

Validation du code de calcul **GARDÉNIA** par modélisations physiques comparatives

BRGM/RP-64500-FR
Juillet 2015
Mise à jour : Janvier 2019

Dominique Thiéry

Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives

BRGM/RP-64500-FR

Juillet 2015

Mise à jour : Janvier 2019

Rapport écrit dans le cadre des projets
de développement du BRGM 2015-2016

Dominique Thiéry

Vérificateur :

Nom : P. Stollsteiner

Date : 27/04/2015



Signature :

Approbateur :

Nom : S. Lallier

Date : 30/07/2015



Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

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

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

Thiéry D. (2015) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **N**iveaux **A**quifères) (Thiéry, 2011, 2013, 2014) est un modèle hydroclimatique global à réservoirs pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants.

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

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

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

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. C'est un modèle analogique qui simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées.

Le code de calcul GARDÉNIA est utilisé 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 calibration 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).

Dans la pratique, GARDÉNIA permet d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, d'étendre des données de débits et/ou de niveaux. Il peut ainsi aider au dimensionnement de différents types d'ouvrages (barrages) ou d'aménagements (parkings, ouvrages de captage en rivière, microcentrales électriques), etc.

En effet, le modèle, une fois calibré, est en mesure :

- De reconstituer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, et / ou les niveaux piézométriques en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures ;
- De simuler :
 - Des débits résultant de périodes de sécheresse (pour le calcul de débits d'étiage ou le dimensionnement de barrages) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (pour le dimensionnement de fondations, de parkings, d'ouvrages enterrés),
 - Des niveaux piézométriques ponctuels de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations prévisionnels (sécheresses, périodes de hautes eaux).

GARDÉNIA n'est pas un logiciel de type « boîte noire » ou « traitement du signal » : c'est un « modèle analogique ». Le but de ce rapport est de montrer que son schéma de fonctionnement

correspond à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel, ce qui est un gage important de robustesse. La robustesse est la capacité à produire des simulations fiables y compris dans des conditions de fonctionnement (sécheresses, changement climatique) différentes de celles de la période de calibration.

Le rapport présente cinq exemples de validation, principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels en régime transitoire par une approche physique, en milieu non saturé, avec l'équation de Richards, et en milieu saturé, avec la loi de Darcy.

Ces modélisations ont été réalisées avec le code de calcul MARTHE du BRGM qui utilise une discrétisation par volumes finis.

Les cinq exemples de validation présentés sont les suivants :

- Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.
- Modélisation de parcelles expérimentales en sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sonde à neutrons.
- Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches : validation du schéma de calcul de l'influence de pompages. Comparaison avec la modélisation effectuée avec le code MARTHE de l'influence des pompages.
- Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant ayant une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes.
- Modélisation d'un bassin versant disposant de mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant des fluctuations de plus de 20 mètres en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés par le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau spatialisé avec propagation amont – aval.

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

Sommaire

1. Introduction	9
2. Description du modèle GARDÉNIA	11
2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE GLOBAL À RÉSERVOIRS	11
2.2. DOMAINES D'APPLICATION	11
2.2.1. Application à l'extension de séries de débits d'un bassin jaugé	11
2.2.2. Exploitation ultérieure de séries de débits	11
2.3. LES DONNÉES NÉCESSAIRES À L'UTILISATION DU MODÈLE	12
2.3.1. La lame d'eau	12
2.3.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	12
2.3.3. La température moyenne de l'air	12
2.3.4. Les débits à l'exutoire et les niveaux piézométriques	13
2.4. FONCTIONNEMENT DU MODÈLE	13
2.4.1. Introduction	13
2.4.2. Prise en compte de l'influence de pompages dans la nappe	16
3. Validation des lois physiques de GARDÉNIA	19
3.1. VALIDATION DU SCHÉMA DE CALCUL D'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LE SOL ET DE PERCOLATION. ÉCOULEMENT DANS UN LYSIMÈTRE	21
3.1.1. Modélisation avec le code MARTHE	21
3.1.2. Modélisation avec le code GARDÉNIA	24
3.2. VALIDATION DU SCHÉMA DE CALCUL D'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LE SOL. ÉCOULEMENT À TRAVERS UNE PARCELLE EXPÉRIMENTALE	27
3.2.1. Résultats obtenus sur la parcelle de sol nu	27
3.2.2. Résultats obtenus sur la parcelle de maïs	29
3.3. VALIDATION DU SCHÉMA DE MODÉLISATION DE L'INFLUENCE D'UN POMPAGE SUR UN NIVEAU DE NAPPE	31
3.3.1. Modélisation avec GARDÉNIA	31
3.3.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe	32
3.4. VALIDATION DU SCHÉMA DE MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS	35
3.4.1. Modélisation avec GARDÉNIA	35
3.4.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul des écoulements souterrains	36

3.5. VALIDATION DE LA MODÉLISATION D'UN HYDROSYSTÈME RÉEL	39
3.5.1. Modélisation avec le code de calcul spatialisé MARTHE en présence d'un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval	39
3.5.2. Modélisation avec de code de calcul global GARDÉNIA	41
3.5.3. Comparaison des paramètres des deux simulations.....	42
4. Conclusion	45
5. Références bibliographiques	47

Liste des figures

Figure 1 - Schéma de principe du modèle GARDÉNIA.....	14
Figure 2 - Schéma le plus simple : un seul réservoir souterrain.	15
Figure 3 - Schéma complexe : deux réservoirs souterrains.	15
Figure 4 - Schéma complexe : un seul réservoir souterrain à deux orifices de vidange.....	16
Figure 5 – Exemple d'influence d'un pompage sur un niveau piézométrique.....	17
Figure 6 – Lysimètre : cumul de l'évapotranspiration réelle. Simulation GARDÉNIA (trait bleu) et Simulation MARTHE + équation de Richards (trait rouge)	22
Figure 7 – Lysimètre : cumul du débit de drainage. Simulation GARDÉNIA (trait bleu) et Simulation MARTHE + équation de Richards (trait rouge)	22
Figure 8 – Lysimètre : teneur en eau à 25 cm de profondeur : Simulation MARTHE.....	23
Figure 9 – Lysimètre : teneur en eau à 85 cm de profondeur. Simulation MARTHE.....	23
Figure 10 – Lysimètre : variation du stock en eau, estimé à partir d'une pondération entre les teneurs en eau à 25 cm (10 %) et à 85 cm (90 %). Simulation MARTHE.....	23
Figure 11 – Lysimètre : Validation de l'ETR calculée par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs mesurées et calculées avec le code MARTHE	24
Figure 12 – Lysimètre : Validation du débit de drainage calculé par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs calculées avec le code MARTHE.....	24
Figure 13 – Lysimètre : comparaison des variation de stock en eau dans le sol calculées par les codes GARDÉNIA et MARTHE + équation de Richards	25
Figure 14 – Site de St André, sol nu : Débit de drainage simulé par GARDÉNIA et par MARTHE de 1991 à 1993.	28
Figure 15 – Site de St André, sol nu : Cumuls des évaporation + transpiration réelle et du drainage. Comparaison des observations du LTHE (symboles) et des simulations par GARDÉNIA (traits).	29
Figure 16 – Site de St André, année 1993 : Cumuls de l'évaporation + transpiration réelle et du drainage. À gauche : sol nu ; à droite : parcelle de maïs. Symboles = Observations du LTHE; Traits = simulations GARDÉNIA. On note l'évapotranspiration plus importante pour la parcelle de maïs.	30
Figure 17 – Piézomètre Perpignan influencé par des pompages : Niveaux journaliers observés et simulés	31
Figure 18 – 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.33	

Figure 19 – Piézomètre Perpignan : comparaison de l'influence du pompage sur le niveau piézométrique calculé avec le code MARTHE (en rouge) et avec le code GARDÉNIA (en bleu).....	33
Figure 20 – Débit de l'Austreberthe à Saint Paër simulé par le code GARDÉNIA.	35
Figure 21 – Composante souterraine du débit de l'Austreberthe à Saint Paër calculée par le code GARDÉNIA.	36
Figure 22 – 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.	37
Figure 23 – 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 24 – Schématisation du bassin de la Voulzie pour une modélisation avec le code MARTHE.	39
Figure 25 – Maillage et position du cours d'eau et du piézomètre pour la modélisation du bassin de la Voulzie avec le code MARTHE.....	40
Figure 26 – Simulation avec le code MARTHE du débit de la Voulzie à Jutigny et du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron.....	41
Figure 27 – Comparaison de la simulation du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.....	41
Figure 28 – Comparaison de la simulation du débit de la Voulzie à Jutigny avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.....	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : Bassin de la Voulzie. Comparaison des paramètres des codes GARDÉNIA et MARTHE	42
---	----

1. Introduction

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **D**Ébits et des **N**iveaux **A**quifères) (Thiéry, 2011, 2013, 2014) est un modèle hydroclimatique global à réservoirs pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants.

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

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) ;
et / ou
- le niveau piézométrique 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.

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. C'est un modèle analogique qui simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées.

GARDÉNIA n'est pas de type « boîte noire » ou « traitement du signal », mais c'est un « modèle analogique ». Le but de ce rapport est de montrer que son schéma de fonctionnement correspond à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel, ce qui est un gage important de robustesse. La robustesse est la capacité à produire des simulations fiables y compris dans des conditions de fonctionnement (sécheresses, changement climatique) différentes de celles de la période de calibration.

Le rapport présente cinq exemples de validation, principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels en régime transitoire par une approche physique, en milieu non saturé, avec l'équation de Richards (1931), et en milieu saturé, avec la loi de Darcy (1856).

Ces modélisations ont été réalisées avec le code de calcul MARTHE du BRGM qui utilise une discrétisation par volumes finis.

Les cinq exemples de validation présentés sont les suivants :

- Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.

Cet exemple permet la comparaison de la fonction « production » (capacité du réservoir sol etc.) de GARDÉNIA, hors fonction transfert, avec des mesures et des calculs en Zone Non Saturée selon l'équation de Richards.

- Modélisation de parcelles expérimentales en sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sonde à neutrons.

Cet exemple permet la comparaison de la fonction production (capacité du réservoir sol etc.) de GARDÉNIA, avec des mesures en conditions naturelles, et des calculs en Zone Non Saturée selon l'équation de Richards.

Application à un sol nu et à un sol cultivé.

- Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches.

Cet exemple permet la validation du schéma de calcul de l'influence de pompages par comparaison avec la modélisation, effectuée avec le code MARTHE.

- Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant ayant une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emménagement uniformes.

Cet exemple permet la validation de la seule fonction de transfert de GARDÉNIA (réservoir souterrain G), puisque la même fonction production est utilisée dans les 2 cas.

- Modélisation d'un bassin versant disposant des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant fluctuations de plus de 20 mètres en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés par le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval.

Cet exemple permet la validation du schéma de transfert (réservoirs G, et H) pour simuler un exemple avec à la fois le débit d'un cours d'eau et le niveau d'une nappe, avec temps de propagation vers la rivière.

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

2. Description du modèle GARDÉNIA

Ce chapitre extrait de la notice d'utilisation du code GARDÉNIA v8.6 (Thiéry 2014) décrit succinctement :

- Le principe de fonctionnement d'un modèle hydrologique global ;
- Le domaine d'application de GARDÉNIA ;
- Les données nécessaires à son utilisation ;
- Les schémas de fonctionnement.

2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE GLOBAL À RÉSERVOIRS

Un modèle hydrologique global simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par les paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.).

En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, ces paramètres, bien qu'ayant un sens physique, peuvent difficilement être déduits *a priori* des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale, etc.).

Les paramètres doivent donc être déterminés :

- soit par ajustement (calibration) sur des séries d'observations ;
- soit, exceptionnellement, par transposition à partir de la modélisation de bassins versants proches et de caractéristiques similaires.

2.2. DOMAINES D'APPLICATION

2.2.1. Application à l'extension de séries de débits d'un bassin jaugé

L'application la plus fréquente du modèle GARDÉNIA est l'extension de données hydrométriques dans le temps. Ayant calibré le modèle sur une courte série de pluies, débits et niveaux (quelques années), on utilise une série de pluies plus longue (généralement disponible) pour générer avec le modèle une série correspondante de débits et de niveaux piézométriques.

2.2.2. Exploitation ultérieure de séries de débits

Les séries de débits générées par un modèle peuvent ensuite être utilisées :

- pour évaluer les ressources en eau disponibles en cas de sécheresse d'occurrence rare (alimentation en eau potable, irrigation, etc.) ;

- pour dimensionner des micro-centrales ou des barrages-réservoirs par la simulation de la gestion de ceux-ci en temps réel sur une série chronologique ;
- pour mettre au point un système de gestion de ces équipements (en utilisant les possibilités de prévision pour améliorer les performances de la gestion).

2.3. Les données nécessaires à l'utilisation du modèle

Il faut disposer des données suivantes :

- une série continue de précipitations (lames d'eau) ;
- une série continue d'évapotranspirations potentielles (ETP)
- éventuellement une série temporelle de débits de prélèvement (ou d'injection) dans son bassin ;
- éventuellement une série continue de températures de l'air (uniquement si l'on prend en compte la fonte de la neige) ;
- éventuellement une série continue de précipitations neigeuses (équivalent en eau) facultative ;
- éventuellement une série, pas forcément continue, de débits à l'exutoire du bassin versant.
- éventuellement une série, pas forcément continue, de niveaux en un piézomètre situé dans le bassin.

Ces 2 à 7 séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant le début des mesures de débit, ou même pendant plusieurs années auparavant en cas de simulation de niveaux piézométriques (pour faciliter l'initialisation du modèle).

Par ailleurs, la calibration du modèle fait intervenir des paramètres « hydrologiques » (capacité des réservoirs sol, temps de tarissement, coefficient de correction de la lame d'eau...) qui seront décrits plus bas.

2.3.1. La lame d'eau

La lame d'eau pendant le pas de temps est une moyenne pondérée des précipitations des différents postes pluviométriques relatifs au bassin versant. En cas de précipitations neigeuses, l'équivalent en eau de la neige est ajouté à la pluie.

2.3.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

La valeur utilisée est généralement l'ETP calculée selon la formule de Penman ou éventuellement selon la formule mensuelle de Turc (Turc, 1961).

2.3.3. La température moyenne de l'air

On utilisera généralement la valeur définie comme la moyenne des températures minimale et maximale (de chaque jour ou de chaque mois).

Comme pour les précipitations, on sera parfois amené à pondérer les données de plusieurs postes. Il sera souvent nécessaire de corriger ces températures pour tenir compte des différences d'altitude entre le bassin étudié et les postes de mesure disponibles.

2.3.4. Les débits à l'exutoire et les niveaux piézométriques

Ces données peuvent présenter des lacunes et ne sont pas nécessaires dans le cas de l'utilisation de GARDÉNIA en simulation.

Pour une calibration sur des niveaux de nappe, il faut s'assurer que le piézomètre pris en compte n'est pas trop près d'un cours d'eau, car l'influence de ce dernier pourrait masquer les variations de niveau de la nappe dans le piézomètre.

2.4. Fonctionnement du modèle

2.4.1. Introduction

Le modèle GARDÉNIA représente le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire, *via* le niveau aquifère en un point du bassin (Figure 1). Le modèle est global, car il considère des « entrées » globales (une « lame d'eau » sur le bassin et une évapotranspiration potentielle moyenne sur le bassin) et une ou deux « sorties » qui sont le débit à l'exutoire du bassin et / ou les variations de niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. Le modèle simule le cycle de l'eau par un système de trois ou quatre 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 de l'écoulement lent.

L'allure exponentielle du tarissement des débits de rivières et des niveaux des nappes souterraines est identique à celle de la vidange d'un réservoir. Le comportement d'un système aquifère peut donc être représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transferts non linéaires permettent cependant d'améliorer cette approche un peu schématique.

• Réservoirs du modèle

Le modèle GARDÉNIA comprend au maximum quatre (ou cinq) réservoirs ; cependant, par l'intermédiaire des paramètres (et des options), il est possible d'utiliser un schéma simplifié ne faisant intervenir que deux ou trois réservoirs. Le schéma des réservoirs est précisé sur les Figure 2 à Figure 4.

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

• Fonction « production » et fonction « transfert »

Le calcul comporte deux parties traditionnellement appelées : fonction « production » et fonction « transfert ».

La fonction « production » détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité sera évaporée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir « plus tard » à l'exutoire du bassin.

La fonction « transfert » détermine à quel moment l'eau qui n'a pas été évapotranspirée ressortira à l'exutoire du bassin ou arrivera à la nappe. Le transfert s'effectue par passage à travers les deux ou trois réservoirs inférieurs du modèle.

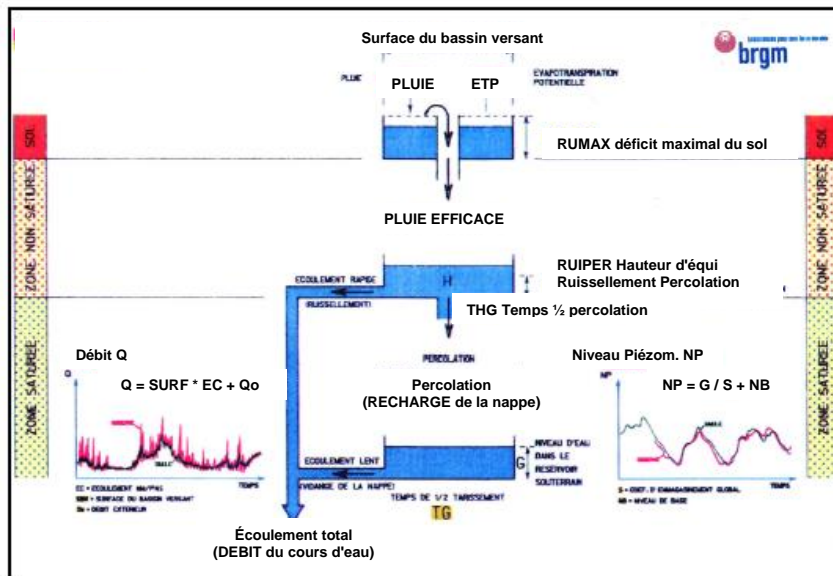
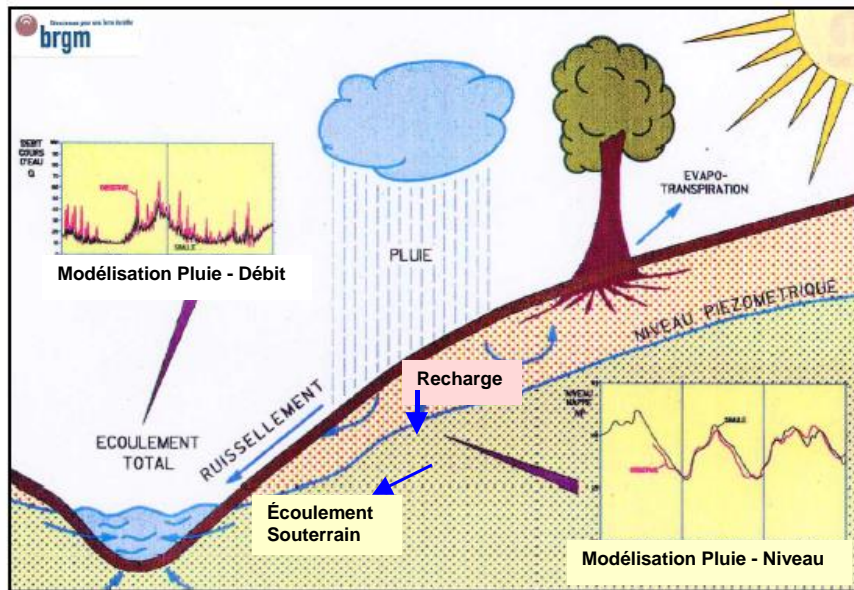


Figure 1 - Schéma de principe du modèle GARDÉNIA.

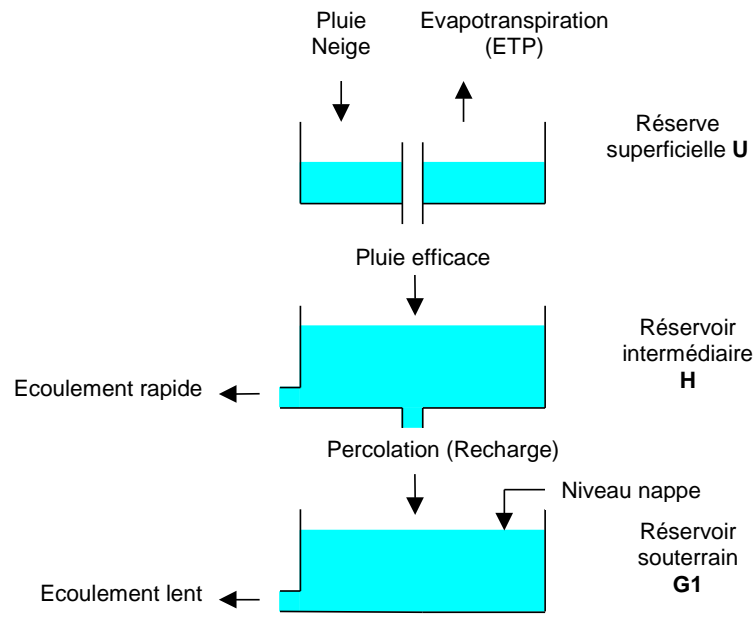


Figure 2 - Schéma le plus simple : un seul réservoir souterrain.

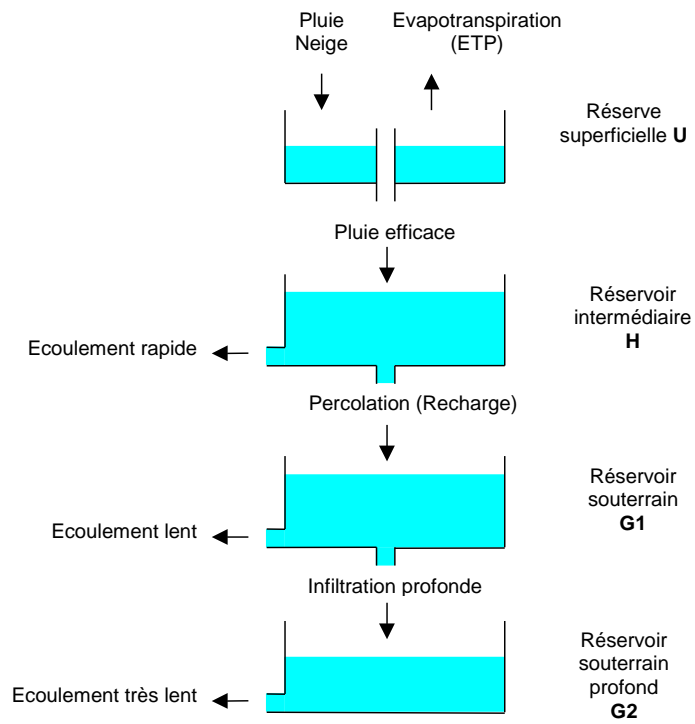


Figure 3 - Schéma complexe : deux réservoirs souterrains.

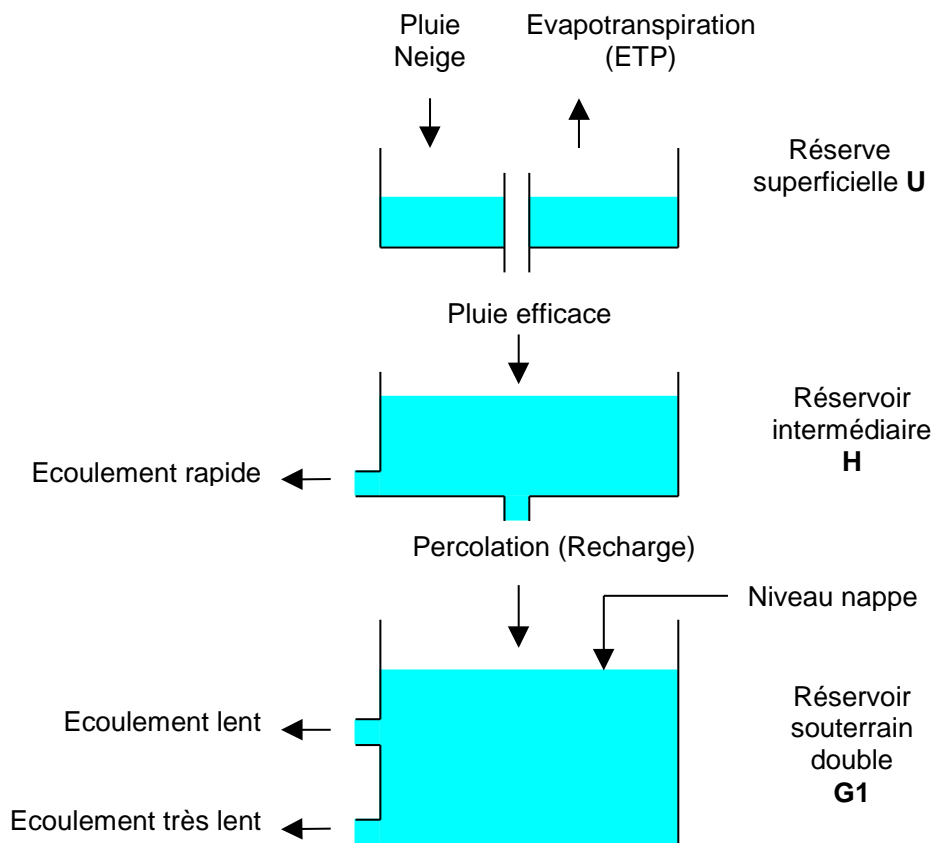


Figure 4 - Schéma complexe : un seul réservoir souterrain à deux orifices de vidange.

2.4.2. Prise en compte de l'influence de pompages dans la nappe

Pour prendre en compte l'influence des pompages, il faut disposer d'une série de mesures de débits pompés (notés négativement) ou injectés (notés positivement) qui doit être au même pas de temps que celui des pluies. L'unité de débit utilisée pour cette série n'est pas imposée et peut être choisie de manière quelconque. L'influence de la série des pompages (et/ou injections) sur les débits de rivière se fait par l'intermédiaire d'une relation qui fait intervenir trois paramètres. L'influence de ces mêmes débits de pompage est calculée par la même relation mais avec des

valeurs différentes de ces trois paramètres. La Figure 5 montre un exemple d'influence de pompage sur un niveau de nappe.

L'influence du pompage sur les débits de rivière est une série de variations de débits qui s'ajoute à la série des débits de rivière calculée à partir des séries climatiques.

L'influence du pompage sur les niveaux de nappe est une série de variations de niveau de nappe qui s'ajoute à la série des niveaux de nappe calculée à partir des séries climatiques.

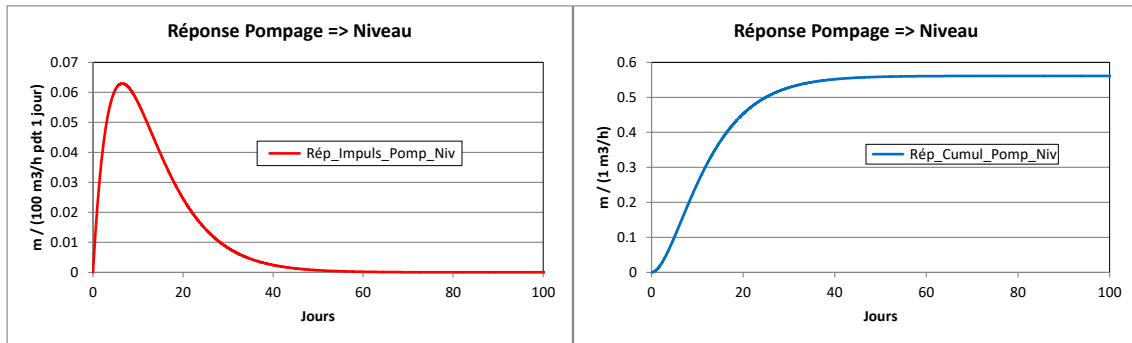


Figure 5 – Exemple d'influence d'un pompage sur un niveau piézométrique.

3. Validation des lois physiques de GARDÉNIA

Ce chapitre a pour objet de montrer que les lois décrivant le fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA correspondent à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel. Cette validation est réalisée principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels avec le code de calcul MARTHE (Thiéry 1993, 2010a, 2010c, 2015a, b, c) qui utilise une approche physique, selon la loi de Darcy (1856) en milieu saturé et l'équation de Richards (1931) en milieu non saturé, avec une discrétisation par volumes finis.

Cinq exemples de validation sont présentés :

1. Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation, et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.

Cet exemple permet la comparaison de la fonction « production » (capacité du réservoir sol etc.) de GARDÉNIA, hors fonction transfert, avec des mesures et des calculs en Zone Non Saturée selon l'équation de Richards.

On obtient une bonne simulation du flux d'ETR, du flux de drainage et aussi de la teneur en eau dans le sol à plusieurs profondeurs.

⇒ Validation de la fonction production de GARDÉNIA par rapport aux lois physiques réelles.

2. Modélisation de parcelles expérimentales de sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.

Cet exemple permet la comparaison de la fonction production (capacité du réservoir sol etc.) de GARDÉNIA, avec des mesures en conditions naturelles et des calculs en Zone Non Saturée selon l'équation de Richards.

On obtient une bonne simulation du flux d'ETR, du flux de drainage, à la fois pour un sol nu et pour un sol cultivé.

⇒ Validation de la fonction production de GARDÉNIA par rapport aux lois physiques réelles.

3. Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches.

Cet exemple permet la validation du schéma de calcul de l'influence de pompages par comparaison avec la modélisation, effectuée avec le code MARTHE.

(Il n'y a pas de cours d'eau).

On obtient des simulations quasiment identiques.

⇒ Validation de la fonction de prise en compte de pompages de GARDÉNIA

4. Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant avec une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes.

Cet exemple permet la validation de la seule fonction de transfert de GARDÉNIA (réservoir souterrain G), puisque la même fonction production est utilisée dans les 2 cas. On obtient exactement la même simulation de la composante souterraine du débit (dans l'épaisseur du trait).

⇒ Valide la fonction transfert de GARDÉNIA : la loi de tarissement de GARDÉNIA permet de reproduire les variations du débit souterrain modélisées avec le schéma physique de MARTHE.

5. Modélisation d'un bassin versant avec des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant des fluctuations de plus de 20 mètres d'amplitude en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés avec le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau.

Cet exemple permet la validation par rapport à MARTHE du schéma de transfert (réservoirs G, et H) pour simuler un exemple avec à la fois le débit d'un cours d'eau et le niveau d'une nappe, avec temps de propagation vers la rivière.

Le temps de $\frac{1}{2}$ tarissement TG de GARDÉNIA est égal à la valeur qui peut être déterminée à partir des valeurs physiques (transmissivité, coefficient d'emmagasinement et dimension du bassin versant)

⇒ Valide la fonction transfert de GARDÉNIA : la fonction de transfert de GARDÉNIA permet de reproduire correctement les variations de débit et de niveau de nappe mesurés. La simulation GARDÉNIA est quasiment identique à celle obtenue avec le modèle physique de MARTHE, avec des paramètres très semblables.

3.1. Validation du schéma de calcul d'évapotranspiration dans le sol et de percolation. écoulement dans un lysimètre

Cette application montre la possibilité de simuler des écoulements à travers un sol non saturé. Elle permet 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 d'un ensemble de cinq grands lysimètres de 1.1 mètre de haut et de 1.0 m² de surface soumis à des cultures de céréales et suivis pendant une période de 21 mois (Herbst et al. 2005).

Cinq monolithes de sol non perturbé (lysimètres à drainage libre) contenant un Luvisol orthique ont été utilisés pour suivre le bilan hydrique du sol. Les monolithes avaient une profondeur de 1.1 m et une surface de 1.0 m². Du blé d'hiver a été semé en premier avec une période de pré-germination en novembre 1988. Pendant la période de végétation suivante, c'est de l'orge d'hiver (*Hordeum vulgare* L.) qui a été semée puis récoltée le 11 mai 1990. La culture suivante était de l'avoine (*Avena sativa* L.), qui a été récoltée le 13 août 1990. Pendant les 627 jours de la période du 25 novembre 1988 au 13 août 1990, les précipitations, l'humidité de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement ont été suivis sur une base quotidienne. La teneur en eau du sol a été mesurée environ tous les 4 à 5 jours avec une sonde à neutrons à différentes profondeurs. Le drainage du lysimètre a pu être mesuré directement, tandis que l'évapotranspiration réelle ETR (mm) a été calculée à partir du bilan hydrique des sols :

$$\text{ETR} = \text{Pluie} - \text{Drainage} - \text{Diff_Stock}$$

3.1.1. Modélisation avec le code MARTHE

Ces données ont été modélisées avec différents codes de calcul et en particulier avec le code de calcul MARTHE du BRGM, en prenant en compte le développement de la végétation (Thiéry, 2016). Les Figure 6 à Figure 10 montrent que le code MARTHE permet de simuler correctement le cumul de l'ETR, le cumul du drainage, les teneurs en eau à 25 cm et à 85 cm, ainsi que la variation de stock en eau dans le sol (estimée à partir des mesures disponibles à 25 cm et 85 cm).

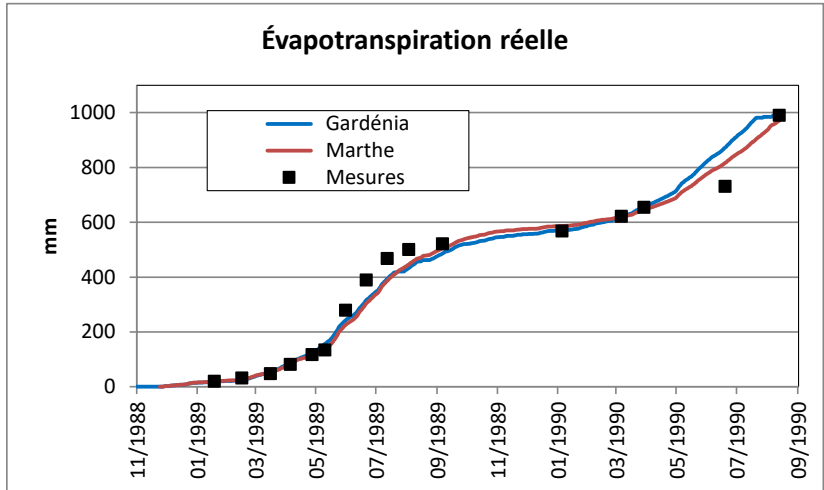


Figure 6 – Lysimètre : cumul de l'évapotranspiration réelle.
Simulation GARDÉNIA (trait bleu) et Simulation MARTHE + équation de Richards (trait rouge)

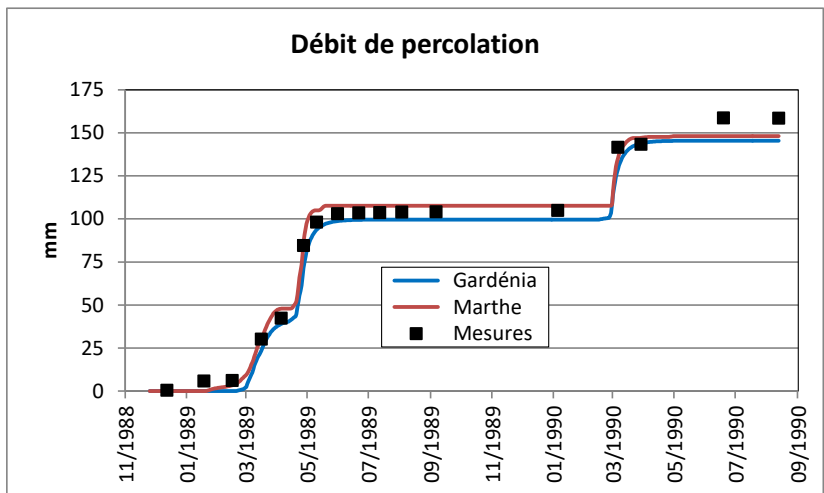


Figure 7 – Lysimètre : cumul du débit de drainage.
Simulation GARDÉNIA (trait bleu) et Simulation MARTHE + équation de Richards (trait rouge)

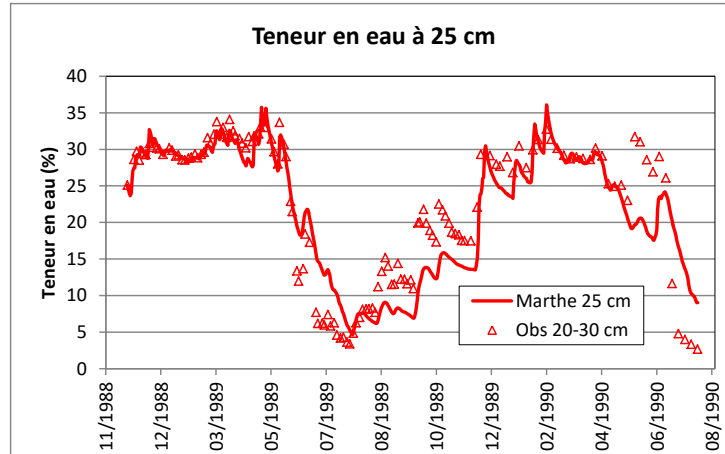


Figure 8 – Lysimètre : teneur en eau à 25 cm de profondeur : Simulation MARTHE.

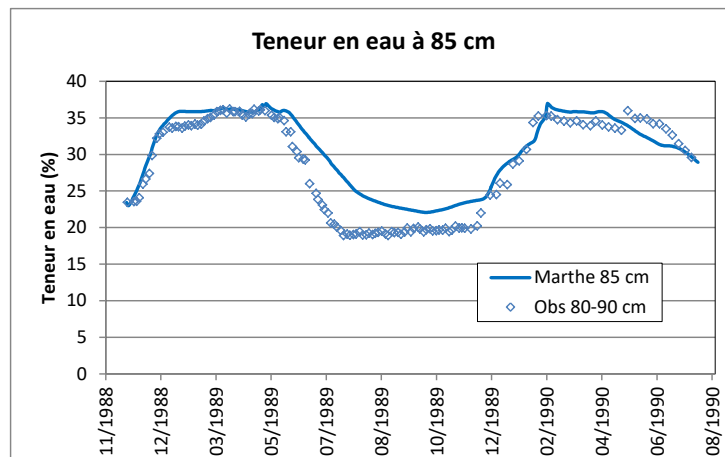


Figure 9 – Lysimètre : teneur en eau à 85 cm de profondeur. Simulation MARTHE.

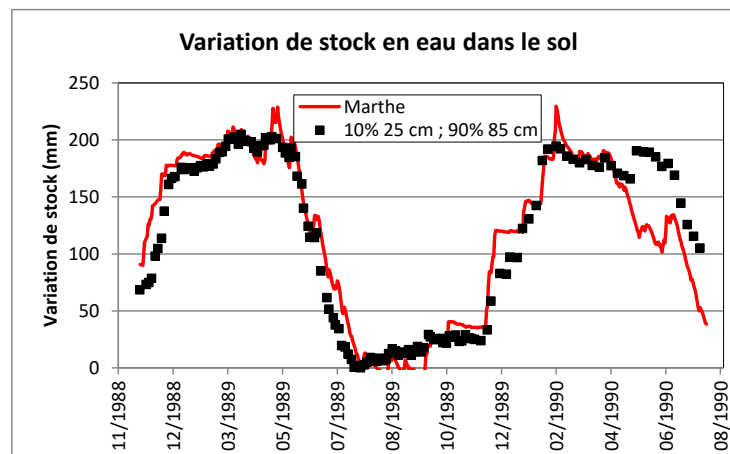


Figure 10 – Lysimètre : variation du stock en eau, estimé à partir d'une pondération entre les teneurs en eau à 25 cm (10 %) et à 85 cm (90 %). Simulation MARTHE.

3.1.2. Modélisation avec le code GARDÉNIA

Comme le code MARTHE permet de reproduire le bilan d'eau et les écoulements dans le lysimètre, on a calibré le code GARDÉNIA sur les débits de drainage calculés par MARTHE. Les Figure 11 à Figure 13, et aussi les Figure 6 et Figure 7, montrent que la simulation par le code GARDÉNIA donne des résultats proches de celles du code MARTHE en termes de débit de drainage, mais aussi en termes d'évapotranspiration réelle (ETR) et de stock en eau.

La capacité du réservoir sol de type « réserve utile » est égale à 179 mm. Le coefficient d'ajustement sur le débit de drainage est égal à 0.906, soit un coefficient de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) égal à 0.82, et le biais de simulation est égal à -1.7 %.

Ceci constitue une validation des schémas de fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA.

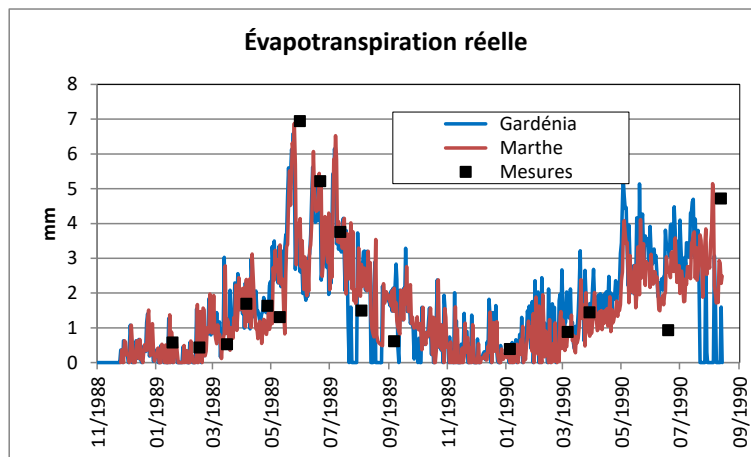


Figure 11 – Lysimètre : Validation de l'ETR calculée par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs mesurées et calculées avec le code MARTHE

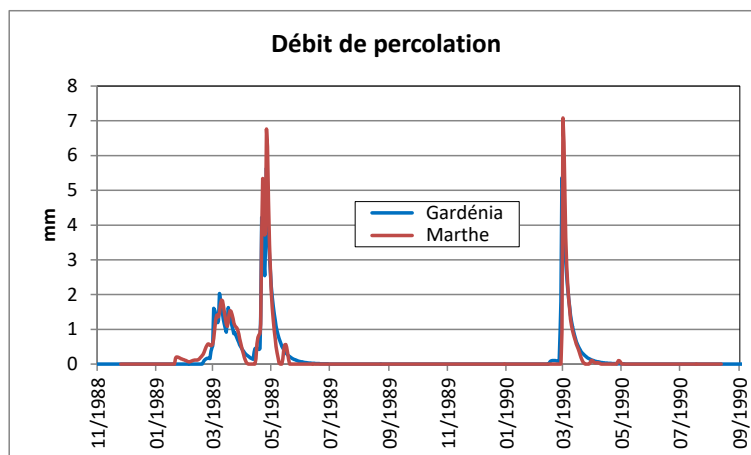


Figure 12 – Lysimètre : Validation du débit de drainage calculé par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs calculées avec le code MARTHE

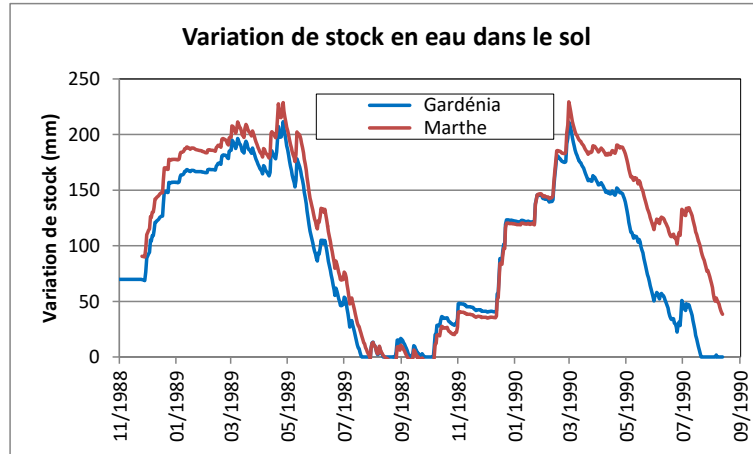


Figure 13 – Lysimètre : comparaison des variation de stock en eau dans le sol calculées par les codes GARDÉNIA et MARTHE + équation de Richards

3.2. Validation du schéma de calcul d'évapotranspiration dans le sol. écoulement à travers une parcelle expérimentale

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'évapotranspiration 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 en sol nu et une parcelle cultivée avec 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 8 profondeurs
- Les succions à 5 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, en prenant en compte le développement de la végétation (Thiéry, 2016). 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)
Pour le sol nu (« bare soil ») et pour le sol cultivé :
- Précipitations (+ irrigations) (mm/j)
- Drainage calculé par le code de calcul MARTHE (mm/j)

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013).

3.2.1. Résultats obtenus sur la parcelle de sol nu

La calibration automatique, sur la période 1991-1993, permet d'obtenir une simulation excellente avec le code GARDÉNIA (Figure 14) : 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. La capacité du réservoir sol (de type « réserve utile ») est égale à 11 mm, valeur assez faible mais qui s'explique parce que le sol est nu.

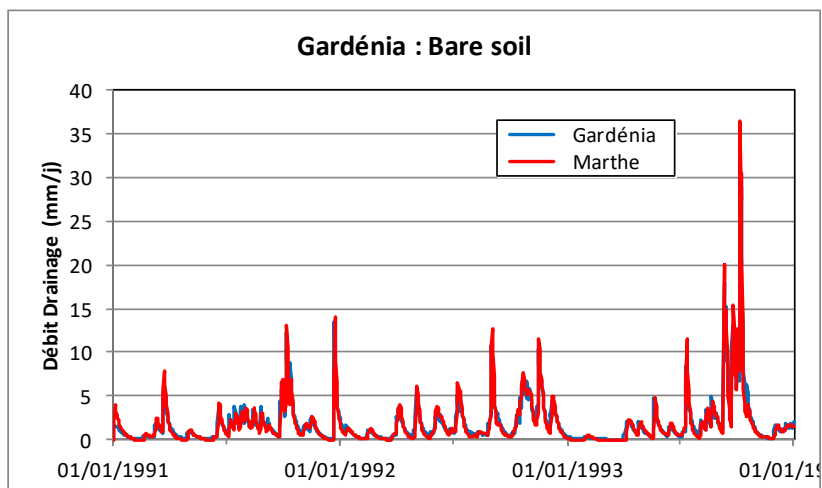


Figure 14 – Site de St André, sol nu : Débit de drainage simulé par GARDÉNIA et par MARTHE de 1991 à 1993.

La Figure 15 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.

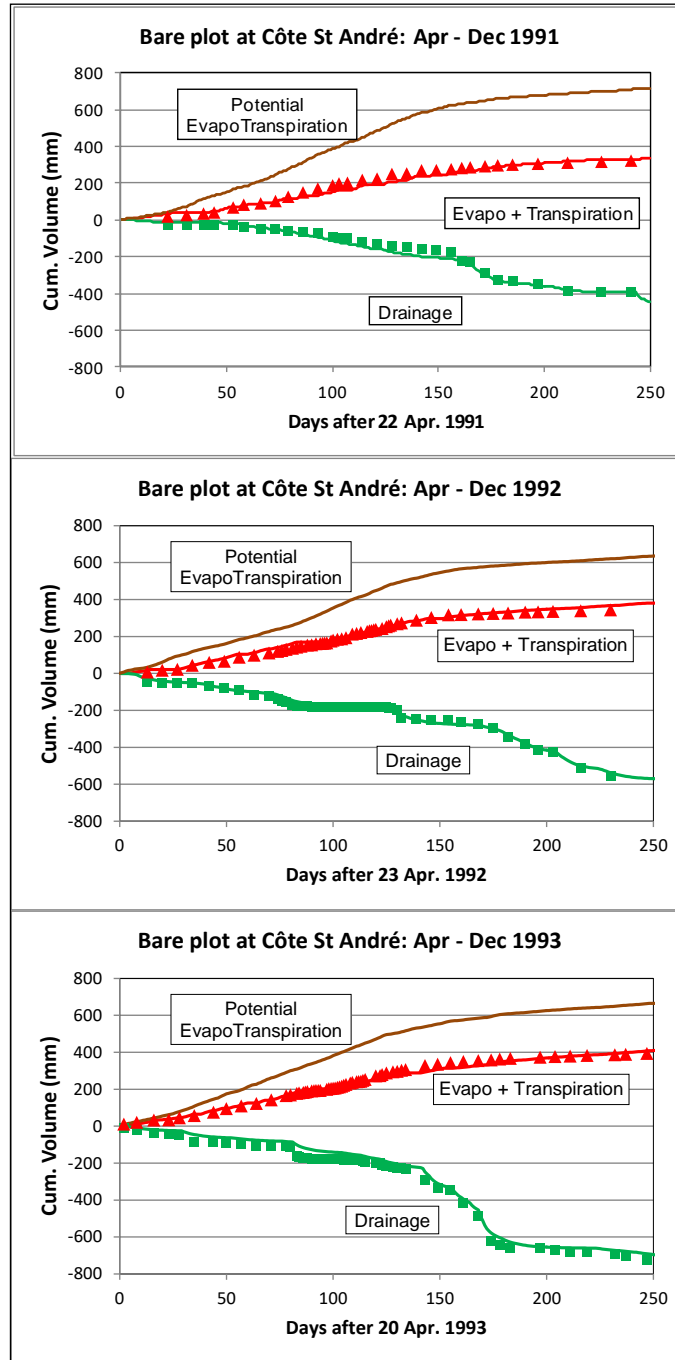


Figure 15 – Site de St André, sol nu : Cumuls des évaporation + transpiration réelle et du drainage. Comparaison des observations du LTHE (symboles) et des simulations par GARDÉNIA (traits).

3.2.2. Résultats obtenus sur la parcelle de maïs

En donnant un poids de 15 % sur la minimisation du biais de simulation, on obtient alors une simulation avec un coefficient d'ajustement égal à 0.926, avec un biais de simulation égal à 0. La capacité du réservoir sol (de type « réserve utile ») est égale à 25 mm, donc un peu augmentée à cause de l'influence des racines de la végétation.

La Figure 16 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.

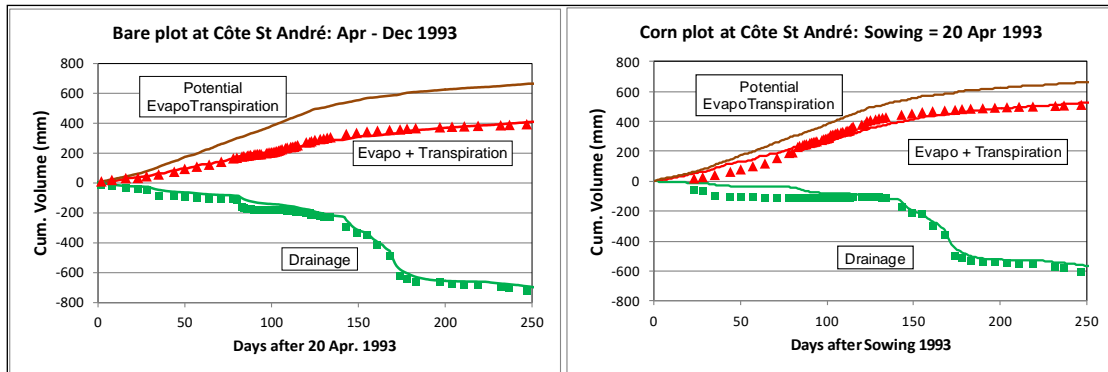


Figure 16 – Site de St André, année 1993 : Cumuls de l'évaporation + transpiration réelle et du drainage.
À gauche : sol nu ; à droite : parcelle de maïs.
Symboles = Observations du LTHE; Traits = simulations GARDÉNIA.
On note l'évapotranspiration plus importante pour la parcelle de maïs.

3.3. Validation du schéma de modélisation de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe

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.

La nappe au point étudié est influencée à la fois par la recharge par les pluies efficaces et par des pompages proches.

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 m³.

3.3.1. Modélisation avec GARDÉNIA

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013). Elle permet d'obtenir une simulation excellente : le coefficient d'ajustement est égal à 0.961. (Figure 17).

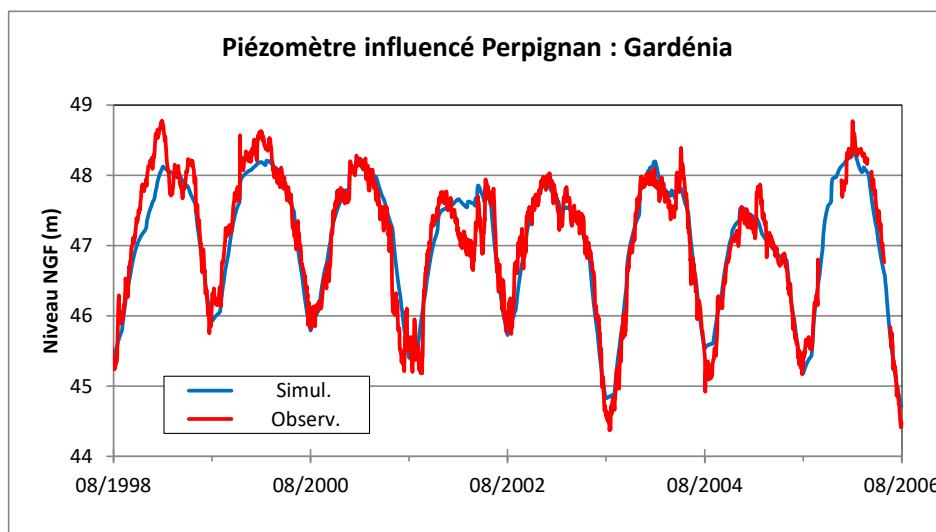


Figure 17 – Piézomètre Perpignan influencé par des pompages : Niveaux journaliers observés et simulés

La modélisation permet de séparer l'effet de chacune des deux influences :

- L'influence des débits de pompage.
- L'influence de la pluie et de l'évapotranspiration.

3.3.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul de l'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 18) :

- Carré de 2 km de côté, discrétisé en 10000 mailles de 20 m de côté
- La limite ouest, bordée par une rivière, a un niveau piézométrique imposé (à la cote 2 mètres).
- Les trois autres limites, à l'Est, au Nord et au Sud, sont étanches.
- Le piézomètre d'observation est situé à 80 mètres 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 mètres à l'est de la rivière, c'est-à-dire à 500 mètres à l'est du piézomètre.
- La nappe a une épaisseur uniforme de 50 mètres.

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 3134 jours de la période de 1998 à juillet 2006.

La Figure 19 montre qu'avec un coefficient d'emmagasinement égal à 8.3 % et une perméabilité égale à $8.44 \cdot 10^{-5}$ m/s, soit une transmissivité de $4.22 \cdot 10^{-3}$ m²/s, on calcule avec MARTHE une influence du pompage sur le niveau piézométrique très proche de celle obtenue avec GARDÉNIA.

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.

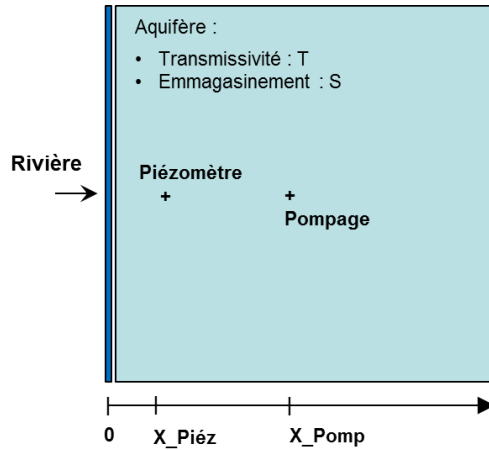


Figure 18 – Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe.

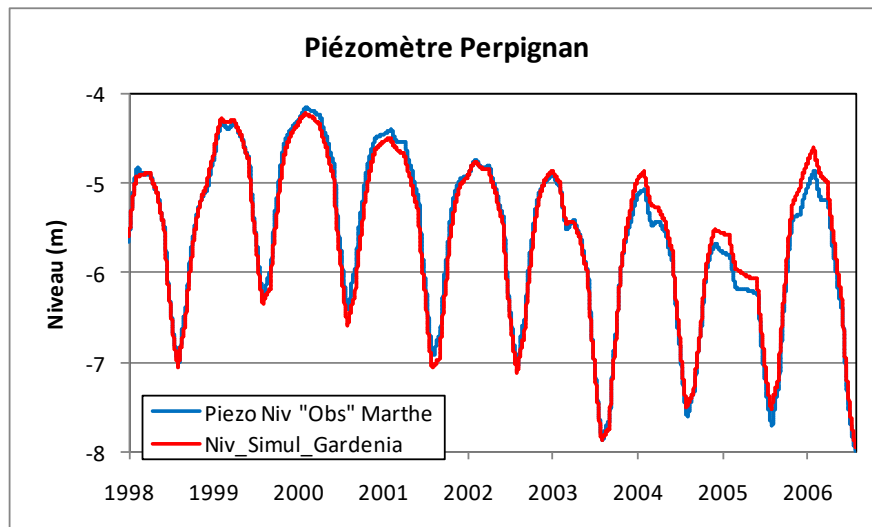


Figure 19 – Piézomètre Perpignan : comparaison de l'influence du pompage sur le niveau piézométrique calculé avec le code MARTHE (en rouge) et avec le code GARDENIA (en bleu).

3.4. Validation du schéma de modélisation des écoulements souterrains

La validation est réalisée sur les débits de l'Austreberthe à Saint-Paër. Le bassin versant, d'une superficie de 157 km², est situé dans le pays de Caux (Seine Maritime). On dispose des données suivantes :

- Pluie décadaires à Rouen, de 1969 à 2006.
- Évapotranspiration potentielle (ETP) décadaire à Rouen, de 1969 à 2006.
- Débit moyen décadaire de l'Austreberthe à Saint-Paër, de mars 1997 à 2006.

3.4.1. Modélisation avec GARDÉNIA

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013). Le coefficient d'ajustement est très élevé. Il est égal à 0.961 (soit un coefficient de Nash égal à 0.923), Figure 20.

La modélisation permet de décomposer le débit en deux composantes :

- La composante rapide.
- La composante lente correspondant à l'écoulement souterrain qui représente 90 % de l'écoulement (Figure 21).

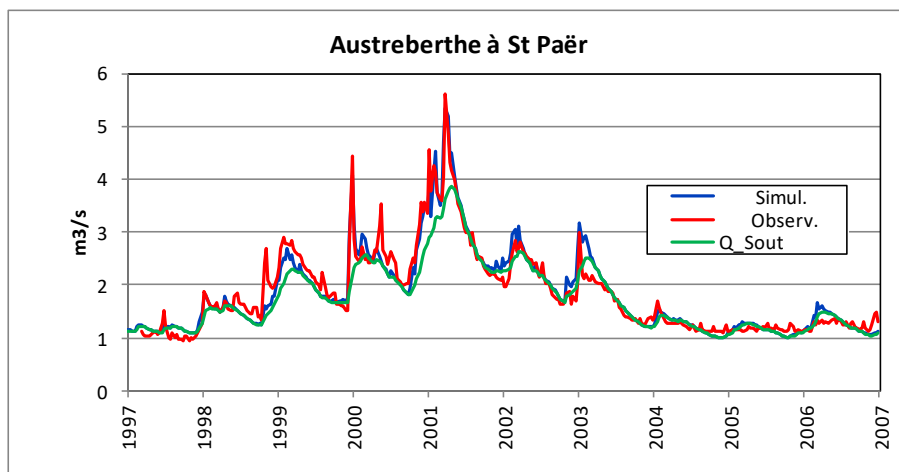


Figure 20 – Débit de l'Austreberthe à Saint Paër simulé par le code GARDÉNIA.

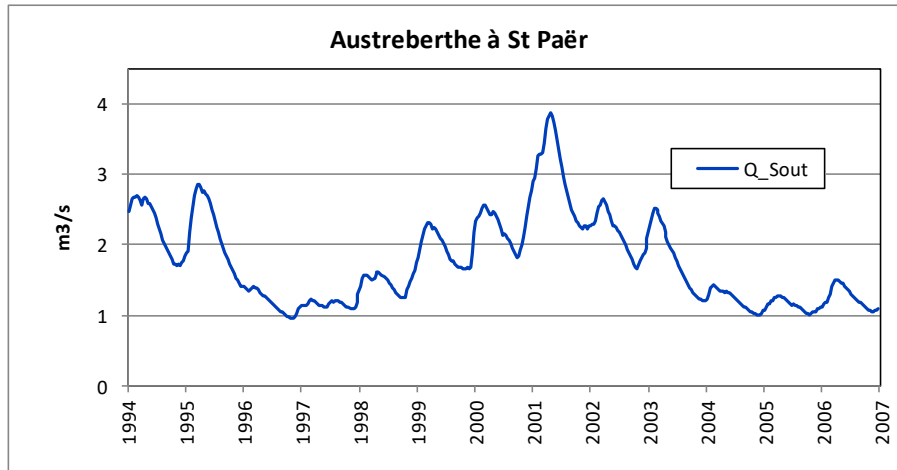


Figure 21 – Composante souterraine du débit de l'Austreberthe à Saint Paër calculée par le code GARDÉNIA.

3.4.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul des écoulements souterrains

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.
- 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 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 km², ayant la forme d'un secteur de disque de 45°, c'est-à-dire un secteur formé par 1/8 de disque (Figure 22).
- 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 km², 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'emménagement uniforme égal à 1 %, ce qui est une valeur réaliste. 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.

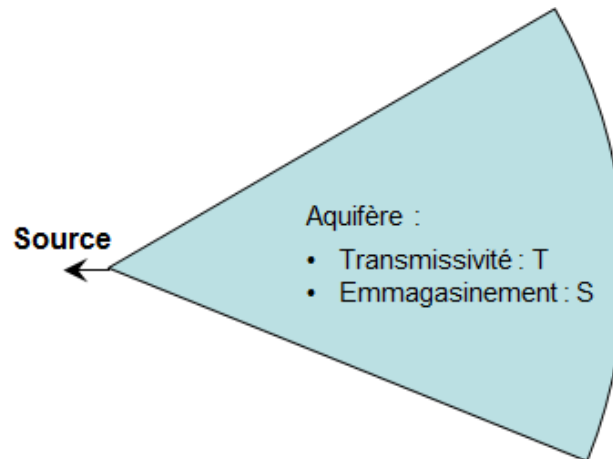


Figure 22 – Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA du débit à l'exutoire d'un bassin versant.

On obtient un débit souterrain décadaire quasi identique (Figure 23) 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 mètres 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.

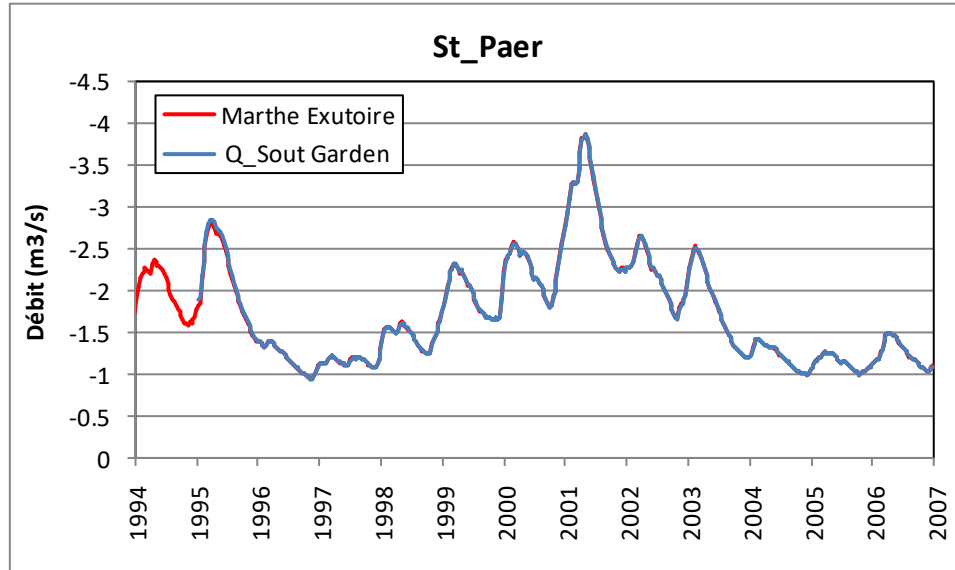


Figure 23 – L'Austreberthe à Saint-Paër : Débit souterrain. Simulation GARDÉNIA (en bleu) et simulation physique MARTHE (en rouge). Les courbes sont superposées et indiscernables.

3.5. Validation de la modélisation d'un hydrosystème réel

Le bassin utilisé pour cette validation est celui de la Voulzie à Jutigny, qui draine un bassin versant de 280 km², près de la ville de Provins. On lui associe le niveau piézométrique du piézomètre Saint Martin-Chennetron, d'indice BSS 02603X0009/S1, situé en Seine-et-Marne dans les calcaires de Champigny.

3.5.1. Modélisation avec le code de calcul spatialisé MARTHE en présence d'un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval

On modélise le domaine avec le code MARTHE, comme un aquifère monocouche traversé, du Nord au Sud, par un cours d'eau rectiligne : Figure 24.

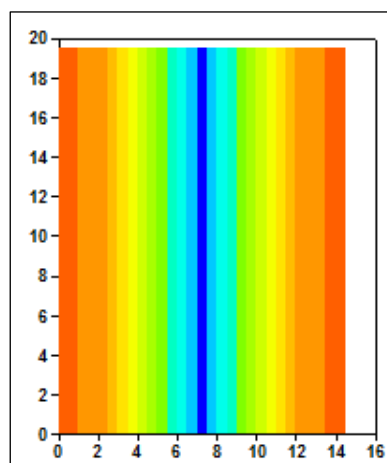


Figure 24 – Schématisation du bassin de la Voulzie pour une modélisation avec le code MARTHE.

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.
- Débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny de 1974 à 2004.
- Niveau piézométrique mensuel à St Martin-Chennetron de 1970 à 2004.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

- Le domaine est modélisé par un rectangle de 14.5 km dans la direction Ouest-Est sur 19.5 km dans la direction Sud-Nord, soit 282.75 km².
- On choisit un maillage carré régulier, avec 29 colonnes de 0.5 km de largeur et 39 lignes de 0.5 km de hauteur. Figure 25.
- L'altitude topographique est fixée arbitrairement à +200 m NGF.
- L'altitude du substratum est fixée à la cote 0 m NGF.

Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité de l'aquifère = $4.594 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Coefficient d'emmagasinement libre = 1.07 %

Réseau hydrographique :

- Le réseau hydrographique est constitué d'un seul affluent orienté Nord-Sud, situé au milieu du domaine (donc à l'abscisse 7.25 km). On considère, pour simplifier, que son lit est horizontal, ainsi que l'altitude de la surface libre de l'eau.
 - Largeur du cours d'eau = 0.015 km (soit 15 m).
 - Longueur des tronçons de cours d'eau = 0.5 km (par maille).
 - Altitude de la cote du fond du lit = 107 m NGF.
 - Altitude la surface de l'eau dans le cours d'eau = 107.62 m NGF.
 - Épaisseur du lit et des berges = 0.1 m
 - Perméabilité du lit et des berges = 10^{-6} m/s

Paramètres du bilan hydroclimatique :

Dans tout le domaine on fixe les paramètres suivants :

- Capacité du réservoir sol progressif = 103 mm
- Hauteur d'équi-ruisellement = 405 mm
- Temps de $\frac{1}{2}$ percolation = 4.4 mois

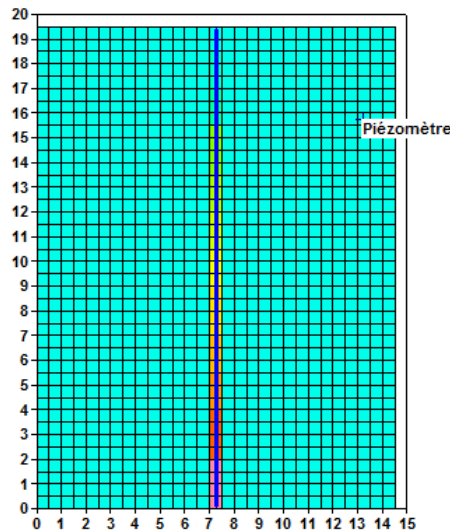


Figure 25 – Maillage et position du cours d'eau et du piézomètre pour la modélisation du bassin de la Voulzie avec le code MARTHE.

Avec ces paramètres on calcule alors avec le code MARTHE, au pas de temps mensuel, l'évolution du débit à l'exutoire du système et l'évolution du niveau piézométrique au piézomètre de 1962 à 2004. La période 1962-1973 sert à l'initialisation des états du modèle.

La Figure 26 montre que l'évolution des débits de la rivière à l'exutoire du bassin, et l'évolution des niveaux piézométriques au piézomètre, sont bien simulés par le modèle physique spatialisé MARTHE.

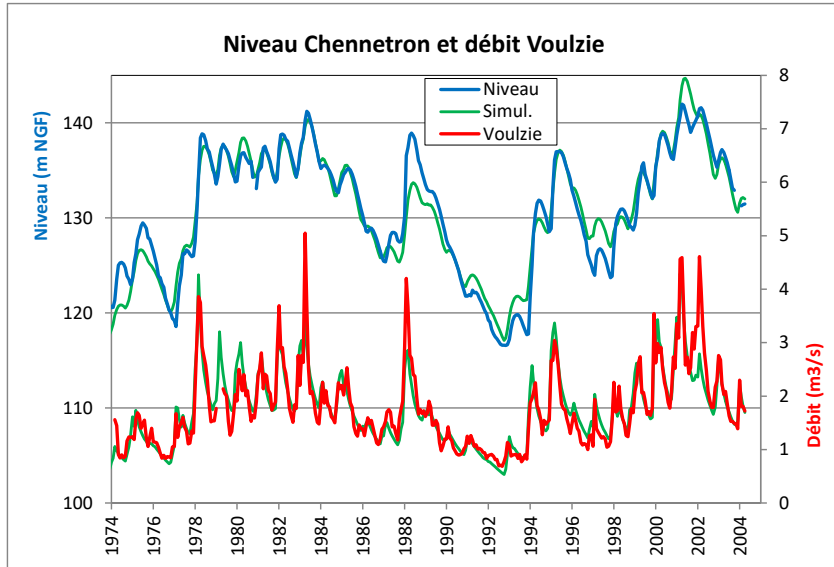


Figure 26 – Simulation avec le code MARTHE du débit de la Voulzie à Jutigny et du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron.

3.5.2. Modélisation avec de code de calcul global GARDÉNIA

Avec le code de calcul global GARDÉNIA on modélise également l'évolution des débits de la Voulzie et des niveaux du piézomètre St Martin-Chennetron. On obtient une simulation quasi identique, avec des paramètres très semblables à ceux du code de calcul physique MARTHE. Les Figure 27 et Figure 28 montrent que les débits et les niveaux simulés avec les deux codes sont quasi indiscernables. Ceci montre bien que le schéma de GARDÉNIA correspond bien de manière simplifiée à un schéma physique.

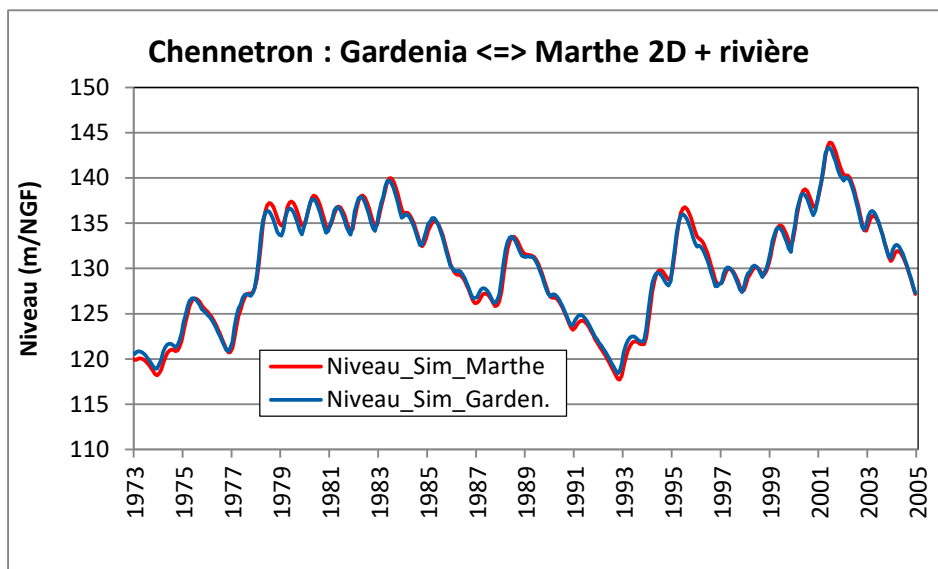


Figure 27 – Comparaison de la simulation du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.

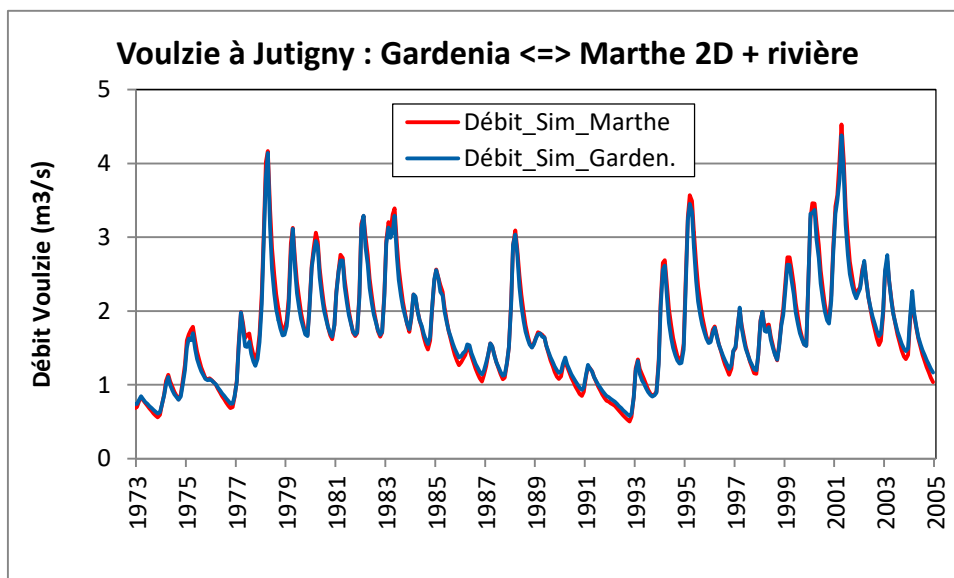


Figure 28 – Comparaison de la simulation du débit de la Voulzie à Jutigny avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.

3.5.3. Comparaison des paramètres des deux simulations

Le Tableau 1 permet la comparaison des paramètres de modélisation des deux codes.

Paramètre	MARTHE	GARDÉNIA
Coefficient d'emmagasinement	1.07 %	1.07 %
Niveau de base ou Altitude de l'eau dans la rivière	107.62 m NGF Altitude rivière	109.54 m NGF Niveau de base
Temps de $\frac{1}{2}$ percolation	4.4 mois	3.84 mois
Temps de $\frac{1}{2}$ tarissement	-	12.83 mois
Temps de concentration	-	0.44 jour
Perméabilité	$4.594 \cdot 10^{-5}$ m/s	-

Tableau 1 : Bassin de la Voulzie. Comparaison des paramètres des codes GARDÉNIA et MARTHE

Il apparaît que les paramètres des deux codes de calculs sont donc tout à fait du même ordre de grandeur :

- Coefficients d'emmagasinement : identiques
- Altitudes de la surface de l'eau dans la rivière : proches, compte tenu de l'amplitude de variation de 30 mètres.
- Temps de percolation : comparables

On va montrer également que le temps de $\frac{1}{2}$ tarissement de GARDÉNIA (12.83 mois) correspond tout à fait à la valeur théorique qui peut être calculée à partir : de la transmissivité, du coefficient d'emmagasinement et de la dimension du domaine.

Calcul du temps de $\frac{1}{2}$ tarissement équivalent du modèle MARTHE

Compte tenu de la perméabilité de $4.594 \cdot 10^{-5}$ m/s et en prenant en compte l'épaisseur en eau moyenne dans la nappe, qui est de l'ordre de 125 mètres, on obtient dans le code MARTHE une transmissivité est égale à $5.74 \cdot 10^{-3}$ m²/s

On note :

- L : la dimension du système dans le sens de l'écoulement, perpendiculaire à la rivière.
- T : La transmissivité.
- S : le coefficient d'emmagasinement.

La constante de temps CT du système est de l'ordre de $L^2 \cdot S / (2T)$.

Ici l'écoulement est principalement orienté des limites latérales vers la rivière au centre. On a donc :

$$\begin{aligned} L &= 14.5 \text{ km} / 2 = 7250 \text{ m} \\ T &= 5.74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ S &= 0.0107 \end{aligned}$$

D'où une constante $CT = 7250^2 \times 0.0107 / (2 \times 5.74 \cdot 10^{-3}) = 4.899 \cdot 10^7$ secondes = 18.63 mois.
On obtient alors le temps de $\frac{1}{2}$ tarissement équivalent par la relation :

$$TG_{1/2} = CT \times \ln(2)$$

Soit : $TG_{1/2} = 12.91$ mois

Paramètre	MARTHE	GARDÉNIA
Temps de $\frac{1}{2}$ tarissement	12.91 mois (équivalent)	12.83 mois

Le temps de tarissement de GARDÉNIA (12.83 mois) est donc quasiment identique à la valeur (12.91 mois) calculée à partir de données physiques du bassin versant permettant de modéliser les débits et les niveaux avec un schéma physique discrétisé (MARTHE).

Le fait de reproduire parfaitement avec GARDÉNIA les débits et les niveaux de nappe calculés avec un modèle hydrodynamique physique spatialisé est une validation forte des lois utilisées par GARDÉNIA pour simuler à la fois les écoulements dans le réseau superficiel et les écoulements souterrains.

4. Conclusion

Les modélisations physiques comparatives présentées au travers de cinq exemples correspondant à cinq environnements différents, ont permis de valider le code de calcul GARDÉNIA et de montrer que les lois décrivant son fonctionnement correspondent à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel.

La validation a été réalisée :

- D'une part par comparaison avec des séries de mesures.
- D'autre part par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels avec le code de calcul MARTHE du BRGM, qui utilise une approche physique, suivant la loi de Darcy en milieu saturé et non saturé, avec une discrétisation par volumes finis.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La modélisation en 1D des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi a permis la validation :
 - Du schéma de calcul de l'ETR avec le réservoir sol de GARDÉNIA, par comparaison avec des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons et avec la simulation discrétisée de la Zone Non Saturée avec l'équation de Richards (code MARTHE).
 - Du schéma de percolation par le réservoir intermédiaire par comparaison avec des mesures de drainage et avec la simulation MARTHE avec le schéma de Richards.
- La modélisation en 1D de parcelles expérimentales en sol nu ou avec culture de maïs du site expérimental de « La côte Saint André » en Isère a permis la validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Cette validation a été obtenue, à la fois pour un sol nu et une parcelle cultivée :
 - Par comparaison avec des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons et par comparaison avec des mesures de cumul de drainage et d'évapotranspiration.
 - Par comparaison avec la simulation GARDÉNIA du débit de percolation avec la simulation discrétisée de la Zone Non Saturée avec l'équation de Richards (code MARTHE).
- La modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches, en un site situé près de la ville de Perpignan, a permis :
 - La validation du schéma de calcul de l'influence de pompages par une fonction à trois paramètres par comparaison avec la modélisation effectuée avec le code MARTHE dans un aquifère uniforme.
- La modélisation en 2D des débits à l'exutoire d'un bassin versant ayant une forte composante souterraine, l'Austreberthe à Saint-Paër le pays de Caux, a permis :
 - La validation du schéma de calcul des écoulements souterrains avec le réservoir intermédiaire et le réservoir souterrain de GARDÉNIA. La validation a été réalisée par comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère horizontal à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes. Les débits simulés avec les deux codes sont quasiment indiscernables.

- La modélisation en 2D d'un bassin versant disposant des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant fluctuations de plus de 20 mètres en réaction aux pluies efficaces a permis :
 - La validation du schéma global de calcul des débits et des niveaux piézométriques par GARDÉNIA.

La validation a été réalisée par comparaison avec la modélisation physique discrétisée, avec le code MARTHE, des niveaux et débits dans un aquifère traversé par un cours d'eau.

Les simulations avec GARDÉNIA et MARTHE sont très proches des mesures et quasiment indiscernables. Par ailleurs les paramètres des deux codes ont des ordres de grandeur tout à fait comparables.

5. 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>. (Accès Octobre 2018).
- Darcy, H., (1856) - Les Fontaines publiques de la Ville de Dijon, Paris, Victor Dalmont éditeur.
- Herbst M., Fialkiewicz W., Chen T., Pütz T., Thiéry D., Mouvet C., Vachaud G., Vereecken H. (2005) - Intercomparison of Flow and Transport Models Applied to Vertical Drainage in Cropped Lysimeters. *Vadose Zone J.* 2005; 4(2): p. 240–254. ISSN 1539–1663. doi.org/10.2136/vzj2004.0070. (Accès Octobre 2018).
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.
- Richards, L.A., (1931) - Capillary conduction of liquids in porous media. *Physics*, 1, 318-333.
- 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 pp. 325-336. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01062466>
- 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. (2010a) – Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. in *Traité d'hydraulique environnementale – Volume 9 – Logiciels d'ingénierie du cycle de l'eau*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 77–94. ISBN 978-2-7462-2339-4.
- Thiéry, D. (2010b) – Reservoir Models in Hydrogeology. in *“Mathematical Models Volume 2, chapter 13, pp. 409–418 • Environmental Hydraulics Series”*. Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-154-4.
- Thiéry, D. (2010c) – Groundwater Flow Modeling in Porous Media Using MARTHE. in *“Modeling Software Volume 5, Chapter 4, pp. 45–60 • Environmental Hydraulics Series”*. Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-157-5.
- Thiéry, D. (2011) - Plaquette de présentation du code de calcul du BRGM GARDÉNIA v8.1. Note technique NT EAU 2011/05. http://www.brgm.fr/sites/default/files/logiciel_gardenia.pdf. (Accès Octobre 2018).
- 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 Octobre 2018).

- Thiéry, D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version v8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>. (Accès Octobre 2018).
- Thiéry, D. (2015a) – Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64554-FR.pdf> (Accès Octobre 2018).
- Thiéry, D. (2015b) – Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP- 64495-FR. 87 p., 32 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64495-FR.pdf> (Accès Octobre 2018).
- Thiéry, D. (2015c) – Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64765-FR, 324 p., 158 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64765-FR.pdf> (Accès Octobre 2018).
- Thiéry, D. (2016) – Prise en compte de la végétation pour le calcul de l'Évaporation et de la Transpiration dans le code de calcul MARTHE v7.6. Rapport BRGM/RP-65918-FR, 78 p., 47 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65918-FR.pdf> (Accès Octobre 2018).
- Thiéry, D. (2018a) – Logiciel ÉROS version 7.1. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-67704-FR, 171 p., 82 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67704-FR.pdf> (Accès Octobre 2018)
- Thiéry, D. (2018b) – Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS. Rapport BRGM/RP-67723-FR, 66 p., 23 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67723-FR.pdf> (Accès Octobre 2018)
- Turc L. (1961) - Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Ann. Agronom.*, 1961, 12.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies**

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