

ADAPTATION D'UN SCHÉMA DE SURFACE À VOCATION HYDROLOGIQUE AU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN DE LA SEINE

Agnès Ducharne

UMR Sisyphe, UPMC Case 105, 4 pl. Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Agnès.Ducharne@ccr.jussieu.fr

1. Résumé

Le modèle CaB fait partie d'une nouvelle génération de schémas de surface couplant une approche TSVA (Transferts Sol-Végétation-Atmosphère) des flux d'énergie à une description de l'hydrologie basée sur les concepts de TOPMODEL. Ce papier présente une application de CaB dans le bassin de la Seine, sous forçage météorologique SAFRAN (période 1985-1991). Les écoulements simulés sont le terme de contrôle, comparés aux débits observés en 20 stations de jaugeage selon des critères classiques en hydrologie (efficacité de Nash, biais, coefficient de corrélation), et en intégrant l'effet des principaux ouvrages de régulation. L'obtention de performances satisfaisantes, notamment d'étiages assez soutenus, a nécessité la calibration de certains paramètres, ainsi que l'adaptation des transferts verticaux entre la zone racinaire et la nappe phréatique «conceptuelle» du modèle CaB, qui n'est pas équivalente à l'important système aquifère du bassin de la Seine.

2. Introduction

Le modèle CaB (pour « Catchment-Based » ; Koster et al., 2000 ; Ducharne et al., 2000) est un modèle du fonctionnement des surfaces continentales, qui décrit sur des bases physiques l'influence du climat sur les écoulements. Il combine :

- une approche TSVA (« Transferts Sol-Végétation-Atmosphère »), où l'évapotranspiration est couplée au bilan d'énergie, et contrôlée par la végétation et divers facteurs de stress (hydriques notamment),
- une approche basée sur le modèle hydrologique TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et souterrains. Selon cette approche, le domaine d'étude est discrétisé en bassin versants élémentaires, toujours pourvus d'une nappe phréatique. Sous l'hypothèse que les gradients topographiques sont une bonne approximation des gradients hydrauliques, on exploite une description à haute résolution de la topographie de chaque bassin élémentaire pour dériver, à chaque pas de temps (20 minutes), une distribution spatiale de la profondeur de la nappe en fonction de l'humidité moyenne du bassin. Cette distribution permet de subdiviser le bassin en trois fractions (saturée, stressée, intermédiaire) où les flux de surface sont calculés selon des paramétrisations adaptées. Elle contrôle aussi les transferts verticaux entre zone racinaire et nappe ainsi que l'écoulement de base (écoulement de la nappe vers les cours d'eau, inversement proportionnel à la profondeur de la nappe).

Cette nappe phréatique « conceptuelle » n'est cependant pas équivalente au système aquifère qui prévaut dans le bassin de la Seine. Celui-ci s'inscrit en presque totalité dans le bassin sédimentaire de Paris, qui comprend d'importantes formations aquifères séparées par des formations semi-perméables, au sein d'une structure dite " en pile d'assiette ". Leurs affleurements forment ainsi des auréoles concentriques dont l'altitude tend à augmenter quand on s'éloigne du centre du bassin, vers l'Est notamment. Notons enfin que les aquifères les plus profonds (correspondant aux couches les plus anciennes) sont plus étendus que le bassin versant topographique.

L'objectif de cette étude était donc d'évaluer si la représentation simplifiée des aquifères dans le modèle CaB, préalablement validé dans les bassins de la Red et de l'Arkansas River (Ducharne et al., 2000) et dans le bassin du Rhone (Boone et al., 2004), était suffisante pour simuler correctement les débits de la Seine.

3. Mise en oeuvre du modèle CaB dans le bassin de la Seine

3.1. Données de forçage

Dans cette étude, le bassin de la Seine est subdivisé en 29 bassins élémentaires (2600 km² en moyenne, Figure 1). Les paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur :

- la topographie (résolution de 100m),
- la couverture végétale, caractérisée selon les données ISLSCP (Sellers et al., 1996) qui fournissent, à partir d'observations satellitaires réalisées en 1987-1988, l'évolution mensuelle de la morphologie végétale (indice de surface foliaire, hauteur...) et le type de végétation (Figure 1).
- les propriétés des sols : la porosité et la profondeur du sol sont fournis par l'INRA, alors que le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation ont été calibrés.

Pour cela, nous avons travaillé sur une période de 6 ans (août 1985 - juillet 1991), grâce aux données météorologiques fournies par Météo-France au pas de temps horaire et à la résolution de 8 km (données SAFRAN-CROCUS), et agrégées à la résolution du modèle (29 bassins élémentaires).

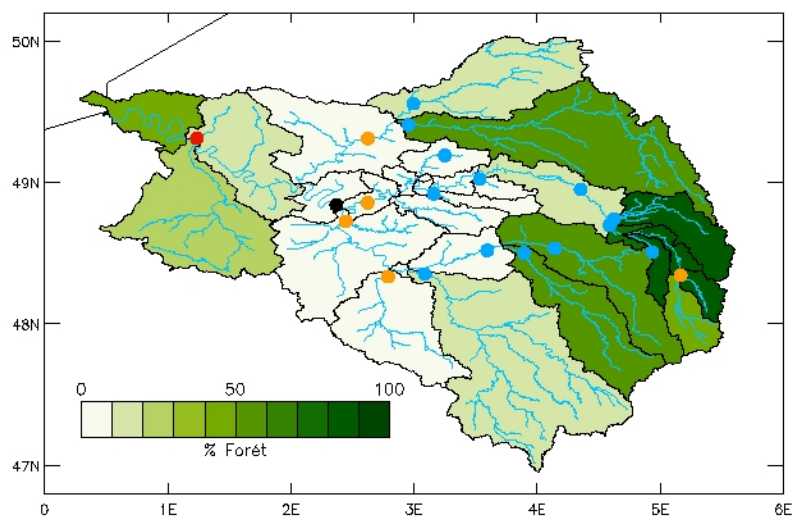


Figure 1 : Discrétisation du bassin versant de la Seine selon CaB, en 29 sous-bassins unitaires. Les niveaux de gris indiquent le pourcentage de forêt dans notre application. Le réseau hydrographique principal apparaît en bleu, et les points localisent les 20 stations de jaugeage exploitées pour la calibration du modèle (Poses étant la plus occidentale).

3.2. Méthode et données pour l'évaluation

La calibration du modèle fut alors réalisée pour optimiser les écoulements simulés, par comparaison avec les débits observés (données Banque Hydro) en 20 stations de jaugeage (Figure 1). Les critères de performance sont les critères quantitatifs classiques en hydrologie (efficacité de Nash, biais, coefficient de corrélation), utilisés en appui d'une évaluation visuelle. Elle s'est avérée nécessaire pour combiner utilement les trois critères, voire diminuer leur importance, car ils ne décrivent, ni seuls ni combinés, l'ensemble des caractéristiques du signal importantes en hydrologie.

Dans cet exercice, les écoulements simulés par CaB sont comparés avec les débits observés, ramenés en lame d'eau. Quand des valeurs sont fournies en m³/s, cela signifie seulement que les lames d'eau écoulées ont été multipliées par la surface contributive. Le routage des écoulements en débit n'étant pas pris en compte, la comparaison entre les écoulements simulés et observés a été réalisée sur les moyennes décennales (le temps de concentration du bassin étant proche de 10 j, Gomez et al., 2002).

Nous avons cependant 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 pendant cette période (source : IIBRBS). Ils permettent en effet un écrêtement des crues, sensible à l'échelle régionale, mais toutefois limité à Paris étant donné leur éloignement. Là, leur rôle majeur réside dans le soutien du débit d'étiage en fin d'été et en automne, ces trois réservoirs pouvant restituer 60 m³/s, ce qui peut doubler le débit d'étiage à Paris lors des années sèches.

4. Résultats et Discussion

Le premier objectif que devait satisfaire la calibration du modèle était de résoudre correctement les bilans d'eau, à l'échelle interannuelle notamment (critère = biais). Ceci fut assuré par la calibration de trois paramètres :

- le point de flétrissement (à un degré de saturation variant entre 0.25 et 0.50 dans les 29 bassins élémentaires)
- deux descripteurs du profil vertical de conductivité hydraulique à saturation, sa valeur en surface, variant entre 10^{-2} et 10^{-4} m/s selon les bassins, et son facteur de décroissance exponentielle avec la profondeur, entre 2 et 5.

Le second objectif assigné à la calibration du modèle était de décrire correctement la dynamique du signal débit (ou écoulement total), notamment les contrastes saisonniers entre crues et étiages, et la variabilité interannuelle (années humides vs. années sèches). Dans le bassin de la Seine, ceci impose de prendre en compte le rôle tampon que jouent les nappes à l'échelle saisonnière (et interannuelle) : l'infiltration importante vers les nappes en hiver (ou recharge) permet de limiter les écoulements pendant cette saison de crue, et cette eau est restituée en été, sous forme de débit de base, qui limite la sévérité des étiages.

Dans sa configuration originelle, le modèle CaB ne s'est pas montré capable de décrire un tel système, malgré la présence d'une nappe conceptuelle sous la zone racinaire. Ceci s'explique par l'étroite connexion hydrique entre la nappe et la zone racinaire : la forte demande évaporative estivale entraîne des remontées d'eau vers la zone racinaire, eau qui n'est alors plus disponible dans la nappe pour assurer un débit de base suffisant. On pourrait limiter ces remontées en modifiant les paramètres hydriques du sol, notamment en diminuant la conductivité hydraulique à saturation. Mais ceci limite également les transferts verticaux descendants (i.e. la recharge), si bien que la nappe descend, et que le débit de base n'est plus assuré.

Nous avons donc choisi d'imposer une limitation des flux d'eau ascendants (qui ont lieu en été) entre la nappe et la zone racinaire, en divisant ces flux par 100. Nous avons de plus confiné cette adaptation aux bassins amont, qui seuls montraient une nette sous-estimation des débits d'étiage, quelque soit la valeur des paramètres calibrés. En effet, les nappes réelles y sont très profondes (plusieurs dizaines de mètres) et c'est cette profondeur qui déconnecte la nappe de la zone racinaire.

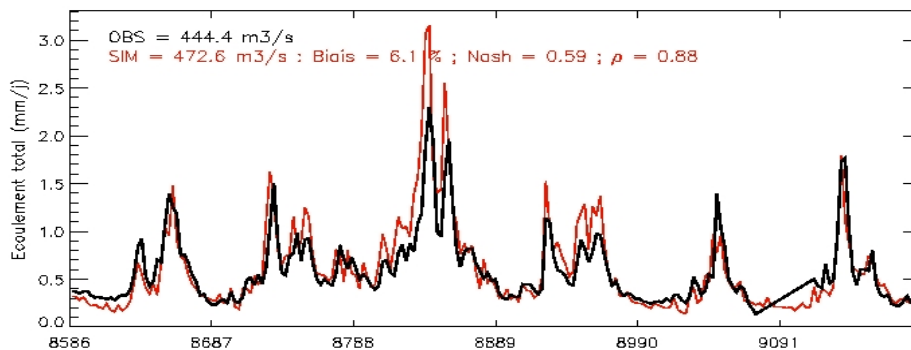


Figure 2 : Comparaison des écoulements observés et simulés par CaB : moyennes décadaires à Poses entre le 1^{er} août 1985 et le 31 juillet 1991.

La Figure 2 montre que les performances ainsi obtenues à l'exutoire du bassin (à Poses, qui marque la limite avec le domaine estuarien) sont tout à fait satisfaisantes, avec de bons étiages. Les contrastes entre l'année hydrologique 87-88 très humide (crue très importante) et les années 89-90 et 90-91 sèches (étiages sévères), qui offrent un bon échantillonnage de la variabilité interannuelle du climat récent, sont aussi bien rendus malgré une tendance à surestimer les pics de crue.

Ce comportement satisfaisant a été vérifié dans l'ensemble du bassin, comme en atteste le Tableau 1 qui résume les performances du modèle CaB calibré et adapté, dans les 20 stations de jaugeage de la Figure 1. On tend à considérer que l'efficacité de Nash est suffisante quand elle est supérieure à 0.7. C'est le cas dans 5 stations sur 20, mais 14 bassins ont une efficacité supérieure à 0.5, dont tous les

bassins les plus à l'aval du bassin (aval de la Marne, de l'Oise, Seine à l'aval d'Alfortville). On note enfin que l'efficacité de Nash ne réagit pas symétriquement au biais, un biais négatif entraînant une meilleure efficacité que le même biais positif.

Tableau 1 : Performances du modèle CaB sur la période août 1985-juillet 1991 après calibration et adaptation au contexte hydrogéologique de la Seine. Les lignes en gris indiquent les bassins amont où les flux ascendants entre nappe et zone racinaire sont divisés par 100.

Rivière	Surface amont (km ²)	Débit observé (m ³ /s)	Débit simulé (m ³ /s)	Biais (%)	Nash (-)	Coeff. de correl.
Rognon	630	8.8	7.8	-12	0.86	0.93
Saulx	2140	26	17	-33	0.67	0.85
Marne (Frignicourt)	3334	37	43	+14	0.44	0.76
Blaise	466	3.7	3.8	+1	0.58	0.84
Marne (Chalons-en-Ch.)	6310	72	67	-10	0.71	0.86
Surmelin	467	3.4	4.1	+21	0.35	0.80
Petit Morin	616	3.8	3.9	+3	0.61	0.87
Ourcq	345	2.4	4.3	+83	-2.26	0.86
Marne (Noisiel)	12582	104	122	+18	0.57	0.86
Aube	3550	32	30	-7	0.54	0.78
Seine (Méry-sur-Seine)	3967	34	25	-26	0.18	0.55
Seine (Pont-sur-Seine)	8784	72	60	-16	0.47	0.73
Yonne	10840	69	75	+7	0.20	0.71
Loing	3946	19	19	-1	0.61	0.84
Seine (Alfortville)	30718	188	183	-3	0.65	0.83
Seine (Paris)	43575	270	306	+13	0.67	0.86
Oise	4294	37	34	-9	0.78	0.89
Aisne	7871	64	53	-18	0.77	0.91
Oise	13555	116	112	-4	0.83	0.93
Seine (Poses)	64940	444	472	+6	0.59	0.88

5. Remerciements

L'auteur tient à remercier le programme Gestion et Impact du Changement Climatique du MEDD qui a financé cette étude dans le cadre du projet GICC-Seine ; Météo-France, qui a fourni les données météorologiques SAFRAN-CROCUS utilisées dans cette étude ; et l'IIBRBS (Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine) qui a fourni les données de gestion des barrages réservoir de la Seine, la Marne et l'Aube.

6. Bibliographie

- 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. F. Habets, J. Noilhan, D. Clark, P. Dirmeyer, S. Fox, Y. Gusev, I. Haddeland, R. Koster, D. Lohmann, S. Mahanama, K. Mitchell, O. Nasonova, G.-Y. Niu, A. Pitman, J. Polcher, A. B. Shmakin, K. Tanaka, B. van den Hurk, S. Vérant, D. Verseghy, P. Viterbo and Z.-L. Yang, 2004: The Rhone-Aggregation Land Surface Scheme Intercomparison Project: An Overview. *J. Climate*, (in press).
- 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.
- Gomez, E. (2002). *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 pp.
- Koster, R.D., Suarez, M., Ducharne, 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.