

# Raffinement de la modélisation hydrologique couplée du Grand Morin

Nicolas FLIPO<sup>1</sup>, Céline MONTEIL<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Centre de Géosciences, Mines ParisTech, UMR 7619 Sisyphe, 35 rue Saint-Honoré, 77 305 Fontainebleau.

Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr

## Table des matières

1. Introduction	1
2. Construction du modèle du Grand Morin	2
3. Les observations	4
4. Critères statistiques utilisés	6
5. Etape de calage	7
5.1. Paramétrisation du modèle	7
5.2. Conditions limites	9
5.3. Critique de la paramétrisation du modèle de surface	10
5.4. La piézométrie	10
5.5. Les débits - Effet du pas de temps sur les critères statistiques	13
6. Etape de validation	14
6.1. La piézométrie	14
6.2. Les débits	15
7. Conclusions	16

## 1. Introduction

La contamination azotée élevée des aquifères et des rivières du bassin de la Seine a conduit le PIREN SEINE à étudier, depuis une dizaine d'années, l'origine, le transfert, et le devenir des flux d'azote d'origine agricole. A cet effet, plusieurs actions ont été entreprises.

Tout d'abord un vaste travail d'enquêtes a été mené par l'INRA afin de renseigner les pratiques agricoles et les itinéraires techniques à l'échelle du bassin (Benoît et al. 2000). Les résultats de ces enquêtes ont ensuite été dépouillés et rendus utilisables par le modèle STICS (Brisson et al. 1998), qui simule à l'échelle d'une colonne de sol les flux de nitrates infiltrés à la base de la zone racinaire. Une base de données, rassemblant l'ensemble de ces éléments a été constituée.

Parallèlement à ce travail, une modélisation spatialisée a été mise en place à l'échelle du bassin de la Marne (Gomez 2002; Gomez et al. 2003). Cette modélisation basée sur une régionalisation du modèle STICS, couplée avec la représentation explicite des aquifères, a permis de mieux caractériser le transfert des pollutions azotées sur le long terme (30 ans). Les deux projets ont été menés en étroite relation.

L'étude du potentiel dénitrifiant des zones riveraines a été menée de concert avec les deux actions précédentes. Cette approche, basée sur des méthodes isotopiques, a permis de mieux comprendre

l'effet de la dénitrification sur l'enrichissement en  $^{15}\text{N}$  des nitrates de la colonne d'eau (Sebilo 2003; Sebilo et al. 2003). Elle a aussi permis de montrer le faible potentiel dénitrifiant des aquifères tertiaires.

Ces trois approches ont été menées sur de grandes extensions spatiales. Afin de mieux comprendre les transferts et transformations de l'azote dans le milieu naturel, un changement d'échelle a été effectué afin de s'intéresser plus spécifiquement au bassin du Grand Morin, dont les pratiques agricoles sont représentatives de celles du plateau briard. Pour ce faire la plate-forme de modélisation CAWAQS (CATCHment WATER Quality Simulator) a été développée (Flipo 2005; Flipo et al. 2007; Flipo et al. 2007).

Suite à ces travaux, le PIREN s'intéresse aujourd'hui à la production de gaz à effet de serre et notamment à la production de  $\text{N}_2\text{O}$ . A cet effet des piézomètres ont été installés sur le bassin versant de l'Orgeval par la FIRE (Fédération Ile-de-France de Recherche en environnement). L'objet de cette étude est de suivre l'évolution des teneurs en nitrates et  $\text{N}_2\text{O}$  le long d'un gradient plateau agricoles - zone riparienne - rivière (Vilain et al. 2008). Afin d'être à même de simuler les flux d'azote, nous avons décidé de raffiner le modèle hydrologique bi-couche du Grand Morin en un modèle tri-couche pour mieux simuler les transferts hydriques dans le bassin et notamment les soutiens d'étiage du bassin de l'Orgeval qui étaient mal représentés par le modèle bi-couche, notamment du fait que l'Orgeval draine plusieurs aquifères.

La période de calage du modèle s'étend de août 1986 à septembre 1996. Cette période est identique à la période de calage du modèle bi-couche (Flipo 2005). Elle couvre plusieurs périodes distinctes du point de vue hydrologique, et notamment la période de sécheresse 1989-1992. Pour valider le modèle, nous nous sommes focalisés sur une période allant de août 1996 à septembre 2001. La période est deux fois plus courte que celle de calibration, ce qui a souvent pour conséquence directe de diminuer la qualité des critères statistiques.

Tout d'abord nous présentons le domaine modélisé en caractérisant la structure du bassin sédimentaire et les entités hydrogéologiques identifiées. Ensuite nous présentons les observations dont nous nous sommes servis pour caler et valider le modèle. Finalement l'estimation de la qualité du calage final par rapport à des fonctions objectifs, ainsi que la validation du modèle sont présentées pour aboutir à une synthèse du fonctionnement hydrogéologique du bassin.

## **2. Construction du modèle du Grand Morin**

Le Grand Morin est un site privilégié en terme de suivis des flux d'eau et de matière. En effet, un sous bassin du Grand Morin, l'Orgeval, a été instrumenté par le CEMAGREF depuis le début des années 50. Par ailleurs, la station hydrographique de Pommeuse est une station de référence de la DIREN en ce qui concerne les annonces de crues. De plus, le Grand Morin est un site atelier du PIREN SEINE qui y a réalisé de nombreuses campagnes de terrain concernant l'azote, le phosphore, le carbone, et, plus récemment, le périphyton, les polluants organiques persistants, ainsi que les métaux. Enfin, le bassin du Grand Morin constitue, à moyenne échelle, un espace représentatif de l'exploitation agricole du bassin de la Marne. Les zones rurales représentent 73% de la surface du bassin. De plus le bassin du Grand Morin fait l'objet d'un programme de recherche pérenne par le biais du GIS ORACLE. Il est aussi un site privilégié de recherche pour la FIRE (Fédération Ile-de-France de Recherche en Environnement) qui y a implanté des piézomètres en 2007 afin de suivre la production de peroxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Le bassin versant du Grand Morin, d'une superficie de  $1200 \text{ km}^2$ , appartient au plateau Briard. Les limites d'un bassin versant surfacique ne sont pas les mêmes que celles du bassin versant souterrain. Dans le cadre d'une modélisation couplée surface-souterrain, ce sont les conditions limites hy-

drogéologiques qui fixent l'extension du domaine. Pour le Grand Morin, les limites hydrogéologiques sont : la Marne, le Petit Morin, l'Yerre, et la cuesta d'Ile de France<sup>1</sup> (Fig. 1).

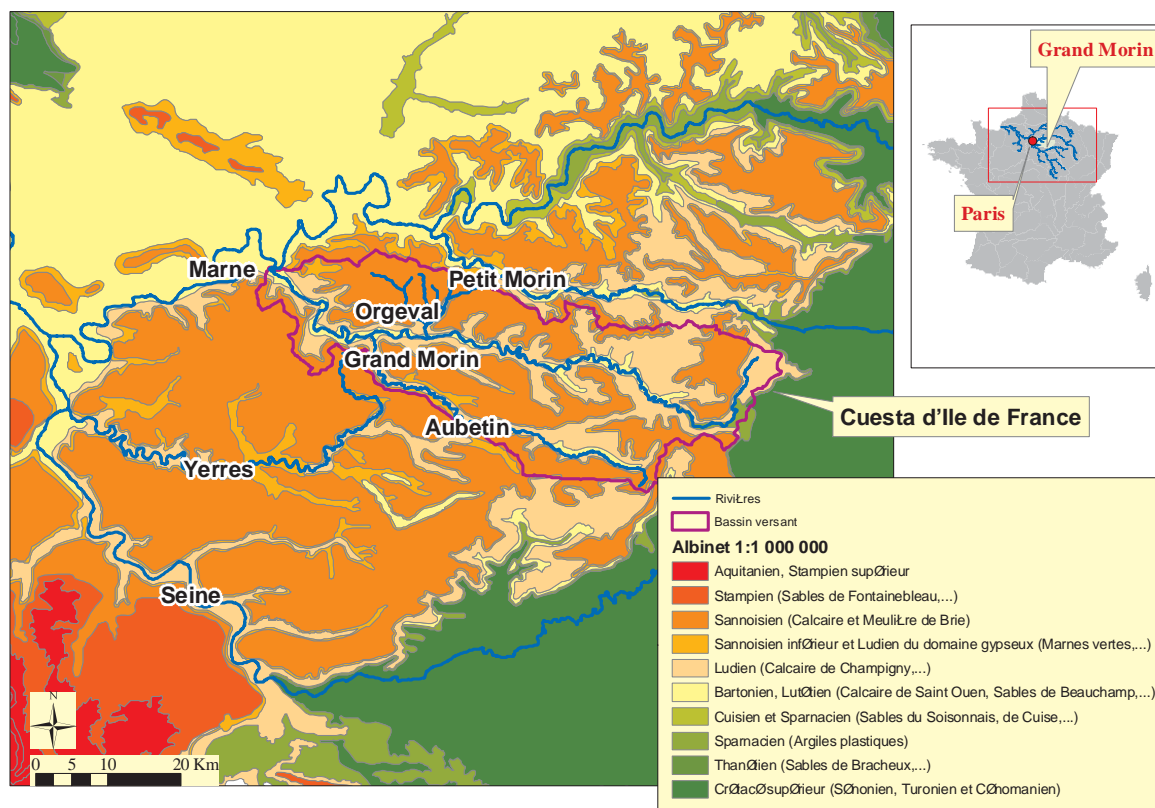


Figure 1: Le Grand Morin dans son contexte géologique

La structure multicouches des aquifères tertiaires du Grand Morin est assez complexe (Flipo 2005). Nous avons ici choisi de raffiner le modèle bi-couche réalisé par Flipo (2005) en un modèle tricouche à l'aide du modèle structural du Tertiaire du BRGM. Nous avons réalisé trois regroupements d'entités hydrogéologiques: l'Oligocène (Calcaires de Brie et sables de Fontainebleau), la nappe du Champigny (Eocène supérieur) et une formation dite profonde qui regroupe les sables de Monceau, les calcaires de Saint Ouen, les sables de Beauchamps et d'Auvers ainsi que la formation du Lutétien.

Ce découpage est justifié par la présence des marnes vertes et marnes supragypseuses qui forment une discontinuité hydraulique entre les calcaires de Brie et du Champigny. Pour le bassin du Grand Morin, l'épaisseur de cette formation peut atteindre 30m à l'ouest du modèle alors qu'elle est parfois inexistante à l'est (zone où les calcaires de Brie sont très morcelés).

Même si à l'échelle du bassin de la Seine, il a été admis que les argiles et sables de Beauchamp, qui séparent les deux unités de l'Eocène, et dont l'épaisseur varie de 1 à 30 m (AESN 1974), ne constituaient pas une barrière hydraulique efficace, à l'échelle plus locale du Grand Morin, cette discontinuité hydraulique est prise en compte car elle contraint les écoulements dans les deux formations identifiées. Toutefois cette limite n'est pas évidente à repérer et semble être peu épaisse, apparaissant en lentilles peu perméables.

<sup>1</sup>La cuesta d'Ile de France marque, à l'Est du bassin du Grand Morin, le passage brusque des formations tertiaires à la craie du Secondaire.

Les nappes alluviales ne sont pas prises en compte explicitement car leur alimentation dépend largement des coteaux. Cette alimentation est prise en compte dans l'écoulement des autres aquifères. Par ailleurs, leur impluvium propre ne représente qu'une faible partie de la surface totale.

La définition des mailles souterraines a été réalisée en croisant les informations spatiales du MN<sup>2</sup> et les données altimétriques qui définissent les toits et murs des aquifères tertiaires (modèle structural du Tertiaire du BRGM). Le mailleur automatique AV-XMAILLE (Théry et Flipo 2004) a été utilisé pour construire le modèle.

La figure 2 présente la structure projetée du modèle tri-dimensionnel. Quant à la figure 3, elle permet d'appréhender la variabilité spatiale des entités modélisées. Il ressort de l'analyse des données que l'épaisseur des trois couches croît d'Est en Ouest.

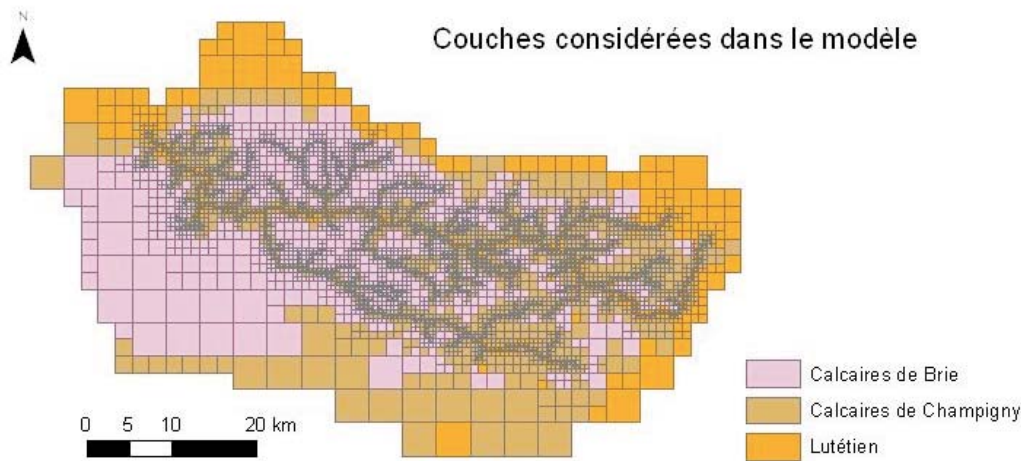


Figure 2: Variabilité spatiale de l'épaisseur des aquifères modélisés

La modélisation hydrologique du Grand Morin a été réalisée à l'aide du modèle CAWAQS (Flipo 2005; Flipo et al. 2005) qui permet de simuler de manière déterministe et spatialisée les flux hydriques dans le bassin versant ainsi que dans les trois entités hydrogéologiques identifiées. Pour pouvoir modéliser finement les transferts nappes-rivières, le côté des plus petites mailles a été fixé à 250 m, ce qui permet de bien identifier les mailles drainantes pour les confluences entre petits ordres.

### 3. Les observations

Les données utilisées pour caler puis valider le modèle proviennent de stations limnimétriques situées à l'exutoire de sous-bassins versants emboîtés (données de l'Orgeval et du Grand Morin) et d'observations piézométriques continues (Figure 4).

Les données piézométriques concernant les calcaires du Champigny proviennent de la base de données ADES, commune à l'AESN et au BRGM. Pour ce qui est des calcaires de Brie, seul un puits de forage et un piézomètre sont disponibles sur l'Orgeval. Ces données proviennent des bases de données du CEMAGREF. Des données sont disponibles de 1964 à nos jours. Aucun piézomètre n'atteint la formation profonde du Lutétien.

<sup>2</sup>Modèle Numérique de Terrain

## Variations des épaisseurs des trois couches du modèle

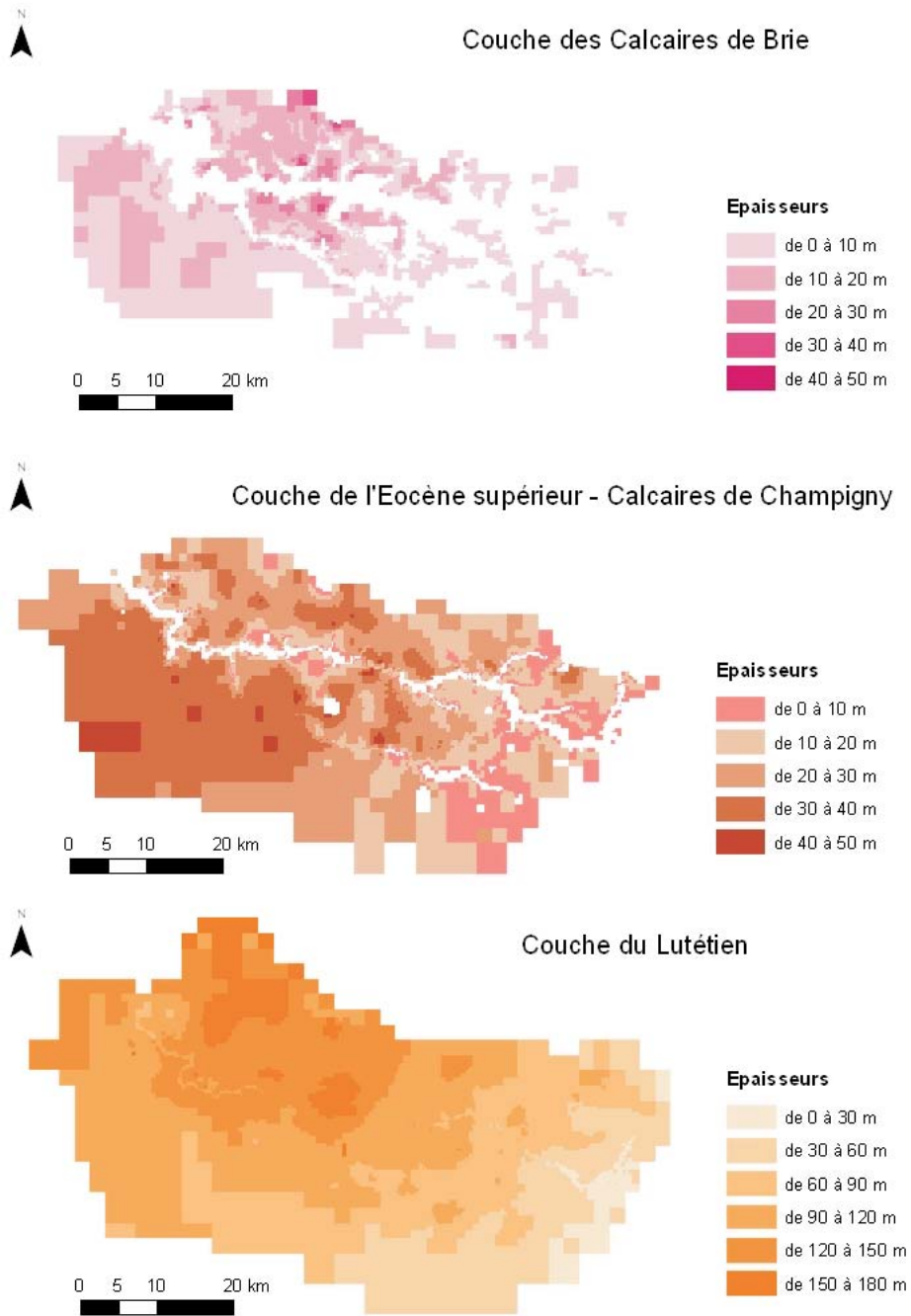


Figure 3: Variabilité spatiale de l'épaisseur des aquifères modélisés

Nom	Rivière	Superficie km <sup>2</sup>	Période	Origine	Confiance
Montry	Grand Morin	1190.0	1967-1992	Banque HYDRO	Elevée
Crécy-la-Chapelle	Grand Morin	1070.0	1990-2004	Banque HYDRO	Très limitée
Pommeuse	Grand Morin	770.0	1971-2004	Banque HYDRO	Très élevée
Meilleray	Grand Morin	336.0	1996-2004	Banque HYDRO	Elevée
Lavanderie	Aubetin	270.0	1991-1996	CGE	Moyenne
Le Theil	Ru de l'Orgeval	104.0	1962-2004	CEMAGREF	Elevée
Les Avenelles	Ru des Avenelles	45.7	1962-2004	CEMAGREF	Elevée
La Gouge	ru des Avenelles	24.7	1962-1984	CEMAGREF	Moyenne
Mélarchez	ru du Fosse Rognon	7.1	1962-2004	CEMAGREF	Elevée

Tableaux 1: Caractéristiques des stations hydrographiques

Les données des stations hydrographiques (Figure 4 & Tableau 1) proviennent de la banque HYDRO pour les stations de Montry, Crécy-La-Chapelle, Pommeuse, et de Meilleray en amont du Grand Morin. Les stations de l'Orgeval, Le Theil, Les Avenelles, La Gouge et Mélarchez sont gérées par le CEMAGREF. Le suivi de la Lavanderie, sur L'Aubetin, a été réalisé par la CGE dans le cadre du projet ISMAP (ISMAP 1997, ). La station de Crécy non référencée sur la Figure 4 est réputée peu précise. En effet elle indique très fréquemment des pertes de débits importantes entre Pommeuse et Crécy, ce qui n'est pas réaliste. Elle n'a donc pas été retenue.

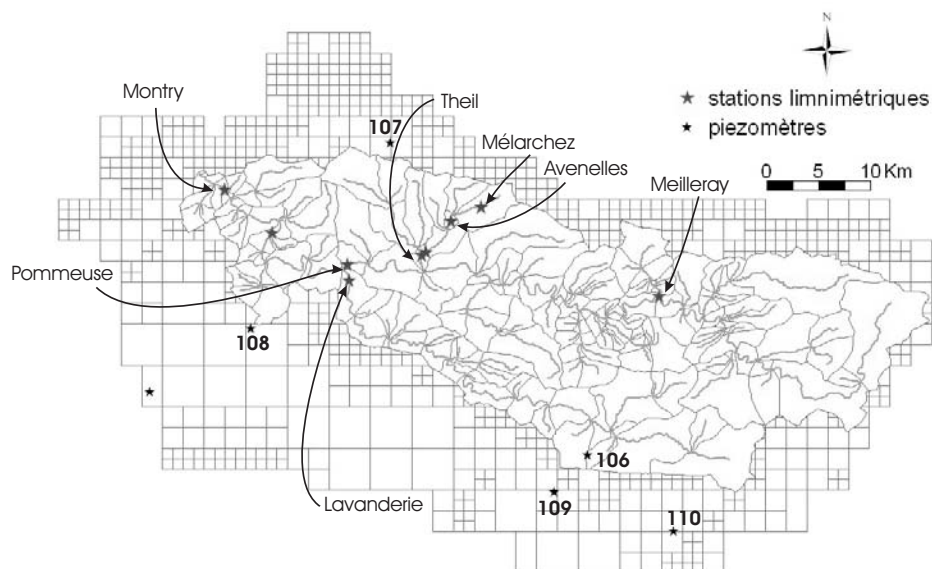


Figure 4: Localisation des points d'observation : piézomètres et station de jaugeage du débit.

#### 4. Critères statistiques utilisés

L'évaluation du modèle consiste à comparer les valeurs simulées aux valeurs observées. En plus d'une analyse subjective des chroniques simulées comparées aux chroniques observées, des critères

statistiques objectifs sont utilisés pour caractériser globalement la qualité de la simulation. Les deux approches sont complémentaires. Dans ce travail, nous avons utilisé les critères classiques en hydrologie: biais, corrélation, et critère de Nash.

Soit  $N$ , le nombre de valeurs que l'on veut comparer et  $X$  la variable simulée ou observée (indice *sim* ou *obs*). Pour estimer la qualité de la modélisation, nous utiliserons les critères statistiques suivants :

- le biais ou erreur moyenne (BIAIS), en pourcentage :

$$BIAIS = 100 \times \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} (X_{sim}(t) - X_{obs}(t))}{\bar{X}}$$

Le biais permet de quantifier l'écart relatif moyen entre les chroniques simulées et les chroniques observées. La valeur optimale est 0. Une valeur positive indique une sur-estimation des variables et une valeur négative, une sous-estimation.

- le critère de Nash (NS) :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=N} (X_{sim}(t) - X_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=N} (X_{obs}(t) - \bar{X}_{obs})^2}$$

Le critère de Nash mesure la part de la variance expliquée grâce au modèle. NS peut varier de  $-\infty$  à 1. Une valeur supérieure à 0,7 est généralement considérée comme satisfaisante, la valeur optimale étant 1. NS est utilisé en particulier pour estimer la qualité des débits simulés.

- le coefficient de corrélation  $\rho$  :

$$\rho = \frac{1}{N} \times \frac{\sum_{t=1}^{t=N} (X_{obs}(t) - \bar{X}_{obs})(X_{sim}(t) - \bar{X}_{sim})}{\sigma_{X_{obs}} \times \sigma_{X_{sim}}}$$

Ce critère évalue la co-fluctuation des séries simulées et observées. Le calage est d'autant plus satisfaisant que ce coefficient est proche de 1.

## 5. Etape de calage

### 5.1. Paramétrisation du modèle

La figure 5 illustre la distribution des paramètres pour les calcaires de Brie et du Champigny. Vu le manque cruel d'informations concernant les calcaires de Brie, nous avons fixé les paramètres homogènes sur l'ensemble de la couche: la transmissivité à  $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  et l'emmagasinement à  $10^{-3}$ .

La figure 6 illustre la distribution des paramètres pour la couche profonde. La drainance verticale entre les calcaires du Champigny et cette couche profonde est homogène, fixée à  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$



## Calage des paramètres spatialisés du modèle

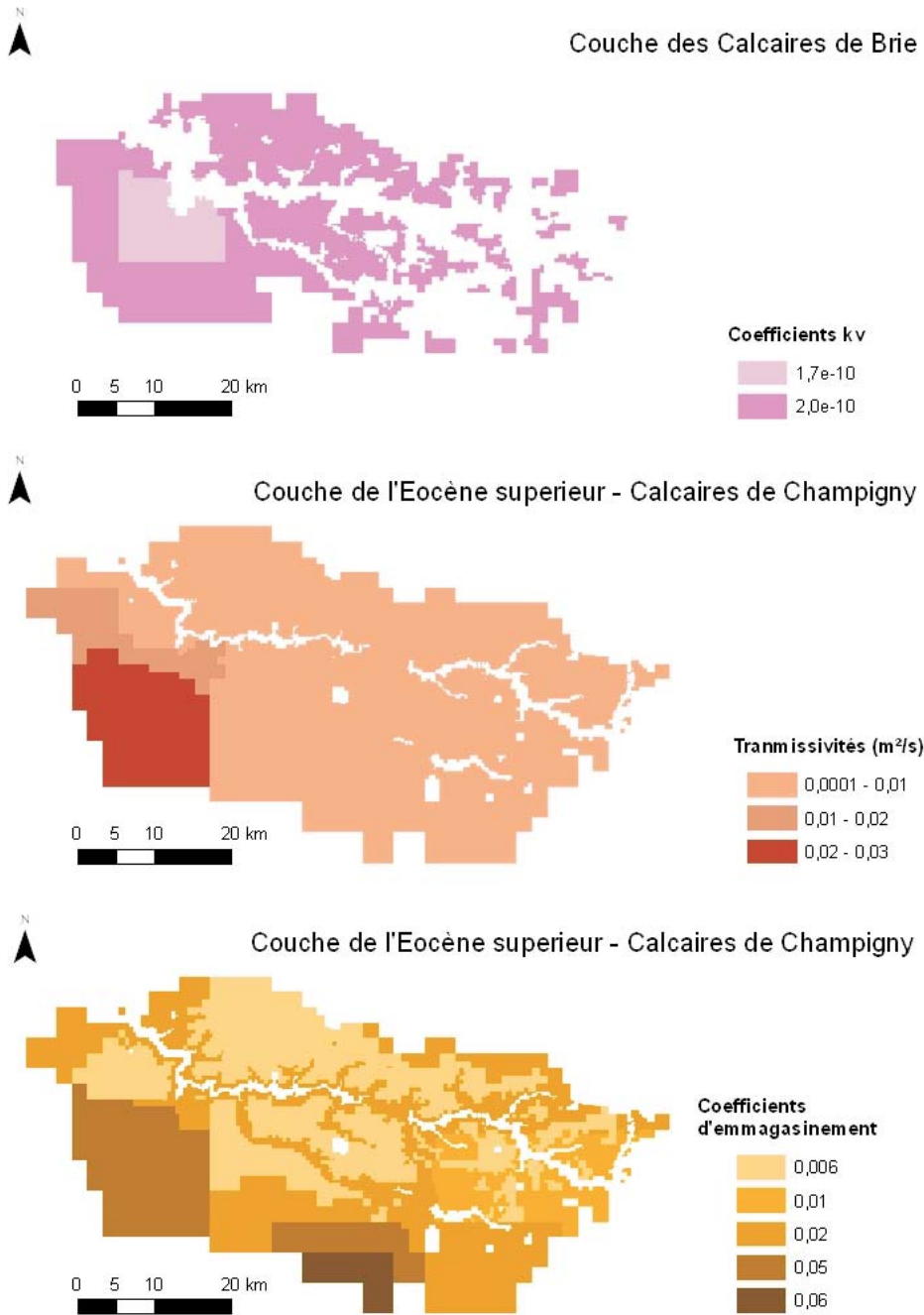


Figure 5: Paramétrisation des calcaires de Brie et des calcaires du Champigny. transmissivités ( $m^2s^{-1}$ ), emmagasinement (adim), drainance verticale ( $s^{-1}$ ).



## Calage des paramètres spatialisés, couche du Lutétien

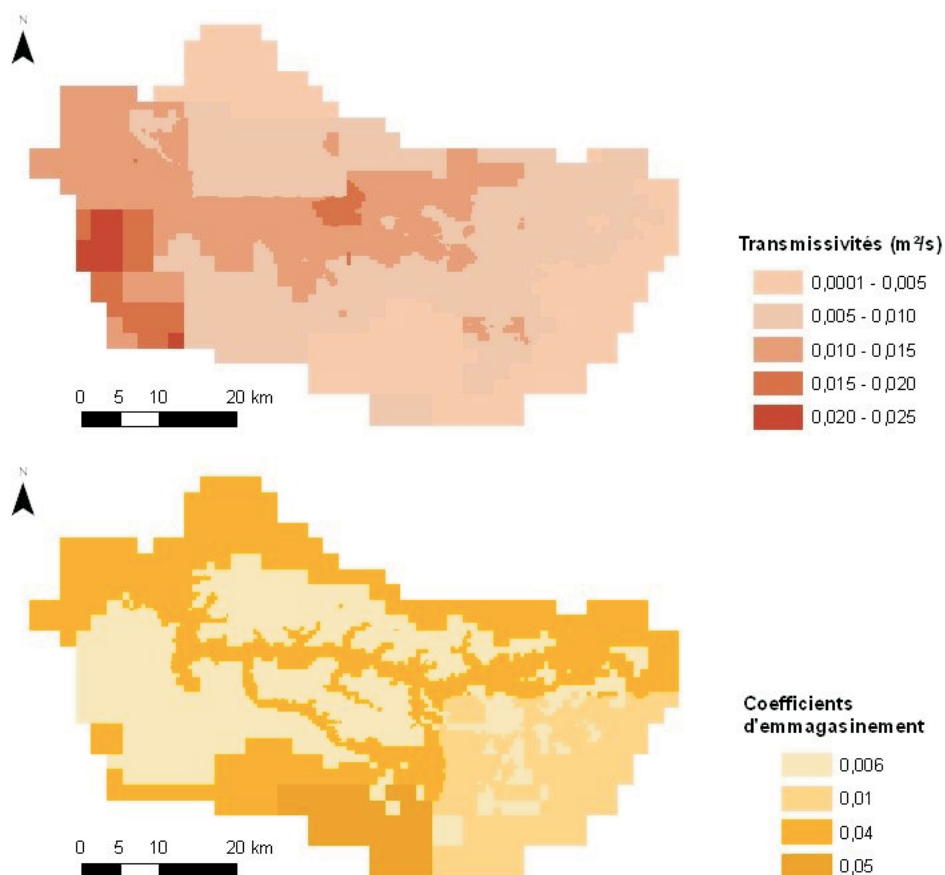


Figure 6: Paramétrisation de la couche profonde. transmissivités ( $m^2s^{-1}$ ), emmagasinement (adim)

### 5.2. Conditions limites

Les limites d'un bassin versant surfacique ne sont pas les mêmes que celles du bassin versant souterrain. Dans le cadre d'une modélisation couplée surface-souterrain, ce sont les conditions limites hydrogéologiques qui dictent l'extension du domaine. Pour le Grand Morin, nous nous sommes appuyés sur les principaux affluents, la Marne, le Petit Morin, l'Yerre et la cuesta d'Ile de France<sup>3</sup>.

Les conditions limites hydrogéologiques imposées sur le Grand Morin sont de deux types :

- les conditions de Dirichlet (ou conditions de potentiel imposé). Pour la formation profonde du Lutétien, les cotes de drainage au nord du domaine ont été déterminées, pour une maille drainée, en utilisant le minimum de la cote du MNT sur cette maille. Par contre au sud, la géologie étant plus complexe, nous avons eu recours à une modélisation à plus grande échelle afin d'imposer les côtes piézométriques sur la bordure ouest du modèle (Viennot 2007). Les écoulements simulés à l'échelle régionale permettent ainsi de contraindre les écoulements simulés locale-

<sup>3</sup>La Cuesta d'Ile de France marque, à l'Est du bassin du Grand Morin, le passage brusque des formations tertiaires à la Craie du Secondaire.

ment. Les cotes de drainage des calcaires de Brie ainsi que des zones affleurante du Champigny ont toutes été déterminées en prenant le minimum des valeurs du MNT.

- les conditions de Neumann (ou conditions de flux imposé). Cette condition ne concerne que la formation profonde. La cuesta d'Ile de France constitue une limite à flux nul. A la base de la couche profonde, on ne considère aucun transfert avec la formation plus profonde de la Craie, d'où une condition de flux nul. Pour toutes les mailles affleurantes, le flux infiltré est calculé à partir des variables de forçage.

### 5.3. Critique de la paramétrisation du modèle de surface

Toutes les simulations reposent sur une bonne évaluation de la lame d'eau disponible à l'écoulement et de la répartition de cette lame entre ruissellement et infiltration. Il semble que le calage des paramètres du modèle de surface pourrait être amélioré. En effet, à toutes les stations hydrographiques, le modèle a tendance à sous-estimer les pointes de crue (Figure 7). De même, le modèle présente des difficultés pour simuler des événements humides successifs. Le calage des paramètres qui règlent, à chaque pas de temps, la quantité d'eau disponible à l'écoulement, serait à affiner d'avantage. Cette tâche est délicate. En effet, ces paramètres caractérisent la réactivité des sols face aux événements pluvieux. On aborde certainement ici une limite de la modélisation conceptuelle du modèle de surface. En effet, ces paramètres sont fixes; ils ne peuvent donc pas intégrer les variations inter-annuelles des caractéristiques des sols : prélèvement par la végétation, formation d'une croûte de battance sur sol nu, etc. Ils ne prennent pas non plus en compte des évolutions à plus long terme, comme l'augmentation du taux de drainage des surfaces cultivées.

Par ailleurs, à ces réflexions, s'ajoute un autre facteur, à savoir la validité des forçages météo. Les données d'entrée du modèle (pluie, ETP) peuvent être sur ou sous-estimées par SAFRAN. Ces erreurs possibles ont, ensuite, des conséquences majeures en terme de volumes d'eau écoulés. Cependant, pour le calage, les volumes d'eau moyens simulés sont cohérents au regard des débits observés (Tableau 2). Une autre piste serait aussi d'exploiter au mieux la résolution temporelle de SAFRAN qui définit des forçages horaires alors que nous avons utilisé un pas de temps journalier. La modélisation des ruissellements de surface et subsurface pourrait certainement être améliorée en utilisant une discrétisation temporelle plus fine en surface que pour les transferts en milieu souterrain où les écoulements sont pas essence même très lents.

### 5.4. La piézométrie

Un bon calage de la piézométrie est primordial pour bien représenter les écoulements en rivière. Par exemple, une piézométrie sous-estimée a pour conséquence de sous-estimer les débits apportés aux cours d'eau. Nous sommes arrivés à un niveau de calage satisfaisant concernant les piézomètres du domaine en terme d'amplitude globale des piézomètres et surtout de niveaux piézométriques (Figure 8). Cependant, il existe parfois des écarts dynamiques liés à des retards de pics entre observations et simulations. Vue l'information dont nous disposons, il est difficile de caler plus finement. En effet, le risque est d'introduire des discontinuités très localisées des caractéristiques du milieu, sans réelles justifications physiques. Nous avons donc décidé d'en rester à ce niveau de calage. Le piézomètre 109 n'est pas figuré sur les graphes car, étant localisé à la frontière d'une maille NEWSAM à potentiel imposé, il n'est pas représentatif.

Le fait d'avoir discrétisé la couche Eocène du modèle bicouche initial de Flipo (2005) a permis d'améliorer le calage des piézomètres les plus représentatifs (106, 107 et 108). Notons que le piézomètre 110 est trop influencé par les conditions limite du modèle pour représenter correctement

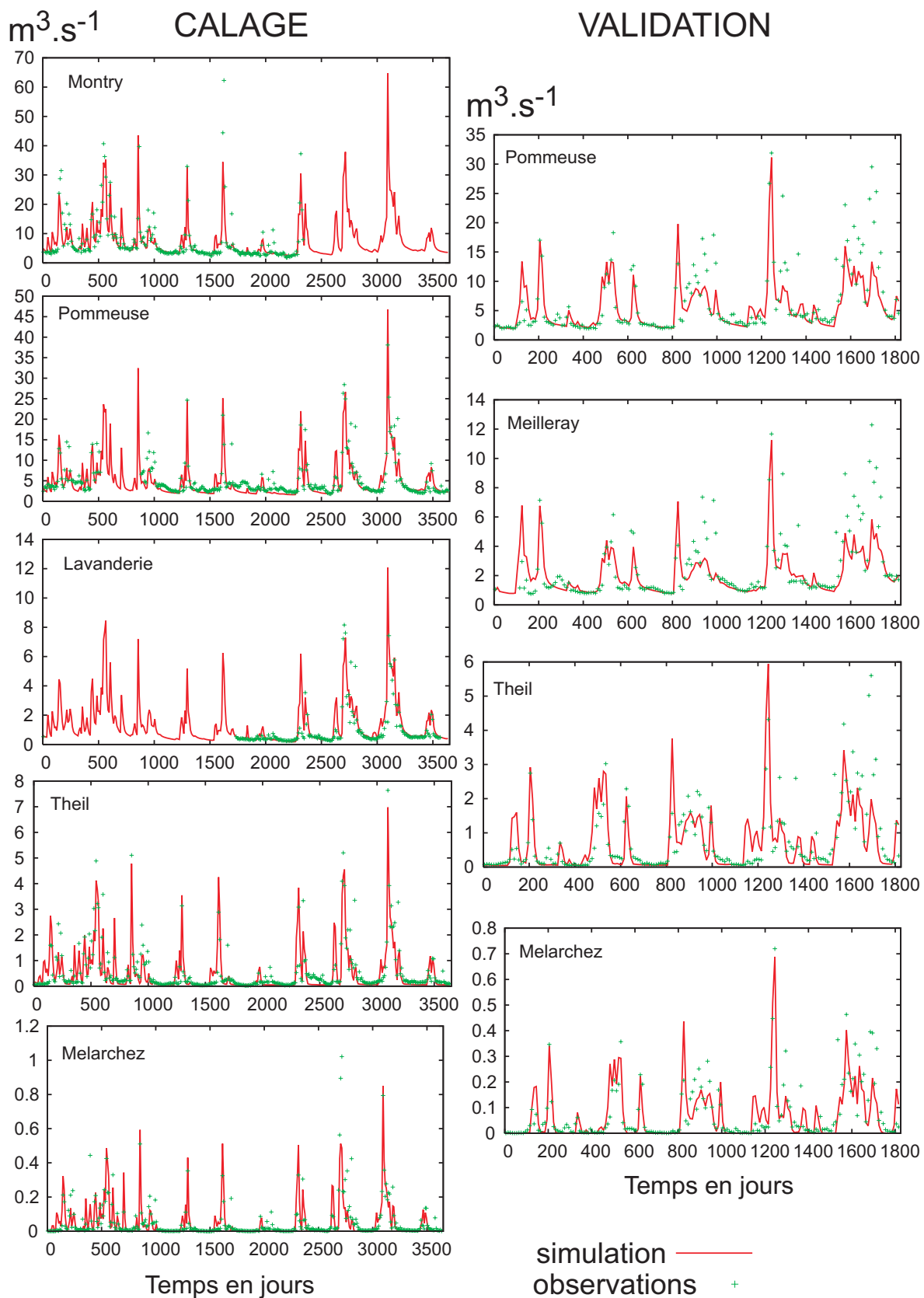


Figure 7: Comparaison des débits simulés et observés en  $m^3.s^{-1}$ . Pas de temps décadaire. A gauche, résultats du calage, à droite, résultats de la validation.

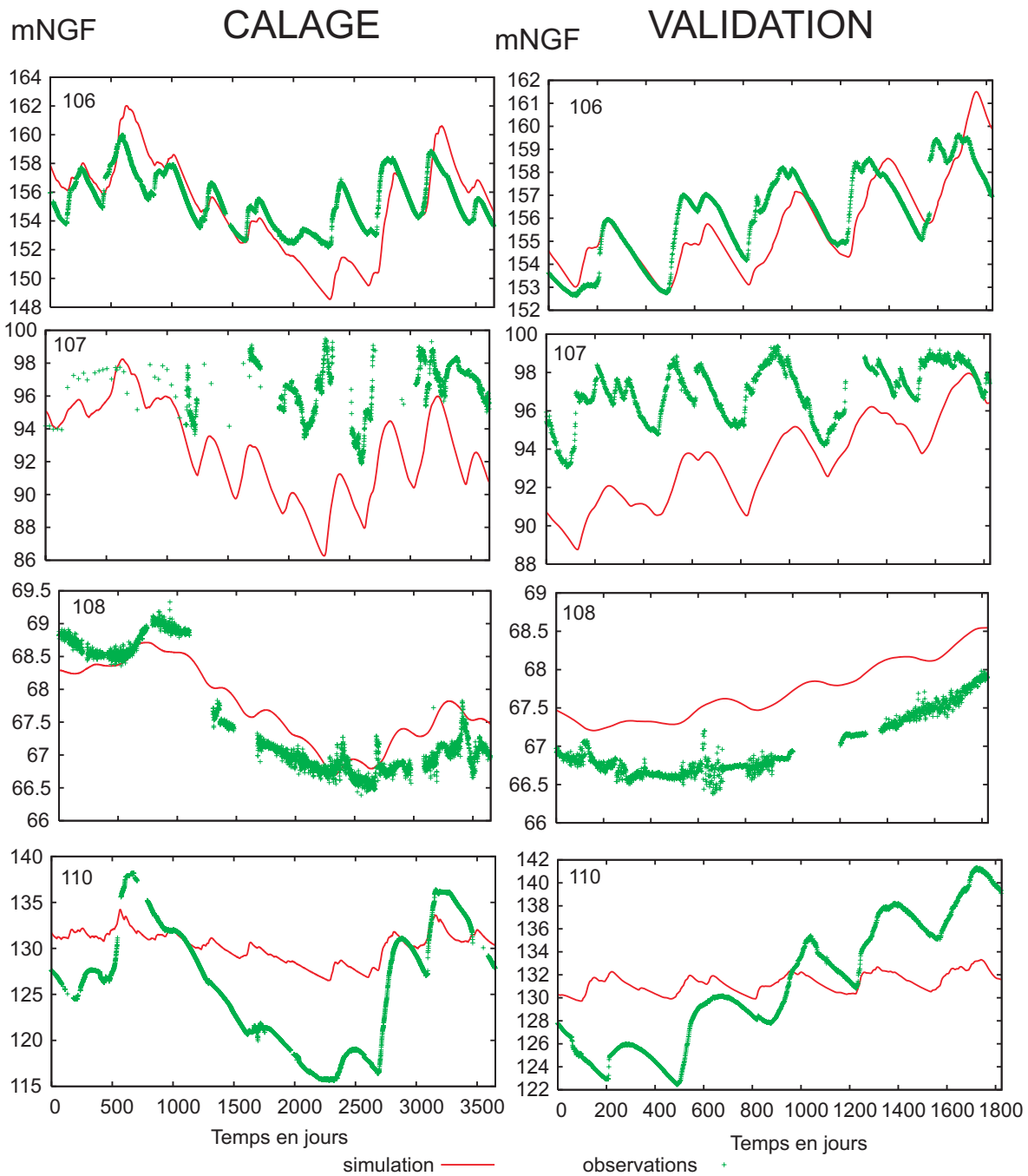


Figure 8: Comparaison des piézométries simulées et observées en mNGF. Pas de temps décadaire. A gauche, résultats du calage (1986-1996), à droite, résultats de la validation (1996-2001). cf. Figure 4, p.6, pour la localisation des piézomètres.

les observations. Une des améliorations permise par la discrétisation du modèle est de simuler une meilleure dynamique du piézomètre 107. Ce piézomètre est représentatif du fonctionnement hydrologique du plateau de l'Orgeval (qui peuvent être considérés comme représentatifs du Champigny dans cette zone particulière) et n'est pas influencé par la condition limite de la Marne. L'étude de la

carte géologique au 1/ 25000 dans ce secteur a permis de valider cette vision et de fixer des paramètres plus réalistes que ceux établis lors du calage du modèle bicouche. Grâce au raffinement du modèle hydrologique, notre capacité de prédiction des flux hydriques souterrains sur le bassin de l'Orgeval est donc accrue.

En ce qui concerne les piézomètres 106 et 107, les niveaux piézométriques relatifs à la période de sécheresse de 1989-1992 (jours 2000 à 2800) sont sous estimés. Il faudra améliorer le calage pour cette période. Pour ce faire, il faudra certainement améliorer les paramètres du transfert en zone non saturée.

### 5.5. Les débits - Effet du pas de temps sur les critères statistiques

<b>Montry</b> $\bar{X}_o = 7.68$ $\bar{X}_s = 7.78$	1250 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	9.27	8.50	-6.71	0.55	0.61
	D	8.36	7.24	-4.87	0.67	0.73
	M	6.78	6.26	-3.38	0.77	0.75
<b>Pommeuse</b> $\bar{X}_o = 5.24$ $\bar{X}_s = 5.10$	770 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	5.95	6.12	-8.95	0.66	0.74
	D	4.83	5.14	-9.	0.76	0.81
	M	4.06	4.36	-8.45	0.79	0.83
<b>Meilleray</b> $\bar{X}_o = \times$ $\bar{X}_s = 2.14$	330 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	$\times$	2.78	$\times$	$\times$	$\times$
	D	$\times$	2.29	$\times$	$\times$	$\times$
	M	$\times$	1.90	$\times$	$\times$	$\times$
<b>Lavanderie</b> $\bar{X}_o = 1.02$ $\bar{X}_s = 1.37$	250 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	1.7	1.73	16.55	0.67	0.68
	D	1.44	1.54	23.52	0.48	0.81
	M	1.29	1.38	22.84	0.72	0.96
<b>Theil</b> $\bar{X}_o = 0.58$ $\bar{X}_s = 0.54$	106 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	1.25	1.04	-6.24	0.62	0.79
	D	0.94	0.91	-6.25	0.75	0.87
	M	0.78	0.78	-6.24	0.79	0.88
<b>Avenelles</b> $\bar{X}_o = 0.27$ $\bar{X}_s = 0.25$	40 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	0.56	0.46	-7.11	0.59	0.77
	D	0.41	0.40	-7.10	0.74	0.87
	M	0.33	0.33	-7.06	0.76	0.88
<b>Mélarchez</b> $\bar{X}_o = 0.055$ $\bar{X}_s = 0.051$	7 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
	J	0.16	0.13	-7.59	0.52	0.73
	D	0.12	0.11	-7.59	0.68	0.83
	M	0.095	0.09	-7.58	0.71	0.84

Tableaux 2: Résultats du calage. J : journalier ; D : décadaire; M : mensuel.

Un des objectifs du modèle est de simuler les débits journaliers. Cependant les débits du Grand Morin présentent une forte réactivité, laissant présumer une contribution importante des processus de surface et subsurface aux écoulements de crue. Il est, dès lors, délicat d'obtenir de bons critères

statistiques à une échelle journalière. Le calcul des critères statistiques pour plusieurs résolutions temporelles (journalière, décadaire et mensuelle) permet d'estimer la capacité du modèle à acheminer les bons volumes. On observe alors un accroissement très significatif du critère de Nash en chaque station hydrographique lorsque l'on passe du pas de temps journalier au pas de temps décadaire (Tableau 2).

Le modèle est bien calé au niveau mensuel car tous les critères de Nash sont supérieurs au seuil décisif de 0.7. Ils atteignent 0.79 à la station de référence de Pommeuse. Exceptées la station moins bien échantillonnée de La Lavanderie, les critères décadaires sont supérieurs à 0.7. Par contre la dynamique journalière est plus difficilement représentée. Cependant les critères de Nash restent supérieurs à 0.5, ce qui est acceptable.

Nous avons décidé de présenter l'analyse du calage des débits à l'aide de chroniques décadaires qui présentent une meilleure lisibilité que les chroniques journalières, tout en gardant une résolution temporelle assez fine.

Globalement, les pointes de crues sont sous-estimées par le modèle en toute station. Par contre, le modèle simule, pour quasiment toutes les stations, des débits d'étiage en adéquation avec les observations, aussi bien en quantité qu'en durée. Cependant, les étiages ne sont pas assez soutenus par les aquifères au Theil. L'absence d'informations concernant le domaine souterrain dans ce secteur rend le calage très délicat, d'autant plus que la structure géologique du bassin est très complexe dans ce secteur. Cela laisse supposer, vu le bon calage des piézométries et notamment du piézomètre 107 (Figure 8), que la capacité de stockage de la formation Oligocène est sous-estimée par le modèle malgré des valeurs de paramètres déjà faibles pour un aquifère de surface. Un raffinement du schéma de surface (fonctions production pour le calcul du bilan hydrique) semble nécessaire car pour le moment les cellules de calcul du bilan ont un côté qui mesure au minimum 1 km. Pour approfondir ce travail, une étude hydrogéologique plus poussée serait nécessaire dans ce secteur. De plus, il faudrait prendre en compte explicitement le drainage agricole qui joue un rôle important en terme de temps de transfert, de la surface vers le réseau hydrographique, mais aussi en interceptant une partie de la lame d'eau infiltrée. Dans cette partie du bassin du Grand Morin, les taux de drainage sont très élevés, de l'ordre de 50 %.

## 6. Etape de validation

### 6.1. La piézométrie

Globalement, l'évolution des piézométries simulées est en accord avec les tendances observées pour l'étape de validation (Figure 8). Les écarts entre piézométries simulées et observées peuvent être liés à de nombreux facteurs tels qu'une mauvaise paramétrisation des aquifères, ce qui renvoie au problème soulevé par Beven (1989), c'est à dire que le système d'équations linéaires présente une infinité de solutions. Au mieux, la paramétrisation adoptée s'approche d'une de ces solutions.

Cependant une mauvaise répartition de la pluie entre ruissellement et infiltration peut aussi être une source d'erreur sur les piézométries calculées. A ce sujet, il convient de noter que le modèle hydrologique à réservoirs ne prend pas en considération l'évolution du drainage agricole. Sur le Grand Morin, la part de SAU<sup>4</sup> drainée est en constante augmentation. L'augmentation du drainage implique une évolution des paramètres des *fonctions production*. Une modification à apporter au modèle pourrait être la prise en compte de coefficients variables au cours du temps en fonction des niveaux de saturation du sol en eau.

Pour finir, il convient de noter que le calage de la piézométrie des calcaires du Champigny a été clairement amélioré par rapports aux résultats obtenus à l'aide du modèle bicouche (Flipo 2005),

---

<sup>4</sup>Surface Agricole Utile.

notamment au niveau des trois piézomètres les plus fiables (106, 107, 108).

## 6.2. Les débits

<b>Montry</b>	1250 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = \times$	J	$\times$	7.14	$\times$	$\times$	$\times$
$\bar{X}_s = 8.71$	D	$\times$	6.15	$\times$	$\times$	$\times$
	M	$\times$	5.55	$\times$	$\times$	$\times$
<b>Pommeuse</b>	770 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = 6.62$	J	7.7	4.9	-15.28	0.52	0.74
$\bar{X}_s = 5.61$	D	6.01	4.18	-15.16	0.62	0.81
	M	5.35	3.73	-15.23	0.65	0.83
<b>Meilleray</b>	330 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = 2.56$	J	3.02	1.78	-16.14	0.45	0.71
$\bar{X}_s = 2.11$	D	2.3	1.51	-15.94	0.54	0.77
	M	2.01	1.34	-15.28	0.58	0.78
<b>Lavanderie</b>	250 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = \times$	J	$\times$	1.56	$\times$	$\times$	$\times$
$\bar{X}_s = 1.64$	D	$\times$	1.39	$\times$	$\times$	$\times$
	M	$\times$	1.27	$\times$	$\times$	$\times$
<b>Theil</b>	106 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = 0.78$	J	1.36	1.06	-8.67	0.39	0.64
$\bar{X}_s = 0.71$	D	1	0.91	-8.80	0.50	0.73
	M	0.89	0.81	-8.48	0.53	0.74
<b>Avenelles</b>	40 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = 0.33$	J	0.56	0.47	-6.32	0.43	0.68
$\bar{X}_s = 0.32$	D	0.42	0.4	-6.44	0.54	0.76
	M	0.37	0.35	-6.13	0.59	0.78
<b>Mélarchez</b>	7 km <sup>2</sup>	$\sigma_o$	$\sigma_s$	biais	nash	corrélation
$\bar{X}_o = 0.076$	J	0.17	0.13	-9.56	0.47	0.69
$\bar{X}_s = 0.069$	D	0.11	0.10	-9.90	0.65	0.81
	M	0.09	0.09	-8.98	0.72	0.85

Tableaux 3: Résultats de validation aux stations de contrôle 1996-2001. J : journalier ; D : décadaire; M : mensuel.

Contrairement à l'étape de validation du modèle bicouche, nous observons, pour le modèle tricouche, une très nette dégradation des fonctions résultats (biais, critère de Nash) en terme de débit (Tableau 3). Par exemple, plus aucun critère de Nash mensuel n'atteint le seuil empirique de 0.7, qui indique une bonne capacité du modèle à simuler la dynamique temporelle observée.

Une analyse visuelle des comparaisons entre simulations et observations (Figure 7) indique que la dégradation des indicateurs statistiques est liée à une mauvaise capacité du modèle à décrire les dynamiques de crue. Cependant les niveaux d'étiages sont correctement simulés par le modèle pour les stations de jaugeage drainant une surface conséquente (à partir de 300 km<sup>2</sup>, cf. station de Meilleray). Ceci tendrait à indiquer que les écoulements souterrains sont correctement simulés par le modèle (ce qui va de concert avec le calage correct des niveaux piézométriques). Le plus gros écueil du schéma conceptuel, par ailleurs bien adapté à la simulation de grands bassins, serait alors, dans le cas de



bassins d'environ 1 000 km<sup>2</sup> et moins, une mauvaise formalisation de flux de surface et subsurface, ainsi que du transfert dans la zone non saturée. Cela semble confirmé par les mauvais résultats obtenus pour l'Orgeval pour les soutiens d'étiage et pour la dynamique des crues.

## 7. Conclusions

Cette étude préalable des transferts hydriques distribués à l'échelle du bassin du Grand Morin a été réalisée à l'aide du modèle CAWAQS. Ce modèle s'inscrivait dans la dynamique d'intégration des modèles du PIREN SEINE entre eux qui se concrétise dans la phase actuelle du PIREN SEINE par la construction de la plate-forme EAU Dyssée. Afin de continuer à progresser dans notre compréhension des processus hydrologiques, nous envisageons de transférer le modèle actuel sous EAU Dyssée, ce qui nous permettra, grâce à la structure modulaire de la plate-forme, de tester différentes approches pour simuler différents formalismes des écoulements de surface et subsurface.

Cette action a pour but de simuler correctement les chemins d'écoulement de l'eau à travers le paysage ainsi que les temps de transfert associés. La connaissance des flux hydriques est le socle de toute étude qui vise à étudier les transferts de matière et de polluants dans un hydrosystème. Ce sont les écoulements d'eau qui transfèrent les polluants d'un point à l'autre de l'hydrosystème en traversant une mosaïque très large de contextes biogéochimiques.

La prochaine étape de ce travail se focalisera spécifiquement sur le bassin de l'Orgeval pour lequel un suivi des écoulements de subsurface sera mis en place afin de les intégrer dans EAU Dyssée pour, ensuite, simuler les flux d'azote dans l'hydrosystème tout en s'attachant aux mécanismes d'élimination (dénitrification) et aux résidus associés (gaz à effet de serre).

## Bibliographie

- AESN (1974). *Les bassins de la Seine et des cours d'eau Normands - Eaux souterraines*, Volume Agence de l'eau Seine-Normandie, Nanterre, tome1, fasc. 4.
- Benoît, M., C. Bornerand, C. Mignolet, E. Bienaimé, R. Cosserrat-Mangeot, J.-F. Mari, and J.-M. Trommenschlager (2000). Etude rétrospective des dynamiques agricoles dans le bassin de la Seine depuis les années 70. Technical report, PIREN SEINE.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology. The case of physically-based model. *J. of Hydrology* 105, 157–172.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. Machet, J. Meynard, and R. Delécolle (1998). Stics : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin*. Ph. D. thesis, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, and E. Ledoux (2005). Hydrological part of CAWAQS (CATCHMENT WATER QUALITY SIMULATOR): fitting on a small sedimentary basin. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 29(2), 768–772.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, S. Théry, and E. Ledoux (2007). Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sci Total Environ* 375, 69–79.

- Flipo, N., N. Jeannée, M. Poulin, S. Even, and E. Ledoux (2007). Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modeling. *Environ Pollut* 146(1), 241–256.
- Gomez, E. (2002). *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. Ph. D. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique.
- Gomez, E., E. Ledoux, P. Viennot, C. Mignolet, M. Benoît, C. Bornerand, C. Schott, B. Mary, G. Billen, A. Ducharne, and D. Brunstein (2003). Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: Application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* 3-2003, 38–45.
- ISMAP(1997). Synthèse des travaux des partenaires français. Rapport final. Technical report, Projet EUREKA EU 479.
- Sebilo, M. (2003). *Utilisation du traçage isotopique naturel pour caractériser et quantifier les processus de nitrification et de dénitrification à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine*. Ph. D. thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Sebilo, M., G. Billen, M. Grably, and A. Mariotti (2003). Isotopic composition of nitrate-nitrogen as a marker of riparian and benthic denitrification at the scale of the whole Seine river system. *Biogeochemistry* 63, 35–51.
- Théry, S. and N. Flipo (2004). *Av-Xmaille2, mailleur pour NEWSAM*. <http://www.sisyphes.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Viennot, P. (2007). Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine. représentation différenciée des aquifères du Tertiaire / intégration des prélèvements anthropiques. Technical Report R071128PVIE, Centre de Géosciences, Mines ParisTech.
- Vilain, G., J. Garnier, G. Tallec, P. Cellier, and N. Flipo (2008). Flux de N<sub>2</sub>O le long dun continuum parcelle-zone humide-rivière dans le bassin versant de l'Orgeval. Technical report, PIREN SEINE.