

Annexe Volet 2.

Description des modèles hydrologiques

Ducharne A, Gascoin S, Habets F, Ledoux E, Martin E, Oudin L, Thiéry D, Viennot P

4 août 2009

1. Introduction

Une approche multi-modèle a été retenue dans le projet RExHySS pour appréhender les incertitudes liées à la modélisation hydrologique. Cette approche consiste à analyser des simulations hydrologiques réalisées avec plusieurs modèles, choisis pour couvrir les différentes stratégies de modélisation actuellement utilisées dans la communauté scientifique, et échantillonner ainsi les incertitudes qui leur sont liées.

Cet échantillonnage des incertitudes est nécessairement partiel, et ceci resterait vrai si l'on augmentait le nombre de modèles hydrologiques considérés. Comme le nombre de modèles augmente vite le nombre de simulations hydrologiques à analyser (puisque ces modèles devaient simuler 12 scénarios climatiques désagrégés, afin de rendre également compte des incertitudes liées aux scénarios climatiques), un compromis est nécessaire pour travailler sur un nombre de modèles suffisant pour représenter au mieux la dispersion possible mais gérable opérationnellement. Nous avons ainsi considéré 7 modèles (section 2) développés dans la communauté française mais représentatifs de l'état de l'art international.

Un autre point très important est de ne pas surestimer les incertitudes en tenant compte de modèles qui ne représentent pas le fonctionnement hydrologique régional de manière réaliste. Le premier critère est donc de ne considérer que des modèles validés avec de bonnes performances par rapport aux observations historiques (de débits essentiellement, et pour certains, de niveau piézométrique), ce qui est le cas pour les 7 modèles retenus dans RExHySS (section 2).

Mais cette validation n'est pas tout car elle ne garantit pas le réalisme du modèle sous climat futur. Celui-ci est difficile à vérifier puisque l'observation n'est par définition par encore connue dans le futur. Une alternative est d'utiliser des jeux de données historiques susceptibles de représenter, au moins partiellement, les conditions du futur, comme discuté au cours de l'atelier du volet V6. Un tel exercice est cependant difficile car de telles données n'existent pas forcément. Ainsi il n'y a pas d'analogues enregistrés dans les bassins de la Seine et de la Somme du climat plus chaud et plus sec attendu sur le long-terme selon les scénarios du V1. La canicule de 2003 s'en distingue par sa brièveté (moins d'un mois) et peut certes être utilisée, mais avec des limites importantes. Une autre possibilité serait d'utiliser les conditions historiques d'autres bassins versants, plus arides, avec la limite cette fois que cette approche implique une caractérisation différente des paramètres des modèles (que ce soit par calage ou à partir de données a priori) et que l'on valide/invalidé donc une version différente de celle utilisée dans l'étude d'impact. Vu ces difficultés, nous n'avons pas abordé cette question de manière systématique dans RExHySS.

Cependant, l'analyse des bilans hydrologiques conduite dans le volet V2 a montré un comportement particulier du modèle CLSM, qui est le seul à simuler une augmentation de l'évapotranspiration sous scénarios climatiques, entraînant une réduction particulièrement marquée des débits. Ce comportement fait écho à une évaluation menée sur 7 ans à proximité de Strasbourg, qui a montré une surestimation de l'évapotranspiration de ce modèle pendant l'été 2003 (section 9). En conséquence de ces éléments convergents, nous avons donc exclu le modèle CLSM de la quantification des incertitudes menée dans le volet V2.

2. Présentation comparée des sept modèles

Les principales différences entre les différents modèles utilisés dans RExHySS sont résumées dans le Tableau 1, et discutées ci-dessous. Les sections suivantes fournissent une description spécifique de chaque modèle pour faciliter la compréhension de ce rapport, mais le lecteur est renvoyé aux publications associées pour plus de détails, y compris sur la calibration et la validation des modèles.

Tableau 1 - Synthèse des 7 modèles hydrologiques mobilisés dans le cadre du volet V2.

Modèle	Spatialisation	Bilans d'eau	Nappes	Bassins	Partenaire	Références
MARTHE	Distribué	Conceptuels $\Delta t = 1 \text{ j}$	Explicite 2D	Somme	BRGM	Thiéry, 1990
MODCOU	Distribué	Conceptuels $\Delta t = 1 \text{ j}$	Explicite 2D multicouche	Seine Somme	ENSMF	Ledoux et al., 1989 Korkmaz et al., 2009
SIM	Distribué	Couplés aux bilans d'énergie (ISBA) $\Delta t = 1 \text{ h}$	Explicite (MODCOU)	Seine Somme	Météo- France	Habets et al., 2008
CLSM	Semi-distribué	Couplés aux bilans d'énergie $\Delta t = 1 \text{ h}$	Conceptuel	Seine Somme	Sisyphé	Koster et al., 2000 Ducharne et al., 2000 Gascoïn et al., 2009
EROS	Semi-distribué	Conceptuels $\Delta t = 1 \text{ j}$	Conceptuel	Seine	BRGM	Thiéry & Moutzopoulos, 1995 Thiéry, 2004
GARDENIA	Global	Conceptuels $\Delta t = 1 \text{ j}$	Conceptuel	Seine Somme	BRGM	Thiéry, 2003
GR4J	Global	Conceptuels $\Delta t = 1 \text{ j}$	Conceptuel	Seine Somme	Sisyphé	Perrin et al. 2003

Les modèles GR4J et GARDENIA sont des modèles globaux, qui décrivent la relation entre le débit en une station et les conditions météorologiques sur l'ensemble du bassin amont de cette station. Ils ne sont donc pas distribués, et simuler le débit en plusieurs stations implique autant de modèles, caractérisés par des jeux de paramètres différents. En général, ces modèles globaux sont conceptuels, c'est-à-dire que leurs paramètres ne correspondent pas à des paramètres physiques mesurables et doivent donc être calés, même si leurs équations peuvent être inspirées par des lois physiques.

Les autres modèles utilisés dans RExHySS décrivent au contraire les hétérogénéités au sein des bassins versants modélisés en subdivisant l'espace en différentes unités de calcul, dont les paramètres sont fixés une fois pour toute, soit à partir d'informations physiques (topographie, pédologie, géologie, occupation des sols, etc.) soit par calage. Selon la résolution des unités de calculs, on distingue :

- les modèles distribués, qui décrivent le domaine selon un maillage à haute résolution (modèles MODCOU, SIM et MARTHE) ;
- les modèles semi-distribués, dont la résolution est moins fine, et qui reposent souvent sur une discrétisation de l'espace en sous-bassins (modèles EROS et CLSM).

Même si le modèle EROS est une application semi-distribuée des équations du modèle conceptuel global GARDENIA, les modèles distribués et semi-distribués sont généralement à bases physiques, c'est-à-dire que leurs équations décrivent des processus physiques (e.g. écoulements en milieu saturé; évapotranspiration, etc.) avec des paramètres qui ont un sens physique (e.g. conductivité hydraulique, résistance stomatique). Sur la base du *Tableau 1*, on peut ainsi distinguer, au sein des modèles à bases physiques, les modèles hydrogéologiques, qui décrivent finement les écoulements en nappe l'équation de la diffusivité (MODCOU et MARTHE), et les modèles hydrométéorologiques, où ce sont les bilans d'eau qui sont décrits sur des bases physiques, de manière couplée aux bilans d'énergie selon le principe des transferts sol-végétation-atmosphère (CLSM et SIM). SIM occupe une place particulière dans cadre, puisqu'il décrit les composantes hydrogéologiques et hydrométéorologiques sur des bases physiques, en couplant les modèles MODCOU et ISBA respectivement.

Dans la pratique, la limite est plus floue entre approches conceptuelles et à bases physiques, car la plupart des modèles à bases physiques incluent des représentations conceptuelles pour certains processus. De plus, même si certains modèles à bases physiques peuvent être utilisés sans calibration, en n'utilisant que des paramètres définis a priori à partir des caractéristiques physiques du milieu (c'est le cas du modèle CLSM et du modèle ISBA qui décrit les bilans d'eau dans SIM), tous les

modèles utilisés dans RExHySS ont été calés pour certains de leur paramètres (5 paramètres pour CLSM, et pour SIM, dont les écoulement en nappe sont décrits par le modèle MODCOU, les paramètres hydrogéologiques calés de celui-ci).

Finalement, une différence essentielle entre modèles conceptuels et modèles « à bases physique » est probablement la qualité de l'optimisation réalisée entre débits simulés et observés. En effet, les modèles conceptuels optimisent l'ensemble de leurs paramètres, alors que les modèles à bases physiques n'en calent qu'une partie, et de manière plus difficile à optimiser partout pour les modèles finement distribués que pour les modèles semi-distribués. Par ailleurs les modèles MODCOU, SIM et MARTHE sont calés de manière à simuler au mieux les débits des cours d'eau, mais aussi les niveaux piézométriques, ce qui introduit des contraintes supplémentaires.

Ceci explique les meilleures performances des modèles conceptuels en validation, comme analysé dans l'annexe du volet V3, y compris sur les extrêmes. Il est important de noter cependant que, même s'il existe pour chaque modèle des stations où le débit n'est pas bien simulé, ils montrent tous un comportement globalement réaliste, comme résumé dans le *Tableau 2* pour les exutoires des deux bassins versants.

Tableau 2 - Exemple de validation des 7 modèles hydrologiques du volet V2, pour la Seine à Poses et la Somme à Abbeville. Les débits simulés utilisent tous les analyses SAFRAN (Quintana-Segui et al., 2008) comme forçage météorologique historique, et les débits observés pour calculer les critères de performance (Biais relatif en % et efficacité de Nash & Sutcliffe, 1970) sont issus de la Banque Hydro. Les cases grises indiquent les bassins non simulés par un modèle.

		GR4J	GARDENIA	EROS	MARTHE	MODCOU	SIM	CLSM
Seine à Poses	Période de validation	1975-2000 (26 ans)	1972-2006 (35 ans)	1972-2006 (35 ans)		1995-2006 (11 ans)	1995-2005 (10 ans) [†]	1986-2002 (16 ans)
	Biais (%)	0.6	0.5	7.9			-6.0	2.0
	Nash	0.86	0.90	0.87		0.85	0.88	0.89
Somme à Abbeville	Période de validation	1986-2002 (17 ans)	1989-2003 (15 ans)		1985-2003 (18 ans)	1985-2003 (18 ans)		1985-2003 (18 ans)
	Biais (%)	0.1	1.3		4.0			-4.3
	Nash	0.84	0.94		0.84	0.86		0.79 *

* En absence d'un module de transformation des écoulements en débit sur la Somme pour CLSM, le critère de Nash est calculé entre les moyennes décennales (10 j) de l'écoulement simulé et du débit observé.

[†] issu de Habets et al., 2008.

3. Le modèle GR4J

Principe général

Le modèle GR4J (Perrin et al. 2003) est un modèle conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier. Le nombre de paramètres est limité à quatre, ce qui en fait un modèle parcimonieux. Ce modèle a été développé sur la base d'un grand nombre de bassins versants, incluant des bassins versants à climats contrastés, ce qui en fait un bon candidat pour évaluer l'impact du changement climatique. En revanche, comme tous les modèles conceptuels, le jeu de paramètres est susceptible de dépendre de la période de calage (longueur et caractéristiques climatiques). Les simulations sont donc soumises, entre autres, aux incertitudes liées au calage des paramètres. La Figure 1 indique le schéma conceptuel du modèle et les quatre paramètres calés. Classiquement pour ce type de modèles, on peut distinguer la fonction de production, qui permet de calculer la pluie efficace à partir des données journalières de pluie et d'évapotranspiration potentielle grâce à un premier réservoir ; et la fonction de transfert qui permet de transformer la pluie efficace en débit. Cette fonction de transfert est composée de deux branches qui se vidangent de manière différente : l'une permet de représenter les écoulements rapides (branche directe), et l'autre est à vidange lente car transitant via un réservoir linéaire.

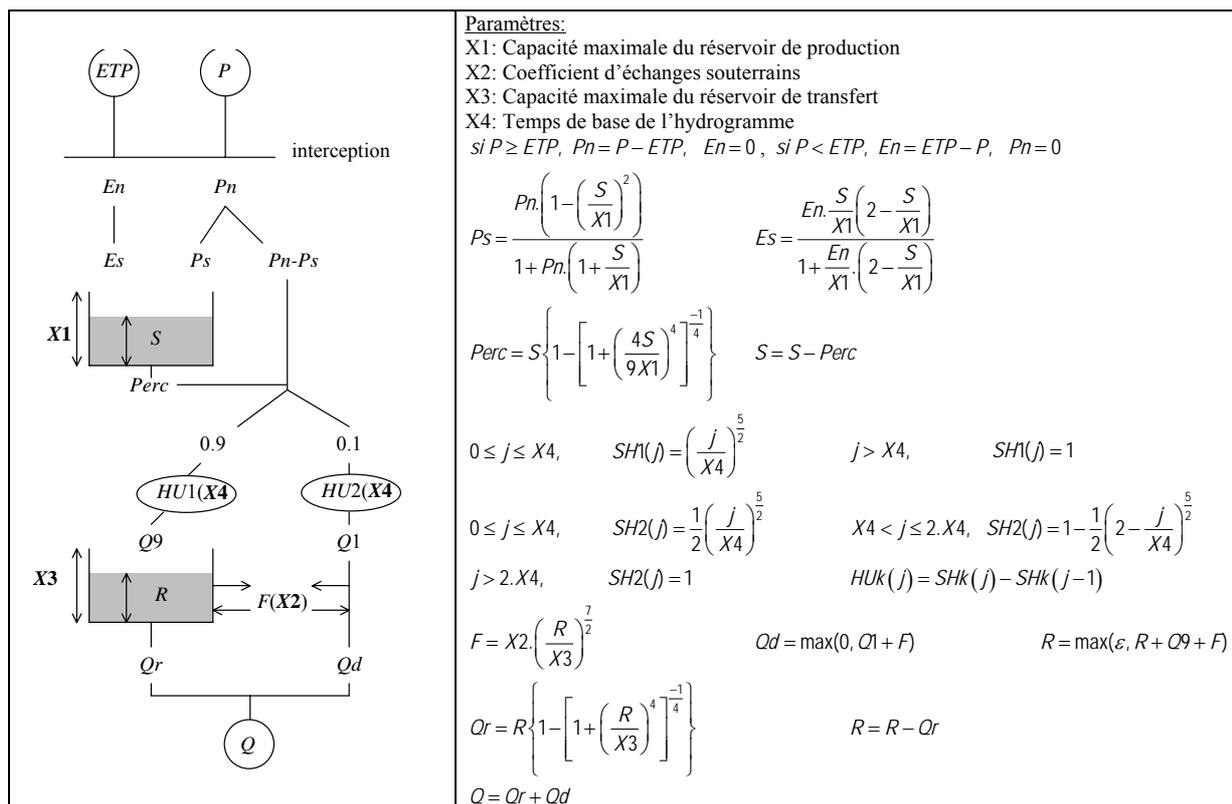


Figure 1 – Schéma du modèle GR4J et principales équations du modèle.

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet RExHySS

Dans le cadre du projet RExHySS, le modèle GR4J a été calé sur 214 bassins versants de la Seine, sur la période 1972-2006 (35 ans) et sur 5 stations de la Somme sur la période 1989-2003 (15 ans). Notons cependant que pour l'ensemble des bassins, la période de données hydrométriques disponible ne couvrent en général pas la période d'observation climatique. La fonction objectif utilisée est le critère de Nash et Sutcliffe appliqué sur les racines carrées des débits, cette transformation permettant un calage équilibré entre périodes de crues et d'étiage (Oudin et al., 2006). Le critère de Nash-Sutcliffe original est utilisé ensuite pour évaluer le modèle, ceci afin de fournir des éléments de comparaison avec les résultats des autres modèles hydrologiques utilisés dans le cadre du projet. Les résultats en calage sont assez satisfaisants dans l'ensemble puisque plus de la moitié des 214 bassins versants sont modélisés avec des critères de Nash supérieurs à 0.80.

Afin de s'assurer de la robustesse du modèle, une procédure de calage-contrôle (Klemeš, 1986) a été menée sur l'ensemble des stations. Cette méthode consiste à séparer la chronique en sous-périodes et d'évaluer le modèle sur ces différentes sous-périodes : le modèle est calé sur une période puis évalué avec ce jeu de paramètres sur les autres sous-périodes (appelées périodes de validation ou de contrôle). Nous avons appliqué ce test en séparant la chronique de données en deux sous-périodes distinctes. Les résultats de ce test pour les bassins de la Seine à Poses et de la Somme à Abbeville sont indiqués dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Illustration des résultats de la procédure de calage-validation du modèle GR4J.

	Période de test	Critère de Nash-Sutcliffe au calage	Critère de Nash-Sutcliffe en contrôle
Seine à Poses	1975-1988	0.853	0.758
	1988-2000	0.853	0.845
	1975-2000	0.861	NA
Somme à Abbeville	1986-1994	0.724	0.663
	1994-2002	0.873	0.855
	1986-2002	0.838	NA

4. Le modèle GARDENIA

Principe général

Le modèle GARDÉNIA (pour Modèle Global A Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères; Thiéry 2003) est un modèle hydrométéorologique global qui simule 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 des "entrées" moyennes (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et un point de calcul unique qui est le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. Le cycle de l'eau est représenté par une succession de réservoirs (Figure 2).

Un premier réservoir, représentant la zone racinaire, permet de calculer, en fonction de son état de saturation, l'évapotranspiration réelle à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle et donc l'éventuel excédent de pluie. Un deuxième réservoir non linéaire, représentant la zone non saturée, permet de décomposer l'excédent de pluie en deux composantes : une composante rapide identifiée au ruissellement, et une composante lente identifiée à l'infiltration. Il est responsable du routing de l'infiltration en recharge de l'aquifère sous-jacent. Un troisième réservoir linéaire à vidange exponentielle représente le tarissement de la composante souterraine du débit d'un cours d'eau et son niveau représente le niveau piézométrique en un point représentatif de la nappe. L'hypothèse est que, au moins localement, les variations de niveaux piézométriques sont homothétiques. Le modèle GARDÉNIA intègre également un module de fonte de la neige faisant les apports d'énergie au contact de l'atmosphère ainsi que les calories apportées dans l'eau de pluie et par le contact avec le sol. Des effets anthropiques comme des prélèvements ou des injections peuvent enfin être pris en compte explicitement, de manière analogique par le modèle.

Le modèle GARDÉNIA peut fonctionner à des pas de temps journalier, mais également à des pas de temps fins, par exemple horaire ou même de quelques minutes, quand il est nécessaire de simuler des crues résultant de précipitations cycloniques par exemple.

L'originalité du modèle GARDÉNIA est, outre la prise en compte de pompages, la possibilité de simuler les niveaux aquifères et surtout de pouvoir simuler simultanément, avec le même jeu de paramètres le débit à l'exutoire du bassin et un niveau piézométrique représentatif de bassin. Cette fonctionnalité renforce fortement la robustesse du modèle puisque les paramètres gérant les écoulements souterrains peuvent être calibrés explicitement sur les variations piézométriques ce qui limite les incertitudes liées à une mauvaise identification des deux composantes de l'écoulement résultant d'une non unicité de la calibration.

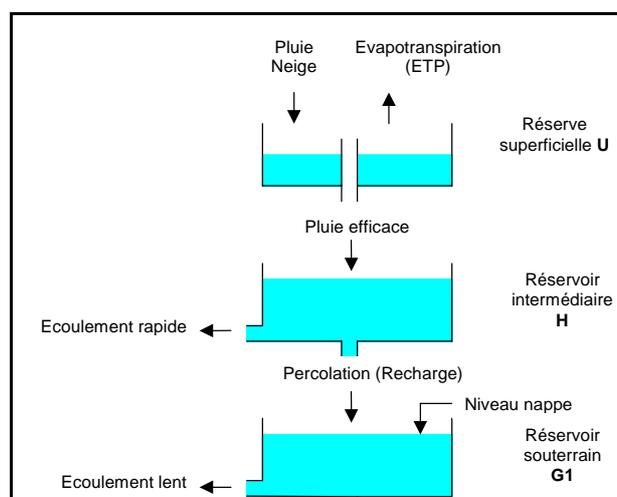


Figure 2 – Schéma simplifié du modèle GARDÉNIA.

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet RExHySS

Le modèle GARDÉNIA permet de prendre en compte une fonction d'exportation, ou même une importation, de débit souterrain vers les bassins voisins, ou vers la mer. Cette fonction d'échange de débit souterrain a été améliorée pour dépendre de l'état du stock en eau souterraine dans le bassin pour permettre des résultats satisfaisants y compris avec des scénarios de changement climatique correspondant à des diminutions marquées de l'alimentation des bassins.

Pour le projet RExHySS, le modèle GARDENIA a été calé en 152 stations du bassin de la Seine, sur la période 1972-2006 (35 ans) et en 5 stations de la Somme sur la période 1989-2003 (15 ans), où ont aussi été exploitées les données de 57 piézomètres.

A partir du scénario désagrégé A1B continu, nous avons comparé les évolutions du débit de la Somme à Abbeville (6430 km²) simulées avec le modèle global GARDÉNIA et avec le modèle distribué MARTHE, avec des résultats très proches. Cette analyse suggère une robustesse intéressante du modèle GARDENIA malgré son approche très conceptuelle.

5. Le modèle EROS

Principe général

Le modèle EROS (pour Ensemble de Rivières Organisées en Sous-bassins; Thiéry et Moutzopoulos 1995) est un modèle hydrologique semi-distribué qui simule le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire. Ce modèle est spatialisé comme une « grappe » de modèles globaux, la contribution de chaque sous-bassin élémentaire étant simulée par un modèle global GARDENIA (Thiéry 2003, Thiéry 2004). La spatialisation se rapporte à la fois aux données hydroclimatiques et aux paramètres des sous bassins. Le débit d'un sous bassin résulte du bilan hydroclimatique Pluie, Évapotranspiration sur le bassin auquel se rajoutent les débits provenant des sous bassins amont débits. Il peut y avoir des influences anthropiques : prélèvements, importations dans le cours d'eau ou dans le bassin. On considère qu'en dehors des éventuelles importations ou exportations vers l'extérieur, la totalité des débits amont est transférée vers l'aval.

L'intérêt d'un modèle spatialisé est multiple : d'une part il est possible de représenter des bassins très hétérogènes, par exemple de très grands bassins dans des contextes géomorphologiques variés ou soumis à des précipitations très hétérogènes à cause de l'altitude ou de la distance à la mer. D'autre part cette approche de modélisation permet de calculer l'influence d'aménagements du bassin, par exemple un changement important d'occupation des sols ou la création de barrages réservoirs. L'intérêt est également une plus grande robustesse due aux contraintes résultant des relations amont aval. Les paramètres du modèle sont en effet calibrés pour permettre la simulation optimale de tous les bassins simultanément.

Le modèle EROS peut fonctionner à des pas de temps journalier, mais également à des pas de temps fins, par exemple horaire ou même de quelques minutes, quand il est nécessaire de simuler des crues résultant de précipitations violentes.

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet RExHySS

Le modèle EROS n'a été utilisé que dans le bassin de la Seine, subdivisé en 41 sous bassins (Figure 3). Le calage a exploité les débits observés en 41 stations, sur la période 1972-2006 (35 ans), avec une optimisation simultanée de l'ensemble des paramètres. Comme décrit précédemment, le modèle GARDÉNIA utilisé dans chaque sous bassin élémentaire permet de prendre en compte une fonction d'exportation, ou même une importation, de débit souterrain vers des bassins extérieurs ou vers la mer. Cette fonction d'échange de débit souterrain dépend du stock en eau souterraine dans le bassin pour permettre des résultats satisfaisants y compris avec des scénarios de changement climatique correspondant à des diminutions marquées de l'alimentation des bassins.

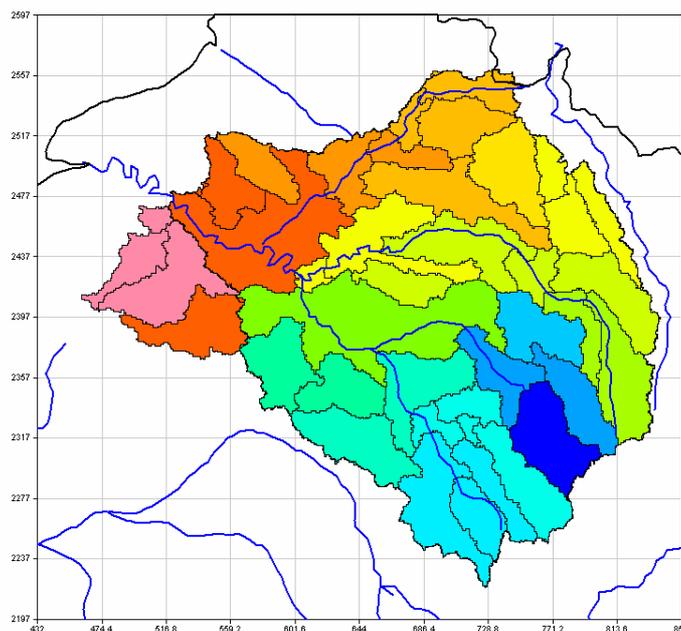


Figure 3 - Modélisation du bassin de la Seine à Poses avec le modèle EROS sous forme d'une grappe de 41 sous bassins.

6. Le modèle MARTHE

Principe général

Le modèle MARTHE (pour Modélisation d'Aquifères avec Maillage Rectangulaire, transport et Hydrodynamique; Thiéry 1990, 1993, 2004) est un modèle d'écoulement en milieu poreux en 3 D et en multicouche, par la méthode des volumes finis. Le domaine à modéliser est discrétisé selon un maillage rectangulaire de type "écossais" irrégulier avec possibilité de maillages gigognes emboîtés. Les maillages peuvent faire intervenir plus d'un million de mailles et les pas de temps de calculs irréguliers utilisés peuvent varier de quelques fractions de secondes à des siècles ou millénaires.

Le système aquifère modélisé est alimenté par une recharge calculée par le schéma GARDENIA à l'échelle de zones hydroclimatiques homogènes. Il peut intégrer un réseau hydrographique. Le modèle MARTHE permet aussi la prise en compte de discontinuités telles que des plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains).

MARTHE, qui peut réaliser une modélisation continue de la zone saturée et de la zone non saturée, peut en outre prendre en compte les aspects suivants :

- Migration hydro-dispersive d'un effluent dans la nappe et la zone non saturée.
- Interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
- Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
- Transferts d'énergie.
- Développement de la végétation.

Pour la modélisation des hydrosystèmes couplés avec un réseau hydrographique, les écoulements dans les cours d'eau sont réalisés par une méthode d'onde cinématique intégrant une relation débit – hauteur selon la loi de Manning-Strickler (Thiéry et Amraoui 2001).

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet RExHySS

Le modèle MARTHE a été utilisé dans le bassin de la Somme selon la configuration décrite dans Habets et al. (2009), avec un domaine modélisé de 7336 km², subdivisé en mailles de 500m sur les plateaux et 100m dans les vallées. Le calage a exploité les données observées en 5 stations de débit et 42 piézomètres sur la période 1986-2003 (18 ans).

7. Le modèle MODCOU

Le modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux, 1980, Ledoux et al., 1984, 1989) simule les écoulements couplés superficiels et souterrains sur un système hydrologique. Il assure le calcul du bilan hydrique journalier sur les bassins versants, des débits dans les rivières et des variations piézométriques des aquifères simulés. Il utilise pour cela les données climatiques standards que sont la pluviométrie journalière moyenne et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

MODCOU est un modèle distribué spatialement qui conceptualise un système hydrologique selon une couche superficielle et une ou plusieurs couches souterraines représentant les aquifères. Le calcul des flux est généralement mené au pas de temps journalier. Un modèle conceptuel à réservoirs simule le bilan hydrique sur chaque maille de la couche de surface en effectuant la partition entre l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement de surface et de subsurface et l'infiltration vers les formations aquifères sous-jacentes. Cette infiltration constitue la recharge des aquifères simulés (mono ou multi couches). Le retard induit par le transfert des flux d'eau à travers la zone non saturée, si elle existe, est modélisé par transfert dans un ensemble de réservoirs de type cascade de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970). Ce flux de recharge à la base de la zone non saturée contribue à la dynamique des formations aquifères qui est calculée par résolution de l'équation de diffusivité à deux dimensions par la méthode des différences finies. Les niveaux piézométriques calculés en toute maille du domaine souterrain sont couplés dynamiquement aux niveaux d'eau imposés dans les mailles « rivières » (ou mailles traversées par un tronçon de rivière) du domaine de surface pour simuler les échanges nappe-rivière qui constituent le débit de base. A ce débit de base s'ajoute le ruissellement superficiel vers les rivières, établi par routage isochrone le long du réseau de drainage de surface. Le temps de transfert de ce ruissellement dépend naturellement de la topographie et du temps de concentration fonction de l'extension des bassins versants.

Le modèle MODCOU a été utilisé pour simuler les écoulements sur de nombreux bassins, à différentes échelles (de quelques km² à plusieurs dizaines de milliers de km²) et de complexité hydrogéologique variée.

Deux applications distinctes de MODCOU ont été utilisées dans le cadre du projet REXHYSS :

- la première sur le bassin de la Seine, dont l'extension maximale, incluant l'ensemble des conditions aux limites hydrauliques des grandes formations aquifères simulées (Oligocène, Eocène, Craie), représente une surface de près de 95 560 km² (Gomez, 2002, Gomez et al., 2002, 2003) ; c'est cette version de MODCOU couplée au modèle agronomique STICS qui est utilisée dans le cadre du volet V5 dédié à l'irrigation.
- la seconde sur le bassin de la Somme (Korkmaz, 2008), d'extension 6400 km² et intégrant l'unique formation aquifère de la Craie.

8. Le modèle SIM

Principe général

Le modèle SIM (Safran-Isba-Modcou, Habets et al., 2008) est constitué par le couplage entre un système d'analyse météorologique à fine échelle (SAFRAN, Quintana-Sequi et al., 2008), le modèle de surface ISBA (Noilhan et Planton, 1989, Noilhan and Mahfouf, 1996) et le modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux et al., 1989).

Le système d'analyse SAFRAN a été développé à l'origine par le Centre d'études de la neige (Durand et al., 1993) pour la prévision du risque d'avalanches, puis a été étendu à la France entière (Le Moigne, 2002). Safran analyse huit paramètres météorologiques au pas de temps horaire : le vent à 10 mètres, la température de l'air et l'humidité relative à 2 mètres, la nébulosité, les rayonnements solaires visible et infrarouge, ainsi que les précipitations liquides et solides. Il s'appuie sur une méthode robuste d'interpolation optimale pour les principaux paramètres météorologiques. Son originalité provient du découpage en zones climatiques homogènes (les observations de zones voisines ont moins de poids que celles de la zone analysée) qui tient compte explicitement de l'altitude : pour une zone donnée, des analyses à différentes altitudes sont effectuées, avec une résolution verticale de 300 mètres. Dans l'application sur la

France entière, c'est le zonage Symposium de Météo-France, découpant la France en environ six cents zones, qui a été utilisé. Le modèle Safran s'appuie à la fois sur l'ensemble des observations disponibles du réseau d'observations (précipitation, température...) ainsi que sur les analyses des modèles atmosphériques (Arpège ou CEPMMT) qui servent d'ébauche pour l'analyse. En outre, il estime les termes de rayonnement (visible et infrarouge) à partir d'un modèle radiatif utilisant en entrée les paramètres analysés (nébulosité et champs d'altitude). Une validation de Safran a été effectuée par Quintana Seguí et al. (2008). Les données de Safran sont projetées sur une grille régulière 8 x 8 km sur la France.

Le schéma de surface ISBA (conçu à l'origine pour être utilisé dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat) a été progressivement enrichi pour les applications hydrologiques. La version du modèle utilisée (Boone et al., 1999) comporte trois couches dans le sol : couche superficielle, couche racinaire et couche profonde. Il intègre aussi un modèle d'évolution du manteau neigeux à trois couches (Boone et Etchevers, 2001) et des schémas de ruissellement et de drainage incluant une représentation sous maille de ces processus (Habets et al., 1999). Les paramètres décrivant la végétation et la texture du sol sont issus de la base ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) à la résolution de 1 km sur la France. ISBA étant un modèle physique, le seul paramètre de calage, le drainage sous maille, a été optimisé pour soutenir les débits d'étiage des cours d'eau lorsque que les nappes ne sont pas simulées explicitement par le modèle MODCOU. Dans le cadre du projet REXHYSS, cette possibilité n'a pas été utilisée. ISBA simule les bilans de surface à la résolution de 8 km, et en particulier le ruissellement de surface et le drainage profond, nécessaires pour l'alimentation du modèle hydrologique.

Les transferts hydrologiques sont simulés par le modèle hydrogéologique MODCOU, développé par l'École des Mines de Paris (Ledoux et al., 1989). Dans ce modèle MODCOU est utilisé sans sa partie « surface » (fonctions de productions). Le modèle reçoit en entrée les données de ruissellement et d'infiltration issues d'ISBA. Il calcule l'évolution spatiale et temporelle des niveaux piézométriques des aquifères. Utilisant l'équation de diffusivité. Il calcule les échanges aquifères/rivières, puis route les eaux de surface par le réseau hydrographique, utilisant un algorithme d'isochronisme. Les débits sont calculés avec un pas de temps de 3h, l'évolution dans les nappes est calculée avec un pas de temps d'un jour.

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet REXHYSS

La version de SIM utilisée dans REXHYSS est conforme à celle décrite dans Habets et al. (2008). Il n'y a pas eu d'adaptation pour le projet REXHYSS. La version de MODCOU utilisée dans SIM ne simulant pas l'évolution de la nappe de la Somme, seuls les résultats concernant le bilan hydrique de surface sont analysés dans le cadre de ce projet.

9. Le modèle CLSM

Principe général

Le modèle CLSM (pour Catchment Land Surface Model; Koster et al., 2000; Ducharne et al., 2000) est un modèle hydrométéorologique, qui simule sur des bases physiques l'ensemble des processus régissant les bilans d'eau et d'énergie au niveau du sol, selon une approche dite TSVA (Transferts Sol-Végétation-Atmosphère). Ces différents processus dépendent d'une part des conditions météorologiques, et d'autre part des propriétés de la surface (albédo, rugosité, indice de surface foliaire, physiologie du couvert végétal, propriétés hydriques des sols, etc.).

CLSM est un modèle semi-distribué, et son originalité est de rendre compte, dans chaque sous-bassin élémentaire, de l'influence de la topographie sur les écoulements et les hétérogénéités de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration. Il exploite à cette fin les concepts du modèle hydrologique de bassin TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) pour définir dans chaque sous-bassin une distribution de la profondeur de la nappe phréatique en fonction de la topographie. Cette distribution évolue à chaque pas de temps (20 min) en fonction de l'humidité moyenne du bassin et permet de subdiviser ce dernier en trois fractions (saturée – identifiable à une fraction inondée, non saturée, stressée) où les différents processus de surface dépendent de contraintes adaptées au régime hydrologique. A titre d'exemple, l'infiltration est nulle dans la fraction saturée, et la transpiration est nulle dans la fraction stressée (caractérisée par une humidité inférieure au point de flétrissement de la végétation). La distribution de la

profondeur de la nappe contrôle aussi l'écoulement de base, décrit selon TOPMODEL comme le drainage d'une nappe libre, et les transferts verticaux entre zone racinaire et nappe, qui tendent à ramener la zone non saturée vers l'équilibre hydrostatique (équation de Richards). Ils sont donc généralement descendants en hiver (recharge) et ascendants en été (remontée phréatique).

Il faut cependant noter que la nappe très superficielle décrite par TOPMODEL et CLSM n'est pas équivalente à des systèmes aquifères plus profonds, comme ceux qui prévalent dans le bassin sédimentaire de Paris, surmonté d'une zone non saturée épaisse (plusieurs dizaines de mètres), et dont les gradients hydrauliques sont beaucoup plus faibles que les gradients topographiques. Le modèle CLSM s'est ainsi avéré incapable de reproduire correctement le régime hydrologique très tamponné de la Somme, ce qui ce fut corrigé en introduisant un réservoir permettant de représenter de façon simplifiée le stockage d'eau dans le système profond (zone saturée *et* non saturée, sous le sol). Nous avons opté pour un réservoir linéaire, alimenté par une recharge issue de la nappe superficielle de TOPMODEL, et dont le débit sortant s'ajoute au débit de base (Gascoïn et al., 2009).

Caractéristiques des applications développées dans le cadre du projet RExHySS

C'est cette version de CLSM avec réservoir linéaire qui a servi dans les deux bassins de la Seine et de la Somme pour le projet RExHySS, les seules différences concernant les propriétés des bassins et les 5 paramètres calés, à savoir 2 contrôlant le fonctionnement de la nappe superficielle de TOPMODEL et 3 contrôlant celui du réservoir profond (voir Tableau 4).

Tableau 4: Comparaison des deux applications CLSM dans le projet RExHySS.

	Seine (Ducharne et al., in prep)	Somme (Gascoïn et al., 2009)
Paramètres a priori		
Exutoire (Surface contributive)	Poses (65716 km ²)	Abbeville (5566 km ²)
Nb de sous- bassins élémentaires	27	1
Résolution de la topographie	100-m	75-m
Propriétés des sols et de la végétation	ECOCLIMAP (Masson et al., 2003)	
Calibration/Validation		
Données Météorologiques	SAFRAN (Quintana-Segui et al., 2008)	
Période de calage/validation	Août 1986 - Juillet 2002 (16 ans)	Août 1985 - Juillet 2003 (18 ans)
Nb de stations pour le calage	22	1
Bassins où le réservoir profond est actif	12/27 (surtout au centre du bassin)	1/1
Critère de Nash à l'exutoire	0.84 (dt=1j)	0.79 (dt=10j)

Le modèle CLSM ne simule que des écoulements (en lame d'eau) dans les sous-bassins élémentaires, et ne rend pas compte de la transformation de ces écoulements en débits. Nous avons néanmoins calé les deux applications Seine et Somme pour reproduire au mieux les chroniques de débit observé, en exploitant le fait que les temps de concentration y sont de l'ordre de 10 jours ou moins (Gomez, 2002). Nous avons ainsi réalisé l'ajustement entre les moyennes décadaires des débits observés et les écoulements cumulés sur la surface contributive, ce qui gomme la plupart des différences de dynamique entre écoulements et débits. Dans le bassin de la Seine, nous avons aussi validé ce calage après transformation des écoulements en débits journaliers par un modèle de type Muskingum (McCarthy, 1939), qui nous a ensuite servi à simuler des débits journaliers sous scénario pour les volets V2 et V3, ce qui n'a pas été fait dans le bassin de la Somme.

Dans le bassin de la Seine, nous avons aussi intégré l'effet des principaux ouvrages de régulation (barrages réservoirs à l'amont du bassin sur la Seine, de la Marne et de l'Aube), grâce aux données de gestion des barrages effectivement réalisées en historique (source : IIBRBS). Ils permettent en effet un écrêtement des crues, sensible à l'échelle locale, et un soutien des étiages, sur l'ensemble du réseau aval. Pour la calibration et la validation, sous forçage SAFRAN, ces effets ont été rajoutés à la contribution des sous-bassins simulée en régime naturel par CLSM. Les débits simulés sous scénarios

climatiques désagrégés n'incluent en revanche aucune influence des barrages-réservoirs, que ce soit en temps présent ou en conditions futures.

Discussion sur la sensibilité de CLSM aux forts stress hydriques

La comparaison des différents modèles hydrologiques menée dans le cadre du volet V2 a montré que le modèle CLSM entraîne un assèchement beaucoup plus prononcé que les autres modèles en réponse au CC, dans les deux bassins versants, ce qui est associé au fait que ce modèle est le seul à simuler une augmentation de l'évapotranspiration sous CC. Des résultats récents (Longuevergne et al., 2009) nous amènent à interpréter ce comportement comme incorrect. Le modèle CLSM a en effet été utilisé pour simuler le fonctionnement hydrologique d'une colline de loess aux environs de Strasbourg, où est installé le gravimètre supraconducteur de l'Observatoire de Strasbourg. Les variations du stock d'eau souterrain simulées sur 7 ans à partir des forçages météorologique SAFRAN et des paramètres de sol et végétation caractéristiques du site peuvent être comparées aux variations gravimétriques mesurées par l'instrument, validées par ailleurs (Figure 4). Cette confrontation montre de bons résultats (covariations étroites des deux séries) sauf pendant l'été 2003, où le modèle CLSM surestime les pertes d'eau, ce que l'on attribue à une surestimation de l'évapotranspiration pendant cette période de sécheresse.

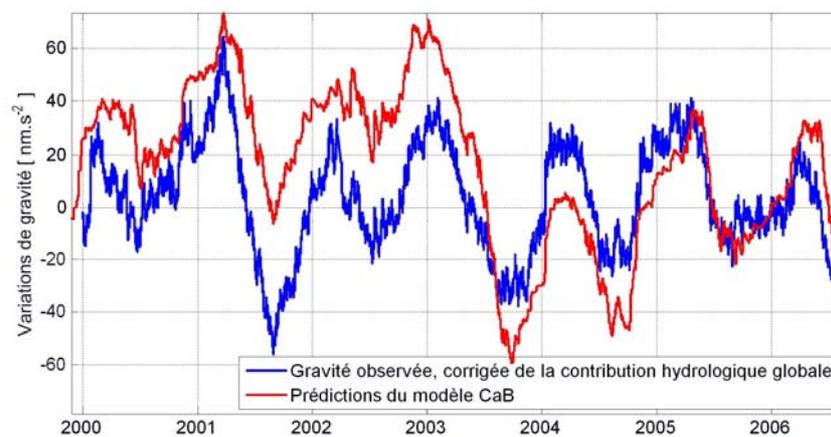


Figure 4 - Comparaison des anomalies gravimétriques observées par le gravimètre supraconducteur de l'Observatoire de Strasbourg (en bleu) et déduites des variations d'humidité souterraine simulées par le modèle CLSM (en rouge). Source : Longuevergne et al. (2009).

10. Références

- Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24:43-69.
- Boone A., J.-C. Calvet, J. Noilhan (1999) : Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method. *J. Appl. Meteor.*, 38, 1611-1630.
- Boone A. et P. Etchevers (2001) : An inter-comparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land-surface model: Local scale evaluation at an Alpine site. *J. Hydrometeorol.*, 2, 374-394.
- Ducharne, A., Koster, R.D., Suarez, M., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24823-24838.
- Ducharne A, Bellier S, Crespi O, Gascoïn S, Zhao Y. Validation of a catchment-based land surface model in the Seine River basin (France) using a simple routing model, in prep.
- Ducharne, A., Koster, R.D., Suarez, M., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration, *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24823-24838.
- Gascoïn S, Ducharne A, Ribstein P, Carli M, Habets F (2009). Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *Journal of Hydrology*, 368(1-4), 105-116, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.039

- Gomez, E. Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2002, 287 pp.
- Gomez E, Mignolet C, Mary B, Schott C, Brunstein D, Bornerand C, et al. Dynamique agricole et pollution nitrique diffuse: Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. Rapport de synthèse du Programme PIREN-Seine 1998–2001, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu; 2002.
- Gomez E, Ledoux E, Viennot P, Mignolet C, Benoit M, Bornerand C, et al. Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application au bassin de la Seine. La Houille Blanche; 2003 . p. 38–45. n°3/2003.
- Habets F, Gascoin S, Korkmaz S, Thiéry D, Zribi M, Amraoui N, Carli M, Ducharme A, Leblois E, Ledoux E, Martin E, Noilhan J, Otlé C and Viennot P (2009). Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France). To be submitted to Hydrology and Earth System Science.
- Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E.Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P.Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, Journal of Geophysical Research (D: Atmospheres), 113, D06113(2008)18.
- Habets F., P. Etchevers, C. Golaz, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan et C.Otlé, 1999 : Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin. J. Geophys. Res., 104, 31145-31172.
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. Hydrological Sciences Journal, 31(1): 13-24.
- Korkmaz S, Ledoux E, Önder H (2009). Application of the coupled model to the Somme river basin, Journal of Hydrology, 366, 21-34.
- Koster, R.D., Suarez, M., Ducharme, A., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure. J. Geophys. Res., 105(D20): 24809—24822.
- Le Moigne P., 2002 : Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME, Météo-France.
- Ledoux, E., Girard, G. & de Marsily, G., 1989: Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : *Unsaturated flow in hydrologic modeling, Theory and practice*, Kluwer Academic Publishers, pp. 435-454.
- Ledoux, E., Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Ph.D. thesis, Ecole des Mines, 1980.
- Longuevergne L, Gascoin S, Boy JP, Rinaldi S, Ducharme A, Florsch A, Hinderer J (2009). Superconducting Gravimeter Measurements for Land Surface Model assessment. Submitted to GRL.
- Masson V., Champeaux J-L., Chauvin F., Meriguet C., and Lacaze R. (2003) A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models, J. Climate, 16, 9, 1261-1282.
- McCarthy, G. T. (1939), The unit hydrograph and flood routing. U.S. Corps Eng., Providence, R.I.
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970). River flow forecasting through conceptual models - Part I - A discussion of principles, Journal of Hydrology, vol 10, no 3, p 282-290.
- Noilhan J., Planton, S. (1989) : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. Mon. Weather Rev., 117, 536-549.
- Noilhan J., Mahfouf J.-F. (1996) : The Isba land surface parameterization scheme. Global Planet. Change, 13, 145-159
- Oudin, L., V. Andréassian, T. Mathevet, C. Perrin, and C. Michel (2006), Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations, Water Resour. Res., 42, W07410, doi:10.1029/2005WR004636.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1-4): 275-289.
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Franchisteguy L., Morel S. and

- Noilhan J. (2008). The SAFRAN atmospheric analysis: Description and validation. *J. Applied Meteorol. and Climatology*, 47, 92–107.
- Thiéry, D., 1990. MARTHE. Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements. Version 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU n° R32210.
- 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. et Moutzopoulos, C., 1995. Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. *VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM "Régionalisation en hydrologie, application au développement"*. In *Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions*, pp. 285-295.
- Thiéry D., Amraoui, N. (2001) – Hydrological modelling of the Saone basin. Sensitivity to the soil model. *Physics and Chemistry of the Earth Journal, Part B Vol. 26 (5-6)* pp. 467-472.
- Thiéry, D., 2003. Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. *Rapport BRGM n° RP 52832*. <http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-52832-FR>
- Thiéry, D., 2004. Simulation d'une grappe de bassins versants du Doubs et de la Loue avec le modèle ÉROS - Prise en compte d'exportations et d'importations. *Note technique NT EAU 2004/23*.
- Thiéry D. (2004). Plaquette de présentation du code de calcul MARTHE du BRGM. Note technique BRGM n°EAU 2004/21. <http://www.brgm.fr/pdf/logiciels/Marthe.pdf>
- Thiéry D. (2004). Plaquette de présentation du code de calcul GARDÉNIA du BRGM. Note technique NT EAU 2004/22.
- Thiéry D. (2005). Code ÉROS v.4.0 : Description succincte du fonctionnement et des paramètres. Note technique NT EAU 2005/04.