

# Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1

Vos premières modélisations

Rapport final

**BRGM/RP-61720-FR**

Janvier 2013



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1

Vos premières modélisations

Rapport final

**BRGM/RP-61720-FR**  
Janvier 2013

**Dominique Thiéry**

**Vérifié par :**

Nom : Y. Barthélemy

Date : 11/01/2013

Signature :



**Approuvé par :**

Nom : S. Lallier

Date : 15/01/2013

Signature :



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

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

**Mots clés** : Code de calcul GARDÉNIA, Didacticiel, Modèle à réservoirs, Bilan hydrologique, Pluie-Débit, Pluie-Niveau, Prévision hydrologique.

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

**Thiéry D.** (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport final. BRGM/RP-61720-FR, 127 p., 93 fig., 4 tabl.

## Synthèse

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **Global A Réservoirs** pour la simulation des **DÉbits** et des **Niveaux Aquifères**) est un modèle hydrologique global de bassins versants.

À partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur son bassin d'alimentation, il permet donc de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) ;
- et/ou le niveau en un point de la nappe libre sous-jacente.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

Les calculs peuvent être réalisés au choix, au pas de temps journalier, décadaire (dix jours) ou mensuel. Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

Le code de calcul GARDÉNIA est exploité de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps. Il permet les fonctionnalités suivantes :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calage préalable sur une période relativement courte ;
- analyse de cohérence entre observations climatiques et observations de débits ou de niveaux piézométriques ;
- analyse des différents termes du cycle hydrologique (infiltration, évapotranspiration, écoulement).

L'objet de ce didacticiel est de présenter, d'explorer et de mettre en œuvre la plupart des fonctionnalités du code de calcul GARDÉNIA version 8.1 sous forme de traitement d'un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes. Ce didacticiel a pour but de permettre à l'utilisateur une première prise en main autonome du code de calcul.

Avertissement : Les données hydro-climatiques qui sont nécessaires à l'utilisation de ce didacticiel sont fournies avec la distribution du logiciel. Elles sont destinées uniquement à un usage didactique. Pour des raisons de propriété, elles ne doivent en aucun cas être utilisées à un autre usage. Elles ont d'ailleurs pu être volontairement modifiées ou dénaturées.



## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Premier exemple d'application : débits journaliers de la Somme à Abbeville.....</b>	<b>17</b>
2.1. CRÉATION D'UN NOUVEAU PROJET .....	18
2.2. DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE SIMULATION. ....	20
2.3. LANCEMENT DE LA SIMULATION ET EXAMEN DES RÉSULTATS .....	22
<b>3. Exemple d'application n° 2 : débits décennaux de l'Austreberthe à Saint-Paër (validation du schéma d'écoulement souterrain).....</b>	<b>31</b>
3.1. PRÉPARATION DES DONNÉES .....	31
3.2. EXAMEN DES RÉSULTATS .....	32
3.3. VALIDATION DU SCHÉMA D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN DE GARDÉNIA.....	35
<b>4. Exemple d'application n° 3 : débits du Gapeau à Hyères .....</b>	<b>39</b>
4.1. SIMULATION AVEC LE SCHÉMA « GARDÉNIA » .....	39
4.2. SIMULATION AVEC LE SCHÉMA GR4 .....	41
4.3. SIMULATION OPTIMALE DES ÉTIAGES .....	43
4.4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	44
4.4.1. Utilisation d'une réserve sol « Rumax » au lieu d'une « Réserve progressive » .....	45
4.4.2. Utilisation de pluie et d'ETP décennaux .....	45
4.4.3. Calcul sans échanges souterrains.....	45
4.5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	46
<b>5. Exemple d'application n° 4 : débits de la Durance à Embrun.....</b>	<b>47</b>
5.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES.....	48
5.2. RÉSULTATS OBTENUS .....	49
<b>6. Exemple d'application n° 5 : modélisation simultanée du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron et du débit de la Voulzie à Jutigny (validation du schéma pluie - niveau de Gardénia).....</b>	<b>53</b>
6.1. MODÉLISATION UNIQUEMENT PLUIE - NIVEAU .....	54

6.1.1.	Définition des paramètres.....	55
6.1.2.	Résultats obtenus.....	55
6.1.3.	Validation de la calibration – Extension de données.....	57
6.2.	<b>MODÉLISATION UNIQUEMENT PLUIE - DÉBIT : MODIFICATION D'UN PROJET</b> .....	59
6.2.1.	Modification d'un projet existant .....	59
6.2.2.	Définition des paramètres.....	60
6.3.	<b>MODÉLISATION COUPLÉE PLUIE - DÉBIT ET PLUIE - NIVEAU</b> .....	61
6.3.1.	Création ou modification d'un projet existant .....	61
6.3.2.	Définition des paramètres.....	61
6.3.3.	Résultats obtenus.....	62
6.4.	<b>VALIDATION DU SCHÉMA GARDÉNIA DE MODÉLISATION DES NIVEAUX DE NAPPE</b> .....	65
<b>7.</b>	<b>Exemple d'application n° 6 : modélisation simultanée du niveau de nappe à Morvillers et du débit de la Selle à Plachy</b> .....	<b>69</b>
7.1.	<b>MODÉLISATION COUPLÉE PLUIE - DÉBIT ET PLUIE - NIVEAU</b> .....	70
7.1.1.	Définition des paramètres.....	70
7.1.2.	Résultats obtenus.....	71
<b>8.</b>	<b>Exemple d'application n° 7 : modélisation avec deux composantes souterraines : niveau de nappe à Sompuis et débit de l'Huitrelle à Lhuitre. .</b>	<b>73</b>
8.1.	<b>MODÉLISATION PLUIE - DÉBIT- NIVEAU, SANS EFFET DE SEUIL</b> .....	74
8.2.	<b>MODÉLISATION PLUIE - DÉBIT- NIVEAU, AVEC SEUIL DE TARISSEMENT RAPIDE</b> .....	76
<b>9.</b>	<b>Exemple d'application n° 8 : modélisation d'une crue éclair à pas de temps fin (1/2 heure) dans l'île de la Réunion</b> .....	<b>79</b>
9.1.	<b>DÉFINITION DES PARAMÈTRES</b> .....	79
9.2.	<b>RÉSULTATS OBTENUS</b> .....	81
<b>10.</b>	<b>Exemple d'application n° 9 : modélisation à pas de temps horaire d'un ensemble de crues provoquées par des cyclones. Rivière du Mât (île de la Réunion)</b> .....	<b>83</b>
10.1.	<b>PRÉPARATION DES DONNÉES ET DÉFINITION DES PARAMÈTRES</b> .....	84
10.2.	<b>RÉSULTATS OBTENUS</b> .....	85

<b>11. Exemple d'application n° 10 : modélisation d'un écoulement à travers la zone non saturée. Validation du code de calcul Gardénia</b> .....	<b>87</b>
11.1. PRÉPARATION DES DONNÉES ET DÉFINITION DES PARAMÈTRES.....	88
11.1.1. Résultats obtenus sur la parcelle de sol nu .....	88
11.1.2. Résultats obtenus sur la parcelle de maïs .....	91
11.1.3. Conclusion des simulations des parcelles de Saint-André.....	92
<b>12. Exemple d'application n° 11 : modélisation pluie-biveau d'un piézomètre influencé par un pompage</b> .....	<b>93</b>
12.1. MODÉLISATION PLUIE - POMPAGE - NIVEAU.....	94
12.1.1. Valeurs initiales des paramètres .....	94
12.1.2. Résultats obtenus .....	95
12.2. RECALCUL DES DÉBITS DE POMPAGE EN DEHORS DE LA PÉRIODE D'OBSERVATION .....	98
12.3. VALIDATION DU SCHÉMA GARDÉNIA D'INFLUENCE D'UN POMPAGE SUR UN NIVEAU DE NAPPE.....	101
<b>13. Exemple d'application n° 12 : modélisation pluie-niveau de deux piézomètres du Marais poitevin, influencés par des pompages</b> .....	<b>103</b>
13.1. DONNÉES DISPONIBLES .....	103
13.1.1. Données météorologiques .....	103
13.1.2. Données de prélèvement .....	104
13.2. MODÉLISATION DU PIÉZOMÈTRE LUÇON .....	104
13.2.1. Choix des prélèvements à prendre en compte .....	104
13.2.2. Fichiers de données utilisés .....	104
13.2.3. Valeurs initiales des paramètres .....	105
13.2.4. Résultats obtenus .....	106
13.3. MODÉLISATION DU PIÉZOMÈTRE CHALAIS .....	109
13.3.1. Choix des prélèvements à prendre en compte .....	109
13.3.2. Fichiers de données utilisés .....	109
13.3.3. Valeurs initiales des paramètres .....	109
13.3.4. Résultats obtenus : .....	110
<b>14. Exemple d'application n° 13 : prévision des débits de la Somme à Abbeville</b> .....	<b>113</b>
14.1. DONNÉES SUPPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES EN MODE PRÉVISION.....	113

14.2.	ÉTAPES DU CALCUL DE PRÉVISION.....	113
14.3.	ÉMISSION DIRECTE D'UNE PRÉVISION, SANS ÉTAPE DE PRÉPARATION.....	114
14.4.	CALCUL EN DEUX ÉTAPES : PRÉPARATION, PUIS ÉMISSION DE LA PRÉVISION.....	115
14.4.1.	Préparation de la prévision.....	115
14.4.2.	Émission d'une prévision.....	116
<b>15.</b>	<b>Comparaison de différentes hypothèses et conseils .....</b>	<b>119</b>
15.1.	INFLUENCE DU PAS DE TEMPS DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES.....	119
15.2.	RÉSERVE DU SOL PROGRESSIVE COMPARÉE À UNE « RÉSERVE UTILE » .....	120
15.3.	SCHÉMA DE RUISSELLEMENT DE GARDÉNIA COMPARÉ À UN POURCENTAGE DE RUISSELLEMENT CONSTANT .....	121
15.4.	INTÉRÊT DE LA PRISE EN COMPTE DU COEFFICIENT DE RETARD SIMULANT LE « TEMPS DE CONCENTRATION » DU BASSIN .....	121
15.5.	INTÉRÊT DE LA PRISE EN COMPTE DES ÉCHANGES SOUTERRAINS.....	122
15.6.	INTÉRÊT DE L'UTILISATION DE DEUX RÉSERVOIRS SOUTERRAINS.....	124
15.7.	RÉCAPITULATION.....	124
<b>16.</b>	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>127</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 -	Ouverture de Gardénia et création d'un nouveau projet.....	18
Figure 2 -	Création d'un nouveau projet.....	19
Figure 3 -	Nom à donner au nouveau fichier projet.....	19
Figure 4 -	Création d'un nouveau fichier de paramètres.....	20
Figure 5 -	Pré-options : type d'utilisation (simple ou avancée).....	20
Figure 6 -	Définition des options générales (type d'observations, résultats à sauvegarder, type de pondération, etc.).....	23

Figure 7 -	Définition des pas de temps des données hydroclimatiques. ....	24
Figure 8 -	Paramètres généraux : définition des valeurs observées minimales et maximales à prendre en compte. ....	24
Figure 9 -	Paramètres généraux : définition du nombre d'années, de la durée de la période de démarrage, de l'initialisation, du nombre d'itérations. ....	25
Figure 10 -	Paramètres physiques : définition des facteurs d'amplitude. Pour les débits : superficie du bassin versant, débit extérieur. Pour les nappes : coefficient d'emmagasinement équivalent et niveau de base. ....	26
Figure 11 -	Paramètres physiques : capacité des réserves superficielles, hauteur d'équivalent, temps de ½ montée, temps de ½ tarissement. ....	27
Figure 12 -	Paramètres physiques : bornes des paramètres pour la calibration automatique. ....	28
Figure 13 -	Message de fin de simulation. ....	28
Figure 14 -	Somme à Abbeville : dessin à l'écran des débits observés (en rouge) et simulés (en vert). ....	29
Figure 15 -	Message de fin d'exécution avec le nom des fichiers de résultats générés. ....	29
Figure 16 -	Austreberthe : pas de temps des données hydroclimatiques « Décadaires annuaire ». ....	33
Figure 17 -	Austreberthe : 38 années de données, 28 années de démarrage, première année 1969. ....	33
Figure 18 -	L'Austreberthe à Saint-Paër. Superficie = 157 km <sup>2</sup> ; détermination par calibration automatique d'un débit extérieur constant ; pluie efficace pour initialisation = 100 mm/an. ....	34
Figure 19 -	L'Austreberthe à Saint-Paër : dessin à l'écran des débits observés (en rouge) et simulés (en vert). En bleu foncé : composante souterraine. ....	35
Figure 20 -	Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA du débit à l'exutoire d'un bassin versant. ....	36
Figure 21 -	L'Austreberthe à Saint-Paër : débit souterrain. Simulation GARDÉNIA (en bleu) et simulation physique MARTHE (en rouge). Les courbes sont superposées et indiscernables. ....	37
Figure 22 -	Le Gapeau à Hyères. Racine carrée des débits. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). ....	41
Figure 23 -	Le Gapeau à Hyères. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu) (échelle logarithmique). ....	41
Figure 24 -	Schéma GR4 : le Gapeau à Hyères. Racine carrée des débits. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). ....	42
Figure 25 -	Schéma GR4 : le Gapeau à Hyères. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu) (échelle logarithmique). ....	43
Figure 26 -	Le Gapeau à Hyères. Pondération logarithmique. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). ....	44
Figure 27 -	Le Gapeau à Hyères. À gauche : pondération racine carrée. À droite : pondération logarithmique. ....	44

Figure 28 - Le Gapeau à Hyères. Simulation avec une réserve sol « Rumax ». Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). .....	45
Figure 29 - Débits moyens mensuels de la Durance à Embrun (dessin EauFrance). .....	47
Figure 30 - Pré-options : utilisation avancée. ....	48
Figure 31 - Prise en compte de la neige.....	50
Figure 32 - Durance : paramètres physiques initiaux, avec fonte de la neige. ....	50
Figure 33 - Durance : bornes des paramètres physiques, avec fonte de la neige.....	51
Figure 34 - La Durance à Embrun 1975-1991. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). .....	51
Figure 35 - La Durance à Embrun 1992-2009. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu). .....	52
Figure 36 - La Durance à Embrun 1974-1991. Évolution du stock moyen de neige calculé. ...	52
Figure 37 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron et débit de la Voulzie à Jutigny (données moyennes mensuelles). .....	53
Figure 38 - Simulation du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron. Calibration sur les seuls niveaux de nappe. ....	57
Figure 39 - Ouverture d'un projet existant. ....	58
Figure 40 - Modification du nombre d'années. ....	58
Figure 41 - Simulation du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron. Calibration sur la période 1974-1992 et contrôle sur la période 1993-2004.....	59
Figure 42 - Simulation du débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny (calibration uniquement sur la série des débits). .....	60
Figure 43 - Simulation du débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny (calibration simultanée sur la série des débits et la série des niveaux). .....	63
Figure 44 - Simulation du niveau de nappe mensuel à Saint-Martin-Chennetron (calibration simultanée sur la série des débits et la série des niveaux).....	63
Figure 45 - Simulation simultanée du débit de la Voulzie à Jutigny et du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron.....	64
Figure 46 - Décomposition de l'écoulement en écoulement rapide et écoulement lent (calibration simultanée sur le débit de la Voulzie à Jutigny et sur le niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron). .....	64
Figure 47 - Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs de niveau de nappe avec GARDÉNIA. ....	65
Figure 48 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma 1D, piézomètre à 15 km (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). Les courbes sont superposées et indiscernables.....	67
Figure 49 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma 1D, piézomètre sur la limite est (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). .....	67
Figure 50 - Schéma physique radial modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs de niveau de nappe avec GARDÉNIA. ....	68

Figure 51 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma radial, piézomètre à 15 km (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). Les courbes sont superposées et indiscernables. ....	68
Figure 52 - Piézomètre Morvillers et débit de la Selle à Plachy. ....	69
Figure 53 - Simulation simultanée du débit de la Selle à Plachy et du niveau de nappe à Morvillers. ....	72
Figure 54 - Décomposition de l'écoulement en écoulement rapide et écoulement lent (calibration simultanée sur le débit de la Selle à Plachy et le niveau de nappe à Morvillers). ....	72
Figure 55 - Piézomètre Sompuis et débit de l'Huitrelle à Lhuitre (données décennales).....	73
Figure 56 - Simulation du piézomètre Sompuis sans seuil de tarissement rapide. Les niveaux simulés dépassent nettement la cote maximale en 1983, 1988, 1994 et 2001. ....	76
Figure 57 - Simulation du piézomètre Sompuis avec seuil de tarissement. Les niveaux maximaux sont bien simulés en 1983, 1988, 1994 et 2001. ....	77
Figure 58 - Simulation des niveaux au piézomètre Sompuis et des débit de l'Huitrelle à Lhuitre avec un seuil de tarissement rapide. ....	78
Figure 59 - Définition de pas de temps « Autre », c'est-à-dire ni journalier, ni décennal, ni mensuel. ....	81
Figure 60 - Définition de la durée d'un pas de temps « Autre ». ....	81
Figure 61 - Simulation du débit du bassin de « Patate à Durand » : cyclone de février 2006. ....	82
Figure 62 - Simulation de six crues isolées de la rivière du Mât (île de la Réunion), résultant de cyclones de 2000 à 2003. ....	85
Figure 63 - Site de Saint-André, sol nu : débit de drainage observé et simulé par GARDÉNIA de 1991 à 1993. ....	89
Figure 64 - Site de Saint-André, sol nu : débit de drainage observé et simulé par GARDÉNIA de 1991 à 1993 (échelle logarithmique). ....	89
Figure 65 - Site de Saint-André, sol nu : cumuls des évaporation + transpiration réelle et du drainage. Comparaison des observations du LTHE (symboles) et des simulations par GARDÉNIA (traits). ....	90
Figure 66 - Site de Saint-André, parcelle de maïs : débit de drainage observé par le LTHE et simulé par GARDÉNIA, de 1991 à 1993. ....	91
Figure 67 - Site de Saint-André, parcelle de maïs : cumul de 1991 à 1993 du débit de drainage observé par le LTHE et simulé par GARDÉNIA. ....	92
Figure 68 - Site de Saint-André, année 1993 : cumuls des évapo + transpiration réelle et du drainage. À gauche : sol nu ; à droite parcelle de maïs. Symboles = Observations du LTHE ; Traits = simulations par GARDÉNIA. On note l'évapotranspiration plus importante pour la parcelle de maïs. ....	92
Figure 69 - Piézomètre Perpignan influencé par des pompages : niveaux journaliers observés et simulés. ....	95

Figure 70 - Piézomètre Perpignan : réponse impulsionnelle (1 million de m <sup>3</sup> ) et réponse à un pompage constant de 10 000 m <sup>3</sup> /j. ....	97
Figure 71 - Piézomètre Perpignan : influence de la pluie de 1974 à 2007. ....	98
Figure 72 - Piézomètre Perpignan : niveaux observés de 1974 à 2007. ....	98
Figure 73 - Piézomètre Perpignan : débits de pompage journaliers calculés (en bleu) de 1974 à 2006 et observés de 1998 à 2006 (en rouge).....	99
Figure 74 - Piézomètre Perpignan : moyenne mobile sur 360 jours des débits de pompage calculés (en bleu) de 1974 à 2006 et observés de 1998 à 2006 (en rouge).....	100
Figure 75 - Piézomètre Perpignan : simulation sur la période 1974-2006 des niveaux à partir des pluies et ETP observés et des débits de pompage recalculés. Les niveaux observés (en rouge) et simulés (en bleu) sont quasiment indiscernables. ....	100
Figure 76 - Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe. ....	102
Figure 77 - Piézomètre Perpignan : comparaison de l'influence du pompage sur le niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). ....	102
Figure 78 - Piézomètre Luçon influencé par des pompages : niveaux journaliers observés (rouge) et simulés (bleu). ....	106
Figure 79 - Piézomètre Luçon : réponse impulsionnelle (50 000 m <sup>3</sup> ) et réponse à un pompage constant de 1 000 m <sup>3</sup> /j. ....	108
Figure 80 - Piézomètre Luçon. En bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule. En rouge, les variations de niveau observées, influencées par les pompages. ....	109
Figure 81 - Piézomètre Chalais influencé par des pompages : niveaux journaliers observés (rouge) et simulés (bleu). ....	110
Figure 82 - Piézomètre Chalais : réponse impulsionnelle (50 000 m <sup>3</sup> ) et réponse à un pompage constant de 1 000 m <sup>3</sup> /j. ....	112
Figure 83 - Piézomètre Chalais. En bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule. En rouge, les variations de niveau observées, influencées par les pompages. ....	112
Figure 84 - Prévission du débit de la Somme à Abbeville 60 jours à l'avance. Prévission émise successivement le 1 <sup>er</sup> mars 2002, le 1 <sup>er</sup> avril 2002, le 1 <sup>er</sup> mai 2002 et le 1 <sup>er</sup> décembre 2002. Le débit observé, qui n'est pas connu, après la date d'émission est reporté sur les graphiques en trait rouge épais pour contrôle. ....	117
Figure 85 - Caractéristiques des 22 bassins. (médiane en rouge, fréquences 25 % et 75 % en noir, barres extrêmes fréquences 10 % et 90 %). ....	119
Figure 86 - Dessin de gauche : erreur relative sur les débits décennaires des 22 bassins. (partie gauche : données météo journalières ; partie droite données météo décennaires). Dessin de droite : correction globale d'ETP journalière et décennaire.....	120

Figure 87 -	Figure de gauche : erreur relative des débits des 22 bassins (partie gauche : réserve sol progressive ; partie droite : réserve sol type « réserve utile »). Figure de droite : ratio réserve progressive divisée par la réserve utile.....	120
Figure 88 -	Erreur relative des 22 bassins. Partie gauche : schéma de ruissellement Gardénia ; partie droite : taux de ruissellement constant. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits .....	121
Figure 89 -	Prise en compte du temps de concentration. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec temps de concentration ; partie droite : sans temps de concentration. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits. ....	122
Figure 90 -	Compensation de la correction globale d'ETP et du coefficient d'échange souterrain pour les 22 bassins.....	123
Figure 91 -	Prise en compte des échanges souterrains. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec échanges souterrains ; partie droite : sans échanges souterrains. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits.....	123
Figure 92 -	Prise en compte de deux réservoirs souterrains. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec un seul réservoir souterrain ; partie droite : avec deux réservoirs souterrains. Erreur relative sur les inverses des débits.....	124
Figure 93 -	Erreur relative sur les débits des 22 bassins. Dessin de gauche : débits naturels ; dessin de droite : racine carrée des débits. Partie de gauche de chaque dessin : modélisation de référence ; partie de droite : modélisation simplifiée.....	125

## Liste des tableaux

Tableau 1 -	Piézomètre Perpignan : coefficients de corrélation avec chaque influence. ....	95
Tableau 2 -	Piézomètre Luçon : cinq puits de pompage les plus proches. ....	104
Tableau 3 -	Piézomètre Luçon : coefficients de corrélation du niveau piézométrique avec chaque influence.....	107
Tableau 4 -	Piézomètre Chalais : coefficients de corrélation avec chaque influence. ....	111



# 1. Introduction

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **Global A Réservoirs** pour la simulation des **DÉbits** et des **Niveaux Aquifères**) (Thiéry, 2003, 2011) est un modèle hydrologique global de bassins versants.

À partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur son bassin d'alimentation, il permet donc de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) ;
- et/ou le niveau en un point de la nappe libre sous-jacente.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

Les calculs peuvent être réalisés au choix, au pas de temps journalier, décadaire (dix jours) ou mensuel. Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

Le code de calcul GARDÉNIA est exploité de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps. Il permet les fonctionnalités suivantes :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calage préalable sur une période relativement courte ;
- analyse de cohérence entre observations climatiques et observations de débits ou de niveaux piézométriques ;
- analyse des différents termes du cycle hydrologique (infiltration, évapotranspiration, écoulement).

L'objet de ce didacticiel est de présenter, d'explorer et de mettre en œuvre la plupart des fonctionnalités du code de calcul GARDÉNIA version 8.1 sous forme de traitement d'un certain nombre d'exemples de difficultés croissantes. Ce didacticiel a pour but de permettre à l'utilisateur une première prise en main autonome du code de calcul.

Treize exemples d'application sont présentés :

- Exemple d'application n° 1 : débits journaliers de la Somme à Abbeville.  
*Exemple d'application simple.*
- Exemple d'application n° 2 : débits décadaires de l'Austreberthe à Saint-Paër.  
*Validation du schéma d'écoulement souterrain de Gardénia.*
- Exemple d'application n° 3 : débits du Gapeau à Hyères.  
*Bassin versant très réactif.*
- Exemple d'application n° 4 : débits de la Durance à Embrun.  
*Modélisation avec prise en compte de la fonte de la neige.*
- Exemple d'application n° 5 : modélisation simultanée du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron et du débit de la Voulzie à Jutigny.

*Validation du schéma pluie - niveau de Gardénia.*

- Exemple d'application n° 6 : modélisation du niveau de nappe à Morvillers et du débit de la Selle à Plachy.  
*Modélisation simultanée du niveau de nappe et du débit à l'exutoire.*
- Exemple d'application n° 7 : niveau de nappe à Sompuis et débit de l'Huitrelle à Lhuitre.  
*Modélisation avec deux composantes souterraines.*
- Exemple d'application n° 8 : modélisation d'une crue éclair dans l'île de la Réunion.  
*Modélisation à pas de temps fin (1/2 heure).*
- Exemple d'application n° 9 : modélisation à pas de temps horaire d'un ensemble de crues provoquées par des cyclones. Rivière du Mât (île de la Réunion).  
*Modélisation simultanée, à pas de temps fin, d'un ensemble d'évènements isolés.*
- Exemple d'application n° 10 : modélisation d'un écoulement à travers la zone non saturée.  
*Validation du schéma de bilan de Gardénia pour simuler l'évaporation dans le sol à partir des pluies et des ETP.*
- Exemple d'application n° 11 : modélisation Pluie-Niveau d'un piézomètre influencé par un pompage, situé près de Perpignan.  
*Validation du schéma Gardénia de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe.*
- Exemple d'application n° 12 : modélisation Pluie-Niveau de deux piézomètres du Marais poitevin, influencés par des pompages.  
*Modélisation des niveaux piézométriques influencés par un ensemble de pompages.*
- Exemple d'application n° 13 : prévision des débits de la Somme à Abbeville.  
*Utilisation de Gardénia en mode prévision.*

Avertissement : Les données hydro-climatiques qui sont nécessaires à l'utilisation de ce didacticiel sont fournies avec la distribution du logiciel. Elles sont destinées uniquement à un usage didactique. Pour des raisons de propriété elles ne doivent en aucun cas être utilisées à un autre usage. Elles ont d'ailleurs pu être volontairement modifiées ou dénaturées.

## 2. Premier exemple d'application : débits journaliers de la Somme à Abbeville

L'exemple à modéliser est le débit journalier de la Somme à Abbeville. C'est un bassin versant de superficie 6 550 km<sup>2</sup>. Le débit a des variations lentes car il comporte une forte composante souterraine. La série des débits journaliers a un coefficient d'asymétrie de 1,3, et un fort coefficient d'autocorrélation égal à 0,995 (l'utilisation du module SHALIMAR, fourni dans la distribution, montre qu'il faut un espacement de 140 jours entre deux débits pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

On dispose des données suivantes :

- Pluie journalière à Glisy du 01/01/1988 au 07/03/2007, en mm/j ;
- Évapotranspiration potentielle (ETP) journalière à Abbeville du 01/01/1988 au 07/03/2007, en mm/j ;
- Débit journalier de la Somme à Abbeville du 01/01/1988 au 07/03/2007, en m<sup>3</sup>/s.

Les trois fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Plu\_Glisy\_1988\_2007.prn : pour les pluies ;
- ETP\_Somme\_1988\_2007.prn : pour les ETP ;
- Deb\_Somme\_Abbeville\_1988\_2007.prn : pour les débits.

Les séries de pluie et d'ETP ne doivent pas comporter de lacunes (valeurs absentes) et elles n'en comportent pas.

La série des débits comporte quelques lacunes fin janvier 2007. Ces lacunes doivent être notées « -2 » dans le fichier des débits. La valeur « -2 » est un code reconnu par le code de calcul GARDENIA, car un débit observé ne peut pas être négatif.

On verra plus bas que lors d'une modélisation de niveaux de nappe, les lacunes doivent être remplacées par la valeur code « 9999 », puisqu'un niveau de nappe ne peut pas atteindre 9 999 mètres, mais peut en revanche être négatif.

Toutes les données sont dans des formats « texte », c'est-à-dire pouvant être visualisées avec n'importe quel éditeur de texte. Elles ne sont jamais en format binaire.

Plusieurs formats sont possibles pour les données. Dans ce premier exemple, les données sont toutes au format « Excel Date ». Ce format très simple, qui peut par exemple être exporté du tableur Excel, est le suivant :

Date	Débit Somme Abbeville 1988-2007	UNITE=m <sup>3</sup> /s
01/01/1988	44.4	
02/01/1988	44.3	
03/01/1988	44.2	
04/01/1988	45.3	

La première ligne est un titre descriptif obligatoire. Les lignes suivantes sont la date (sous la forme « jj/mm/aaaa ») et la valeur. La date et la valeur peuvent être séparées par une ou des tabulations, ou par des espaces ou éventuellement par des « ; ». Le séparateur décimal des valeurs numériques non entières doit être un « point décimal » et non pas une virgule.

Les séries de données doivent toujours être sous forme d'années complètes, c'est-à-dire 365 ou 366 valeurs par an pour les séries journalières (comme dans cet exemple), 36 décades par an ou 12 mois par an. Si l'année n'est pas complète, comme dans notre cas, les pluies seront complétées par des pluies nulles, par exemple, jusqu'au 31 décembre, les ETP seront complétées, par exemple également par des valeurs nulles. En revanche, la série des débits journaliers sera complétée par des valeurs absentes, c'est-à-dire par des valeurs égales à -2. Cependant, dans le cas particulier de données journalières au format « Excel Date », il est possible de ne pas compléter la dernière année quand elle est incomplète.

Les dates des séries ne sont en fait pas prises en compte directement par le code de calcul GARDENIA. Les données doivent commencer :

- au début janvier : si les années sont des années civiles (cas général) ;
- au début août : si les années sont des années hydrologiques, ce qui sera précisé par un paramètre du code de calcul GARDENIA.

## 2.1. CRÉATION D'UN NOUVEAU PROJET

- (1) On clique sur l'icône du code de calcul GARDENIA et on choisit le menu « Fichier → Nouveau » (Figure 1).

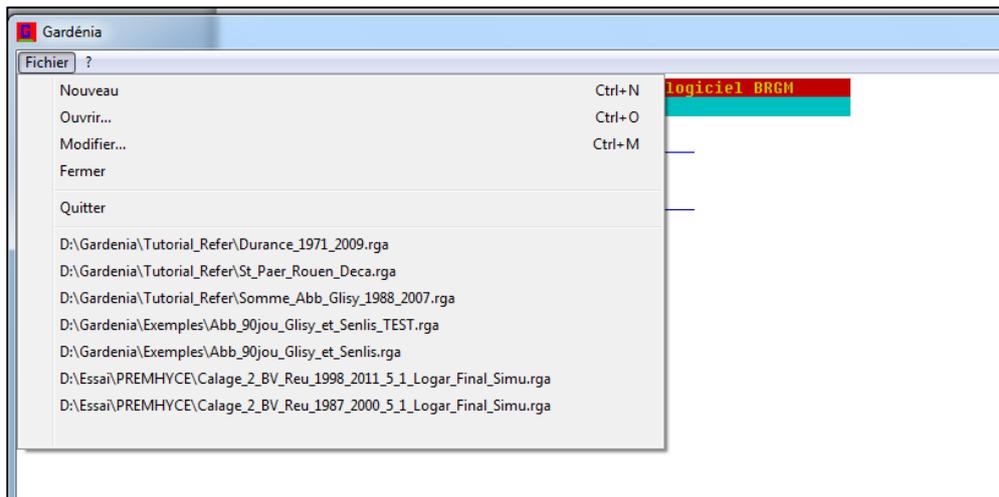


Figure 1 - Ouverture de Gardénia et création d'un nouveau projet.

- (2) Puis on choisit « Créer un nouveau projet » (Figure 2).

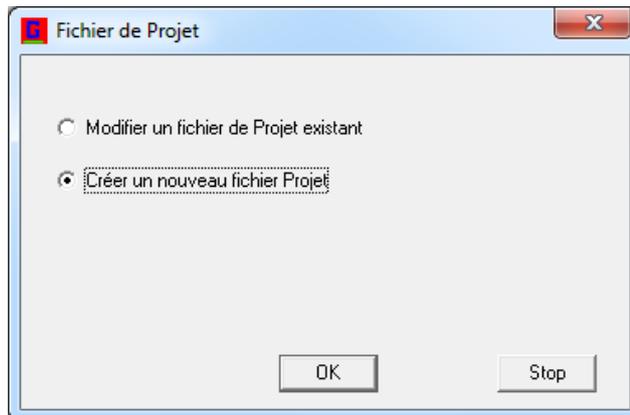


Figure 2 - Création d'un nouveau projet.

- (3) On parcourt alors les dossiers pour sélectionner le dossier dans lequel sont les données hydro-climatiques (ici « Gardénia\Tutorial »). On donne alors un nom pour le fichier projet qui sera créé : par exemple « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007 », c'est-à-dire « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007.rga » (Figure 3).

Un fichier projet est un petit fichier d'une quinzaine de lignes listant les noms des fichiers qui seront utilisés pour la modélisation.

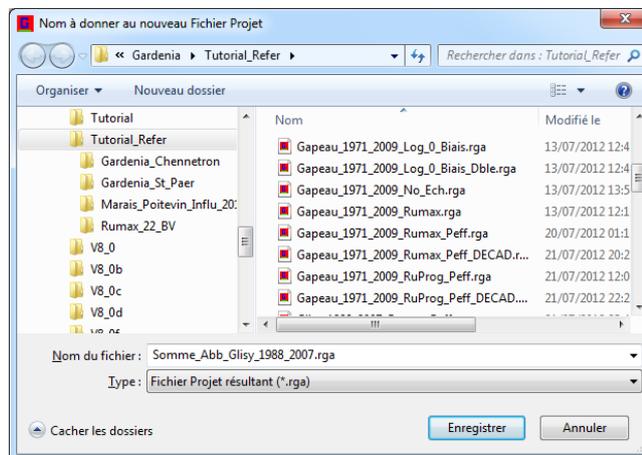


Figure 3 - Nom à donner au nouveau fichier projet.

- (4) On donne alors un « titre descriptif » pour le projet. Par exemple « Somme à Abbeville 1988-2007 ».
- (5) On choisit alors (Figure 4) de « créer un nouveau fichier de paramètres ». Si on avait disposé d'un fichier de paramètres, on aurait pu importer ce fichier et le modifier par des écrans de saisie.

## 2.2. DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE SIMULATION.

Un « Fichier de paramètres » est un fichier décrivant les paramètres de simulation : Nombre d'années, type de simulation, pas de temps des données, superficie du bassin versant, capacité de rétention du sol, temps de tarissement, etc.

- (1) On définit un titre descriptif pour le fichier des paramètres. Par défaut, c'est le même que celui du fichier projet.
  - (2) On choisit alors (Figure 5) entre une utilisation simple (réponse 0) ou une utilisation avancée (réponse 1). On choisit ici une utilisation simple. Une utilisation avancée serait nécessaire par exemple pour réaliser des prévisions, ou prendre en compte la fonte de la neige, ou utiliser des paramètres peu fréquents.
- N.B. Dans le fichier des paramètres : « 0 » signifie « Non » ; « 1 » signifie « Oui ».

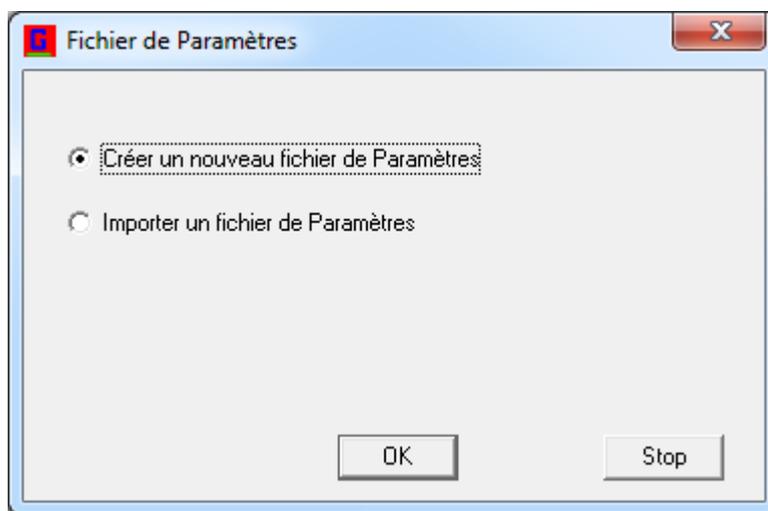


Figure 4 - Création d'un nouveau fichier de paramètres.

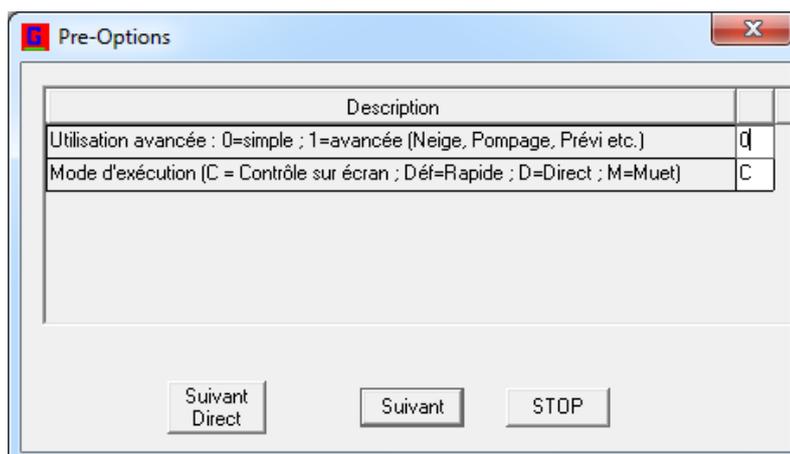


Figure 5 - Pré-options : Type d'utilisation (simple ou avancée).

- (3) On sélectionne alors les fichiers de pluie (Plu\_Glisy\_1988\_2007.prn) et d'ETP (ETP\_Somme\_1988\_2007.prn), qui doivent donc avoir été préparés au préalable.
- (4) On voit alors apparaître un menu d'« Options ». Pour cette simulation simple, on accepte toutes les valeurs proposées par défaut (Figure 6) :
- Une (ou des) série(s) d'observation de données hydrologiques.
  - Une série d'observation de débits (pas d'observation de niveaux de nappe).
  - Sauvegarde des débits calculés
  - Dessin à l'écran des débits simulés.
- N.B. Dans le fichier des paramètres, pour toutes les options de type Non/Oui : « 0 » signifie « Non » ; « 1 » signifie « Oui »
- (5) Maintenant que GARDENIA sait qu'il y a une série de débits observés, on donne alors le nom de ce fichier (Deb\_Somme\_Abbeville\_1988\_2007.prn).
- (6) On définit alors les pas de temps des données et leurs formats (Figure 7). Dans la colonne « format » : on sélectionne « Excel Date » en remplacement de « Annuaire » pour les trois séries de données : Pluie, ETP et Débits observés.
- (7) On donne alors le nom du bassin simulé (En effet on peut enchaîner, dans un même projet, la simulation de plusieurs bassins) : ici, on donne « Somme à Abbeville » comme nom de bassin.
- (8) On définit alors la plage des débits pris en compte pour la calibration du modèle. Par défaut tous les débits sont pris en compte, mais on pourrait éliminer les forts débits pour ne s'intéresser qu'aux étiages, ou bien en contraire éliminer les faibles débits pour se focaliser sur les crues. Ici on accepte les valeurs par défaut (Figure 8).
- (9) Dans l'écran suivant de paramètres généraux, on définit les nombres d'années, etc. (Figure 9) :
- 20 années de données, pour chacune des séries.
  - 7 années de démarrage (c'est-à-dire sept années d'observations de débits ignorées, car influencées par les précipitations antérieures à 1988).
  - 250 itérations pour la calibration automatique des paramètres.
- (10) Dans l'écran suivant des paramètres d'amplitude (Figure 10), on définit :
- 100 mm/an = Pluie efficace annuelle moyenne pour mise en équilibre avant le démarrage de la simulation.
  - 6 550 km<sup>2</sup> = Superficie du bassin versant.
- (11) Dans l'écran des paramètres physiques (Figure 11), on définit :
- 150 mm = Capacité (de rétention) de la « réserve sol progressive ».
  - 150 mm = Hauteur de répartition ruissellement/percolation.
  - 3 mois = Temps de ½ montée du débit souterrain (temps de ½ percolation).
  - 25 mois = temps de tarissement du débit souterrain.
- (On optimise ces quatre paramètres).
- (12) Dans l'écran des « Bornes des paramètres physiques », on garde la plupart des valeurs par défaut. On modifie cependant (Figure 12) :
- 15 mois = Borne supérieure du temps de ½ montée.
  - 5 mois et 50 mois = Bornes du temps de ½ tarissement.

On a alors fini la définition des paramètres.

### 2.3. LANCEMENT DE LA SIMULATION ET EXAMEN DES RÉSULTATS

On lance les calculs en appuyant sur le bouton « OK ». La calibration automatique des paramètres s'effectue en 1 ou 2 seconde(s).

Un court message (Figure 13) indique que le coefficient d'ajustement obtenu entre les débits observés et les débits simulés est égal à 0,952. Le coefficient d'ajustement est la racine carrée du coefficient de Nash-Sutcliffe (1970). Si le coefficient de Nash est négatif, dans le cas d'une simulation particulièrement mauvaise, le coefficient d'ajustement est l'opposé de la racine carrée de la valeur absolue du coefficient de Nash. Dans notre cas le coefficient de Nash est donc égal à 0,906, c'est-à-dire que 90,6 % de la variance des débits est expliquée par le modèle.

On voit alors apparaître (Figure 14) le dessin comparatif de la série des débits observés, en rouge, et des débits simulés, en vert. On voit que globalement la simulation est tout-à-fait correcte, aussi bien en période de crue qu'en étiage.

Il est possible de copier le dessin dans le presse-papier (bouton « Copy Graph ») pour le coller dans une autre application, ou de sauvegarder le dessin (bouton « Save Graph ») dans un fichier [.bmp], ou de l'imprimer (bouton « Print Graph »). Ces opérations de copie, sauvegarde ou impression peuvent également être actionnées par les icônes correspondantes.

Dans le cas de simulation de plusieurs bassins dans un même projet, le bouton « Arrêt dessins » permet d'annuler les dessins des bassins suivants.

Après avoir examiné le dessin, on passe à la suite en appuyant sur la touche « Entrée » ou « Échap. » ou par un double-clic.

On voit alors apparaître un dernier écran (Figure 15) rappelant les noms des fichiers générés :

- Fichier « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007.rga », qui est le fichier projet, c'est-à-dire la liste des fichiers utilisés en entrée pour une simulation.
- Fichier « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007.gar », qui est le fichier des paramètres qui ont été définis dans les menus, avec les paramètres physiques obtenus en fin de calibration. Ce fichier des paramètres, dont le nom apparaît dans le fichier projet, peut être réutilisé pour d'autres simulations ultérieures.
- Fichier « **tabl\_param.prn** », qui contient un tableau résumé des paramètres après calibration, ainsi que des critères d'ajustement.
- Fichier « **minmaxmoy.prn** », qui contient un tableau résumé des caractéristiques statistiques comparées des séries de débits observés et simulés (Mini, maxi, moyenne, écart-type, débit mensuel minimal, débit journalier maximal, etc.) en m<sup>3</sup>/s.
- Fichier « **moybilan.prn** », qui contient les valeurs moyennes annuelles des termes du bilan (en mm/an).
- Fichier « **bilmens.prn** », qui contient les termes du bilan de chaque mois (dans notre cas) ou, selon l'option choisie, de chaque jour, ou de chaque année.

- Fichier « **gardelis.txt** », qui contient un « listing » des données d'entrée, du suivi de la calibration, et de l'état final.
- Fichier « **gardesim.prn** », qui est un fichier importable directement dans Excel (ou son équivalent), sous forme de trois colonnes séparées par des « tabulations » :
  - Colonne n° 1 = Date
  - Colonne n° 2 = Débits simulés
  - Colonne n° 3 = Débits observés.

Les noms « tabl\_param.prn », « minmaxmoy.prn », « moybilan.prn », « bilmens.prn », « gardelis.txt » et « gardesim.prn » sont des noms génériques invariants. Si l'utilisateur désire conserver un de ces fichiers, il devra donc le renommer. En particulier, pour réaliser des simulations après calibration, il suffit de renommer le fichier « gardepara.out », par exemple, en « simulat\_scenar.gar » et de l'utiliser dans un nouveau projet.

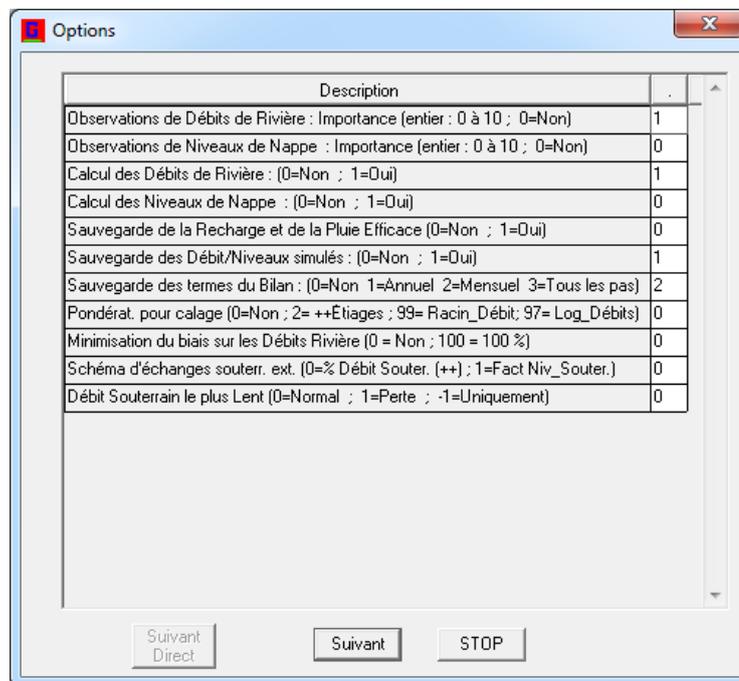


Figure 6 - Définition des options générales  
(type d'observations, résultats à sauvegarder, type de pondération, etc.).

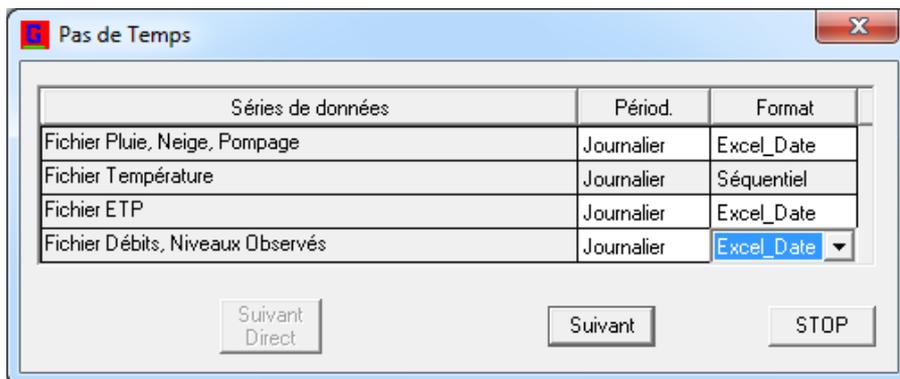


Figure 7 - Définition des pas de temps des données hydroclimatiques.

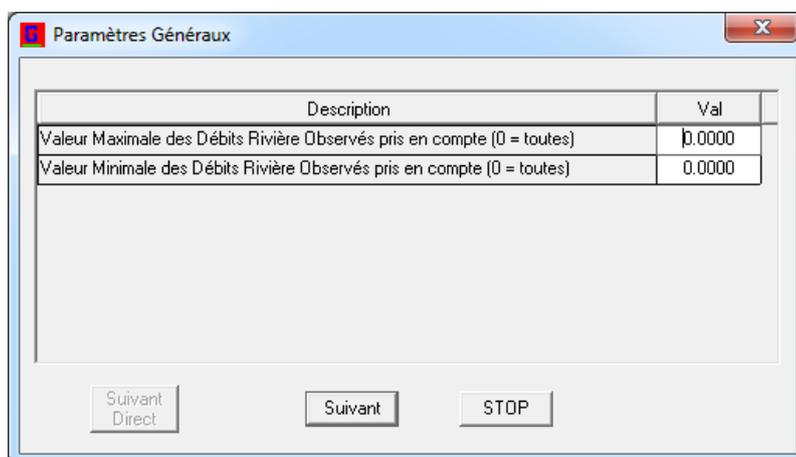
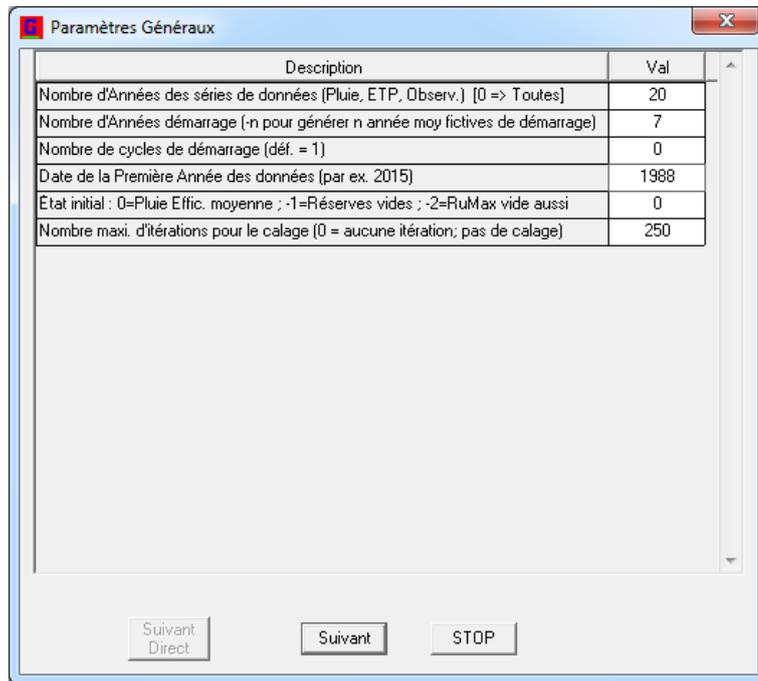


Figure 8 - Paramètres généraux : définition des valeurs observées minimales et maximales à prendre en compte.



Description	Val
Nombre d'Années des séries de données (Pluie, ETP, Observ.) [0 => Toutes]	20
Nombre d'Années démarrage (-n pour générer n année moy fictives de démarrage)	7
Nombre de cycles de démarrage (déf. = 1)	0
Date de la Première Année des données (par ex. 2015)	1988
État initial : 0=Pluie Effic. moyenne ; -1=Réserves vides ; -2=RuMax vide aussi	0
Nombre maxi. d'itérations pour le calage (0 = aucune itération; pas de calage)	250

Suivant Direct    Suivant    STOP

Figure 9 - Paramètres généraux : définition du nombre d'années, de la durée de la période de démarrage, de l'initialisation, du nombre d'itérations.

Description	Val	Opti	
Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0=équil.) (mm/an)	100.00	Opti	<input type="checkbox"/>
Débit extérieur éventuel (m3/s)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Superficie du bassin versant (km2)	6550.0	Opti	<input type="checkbox"/>
Niveau de base (m NGF)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Coefficient d'emmagasinement équivalent (-)	1.0000	Opti	<input type="checkbox"/>

Figure 10 - Paramètres physiques : définition des facteurs d'amplitude.  
 Pour les débits : superficie du bassin versant, débit extérieur.  
 Pour les nappes : coefficient d'emmagasinement équivalent et niveau de base.

**Paramètres Hydrologiques**

Description	Val		
Correction globale des Pluies (%)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Correction globale de l'ETP (%)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Capacité de la réserve superficielle (RuMax) (mm)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Capacité de la réserve superficielle Progressive (mm)	150.00	Opti	<input checked="" type="checkbox"/>
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	150.00	Opti	<input checked="" type="checkbox"/>
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 Percolation) (mois)	3.0000	Opti	<input checked="" type="checkbox"/>
Temps de 1/2 tarissement Souterrain 1 (mois)	25	Opti	<input checked="" type="checkbox"/>
Retard (propagation) Débits (en pas de temps)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>
Facteur d'échange externe (%)	0.0000	Opti	<input type="checkbox"/>

Suivant Direct      Suivant      STOP

Figure 11 - Paramètres physiques : capacité des réserves superficielles, hauteur d'équi-ruissellement, temps de ½ montée, temps de ½ tarissement.

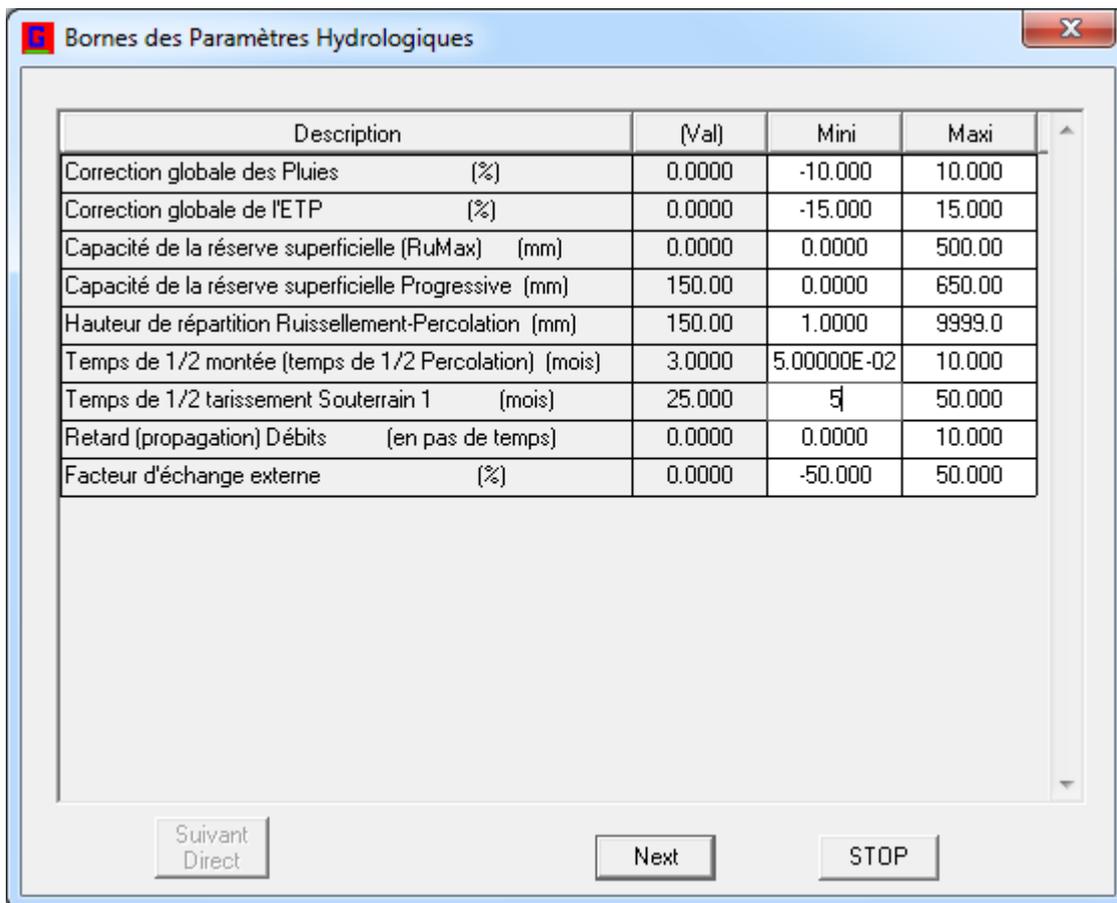


Figure 12 - Paramètres physiques : bornes des paramètres pour la calibration automatique.

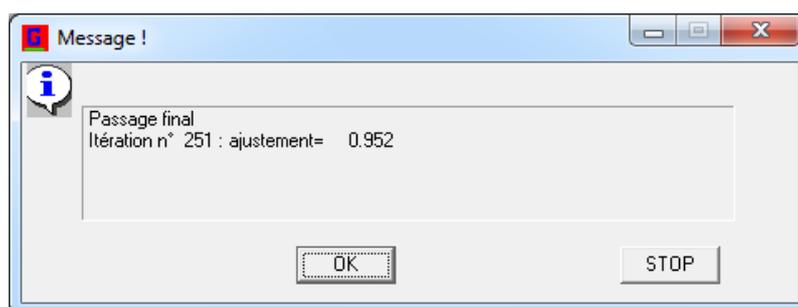


Figure 13 - Message de fin de simulation.

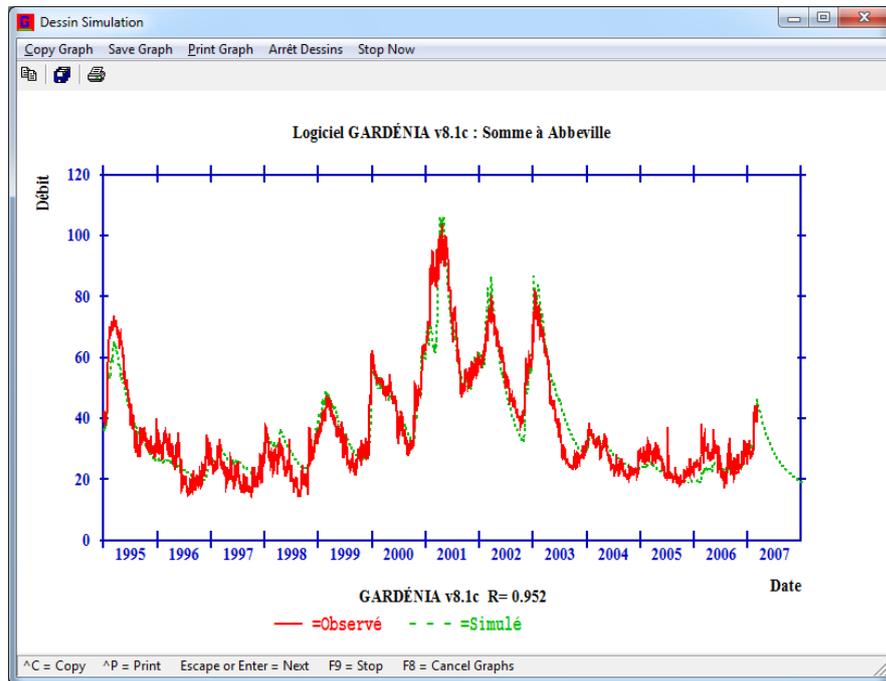


Figure 14 - Somme à Abbeville : dessin à l'écran des débits observés (en rouge) et simulés (en vert).

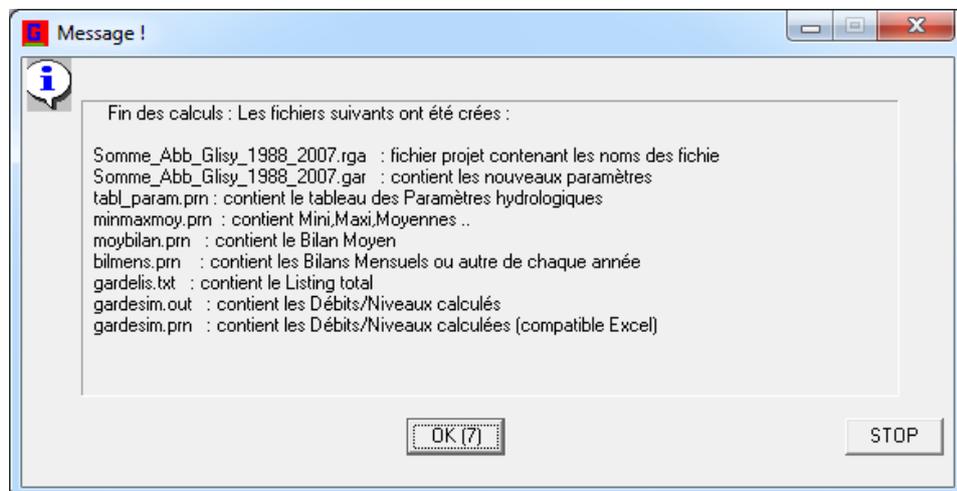


Figure 15 - Message de fin d'exécution avec le nom des fichiers de résultats générés.



### 3. Exemple d'application n° 2 : débits décennaires de l'Austreberthe à Saint-Paër (validation du schéma d'écoulement souterrain)

Ce bassin, d'une superficie de 157 km<sup>2</sup>, est situé dans le pays de Caux (Seine-Maritime). On dispose des débits moyens décennaires pendant la période 1997-2006. Le but de cet exemple est de montrer que sous ce climat régulier, et pour un bassin avec des débits peu variables, il est possible de modéliser les débits décennaires à partir des pluies et ETP décennaires. Cet exemple est utilisé également pour la validation du schéma de calcul de l'écoulement souterrain avec le code de calcul GARDÉNIA par comparaison avec un code de calcul hydrodynamique discrétisé.

#### 3.1. PRÉPARATION DES DONNÉES

La série des débits décennaires a un coefficient d'asymétrie de 1,4, et un fort coefficient d'autocorrélation égal à 0,95 (Il faut un espacement de 30 décades, soit près d'un an, entre deux débits pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

On dispose des données suivantes :

- pluie décennaires à Rouen, de 1969 à 2006 (en mm/décade) ;
- évapotranspiration potentielle (ETP) décennaire à Rouen, de 1969 à 2006 (en mm/décade) ;
- débit moyen décennaire de l'Austreberthe à Saint-Paër, de mars 1997 à 2006 (en m<sup>3</sup>/s).

Pour avoir des données sur la même période, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 » de janvier 1969 à février 1997. En fait, il aurait suffi d'avoir comme période commune la période 1994-2006 avec donc 1993-1996 comme période de démarrage de trois ans. Avec notre choix, la période de démarrage a une durée de 18 ans : de 1969 à 1996.

Les trois fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Plu\_Deca\_Rouen\_1969\_2006.plu : pour les pluies ;
- Etp\_Deca\_Rouen\_1969\_2006.etp : pour les ETP ;
- Deb\_Deca\_St\_Paer\_1969\_2006.deb : pour les débits.

Les données décennaires sont au format « Décennaire-Annuaire », c'est-à-dire trois lignes par an :

- ligne n° 1 : 1<sup>ère</sup> décade des 12 mois de l'année ;
- ligne n° 2 : 2<sup>ème</sup> décade des 12 mois de l'année ;
- ligne n° 3 : 3<sup>ème</sup> décade des 12 mois de l'année.

```

Pluie Décadaire Rouen UNITE=mm/Décade
 1.5 38.1 4.7 2 12.4 4.9 22.8 30.8 9.1 0.1 47 30.8 1969 1A
18.3 19.2 47.1 9.7 22.8 16.7 0 30.7 41.3 4.1 29.6 21.2 1969 2A
 20 1.2 15.1 23.1 53.5 36.6 40.6 24.2 2.7 6.4 20.4 17.1 1969 3A
22.8 51.5 36.3 27.6 8.2 12.1 10.5 29.7 14.2 14.3 21 27.1 1970 1A
18.7 47.3 23.1 20.1 34.4 12.3 11.7 13.1 36.1 17.9 34.3 2 1970 2A
49.4 35.6 12.4 33.2 8.3 25.5 28.6 18.3 1.3 2.1 20.3 7.5 1970 3A

```

On procède comme pour le premier exemple. On crée un nouveau projet (de nom « St\_Paer\_Rouen\_Deca »). On définit les paramètres par les écrans de saisie. On accepte tous les paramètres par défaut avec les exceptions suivantes :

- 2 = Dessin de la série simulée (0 = non ; 1 = Oui ; 2 = Oui avec décomposition) ;
- Pas de temps (Figure 16) ;
- Nombre d'années (Figure 17) ;
- Superficie et débit extérieur (Figure 18).

### 3.2. EXAMEN DES RÉSULTATS

La calibration automatique se réalise en 1 seconde. La Figure 19 montre la comparaison des débits observés (en rouge) et simulés (en vert). On voit également sur ce dessin la composante souterraine calculée de l'écoulement (en bleu foncé).

À ce stade, il est possible de copier le dessin dans le presse-papier « Copy Graph » pour le coller dans une autre application, ou de sauvegarder le dessin « Save Graph » dans un fichier [.bmp], ou de l'imprimer « Print Graph ». Ces opérations de copie, sauvegarde ou impression peuvent également être actionnées par les icônes correspondantes.

Le coefficient d'ajustement est très élevé. Il est égal à 0,961 (soit un coefficient de Nash égal à 0,923).

Le fichier « tabl\_param.prn » indique un « Débit extérieur » de +0,71 m<sup>3</sup>/s, donc un apport (souterrain) constant, provenant de l'extérieur du bassin versant superficiel. Si on essaie de calibrer les paramètres sans prendre de « débit extérieur constant », on obtient un ajustement significativement moins bon. Même si on essaie de déterminer un facteur d'échange souterrain, donc un apport souterrain non constant, on obtient un ajustement moins bon. Ce fichier « tabl\_param.prn » indique un temps de ½ montée (temps de ½ percolation) de 0,54 mois, et un temps de ½ tarissement de 4 mois.

Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 228 mm/an, dont 90 % d'écoulement souterrain.

Un calcul au pas de temps journalier, avec les pluies journalières de Rouen, calibré sur les débits décadaires, donne des résultats très proches : coefficient d'ajustement de 0,959, pluie efficace annuelle moyenne de 265 mm/an, écoulement souterrain de 89 %, débit extérieur de 0,53 m<sup>3</sup>/s, temps de ½ montée de 0,33 mois, temps de ½ tarissement de 3,5 mois.

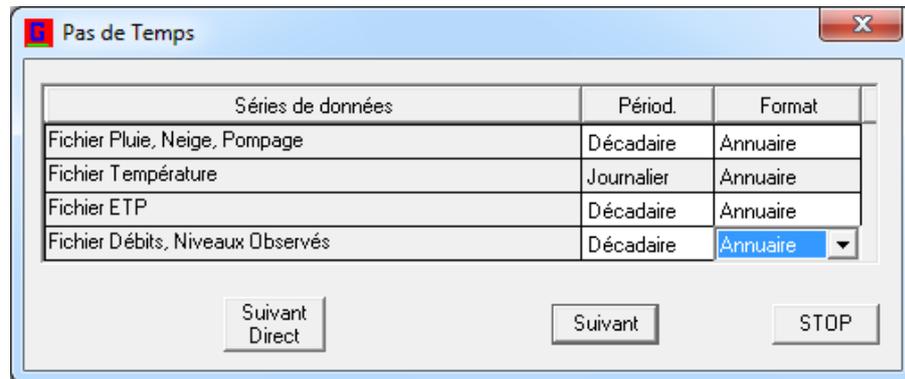


Figure 16 - Austreberthe : pas de temps des données hydroclimatiques « Décadaires annuaire ».

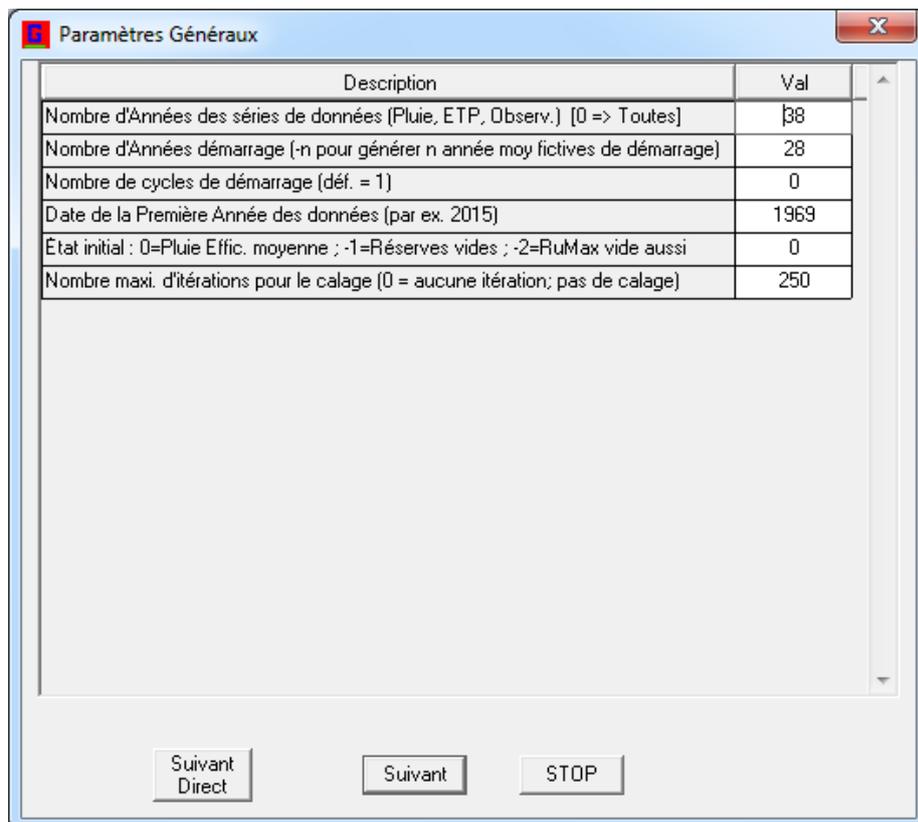


Figure 17 - Austreberthe : 38 années de données, 28 années de démarrage, première année 1969.

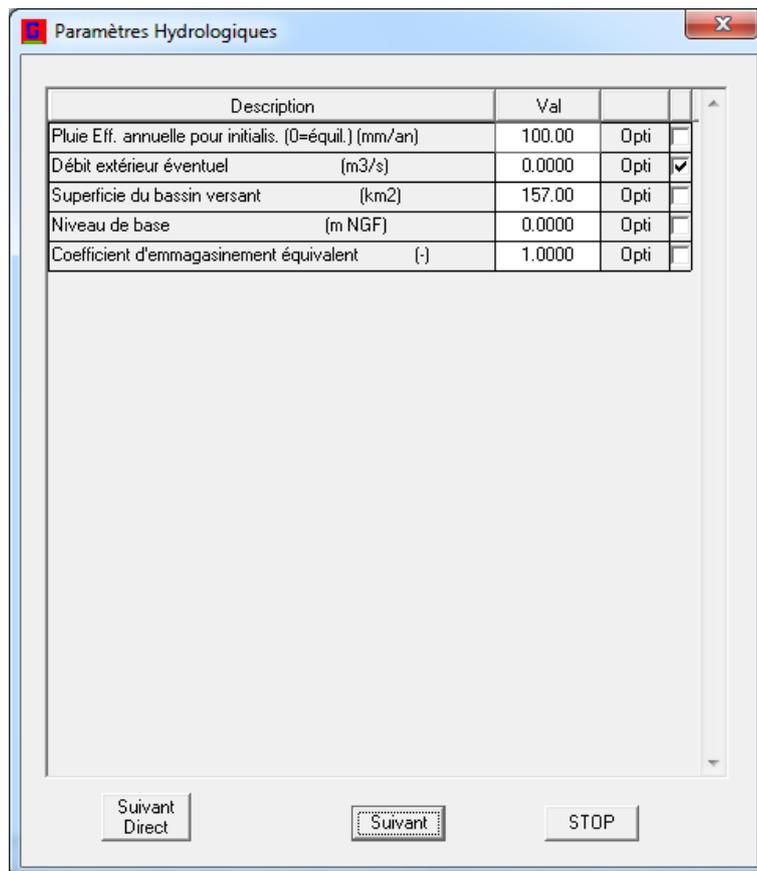


Figure 18 - L'Austreberthe à Saint-Paër. Superficie = 157 km<sup>2</sup> ; détermination par calibration automatique d'un débit extérieur constant ; pluie efficace pour initialisation = 100 mm/an.

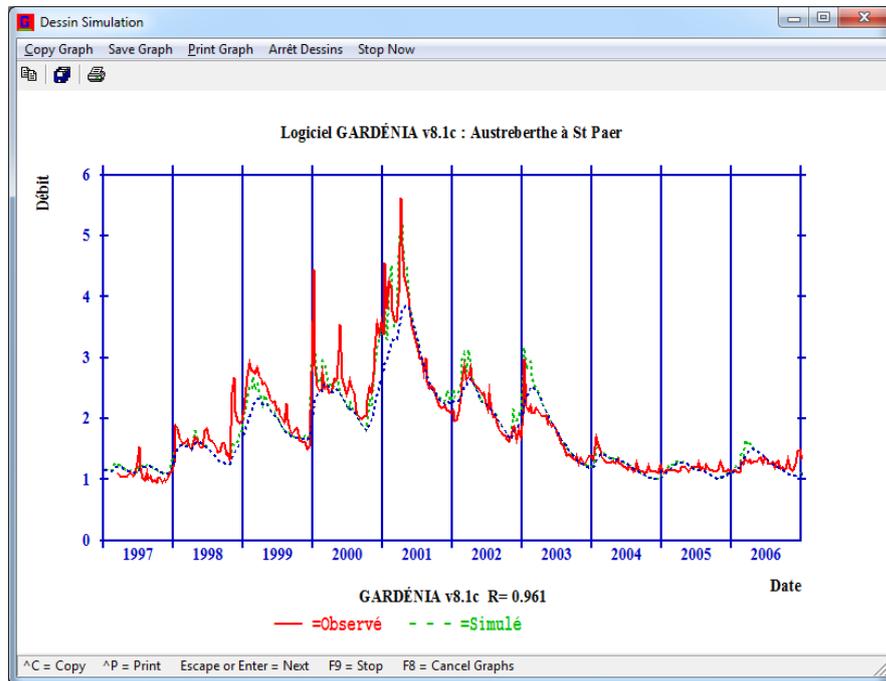


Figure 19 - L'Austreberthe à Saint-Paër : dessin à l'écran des débits observés (en rouge) et simulés (en vert). En bleu foncé : composante souterraine.

### 3.3. VALIDATION DU SCHÉMA D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN DE GARDÉNIA

Dans un but de validation du schéma de calcul de l'écoulement souterrain avec le code de calcul GARDÉNIA, on a procédé de la manière suivante :

- On a extrait la composante souterraine du débit, calculée par GARDÉNIA au pas de temps décadaire. Cette composante souterraine, qui apparaît en bleu sur la Figure 19, représente 90 % du débit total.
- On a extrait la recharge calculée par GARDÉNIA au pas de temps décadaire sur la période 1994-2007.
- On a alors introduit cette recharge dans le code de calcul hydrodynamique MARTHE (Thiéry 1990, 1993, 1994, 1995, 2002, 2004, 2007) de simulation d'aquifères par volumes finis selon la loi de Darcy. On a modélisé l'écoulement souterrain à l'exutoire d'un bassin versant de 157 km<sup>2</sup>, ayant la forme d'un secteur de disque de 45°, c'est-à-dire un secteur formé par 1/8 de disque (Figure 20).
- On a alors déterminé les paramètres hydrodynamiques uniformes qui permettent de calculer avec le code de calcul physique MARTHE un débit souterrain décadaire le plus proche possible de celui obtenu avec GARDÉNIA.

Pour avoir une superficie de 157 km<sup>2</sup>, un secteur de disque de 45° doit avoir un rayon de 20 km. On a modélisé le domaine d'étude en radial avec 40 mailles de 0,5 km de long et 45° de large. On a fixé arbitrairement un coefficient d'emmagasinement uniforme égal à 1 %. On a alors déterminé la transmissivité uniforme qui permet de

simuler correctement, au pas de temps décadaire, le débit souterrain des 468 décades de 1994 à 2007. L'année 1994 a été utilisée comme période de démarrage.

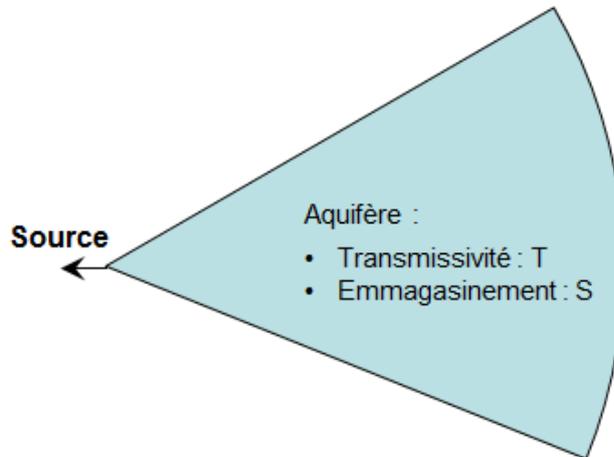


Figure 20 - Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA du débit à l'exutoire d'un bassin versant.

On obtient un débit souterrain décadaire quasi identique (Figure 21) avec une transmissivité de  $0,481 \text{ m}^2/\text{s}$ , soit une perméabilité de  $9,63 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  sur 50 m d'épaisseur. Comme l'inertie du système est contrôlée par la diffusivité qui est le rapport de la transmissivité au coefficient d'emmagasinement, on aurait obtenu exactement le même ajustement sur les débits souterrains avec par exemple un coefficient d'emmagasinement double et une transmissivité double.

Réciproquement, le fait de reproduire parfaitement avec GARDÉNIA le débit souterrain calculé avec un modèle hydrodynamique physique est une validation forte du schéma de GARDÉNIA pour le calcul de ces écoulements souterrains.

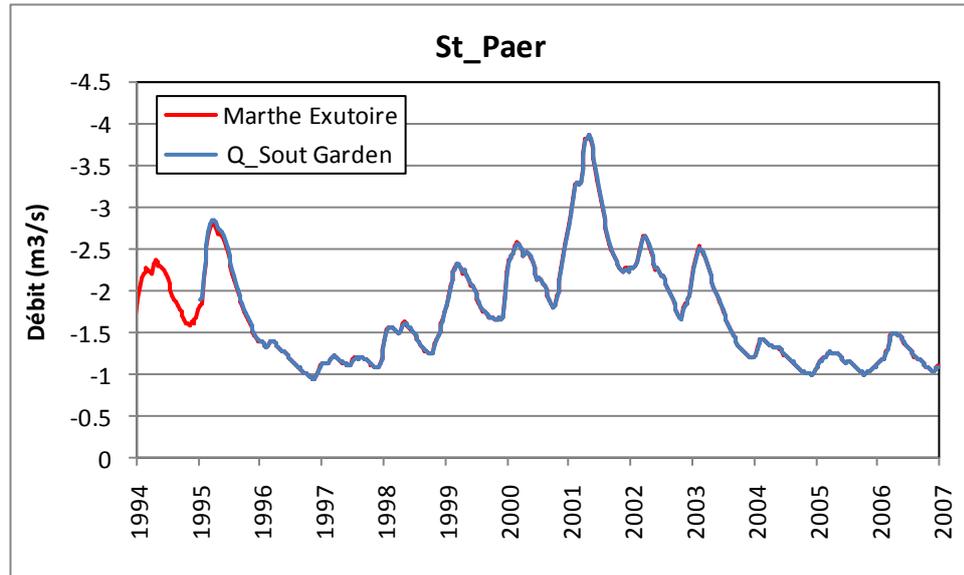


Figure 21 - L'Austreberthe à Saint-Paër : débit souterrain. Simulation GARDÉNIA (en bleu) et simulation physique MARTHE (en rouge). Les courbes sont superposées et indiscernables.



## 4. Exemple d'application n° 3 : débits du Gapeau à Hyères

Ce bassin, d'une superficie de 517 km<sup>2</sup>, est situé dans le Var, près de la Crau. On dispose des débits journaliers pendant la période 1974-2009. Le but de cet exemple est d'illustrer la modélisation d'un petit bassin versant très réactif.

La série des débits journaliers a un coefficient d'asymétrie de 9,8, ce qui est considérable, et un faible coefficient d'autocorrélation égal à 0,705. (Le module Shalimar indique que deux débits séparés de deux jours ont un coefficient de corrélation inférieur à 0,50).

On dispose des données suivantes :

- pluie journalière sur le bassin, de 1971 à 2009 (en mm/j) ;
- évapotranspiration potentielle (ETP) journalière sur le bassin, de 1971 à 2009 (en mm/j) ;
- débit journalier du Gapeau à Hyères, de 1974 à 2009 (en m<sup>3</sup>/s).

Pour avoir des données sur la même période, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 » pour les trois années de 1971 à 1973. La période de démarrage a une durée de 3 ans.

Les trois fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluie\_Gapeau\_1971\_2009.prn : pour les pluies ;
- ETP\_Gapeau\_1971\_2009.prn : pour les ETP ;
- Debit\_Gapeau\_1971\_2009.prn : pour les débits.

Les données décadaires des trois séries sont au format « Excel Date ».

### 4.1. SIMULATION AVEC LE SCHÉMA « GARDÉNIA »

On procède comme pour les premiers exemples. On crée un nouveau projet (de nom « Gapeau\_1971\_2009 »). On définit les paramètres par les écrans de saisie.

Compte tenu de l'extrême variabilité des débits (asymétrie égale à 9,8), la calibration sera réalisée en minimisant les écarts sur la racine carrée des débits. En effet la série des racines carrées des débits journaliers a un coefficient d'asymétrie de 3,2, donc beaucoup plus adapté. De cette manière on favorise la prise en compte des étiages.

On accepte tous les paramètres par défaut avec les exceptions suivantes :

- **99** = Pondération des écarts pour le calage (99 = Racine\_Débit), c'est-à-dire que la calibration est réalisée par minimisation des écarts entre la racine carrée des débits observés et la racine carrée des débits simulés.

- **15** = Minimisation du biais sur les Débits Rivière : on donne donc un poids de 15 % de pénalité sur le biais moyen de simulation.

**Options du bassin :**

- Nombre d'années = 39.
- Nombre d'années de démarrage = 3.
- Numéro de la première année = 1971.
- Nombre d'itérations de calibration = 450.

**Paramètres Physiques :**

- Superficie et débit extérieur = 517 km<sup>2</sup>.
- Paramètres initiaux déterminés à la suite d'une première phase de calibration :*
- Correction globale de l'ETP = -10 % ; Optimisé.
- Capacité de la réserve superficielle progressive = 330 mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 26 mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,15 mois ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = 0,75 mois ; Optimisé.
- Retard (propagation) des débits = 0,7 jours ; Optimisé.
- Facteur d'échange externe = -52 % ; Optimisé.

La calibration automatique se réalise en quelques secondes.

- Le coefficient d'ajustement obtenu est égal à 0,948 (soit un coefficient de Nash égal à 0,898 sur la racine carrée des débits). Le coefficient d'ajustement sur les valeurs naturelles des débits est égal à 0,941 (soit un coefficient de Nash de 0,885).
- Le fichier « tabl\_param.prn » indique, après calibration, des paramètres quasiment inchangés : un coefficient correcteur global d'ETP de -10,3 %, une capacité de la réserve sol progressive de 332 mm, une hauteur d'équi-ruissellement de 25 mm, un temps de ½ montée (temps de ½ percolation) de 0,11 mois, un temps de ½ tarissement de 0,74 mois, un temps (retard) de propagation de 0,75 jours, et un facteur d'échange externe de -51 %.
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 334 mm/an, dont 47 % d'« écoulement lent ». Mais cet écoulement lent ayant un temps de ½ tarissement de 0,75 mois n'est pas réellement un écoulement lent. Ce fichier « moybilan.prn » indique également -32 % de débit échangé.

Les Figure 22 et Figure 23 montrent que la simulation de ce bassin extrêmement réactif est correcte.

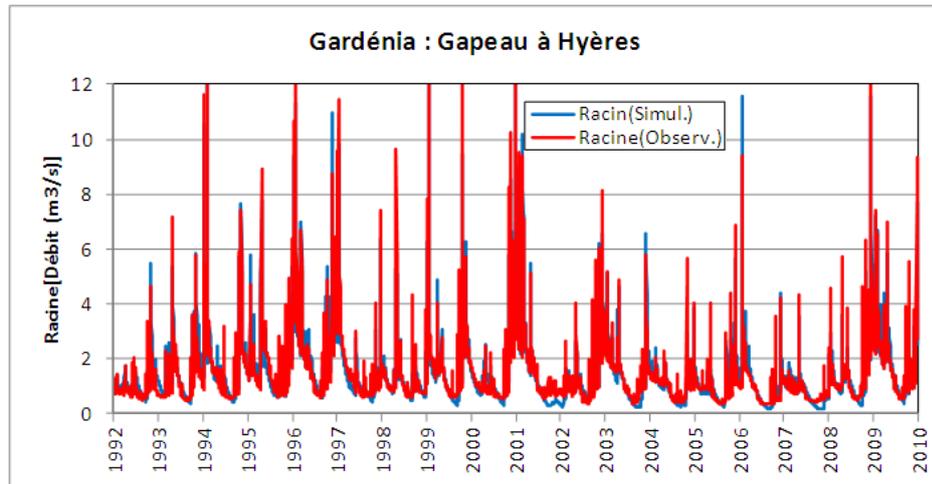


Figure 22 - Le Gapeau à Hyères. Racine carrée des débits.  
Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

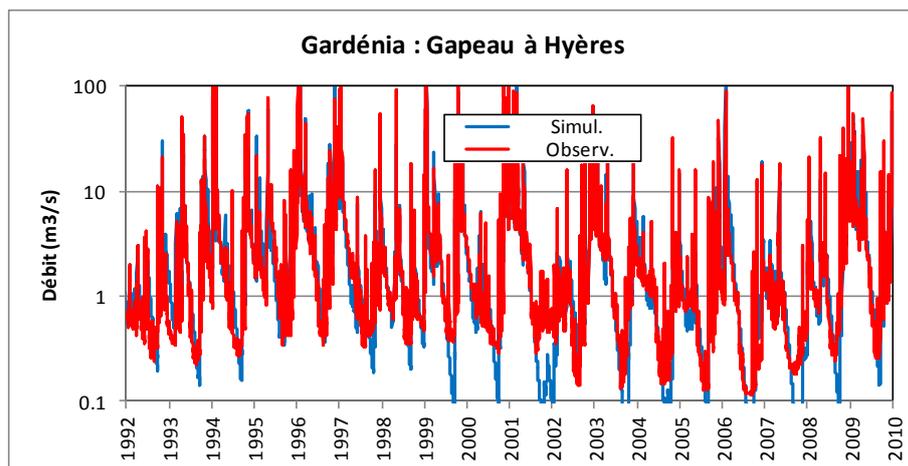


Figure 23 - Le Gapeau à Hyères. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu)  
(échelle logarithmique).

## 4.2. SIMULATION AVEC LE SCHÉMA GR4

On utilise les valeurs initiales des paramètres du schéma GR4 inclus dans le code de calcul GARDÉNIA :

- Correction globale de l'ETP = +10 % ; Optimisé.
- Capacité de la réserve superficielle [A] = 190 mm ; Optimisée.
- Capacité du Réservoir d'Eau Gravitaire [B] = 270 mm ; Optimisée.
- Temps de Décroissance des Hydrogrammes [C] = 1,3 jours ; Optimisé.
- Facteur d'échanges externe -> Réservoir gravitaire [D] = -0,58 ; Optimisé.

La calibration automatique se réalise en quelques secondes.

- Le coefficient d'ajustement obtenu est égal à 0,897 (soit un coefficient de Nash égal à 0,804 sur la racine carrée des débits, au lieu de 0,896 avec le schéma « Gardénia »). Le coefficient de Nash sur les débits naturels est égal à 0,767, au lieu de 0,885 avec le schéma « Gardénia »).
- Le fichier « tabl\_param.prn » indique, après calibration, les paramètres suivants : un coefficient correcteur global d'ETP de +22 %, une capacité de la réserve sol [A] de 203 mm, une capacité du Réservoir d'Eau Gravitaire [B] de 261 mm, un temps de décroissance des hydrogrammes [C] de 1.28 jours, un facteur d'échange externe => Réservoir gravitaire [D] de -0,64.
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 323 mm/an, dont 86 % d' « écoulement lent », et un débit d'échange souterrain de -30 % de la pluie efficace.

Les Figure 24 et Figure 25 montrent que la simulation de ce bassin très réactif est correcte, mais cependant significativement moins bonne qu'avec le schéma « Gardénia », surtout en étiage.

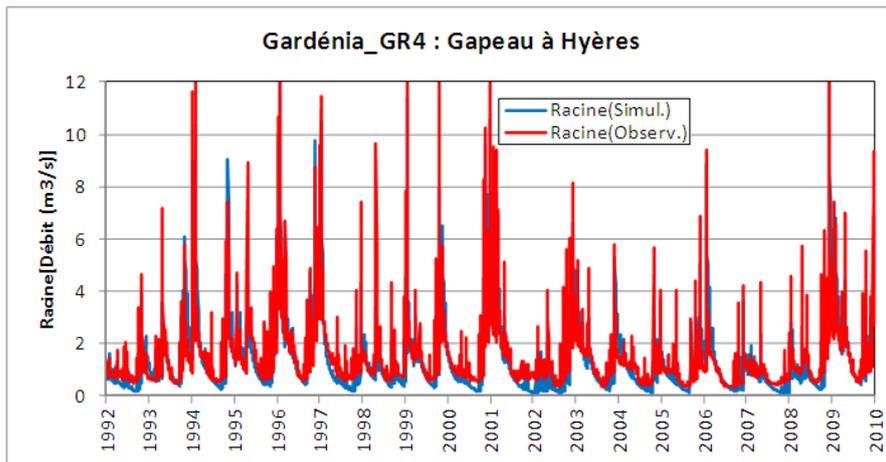


Figure 24 - Schéma GR4 : le Gapeau à Hyères. Racine carrée des débits. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

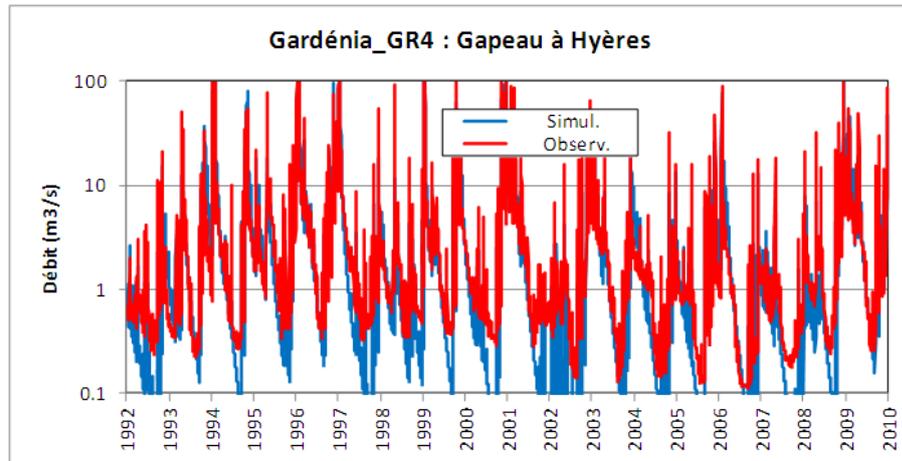


Figure 25 - Schéma GR4 : le Gapeau à Hyères. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu) (échelle logarithmique).

### 4.3. SIMULATION OPTIMALE DES ÉTIAGES

Le schéma GARDÉNIA avec calibration par minimisation des écarts sur la racine carrée des débits donne des résultats acceptables. Cependant, la Figure 23 montre que les faibles débits, de l'ordre de 0,1 à 0,5 m<sup>3</sup>/s ont tendance à être sous-estimés (bien que dans une plus faible mesure qu'avec le schéma GR4). On peut favoriser la simulation des étiages, peut-être un peu au détriment de la simulation des forts débits, en procédant comme suit :

- on choisit une pondération logarithmique « 97 = Pondérat. pour calage (97 = Log\_Débits) » ;
- on donne un poids égal à zéro sur la minimisation du biais moyen de simulation.

La Figure 26 montre que les faibles débits sont alors nettement mieux simulés.

La Figure 27 montre elle aussi que la simulation des faibles débits est nettement meilleure. En particulier, on n'observe plus comme précédemment de débits simulés de 0,02 à 0,1 m<sup>3</sup>/s correspondant à des débits observés de 0,1 à 0,8 m<sup>3</sup>/s.

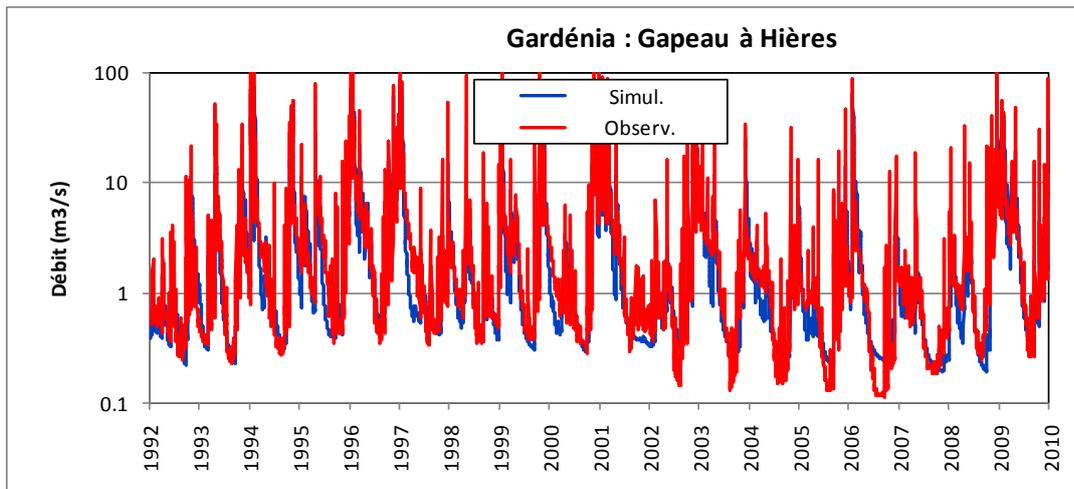


Figure 26 - Le Gapeau à Hyères. Pondération logarithmique. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

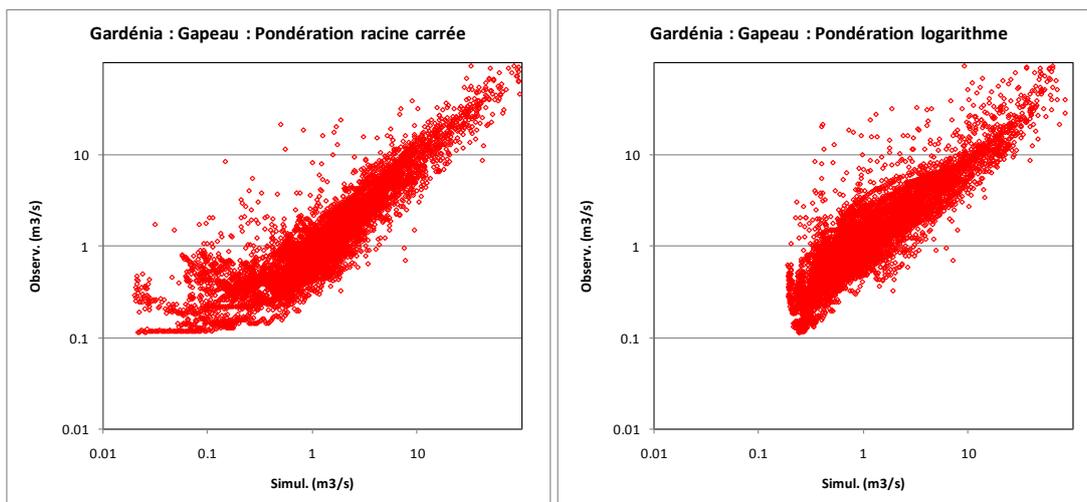


Figure 27 - Le Gapeau à Hyères. À gauche : pondération racine carrée. À droite : pondération logarithmique.

#### 4.4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

On a également modélisé les débits du Gapeau avec d'autres paramètres ou schémas pour mettre en évidence leur influence. Une telle analyse de sensibilité est conseillée à chaque fois que possible.

#### 4.4.1. Utilisation d'une réserve sol « Rumax » au lieu d'une « Réserve progressive »

Une modélisation avec une réserve sol « Rumax » au lieu d'une « réserve progressive » a donné des résultats très nettement moins bons. Le coefficient d'ajustement est égal à 0,883 au lieu de 0,948 (soit un coefficient de Nash de 0,78 au lieu de 0,90).

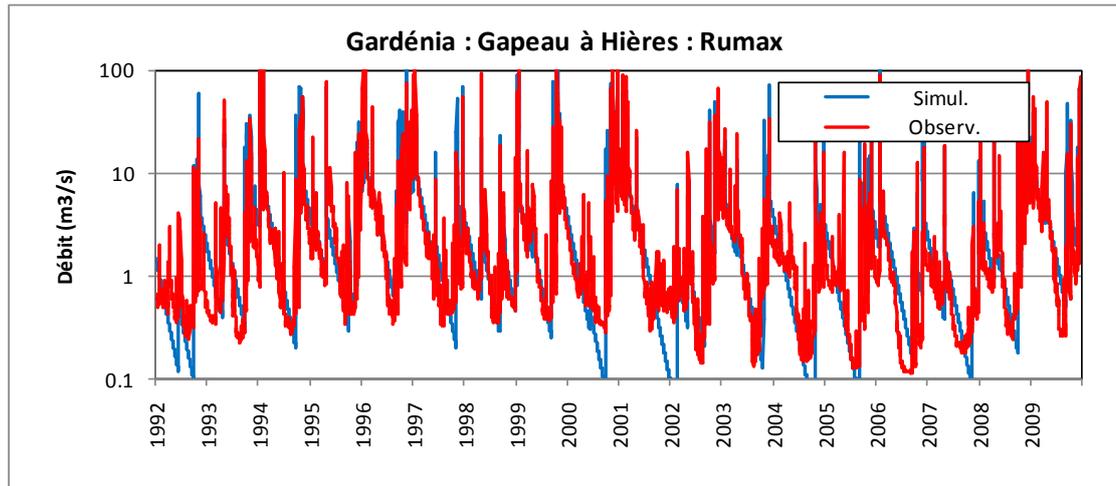


Figure 28 - Le Gapeau à Hyères. Simulation avec une réserve sol « Rumax ». Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

#### 4.4.2. Utilisation de pluie et d'ETP décadaires

Une modélisation avec des séries de pluie et d'ETP décadaires, au lieu de séries journalières, donne des résultats très nettement moins bons. Le coefficient d'ajustement est égal à 0,831 au lieu de 0,948 (soit un coefficient de Nash de 0,69 au lieu de 0,90).

Pour pouvoir réaliser cette simulation il faut sélectionner l'option :

« 1 = Bilan journalier même si pluie Décadaire ou Mensuelle (1 = Oui) »

#### 4.4.3. Calcul sans échanges souterrains

Une modélisation a été réalisée en n'imposant aucun échange souterrain :

« 0.0 = Facteur d'échange externe (%) Opti = 0 »

Cette simulation donne des résultats très peu différents de la simulation de référence. Le coefficient d'ajustement est égal à 0,943 au lieu de 0,948 (soit un coefficient de Nash de 0,889 au lieu de 0,90).

## 4.5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

À la suite des différentes simulations réalisées, il apparaît que pour ce bassin :

- Une calibration simulation avec minimisation des écarts de la racine carrée des débits donne des résultats satisfaisants pour la simulation de tous les débits.
- Si on s'intéresse particulièrement aux débits d'étiage, on obtient des résultats nettement meilleurs en réalisant une calibration avec minimisation des écarts du logarithme des débits.
- Une modélisation avec une « réserve sol progressive » est nettement plus performante qu'avec une réserve sol « R<sub>max</sub> ».
- Une modélisation avec des données météorologiques, pluies et ETP, décadaires au lieu de journalières donne des résultats nettement moins bons.
- Sauf si une étude hydrogéologique l'indiquait, il n'y a pas de raison de faire intervenir des échanges souterrains. En effet, le fait de calibrer un coefficient d'échange souterrain ne permet pas d'obtenir une meilleure simulation.

## 5. Exemple d'application n° 4 : débits de la Durance à Embrun

Ce bassin, d'une superficie de 2 170 km<sup>2</sup>, est situé dans les Hautes-Alpes. On dispose des débits journaliers pendant la période 1974-2009. Le but de cet exemple est d'illustrer la modélisation d'un bassin à forte composante nivale. Le débit moyen mensuel le plus fort est en effet celui du mois de juin (Figure 29), résultant de la fonte de la neige.

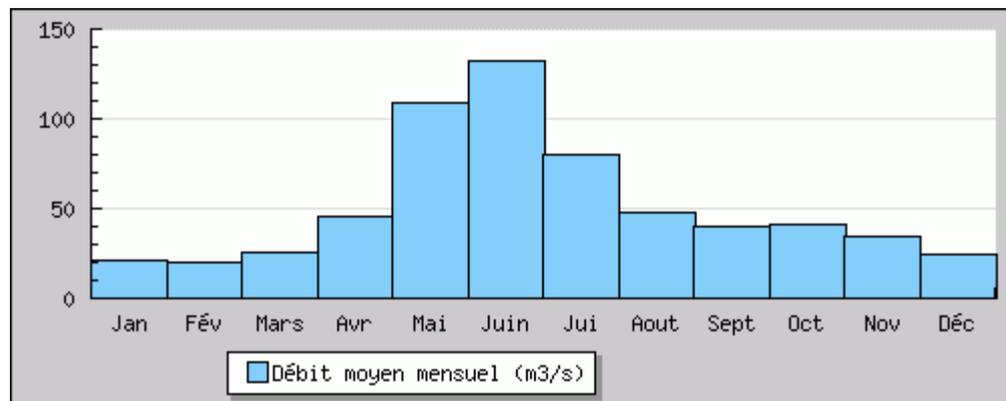


Figure 29 - Débits moyens mensuels de la Durance à Embrun (dessin EauFrance).

La série des débits journaliers a un coefficient d'asymétrie de 2,5, et un coefficient d'autocorrélation de valeur moyenne égal à 0,978. (Il faut un espacement de 32 jours entre deux débits pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0.50). La série des racines carrées des débits journaliers a un coefficient d'asymétrie de 1,4.

On dispose des données suivantes :

- pluie journalière sur le bassin, de 1971 à 2009 (en mm/j) ;
- évapotranspiration potentielle (ETP) journalière sur le bassin, de 1971 à 2009 (en mm/j) ;
- débit journalier de la Durance à Embrun, de 1974 à 2009 (en m<sup>3</sup>/s).

Pour avoir des données sur la même période, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 » pour les trois années de 1971 à 1973. La période de démarrage a une durée de trois ans.

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluie\_Durance\_1971\_2009.prn : pour les pluies ;
- ETP\_Durance\_1971\_2009.prn : pour les ETP ;
- Debit\_Durance\_1971\_2009.prn : pour les débits ;
- Tempe\_Durance\_1971\_2009.prn : pour les températures de l'air, en °C.

Les données décadaires sont au format « Excel Date ».

## 5.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES

On procède comme pour l'exemple du Gapeau à Hyères : On crée un nouveau projet (de nom « Durance\_1971\_2009 »). On définit les paramètres par les écrans de saisie, cependant, contrairement aux exemples précédents, on choisit (Figure 30) une « utilisation avancée » pour prendre en compte la fonte de la neige.

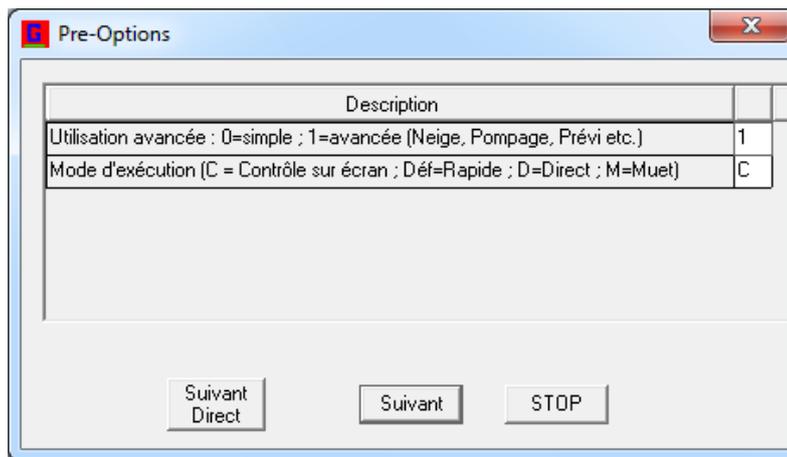


Figure 30 - Pré-options : utilisation avancée.

On accepte tous les paramètres par défaut avec les exceptions suivantes :

- On choisit « prise en compte de la neige » dans les options (Figure 31).
- **99** = Pondération des écarts pour le calage (99 = Racine\_Débit), c'est-à-dire que la calibration est réalisée par minimisation des écarts de la racine carrée des débits. De cette manière, on favorise la prise en compte des étiages.
- **15** = Minimisation du biais sur les Débits Rivière : On donne un poids de 15 % de pénalité sur le biais moyen de simulation.
- On pense à définir le pas de temps de la température de l'air : « Journalier », en format « Excel Date ».

### Options du bassin :

- Nombre d'années = 39.
- Nombre d'années de démarrage = 3.
- Numéro de la première année = 1971.
- Nombre d'itérations de calibration = 450.

### Paramètres Physiques :

- Superficie et débit extérieur = 2 170 km<sup>2</sup>.  
Paramètres initiaux déterminés à la suite d'une première phase de calibration (Figure 32) :
- Correction globale de l'ETP = -30 % ; Optimisé.

- Capacité de la réserve superficielle progressive = 240 mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 30 mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ Percolation) = 5 mois ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = 18 mois ; Optimisé.
- Retard (propagation) des débits = 0 jours ; Optimisé.
- Facteur d'échange externe = 60 % ; Optimisé.

On définit également les paramètres initiaux de fonte de la neige, déterminés à la suite d'une première phase de calibration :

- Correction globale des températures = -2 °C ; Optimisé.
- Taux de rétention d'eau de la neige = 5 % ; Non optimisé
- Facteur d'évaporation de la neige = 0 ; Non optimisé.
- Correction de fonte de la neige par la pluie = -20 % ; Optimisé.
- Seuil de fonte naturelle de la neige = -0,3 °C ; Optimisé.
- Constante de fonte par la température = 1,8 mm/°C/jour ; Optimisé.
- Fonte de la neige au contact du sol = 6,5 1/10 mm/jour ; Optimisé.

Les bornes des paramètres sont données sur la Figure 33.

## 5.2. RÉSULTATS OBTENUS

À l'issue de la calibration, les paramètres physiques obtenus sont peu différents.

- Le coefficient d'ajustement obtenu est égal à 0,878 (soit un coefficient de Nash égal à 0,771 sur la racine carrée des débits). Le coefficient d'ajustement sur les valeurs naturelles des débits est égal à 0,86 (soit un coefficient de Nash de 0,74).
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 634 mm/an, dont 33 % d'« écoulement lent ». Le pourcentage de débit souterrain échangé est de 16 % de la pluie efficace.

Les Figure 34 et Figure 35 montrent que la simulation de ce bassin avec prise en compte de la neige, est tout-à-fait satisfaisante. La Figure 36 montre l'évolution du stock de neige calculé moyen sur le bassin.

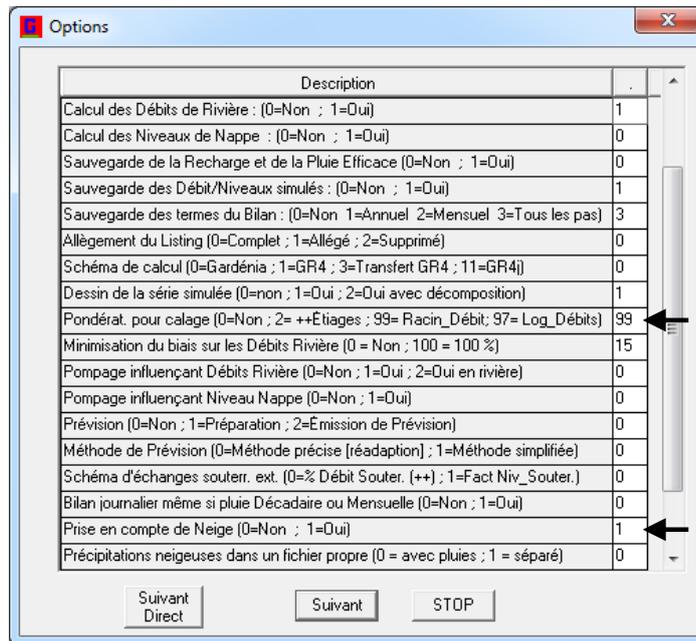


Figure 31 - Prise en compte de la neige.

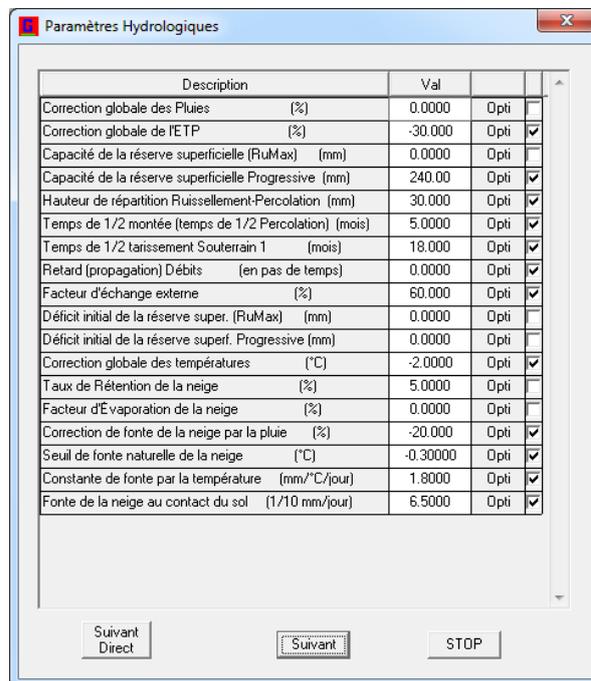


Figure 32 - Durance : paramètres physiques initiaux, avec fonte de la neige.

Description	(Val)	Mini	Maxi
Correction globale de l'ETP (%)	-30.000	-35.000	35.000
Capacité de la réserve superficielle (RuMax) (mm)	0.0000	0.0000	250.00
Capacité de la réserve superficielle Progressive (mm)	240.00	0.0000	900.00
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	30.000	1.00000E-03	9999.0
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 Percolation) (mois)	5.0000	5.00000E-02	20.000
Temps de 1/2 tarissement Souterrain 1 (mois)	18.000	0.30000	35.000
Retard (propagation) Débits (en pas de temps)	0.0000	0.0000	7.0000
Facteur d'échange externe (%)	60.000	-80.000	70.000
Déficit initial de la réserve super. (RuMax) (mm)	0.0000	0.0000	0.0000
Déficit initial de la réserve superf. Progressive (mm)	0.0000	0.0000	0.0000
Correction globale des températures (°C)	-2.0000	-3.0000	3.0000
Taux de Rétention de la neige (%)	5.0000	1.00000E-03	10.000
Facteur d'Evaporation de la neige (%)	0.0000	0.0000	20.000
Correction de fonte de la neige par la pluie (%)	-20.000	-20.000	20.000
Seuil de fonte naturelle de la neige (°C)	-0.30000	-2.0000	2.0000
Constante de fonte par la température (mm/°C/jour)	1.8000	1.0000	7.0000
Fonte de la neige au contact du sol (1/10 mm/jour)	6.5000	1.00000E-03	20.000

Figure 33 - Durance : bornes des paramètres physiques, avec fonte de la neige.

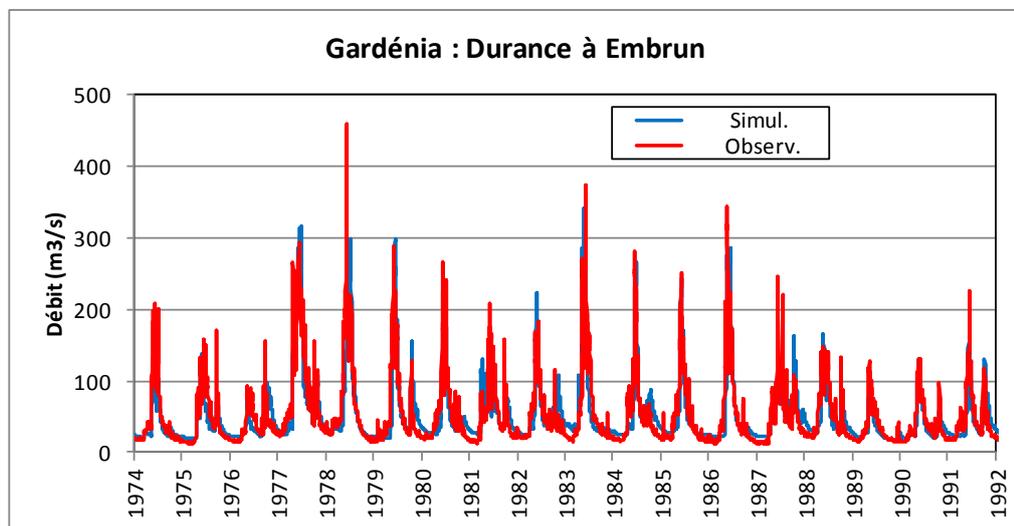


Figure 34 - La Durance à Embrun 1975-1991. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

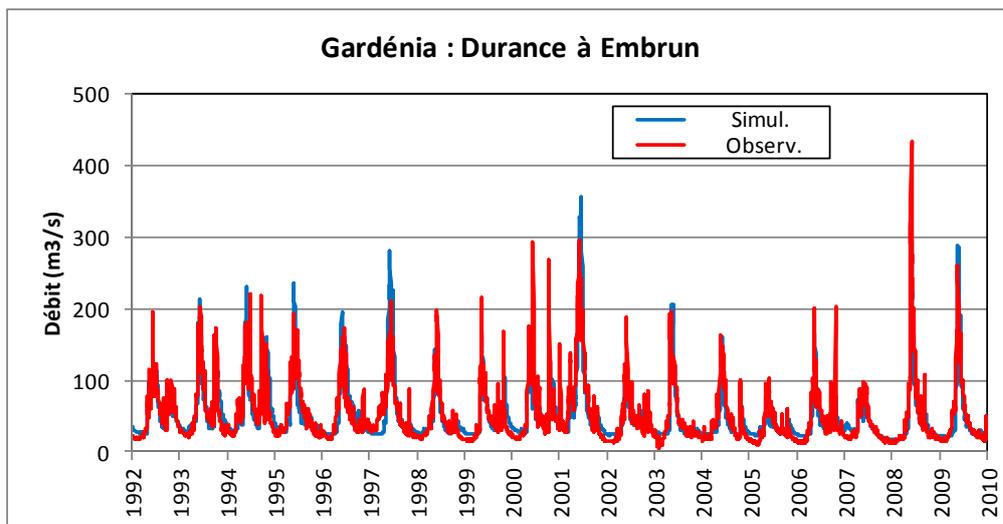


Figure 35 - La Durance à Embrun 1992-2009. Débits observés (en rouge) et simulés (en bleu).

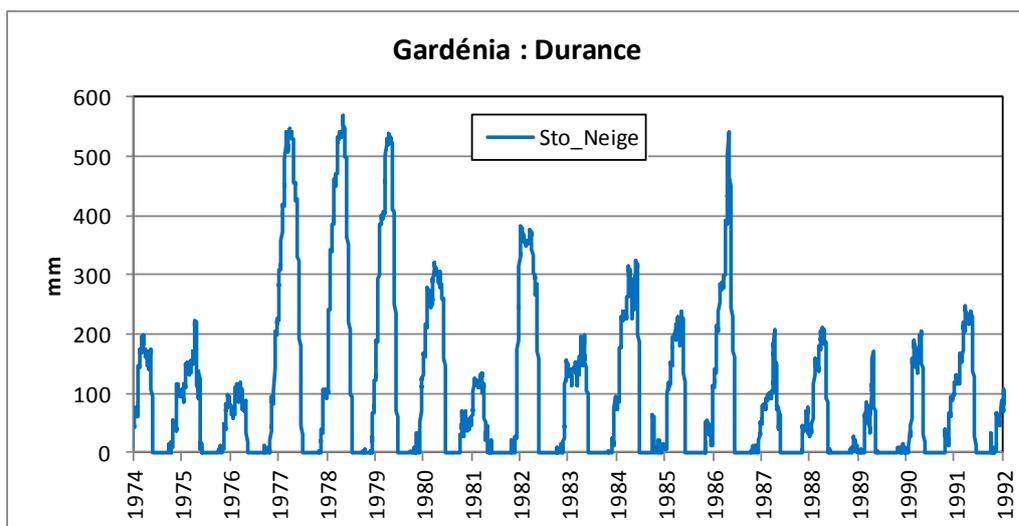


Figure 36 - La Durance à Embrun 1974-1991. Évolution du stock moyen de neige calculé.

## 6. Exemple d'application n° 5 : modélisation simultanée du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron et du débit de la Voulzie à Jutigny (validation du schéma pluie - niveau de Gardénia)

Cette application montre tout d'abord comment réaliser une modélisation « pluie – niveau de nappe », puis elle montre l'intérêt de réaliser une modélisation couplée « pluie – débit » et « pluie – niveau de nappe ». Cet exemple est utilisé également pour la validation du schéma de calcul pluie – niveau du code de calcul GARDÉNIA par comparaison avec un code de calcul hydrodynamique discrétisé.

On dispose des niveaux piézométriques moyens au piézomètre Saint Martin-Chennetron, d'indice BSS 02603X0009/S1, situé dans les calcaires de Champigny, en Seine-et-Marne. On dispose également des débits de la Voulzie à Jutigny, qui draine un bassin versant de 280 km<sup>2</sup>, près de la ville de Provins (Figure 37).

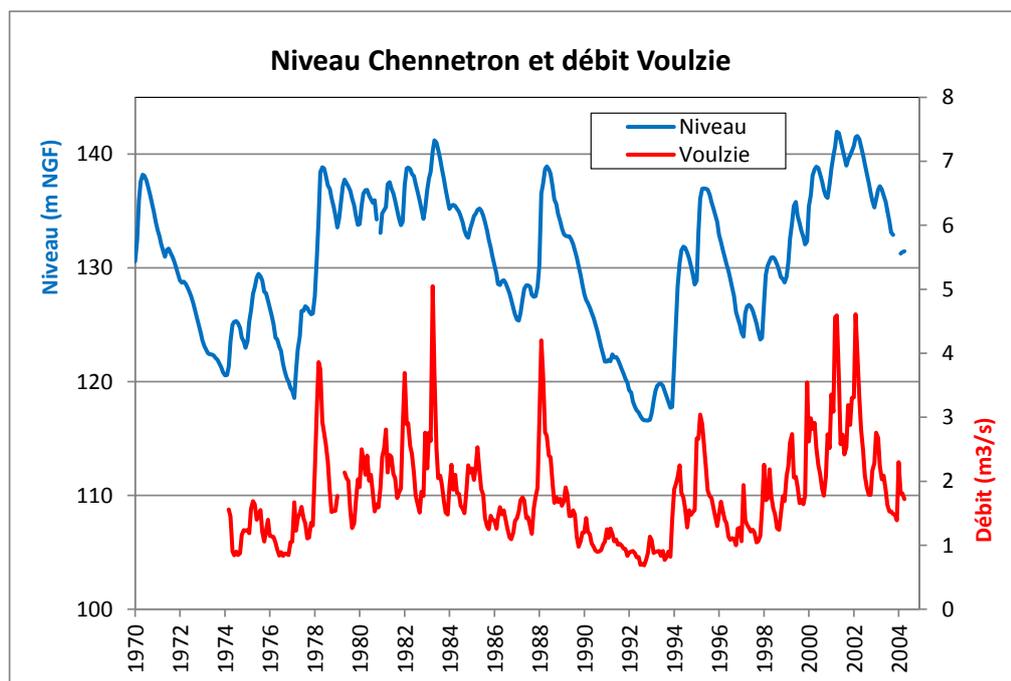


Figure 37 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron et débit de la Voulzie à Jutigny  
(données moyennes mensuelles).

On dispose des données suivantes :

- Pluie mensuelle sur le bassin de 1962 à 2004, en mm/mois. C'est une lame d'eau sur le bassin calculé par pondération arithmétique de stations pluviométriques voisines.
- Évapotranspiration potentielle (ETP) à Melun de 1962 à 2004, en mm/mois.
- Débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny de 1974 à 2004, en m<sup>3</sup>/s.
- Niveau piézométrique mensuel à Saint-Martin-Chennetron de 1970 à 2004, en m NGF.

La série des niveaux mensuels a un coefficient d'asymétrie de -0,35, et un fort coefficient d'autocorrélation égal à 0,988 (il faut un espacement de quinze mois, soit plus d'un an, entre deux niveaux mensuels pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

La série des débits mensuels a un coefficient d'asymétrie de 1,3, et un coefficient d'autocorrélation assez élevé égal à 0,87 (il faut un espacement de quatre mois entre deux débits mensuels pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

Pour avoir des données sur la même période 1962-2004, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 », de 1962 à mars 1974 et de mai à décembre 2004. On a aussi étendu la série des niveaux de nappe observés en mettant des « valeurs absentes » égales à « 9999 » sur la période 1962-1969 et de mai à décembre 2004.

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Plu\_Moy3sta\_Voulzie\_1962\_2004.plu : pour les pluies (mm/mois) ;
- Melun\_1962.etp : pour les ETP (mm/mois) ;
- QMVoulz\_Jutigny\_1962.deb : pour les débits (m<sup>3</sup>/s) ;
- Chennetron\_1962.niv : pour les niveaux de nappe (m NGF).

Les données mensuelles sont au format « mensuel-Annuaire », c'est-à-dire une ligne par an contenant les valeurs des douze mois de l'année. Les données de ce format ne sont pas en format libre : elles sont formatées. Il est possible de les mettre en forme très facilement avec le logiciel SHALIMAR du BRGM, fourni avec la distribution de GARDENIA. Il est ainsi possible de créer automatiquement les fichiers à partir de diverses sources, en particulier à partir de la « climathèque » de Météo-France. Il aurait été tout-à-fait possible d'utiliser le format « Excel Date » comme précédemment en utilisant une ligne par mois avec pour date le 15 de chaque mois.

## 6.1. MODÉLISATION UNIQUEMENT PLUIE - NIVEAU

À titre de démonstration, on réalise dans un premier temps uniquement une modélisation pluie – niveau de nappe.

### 6.1.1. Définition des paramètres

On procède comme pour les premiers exemples (débit de la Somme ou débit de l'Austreberthe). On crée un nouveau projet (de nom « Chennetron »). On définit les paramètres par les écrans de saisie.

On accepte tous les paramètres par défaut, avec les exceptions suivantes :

- **0** = Observations de Débits de Rivière (0 = Non) : *parce qu'on n'a pas (ou on ne prend pas en compte) de débits de rivière.*
- **1** = Observations de Niveaux de Nappe : *parce qu'on a des observations de niveau.*
- **0** = Calcul des Débits de Rivière : (0 = Non).
- Pour les pas de temps de Pluie, ETP et Observations de Niveaux :
  - *Pas de temps « Mensuel » et format « Annuaire ».*

#### Options du bassin :

- Nombre d'années = 43
- Nombre d'années de démarrage = 12
- Numéro de la première année = 1962
- Nombre d'itérations de calibration = 500

#### Paramètres Physiques :

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = 100 mm/an
  - Superficie : On laisse la valeur par défaut = 1 km<sup>2</sup>. (non utilisé).
  - Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = 0 ; **Optimisé.**
  - Coefficient d'emménagement équivalent : Valeur par défaut = 0,01 ; **Optimisé.**
- Paramètres initiaux déterminés à la suite d'une première phase de calibration :
- Capacité de la réserve superficielle (RuMax) = 0 ; Non Optimisée.
  - Capacité de la réserve superficielle progressive = 220 mm ; Optimisée.
  - Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 450 mm ; Optimisée.
  - Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 3 mois ; Optimisé.
  - Temps de ½ tarissement = 15 mois ; Optimisé.

#### Bornes des paramètres physiques :

- Borne supérieure du temps de ½ montée = 20 mois
- Borne supérieure du temps de ½ tarissement = 50 mois

### 6.1.2. Résultats obtenus

La calibration automatique se réalise en quelques secondes et on voit à l'écran une simulation excellente sur la période de 31 ans (hors démarrage) de 1974 à 2004.

- Le coefficient d'ajustement obtenu est égal à 0,971 (soit un coefficient de Nash égal à 0,943).
- Le fichier « gardelis.txt » (à la fin du fichier) ou le fichier « tabl\_param.prn » donne les paramètres suivants en fin de calibration :

- Coefficient d'emménagement équivalent = 0,00150 (c'est-à-dire 0,15 %), soit une valeur très faible.
- Niveau de base = 107,30 m NGF, c'est le niveau qui serait atteint pendant une très longue période (une dizaine d'années) sans aucune recharge.
- Capacité de la réserve sol progressive = 225 mm
- Hauteur d'équi-ruissellement = 18 mm (ce qui implique une importante composante de ruissellement).
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 14,6 mois
- Temps de ½ tarissement = 10,6 mois.
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 136 mm/an, dont 21 % d'« écoulement lent ».

La Figure 38 montre que la simulation des niveaux de nappe est excellente, aussi bien en hautes eaux (1978-1985 et 1999-2002) qu'en basses eaux (1975-1976 et 1990-1993).

Il convient cependant d'être conscient qu'une calibration uniquement sur une série de niveaux de nappe peut être insuffisante, particulièrement pour les systèmes très amortis. Ceci est particulièrement vrai si on optimise la valeur du coefficient d'emménagement équivalent, ce qui est le cas général en simulation pluie – niveau. En effet, on peut parfois obtenir un très bon ajustement avec :

- Une proportion d'écoulement rapide (de surface) trop forte, et donc une recharge trop faible, ce qui induit des niveaux d'eau (en mm) trop faibles dans le réservoir souterrain G.
- Un coefficient d'emménagement équivalent trop petit qui transforme ces niveaux dans le réservoir souterrain G trop faibles en des niveaux de nappe simulés tout-à-fait corrects.

Il semble que ce soit le cas pour cette première simulation démonstrative.

Pour les systèmes très amortis, on peut parfois identifier :

- une capacité de réserve sol trop grande, ce qui produit une ETR trop forte, donc une recharge trop faible ;
- un coefficient d'emménagement équivalent trop petit qui permet d'obtenir une simulation correcte des niveaux de nappe.

Ces incertitudes n'apparaissent généralement pas :

- pour les systèmes réactifs ;
- en simulation Pluie – Débit, puisque la superficie du bassin versant est la plupart du temps imposée.

Il est donc conseillé de réaliser à chaque fois que possible une modélisation double Pluie – Débit rivière – Niveau de nappe.

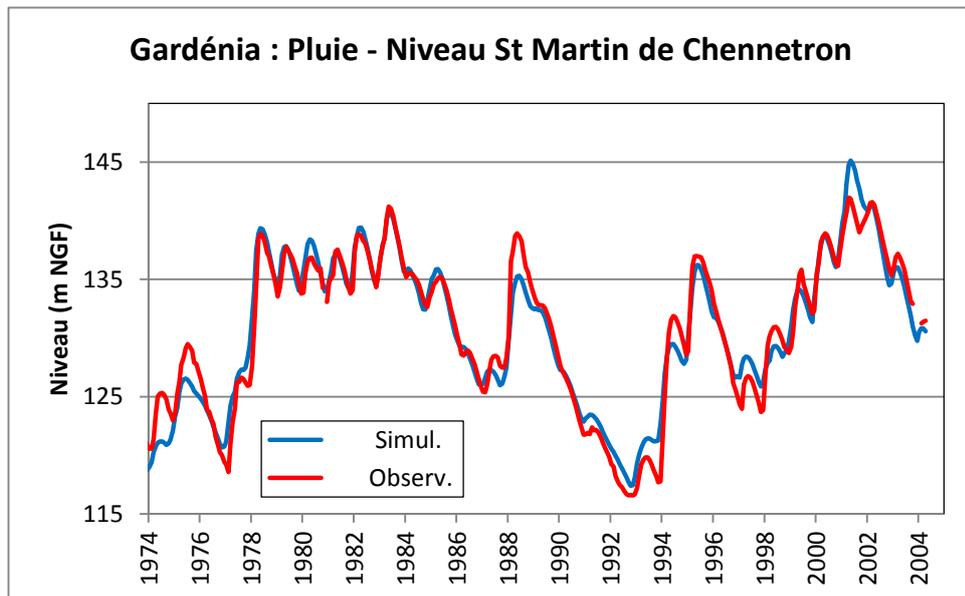


Figure 38 - Simulation du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron.  
Calibration sur les seuls niveaux de nappe.

À titre d'exemple, on a refait exactement la même simulation, mais en imposant un coefficient d'emmagasinement équivalent égal à 1 %. On obtient un ajustement quasiment aussi bon (coefficient d'ajustement de 0,964 au lieu de 0,971), mais avec 80 % d'écoulement souterrain au lieu de 21 %.

### 6.1.3. Validation de la calibration – Extension de données

Pour valider les paramètres de cette modélisation pluie – débit et réaliser une extension de données, on a procédé de la manière suivante :

- On est parti d'exactly les mêmes paramètres initiaux, mais on a supposé qu'on disposait des observations uniquement jusqu'en 1992, c'est-à-dire avant la forte remontée de 1993-1995 et 1997-2001.
- On considère donc qu'on a 31 ans de données sur les fichiers (1962-1992) et donc que la calibration s'effectue sur les 19 années de la période 1974-1992.

Pour effectuer cette simulation :

- On ouvre le projet de nom « Chennetron » qui a été généré (Figure 39). Il contient le fichier des paramètres « Chennetron.gar » avec les paramètres en fin de calibration automatique.
- On valide tous les paramètres (on peut cependant changer le titre descriptif jusqu'à l'écran « paramètres généraux »).
- On remplace alors le nombre d'années qui était de 43 ans par 39 ans (Figure 40).
- Pour être parfaitement objectif on réintroduit les paramètres initiaux (220 mm pour la capacité du sol, 450 mm pour la hauteur d'équi-ruisellement, etc.) et on lance la simulation.

La Figure 41 montre que la calibration des paramètres sur la période 1974-1992 est très robuste et permet de prévoir très précisément les niveaux de la période 1993-2004.

Cependant, comme expliqué plus haut, pour ce système très amorti, la calibration uniquement sur une série de niveaux de nappe, bien que robuste, n'est pas forcément unique et ne permet pas forcément d'estimer correctement la composante superficielle de l'écoulement.

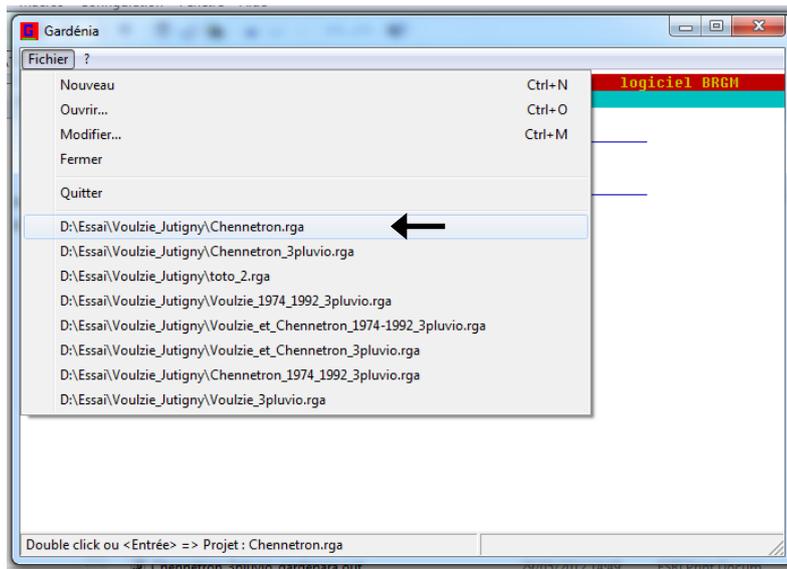


Figure 39 - Ouverture d'un projet existant.

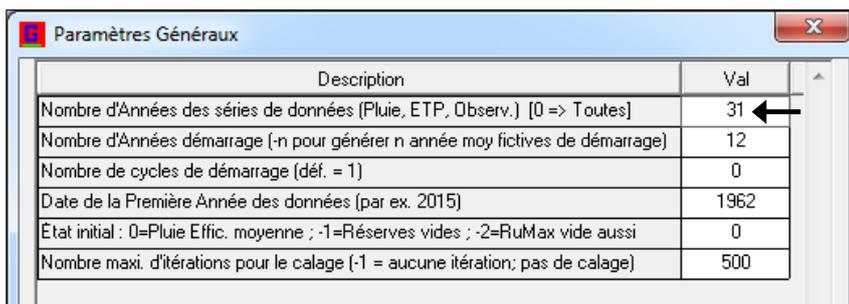


Figure 40 - Modification du nombre d'années.

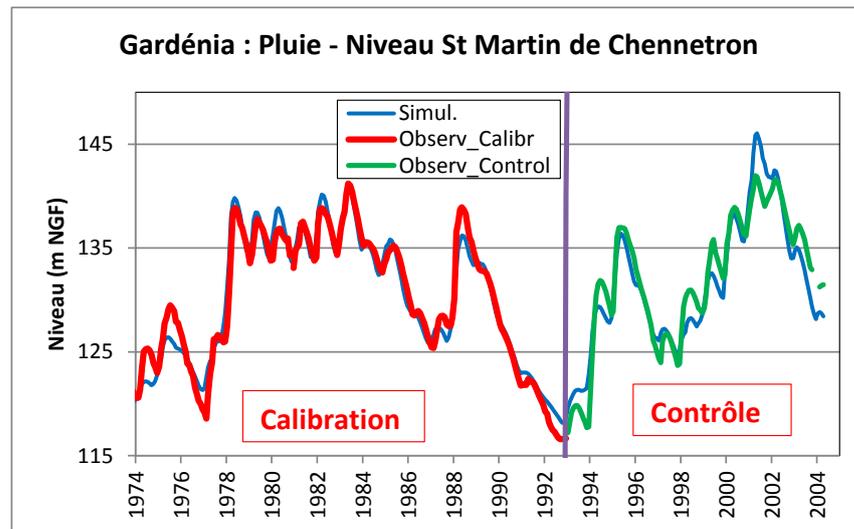


Figure 41 - Simulation du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron. Calibration sur la période 1974-1992 et contrôle sur la période 1993-2004.

## 6.2. MODÉLISATION UNIQUEMENT PLUIE - DÉBIT : MODIFICATION D'UN PROJET

À titre de comparaison, on modélise les débits de la Voulzie à Jutigny par une simulation Pluie - Débit, avec les paramètres calibrés uniquement sur la série des débits observés.

### 6.2.1. Modification d'un projet existant

Par sécurité, on commence par faire une copie du fichier des paramètres « Chennetron.gar » sous le nom « Voulzie.gar ».

On va alors « modifier » le fichier projet existant :

On active GARDÉNIA. Puis « Fichier → Modifier » et on sélectionne le projet « Chennetron ».

On veut modifier le fichier des paramètres et ajouter le nom du fichier des débits de la Voulzie :

- En face du nom du fichier des paramètres, on clique sur « Parcour. » et on sélectionne le fichier « Voulzie.gar ».
- En face du nom du fichier des débits observés, on clique sur « Parcour. » et on sélectionne le fichier « QMVoulz\_Jutigny\_1962.deb ».

Il n'est pas nécessaire de retirer le nom du fichier des niveaux de nappe, car on s'en servira dans une autre application.

On appuie sur le bouton OK et on adapte le titre descriptif : par ex, « Simulation de la Voulzie ».

On donne le nom « Voulzie.rga » au nouveau projet.

Puis on choisit une exécution avec « Contrôle ».

## 6.2.2. Définition des paramètres

Les seuls changements à apporter sont les suivants :

- 1 = Observations de Débits de Rivière.
- 0 = Observations de Niveaux de Nappe (0 = Non). Parce qu'on n'a pas (ou on ne prend pas en compte) de niveau de nappe observé.
- 0 = Calcul des Niveaux de Nappe (0 = Non).

### Paramètres Physiques :

- Superficie du bassin versant = **280 km<sup>2</sup>** ; Non optimisée.
- On peut laisser les valeurs du coefficient d'emménagement et du niveau de base : ces paramètres ne seront pas utilisés en simulation pluie – débit.

La simulation s'effectue en quelques secondes et est tout-à-fait satisfaisante comme le montre le graphique (Figure 42) qui apparaît à l'écran.

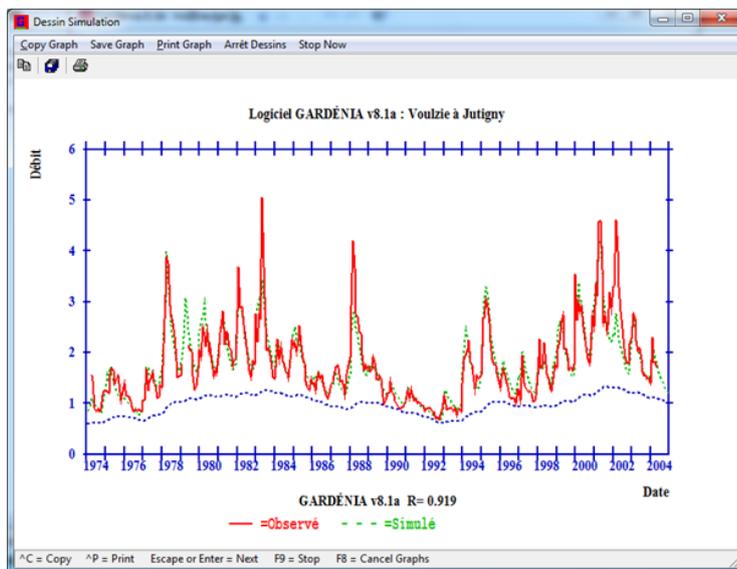


Figure 42 - Simulation du débit moyen mensuel de la Vouizie à Jutigny (calibration uniquement sur la série des débits).

Le coefficient d'ajustement est égal à 0,919 (Nash = 0,844).

### 6.3. MODÉLISATION COUPLÉE PLUIE - DÉBIT ET PLUIE - NIVEAU

Comme expliqué plus tôt, une telle modélisation est conseillée à chaque fois que possible, car elle permet une calibration fiable. En effet, les paramètres du modèle seront calibrés sur les deux composantes de l'écoulement : l'écoulement superficiel et l'écoulement souterrain.

Quand on dispose de deux séries d'observations : une série d'observation de débits et une série d'observation de niveaux, les contraintes sont les suivantes :

- Les périodes d'observation des débits de rivière et des niveaux de nappe n'ont pas besoin d'être identiques, mais on étendra les séries à une période de simulation commune, en complétant les séries par des « valeurs absentes ».
- Le pas de temps des deux séries d'observation doit être le même.

#### 6.3.1. Création ou modification d'un projet existant

On doit créer un fichier projet, par exemple de nom « Voulzie\_et\_Chennetron ». Ce projet doit faire apparaître les deux noms des séries d'observation :

```
Voulzie_et_Chennetron.gar = Paramètres
Plu_Moy3sta_Voulzie_1962_2004.plu = Pluies
Melun_1962.etp = Évapo-Transpi. Potentielle (Etp)
QMVoulz_Jutigny_1962.deb = Débits Rivière
Chennetron_1962.niv = Niveaux Nappe
```

Le fichier des paramètres « Voulzie\_et\_Chennetron.gar » peut être une copie du fichier « Chennetron.gar » auquel on apportera quelques changements lors du contrôle des paramètres.

#### 6.3.2. Définition des paramètres

Les seuls changements à apporter sont les suivants :

- **1** = Observations de Débits de Rivière : Importance (entier : 0 à 10).
- **1** = Observations de Niveaux de Nappe : Importance (entier : 0 à 10).  
Si on avait voulu donner 50 % de poids en plus à la série des débits, on aurait pu par exemple donner comme paramètres :
  - **3** = Observations de Débits de Rivière : Importance (entier : 0 à 10)
  - **2** = Observations de Niveaux de Nappe : Importance (entier : 0 à 10).

##### Paramètres Physiques :

- Superficie du bassin versant = **280** km<sup>2</sup> ; Non optimisée.
- Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = 0 ; **Optimisé.**
- Coefficient d'emménagement équivalent = 0,01 ; **Optimisé.**
- On réintroduit par exemple les paramètres initiaux (220 mm pour la capacité du sol, 450 mm pour la hauteur d'équi-ruissellement, etc.) mais ce n'est pas nécessaire.

### 6.3.3. Résultats obtenus

On lance la simulation et après quelques secondes de calibration on obtient un coefficient d'ajustement global sur les deux séries de 0,939. On voit apparaître à l'écran successivement la simulation des débits de la Voulzie (Figure 43), puis la simulation des niveaux du piézomètre Saint-Martin-Chennetron (Figure 44).

Les coefficients d'ajustement sur les deux séries ont les valeurs suivantes :

- 0,916 sur les débits de la Voulzie (au lieu de 0,919 pour une calibration sur les seuls débits) ;
- 0,962 sur les niveaux de Saint-Martin-Chennetron (au lieu de 0,971 pour une calibration sur les seuls niveaux).

La calibration simultanée sur les deux séries (Figure 45) produit une simulation quasiment aussi bonne qu'une calibration séparée sur chacune des deux séries, mais avec un seul jeu de paramètres (au lieu de deux). La calibration est donc beaucoup fiable.

En particulier, la décomposition entre écoulement souterrain et écoulement de surface obtenue (Figure 46) est beaucoup plus fiable.

- Les valeurs des paramètres obtenus en fin de simulation (fichier « gardelis.txt » ou fichier « tabl\_param.prn ») sont les suivants :
  - Coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,0088 (c'est-à-dire 0,9 %) ce qui est réaliste
  - Niveau de base = 108,48 m NGF
  - Capacité de la réserve sol progressive = 103 mm
  - Hauteur d'équi-ruissellement = 405 mm
  - Temps de  $\frac{1}{2}$  montée (temps de  $\frac{1}{2}$  percolation) = 4,4 mois
  - Temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement = 10,9 mois
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 200 mm/an, dont 78 % d'« écoulement lent », ce qui est réaliste.

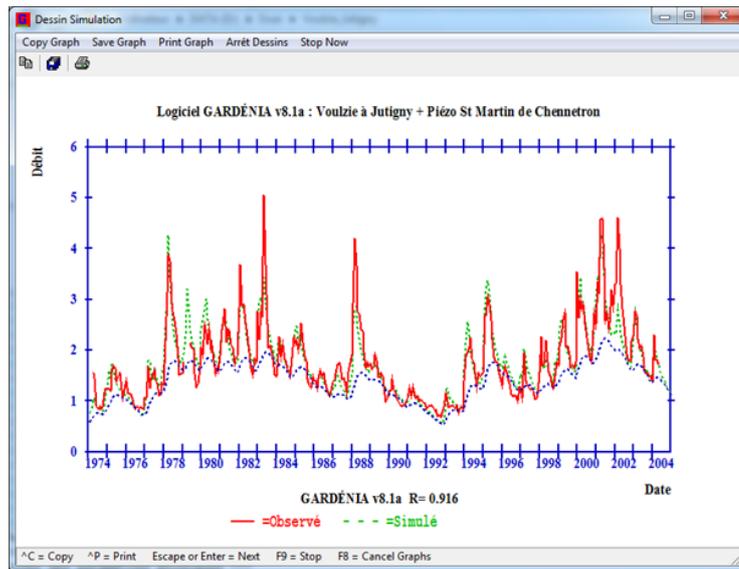


Figure 43 - Simulation du débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny + Piézo St Martin de Chennetron (calibration simultanée sur la série des débits et la série des niveaux).

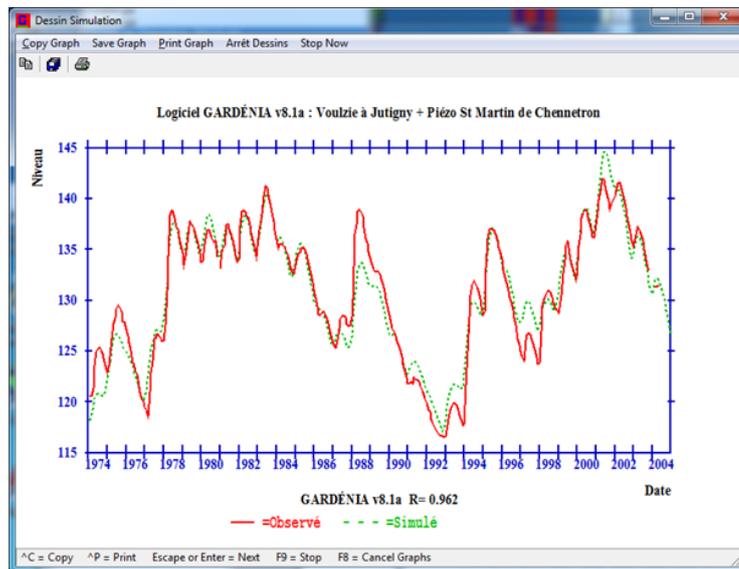


Figure 44 - Simulation du niveau de nappe mensuel à Saint-Martin-Chennetron (calibration simultanée sur la série des débits et la série des niveaux).

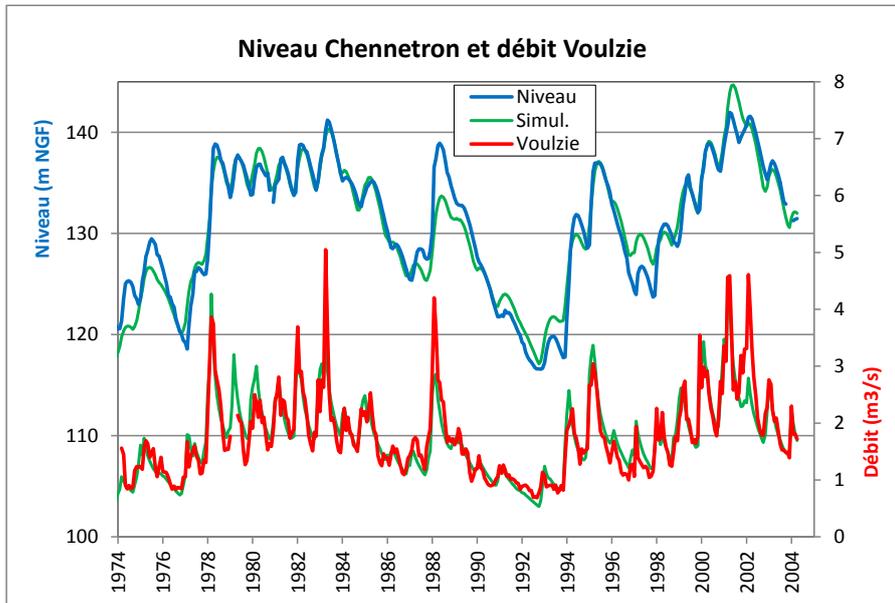


Figure 45 - Simulation simultanée du débit de la Voulzie à Jutigny et du niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron.

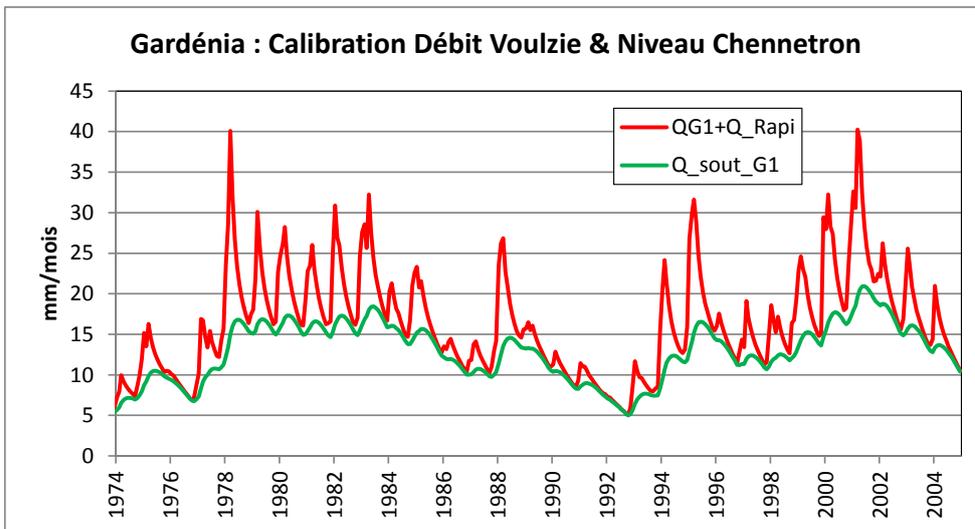


Figure 46 - Décomposition de l'écoulement en écoulement rapide et écoulement lent (calibration simultanée sur le débit de la Voulzie à Jutigny et sur le niveau de nappe à Saint-Martin-Chennetron).

#### 6.4. VALIDATION DU SCHEMA GARDÉNIA DE MODÉLISATION DES NIVEAUX DE NAPPE

Dans un but de validation du schéma GARDÉNIA de modélisation des niveaux de nappe à partir de la recharge, on procède de la manière suivante :

- On modélise les niveaux de nappe à Saint-Martin-Chennetron, à partir des pluies et des ETP, avec le code de calcul GARDÉNIA. On a ainsi obtenu :
  - La série des niveaux de nappe simulés par GARDÉNIA de 1974 à 2004.
  - La série des flux de recharge calculés de 1962 à 2004.
  - Les paramètres de simulation de GARDÉNIA : temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement = 10,9 mois, coefficient d'emmagasinement =  $6,96 \cdot 10^{-3}$ , niveau de base = 109,10 m NGF.
- On introduit ce flux de recharge dans le code de calcul hydrodynamique MARTHE (Thiéry 1990, 1993, 1994, 1995, 2002, 2004, 2007) de simulation d'aquifères par volumes finis selon la loi de Darcy. On modélise un domaine aquifère uniforme de  $200 \text{ km}^2$  défini comme suit (Figure 47) :
  - Le domaine est un rectangle de 10 km de haut sur 20 km dans la direction Ouest-Est, discrétisé en 1D par 40 mailles de 0,5 km de coté.
  - La nappe a une épaisseur uniforme de 50 m.
  - La limite ouest, bordée par une rivière, a un niveau piézométrique imposé (à une cote à déterminer).
  - Les trois autres limites, à l'est, au nord et au sud, sont étanches.
  - Le piézomètre d'observation est situé à 15 km à l'est de la rivière, à mi-ordonnée, c'est-à-dire à 5 km des limites nord et sud.
- On détermine alors la perméabilité uniforme, le coefficient d'emmagasinement uniforme et la cote de rivière qui permettent de reproduire le mieux possible, avec le code de calcul physique MARTHE, le niveau de nappe simulé par GARDÉNIA dans la maille correspondant au piézomètre Saint-Martin-Chennetron pendant la période 1974 à 2004. La période 1962-1973 est utilisée pour initialiser les calculs.

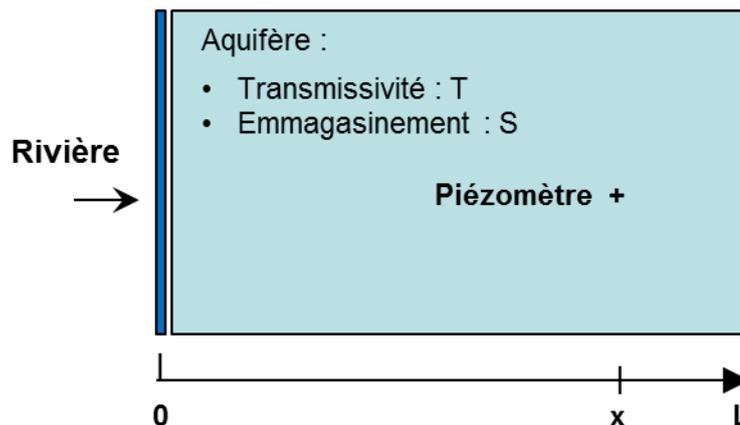


Figure 47 - Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs de niveau de nappe avec GARDÉNIA.

On obtient un niveau de nappe mensuel quasi identique (Figure 48) avec un coefficient d'emmagasinement égal à  $7,817 \cdot 10^{-3}$ , une perméabilité égale à  $6,394 \cdot 10^{-4}$  m/s sur 50 m d'épaisseur (soit une transmissivité de  $3,197 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) et un niveau de rivière égal à 109,26 m NGF.

On note :

- L : la dimension du système dans le sens de l'écoulement ;
- T : la transmissivité ;
- S : le coefficient d'emmagasinement ;
- $D = T/S$  : la diffusivité.

La constante de temps du système CT est de l'ordre de  $L^2 \cdot S / (2T)$ , soit 18,6 mois, ce qui correspond à un temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement = 12,9 mois. Ces valeurs sont du même ordre de celles obtenues avec le code GARDÉNIA qui utilise un schéma simplifié.

En supposant que dans le modèle physique MARTHE le piézomètre est situé non plus à 15 km de la rivière mais à 20 km, c'est-à-dire sur la limite est, on obtient également un ajustement parfait (Figure 49), avec des paramètres légèrement différents. En supposant que le piézomètre est situé à 10 km, soit entre la rivière et la limite amont on obtient également un très bon ajustement (non représenté).

En supposant un bassin en forme de secteur d'angle (écoulement radial : Figure 50) on obtient également un ajustement parfait (Figure 51).

Réciproquement, le fait de reproduire parfaitement avec GARDÉNIA le niveau de nappe calculé avec un modèle hydrodynamique physique est une validation forte du schéma à réservoir de GARDÉNIA pour le calcul du niveau de nappe à partir de la recharge.

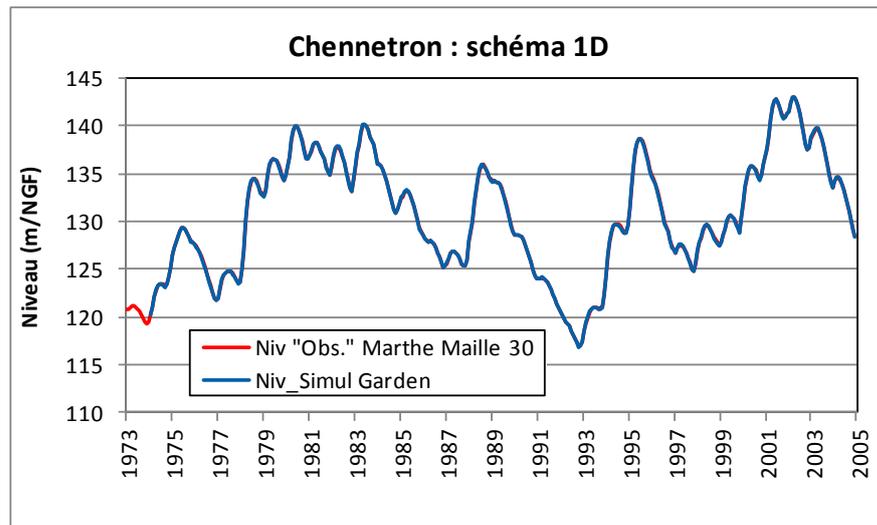


Figure 48 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma 1D, piézomètre à 15 km (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). Les courbes sont superposées et indiscernables.

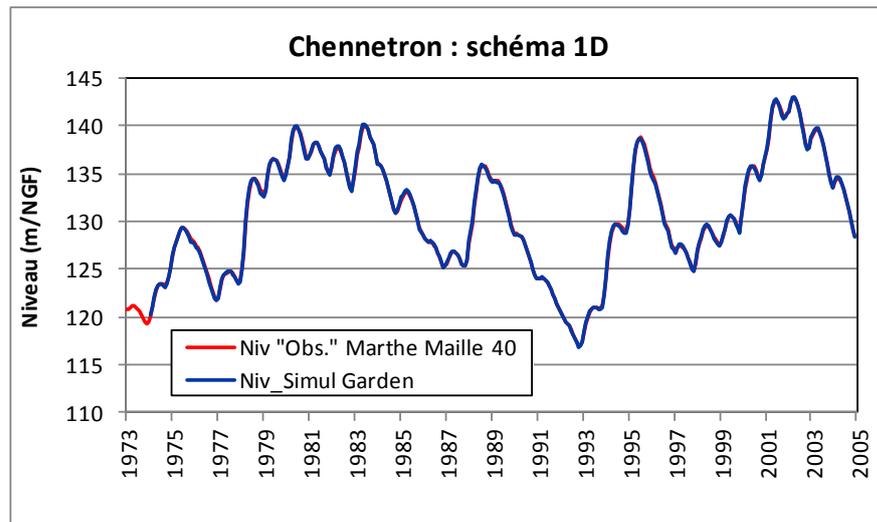


Figure 49 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma 1D, piézomètre sur la limite est (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu).

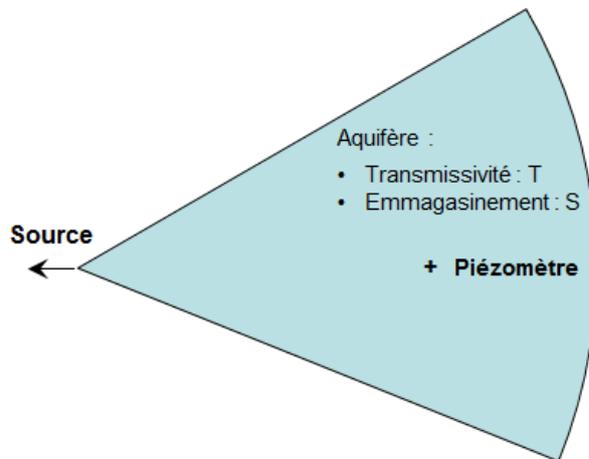


Figure 50 - Schéma physique radial modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs de niveau de nappe avec GARDÉNIA.

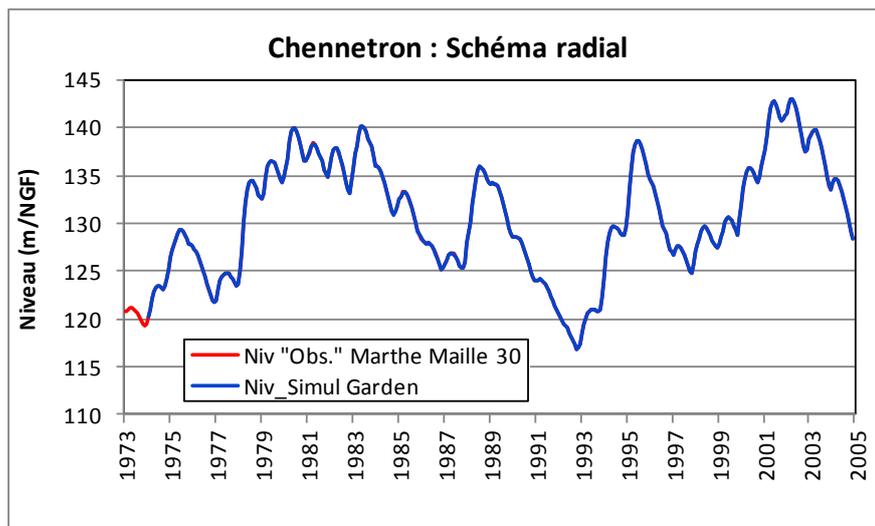


Figure 51 - Piézomètre Saint-Martin-Chennetron : comparaison du niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE, schéma radial, piézomètre à 15 km (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu). Les courbes sont superposées et indiscernables.

## 7. Exemple d'application n° 6 : modélisation simultanée du niveau de nappe à Morvillers et du débit de la Selle à Plachy

Cette application montre comment réaliser une modélisation couplée « pluie – débit » et « pluie – niveau de nappe » avec des débits journaliers et des niveaux piézométriques observés environ une fois par mois.

On dispose des niveaux piézométriques au piézomètre Morvillers, d'indice BSS 00608X0028, situé dans le bassin de la Somme. On dispose également des débits de la Selle à Plachy, un sous-bassin de la Somme qui draine un bassin de 524 km<sup>2</sup> (Figure 52).

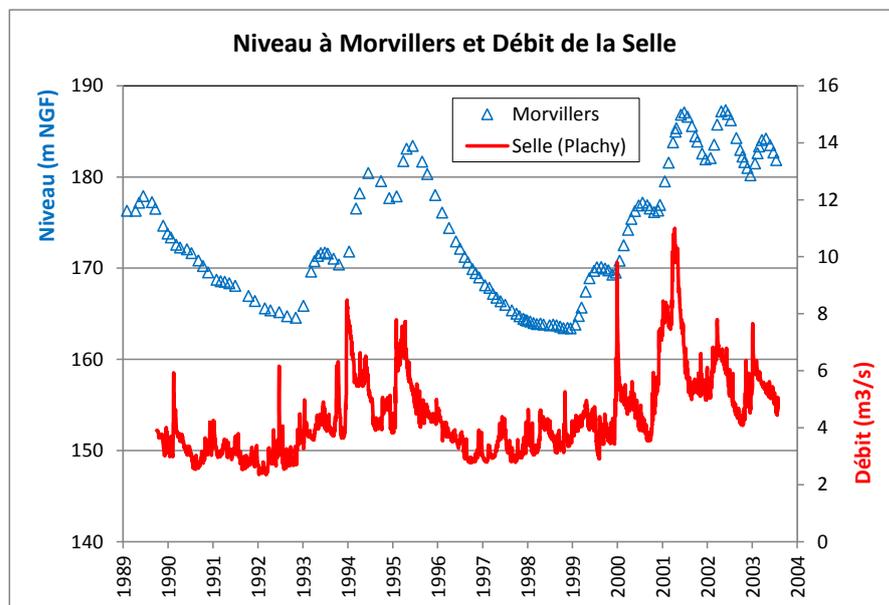


Figure 52 - Piézomètre Morvillers et débit de la Selle à Plachy.

On dispose des données suivantes :

- Pluie journalière mensuelles sur le bassin, d'août 1985 à juillet 2003, en mm/j. C'est une lame d'eau sur le bassin calculé par pondération des stations pluviométriques proches.
- Évapotranspiration potentielle sur le bassin, d'août 1985 à juillet 2003, en mm/j.
- Débit journalier de la Selle à Plachy, d'octobre 1989 à juillet 2003, en m<sup>3</sup>/s.
- Niveaux piézométriques mensuels à Morvillers, observés environ une fois par mois, de septembre 1985 à juillet 2003, en m NGF.

La série des niveaux a un coefficient d'asymétrie de 0,16.

La série des débits a un coefficient d'asymétrie de 1,4, et un fort coefficient d'autocorrélation égal à 0,992 (il faut un espacement de plus de 100 jours entre 2 débits journaliers pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

Pour avoir des données sur la même période 1985-2003, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 », de 1983 à septembre 1989 et à la fin de l'année 2003. Pour la série des niveaux de nappe observés, on a mis des « valeurs absentes », égales à « 9999 », pour tous les jours sauf les 163 jours d'observations.

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluv\_Moy\_9\_Stat\_Selle\_1985\_2003.plu : pour les pluies (mm/j) ;
- Etp\_Moy\_9\_Stat\_Selle\_1985\_2003.etp : pour les ETP (mm/j) ;
- Debit\_Selle\_Plachy\_1985\_2003.deb : pour les débits (m<sup>3</sup>/s) ;
- Niv\_Morvillers\_00608X0028\_1985\_2003.niv : pour les niveaux de nappe (m NGF).

Les données journalières sont au format « Journalier-Annuaire », c'est-à-dire pour chaque année une ligne titre suivie de 31 lignes, une ligne par jour, contenant les valeurs des 12 mois de ce numéro de jour. Les données de ce format ne sont pas en format libre : elles sont formatées. Il est possible de les mettre en forme très facilement avec le logiciel SHALIMAR du BRGM, fourni avec la distribution de GARDENIA. Il est ainsi possible de créer automatiquement les fichiers à partir de diverses sources, en particulier à partir de la « climathèque » de Météo-France. Il aurait été tout-à-fait possible d'utiliser le format « Excel Date » comme précédemment, en utilisant une ligne par jour.

## 7.1. MODÉLISATION COUPLÉE PLUIE – DÉBIT ET PLUIE NIVEAU

### 7.1.1. Définition des paramètres

On procède comme pour les premiers exemples (débit de la Somme ou débit de l'Austreberthe). On crée un nouveau projet, de nom « Q\_Selle\_Niv\_Morvill ». On définit les paramètres par les écrans de saisie.

On accepte tous les paramètres par défaut, avec les exceptions suivantes :

- **5** = Observations de Débits de Rivière : *On donne un poids relatif de 5 aux observations de débits de rivière.*
- **2** = Observations de Niveaux de Nappe : *On donne un poids relatif de 2 aux observations de niveaux de nappe. Le poids sera donc 2,5 fois plus important sur les observations de débits.*
- Pour les pas de temps de Pluie, ETP et Observations de Niveaux :
  - Pas de temps « Journalier » et format « Annuaire ».

#### Options du bassin :

- Nombre d'années = 19
- Nombre d'années de démarrage = 4

- Numéro de la première année = 1985
- Nombre d'itérations de calibration = 250

#### Paramètres physiques :

- Superficie : On laisse la valeur par défaut = 524 km<sup>2</sup>
  - Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = 0 ; Optimisé.
  - Coefficient d'emmagasinement équivalent : Valeur par défaut = 0,01 ; Optimisé.
- Paramètres initiaux déterminés à la suite d'une première phase de calibration :
- Capacité de la réserve superficielle (RuMax) = 0 ; Non Optimisée.
  - Capacité de la réserve superficielle progressive = 180 mm ; Optimisée.
  - Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 600 mm ; Optimisée.
  - Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 5 mois ; Optimisé.
  - Temps de ½ tarissement = 20 mois ; Optimisé.

#### Bornes des paramètres physiques :

- Bornes du temps de ½ montée = 0,15 à 25 mois
- Bornes du temps de ½ tarissement = 6 à 70 mois

### 7.1.2. Résultats obtenus

La calibration automatique, sur la période 1989-2003, se réalise en quelques secondes de calibration. On obtient un coefficient d'ajustement global sur les deux séries de 0,939. On voit apparaître à l'écran successivement la simulation des débits de la Selle, puis la simulation des niveaux du piézomètre Morvillers.

Les coefficients d'ajustement sur les deux séries ont les valeurs suivantes :

- 0,919 sur les débits de la Selle à Plachy ;
- 0,988 sur les niveaux de Morvillers.

La calibration simultanée sur les deux séries (Figure 53) permet de bien simuler les débits et les niveaux avec un seul jeu de paramètres, ce qui donne de la confiance dans la décomposition entre écoulement souterrain et écoulement de surface (Figure 54).

- Les valeurs des paramètres obtenus en fin de simulation (fichier « gardelis.txt » ou fichier « tabl\_param.prn ») sont les suivantes :
  - Coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,0142 (c'est-à-dire 1,4 %) ce qui est réaliste.
  - Niveau de base = 139.46 m NGF.
  - Capacité de la réserve sol progressive = 418 mm.
  - Hauteur d'équi-ruissellement = 363 mm.
  - Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 1,75 mois.
  - Temps de ½ tarissement = 18,1 mois.
- Le fichier « moybilan.prn » indique une pluie efficace moyenne de 258 mm/an, dont 85 % d'« écoulement lent », ce qui est réaliste.

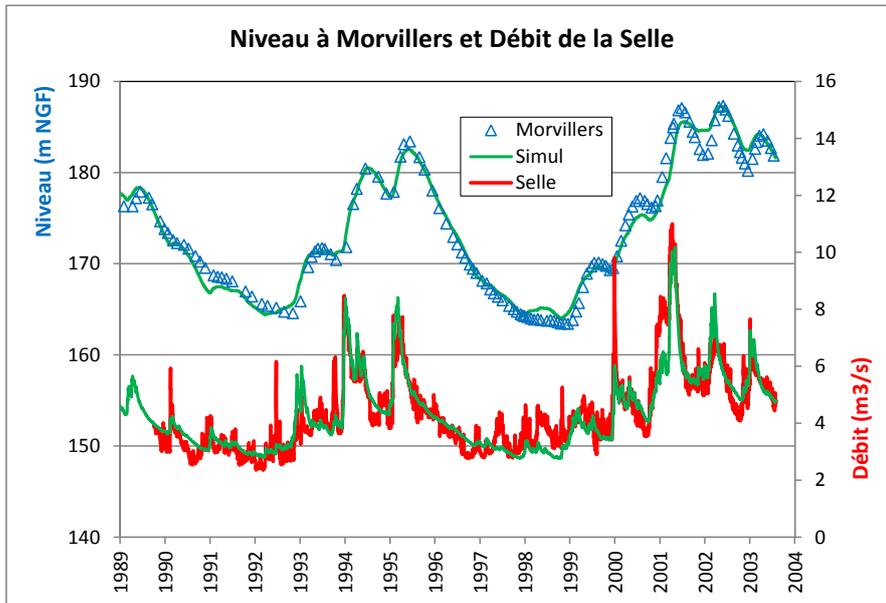


Figure 53 - Simulation simultanée du débit de la Selle à Plachy et du niveau de nappe à Morvillers.

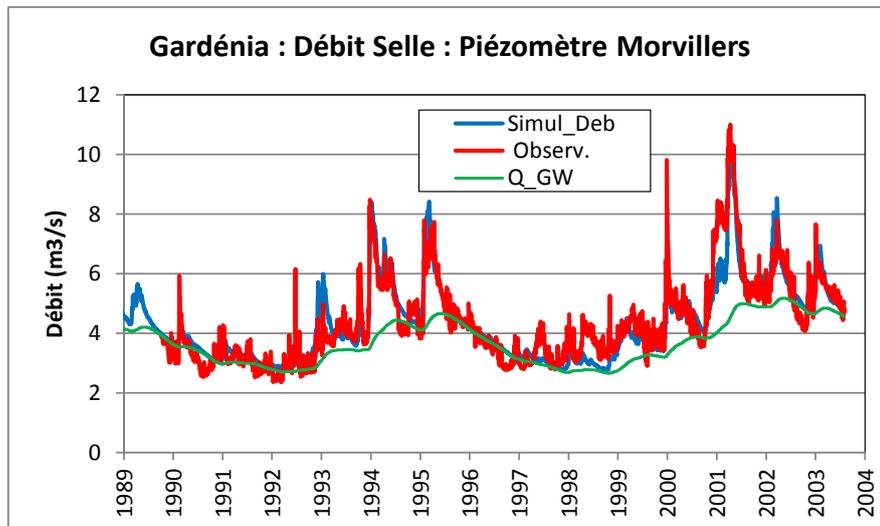


Figure 54 - Décomposition de l'écoulement en écoulement rapide et écoulement lent (calibration simultanée sur le débit de la Selle à Plachy et le niveau de nappe à Morvillers).

## 8. Exemple d'application n° 7 : modélisation avec deux composantes souterraines : niveau de nappe à Sompuis et débit de l'Huitrelle à Lhuitre

Cette application montre l'intérêt de prendre en compte deux composantes d'écoulement souterrain pour simuler des séries de niveaux présentant un seuil de débordement, des fractures ou bien une augmentation de la perméabilité près de la surface.

Le bassin versant de l'Huitrelle à Lhuitre, de code H1503510, d'une superficie de 160 km<sup>2</sup> est situé en Champagne crayeuse, dans le département de la Marne, entre Troyes et Chalons-en-Champagne.

Le piézomètre Sompuis, d'indice BSS : 02255X0003, est situé à environ 10 km du milieu du bassin versant.

L'examen des chroniques de données (Figure 55) montre un effet de seuil très marqué sur les niveaux de nappe à une cote d'environ 145 m NGF.

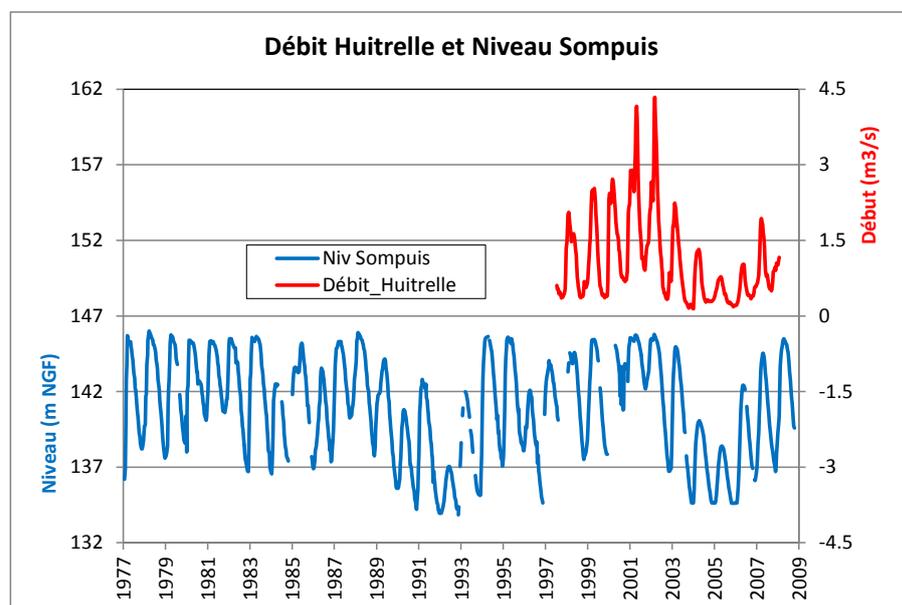


Figure 55 - Piézomètre Sompuis et débit de l'Huitrelle à Lhuitre (données décadales).

On dispose des données suivantes :

- Pluie décadaire sur le bassin, de 1969 à juillet 2008 (en mm/décade).
- Évapotranspiration potentielle (ETP) à Troyes, de 1969 à 2008 (en mm/décade).

- Débit moyen décadaire de l'Huitrelle à Lhuitre, de juillet 1997 à janvier 2008 (en m<sup>3</sup>/s).
- Niveau piézométrique décadaire à Sompuis de 1969 à 2008 (en m NGF). Les données sont disponibles tous les deux mois jusqu'en 1976, puis en continu à partir de 1977.

La série des niveaux mensuels a un coefficient d'asymétrie de -0,27, et un coefficient d'autocorrélation de 0,985 (il faut un espacement de huit décades, soit 2 mois ½ entre deux niveaux décadaires pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

La série des débits décadaires a un coefficient d'asymétrie de 1,3, et un coefficient d'autocorrélation d'une valeur moyenne égale à 0,98 (Il faut un espacement de sept décades entre deux débits pour que leur coefficient de corrélation soit inférieur à 0,50).

Pour avoir des données sur la même période 1969-2008, on a étendu la série des débits observés en mettant des « valeurs absentes », égales à « -2 », de 1969 à juin 1997 et à la fin de l'année 2008. On a aussi complété la série des niveaux de nappe observés en affectant la valeur « 9999 » aux « valeurs absentes ».

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Plu\_Deca\_Huitrelle.prn : pour les pluies (mm/décade) ;
- Etp\_Deca\_Troyes.prn : pour les ETP (mm/décade) ;
- Deb\_Deca\_Huitrelle\_H1503510.prn : pour les débits (m<sup>3</sup>/s) ;
- Niv\_Deca\_Sompuis\_02255X0003.prn : pour les niveaux de nappe (m NGF).

Les données décadaires sont au format « Excel Date ». Comme pour toutes les données au format « Excel Date », il y a une observation par ligne du fichier, donc trois lignes par mois. Les dates, qui ne sont pas prises en compte directement par Gardénia, sont écrites par exemple les jours 5, 15 et 25 de chaque mois.

## 8.1. MODÉLISATION PLUIE - DÉBIT- NIVEAU, SANS EFFET DE SEUIL

On procède comme précédemment en créant un projet de nom « Sompuis\_Huitrelle\_1\_Compos ». On peut récupérer un fichier de paramètres généré précédemment et l'adapter, ce qui peut être plus rapide que d'en générer un nouveau. On fixe les valeurs suivantes :

- **1** = Observations de Débits de Rivière.
- **1** = Observations de Niveaux de Nappe.
- **99** = Pondération pour calage (99 = Racine\_Débit)

### Options du bassin :

- Nombre d'années = 39
- Nombre d'années de démarrage = 7
- Numéro de la première année = 1969
- Nombre d'itérations de calibration = 500
- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = 150 mm/an

**Paramètres Physiques :**

- Superficie du bassin versant = 160 km<sup>2</sup> ; Non optimisée.
  - Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = 0 ; Optimisé.
  - Coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,01 ; Optimisé.
- Paramètres physiques initiaux déterminés à la suite d'une première phase de calibration :
- Capacité de la réserve superficielle progressive = 250 mm ; Optimisée.
  - Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 20 mm ; Optimisée.
  - Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 4 mois ; Optimisé.
  - Temps de ½ tarissement = 2 mois ; Optimisé.
  - Retard (propagation) des débits (en pas de temps) = 0 pas ; Optimisé.

À l'issue de cette modélisation sans effet de seuil, on obtient une simulation *a priori* acceptable avec les coefficients d'ajustement suivants :

- sur les débits de rivière : 0,960 ;
- sur les niveaux de nappe : 0,908 ;
- globalement sur les deux séries : 0,930.

On note en particulier :

- niveau de base = 132,28 m ;
- coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,001385.

La Figure 56 montre cependant que les niveaux simulés dépassent largement (en 1983, 1988, 1994, 2001) le niveau maximal observé qui est de 145 m NGF environ. On va donc réaliser une deuxième simulation en laissant la possibilité d'avoir un seuil de débordement qui devrait correspondre à une valeur proche de cette cote de 145 m.

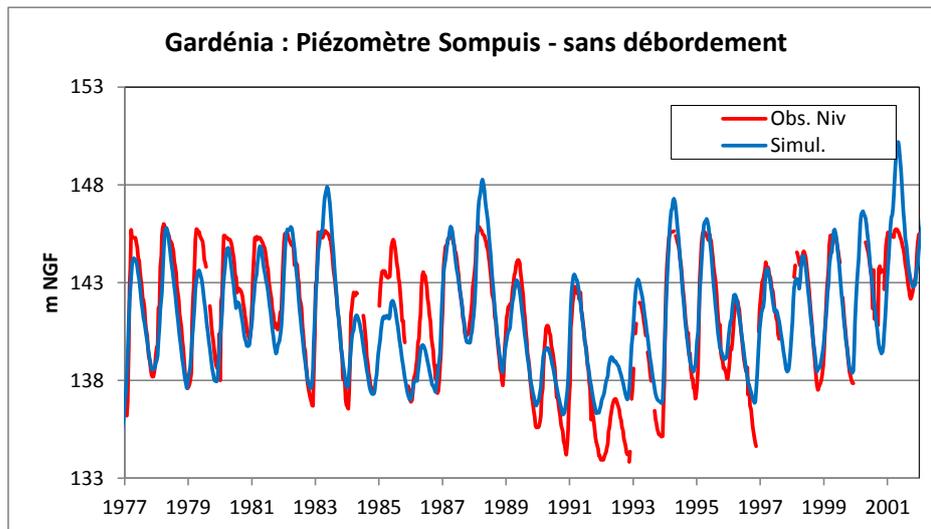


Figure 56 - Simulation du piézomètre Sompuis sans seuil de tarissement rapide.  
Les niveaux simulés dépassent nettement la cote maximale en 1983, 1988, 1994 et 2001.

## 8.2. MODÉLISATION PLUIE - DÉBIT - NIVEAU, AVEC SEUIL DE TARISSEMENT RAPIDE

On reprend exactement la même simulation mais en introduisant un « réservoir souterrain double », c'est-à-dire un réservoir souterrain avec un écoulement « QG2 » situé au fond, et un écoulement supplémentaire « QG1 » quand le niveau dans le réservoir G dépasse une valeur de seuil « SG ».

La valeur du seuil de débordement « SG » du réservoir G, exprimée en mm correspondant à la cote 145 m NGF se calcule très simplement :

$$SG = (145 - \text{Niveau\_Base}) \times \text{Coeff\_Emmagasinement.}$$

$$SG = (145 - 132,28) \times 0,001385 = 17,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 17,6 \text{ mm}$$

Pour prendre en compte un tel réservoir souterrain double, il faut choisir au tout début du contrôle des paramètres :

Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**

Dans les « Paramètres généraux du bassin » on verra apparaître des paramètres supplémentaires et on choisira :

Nombre de Réservoirs Souterrains (1 ou 2 ou 3=Double + seuil) : **3**

On modifie les paramètres Physiques comme suit :

- Temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement souterrain n° 1 = 0,2 mois ; Optimisé.
- Seuil de tarissement souterrain 1 (réservoir double) = 17,6 mm ; Optimisé.
- Temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement souterrain n° 2 = 2 mois ; Optimisé.

On a mis la valeur initiale du « Temps de ½ tarissement » précédente comme « Temps de ½ tarissement souterrain n° 2 ».

On a fixé un seuil de 17,6 mm comme calculé, et on a mis un « Temps de ½ tarissement souterrain n° 1 » très rapide (0,2 mois) pour que le fort écoulement « QG2 » limite fortement les remontées de niveau au-dessus du seuil.

On obtient alors une simulation nettement améliorée des niveaux de nappe. La Figure 57 montre que les niveaux simulés maximaux sont très proches du niveau maximal observé de 145 m NGF, y compris en 1983, 1988, 1994 et 2001.

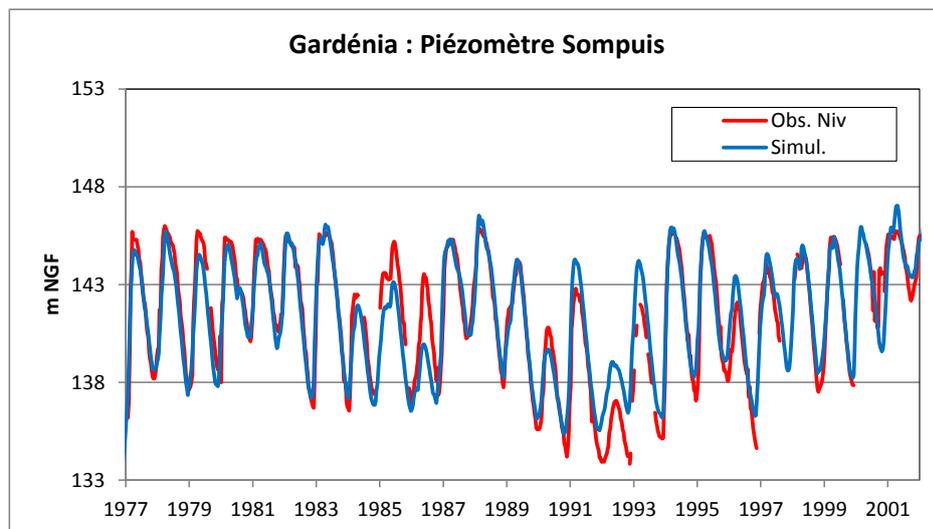


Figure 57 - Simulation du piézomètre Sompuis avec seuil de tarissement.  
Les niveaux maximaux sont bien simulés en 1983, 1988, 1994 et 2001.

À l'issue de cette modélisation avec seuil de tarissement rapide, on obtient les coefficients d'ajustement suivants :

- sur les débits de rivière : 0,960 (inchangé) ;
- sur les niveaux de nappe : 0,935 au lieu de 0,908 (nettement amélioré).

On note en particulier un seuil de tarissement rapide correspondant à la cote 144,01 m NGF.

La Figure 58 montre que les niveaux et les débits sont bien simulés par cette modélisation double avec seuil de tarissement rapide.

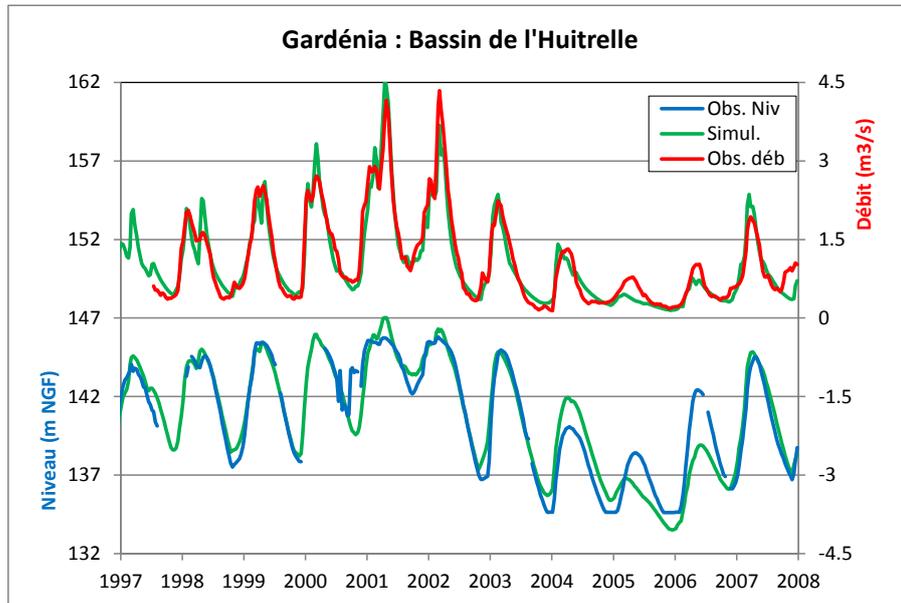


Figure 58 - Simulation des niveaux au piézomètre Sompuis et des débit de l'Huitrelle à Lhuitre avec un seuil de tarissement rapide.

## 9. Exemple d'application n° 8 : modélisation d'une crue éclair à pas de temps fin (1/2 heure) dans l'île de la Réunion

Cette application montre la possibilité de modéliser des écoulements avec des pas de temps fins. Ceci est particulièrement intéressant pour modéliser des crues sur de petits bassins versants.

Le bassin correspondant à cet exemple est celui de la ravine de la « Patate à Durand » dont la superficie est d'un peu plus de 10 km<sup>2</sup>. L'altitude moyenne du bassin est de 977 m, échelonnée entre 40 m d'altitude à l'exutoire et environ 1240 m d'altitude à l'amont, avec une pente moyenne de l'ordre de 11 %. Compte tenu de ces variations d'altitude, il est difficile de calculer une lame d'eau précise.

Cet exemple d'application présente la modélisation de la crue résultant du cyclone du 17-19 février 2006. Sur cette période on dispose des données au pas de 30 mn de :

- pluie estimée sur le bassin, en mm/30 mn ;
- débit horaire à l'exutoire, en m<sup>3</sup>/s.

On ne dispose pas de valeur d'ETP, mais on a choisi une valeur constante de 0,1 mm/30 mn, soit 4,8 mm/jour

Chaque série (Pluie, ETP et Débits) couvre la période du 16 au 19 février 2006, soit 4 jours, par pas de temps de ½ heure. Il y a donc 192 pas de temps. Les données sont sous la forme suivante :

- une ligne par pas de temps ;
- chaque ligne contient la date sous la forme « jj/mm/aaaa hh:mm » et la mesure.

Les trois fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Plu\_Patate\_30mn\_Fev\_2006.prn : pour les pluies (mm/h) ;
- ETP\_Patate\_30mn\_Fev\_2006.prn : pour les ETP (mm/h) ;
- Deb\_Patate\_30mn\_Fev\_2006.prn : pour les débits (m<sup>3</sup>/s).

### 9.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES

On choisit les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(on choisit « utilisation avancée » puisqu'on va utiliser deux réservoirs souterrains).
- Durée des pas de temps : « **Autre** ».
- Format des pas de temps : « **Excel Date** » (Figure 59)
- Durée des pas de temps « Autre » = **30 mn** (Figure 60)

**Options du bassin :**

- Nombre d'années = **0**  
(0 ⇔ Toutes les données du fichier des pluies. En fait, avec le pas de temps « Autre », il ne s'agit pas d'« années », mais de périodes de 12 pas de temps. Comme il y a 192 pas de temps, on aurait pu indiquer qu'il y avait 16 « années » car  $16 \times 12 = 192$  valeurs).
- Nombre d'années de démarrage = **0**
- Numéro de la première année = **2006**
- État initial : (-1 = Réserves vides ; -2 = Rumax vide aussi) = **-2**  
(c'est-à-dire toutes les réserves vides, y compris l'état de la réserve du sol « Rumax »)
- Nombre d'itérations de calibration = **450**
- Nombre de réservoirs souterrains = **2**
- Numéro du jour initial si durée non standard = **16** (début le 16 fév)
- Numéro du mois initial si durée non standard = **2** (février)

**Paramètres Physiques :**

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = **0.001** mm/an  
(Il ne faut pas mettre « 0 » qui signifie « pluie efficace moyenne »)
- Superficie du bassin versant = **10** km<sup>2</sup> ; Non optimisée.
- Capacité de la réserve superficielle progressive = **200** mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = **50** mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = **5** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement souterrain n°1 = **10** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ transfert Souterrain 1-->Souterrain 2 = **6** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement souterrain n°2 = **25** pas ; Non optimisé.
- Retard (propagation) des débits (en pas de temps) = **0** pas ; Optimisé.
- Facteur d'échange externe = **0** % ; Optimisé.

**Bornes des paramètres physiques :**

- Temps de ½ montée : 0.5 à 6 pas de temps (de 30 mn).
- Facteur d'échange externe : -85 % à +60 %.

Il convient de bien noter qu'avec le pas de temps « Autre », les temps de montée, de tarissement, etc., sont donnés en «nombre de pas de temps », ici de durée 30 mn, et non pas en mois comme pour les pas de temps classiques (jour, décade ou mois).

On remarquera que les composantes d'écoulement avec des « coefficients de tarissement » de 10 à 20 pas de temps de ½ heure ne sont pas à proprement des « écoulements souterrains », mais plutôt des écoulements retardés.

Un message indique que « la période de démarrage est courte », ce qui est logique, car comme on démarre dans un état complément sec, on n'a pas pris de période de démarrage.

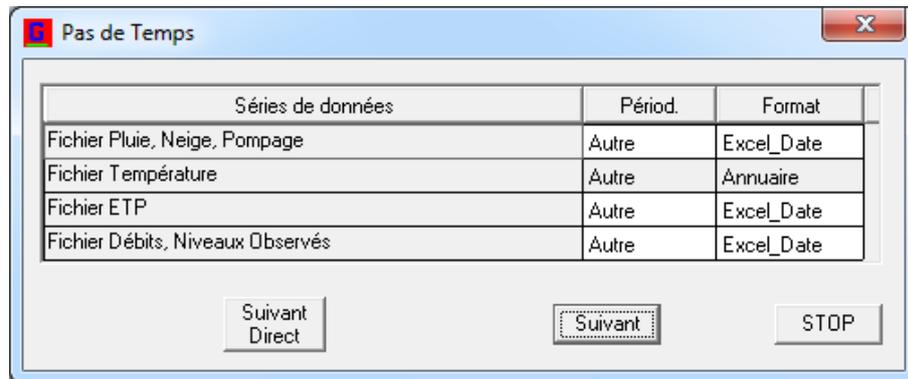


Figure 59 - Définition de pas de temps « Autre », c'est-à-dire ni journalier, ni décadaire, ni mensuel.

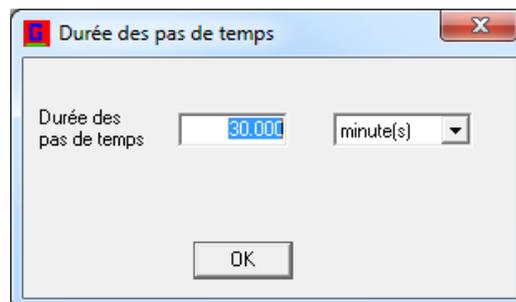


Figure 60 - Définition de la durée d'un pas de temps « Autre ».

## 9.2. RÉSULTATS OBTENUS

On obtient très rapidement un bon ajustement : coefficient d'ajustement de 0,97, comme le montre la Figure 61. Compte tenu des incertitudes sur la lame d'eau effective sur ce très petit bassin, il serait difficile d'espérer une simulation parfaite de la pointe de crue.

On note que le débit maximal est de l'ordre de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  ce qui est considérable pour un petit bassin d'environ  $10 \text{ km}^2$ . Cette crue éclair ne pourrait pas être modélisée correctement avec pas de temps classique de 1 jour par exemple.

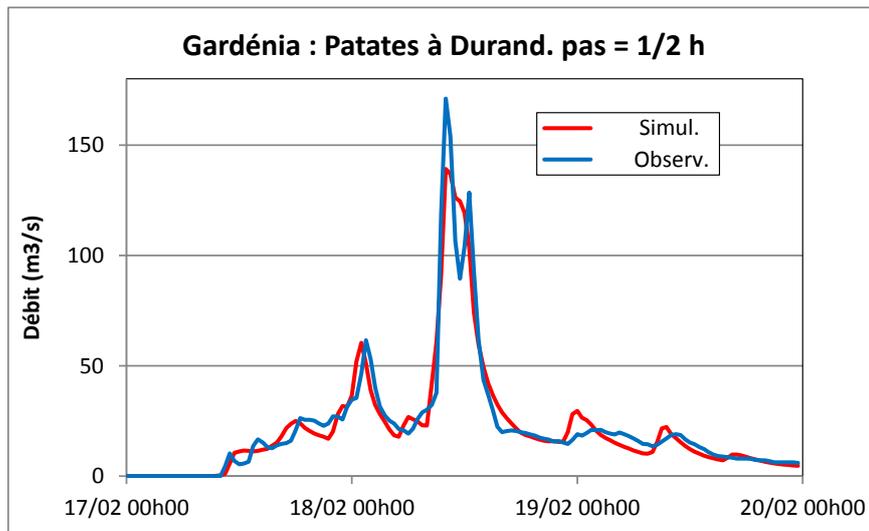


Figure 61 - Simulation du débit du bassin de « Patate à Durand » : cyclone de février 2006.

## **10. Exemple d'application n° 9 : modélisation à pas de temps horaire d'un ensemble de crues provoquées par des cyclones. Rivière du Mât (île de la Réunion)**

Cette application montre la possibilité de modéliser un ensemble d'évènements isolés avec des pas de temps fins. Ceci est particulièrement intéressant pour modéliser des crues multiples sur de petits bassins versants.

Le bassin correspondant à cet exemple est celui de la rivière du Mât dont la superficie est estimée à 90 km<sup>2</sup> environ.

On dispose des données relatives à six cyclones relatifs aux périodes suivantes :

- Crue « Conie » : 27/01/2000 au 02/02/2000 ;
- Crue « Ando » : 05/01/2001 au 09/01/2001 ;
- Crue « Plage C » : 05/01/2002 au 08/01/2002 ;
- Crue « Dina » : 21/01/2002 au 25/01/2002 ;
- Crue « Plage D » : 04/11/2002 au 05/11/2002 ;
- Crue « Plage E » : 01/04/2003 au 09/04/2003.

Au total, ces périodes mises bout à bout correspondent à une période totale de 768 heures (soit 32 jours).

Pour ces périodes, on dispose des :

- pluies horaires sur le bassin (en mm/h) ;
- débits horaires à la station (en m<sup>3</sup>/s).

On ne dispose pas de valeur d'ETP, mais on a choisi une valeur constante de 0,2 mm/h, soit 4,8 mm/jour

Pour modéliser ces crues avec un jeu de paramètre unique, on a rassemblé les données horaires en une série continue de 768 heures. Pour chaque série (Pluie, ETP et Débits), les données sont sous la forme suivante :

- une ligne par mesure ;
- chaque ligne contenant deux champs : la date sous la forme « jj/mm/aaaa hh:mm » et la mesure.

Les trois fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluies\_Mats\_Hor\_Tous.prn : pour les pluies (mm/h) ;
- ETP\_Mats\_Hor\_Tous\_Separ.prn : pour les ETP (mm/h) ;

- Debits\_Mats\_Hor\_Tous\_Separ.prn : pour les débits (m<sup>3</sup>/s).

## 10.1. PRÉPARATION DES DONNÉES ET DÉFINITION DES PARAMÈTRES

On choisit les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(On choisit « utilisation avancée » puisqu'on va utiliser deux réservoirs souterrains)
- Durée des pas de temps : « **Autre** ».
- Format des pas de temps : « **Excel Date** »
- Durée des pas de temps « Autre » = **1 heure**

### Options du bassin :

- Nombre d'années = **0**  
(0 ⇔ Toutes les données du fichier des pluies. En fait avec le pas de temps « Autre » il ne s'agit pas d'« années », mais de périodes de 12 pas de temps. Comme il y a 768 pas de temps, on aurait pu indiquer qu'il y avait 64 « années » car 64 x 12 = 768 valeurs).
- Nombre d'années de démarrage = **0**  
(En fait avec le pas de temps « Autre » il ne s'agit pas d'« années » de démarrage, mais de périodes de 12 pas de temps).
- Numéro de la première année = **1**  
(On ne donne pas de numéro d'année car il s'agit de crues isolées, à des dates d'années différentes)
- État initial : (-1 = Réserves vides ; -2 = Rumax vide aussi) = **-2**  
(C'est-à-dire départ toutes réserves vides, y compris la réserve sol Rumax)
- Nombre d'itérations de calibration = **450**
- Nombre de réservoirs Souterrains = **2**
- Numéro du jour initial si durée « non standard » = **0** (pas de vraie date)
- Numéro du mois initial si durée « non standard » = **0** (pas de vraie date)

### Paramètres Physiques :

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = **0,001** mm/an  
(Il ne faut pas mettre « 0 » qui signifie « pluie efficace moyenne »)
- Superficie du bassin versant = **90** km<sup>2</sup> ; Non optimisée.
- Capacité de la réserve superficielle progressive = **35** mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = **100** mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = **1** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement souterrain n°1 = **4** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ transfert Souterrain 1-->Souterrain 2 = **8** pas ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement souterrain n°2 = **25** pas ; Optimisé.
- Retard (propagation) des débits (en pas de temps) = **0** pas ; Optimisé.
- Facteur d'échange externe = **0** % ; Optimisé.

### Bornes des paramètres physiques :

- Temps de ½ montée : 0,5 à 6 pas de temps (de 1 heure).
- Facteur d'échange externe : -85 % à +60 %.

Il convient de bien noter qu'avec le pas de temps « Autre », les temps de montée, de tarissement, etc. sont donnés en « nombre de pas de temps », ici de une heure, et non pas en mois comme pour les pas de temps classiques (jour, décade ou mois).

On remarquera que les composantes d'écoulement, avec des « coefficients de tarissement » de 10 à 20 pas de temps de une heure, ne sont pas à proprement des « écoulements souterrains », mais plutôt des écoulements retardés.

Un message indique que « la période de démarrage est courte », ce qui est logique, car comme on démarre dans un état complètement sec on n'a pas défini de période de démarrage.

## 10.2. RÉSULTATS OBTENUS

On obtient un très bon ajustement des crues résultant des six cyclones (Figure 62). On note que le débit maximal est de l'ordre de 1 000 m<sup>3</sup>/s ce qui est considérable pour un petit bassin d'environ 90 km<sup>2</sup>. Ces crues violentes ne pourraient pas être modélisées correctement avec pas de temps classique de un jour par exemple.

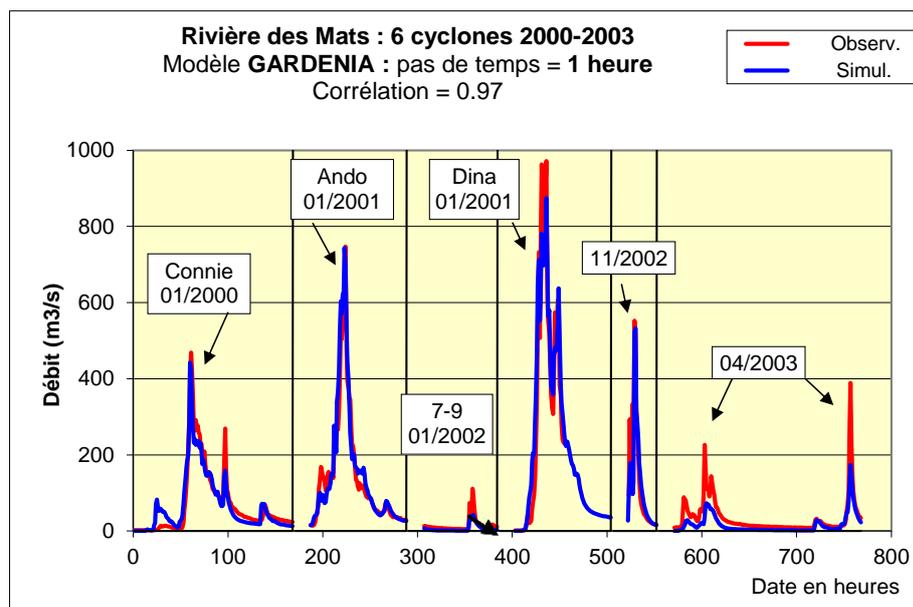


Figure 62 - Simulation de six crues isolées de la rivière du Mât (île de la Réunion), résultant de cyclones de 2000 à 2003.



## **11. Exemple d'application n° 10 : modélisation d'un écoulement à travers la zone non saturée. Validation du code de calcul Gardénia**

Cette application montre la possibilité de simuler des écoulements à travers la zone non saturée. Elle permet également de valider le schéma de bilan de Gardénia pour simuler l'évaporation dans le sol à partir des pluies et des ETP.

Les données de cet exemple proviennent du site expérimental de « La côte Saint-André » en Isère ; elles nous ont été fournies gracieusement par le LTHE de Grenoble, et en particulier par Béatrice Normand que nous remercions.

Les données concernent deux parcelles de sol : une parcelle de sol nu et une parcelle cultivée par du maïs. Le bilan hydrique a été suivi pendant les années 1991 à 1993. Pendant la période de culture, les variations de teneur en eau et de succion, en conditions naturelles, ont été suivies sur une épaisseur de 80 cm, et le débit de drainage a été mesuré à la profondeur de 80 cm.

L'évapotranspiration réelle a alors été déterminée par bilan, connaissant le débit de percolation et la variation de stock total dans la tranche de 80 cm.

Pour chaque année, on dispose de mesures pendant 30 à 60 jours. Ces données concernent :

- les teneurs en eau à huit profondeurs ;
- les succions à cinq profondeurs ;
- le débit de drainage ;
- l'évapotranspiration réelle calculée.

Pour obtenir une série continue de débits sur toute la période 1991-1993, on a modélisé le site de manière physique avec le code de calcul MARTHE du BRGM. Cette modélisation a permis d'obtenir une très bonne simulation des teneurs en eau, des succions, des évapotranspirations et du drainage. On a utilisé la série du drainage calculé par le code de calcul MARTHE pour calibrer les paramètres du modèle GARDÉNIA en simulation Pluie – Débit de drainage.

On dispose sur la période 1991-1993 des données journalières continues de :

- ETP journalière (mm/j) : fichier = ETP\_St\_Andre\_1991\_1993.etp  
*Pour le sol nu (« bare soil » :*
- Précipitations (+ irrigations) (mm/j) : fichier = Plu\_Irr\_Bare\_1991\_1993.plu
- Drainage calculé par le code de calcul MARTHE (mm/j) :  
fichier = Draina\_Simul\_St\_Andre\_Bare\_1991\_1993.deb  
*Pour la parcelle de maïs (« corn plot » :*

- Précipitations (+ irrigations) (mm/j) : fichier = Plu\_Irr\_Crop\_1991\_1993.plu
- Drainage calculé par le code de calcul MARTHE (mm/j) :  
fichier = Draina\_Simul\_St\_Andre\_Corn\_1991\_1993.deb

## 11.1. PRÉPARATION DES DONNÉES ET DÉFINITION DES PARAMÈTRES.

On choisit les paramètres suivants :

- Pas de temps de toutes les données = Journalier – Annuaire

### Options du bassin :

- Nombre d'années = 3
- Nombre d'années de démarrage = -1  
(Un nombre de démarrage négatif indique des années moyennes rajoutées. Ici -1 indique « 1 année moyenne ». -3 aurait indiqué « 3 années moyennes »).
- Numéro de la première année = 1991
- Nombre d'itérations de calibration = 140

### Paramètres Physiques :

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = 0.  
(La valeur code « 0 » signifie « pluie efficace moyenne de la période hors démarrage »)
- Superficie du bassin versant = 86,4 km<sup>2</sup> ; Non optimisée.  
On fixe 86,4 km<sup>2</sup>. En effet les débits de drainage sont en mm/j. Or 86,4 km<sup>2</sup> x 1 mm/j = 86,4 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup> x 10<sup>-3</sup> / 86400 = 1 m<sup>3</sup>/s.
- Capacité de la réserve superficielle (Rumax) = 10 mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = 50 mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,1 pas ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = 0,5 pas ; Optimisé.

### Bornes des paramètres physiques :

- Temps de ½ montée : 0,02 à 1 mois.
- Temps de ½ tarissement : 0,1 à 15 mois.

### 11.1.1. Résultats obtenus sur la parcelle de sol nu

La calibration automatique, sur la période 1991-1993, permet d'obtenir une simulation excellente (Figure 63 et Figure 64) : le coefficient d'ajustement est égal à 0,95. Le biais de simulation est égal à -0,015 mm/j soit un peu moins de 1 % du débit moyen.

Les paramètres physiques obtenus sont les suivants :

- Capacité de la réserve sol (RuMax) = 11 mm.  
(faible valeur ce qui est logique car le sol est nu)
- Hauteur d'équi-ruissellement = 32 mm.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,25 mois.  
(traversée rapide de la ZNS)

- Temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement = 0,10 mois  
(Pas de retard de tarissement, car on mesure directement le débit de drainage)

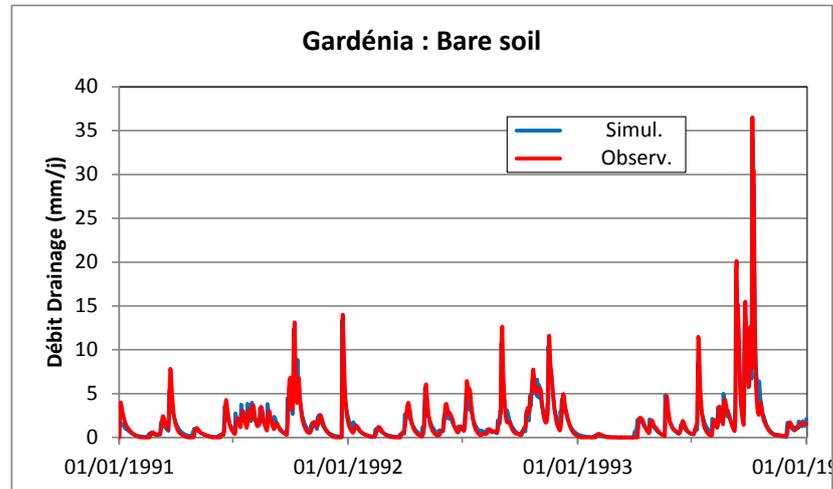


Figure 63 - Site de Saint-André, sol nu : débit de drainage observé et simulé par GARDÉNIA de 1991 à 1993.

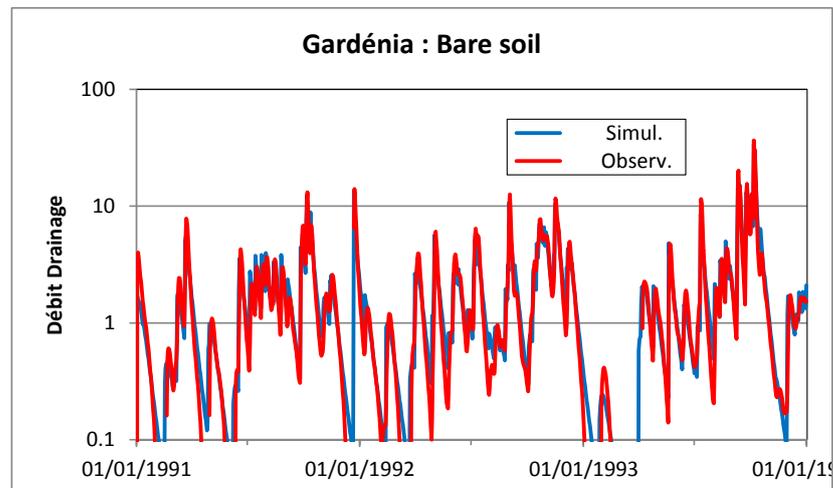


Figure 64 - Site de Saint-André, sol nu : débit de drainage observé et simulé par GARDÉNIA de 1991 à 1993 (échelle logarithmique).

La Figure 65 montre la comparaison des cumuls de l'évaporation + transpiration réelle et du drainage simulés par GARDÉNIA et observés par le LTHE en 1991, 1992 et 1993.

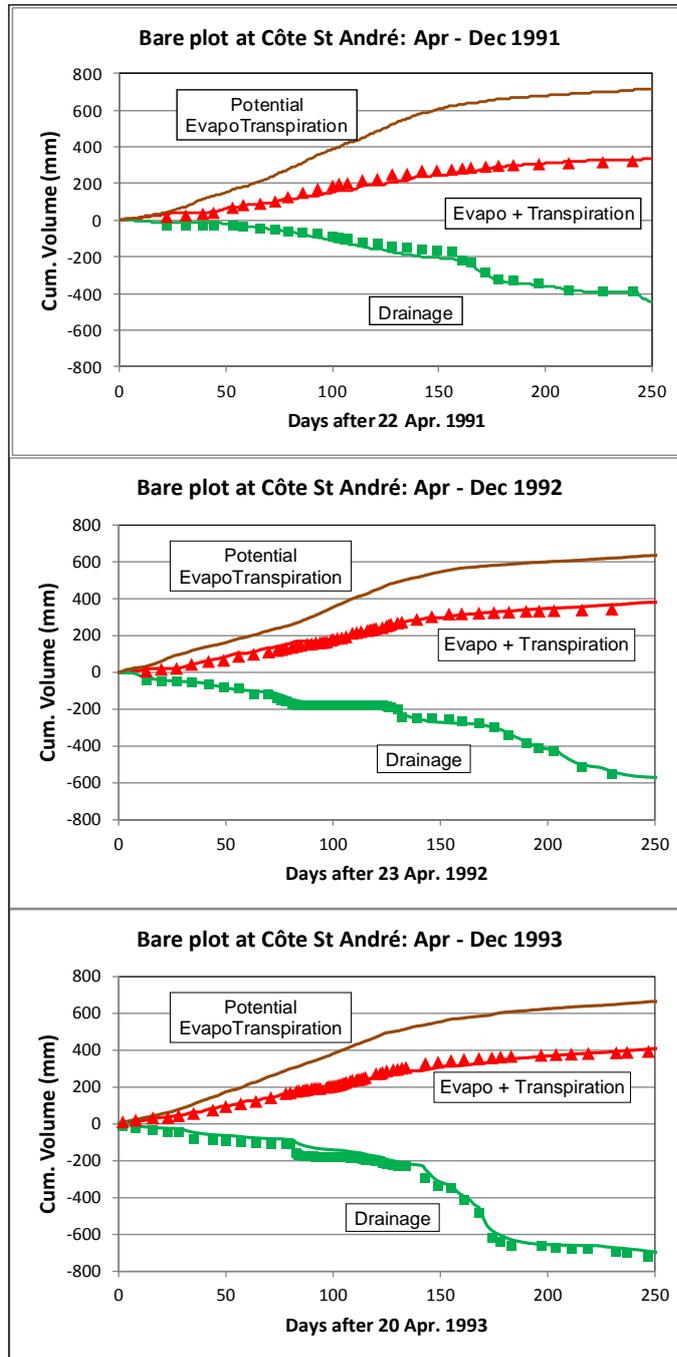


Figure 65 - Site de Saint-André, sol nu : cumuls des évaporation + transpiration réelle et du drainage. Comparaison des observations du LTHE (symboles) et des simulations par GARDÉNIA (traits).

### 11.1.2. Résultats obtenus sur la parcelle de maïs

La première simulation n'était pas satisfaisante car elle présentait un « biais » de simulation égal à 0,20 mm/j, soit 14 % du débit moyen. Pour diminuer ce biais, on a refait la simulation en donnant un poids de 15 % sur la minimisation du biais moyen de simulation. On obtient alors une simulation avec un coefficient d'ajustement légèrement diminué (0,919 au lieu de 0,926) mais avec un biais de simulation égal à 0.

Les paramètres physiques obtenus sont les suivants :

- Capacité de la réserve sol (RuMax) = 25 mm.  
(Capacité un peu augmentée à cause des racines des cultures).
- Hauteur d'équi-ruissellement = 49 mm.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,2 mois.  
(Traversée rapide de la ZNS)
- Temps de ½ tarissement = 0,07 mois  
(Pas de retard de tarissement, car on mesure directement le débit de drainage).

La simulation, Figure 66 et Figure 67, est un peu moins bonne que celle du sol nu, mais elle est tout-à-fait satisfaisante.

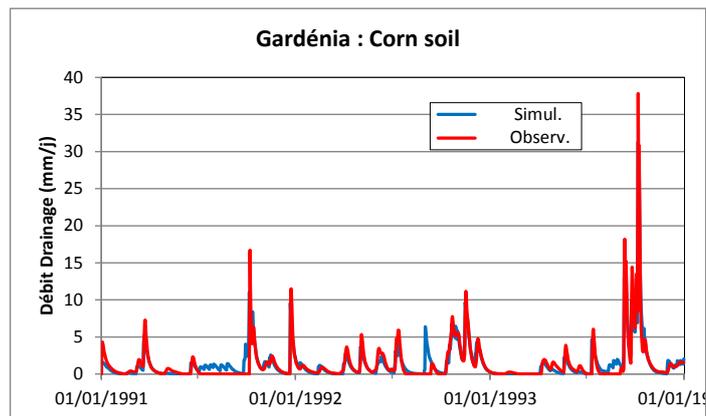


Figure 66 - Site de Saint-André, parcelle de maïs : débit de drainage observé par le LTHE et simulé par GARDÉNIA, de 1991 à 1993.

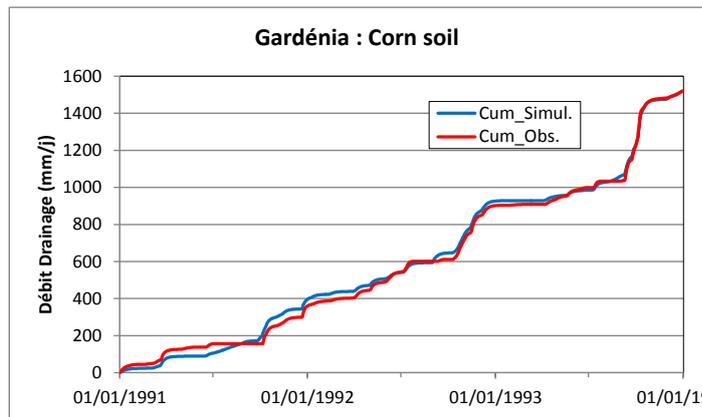


Figure 67 - Site de Saint-André, parcelle de maïs : cumul de 1991 à 1993 du débit de drainage observé par le LTHE et simulé par GARDÉNIA.

La Figure 68 compare les évapotranspirations de 1993 simulées et observées pour la parcelle de sol nu et la parcelle de maïs. Le modèle GARDÉNIA permet de simuler correctement l'augmentation d'évapotranspiration du sol cultivé.

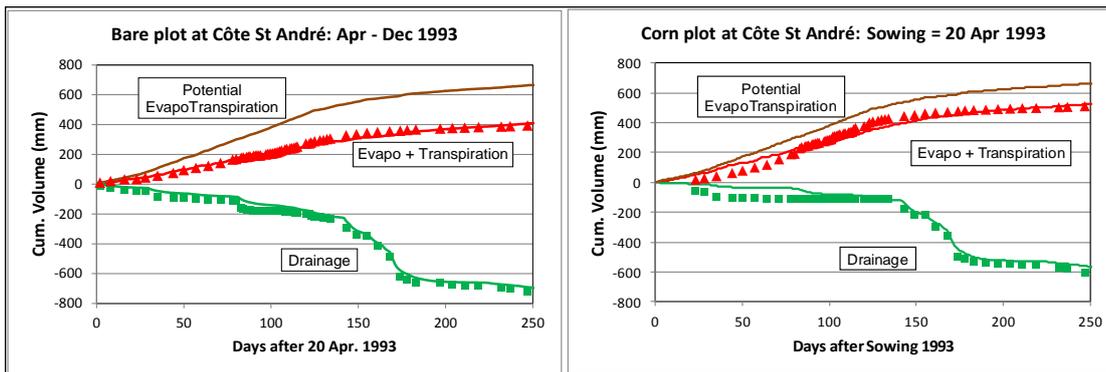


Figure 68 - Site de Saint-André, année 1993 : cumuls des évapo + transpiration réelle et du drainage. À gauche : sol nu ; à droite parcelle de maïs. Symboles = Observations du LTHE ; Traits = simulations par GARDÉNIA. On note l'évapotranspiration plus importante pour la parcelle de maïs.

### 11.1.3. Conclusion des simulations des parcelles de Saint-André

Cet exemple d'application a montré comment simuler avec le code de calcul GARDÉNIA des écoulements à travers la zone non saturée. Il a également permis de valider le schéma de bilan de GARDÉNIA pour simuler l'évaporation dans le sol à partir des pluies et des ETP.

## 12. Exemple d'application n° 11 : modélisation pluie-niveau d'un piézomètre influencé par un pompage

Cette application montre la possibilité de modéliser un niveau piézométrique influencé par un ensemble de pompages dont on connaît l'historique des débits. Elle est utilisée également pour la validation du schéma GARDÉNIA de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe par comparaison avec un code de calcul hydrodynamique discrétisé.

Les données de base de cet exemple, relatives à un piézomètre situé près de la ville de Perpignan, ont été rassemblées et étudiées par Dagneaux (2010) et nous ont été mises à disposition par B. Ladouche et Y. Caballero du BRGM que nous remercions.

Les données disponibles pour cet exemple sont les suivantes :

- Pluies journalières : août 1970 à juillet 2006 (36 ans) ;
- ETP journalière : août 1970 à juillet 2006 (36 ans) ;
- Niveau piézométrique journalier, avec quelques lacunes : février 1974 à novembre 2011 (38 ans). Les lacunes représentent environ 13 % de la période ;
- Somme des débits de pompage du secteur, au pas de temps mensuel : 1998 à 2007 (10 ans) en m<sup>3</sup>.

Compte tenu de ces données, la période commune d'observations s'étend de janvier 1998 à juillet 2006.

Étant donné que les données de pompage doivent être au même pas de temps que celui de la pluie, on a transformé la série mensuelle de pompages en une série journalière. On a donc affecté à chaque jour le volume mensuel prélevé, divisé par le nombre de jours du mois.

Dans un but de simplification, et pour faciliter des traitements ultérieurs, on a conservé pour toutes les données la période du 01/08/1970 au 31/07/2006, soit 36 années hydrologiques. On a donc étendu la série des niveaux piézométriques de fin 1970 à début 1974 en lui affectant des « valeurs absentes » égales à 9999. Cette opération s'effectue simplement avec le logiciel SHALIMAR. On a étendu la série des pompages en lui affectant, sur la période d'août 1970 à décembre 1997, la valeur moyenne du pompage qui est égale à 50 003 m<sup>3</sup>/jour. On aurait pu tout aussi bien choisir comme période de simulation la période d'août 1994 à juillet 2006, soit 12 années dont 4 années de démarrage. Les calculs auraient été trois fois plus rapides, mais ce n'est pas critique car de toute façon ils ne durent que quelques secondes.

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluie\_Perpignan\_1970\_2006.prn : pour les pluies (mm/j) ;
- ETP\_Perpignan\_1970\_2006.prn : pour les ETP (mm/j) ;

- Pomp\_Jour\_Perpignan\_1970\_2007.prn : pour les pompages (m<sup>3</sup>/j) ;
- Niveaux\_Brut\_Perpignan\_1970\_2006.prn : pour les niveaux nappe (m NGF).

On réalise la simulation en spécifiant que les données sont exprimées en années hydrologiques, avec 29 années (hydrologiques) pour la période de démarrage.

## 12.1. MODÉLISATION PLUIE-POMPAGE-NIVEAU.

On crée un nouveau projet, de nom « Perpignan\_Pomp ».

### 12.1.1. Valeurs initiales des paramètres

On choisit les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(On choisit une « utilisation avancée » puisqu'on va prendre en compte des pompages, et aussi parce qu'on utilise des « années hydrologiques »).

#### Options générales :

- **0** = Observations de Débits de Rivière.
- **1** = Observations de Niveaux de Nappe.
- **1** = Pompage influençant Niveau Nappe (0 = Non ; 1 = Oui)  
(Puisqu'on prend en compte l'influence de pompages).
- **1** = Données par années hydrologiques [début 1 août] (1 = années Hydrologiques)

#### Pas de temps (pour les quatre séries : Pluie, Pompages, ETP, Niveaux observés) :

- Durée des pas de temps : **Journalier**
- Format des pas de temps : « **Excel Date** »

#### Options du bassin :

- Nombre d'années (hydrologiques) = **36**
- Nombre d'années de démarrage = **29**
- Numéro de la première année = **1970**
- Nombre d'itérations de calibration = **450**

#### Paramètres Physiques :

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = **300** mm/an
- Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = **0** ; **Optimisé.**
- Coefficient d'emmagasinement équivalent = **0,01** ; **Optimisé.**
- Correction globale de l'ETP = **0** % ; Optimisée
- Capacité de la réserve superficielle progressive = **100** mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = **9999** mm ; Non optimisée.  
(La valeur 9999 est un code indiquant aucun ruissellement).
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = **1** mois ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = **6** mois ; Optimisé.

**Bornes des paramètres physiques :**

- Correction globale de l'ETP : -20 % à +20 %

**Paramètres de Pompage :**

- Coefficient d'influence du pompage => Niveau Nappe = 1. ; **Optimisé**  
(On laisse la valeur par défaut 1 et on l'optimise).
- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe = **0,2** mois ; **Optimisé.**
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe = **1** mois ; **Optimisé.**

**Bornes des paramètres de Pompage :**

- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe : 0,015 à 10 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe : 0,2 à 15 mois

**12.1.2. Résultats obtenus**

La calibration automatique, qui s'effectue en quelques secondes, permet d'obtenir une simulation excellente : le coefficient d'ajustement est égal à 0,961 (Figure 69).

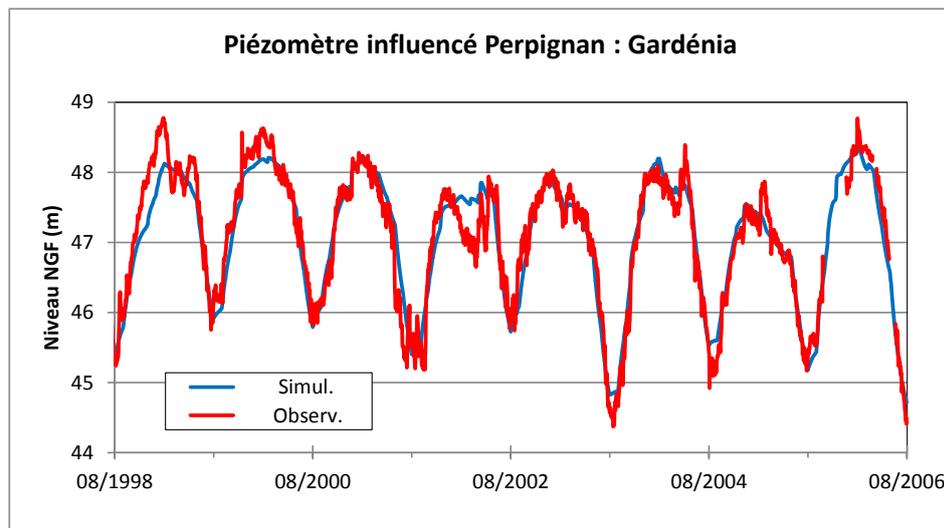


Figure 69 - Piézomètre Perpignan influencé par des pompages : niveaux journaliers observés et simulés.

Le Tableau 1, extrait du fichier « gardelis.txt », montre l'importance relative de la recharge (pluie et ETP) et du pompage sur l'évolution des niveaux.

	Coefficient de corrélation	Coefficient de corrélation partielle
Recharge	0,09	0,70
Pompage	-0,92	-0,96

Tableau 1 - Piézomètre Perpignan : coefficients de corrélation avec chaque influence.

L'influence du pompage est largement majoritaire. La recharge semble n'avoir que peu d'importance, cependant le coefficient partiel de 0,70 indique que : après avoir pris en compte les effets du pompage, la recharge explique une partie très significative du résidu. Le coefficient de corrélation entre les variations de niveaux et l'effet du pompage sont négatifs puisqu'on a introduit des valeurs positives de pompage. Si on avait mis des valeurs négatives de pompage, on aurait obtenu des coefficients positifs.

Les paramètres physiques obtenus après calibration sont les suivants :

- Coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,383
- Niveau de base = 51,84 m NGF
- Correction globale de l'ETP = +19,9 %
- Capacité de la réserve sol progressive = 12 mm
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,03 mois
- Temps de ½ tarissement = 8,1 mois.

Influence des pompages sur les Niveaux Nappe :

- Coefficient d'influence du pompage =  $-1,118 \cdot 10^{-4}$  [-]
- Temps de ½ montée du pompage = 0,015 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage = 0,86 mois

Les paramètres décrivant l'influence du pompage s'interprètent comme suit :

- Le temps de réaction à une augmentation de pompage est très court (temps de ½ montée = 0,015 mois)
- Le temps de stabilisation, c'est-à-dire le temps pour obtenir une quasi-stabilisation, est relativement court. Le temps de ½ stabilisation est égal à 0,86 mois (26,2 jours).
- La réponse du niveau de nappe à un échelon unitaire de pompage de  $1 \text{ m}^3/\text{jour}$  est égale à  $-1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ . Si le débit de pompage augmente d'une valeur constante de  $10\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$  ( $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{mois}$ ), le niveau piézométrique une fois stabilisé baissera de 1,12 m.

La Figure 70 montre la réponse impulsionnelle à un volume pompé instantanément de  $10^6 \text{ m}^3$  (c'est le « limnigramme unitaire du pompage ») et la réponse à un pompage constant de  $10\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ .

La Figure 71 montre l'influence de la pluie seule. L'amplitude de l'influence de la pluie est de l'ordre de 1 m, alors que l'amplitude des variations de niveau observé, Figure 72, est de l'ordre de 6 m.

Le piézomètre est donc davantage sensible aux augmentations de pompage qu'aux diminutions de précipitation. Cependant la simulation montre que de 2000 à 2006, si les pluies n'avaient pas été abondantes, le niveau de la nappe aurait baissé de 1 m de plus (Figure 71).

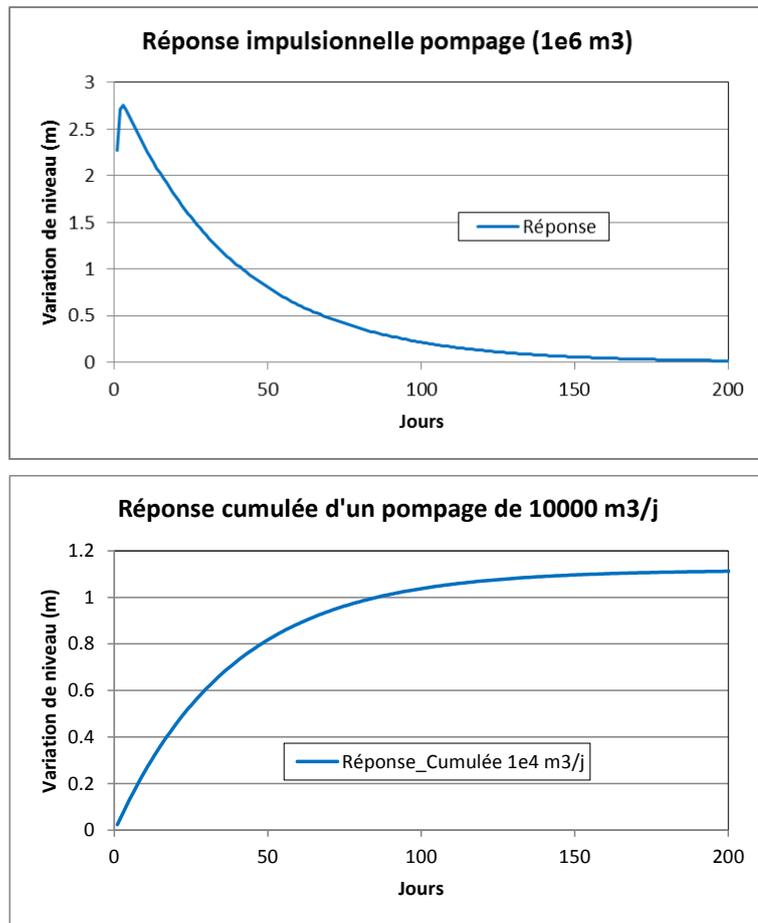


Figure 70 - Piézomètre Perpignan : réponse impulsionnelle (1 million de  $m^3$ ) et réponse à un pompage constant de 10 000  $m^3/j$ .

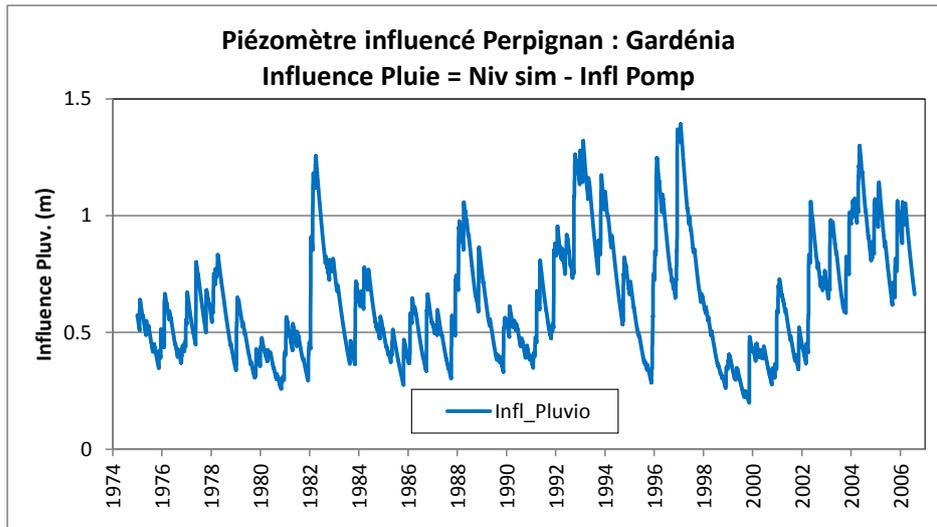


Figure 71 - Piézomètre Perpignan : influence de la pluie de 1974 à 2007.

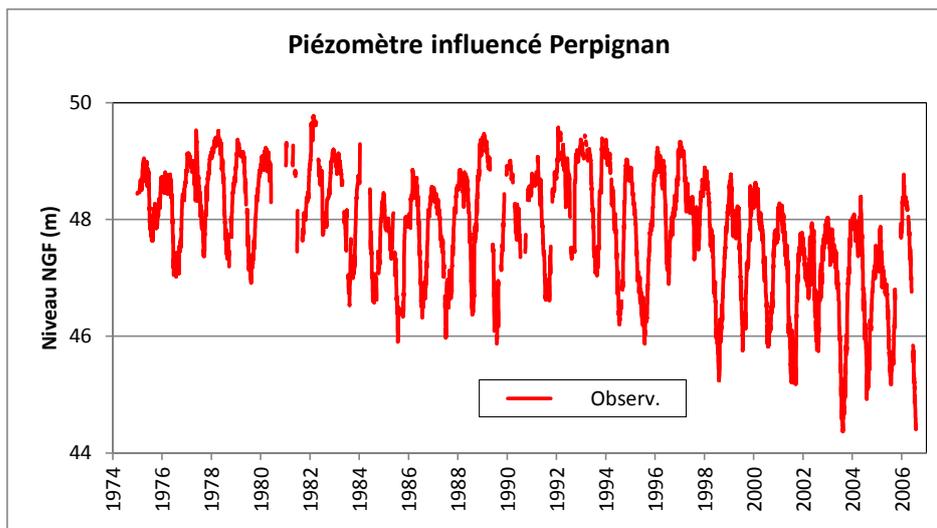


Figure 72 - Piézomètre Perpignan : niveaux observés de 1974 à 2007.

## 12.2. RECALCUL DES DÉBITS DE POMPAGE EN DEHORS DE LA PÉRIODE D'OBSERVATION

On montre ici comment il est possible d'utiliser la réponse impulsionnelle identifiée pour recalculer les débits de pompage en dehors de la période d'observation, c'est-à-dire de 1974 à 1997. On procède comme suit :

- On utilise la période du 11/02/1974 au 31/07/2006 pendant laquelle on dispose des données de niveau piézométrique et des données climatiques. On complète la

série des niveaux piézométriques, en remplaçant les valeurs manquantes par interpolation, pour obtenir une série complète.

- On lui retranche alors l'influence calculée de la pluie. Cette série est donc directement influencée par les pompages (à l'erreur de simulation et à l'erreur de mesure de niveau près).
- On utilise alors la réponse impulsionnelle ou « hydrogramme unitaire du pompage », qui a été déterminé par la modélisation couplée (pluie et niveau) sur la période 1998-2006.
- Par une méthode simple de « déconvolution inverse », non détaillée ici, on calcule le débit de pompage au pas de temps journalier sur les 32,5 années de la période du 11/02/1974 au 31/07/2006.
- Compte tenu de la durée de l'hydrogramme unitaire de 200 jours, les 200 premiers jours de la période ne sont pas pris en compte. Les dix derniers jours également, qui sont mal identifiés, ne sont pas pris en compte.
- On obtient donc les débits de pompage de la période 29/08/1974 - 21/07/2006.

La Figure 73 montre les débits de pompage journaliers calculés (en bleu) de 1974 à 2007 et les débits de pompage observés de 1998 à 2006. En fait, pour la comparaison on a utilisé les débits moyens de chaque mois. L'ajustement, sur la période 1998-2006, est très bon, avec un coefficient de corrélation de 0,948. Ce bon ajustement indique que les débits de pompage recalculés doivent être fiables également sur la période 1975-1997 pendant laquelle les mesures ne sont pas disponibles.

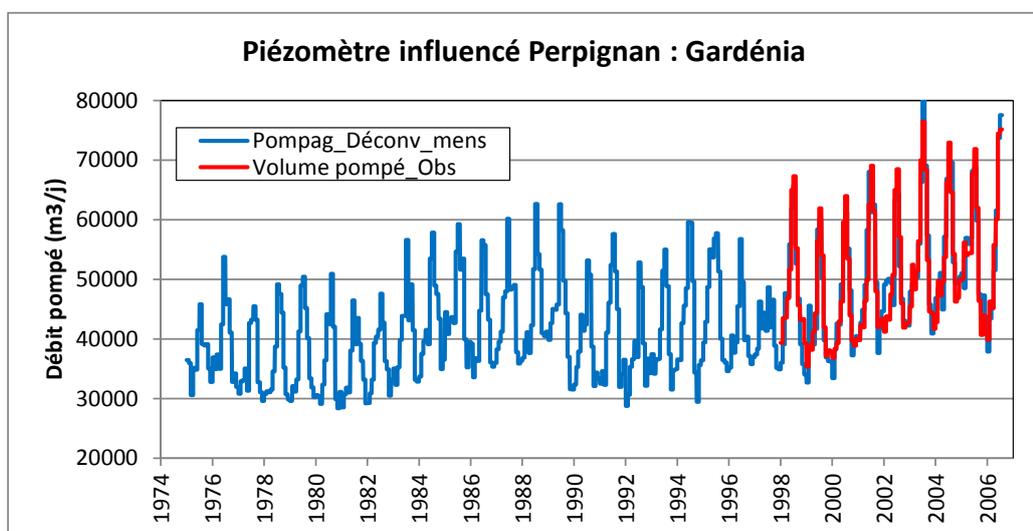


Figure 73 - Piézomètre Perpignan : débits de pompage journaliers calculés (en bleu) de 1974 à 2006 et observés de 1998 à 2006 (en rouge).

La Figure 74 présente les mêmes historiques de débit de pompage, mais en moyenne mobile sur 360 jours, de façon à éliminer les variations interannuelles. Il apparaît nettement que ce sont les augmentations de débit de pompage, qui passe de 36 000 m<sup>3</sup>/j en moyenne en 1975-1980, à 53 000 m<sup>3</sup>/j en 2003-2006, qui sont responsables de la baisse de niveau piézométrique, qui passe de 48,5 m NGF à 46,5 m NGF.

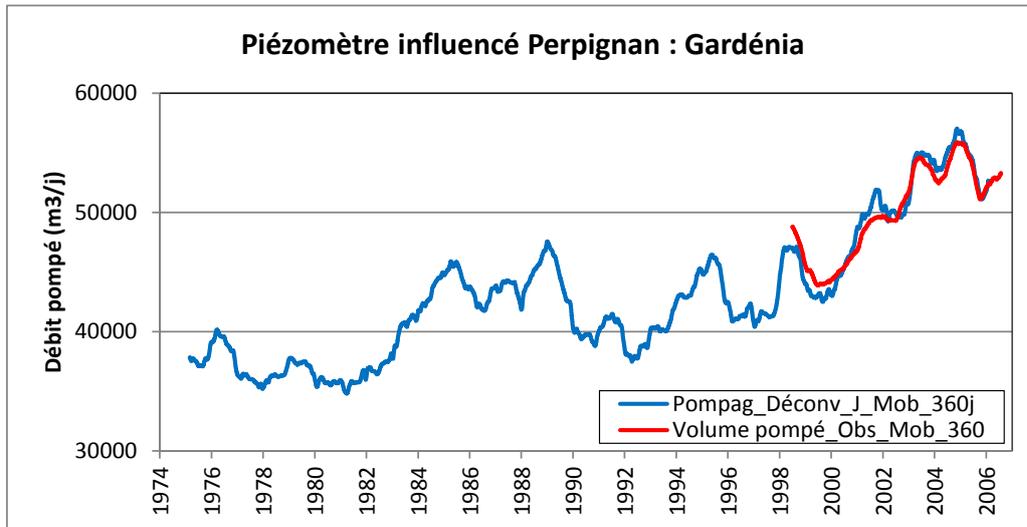


Figure 74 - Piézomètre Perpignan : moyenne mobile sur 360 jours des débits de pompage calculés (en bleu) de 1974 à 2006 et observés de 1998 à 2006 (en rouge).

À titre de vérification, la série des pluies et ETP observés, et la série des débits de pompage recalculés (constants par mois) ont été utilisées pour simuler avec GARDÉNIA le niveau piézométrique observé de la période totale 1974-2006. La Figure 75 montre que la simulation est très bonne, avec un coefficient de corrélation de 0,992. Les courbes sont superposées et quasiment indiscernables.

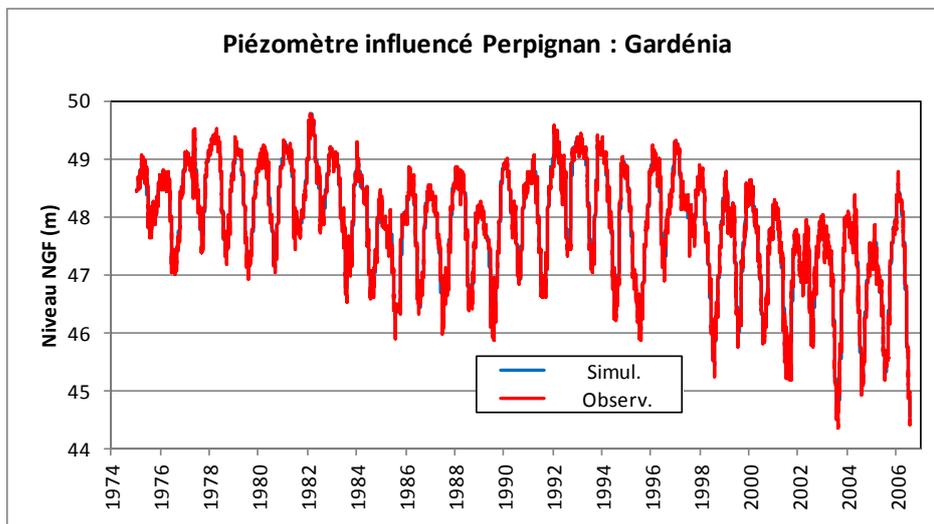


Figure 75 - Piézomètre Perpignan : simulation sur la période 1974-2006 des niveaux à partir des pluies et ETP observés et des débits de pompage recalculés. Les niveaux observés (en rouge) et simulés (en bleu) sont quasiment indiscernables.

### 12.3. VALIDATION DU SCHÉMA GARDÉNIA D'INFLUENCE D'UN POMPAGE SUR UN NIVEAU DE NAPPE

Dans un but de validation du schéma GARDÉNIA de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe, on procède de la manière suivante :

- On définit un domaine aquifère homogène bordé par une rivière qu'on modélise avec le code de calcul hydrodynamique MARTHE de simulation d'aquifères par volumes finis selon la loi de Darcy.
- On introduit dans un puits de pompage l'historique des débits de pompage journalier de la période 1998-2006.
- On détermine alors la perméabilité uniforme et le coefficient d'emmagasinement uniforme qui permettent de reproduire le mieux possible, avec le code de calcul physique MARTHE, l'influence du pompage sur le niveau piézométrique, calculée avec GARDÉNIA de 1998 à 2006.

Le domaine choisi pour la modélisation hydrodynamique discrétisée a les caractéristiques arbitraires suivantes (Figure 76) :

- Carré de 2 km de côté, discrétisé en 10 000 mailles de 20 m de côté.
- La limite ouest, bordée par une rivière, a un niveau piézométrique imposé (à la cote 2 m).
- Les trois autres limites, à l'est, au nord et au sud, sont étanches.
- Le piézomètre d'observation est situé à 80 m à l'est de la rivière, à mi-ordonnée, c'est-à-dire à 1 km des limites nord et sud.
- Le puits de pompage est situé à 580 m à l'est de la rivière, c'est-à-dire à 500 m à l'est du piézomètre.
- La nappe a une épaisseur uniforme de 50 m.

On détermine alors la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement qui permettent de reproduire le mieux possible l'influence du pompage sur le niveau piézométrique, pendant les 3 134 jours de la période de 1998 à juillet 2006.

La Figure 77 montre qu'avec un coefficient d'emmagasinement égal à 0,083 et une perméabilité égale à  $8,44 \cdot 10^{-5}$  m/s, soit une transmissivité de  $4,22 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, on calcule une influence du pompage sur le niveau piézométrique très proche de celle obtenue avec GARDÉNIA.

Réciproquement, le fait de reproduire très bien avec GARDÉNIA l'influence du pompage sur le niveau de nappe calculé avec un modèle hydrodynamique physique, est une validation forte du schéma de GARDÉNIA pour le calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe.

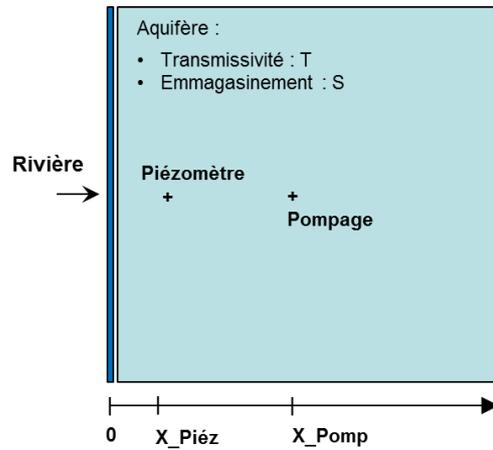


Figure 76 - Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe.

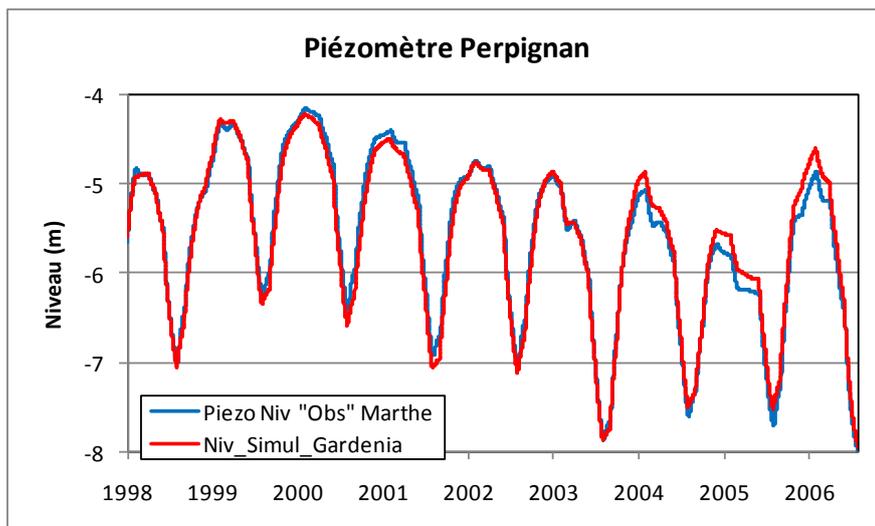


Figure 77 - Piézomètre Perpignan : comparaison de l'influence du pompage sur le niveau piézométrique calculé avec le code de calcul MARTHE (en rouge) et avec le code de calcul GARDENIA (en bleu).

## **13. Exemple d'application n° 12 : modélisation pluie-niveau de deux piézomètres du Marais poitevin, influencés par des pompages**

Cette application montre la possibilité de modéliser des niveaux piézométriques influencés par un ensemble de pompages dont on connaît l'historique des débits de pompage. Elle montre en particulier comment choisir les pompages à prendre en compte. Les piézomètres modélisés, qui sont implantés tous deux dans le Dogger, sont :

- le piézomètre Luçon, d'indice 5857X145/PZ, dans le secteur « Sèvre » ;
- le piézomètre Chalais – Saint-Pierre-le-Vieux, d'indice 06094X0181/F, dans le secteur « Autize ».

Les données de base relatives à ces piézomètres nous ont été mises à disposition par O. Douez que nous remercions.

### **13.1. DONNÉES DISPONIBLES**

Les données disponibles pour cet exemple d'application sont les suivantes :

- Pluies décennales : 1995-2007 (13 ans) à Niort et La Rochelle.
- ETP décennales : 1995-2007 (13 ans) à Niort et La Rochelle.
- Niveau piézométrique journalier, avec quelques lacunes : 1999-2008 (10 ans).
- Volumes pompés en m<sup>3</sup> dans les captages du voisinage, au pas de temps mensuel : 2000-2007 (8 ans).

Compte tenu de ces données, on a choisi la période commune de 1995 à 2007 et un pas de temps journalier.

#### **13.1.1. Données météorologiques**

Pour chaque piézomètre, on a choisi les données de la station météorologique la plus proche :

- La Rochelle : pour le piézomètre Luçon ;
- Niort : pour le piézomètre Chalais.

Comme le pas de temps le plus fin doit être le pas de temps des données météorologiques, on aurait pu transformer les pluies et ETP en données journalières, par simple division de la donnée par le nombre de jours dans la décennie. Mais, il est possible de conserver les pluies et ETP décennales en choisissant le paramètre :

« 1 = Bilan journalier même si pluie Décennale ou Mensuelle (0 = Non ; 1 = Oui) »

### 13.1.2. Données de prélèvement

Étant donné que les données de pompage doivent être au même pas de temps que celui de la pluie, on a transformé, avec le module SHALIMAR, la série mensuelle de volumes pompés (en m<sup>3</sup>) en une série décadaire de prélèvements qu'on a exprimé en m<sup>3</sup>/jour. On verra que l'unité des prélèvements est importante uniquement pour l'interprétation des résultats. Il est conseillé de donner un signe négatif aux débits pompés et un signe positif aux débits injectés. Dans cet exemple, qui ne comporte que des débits pompés, on a cependant donné des valeurs positives aux débits.

## 13.2. MODÉLISATION DU PIÉZOMÈTRE LUÇON

### 13.2.1. Choix des prélèvements à prendre en compte

Les cinq puits de pompage les plus proches de ce piézomètre sont listés dans le Tableau 2.

Puits	n° 84	n° 93	n° 112	n° 120	n° 163
Distance (m)	580	460	876	937	495

Tableau 2 - Piézomètre Luçon : cinq puits de pompage les plus proches.

Le code de calcul GARDÉNIA n'utilise qu'une seule série de pompages/injections. Il est donc nécessaire de regrouper en une seule série les puits qui ont une influence significative sur le niveau piézométrique. Pour ce regroupement, deux puits n'ont pas été pris en compte :

- Le puits n° 84, présentant de faibles prélèvements, car son historique ne montre aucun prélèvement en 2004, 2006 et 2007, alors que le piézomètre est visiblement influencé ces années-là.
- Le puits n° 163, situé à 495 m de distance, car il ne présente aucun prélèvement en 2000, 2001 et 2003, alors que le piézomètre est influencé ces années-là.

On a donc utilisé la somme des prélèvements des trois forages : n° 93, n° 112 et n° 120.

### 13.2.2. Fichiers de données utilisés

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluv\_LaRocheDecad.prn : pour les pluies (mm/décade) ;
- ETP\_LaRocheDecad.prn : pour les ETP (mm/décade) ;
- Prelev\_Lucon\_2\_4\_5\_Decad\_1995\_2007.prn : pour les pompages (m<sup>3</sup>/j) ;
- Niv\_Lucon\_Jour\_1995\_2008.prn : pour les niveaux nappe (m NGF).

### 13.2.3. Valeurs initiales des paramètres

On procède comme pour le piézomètre « Perpignan » décrit plus haut.

On choisit les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(On choisit « utilisation avancée » puisqu'on va prendre en compte des pompages).

#### Options générales :

- **0** = Observations de Débits de Rivière.
- **1** = Observations de Niveaux de Nappe.
- **1** = Pompage influençant Niveau Nappe (0=Non ; 1=Oui)  
(Puisqu'on prend en compte l'influence de pompages).
- **1** = Bilan journalier même si pluie Décadaire ou Mensuelle (0=Non ; 1=Oui).

#### Pas de temps

Pour les trois séries : Pluie, Pompages, ETP :

- Durée des pas de temps : **Décadaire**
- Format des pas de temps : « **Excel Date** »

Pour la série des niveaux piézométriques observés :

- Durée des pas de temps : **Journalier**
- Format des pas de temps : « **Excel Date** »

#### Options du bassin :

- Nombre d'années = **0** (c'est-à-dire « toutes »)
- Nombre d'années de démarrage = **3**
- Numéro de la première année = **1995**
- Nombre d'itérations de calibration = **400**

#### Paramètres Physiques :

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = **120** mm/an
- Niveau de base : on laisse la valeur par défaut = 0. ; **Optimisé.**
- Coefficient d'emménagement équivalent = 0.01 ; **Optimisé.**
- Capacité de la réserve superficielle progressive = **120** mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = **9999** mm ; Non optimisée.  
(La valeur 9999 est un code indiquant aucun ruissellement).
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = **0,5** mois ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = **3** mois ; Optimisé.

#### Paramètres de Pompage :

- Coefficient d'influence du pompage => Niveau Nappe = 1. ; **Optimisé**  
(On laisse la valeur par défaut 1 et on l'optimise).
- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe = **0,3** mois ; **Optimisé.**
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe = **2** mois ; **Optimisé.**

**Bornes des paramètres de Pompage :**

- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe : 0,03 à 10 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe : 0,03 à 15 mois

**13.2.4. Résultats obtenus**

La calibration automatique s'effectue en quelques secondes. En fait, après une première optimisation de 400 itérations, on enchaîne une deuxième optimisation de 400 itérations, comme proposé quand on relance GARDÉNIA en mode « Contrôle » après une première optimisation. On obtient alors une bonne simulation avec un coefficient d'ajustement égal à 0.897 (Figure 78).

La simulation légèrement meilleure que si on avait fait un seul passage de calibration avec par exemple 800 ou 1 200 itérations. Ceci est lié au processus d'optimisation non-linéaire. Il est donc recommandé de faire un 2<sup>ème</sup> passage de calibration (et même un 3<sup>ème</sup> passage de calibration si l'amélioration à l'issue du 2<sup>ème</sup> passage est significative).

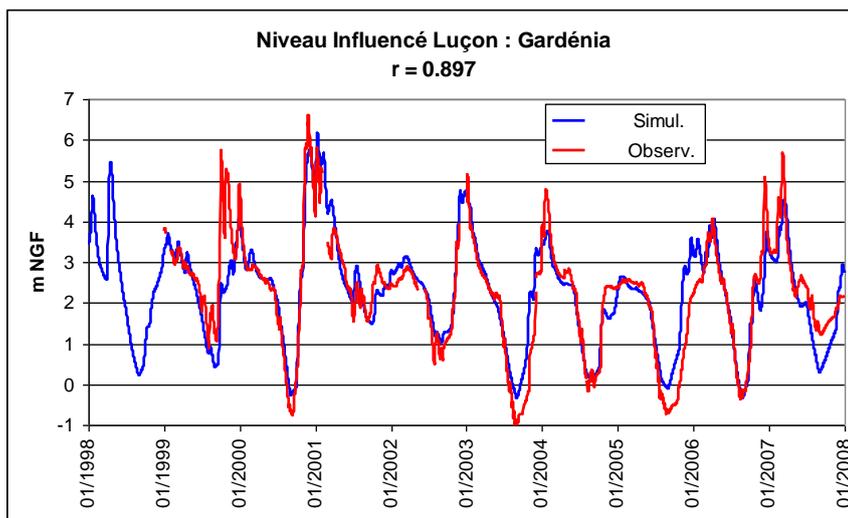


Figure 78 - Piézomètre Luçon influencé par des pompages :  
niveaux journaliers observés (rouge) et simulés (bleu).

Le Tableau 3, extrait du fichier « gardelis.txt », montre l'importance relative de la recharge (pluie et ETP) et du pompage sur l'évolution des niveaux.

	Coefficient de corrélation	Coefficient de corrélation partielle
Recharge	0,709	0,824
Pompage	-0,624	-0,779

Tableau 3 - Piézomètre Luçon : coefficients de corrélation du niveau piézométrique avec chaque influence.

L'influence de la recharge et l'influence du pompage sont à peu près du même ordre. Le coefficient de corrélation entre les variations de niveaux et l'effet du pompage sont négatifs puisqu'on a introduit des valeurs positives de pompage. Si on avait mis des valeurs négatives de pompage, on aurait obtenu des coefficients positifs.

Les paramètres physiques obtenus après calibration sont les suivants :

- Coefficient d'emmagasinement équivalent = 3,45 %
- Niveau de base = 2,96 m NGF
- Capacité de la réserve sol progressive = 0,5 mm
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,083 mois
- Temps de ½ tarissement = 0,597 mois.

Influence des pompages sur les Niveaux Nappe :

- Coefficient d'influence du pompage =  $-3,722 \cdot 10^{-3}$  [-]
- Temps de ½ montée du pompage = 0,075 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage = 3,16 mois

Les paramètres décrivant l'influence du pompage s'interprètent comme suit :

- Le temps de réaction à une augmentation de pompage est très court (temps de ½ montée = 0,075 mois) ;
- Le temps de ½ stabilisation est égal à 3,16 mois (96,2 jours). Ceci indique que le temps nécessaire pour obtenir une quasi-stabilisation, est relativement long, ce qui est logique puisque les pompages sont situés à des distances de 500 à 900 m.
- La réponse du niveau de nappe à un échelon unitaire de pompage de  $1 \text{ m}^3/\text{jour}$  est égale à  $-3.72 \cdot 10^{-3}$  mètre. Si le débit de pompage augmente d'une valeur constante de  $1\ 000 \text{ m}^3/\text{jour}$  ( $3 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{mois}$ ), le niveau piézométrique une fois stabilisé baissera de 3,72 m. Le coefficient obtenu égal à  $-3.72 \cdot 10^{-3} \text{ m par m}^3/\text{j}$  a un signe négatif puisqu'on a introduit des valeurs positives de pompage.

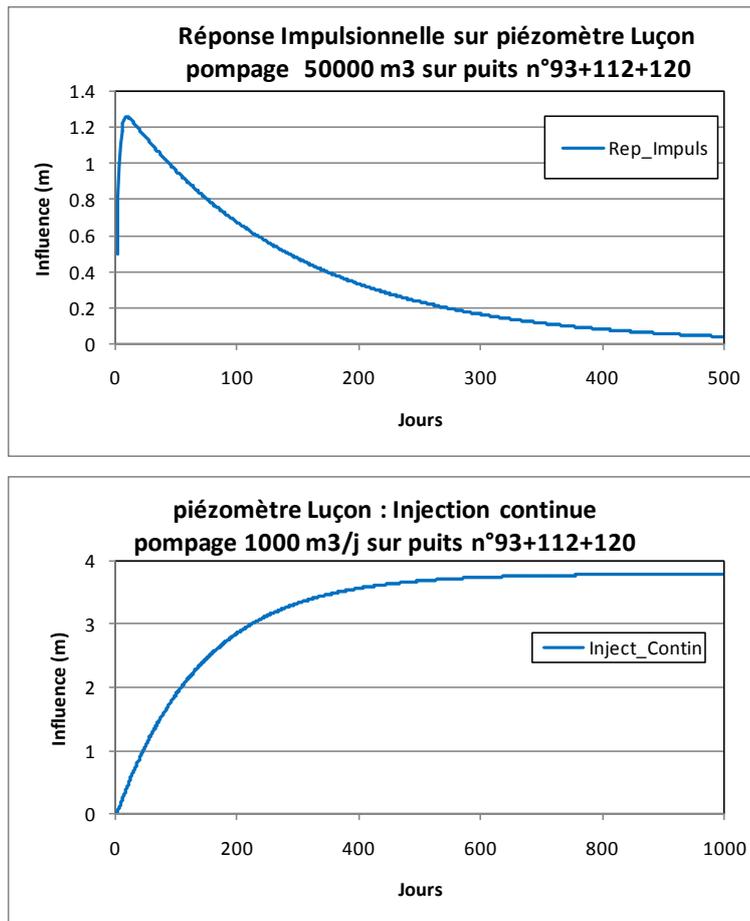


Figure 79 - Piézomètre Luçon : réponse impulsionnelle (50 000 m<sup>3</sup>) et réponse à un pompage constant de 1 000 m<sup>3</sup>/j.

La Figure 79 montre la réponse impulsionnelle à un volume pompé instantanément de 50 000 m<sup>3</sup> (c'est le « limnigramme unitaire » du pompage) et la réponse à un pompage constant de 1 000 m<sup>3</sup>/j.

La Figure 80 montre, en bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule, en l'absence de pompage. En rouge, par comparaison, on a reporté les variations de niveau observées, soumises donc aussi à l'influence des pompages. Il apparaît nettement que les influences des pompages, différence entre les deux courbes, se font sentir nettement même en dehors des périodes de pompage.

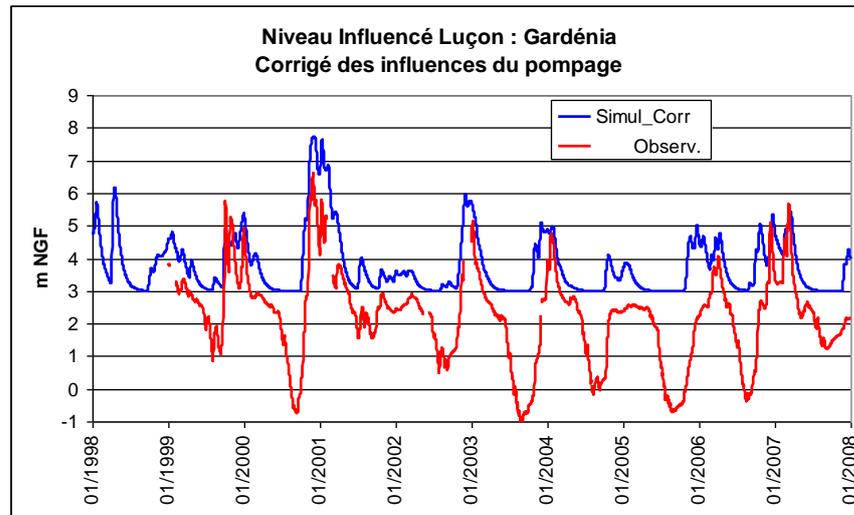


Figure 80 - Piézomètre Luçon. En bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule. En rouge, les variations de niveau observées, influencées par les pompes.

### 13.3. MODÉLISATION DU PIÉZOMÈTRE CHALAIS

#### 13.3.1. Choix des prélèvements à prendre en compte

Plusieurs essais ont été réalisés pour déterminer quels prélèvements prendre en compte. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les prélèvements du puits n° 549, qui est situé dans le Jurassique à 41 m du piézomètre.

On remarque cependant que ce forage n° 549 du Jurassique n'a aucun relevé de prélèvements en 2005, alors que le niveau du piézomètre est fortement influencé. Considérant qu'il s'agit d'un manque de données cette année 2005, on a introduit un prélèvement égal à 171 m<sup>3</sup>/j de juin à août 2005, valeur proche des prélèvements de l'année 2004 qui sont de 5 150 m<sup>3</sup>/mois de juin à août.

#### 13.3.2. Fichiers de données utilisés

Les quatre fichiers de données ont respectivement pour noms :

- Pluv\_Niort\_Decad.prn : pour les pluies (mm/décade) ;
- ETP\_Niort\_Decad.prn : pour les ETP (mm/décade) ;
- Prelev\_Chalais\_549\_Jur\_Decad\_Cor\_1995\_2007.prn : pour les pompes (m<sup>3</sup>/j) ;
- Niv\_Chalais\_Jour\_1995\_2008.prn : pour les niveaux nappe (m NGF).

#### 13.3.3. Valeurs initiales des paramètres

On procède comme pour le piézomètre Luçon.

On choisit les paramètres suivants (très proches des paramètres initiaux de Luçon).

**Paramètres Physiques :**

- Pluie efficace annuelle moyenne démarrage = **120** mm/an
- Niveau de base : On laisse la valeur par défaut = 0 ; **Optimisé.**
- Coefficient d'emménagement équivalent = 0,01 ; **Optimisé.**
- Capacité de la réserve superficielle progressive = **120** mm ; Optimisée.
- Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation = **100** mm ; Optimisée.
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = **1,5** mois ; Optimisé.
- Temps de ½ tarissement = **3,5** mois ; Optimisé.

**Paramètres de Pompage :**

- Coefficient d'influence du pompage => Niveau Nappe = 1 ; **Optimisé**  
(On laisse la valeur par défaut 1 et on l'optimise).
- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe = **0,5** mois ; **Optimisé.**
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe = **2** mois ; **Optimisé.**

**Bornes des paramètres de Pompage :**

- Temps de ½ montée du pompage infl. => Nappe : 0,03 à 10 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage => Nappe : 0,03 à 15 mois

**13.3.4. Résultats obtenus :**

La calibration automatique s'effectue en quelques secondes. On obtient alors une très bonne simulation avec un coefficient d'ajustement égal à 0,924 (Figure 81).

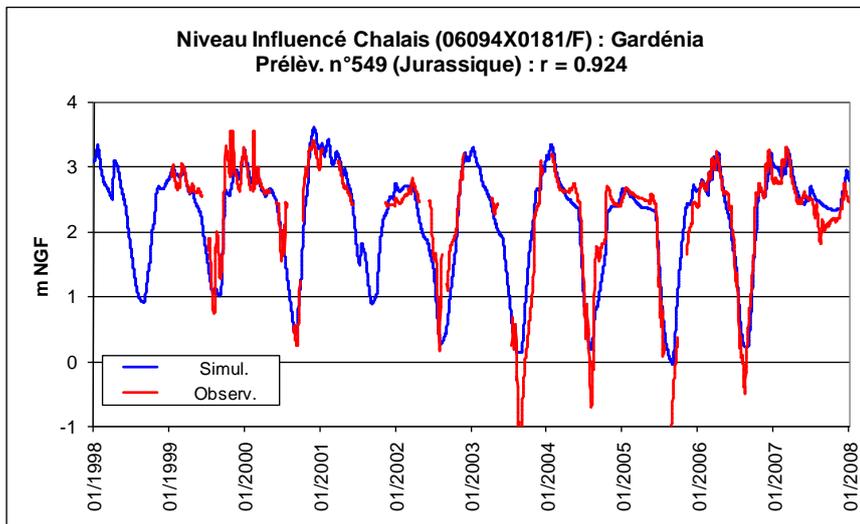


Figure 81 - Piézomètre Chalais influencé par des pompes : niveaux journaliers observés (rouge) et simulés (bleu).

Le Tableau 4, extrait du fichier « gardelis.txt », montre l'importance relative de la recharge (pluie et ETP) et du pompage sur l'évolution des niveaux.

L'influence de la recharge et l'influence du pompage sont à peu près du même ordre.

	Coefficient de corrélation	Coefficient de corrélation partielle
Recharge	0,657	0,600
Pompage	-0,877	-0,861

Tableau 4 - Piézomètre Chalais : coefficients de corrélation avec chaque influence.

Les paramètres physiques obtenus après calibration sont les suivants :

- Coefficient d'emmagasinement équivalent = 0,1238
- Niveau de base = 2,31 m NGF
- Capacité de la réserve sol progressive = 0 mm
- Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) = 0,02 mois
- Temps de ½ tarissement = 0,783 mois.

Influence des pompages sur les Niveaux Nappe :

- Coefficient d'influence du pompage =  $-1,446 \cdot 10^{-2}$  [-]
- Temps de ½ montée du pompage = 0,226 mois
- Temps de ½ stabilisation du pompage = 0,52 mois

Les paramètres décrivant l'influence du pompage s'interprètent comme suit :

- Le temps de réaction à une augmentation de pompage est assez courte (temps de ½ montée = 0,23 mois).
- Le temps de ½ stabilisation est égal à 0,52 mois (15,8 jours). Ceci indique que le temps nécessaire pour obtenir une quasi-stabilisation est assez rapide, ce qui est logique puisque le pompage est situé à faible distance du piézomètre.
- La réponse du niveau de nappe à un échelon unitaire de pompage de  $1 \text{ m}^3/\text{jour}$  est égale à  $-1.446 \cdot 10^{-2}$  mètre. Si le débit de pompage augmente d'une valeur constante de  $1000 \text{ m}^3/\text{jour}$  ( $3 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{mois}$ ), le niveau piézométrique une fois stabilisé baissera de 14.46 mètres. Cette valeur est quatre fois plus grande que pour le piézomètre Luçon.

La Figure 82 montre la réponse impulsionnelle à un volume pompé instantanément de  $50\,000 \text{ m}^3$  (c'est le « limnigramme unitaire » du pompage) et la réponse à un pompage constant de  $1\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ .

La Figure 83 montre, en bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule, en l'absence de pompage. En rouge, par comparaison, on a reporté les variations de niveaux observées, soumises donc aussi à l'influence des pompages.

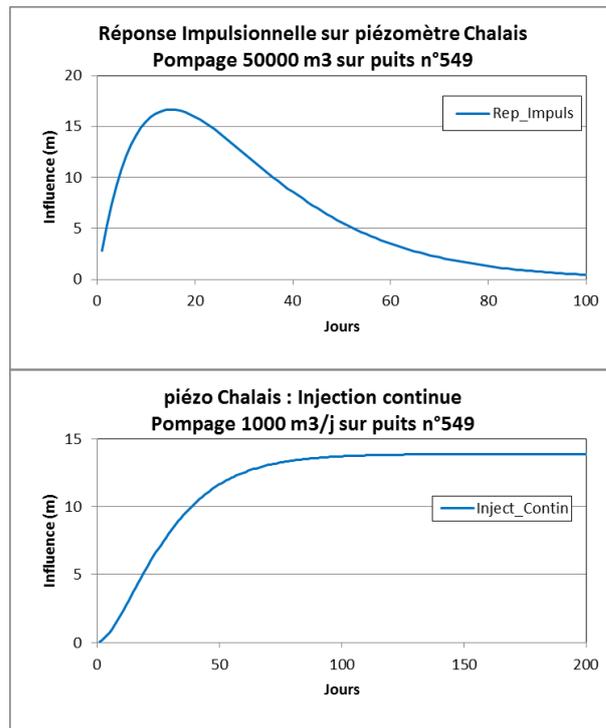


Figure 82 - Piézomètre Chalais : réponse impulsionnelle (50 000 m<sup>3</sup>) et réponse à un pompage constant de 1 000 m<sup>3</sup>/j.

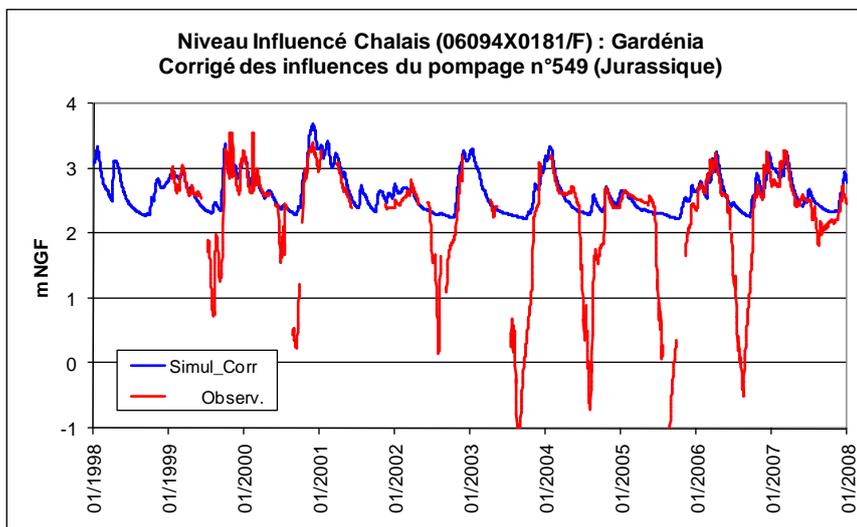


Figure 83 - Piézomètre Chalais. En bleu, les variations de niveau qui seraient observées en réaction à la recharge seule. En rouge, les variations de niveau observées, influencées par les pompages.

## 14. Exemple d'application n° 13 : prévision des débits de la Somme à Abbeville

Cet exemple se rapporte au débit journalier de la Somme à Abbeville, projet « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007 », décrit plus haut. Cependant, il ne s'agit plus ici de *simuler* les débits, mais de *prévoir* les débits. La différence essentielle est que la simulation est réalisée en aveugle, c'est-à-dire que le calcul ne prend pas en compte les débits observés. En revanche, lors de l'émission d'une prévision, on suppose qu'on connaît les débits observés jusqu'à la date d'émission de la prévision. Le modèle GARDÉNIA va donc utiliser les débits observés (ou niveaux observés) pour réajuster les états de ses réservoirs de façon à minimiser les écarts de simulation jusqu'au jour d'émission de la prévision. Cette méthode permet ainsi d'éviter d'avoir une erreur initiale sur le débit simulé au jour d'émission de la prévision.

### 14.1. DONNÉES SUPPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES EN MODE PRÉVISION

Pour réaliser une prévision, il faut avoir calibré le modèle au préalable. Il faut également disposer :

- d'un fichier de « Pluies pour la prévision ». Ce fichier doit contenir un historique de pluies sur le bassin, au même pas de temps que les pluies utilisées en simulation. Ce fichier peut être identique au « fichier des pluies », mais on veillera à ce que la dernière année soit complète. On pourra également utiliser une plus longue période d'observation de pluies, si on dispose d'une telle série ;
- d'un fichier, facultatif, d'ETP pour la prévision, correspondant au fichier de « Pluies pour la prévision ». Si on ne dispose pas d'un tel fichier, les prévisions sont réalisées en prenant pour chaque pas de temps la moyenne interannuelle de l'ETP de la série d'ETP de référence correspondant à ce pas de temps ;
- d'un fichier de « Températures pour la prévision » : ce fichier est utilisé uniquement si la fonte de la neige est prise en compte.

Pour cet exemple, on utilisera le « fichier des pluies » comme fichier de « Pluies pour la prévision », mais il est possible, et conseillé, d'utiliser un fichier comprenant un plus grand nombre d'années (par exemple 30 ou 50 ans).

`Plu_Glisy_1988_2007.prn` = Pluies pour Prévision

### 14.2. ÉTAPES DU CALCUL DE PRÉVISION.

Pour réaliser une prévision, GARDÉNIA procède en deux étapes :

- Étape n° 1 : Préparation de la prévision, GARDÉNIA calcule :
  - L'écart-type de l'évolution des niveaux des réservoirs
  - Le « taux de réajustement des réservoirs » optimal. Ce taux de réajustement dépend de la portée de la prévision.

Cette étape de préparation peut être assez longue.

- Étape n° 2 : Émission de la prévision utilisant le « taux de réajustement » et les écarts-types des niveaux.

La première étape n'est nécessaire qu'une seule fois, pour une portée donnée. Il est donc possible de réaliser uniquement cette étape de préparation à l'issue de laquelle sera généré le fichier de paramètres contenant « taux de réajustement optimal » et les écarts-types des niveaux. Il sera ainsi possible de réaliser ultérieurement plus rapidement les émissions de prévision.

### 14.3. ÉMISSION DIRECTE D'UNE PRÉVISION, SANS ÉTAPE DE PRÉPARATION.

Comme l'année 2007 n'est pas complète, on va supposer, à titre de démonstration, qu'on émet une prévision le 1<sup>er</sup> mars 2002, c'est-à-dire la 15<sup>ème</sup> année. La portée de la prévision est de 60 jours, c'est-à-dire qu'on prévoit les débits pendant 60 jours à partir de la date d'émission.

Pour redémarrer cet exemple, on relance le projet « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007.rga », ce qui génère le fichier « gardepara.out » contenant les paramètres en fin de calibration. Par sécurité, pour conserver ces fichiers, le plus simple est de renommer :

- « Somme\_Abb\_Glisy\_1988\_2007.rga » en « Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.rga ».
- « gardepara.out » en « Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.gar »

On procède alors comme suit :

- (1) On clique sur l'icône du code de calcul GARDENIA et on choisit le menu « Fichier → Modifier ».
- (2) On sélectionne le fichier projet : « Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.rga ».
- (3) On modifie alors les fichiers du projet :
  - On change le nom du fichier des paramètres en « **Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.gar** ».
  - On ajoute le fichier « Plu\_Glisy\_1988\_2007.prn » comme fichier de « Pluies pour la prévision ».
- (4) On accepte par OK, puis on donne un titre descriptif, par exemple « Prévision Somme »
- (5) À l'invite de sauvegarde, on sauvegarde le projet avec ces nouveaux fichiers en « Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.rga »
- (6) On choisit alors une exécution en mode « Contrôle » pour pouvoir adapter les paramètres.

On modifie les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(On choisit « utilisation avancée » puisqu'on va réaliser une prévision).

**Options générales :**

- **1** = Prévission (0 = Non ; 1 = Oui ; -1 = préparation uniquement)  
(*Puisqu'on réalise une prévision*).

**Options du bassin :**

- Nombre d'Années des séries de données (Pluie, ETP, Observations) = **15**  
(*C'est-à-dire émission la dernière des 15 années, soit en 2002*)
- Nombre d'Années de données du fichier de pluies pour la Prévission = **19**
- Jour d'émission de la prévision (1-31) = **1**
- Numéro du Mois d'émission de la Prévission) : *mars* = **3**
- Portée de la Prévission (nombre de pas de temps de la prévision) = **60**
- Date de la Première Année de prévision des fichiers = **1988**

Le fichier des paramètres ne contient pas de valeurs d'écart-type de niveaux dans les réservoirs (ou bien les valeurs initiales d'écart-type de niveaux de réservoirs ont été mises à zéro par l'utilisateur). Une première phase de calcul optimal du coefficient de réajustement est donc réalisée automatiquement en quelques secondes, suivie du calcul de l'émission de la prévision. L'examen du fichier listing « gardelis.txt » montre que le coefficient de réajustement optimal des réservoirs est de 26 % à chaque pas de temps.

La Figure 84 présente la prévision du débit de la Somme à Abbeville 60 jours à l'avance. La prévision est émise successivement le 1<sup>er</sup> mars 2002, le 1<sup>er</sup> avril 2002, le 1<sup>er</sup> mai 2002 et le 1<sup>er</sup> décembre 2002. Le débit observé, qui n'est pas connu après la date d'émission, est reporté sur les graphiques en trait rouge épais pour contrôle

## 14.4. CALCUL EN DEUX ÉTAPES : PRÉPARATION, PUIS ÉMISSION DE LA PRÉVISION

### 14.4.1. Préparation de la prévision

Pour ce deuxième exemple, on choisit une portée de la prévision de 15 jours.

On procède comme précédemment à partir des fichiers Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.rga et Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.gar. Pour la première étape, il n'est pas nécessaire que le fichier projet contienne un nom de fichier de « Pluies pour la prévision », mais ce sera nécessaire pour la 2<sup>ème</sup> étape.

On modifie les paramètres suivants :

- Utilisation avancée : (0 = simple ; 1 = avancée) : **1**  
(*On choisit « utilisation avancée » puisqu'on va réaliser une prévision*).

**Options générales :**

- **-1** = Prévission (0 = Non ; 1 = Oui ; -1 = préparation uniquement)  
(*Puisqu'on souhaite uniquement « préparer » la prévision*).

**Options du bassin :**

- Nombre d'Années de données du fichier de pluies pour la Prévision = 19
- Portée de la Prévision (Nombre de pas de temps de la prévision) = 15

Le calcul du coefficient optimal de réajustement des réservoirs est alors réalisé. Les résultats peuvent être consultés dans le fichier listing « gardelis.txt ». Le coefficient de réajustement optimal des réservoirs est de 44 % à chaque pas de temps, ce qui permet d'améliorer significativement la prévision. Comme on a choisi une portée de prévision plus courte pour cet exemple (15 jours au lieu de 60 jours), le coefficient de réajustement des réservoirs est différent. Il est égal à 44 % au lieu de 26 %, ce qui est logique, car sur une plus courte portée un réajustement hasardeux serait moins pénalisant.

Ce coefficient de réajustement des réservoirs, ainsi que les écarts-types des niveaux des réservoirs, qui sont nécessaires pour réaliser une prévision, apparaissent dans le nouveau fichier « gardepara.out » qui est généré.

**14.4.2. Émission d'une prévision.**

Comme précédemment, on émet une prévision le 1<sup>er</sup> mars 2002, c'est-à-dire la 15<sup>ème</sup> année, mais la portée de la prévision est de 15 jours.

On procède alors comme suit :

- (1) On clique sur l'icône du code de calcul GARDENIA et on choisit le fichier « Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.rga ».
- (2) On choisit une exécution en mode « Contrôle » pour pouvoir adapter les paramètres.
- (3) GARDÉNIA propose d'actualiser le fichier des paramètres Somme\_Abb\_Glisy\_Previ.gar par le fichier « gardepara.out » plus récent → On accepte.

On modifie les paramètres suivants :

**Options générales :**

- 1 = Prévision (0 = Non ; 1 = Oui ; -1 = préparation uniquement)  
(*puisque'on émet la prévision*).

**Options du bassin :**

- Nombre d'Années des séries de données (Pluie, ETP, Observat.) = 15  
(*c'est-à-dire émission la dernière des 15 années, soit en 2002*)
- Jour d'émission de la prévision (1-31) = 1
- Numéro du Mois d'émission de la Prévision) : mars = 3
- Date de la Première Année de prévision des fichiers = 1988

On obtient alors la prévision pour les 15 jours qui suivent le 01/03/2002.

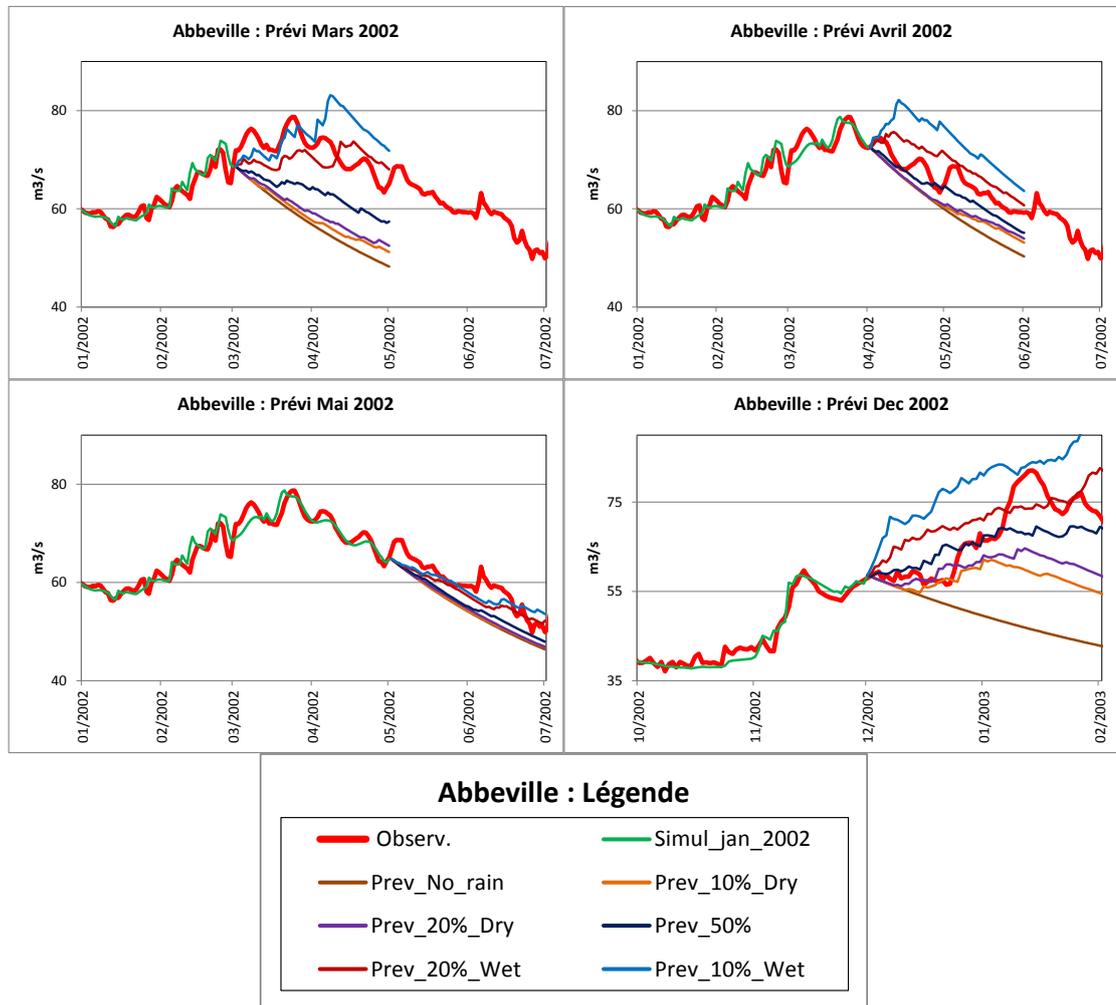


Figure 84 - Prédiction du débit de la Somme à Abbeville 60 jours à l'avance. Prédiction émise successivement le 1<sup>er</sup> mars 2002, le 1<sup>er</sup> avril 2002, le 1<sup>er</sup> mai 2002 et le 1<sup>er</sup> décembre 2002. Le débit observé, qui n'est pas connu, après la date d'émission est reporté sur les graphiques en trait rouge épais pour contrôle.



## 15. Comparaison de différentes hypothèses et conseils

Ce chapitre compare différentes hypothèses de modélisation en termes de qualité de simulation. Les résultats présentés sont issus de l'application de GARDÉNIA à un échantillon de 22 bassins versants répartis sur toute la France. Nous ne détaillerons pas ces bassins, car ils sont impliqués dans des projets en cours dont les résultats ne sont pas encore publiés. Pour information, la superficie médiane de ces bassins est de 900 km<sup>2</sup>, avec 80 % comprises entre 500 et 2 500 km<sup>2</sup>. La pluie annuelle médiane est de 950 mm/an, avec pour 80 % des bassins une valeur entre 750 et 1 300 mm/an. Le débit spécifique médian est de 11 L/s/km<sup>2</sup>, avec 80 % des bassins entre 6 et 26 L/s/km<sup>2</sup>. La période d'observation des débits au pas de temps journalier est de 39 ans.

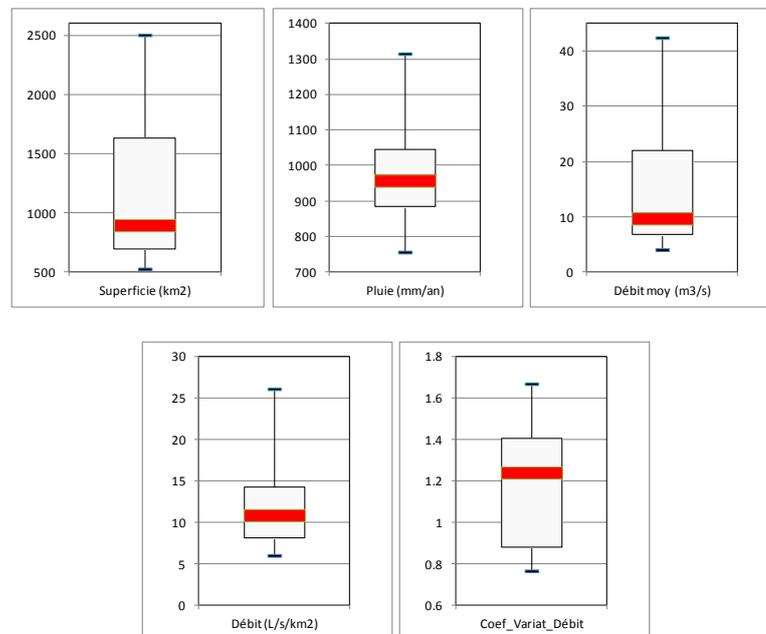


Figure 85 - Caractéristiques des 22 bassins (médiane en rouge, fréquences 25 % et 75 % en noir, barres extrêmes fréquences 10 % et 90 %).

### 15.1. INFLUENCE DU PAS DE TEMPS DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

On analyse ici l'intérêt de disposer de données climatiques journalières pour modéliser des débits moyens décennaux. On a modélisé les débits décennaux des 22 bassins :

- avec des pluies et ETP journalières ;
- avec des pluies et ETP décennales.

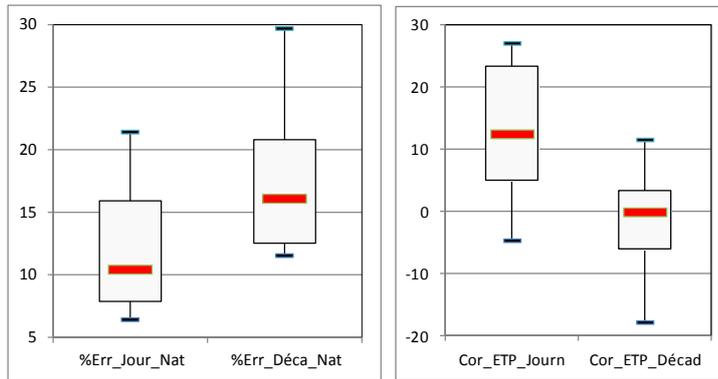


Figure 86 - Dessin de gauche : erreur relative sur les débits décadaires des 22 bassins. (partie gauche : données météo journalières ; partie droite données météo décadaires).  
Dessin de droite : correction globale d'ETP journalière et décadaire.

Il apparaît (Figure 86) que la simulation est nettement meilleure avec des pluies et ETP journalières. Les coefficients de Nash sont significativement meilleurs. Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits décadaires est de 10 % au lieu de 16 %. La Figure 86 montre que la simulation avec un pas de temps décadaire nécessite une diminution globale de l'ETP (par l'intermédiaire de la correction globale d'ETP).

## 15.2. RÉSERVE DU SOL PROGRESSIVE COMPARÉE À UNE « RÉSERVE UTILE »

On analyse ici l'intérêt d'utiliser une réserve du sol progressive (quadratique) plutôt qu'une réserve utile en tout ou rien pour modéliser des débits journaliers. On a modélisé les débits journaliers des 22 bassins :

- avec une réserve du sol progressive ;
- avec une réserve du sol « réserve utile ».

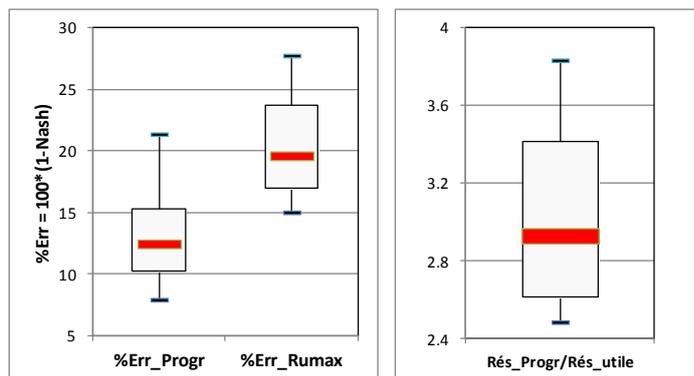


Figure 87 - Figure de gauche : erreur relative des débits des 22 bassins (partie gauche : réserve sol progressive ; partie droite : réserve sol type « réserve utile »).  
Figure de droite : ratio réserve progressive divisée par la réserve utile.

Il apparaît que la simulation est nettement meilleure avec une réserve du sol progressive. Les coefficients de Nash sont significativement meilleurs. Ils sont en moyenne, sur les 22 bassins, de 0,9 au lieu de 0,81. Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits journaliers est de 12,5 % au lieu de 20 % (Figure 87, dessin de gauche). La réserve utile à une valeur de 2,5 à 3,5 fois plus petite que la valeur de la réserve sol progressive (Figure 87, dessin de droite).

### 15.3. SCHÉMA DE RUISSELLEMENT DE GARDÉNIA COMPARÉ À UN POURCENTAGE DE RUISSELLEMENT CONSTANT

On analyse ici l'intérêt d'utiliser le schéma de ruissellement de Gardénia, plutôt qu'un schéma avec un pourcentage de ruissellement constant (non disponible dans la version standard du code Gardénia). On a modélisé les débits journaliers des 22 bassins :

- avec le schéma de ruissellement normal de Gardénia ;
- avec un taux de ruissellement constant indépendamment de l'état de saturation.

Il apparaît que la simulation avec le schéma Gardénia est meilleure. Le gain est plus sensible sur les critères calculés sur les débits naturels, donc plus influencés par les débits de pointe de crue, que sur les critères calculés sur la racine carrés des débits. Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits journaliers est de 12,5 % au lieu de 18 % sur les débits naturels, et de 11 % au lieu de 14 % sur la racine carré des débits.

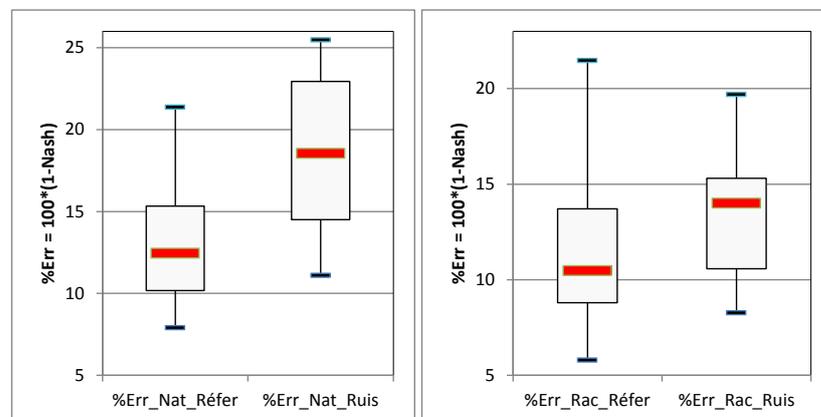


Figure 88 - Erreur relative des 22 bassins. Partie gauche : schéma de ruissellement Gardénia ; partie droite : taux de ruissellement constant. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits

### 15.4. INTÉRÊT DE LA PRISE EN COMPTE DU COEFFICIENT DE RETARD SIMULANT LE « TEMPS DE CONCENTRATION » DU BASSIN

On analyse ici l'intérêt de prendre un coefficient de retard pour représenter le « temps de concentration » du bassin, c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'une

impulsion de pluie efficace se propage jusqu'à l'exutoire. On a modélisé les débits journaliers des 22 bassins :

- avec prise en compte du temps de concentration ;
- sans prise en compte du temps de concentration.

Il apparaît que la simulation avec prise en compte du « temps de concentration » est nettement meilleure. Logiquement, le gain est plus sensible sur les critères calculés sur les débits naturels, donc plus influencés par les débits de pointe de crue, que sur les critères calculés sur la racine carrés des débits. Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits journaliers est de 12,5 % au lieu de 24 % sur les débits naturels, et de 11 % au lieu de 16 % sur la racine carré des débits.

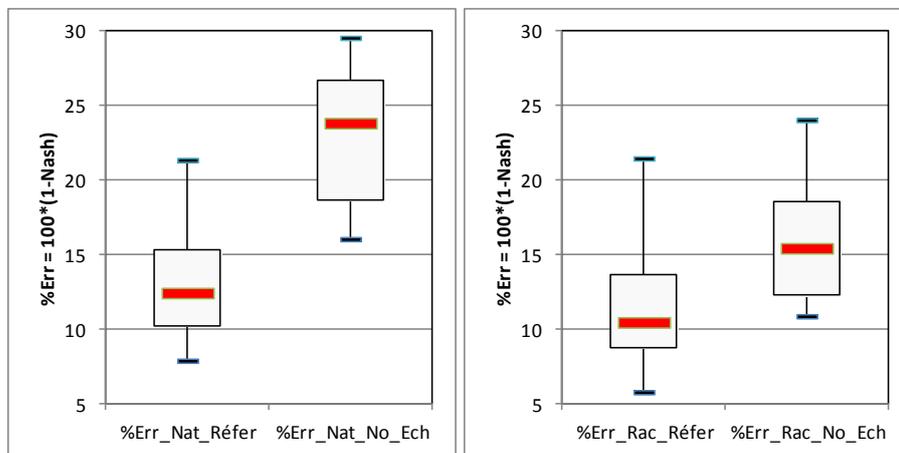


Figure 89 - Prise en compte du temps de concentration. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec temps de concentration ; partie droite : sans temps de concentration. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits.

## 15.5. INTÉRÊT DE LA PRISE EN COMPTE DES ÉCHANGES SOUTERRAINS

On analyse ici l'intérêt de prendre un compte la possibilité d'échanges souterrains avec l'extérieur, c'est-à-dire d'importation ou d'exportation de débits souterrains. On a modélisé les débits journaliers des 22 bassins successivement :

- avec prise en compte d'échanges souterrains ;
- sans prise en compte d'échanges souterrains.

Il est apparu que si on laisse la possibilité d'une correction globale sur l'ETP, la prise en compte ou non de termes d'échanges souterrains n'apporte quasiment pas d'amélioration car les deux phénomènes se compensent (Figure 90).

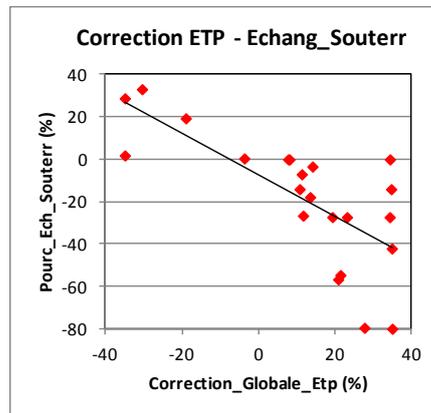


Figure 90 - Compensation de la correction globale d'ETP et du coefficient d'échange souterrain pour les 22 bassins.

On a donc analysé la prise en compte d'échanges souterrains en n'imposant aucune correction globale d'ETP.

Il apparaît que la simulation avec prise en compte d'échanges souterrains est un peu meilleure. Logiquement, le gain est plus sensible sur les critères calculés sur les racines carrées des débits, donc plus influencés par les débits d'étiages, que sur les critères calculés sur les débits naturels. Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits journaliers est de 12,5 % au lieu de 16 % sur les débits naturels, et de 11 % au lieu de 16 % sur la racine carré des débits.

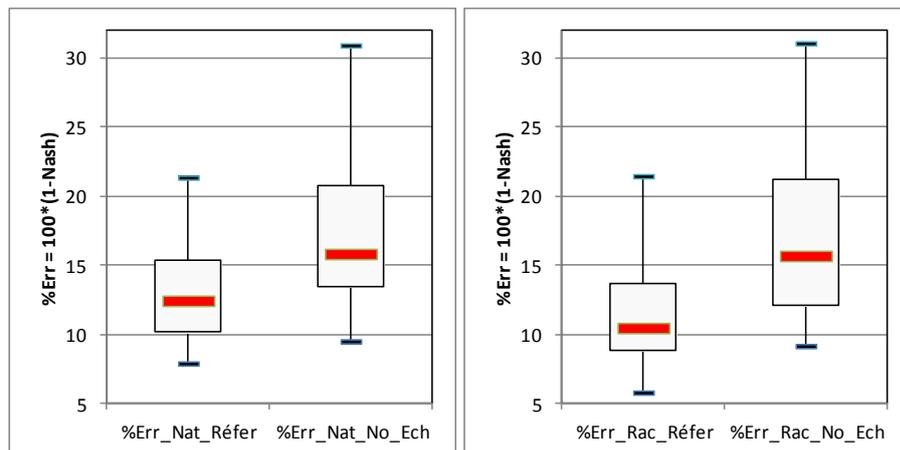


Figure 91 - Prise en compte des échanges souterrains. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec échanges souterrains ; partie droite : sans échanges souterrains. Dessin de gauche : erreur sur les débits ; dessin de droite : erreur relative sur la racine carrée des débits

## 15.6. INTÉRÊT DE L'UTILISATION DE DEUX RÉSERVOIRS SOUTERRAINS

On analyse ici l'intérêt de prendre deux réservoirs souterrains, avec donc deux composantes souterraines. On a modélisé les débits journaliers des 22 bassins successivement :

- avec utilisation d'un seul réservoir souterrain ;
- avec utilisation de deux réservoirs souterrains.

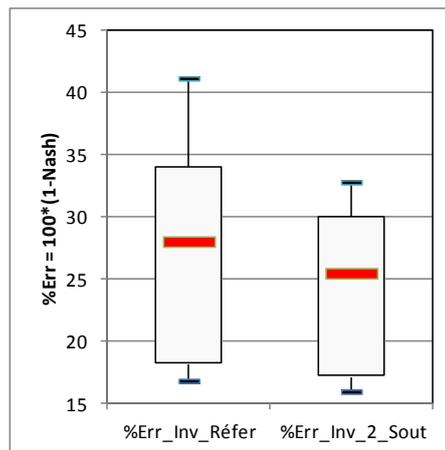


Figure 92 - Prise en compte de deux réservoirs souterrains. Erreur relative des 22 bassins ; partie gauche : avec un seul réservoir souterrain ; partie droite : avec deux réservoirs souterrains. Erreur relative sur les inverses des débits.

Il apparaît que l'utilisation de deux réservoirs souterrains améliore très peu la simulation des débits. Mais, si on s'intéresse spécialement aux étiages, on observe cependant une amélioration. Si on minimise les écarts entre les inverses des débits, on note une amélioration sur ce critère : sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les inverses des débits journaliers est de 25 % au lieu de 28 %. Pour les 10 % de bassins les moins bien simulés, l'erreur relative est nettement améliorée : elle est de 33 % au lieu de 41 %.

## 15.7. RÉCAPITULATION

On présente ici la récapitulation des comparaisons précédentes pour les débits journaliers des 22 bassins :

- simulation de référence : avec réserve sol progressive, avec échanges souterrains, avec temps de concentration ;
- simulation simplifiée, correspondant à la version de Gardénia v6.0 : réserve sol type « réserve utile », pas d'échanges souterrains, pas de correction globale d'ETP, pas de temps de concentration.

Sur les 22 bassins, la médiane de l'erreur relative sur les débits journaliers est de 12,5 % pour la simulation de référence, au lieu de 28 % pour la simulation simplifiée. Sur la racine carrée des débits, la médiane de l'erreur relative est 11 % au lieu de 25 %. La simulation est très significativement améliorée, d'un facteur de 2 à 2,5, en utilisant une réserve progressive, des échanges souterrains et un temps de concentration.

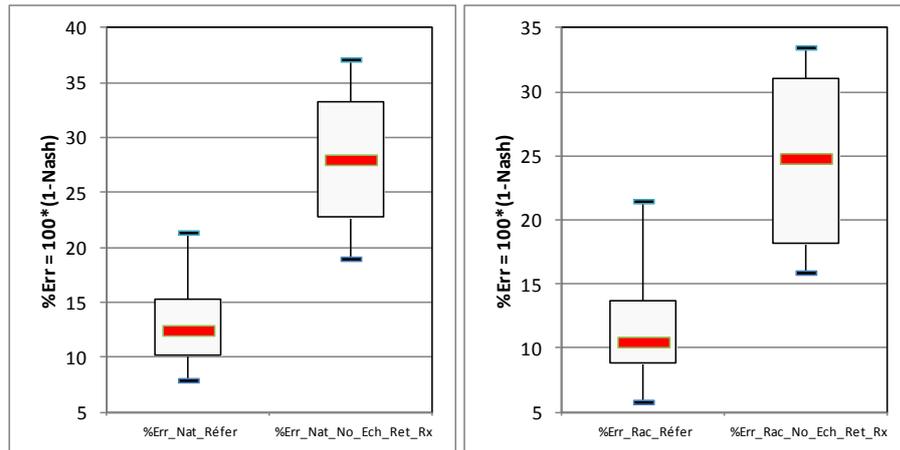


Figure 93 - Erreur relative sur les débits des 22 bassins. Dessin de gauche : débits naturels ; dessin de droite : racine carrée des débits. Partie de gauche de chaque dessin : modélisation de référence ; partie de droite : modélisation simplifiée.



## 16. Références bibliographiques

**Dagneaux D.** (2010) - Étude d'impacts des changements climatiques et socioéconomiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech. Mémoire d'Ingénieur IDEA, AgroParisTech, Yvan Caballero (Dir.), <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00748510>.

**Nash J.E. and Sutcliffe J.V.** (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), p. 282-290.

**Thiéry D.** (1988) – Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. *Journal of Hydrology* 97 (1988), p. 129-148.

**Thiéry D.** (2003) - Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 ann.

**Thiéry D.** (2004) - Le modèle GARDÉNIA avec procédures adaptatives. Note technique NT EAU 2004/01.

**Thiéry D.** (2004) - Prévion de débits ou de niveaux avec le modèle hydrologique global GARDÉNIA 6.5. Note technique NT EAU 2004/02.

**Thiéry D.** (2011) - Plaquette de présentation du code de calcul du BRGM GARDÉNIA v8.1. Note technique NT EAU 2011/05.

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

**Thiéry D.** (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4, p. 325-336.

**Thiéry D.** (1994) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38108 DR/HYT 94. , 114 p.

**Thiéry D., Golaz C.** (2002) - Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the MARTHE model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP-51988-FR. 48 p.



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