Visualisation sur la période 1995-2003 du calage pluie-débit de la Dives à Beaumais sur la période 1972-2005

La série des débits est bien reproduite par le modèle. Toujours pour des raisons de pas de temps, les plus gros débits de crue ne parviennent pas à être simulés (1995 et 2001). Les débits d'étiage sont surestimés pour certaines années : 1997, 1998, 1999 et 2001. Pour les années suivantes (2001 à 2005), les débits de crue, les débits d'étiage comme les périodes de tarissement sont parfaitement simulés.

Sur la période de simulation, les résultats du calage donnent un **débit de fuite de 34 L/s (soit 4 mm/an)** et une **pluie efficace annuelle moyenne de 181 mm**.

Le débit de fuite ainsi calculé correspond à une lame d'eau annuelle de 3.8 mm, soit 2 % de la pluie efficace. Les prélèvements sur ce sous-bassin versant s'élevaient approximativement à 100 000 m³ en 2004 (prélèvements agricoles de l'Orne non connus), soit une lame d'eau annuelle de 0.3 mm. En définitive, sur la partie amont du bassin versant, le débit de fuite peut-être considéré comme négligeable.

Calage à Mesnil-Mauger

Avec un coefficient de corrélation de 0.951 sur la période 1993 - 2005, la restitution des débits observés est encore plus satisfaisante pour le calage pluie-débit à Mesnil-Mauger (Illustration 57). Les débits de crue sont, en effet, mieux approchés et les périodes d'étiage sont toutes correctement simulées hormis celle de 1996 (dont les observations ont un aspect suspect).

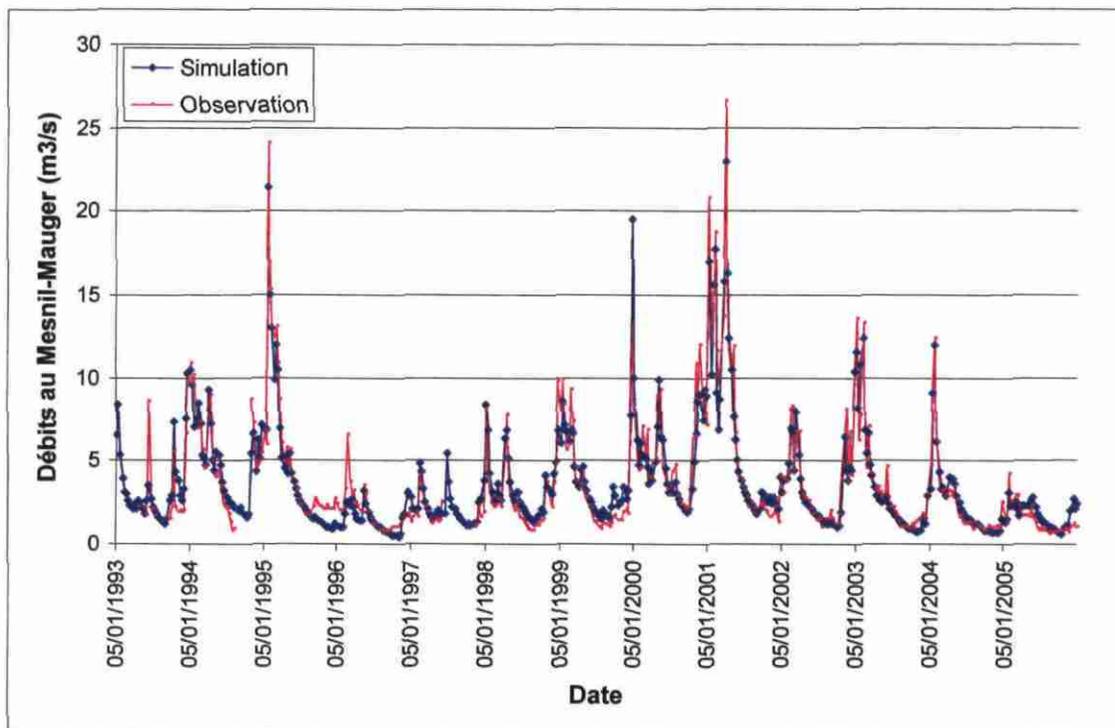


Illustration 57 : Calage pluie-débit de la Dives à Mesnil-Mauger sur la période 1993-2005

Ce calage pluie-débit a permis d'identifier sur la période de simulation (1993-2005) **un débit de fuite de 222 L/s (soit 11 mm/an) et une pluie efficace annuelle moyenne de 188 mm**. Cette dernière valeur est cohérente avec celle obtenue à Beaumais. Par contre, on peut constater que le débit de fuite est beaucoup plus conséquent dans le cas présent, cela s'explique notamment par des prélèvements plus importants. En 2004, le volume annuel prélevé sur le bassin versant en amont de Mesnil-Mauger s'élevait, en effet, à 3.7 Mm³, soit un débit moyen de 120 L/s ou une lame d'eau annuelle de 6 mm (3% du débit moyen de la Dives).

Un des intérêts du logiciel GARDENIA est de pouvoir reconstituer des chroniques de mesures, par exemple, sur la période antérieure au suivi. L'illustration 58 présente ainsi une reconstitution des débits de la Dives à Mesnil-Mauger à partir de 1971.

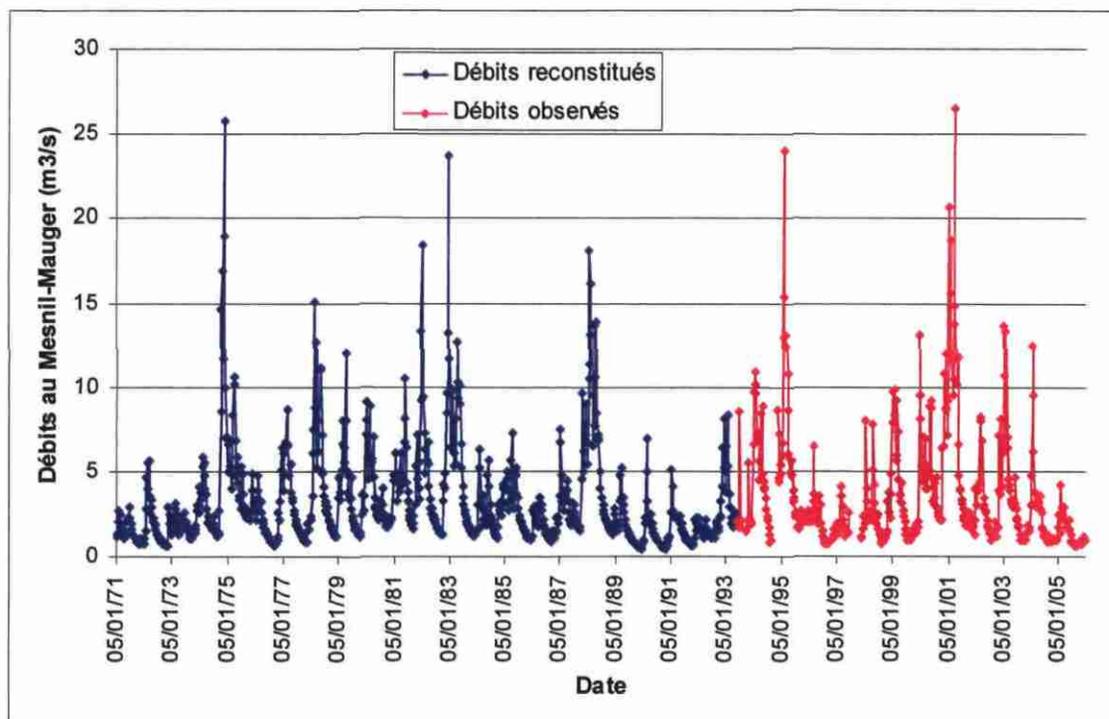


Illustration 58 : Reconstitution des débits de la Dives à Mesnil-Mauger sur la période 1971-1992

5.6.2. Modélisation pluie-niveau

Compte tenu de l'influence notable des prélèvements sur la piézométrie à Percy-en-Auge à partir du début des années 1990, la série de données n'a pu être modélisée correctement que sur la période 1978-1989 (au pas de temps décadaire).

Le coefficient de corrélation est de 0.890, la simulation pêche principalement dans la reconstitution des niveaux de hautes eaux (Illustration 59). **Une pluie efficace annuelle moyenne de 189 mm a été calculée.**

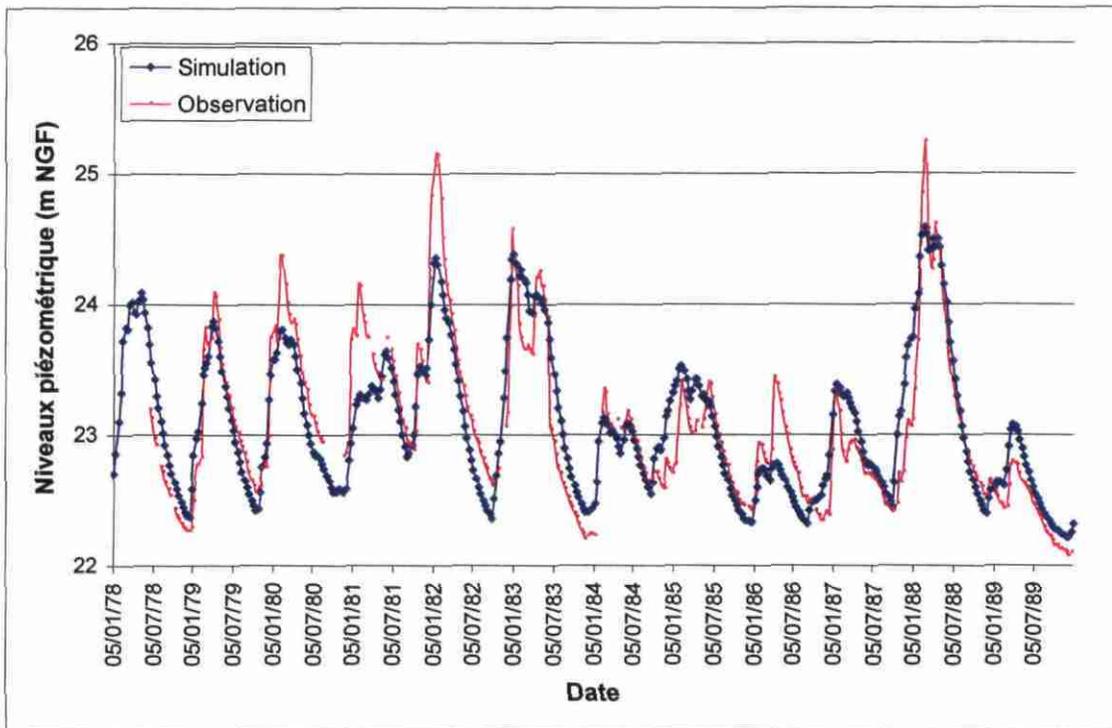


Illustration 59 : Calage pluie-niveau à Percy-en-Auge sur la période 1978-1989

Si on reconstitue les années postérieures à 1989 à partir des paramètres de calage calculés sur la période 78-89, on constate que la modélisation n'est possible qu'avec prise en compte de pompages (Illustration 60). Le décrochage est très net à partir de 1990. Par la suite, la nappe au droit de ce piézomètre ne retrouve pas son état initial, et semble, en outre, être affecté d'une tendance à la baisse.

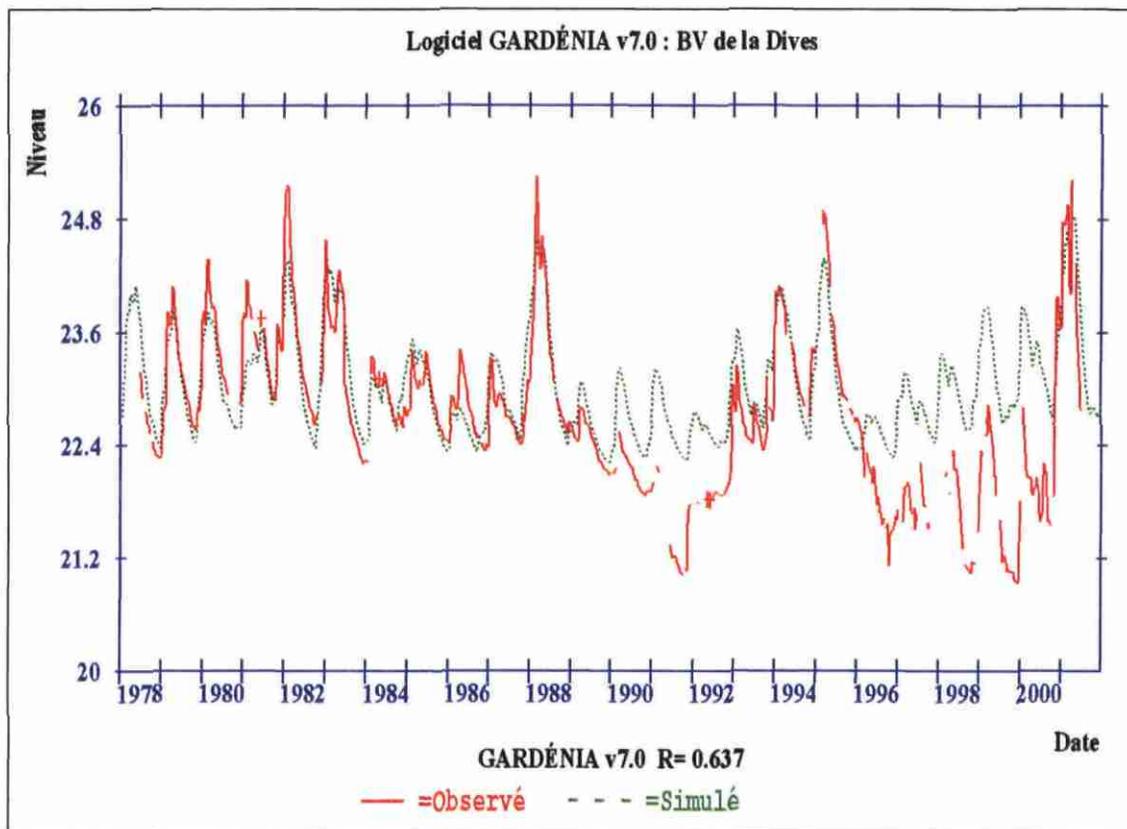


Illustration 60 : Calage pluie-niveau à Percy-en-Auge sur la période 1978-1989 transposé à la période 1978-2001

5.7. BILAN HYDROLOGIQUE

Pour les deux modélisations pluie-débit, les temps de demi-tarissement apparaissent supérieurs aux temps de demi-percolation dans des proportions relativement homogène (respectivement 6 et 2 mois pour le calage à Beaumais et 2.6 et 1.2 mois pour le calage à Mesnil-Mauger). Ces ordres de grandeur sont cohérents avec les caractéristiques de l'aquifère bathonien. En effet, sa puissance et son extension lui assure un effet capacitif intéressant (temps de demi-tarissement important) et sa faible profondeur permet des réactions aux pluies efficaces relativement rapides.

Le bilan hydrologique proposé dans le présent paragraphe repose sur le calage pluie-débit à Mesnil-Mauger (période de simulation 1993-2005).

La superficie du bassin versant contrôlé par cette station de jaugeage représente 95 % de la superficie totale du bassin de la Dives amont. Les résultats pourront, par conséquent, être étendus à l'ensemble du bassin versant.

5.7.1. Recharge hivernale

Sur la période 1993-2005, les précipitations efficaces annuelles, à l'échelle de l'année hydrologique (octobre à septembre), varient entre un minimum de 63 mm (hiver 95-96) et un maximum de 392 mm (hiver 2000-2001) pour une moyenne interannuelle de 188 mm (Illustration 61).

Cette valeur moyenne est différente de celle proposée par le MEDAD (de l'ordre de 220 mm sur la période 1946-2001) et plus en accord avec celle de la DIREN (de l'ordre de 205 mm).

Sur cette courte période, les années de référence sont bien mises en évidence : années sèches 1995-1996 et 2004-2005 et année humide 2000-2001.

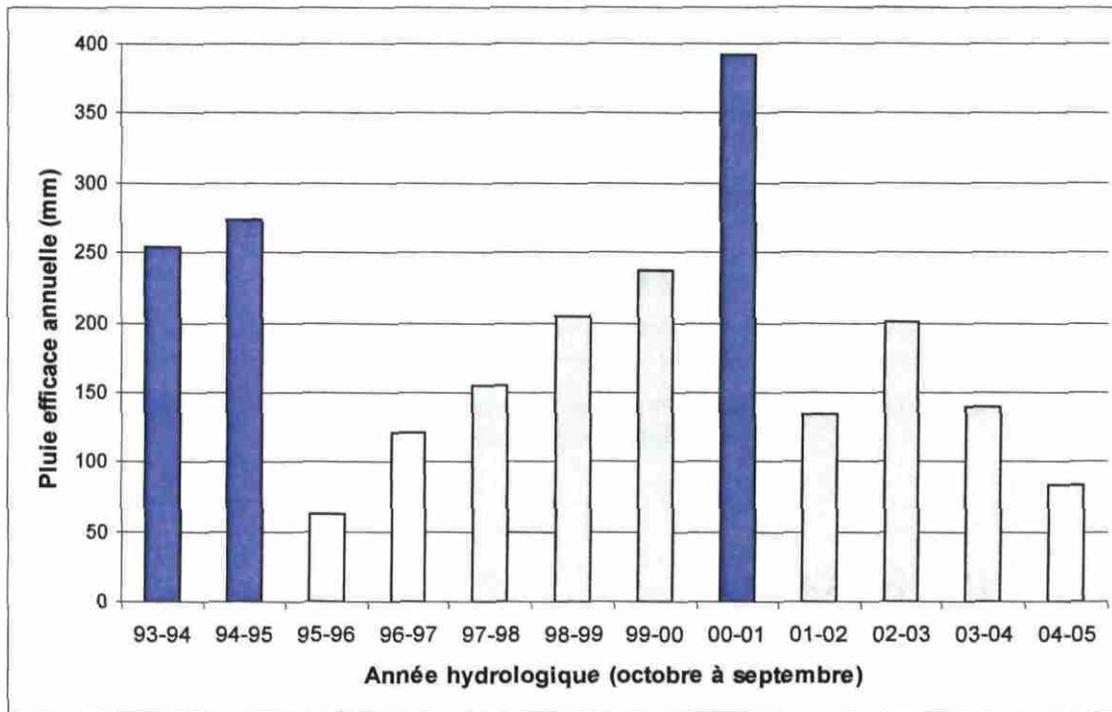


Illustration 61 : Cumul des pluies efficaces par année hydrologique (d'après la modélisation pluie-débit à Mesnil-Mauger)

L'illustration 62 présente les variations mensuelles de la pluie efficace. En moyenne, près de 80 % des précipitations efficaces sont calculées entre les mois de novembre et avril, dont une par importante en décembre et janvier.

Quelques pluies efficaces sont calculées en période estivale, mais celles-ci excèdent rarement des lames d'eau mensuelles de 5 mm. En revanche, comme dans les cas d'étude précédents (Seulles et Mue), on retrouve une pluie efficace importante (29 mm) en juin 1997, mois pendant lequel des précipitations exceptionnelles avaient été enregistrées.

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année hydrologique	Peff. annuelle (mm)
1993	37.2	3.5	0	14.8	2.9	19.2	1.4	0	16.9	30.4	7.4	34.3		
1994	37.5	36.1	13.2	32.8	22.7	4.5	3.3	4.3	7.3	5.9	37.9	37.1	93-94	254
1995	75.2	45.4	36.7	12.4	13.1	2.6	1.2	0.2	5.8	0.3	2.3	7.4	94-95	274
1996	2.7	18.7	11.3	0.6	19.2	0	0	0	0.2	1.1	15.3	30.1	95-96	63
1997	7.7	28.2	2.1	1.1	10.9	29.5	1.4	3.5	0	3.8	7.9	27.3	96-97	121
1998	33.7	4.8	13.4	40.1	1.1	12.1	0.4	0	10.9	23.5	11.4	37.8	97-98	156
1999	35.6	29.8	10.2	21.5	2.3	1.4	0.6	10.4	19.5	6.8	15.5	79.7	98-99	204
2000	8.6	25.3	14.5	31.7	33.1	0	17.3	2	2	29.9	48.1	40.4	99-00	237
2001	77.2	34	95.5	41.7	5.6	0.3	0.5	0.7	17.1	8.7	12.7	17.3	00-01	392
2002	16.1	38	23.9	1.6	3.2	2.8	1.5	3.6	4.6	12.9	33	46.5	01-02	134
2003	50.4	25.7	15.6	3.4	7	5.6	1	0	0.1	3.3	11.1	16	02-03	201
2004	60.6	3.1	11	23.3	4.9	0.2	1.1	4.2	0.2	2.1	3.6	11.8	03-04	139
2005	17.4	10.7	8.7	11	15.1	0.1	1.3	0.7	0.2	8.4	13.1	14.5	04-05	83
MIN	2.7	3.1	0	0.6	1.1	0	0	0	0	0.3	2.3	7.4	MIN	62.7
MAX	77.2	45.4	96.5	41.7	33.1	29.5	17.3	10.4	19.5	30.4	48.2	79.7	MAX	392.1
MOYENNE	35.4	23.3	19.8	18.2	10.9	6.0	2.4	2.3	6.5	10.5	16.9	31.6	MOYENNE	188.0

Illustration 62 : Répartition des pluies efficaces mensuelles calculées de 1993 à 2005 (en jaune : les valeurs minimales, en bleu : les valeurs maximales)

5.7.2. Bilans hydrologiques

Bilan hydrologique moyen

L'illustration 63 présente les différents termes du bilan hydrologique (§ 2.3) pour le bassin versant de la Dives amont. Il s'agit d'un bilan annuel calculé à partir des données résultant du calage pluie-débit à Mesnil-Mauger (période de simulation 1993-2005).

La moyenne des précipitations annuelles sur la période 1993-2005 est de 678 mm. La valeur moyenne de la pluie efficace annuelle calculée par le modèle est de **188 mm** pour une évapotranspiration réelle (ETR) moyenne de **490 mm**. Le calage du modèle a également permis de calculer l'écoulement rapide (90 mm) et l'écoulement lent (99 mm). Le modèle calcule enfin un écoulement annuel moyen de **178 mm** à Mesnil-Mauger pour un débit de fuite de **11 mm** (débit non contrôlé par la station de jaugeage).

A titre comparatif, le débit moyen interannuel de la Dives, sur la période d'observation 1993-2005, est égal à **3.68 m³/s** à Mesnil-Mauger, **soit une lame d'eau de 182 mm**.

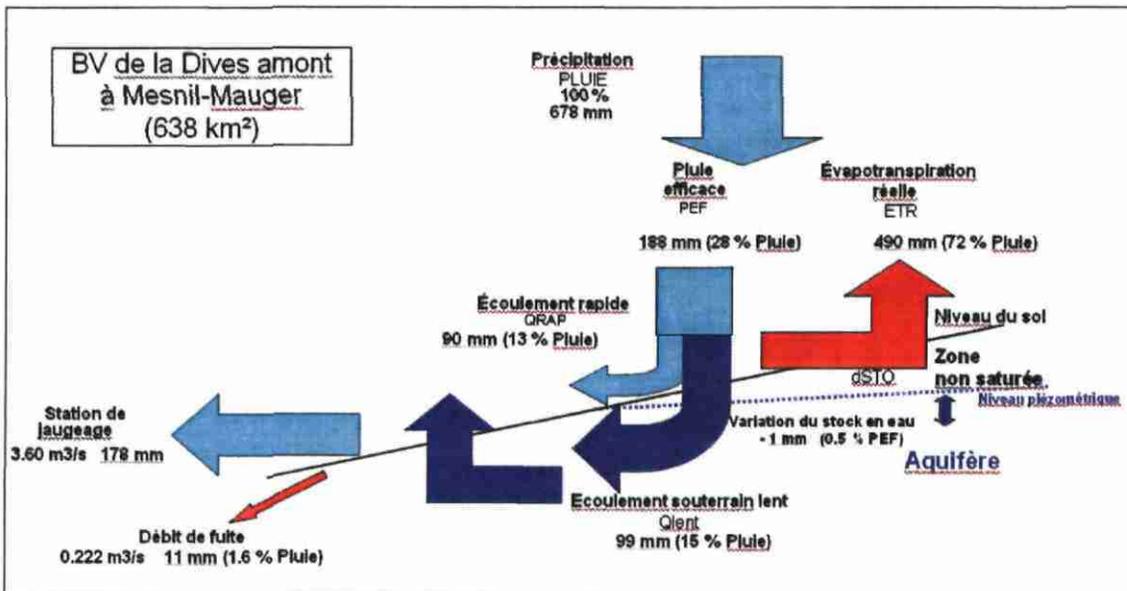


Illustration 63 : Eléments du bilan hydrologique de la Dives à Mesnil-Mauger (1993-2005) d'après les résultats de la modélisation globale GARDENIA pluie-débit

A l'échelle du bassin versant, les prélèvements en eau ne semblent pas engendrer de déficit notable au niveau de la réserve en eau souterraine. En revanche, compte tenu de la concentration des prélèvements AEP, leur impact peut localement être important comme en témoigne l'évolution des niveaux piézométriques à Percy-en-Auge.

Enfin, à titre comparatif, le **bilan hydrologique calculé à Beaumais** (plus en amont) sur la période 1972-2005 indique une part plus importante des écoulements rapides. Ce résultat est cohérent avec une densité plus importante du réseau hydrographique sur la partie amont du bassin versant. La moyenne des précipitations annuelles sur cette période est de 644 mm pour une pluie efficace annuelle de **181 mm** et une ETR moyenne de **462 mm**. L'écoulement rapide représente une lame d'eau annuelle moyenne de 97 mm contre 84 mm pour les écoulements lents. Le modèle calcule enfin un débit de fuite de **4 mm**.

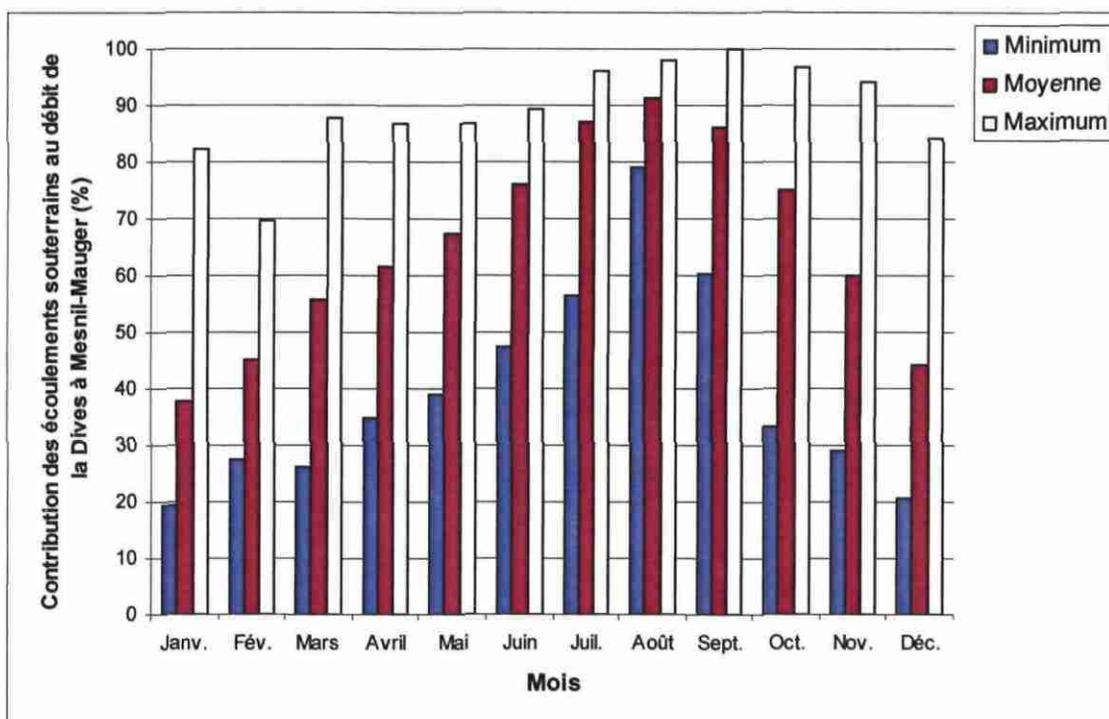
Bilan hydrologique en année sèche

Pour l'année hydrologique 1995-1996 (la plus sèche sur la période simulée), le modèle calcule une **pluie efficace annuelle de 63 mm**. En amont de Mesnil-Mauger, les prélèvements ont été évalués à une lame d'eau annuelle de 6 mm (sources : AESN, DDAF), soit de l'ordre de 10 % de la pluie efficace 95-96. A l'échelle du bassin versant, même en année très sèche, les prélèvements ne semblent pas excéder les volumes mobilisables.

5.7.3. Décomposition des écoulements

L'illustration 64 présente les variations mensuelles de la contribution des écoulements lents au débit de la Dives à Mesnil-Mauger.

Pour la période 1993-2005, le modèle calcule une contribution minimale des écoulements souterrains lents de 19 %, une contribution maximale de 100 % et une contribution moyenne de 66 %.



	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
MIN	19	28	26	35	39	47	56	79	60	33	29	21
MAX	82	70	88	87	87	89	96	98	100	97	94	84
MOYENNE	38	45	56	62	68	76	87	91	86	75	60	44
ECART-TYPE	17	12	15	17	13	13	12	7	12	21	21	18

Illustration 64 : Contributions des écoulements lents (souterrains) au débit de la Dives à Mesnil-Mauger (1993-2005)

Comparativement aux deux autres bassins versants traités précédemment, les variations mensuelles de la contribution des écoulements lents se rapprochent de celles calculées pour le bassin de la Seulles : une forte variabilité entre les basses eaux et les hautes eaux et une contribution maximale centrée sur la période estivale. Ces deux bassins versants, contrairement à celui de la Mue, présentent un fonctionnement contrasté entre l'amont et l'aval. Leur partie amont, avec des reliefs plus marqués et des terrains moins infiltrants, joue, en effet, un rôle prépondérant dans l'écoulement du cours d'eau en automne et hiver et beaucoup plus limité en été.

6. Conclusions / Perspectives

Pour les trois bassins versants étudiés (Seulles, Mue et Dives amont), des modélisations GARDENIA satisfaisantes ont pu être obtenues, et plus particulièrement pour les simulations pluie-débit. En effet, certaines chroniques piézométriques influencées n'ont pu être simulées.

Pour chacun des bassins versants, il a, par conséquent, été possible de calculer un bilan hydrologique fiable à partir des modélisations pluie-débit. Après analyse des différents termes des bilans, les principaux enseignements sont les suivants :

- malgré des contextes géologiques différents, les bassins versants de la Seulles et de la Dives amont présentent des fonctionnements hydrologiques proches avec des parties amont aux reliefs plus marqués et aux terrains plus ruisselants. Sur ces dernières, les cours d'eau se montrent beaucoup plus sensibles aux étiages en raison d'un soutien modéré par les eaux souterraines. Enfin, en période de crue, l'alimentation des cours d'eau par le ruissellement de ces secteurs amont devient prépondérante ;
- le fonctionnement hydrologique de la Mue apparaît plus homogène avec une contribution des eaux souterraines à l'alimentation du cours d'eau qui fluctue moins dans le temps (entre 60 et 80 % en moyenne) ;
- les précipitations efficaces moyennes calculées par le modèle sont respectivement de l'ordre de 320 mm pour le bassin versant de la Seulles (pour la période 1972-2003), de 180 mm pour le bassin de la Mue (période 1971-2005) et de 190 mm pour la Dives amont (période 1993-2005) ;
- le calcul du bilan hydrologique moyen sur le bassin versant de la Mue (sous-bassin de la Thue exclu) fait apparaître un déséquilibre quantitatif important. Un débit de fuite moyen de 220 L/s a, en effet, été calculé par le modèle, soit de l'ordre de 40 % de la pluie efficace moyenne. Cet impact des prélèvements est localement bien visible sur la chronique piézométrique enregistrée sur Cairon qui indique une nette tendance à la baisse depuis le début des années 80. Enfin, cette pression anthropique a entraîné un assèchement de la Mue en janvier 2007.

Compte tenu de l'enjeu quantitatif lié à la masse d'eau souterraine du bajo-bathonien, il apparaît indispensable d'améliorer la connaissance des prélèvements (localisation, indice BSS des ouvrages, volumes mensuels) sur ces trois bassins versants. Un tel inventaire, et plus particulièrement la prise en compte de chroniques de prélèvements, permettrait la réalisation de bilans hydrologiques plus fins et donc plus fiables.

GARDENIA permet désormais d'intégrer des chroniques de pompage, aussi, il serait très intéressant de modéliser le piézomètre de Cairon (bassin versant de la Mue) pour évaluer précisément l'impact des pompages sur l'abaissement local de la nappe. La

même analyse serait également à mener sur le secteur de Percy-en-Auge (bassin de la Dives) dans le but d'y évaluer l'impact des prélèvements AEP.

Sur la base de modélisations ainsi affinées et de scénarios prévisionnels, des règles de gestion volumique sur l'exploitation de la ressource en eau souterraine pourront être déterminées. Il est, par exemple, envisageable d'établir des règles de gestion, simples d'application, basées sur la lecture des chroniques piézométriques (mise en place de seuils de vigilance, d'alerte et/ou de crise).

Enfin, le tableau suivant dresse le bilan des données piézométriques et hydrologiques disponibles pour les principaux bassins versants recoupant l'emprise de la ZRE.

Principaux bassins versant de la ZRE du bajo-bathonien	Données de débit	Données de niveau piézométrique
Laison	Croissanville (1970-1982)	Vieux-Fumé (1974-2007)
Muance	Argences (1970-1980)	/
Dives aval	/	Sannerville (1974-2007)
Orne	/	Mathieu (74-07), Saint-Contest (66-07), Ifs (67-07)
Laize	Fresney-le-Puceux (2005-2007)	Cintheaux (1970-2007)
Aure	Maisons (1981-2007)	Saint-Martin-des-Entrées (1974-2007)
Drôme	Sully (1981-2007)	Maisons (1974-2007)
Bassins côtiers	/	Vierville-sur-Mer (74-07), Asnières-en-Bessin (76-07), Beny-sur-Mer (68-07)

Il apparaît que seuls les bassins versants de la Laison, de la Muance, de l'Aure amont et la Drôme amont pourraient *a priori* faire l'objet d'une modélisation hydrologique globale. Pour le reste des principaux cours d'eau, l'absence de stations de jaugeage anciennes n'autorise pas le calcul de bilans hydrologiques fiables.

7. Références bibliographiques

ARMINES – 1977 – Modèles de simulation et de gestion des ressources en eau des bassins de l'Orne, la Dives et la Seulles.

Jauffret D. – Septembre 1984 – Thèse de doctorat – Géologie des bassins versants et régime de tarissement et d'étiage des cours d'eau de Basse-Normandie ; application à une évaluation des ressources en eau souterraine.

Pascaud P., Mauger D. – 1991 – Carte hydrogéologique du département du Calvados.

Ménillet F., Rioult M. – 1994 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Vimoutiers (n° 177). BRGM.

Gigot P., Dupret L., Le Gall J. – 1999 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Falaise (n° 176). BRGM.

Deroin J.-P., Vernhet Y., Barbier G., Coutard J.-P., Langevin C. – 1999 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Mézidon (n° 146). BRGM.

Maurizot P., Pellerin J., LE Gall J., Auffret J.-P. – 2000 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Bayeux – Courseulles-sur-Mer (n° 119). BRGM.

Vernhet Y., Maurizot P., Le Gall J., Gigot P., Dupret L., Lerouge G., Besombes J.-C., Barbier G., Pay T. – 2002 – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Villers-Bocage (n° 145). BRGM.

Thiéry D. – Décembre 2003 – BRGM – Logiciel GARDENIA. Version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR.

Equilbey E., Normand M., Schomburgk S. – Février 2004 – BRGM – Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet quantitatif. Rapport BRGM/RP-52988-FR.

Martin J.-C., Rouxel-David E., Batkowski D., Normand M., Chabart M. – 2004 – Elaboration d'une règle de gestion volumique de la ressource en eaux du bassin de la barbuise (Aube) – Rapport BRGM/RP-53178-FR.

SAGE Orne aval - Seulles – Mars 2005 – Etat des lieux. Gestion quantitative des eaux.

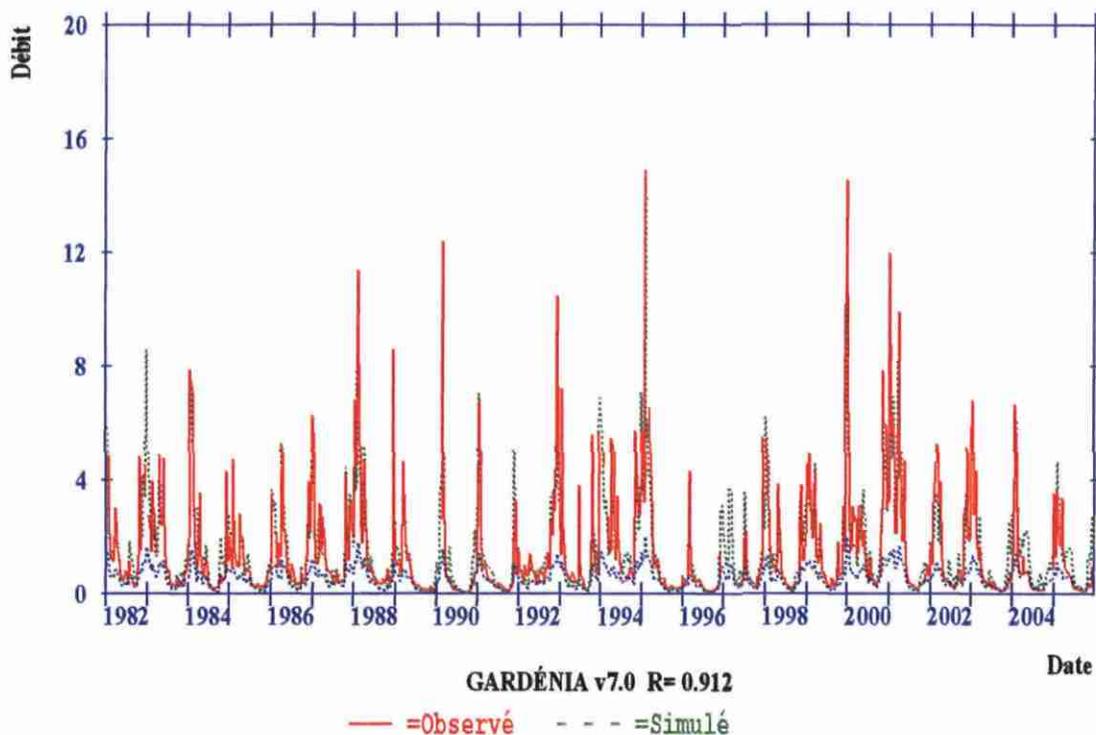
Schmidt C., Normand M., Chabart M. – 2006 – Elaboration de règles de gestion volumique de la ressource en eau pour les bassins versants de la Somme-Soude et de la Coole (51) – Rapport BRGM/RP-54178-FR.

Annexe 1

Bassin versant de la Seulles : résultats des calages

Calage pluie-débit de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles



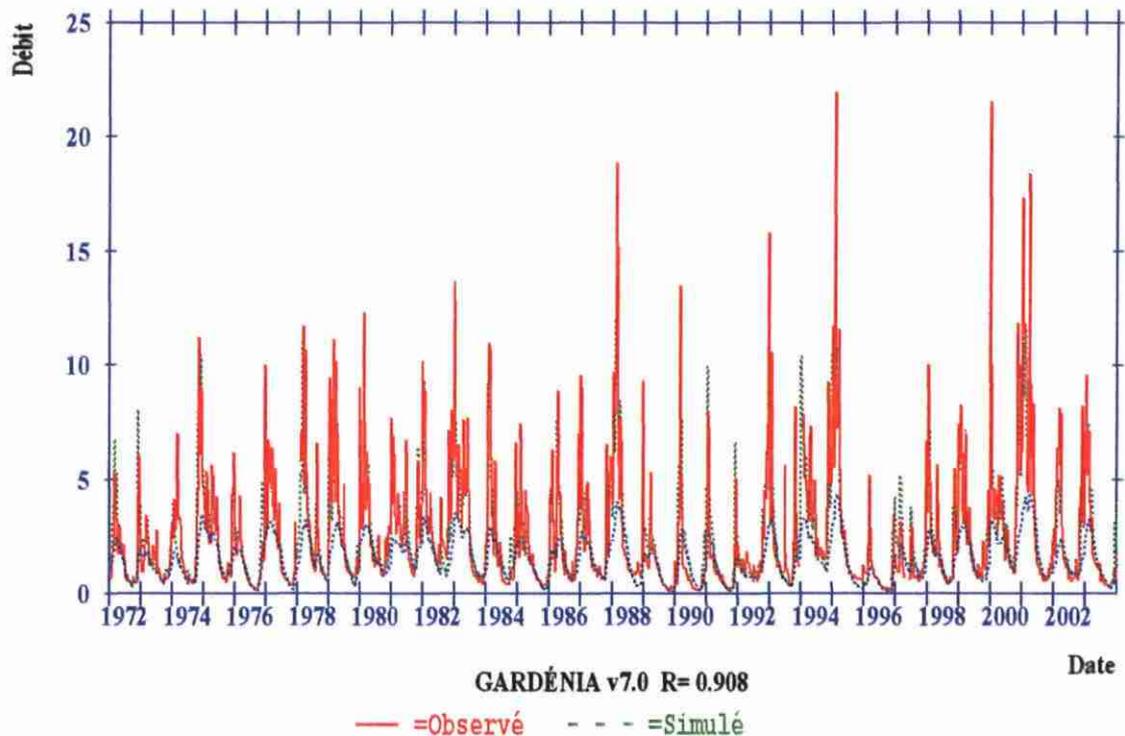
N.B. La courbe pointillée de couleur bleu foncé correspond à la composante lente du débit simulé.

Paramètres de calage :

Surf	Débit ext	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rul_Perc	T1/2_Per	T1/2_Tar1	T1/2_Per2	T1/2_Tar2	Rumax_Prog
km2	m3/s	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
133	-1.11E-02	0.9122	0.9122	20	0	0	21.002	1.512	0.18	0.1501	0.1501	150.779

Calage pluie-débit de la Seules à Tierceville

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Seules à Tierceville

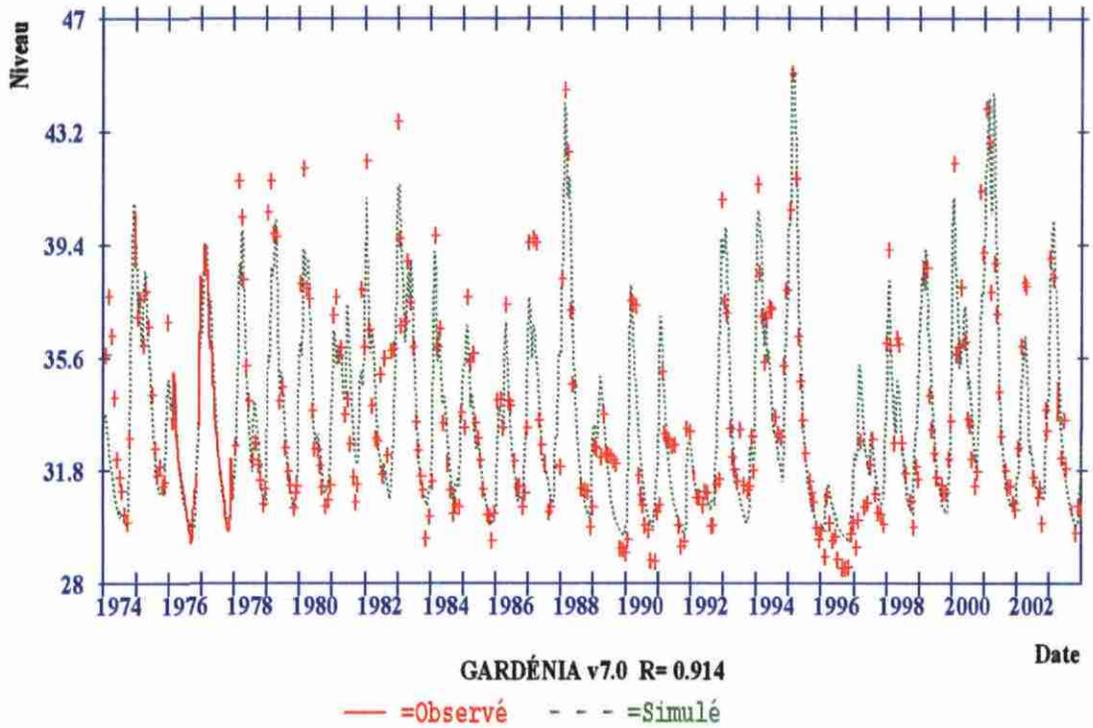


Paramètres de calage :

Surf	Débit ext	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui Perc	T1/2 Per	T1/2 Tar1	T1/2 Per2	T1/2 Tar2	Rumax Prog
km2	m3/s	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
257	-2.78E-02	0.9081	0.9081	15	11.052	0	60	1.001	1.2	0.1501	0.1501	84.52

Calage pluie-niveau au piézomètre de Martragny

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Seules



Paramètres de calage :

Coe Emmag	N. Base	R pond	R nat.	Cor. Plu	Déficit max	Cor. ETP	Rui Perc	T1/2 Per	T1/2 Tar1	T1/2 Per2	T1/2 Tar2	Rumax Prog
	m	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mn	mois	mm
7.19E-04	29.183	0.914	0.914	14.557	27.248	0	67.106	2.546	0.31	0.1501	0.1501	149.988

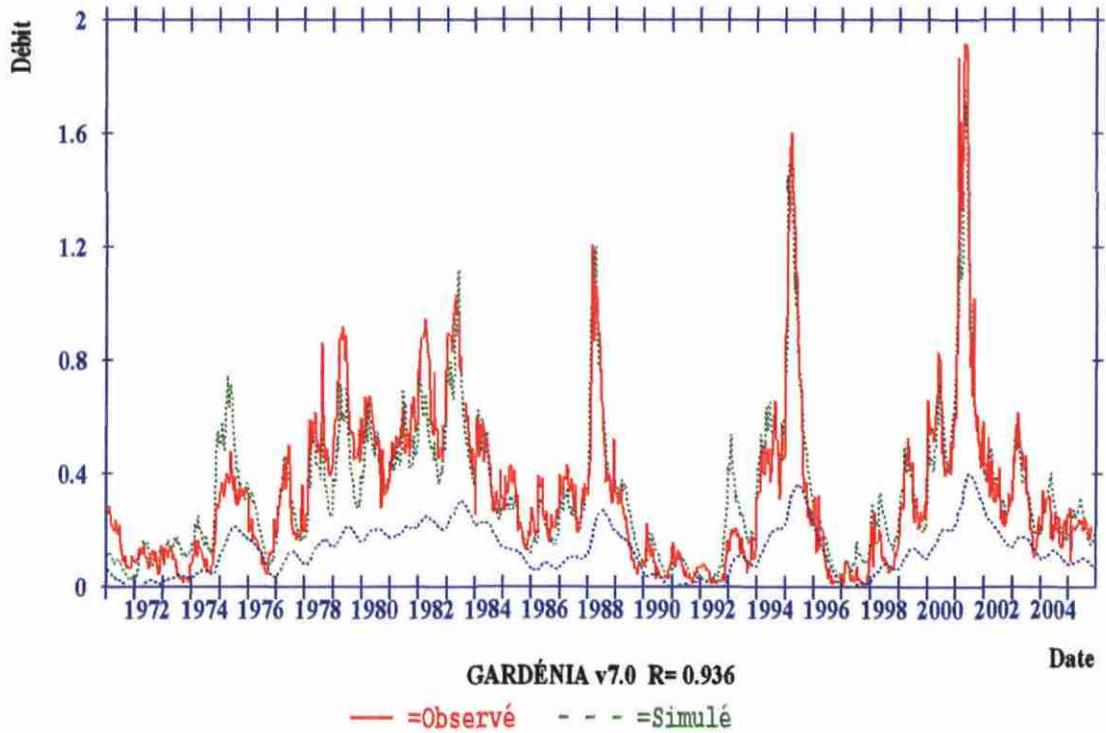
Annexe 2

Bassin versant de la Mue : résultats des calages



Calage pluie-débit de la Mue à Reviers

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Mue à Reviers

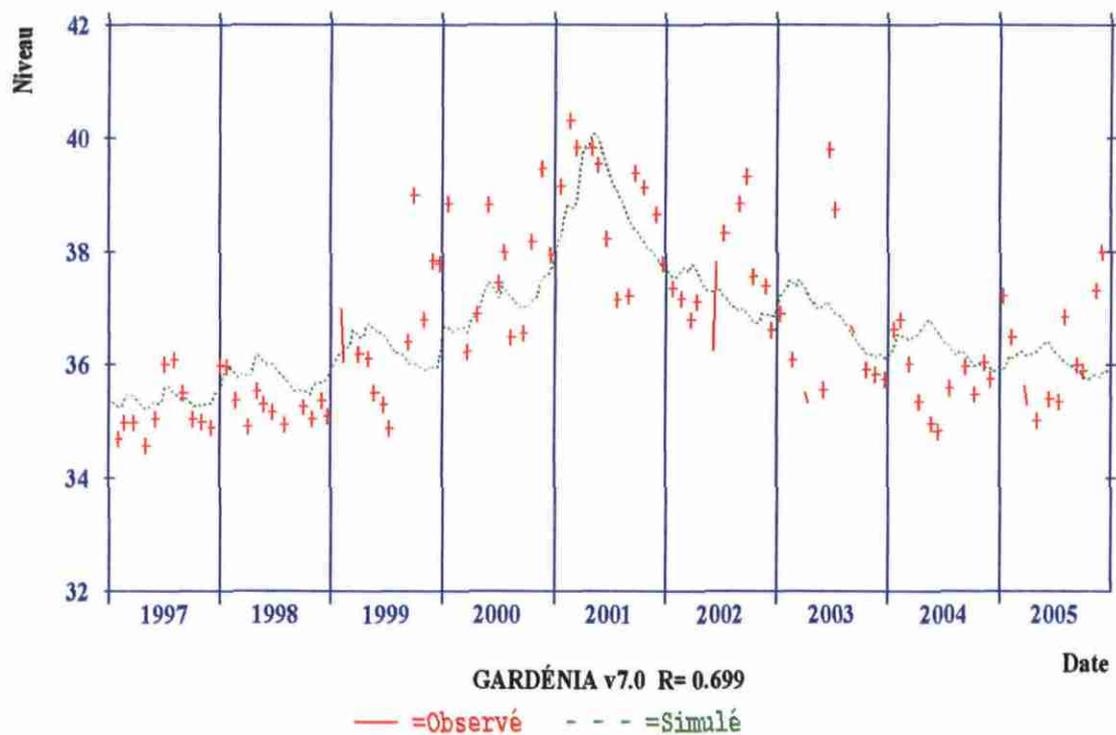


Paramètres de calage :

Surf	Débit ext	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rul_Perc	T1/2_Per	T1/2_Tarf	T1/2_Per2	T1/2_Tar2	Rumax_Prog
km2	m3/s	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou min	mois	mm
98	-0.2217	0.9356	0.9356	0	0	0	145.283	5.5	6.057	0.1501	0.1501	427.918

Calage pluie-niveau au piézomètre de Fresne-Camilly

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Mue

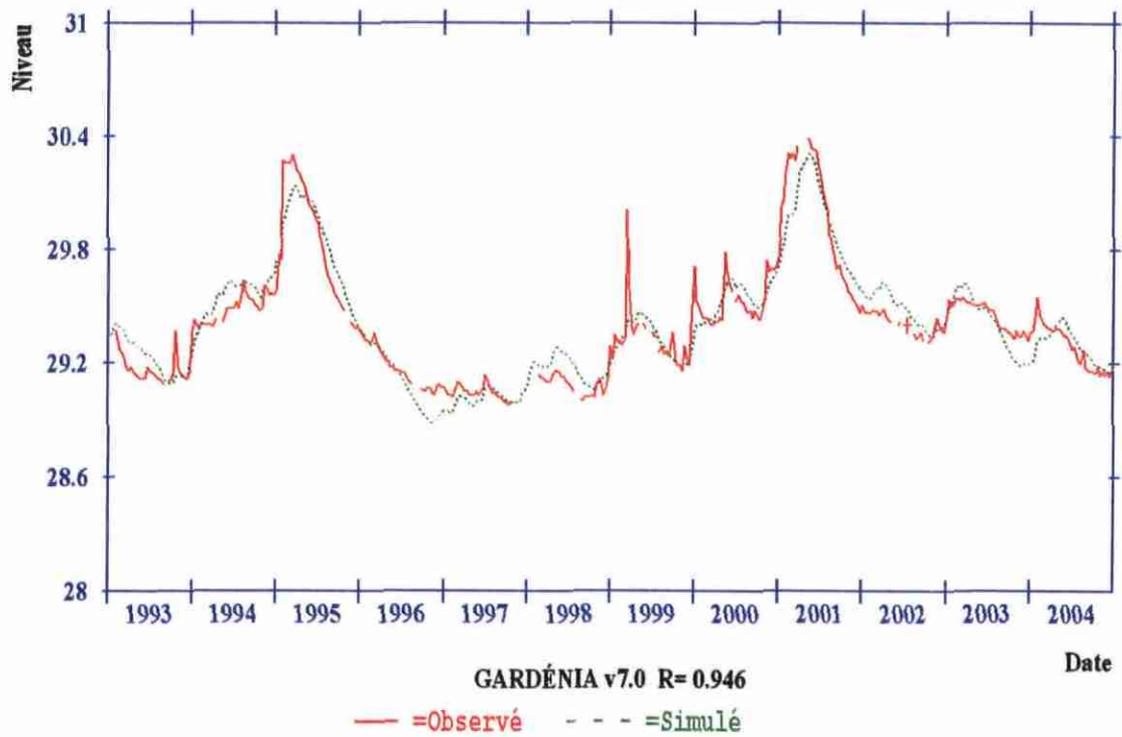


Paramètres de calage :

Coe Emmag	N. Base	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui Perc	T1/2_Per	T1/2_Tar1	T1/2_Per2	T1/2_Tar2	Rumax Prog
	m			%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
4.34E-02	33.108	0.6992	0.6992	0	0	0	40	0.15	8.631	0.1501	0.1501	550

Calage pluie-niveau au piézomètre de Cairon

Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Mue



Paramètres de calage :

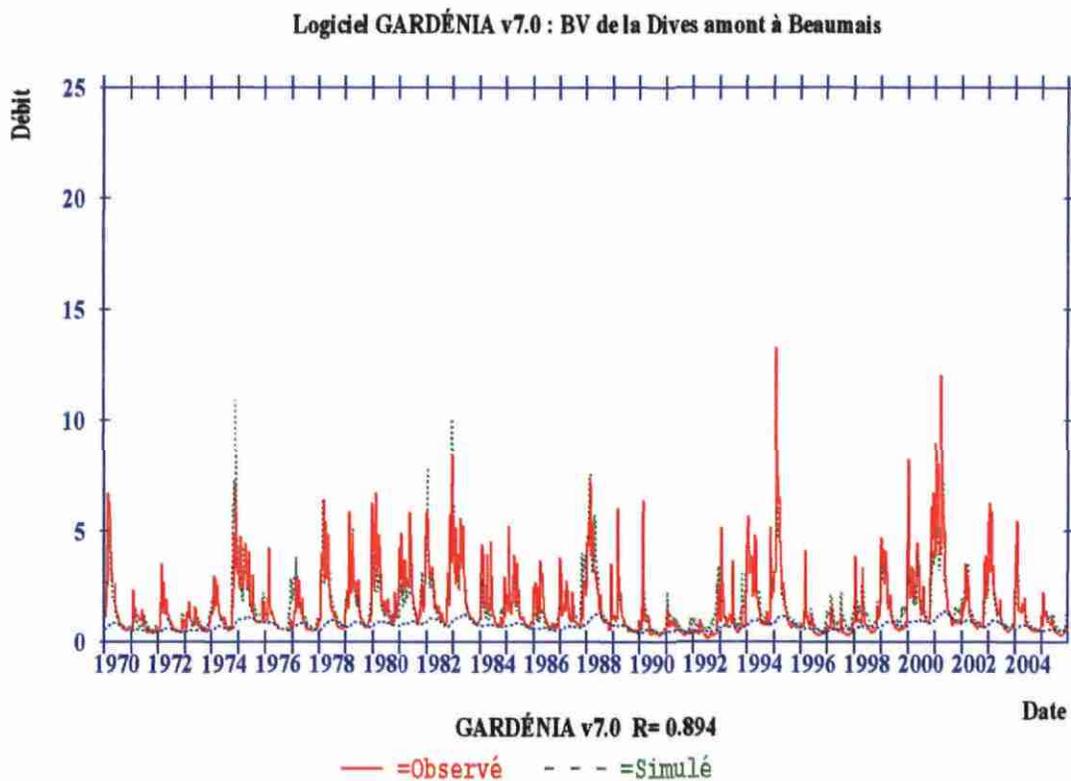
Coe Emmag	N. Base	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui. Perc	T1/2 Per	T1/2 Tar1	T1/2 Per2	T1/2 Tar2	Rumax Prog
-	m	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
9.97E-02	28.28	0.9463	0.9463	0	1.00E-04	0	20.172	0.5	7.776	0.1501	0.1501	400.028



Annexe 3

Bassin versant de la Dives amont : résultats des calages

Calage pluie-débit de la Dives à Beaumais

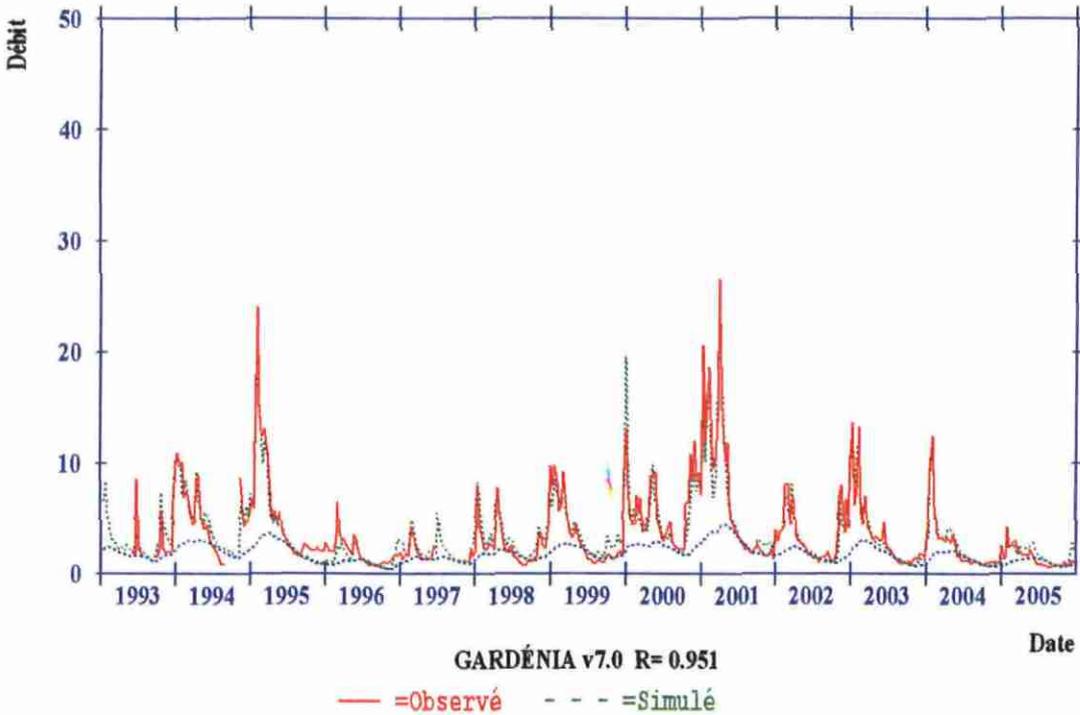


Paramètres de calage :

Surf	Débit ext	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui_Perc	T1/2_Per	T1/2_Tar1	T1/2_Per2	T1/2_Tar2	Rumax_Prog
km2	m3/s	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
287	-3.39E-02	0.8944	0.8944	0	0	0	25	1.994	6.061	0.1501	0.1501	164.624

Calage pluie-débit de la Dives à Mesnil-Mauger

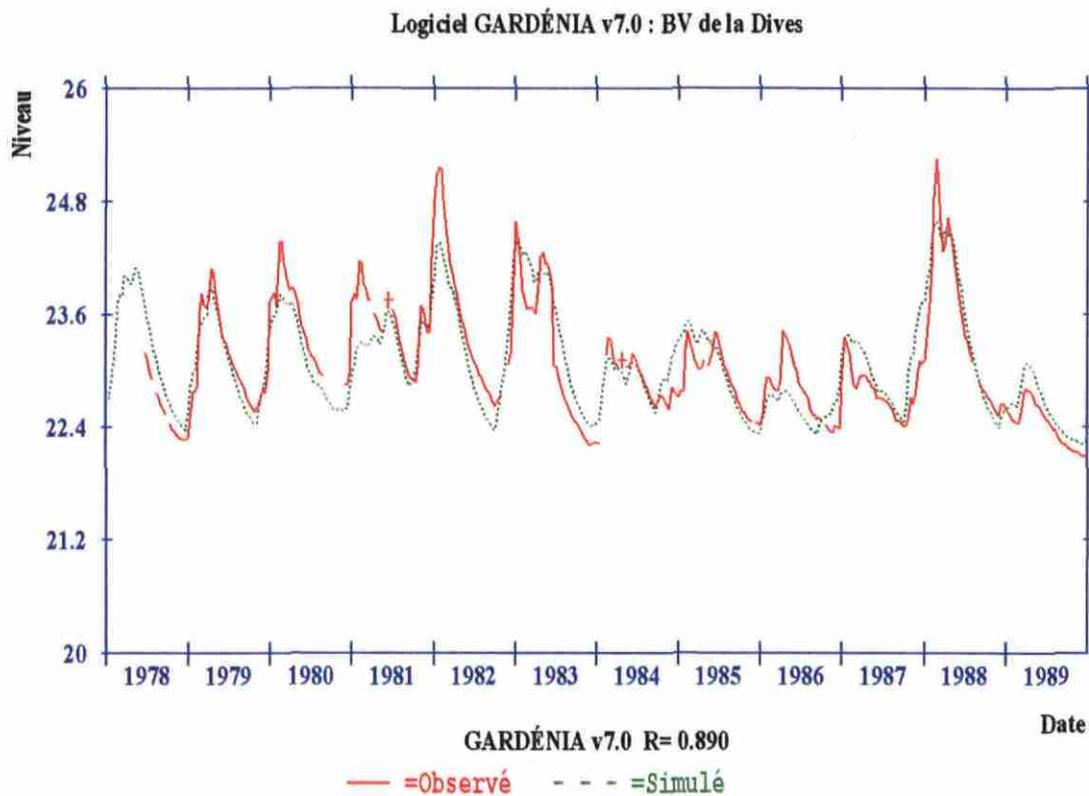
Logiciel GARDÉNIA v7.0 : BV de la Dives amont à Mesnil-Auger



Paramètres de calage :

Surf	Débit ext	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui Perc	T1/2_Per	T1/2_Tar1	T1/2_Per2	T1/2_Tar2	Rumax_Prog
km2	m3/s	-	-	%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
638	-0.2217	0.951	0.951	0	0	0	25	1.249	2.56	0.1501	0.1501	170.167

Calage pluie-niveau au piézomètre de Percy-en-Auge



Paramètres de calage :

Coe Emmag	N. Base	R pond	R nat.	Cor. Plu	Défic max	Cor. ETP	Rui Perc	T1/2 Per	T1/2 Tar1	T1/2 Per2	T1/2 Tar2	Rumax Prog
	m			%	mm	%	mm	mois	mois	mois ou mm	mois	mm
2.60E-02	22.138	0.89	0.89	0	17.332	0	38.087	0.7758	1.855	0.1501	0.1501	63.887



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Basse-Normandie
Citis Odysée
4 avenue de Cambridge
14209 – Hérouville Saint Clair - France
Tél. : 02.31.06.66.40