



# Synthèse

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **N**iveaux **A**quifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants.

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

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

Une méthode de prévision adaptative opérationnelle a été introduite dans le modèle GARDÉNIA v8.6 de façon à lui permettre d'émettre des prévisions fiables.

Des informations récentes sur le code GARDÉNIA du BRGM sont disponibles sur le site : <http://gardenia.brqm.fr/>

# 1 Principe général de fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA

Le modèle hydrologique global GARDENIA simule par une succession de réservoirs, les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement).

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

En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, ces paramètres ne peuvent être déduits a priori des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale, etc.).

Ils doivent donc être évalués par ajustement (calibration) sur une série d'observations ; La calibration consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits ou des niveaux piézométriques aussi proches que possible des débits ou des niveaux observés.

Une fois calibré le modèle GARDÉNIA peut être utilisé en simulation :

- Extension de données :

A partir des observations climatiques il permet de calculer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, ou le niveau piézométrique en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures.

- Simulation de scénarios :

Simulation de débits ou de niveaux piézométriques résultant de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrage) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (dimensionnement de fondations, de parkings).

À cette possibilité de simulation, GARDÉNIA v8.6 ajoute la possibilité d'émission de prévisions.

Il est ainsi possible de prolonger une série de débits ou de niveaux piézométriques observés jusqu'à une certaine date à partir de des scénarios de précipitations prévisionnels pour les semaines ou mois futurs (sécheresses, périodes de hautes eaux).

## 2 Fonctionnement du modèle

Le modèle GARDÉNIA représente le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère une « entrée » globale (une « lame d'eau » sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une « sortie » unique qui est suivant le cas, le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. Ce modèle simule le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

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

- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement lent.

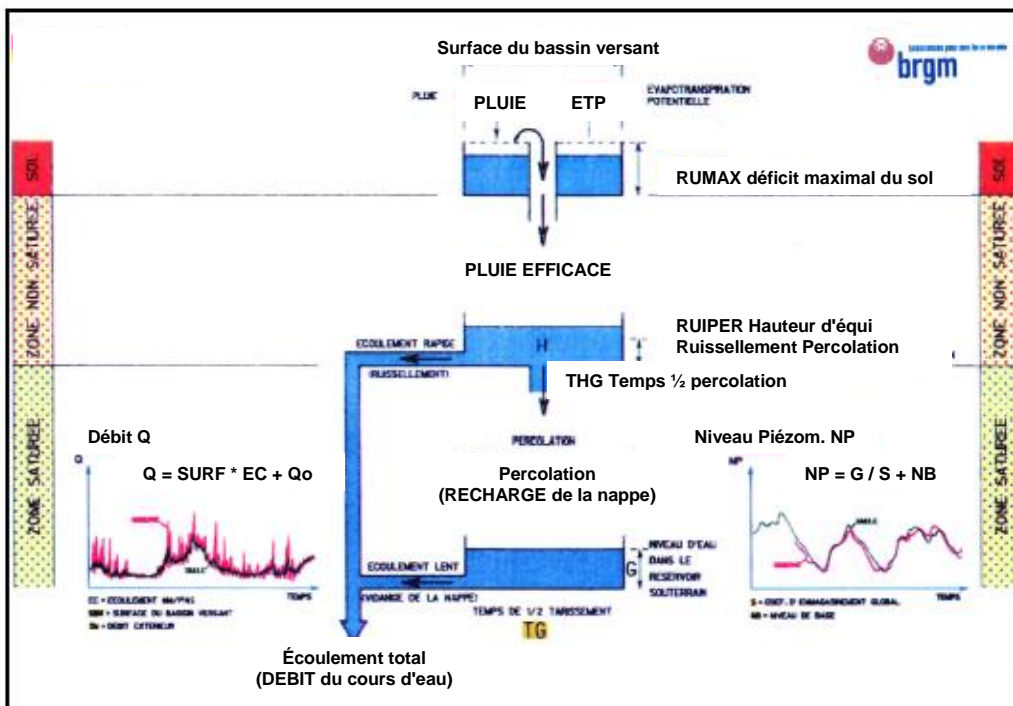
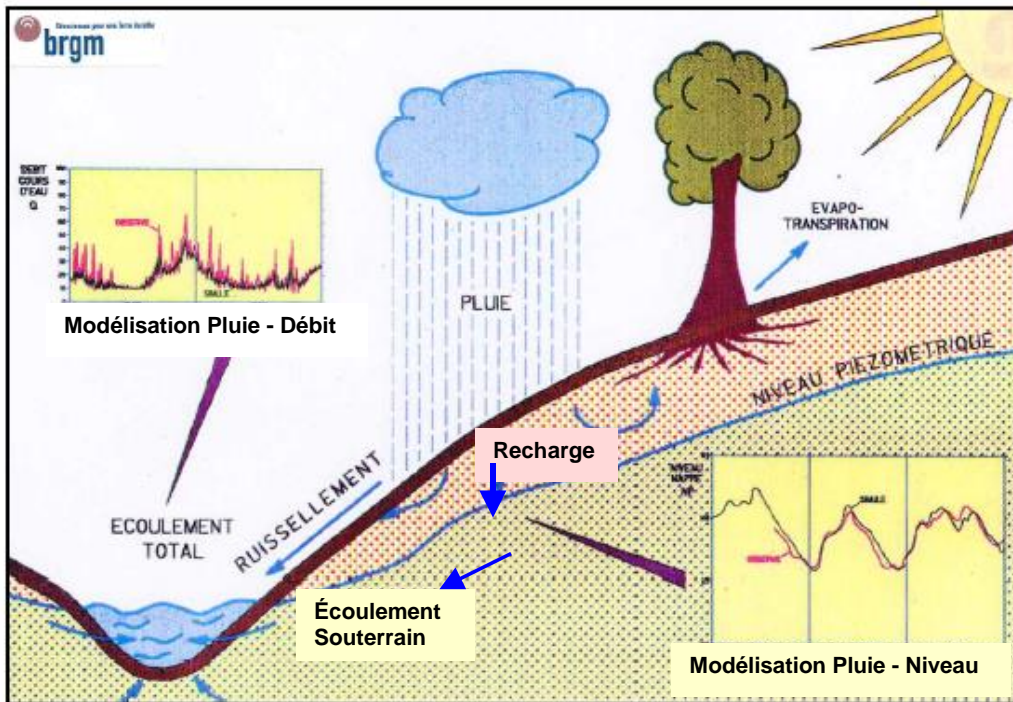


Fig. 1 : schéma de principe du modèle GARDENIA

Par l'intermédiaire des paramètres (et des options) il est possible de configurer le modèle de différentes manières. Le schéma des réservoirs est précisé sur les figures suivantes.

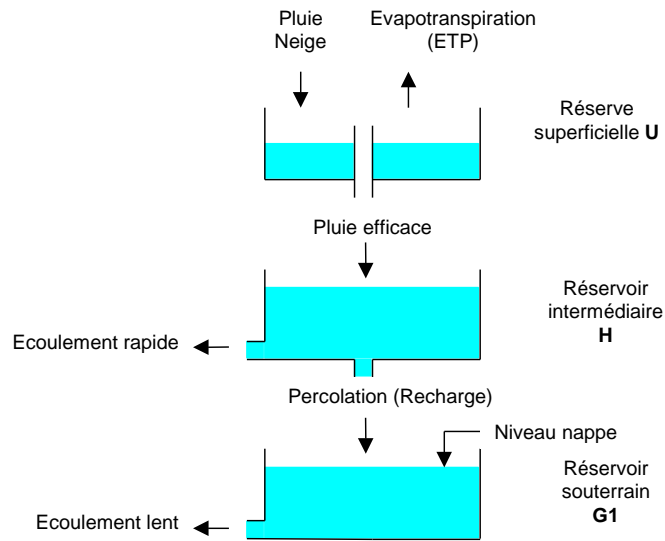


Fig. 2 : Schéma le plus fréquent : 1 seul réservoir souterrain

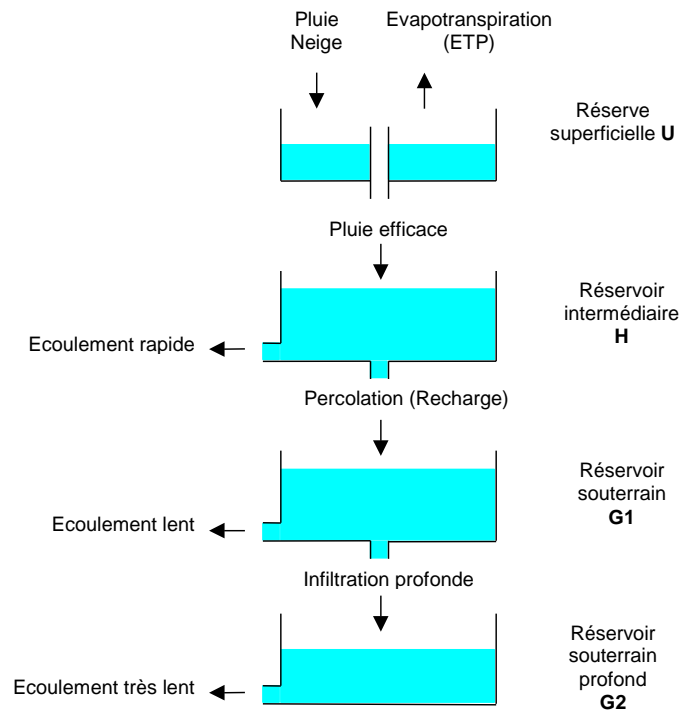


Fig. 3 : Schéma complexe à 2 réservoirs souterrains

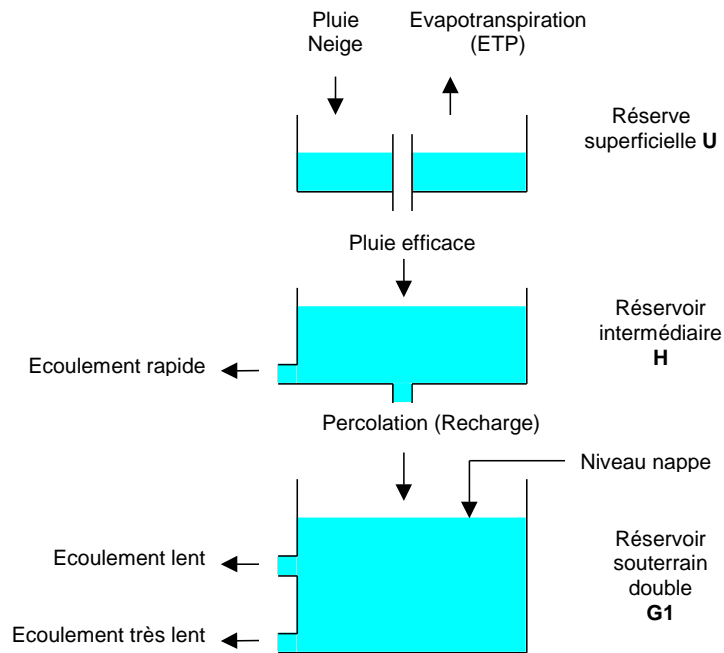


Fig. 4 : Schéma complexe avec 1 réservoir souterrain à 2 orifices de vidange

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

### 3 Principes de la méthode de prévision

#### 3.1 Calculs probabilistes à partir de scénarios

Les précipitations n'étant bien entendu pas connues après la date d'émission de la prévision, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les précipitations futures. On pourrait être tenté de calculer des séquences de précipitations ayant une probabilité de non-dépassement définie et de s'en servir pour calculer des évolutions de débits ou de niveaux correspondantes. Une telle méthode serait totalement incorrecte pour plusieurs raisons :

- Le débit ou le niveau d'un jour ou d'un mois donné résulte le plus souvent des précipitations des 6 mois à 2 ans précédents et il y a une infinité de combinaisons de précipitations qui peuvent produire un même débit (par exemple un hiver très pluvieux suivi d'un printemps très sec, ou bien le contraire, ou bien un hiver moyen suivi d'un printemps moyen).
- Il n'est pas possible de définir une période de 3 mois, 6 mois ou 1 an ayant une probabilité d'occurrence donnée : on peut définir un volume cumulé de pluie pendant 6 mois ayant une probabilité donnée mais il y a une infinité de répartitions possibles.
- Un cumul de pluie de probabilité donnée ne produira pas un débit de la même probabilité car la transformation n'est pas linéaire : le résultat n'est pas le même si les précipitations surviennent en hiver (faible évapotranspiration) ou en été (forte évaporation, pluies peu efficaces), de même si les précipitations sont concentrées en 5 jours (fort ruissellement) ou en 5 mois (forte infiltration)

- Dans tous les cas il faut bien se souvenir qu'une année ayant un cumul de temps de retour 10 ans (probabilité de non-dépassement 90 %) n'est certainement pas une année ayant chaque mois un cumul de précipitation de temps de retour 10 ans. Une telle année aurait certainement un temps de retour plus proche de 100 ans !

Compte tenu de ces remarques la méthode de prévision est la suivante :

- On rassemble un certain nombre d'années de précipitations réellement observées, de l'ordre de 30 à 50 ans si possible (par exemple les années 1951 à 2016 mais il n'est pas nécessaire d'avoir des années contiguës).
- On suppose qu'après la date d'émission de la prévision (le 1<sup>er</sup> septembre 2017 par exemple) les précipitations des 4 mois suivants (septembre à décembre) ont une égale probabilité d'être les précipitations des mois de septembre à décembre de 1951 ou 1952 etc. ou 2016.
- A partir des états du modèle (niveaux de ses réservoirs), GARDÉNIA réalise une simulation par année de précipitations disponible (50 scénarios dans notre exemple correspondant aux 50 années de précipitations).
- On dispose alors de 50 débits calculés pour le 2 septembre, de 50 débits calculés pour le 3 septembre ... 50 débits calculés pour le 31 décembre.
- Pour un jour donné on dispose donc de 50 réalisations et GARDÉNIA calcule le débit de probabilité de non-dépassement X % en classant tout simplement les 50 réalisations et en calculant le quantile X %. Ce calcul est fait séparément pour chaque pas de temps (pour chacun des 120 jours de la période du 2 septembre au 31 décembre dans notre exemple).
- Pour une probabilité de non-dépassement donnée (de 90 % par exemple) on dispose chaque jour d'un débit (qui correspond à des années différentes). GARDÉNIA édite alors ces débits et les dessine. Ce sont des débits probabilistes.
- La courbe tracée donne pour chaque jour le débit ayant une probabilité de non-dépassement donnée (de 90 % dans notre exemple)
- GARDÉNIA réalise également une prévision sans aucune précipitation après la date d'émission de la prévision. Cette prévision donne les débits correspondant à la « prévision garantie ».

### **3.2 Correction des écarts en début de simulation**

Pour calculer les débits ou les niveaux de nappe à partir d'une certaine date il faut, en simulation comme en prévision, démarrer les calculs largement avant cette date pour permettre l'initialisation des niveaux des réservoirs du modèle.

Si la calibration est satisfaisante, le modèle permet généralement de reproduire correctement le fonctionnement d'un bassin versant à partir des précipitations et de l'Évapotranspiration potentielle. Cependant bien que le modèle soit calibré on observe à certaines périodes des écarts de simulation qui peuvent être dus à plusieurs raisons :

- Les précipitations ne sont pas parfaitement connues ou pas homogènes sur tout le bassin.
- Le fonctionnement du bassin est plus complexe que sa schématisation par le modèle. (Le tarissement n'est pas parfaitement exponentiel, la notion de réserve utile en « tout ou rien » est une simplification de la réalité etc.)

De tels écarts en nombre limité ne posent pas de problèmes, cependant ils sont plus gênants s'ils se produisent au moment de l'émission de la prévision.

La différence essentielle entre une simulation et une émission de prévision est en effet la suivante :

- Dans une opération de simulation un écart de simulation au début de la période d'extension ne pose pas de problème car le but est d'obtenir une simulation statistiquement proche de vraies valeurs.
- Dans une opération de prévision, la situation est différente puisqu'on connaît exactement le débit ou le niveau de nappe à la date d'émission et le but est en fait de prévoir la variation par rapport à la dernière situation connue. Par exemple si la valeur observée le jour de l'émission est égale à 100 et si la valeur simulée est égale à 115 et décroît jusqu'à 105 dans les 30 jours suivants l'émission : On ne sait pas comment interpréter la prévision. Sachant que la dernière observation est égale à 100 : est-ce que la valeur dans 30 jours sera 105 comme calculé (soit une augmentation de +5) ou bien de 90 (soit une diminution de 10 ... comme prévu.)

Pour émettre une prévision fiable et utilisable il est donc nécessaire de minimiser au mieux l'écart de simulation initial. En fait pour obtenir des résultats fiables le modèle ne corrige pas uniquement l'écart initial mais corrige régulièrement les éventuels écarts précédant l'émission de la prévision, au fur et à mesure qu'ils apparaissent.

Les écarts de simulation sont réduits par une procédure adaptative qui permet de très légèrement corriger les niveaux des réservoirs du modèle de façon à se rapprocher de manière optimale des débits ou niveaux piézométriques observés. En pratique le modèle calcule de combien il faudrait corriger le niveau des réservoirs en début du pas de temps pour avoir une simulation exacte en fin de pas de temps. Comme il n'y a pas de solution unique, car on pourrait corriger davantage le réservoir intermédiaire ou davantage le réservoir souterrain, le modèle considère qu'il est plus sûr de corriger davantage un réservoir qui a de plus grandes variations d'alimentation. La correction est donc proportionnelle à l'écart-type des alimentations de chaque réservoir. L'amplitude des corrections est déterminée par modélisation inverse.

Dans certains cas il pourrait être dangereux de corriger les niveaux de façon à reproduire exactement les observations de débits. Par exemple si les mesures de débits sont imprécises ou perturbées. Le modèle ne corrige donc pas à 100 % les écarts observés mais applique à chaque pas de temps un « taux de correction » inférieur à 100 % (par exemple 10% ou 60 %) Si l'écart persiste, il sera corrigé quasiment totalement en quelques pas de temps.

Le taux de correction optimal est déterminé automatiquement par le code de calcul par essais / erreurs en émettant une prévision à chaque pas de temps de la période d'observation et en comparant les prévisions émises avec les réalisations.

A titre de comparaison, une procédure de correction simplifiée a également été introduite dans le modèle. Elle consiste à simplement décaler la simulation pour la faire coïncider avec l'observation du jour d'émission de la prévision



## 4 Données nécessaires

Pour réaliser un calcul de prévision il faut disposer des mêmes données que pour réaliser un calcul de simulation. Il faut en outre pour la génération des scénarios, disposer :

- d'un fichier de données pluviométriques de prévision. Ce sont des données pluviométriques au même pas de temps que les données de pluies utilisées pour la modélisation. Le fichier des données de pluies-prévision devra généralement comporter un grand nombre d'années de façon à permettre le calcul de nombreux scénarios. Les données de ces années de prévisions devront toutes être complètes, sans valeurs manquantes.
- d'un fichier de températures de prévision : uniquement dans les cas où on prend en compte la fonte de la neige.

Compte tenu de la faible variabilité interannuelle de cette donnée, GARDÉNIA v8.6 n'utilise pas de fichier d'évapotranspiration ETP de prévision. Pendant la période de prévision, après la date d'émission, le modèle utilise pour chaque pas de temps la moyenne des ETP observées pour ce pas au cours de toutes les années de données de la période de simulation.

## 5 Exemples d'application

### 5.1 Application au débit de la Somme à Abbeville

La figure 5 présente la simulation du débit de la Somme à Abbeville sur la période 1995-2003, sans aucune réadaptation.

Trois prévisions sont présentées à titre d'illustration :

- Prévision au 1<sup>er</sup> septembre 2003
- Prévision au 1<sup>er</sup> mars 2002
- Prévision au 31 décembre 2001

Pour être démonstratif, on a volontairement choisi 3 dates pour lesquelles il y avait un décalage entre simulation et observation. Pour chacun des cas la prévision a été faite à partir de 42 scénarios d'évolution correspondant à 42 années d'observations de pluies journalières. Le taux de réajustement est dans tous les cas égal à 10 %, c'est à dire que quand un écart est constaté, le modèle applique seulement 10 % de la correction des états des réservoirs qui permettrait une correction totale à cette date. Si l'écart persiste, la correction se poursuit dans les jours suivants. A titre de comparaison on a également appliqué la méthode simplifiée pour montrer l'intérêt de la méthode de prévision adaptative.

La légende des courbes s'interprète comme suit :

- Observ. = Série des débits journaliers observés
- Simul. = Série des débits journaliers simulés jusqu'à la date d'émission de la simulation. En fait il ne s'agit pas réellement d'une « simulation » mais d'une simulation réadaptée

- Prév\_Garan = Prévission du niveau « garanti » : c'est à dire prévision réalisée en considérant qu'aucune précipitation ne surviendra après la date d'émission de la prévision. Ce sont les débits simulés les plus bas possibles, d'où le terme de « garanti ». Tout modèle étant approché, il ne faut cependant pas considérer les valeurs calculées comme garanties à 100 %
- Prév\_10 % = Prévission ayant une probabilité de non-dépassement de 10 %, c'est à dire que pour chaque pas de temps on a une probabilité de 10 % d'observer un débit inférieur (donc une probabilité de 90 % d'observer un débit supérieur ou égal.)
- Prév\_50 % = Prévission ayant une probabilité de non-dépassement de 50 %, c'est la valeur médiane.
- Prév\_90 % = Prévission ayant une probabilité de non-dépassement de 90 %, c'est à dire que pour chaque pas de temps on a une probabilité de 90 % d'observer un débit inférieur (donc une probabilité de 10 % d'observer un débit supérieur ou égal.)
- Prév\_X % = Prévission ayant une probabilité de non-dépassement de X %

Ces trois émissions de prévision montrent qu'avec un taux de correction faible, égal à 10 %, le code de calcul GARDÉNIA v8.6 permet de corriger correctement les écarts initiaux ce qui lui permet de réaliser des prévisions fiables.

## 5.2 Application à la prévision d'un niveau piézométrique

Il est également possible d'appliquer la méthode de prévision adaptative à la prévision de l'évolution d'un niveau de nappe. A titre d'illustration on présente l'application au piézomètre de Sompuis situé en Champagne. Ce piézomètre, bien que situé en dehors du bassin de la Somme a été choisi car un modèle GARDENIA était disponible en ce point. La figure 9 montre le résultat de la calibration et la figure 10 montre la prévision de niveau émise le 31 Mars 2004. Il est possible d'émettre des prévisions conditionnelles à long terme dans une telle nappe libre en raison de son inertie et de la lenteur de ses réactions comme le montre la réponse impulsionnelle moyenne représentée sur la figure 11.

## 6 Conclusion

La méthode de prévision adaptative développée et présentée ici est opérationnelle et permet de réaliser des prévisions de débits à l'exutoire d'un bassin ou des niveaux de nappes en un piézomètre.

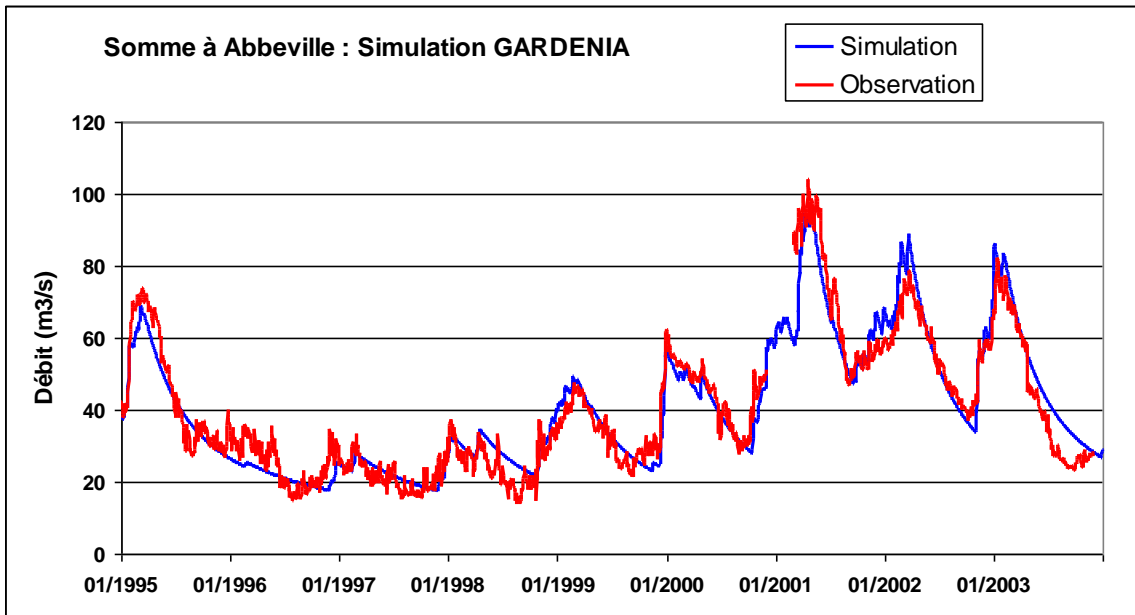


Fig. 5 : Simulation du débit de la Somme à Abbeville sur la période 1995-2003 (sans aucune réadaptation)

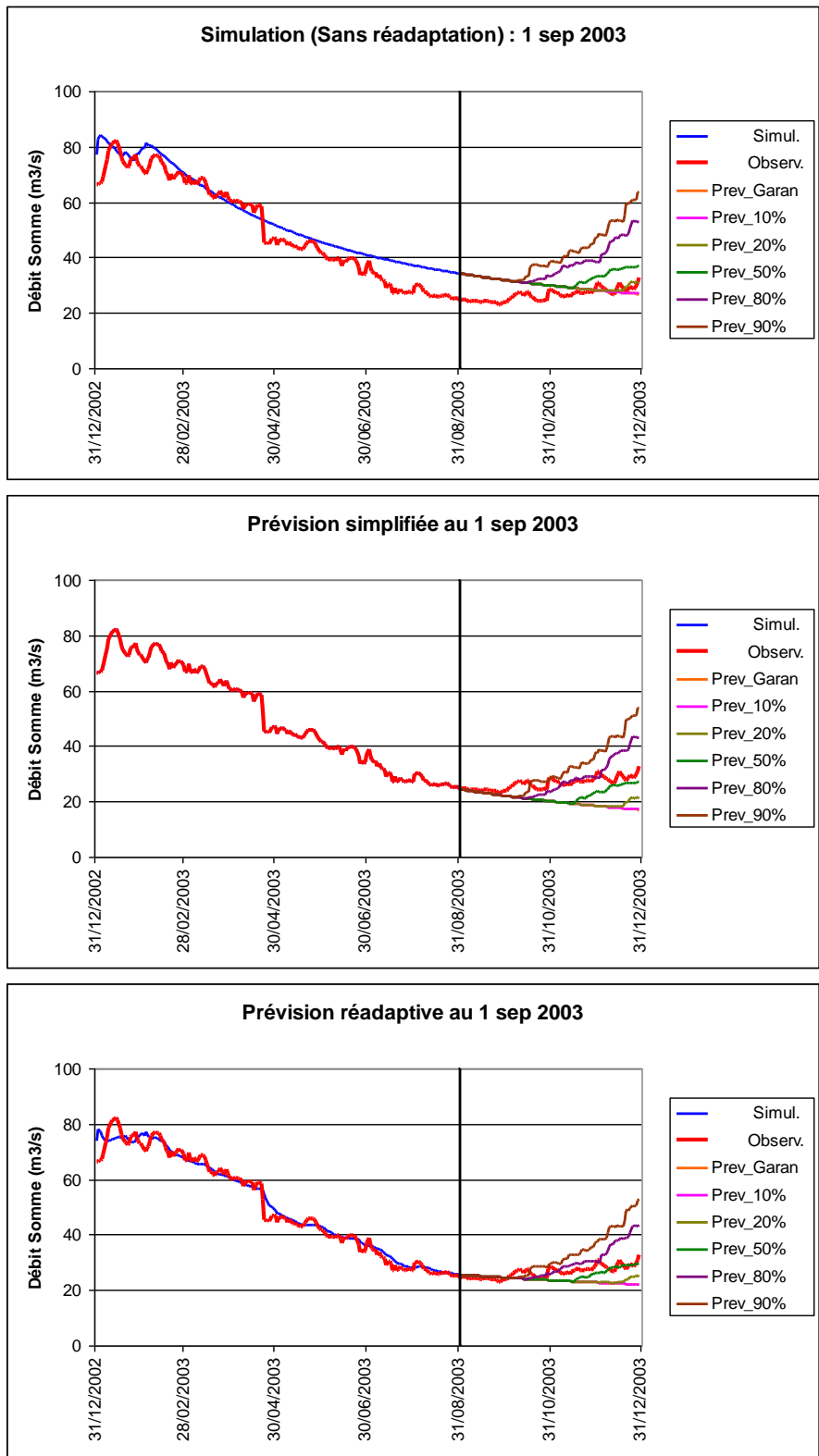


Fig 6 : Prévision au 1<sup>er</sup> Sep. 2003 : de haut en bas : simulation, prévision simplifiée et prévision adaptative. On remarque que la prévision simplifiée présente un tarissement trop rapide, alors que la prévision adaptative est correcte

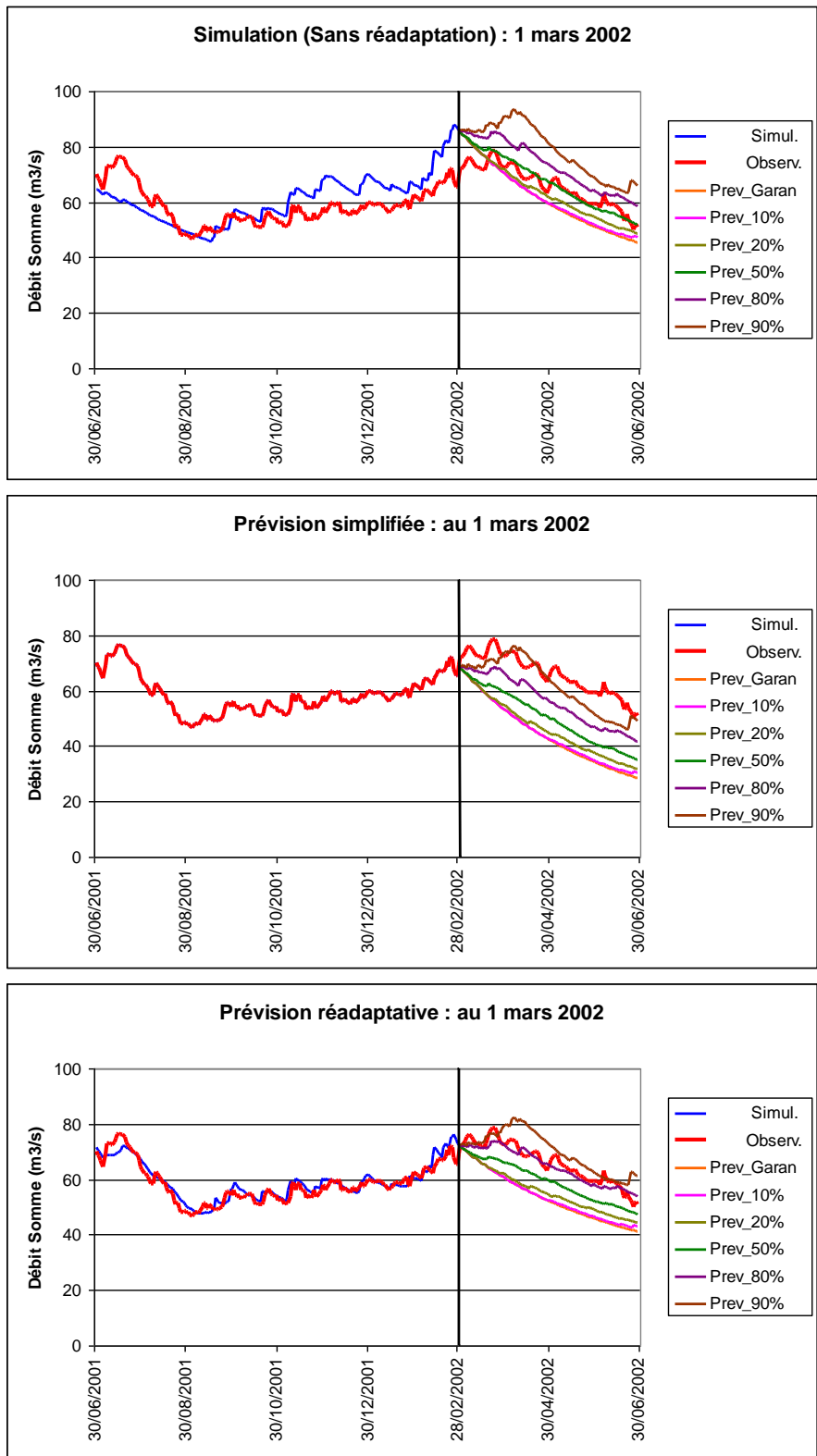


Fig 7 : Prévision au 1<sup>er</sup> Mars 2002 : de haut en bas : simulation, prévision simplifiée et prévision adaptative. On voit que la prévision adaptative permet une prévision fiable

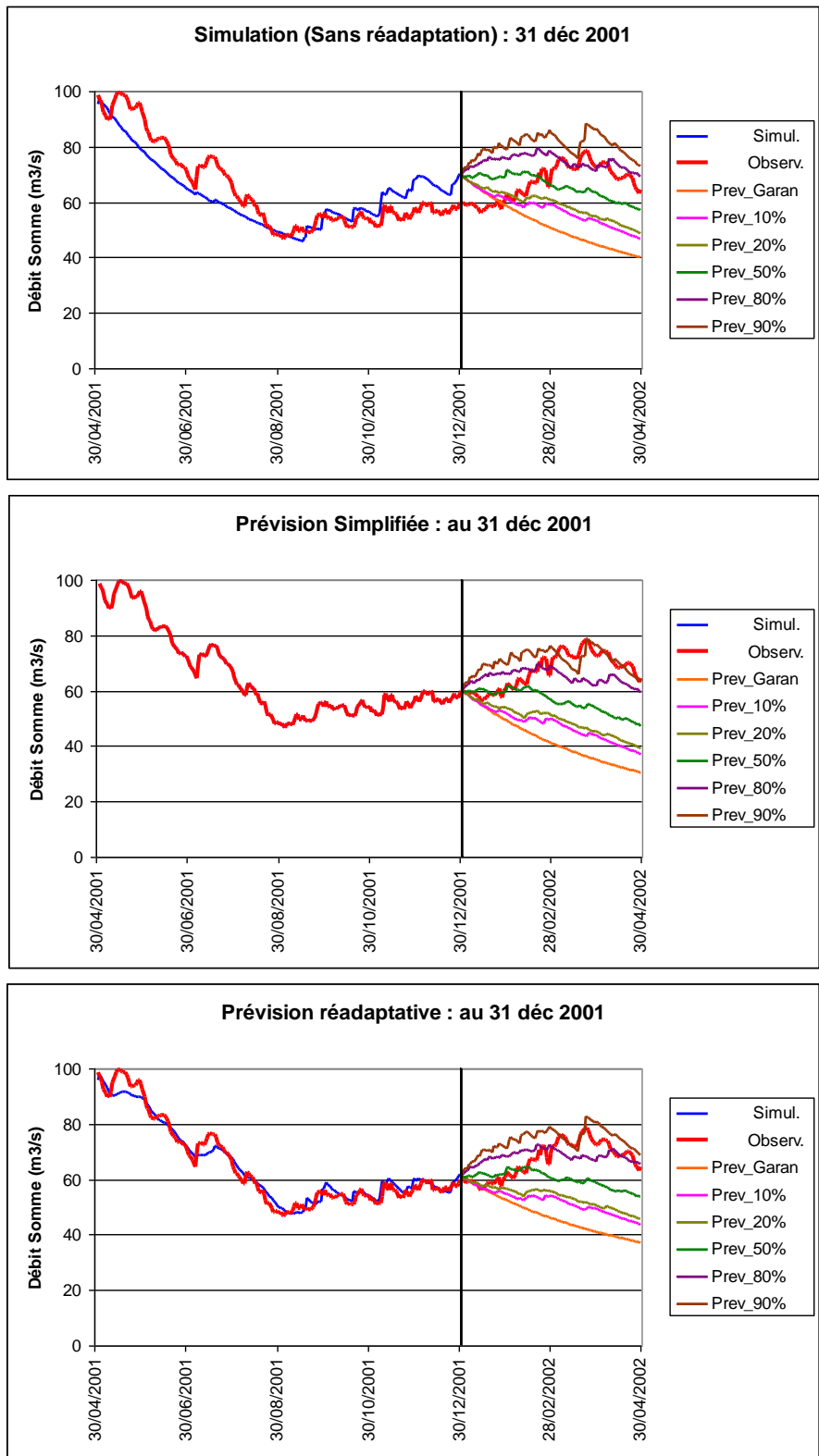


Fig 8 : Prévision au 31 Déc 2001 : de haut en bas : simulation, prévision simplifiée et prévision adaptative. La prévision adaptative permet une prévision fiable alors que la prévision simplifiée présente un tarissement peu réaliste.

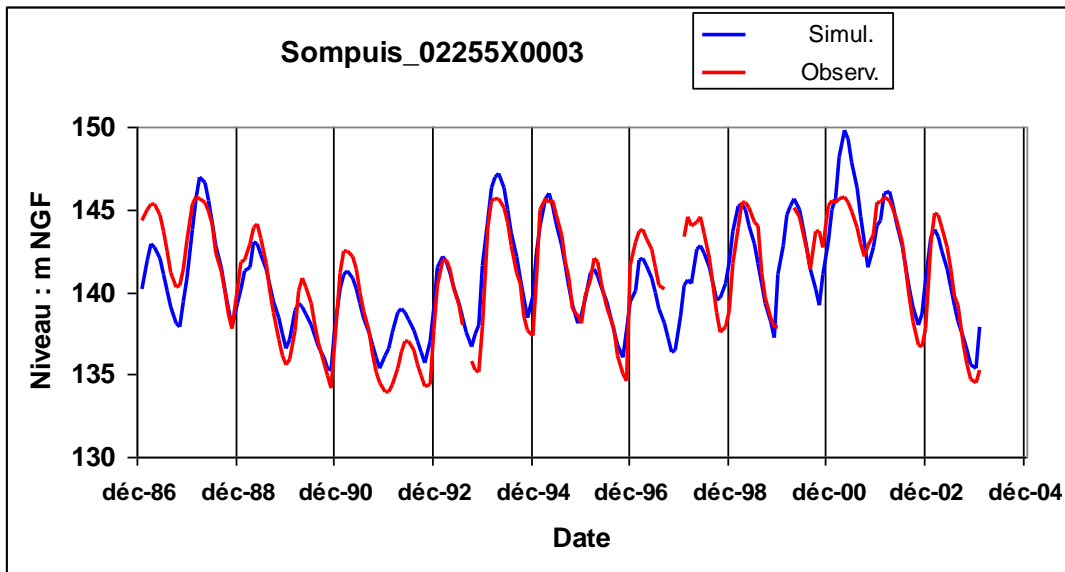


Fig 9 : Piézomètre Sompuis (Champagne) : Calibration du modèle GARDÉNIA sur la période 1987-2003

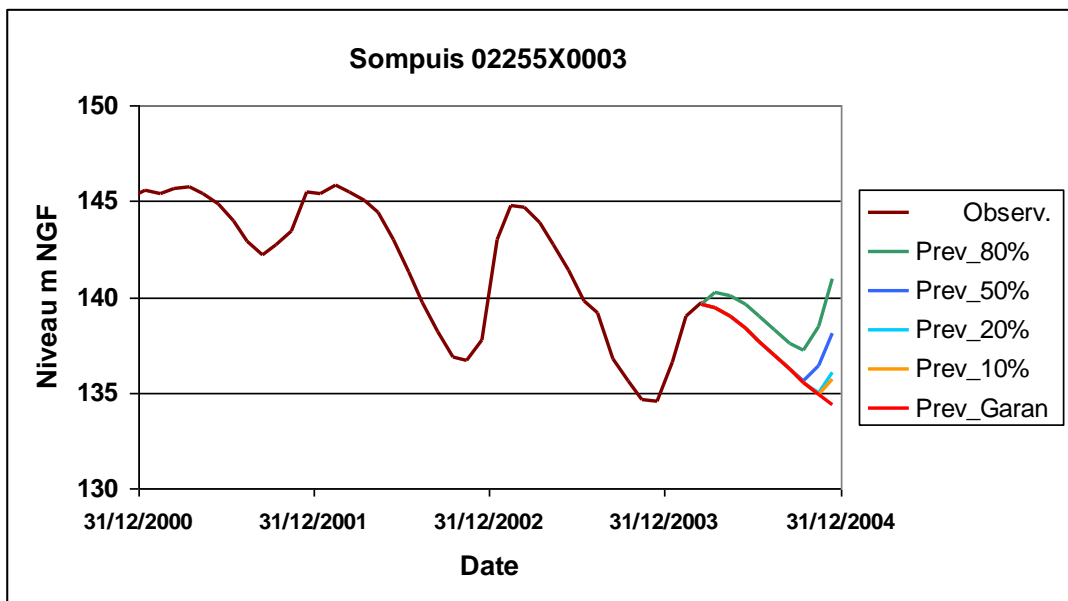


Fig 10 : Piézomètre Sompuis (Champagne) : Prévission adaptative émise à fin Mars 2004. Il est ainsi possible de prévoir pour l'été 2004 une probabilité de 50 % d'avoir un niveau inférieur ou égal à celui de l'été sévère de fin 2003

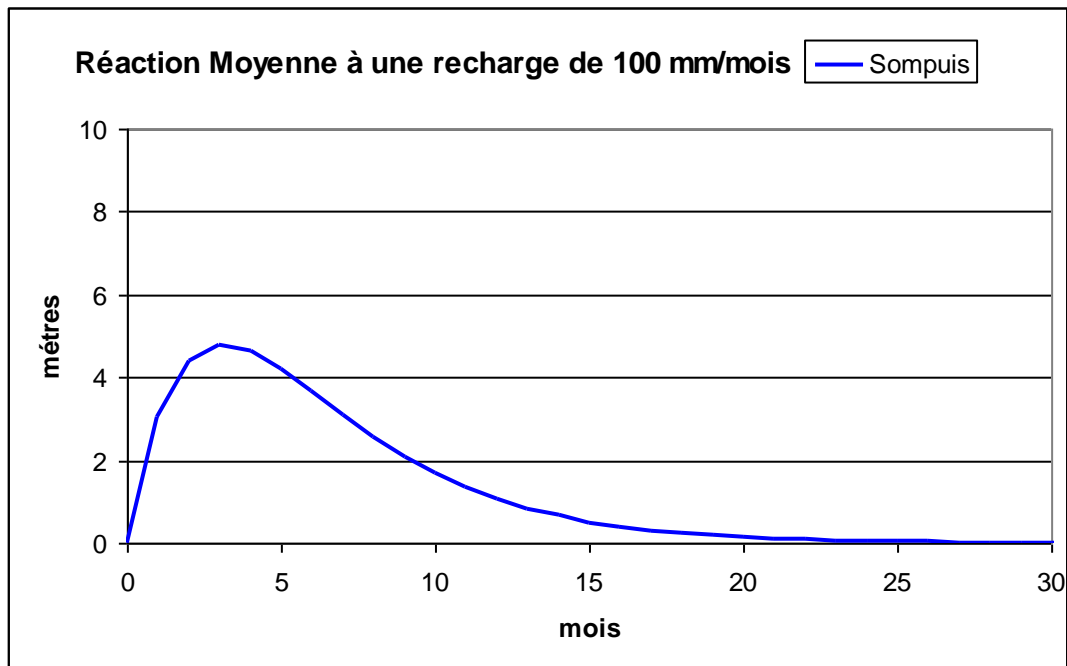


Fig 11 : Piézomètre Sompuis (Champagne) : Réponse impulsionnelle moyenne. C'est la réaction moyenne du piézomètre à une pluie efficace de 100 mm en un mois. Les relations étant non linéaires, c'est la réponse impulsionnelle moyenne en supposant que le piézomètre est initialement dans un état d'équilibre moyen.



## 7 Références bibliographiques

Thiéry D (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 130 p., 93 fig.  
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61720-FR.pdf> . (Accès Juin 2018).

Thiéry, D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR, 136 p., 66 fig., 2 ann.  
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf> . (Accès Juin 2018).

Thiéry, D. (2015) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.  
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf> . (Accès Juin 2018).

Thiéry, D. (2009) – Modèles à réservoirs en hydrogéologie. *in Traité d'hydraulique environnementale - Volume 4 - Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 7 pp. 239-249. ISBN 978-2-7462-2006-5.

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