

Transfert de nitrates dans les bassins versants ruraux amont : développement d'un module de drainage souterrain dans le modèle STICS

Nenad Nikolic, Daniel Zimmer, Cyril Kao (CEMAGREF, Antony)

STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard : Brisson *et al.*, 1998) est un modèle de fonctionnement des cultures à l'échelle parcellaire et à pas de temps journalier conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. STICS est le modèle retenu dans le thème 1 du PIREN-Seine pour simuler les lessivages parcellaires de nitrate. Ses variables d'entrée sont relatives au climat, aux propriétés du sol et au système de culture. Ses variables de sortie sont relatives au bilan hydrique, à la qualité de l'eau, à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture : bilans hydriques et azotés, croissance et développement de cultures, etc. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole (Brisson *et al.*, 1998). L'originalité de ce modèle réside dans son caractère générique et modulaire.

Une des limitations de la version actuelle de STICS tient à l'absence de prise en compte du drainage souterrain agricole au niveau du bilan hydrique. Or, le drainage agricole concerne en France près de 2,5 millions d'hectares (2,3 millions d'hectares drainés par tuyaux enterrés : Arlot, 1999). Ainsi, de nombreux bassins versants amont du bassin de la Seine sont fortement drainés ce qui modifie notablement l'hydrologie de ces bassins, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. En effet, les réseaux de drainage souterrains modifient la répartition des flux d'eau, notamment entre ruissellement et transferts souterrains, et peuvent induire des exportations de nitrate accrues (Arlot, 1999).

L'objectif du travail réalisé est donc de développer un module de drainage souterrain dans STICS afin de disposer d'un outil pouvant simuler de manière correcte les transferts dans les bassins versants drainés. STICS est développé à l'échelle parcellaire, il devra donc ensuite être couplé à d'autres outils de simulation hydrologique permettant de travailler à l'échelle du bassin versant tel que prévu dans le thème 1 du programme en cours. Le travail réalisé jusqu'ici a consisté à (i) intégrer une fonction drainage dans STICS et (ii) à valider cette fonction en utilisant des données de sites expérimentaux drainés. Une première validation a porté à la fois sur les données de volumes drainés, sur les hauteurs des nappes perchées et sur les données de ruissellement issues de sites suivis par le Cemagref : Arrou (28) et La Jaillière (44).

1. Prise en compte d'une fonction de drainage dans STICS : couplage des modèles SIDRA et STICS

1.1. Mode de fonctionnement de STICS

STICS est un modèle sol-végétation-atmosphère dont la limite supérieure du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol. La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne, sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre et la biomasse (et leur teneur en azote) des organes récoltés. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune d'elles étant caractérisée par sa réserve en eau, en azote minéral et organique. Le modèle simule les bilans de carbone, d'eau et d'azote du système et calcule à la fois des variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et des variables environnementales (transferts et bilans d'eau et d'azote) dans diverses situations agricoles. L'eau et les nitrates se déplaçant sont supposés se mélanger d'une manière homogène. STICS simule les transferts d'eau en utilisant le concept agronomique de capacité au champ. Le sol comporte 2 classes de porosité gérées différemment :

1. la microporosité, liée à l'assemblage textural des particules de terre fine, est gérée par couches élémentaires d'un centimètre d'épaisseur ;

2. la macroporosité, liée à la porosité structurale ou biologique, est décrite à l'échelle de l'horizon.

Le transfert de l'eau dans la microporosité du sol est calculé pour chaque couche élémentaire en utilisant une analogie de type réservoir : les apports d'eau remplissent les couches en cascade sachant que la limite supérieure de chaque réservoir élémentaire correspond à la capacité au champ de la couche. Au niveau de chaque discontinuité pédologique (horizon) est défini un paramètre d'infiltrabilité journalier (mm/j), apparenté à la conductivité verticale du sol, qui détermine la quantité d'eau maximale susceptible de passer d'un horizon à l'autre, et qui correspond à l'eau excédentaire totale issue des couches élémentaires constituant un horizon. La circulation descendante se fait alors par débordement d'un compartiment de macroporosité au suivant, donc d'un horizon à l'autre. L'azote lessivé migre ainsi d'une couche à l'autre et peut sortir du système (pertes par infiltrations profondes). Ainsi, le bilan hydrique de STICS ne permet pas de prendre en compte les flux pouvant être captés par des drains, il évacue donc l'excédent d'eau directement vers le réseau de surface.

1.2.Principe du module drainage

1.2.1. Principe du modèle SIDRA

La base du travail repose sur le modèle SIDRA (SImulation du DRAinage : Lesaffre & Zimmer, 1988) qui simule le fonctionnement hydraulique du drainage agricole. En France, dans les parcelles drainées, l'excès d'eau se manifeste par la présence d'une nappe perchée au-dessus d'un horizon imperméable (en général vers un mètre de profondeur) pendant les mois d'hiver et du début du printemps. SIDRA utilise la recharge nette de la nappe à chaque pas de temps afin d'en déduire les variations de hauteur de nappe à l'interdrain et de calculer le débit au drain. La recharge nette est définie comme étant la différence entre la pluie brute et la demande évaporative. L'équation différentielle résolue, déduite de l'équation de Boussinesq (Bouarfa et Zimmer, 2000), s'écrit :

$$C \cdot \mu \cdot \frac{dH(t)}{dt} = R(t) - J(H) - H(t) \cdot \mu \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

où : C est un facteur de forme de nappe [-] ;

μ est la porosité de drainage [-] ;

H (t) est la hauteur de la nappe à l'interdrain au temps t [L] ;

R (t) est la recharge nette au temps t [L.T⁻¹] ;

J(H) est la fonction de Hooghoudt et correspond au débit évacué par le système en régime permanent [L.T⁻¹].

Le terme de droite de l'équation 1 montre que le fonctionnement des systèmes drainants est régi par trois composants : le 1^{er} composant est l'intensité de la recharge qui parvient à la nappe, le 2^{ème} est la production de débit liée à la hauteur de la nappe, et le 3^{ème} correspond aux déformations de la forme de la nappe qui conduit à des stockages/déstockages d'eau de cette dernière. L'importance relative de ces 3 composants dépend à la fois des caractéristiques du système drainant et du pas de temps de simulation. Bouarfa et Zimmer (2000) ont montré que, pour ce qui est du système drainant, c'est le facteur $\sigma = K/(\mu^2 L^2)$ qui détermine l'importance relative des trois termes. Ce facteur détermine en effet la "nervosité" du système et en particulier la fugacité des déformations de nappe. Les systèmes ayant un $\sigma > 1$ sont "nerveux" et les déformations de nappe se produisent sur des durées brèves : même au pas de temps horaire, la prise en compte de ces déformations n'est pas très importante dans les simulations c'est-à-dire que le troisième terme du membre de droite de l'équation 1 peut être négligé :

$$C \cdot \mu \cdot \frac{dH(t)}{dt} = R(t) - J(H) \quad (2)$$

En effet, les trois paramètres K (conductivité hydraulique à saturation), μ et L (longueur de l'interdrain) contrôlent la dynamique de drainage. Ainsi, pour les sites expérimentaux d'Arrou et de La Jaillière, nous sommes dans le cas où l'équation 2 est utilisable. SIDRA commence alors par déduire la variation de la hauteur de nappe à l'interdrain au pas de temps horaire comme suit :

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{R_{h+1} - J(H)}{\mu \cdot C} \times (t_{h+1} - t_h) \quad (3)$$

Ensuite, il en déduit le débit au drain (A est un facteur de forme de nappe) :

$$Q = A \cdot J(H) + (1 - A) \cdot R_h = A \times \frac{K \cdot H_h^2}{L^2} + (1 - A) \cdot R_h \quad (4)$$

STICS étant un modèle unidimensionnel, la première étape pour lui permettre de tenir compte du drainage agricole a été de lui faire calculer une hauteur de nappe correspondant à la " hauteur à l'interdrain ", puis ensuite de lui faire calculer le débit supposé être drainé et de tenir compte de cette perte d'eau dans le calcul final du bilan hydrique.

1.2.2. Incorporation de la fonction de drainage agricole dans STICS

Le couplage entre SIDRA et STICS s'est effectué sous 2 aspects : un couplage dimensionnel (passage du bidimensionnel de SIDRA à l'unidimensionnel de STICS) et un couplage temporel (passage du pas de temps horaire de SIDRA au pas de temps journalier de STICS). Pour le dimensionnel, la hauteur de la nappe " à l'interdrain dans STICS " (H_{max}) a dû être estimée à partir de la hauteur de nappe moyenne calculée dans le profil de sol (H_{nappe}). En fait il s'agit de la quantité d'eau contenue dans la macroporosité du sol qui a été exprimée en hauteur d'eau moyenne dans le profil. L'estimation de H_{max} a été effectuée grâce au calcul suivant, où B est un facteur de forme de nappe et cotedrain est la cote du drain mesurée depuis le plancher imperméable du sol :

$$H_{max} = (H_{nappe} - \text{cotedrain}) / B \quad (5)$$

La figure 1 représente le schéma conceptuel utilisé dans STICS pour l'estimation de la hauteur de la nappe à l'interdrain. Les facteurs de forme de nappe A et B sont des paramètres constants connus. Quant au facteur C , il est relié aux deux précédents par l'expression : $C = B / A$.

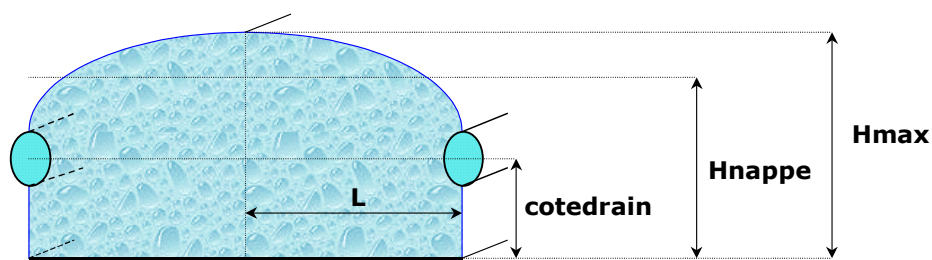


Figure 1. Schéma conceptuel d'une nappe superficielle drainée dans un profil de sol.

Ensuite, le couplage temporel s'est effectué en tenant compte de certaines hypothèses : la porosité de drainage du sol (μ) a été supposée égale à la macroporosité de STICS, la présence d'un horizon imperméable à la base du profil de sol a été pris en compte en fixant le paramètre d'infiltrabilité du dernier horizon dans STICS à une valeur nulle ou faible, et la recharge nette journalière calculée par STICS a été utilisée pour le calcul des débits drainés. Ainsi la formule utilisée dans STICS pour calculer le débit au drain est similaire à celle utilisée dans SIDRA (expression 4) :

$$Q = A \times \frac{K \cdot H_{max}^2}{L^2} + (1 - A) \cdot RN_j \quad (6)$$

Les 2 types de couplage ont nécessité des remaniements de l'organisation des calculs dans le sous-programme *Lixiv.FOR* qui gère les circulations d'eau et d'azote dans le profil de sol : à chaque pas de temps (journalier), un débit est estimé et évacué du système, une nouvelle hauteur de nappe H_{nappe} est alors calculée après nouvelle répartition de l'eau dans le profil de sol (figure 2).

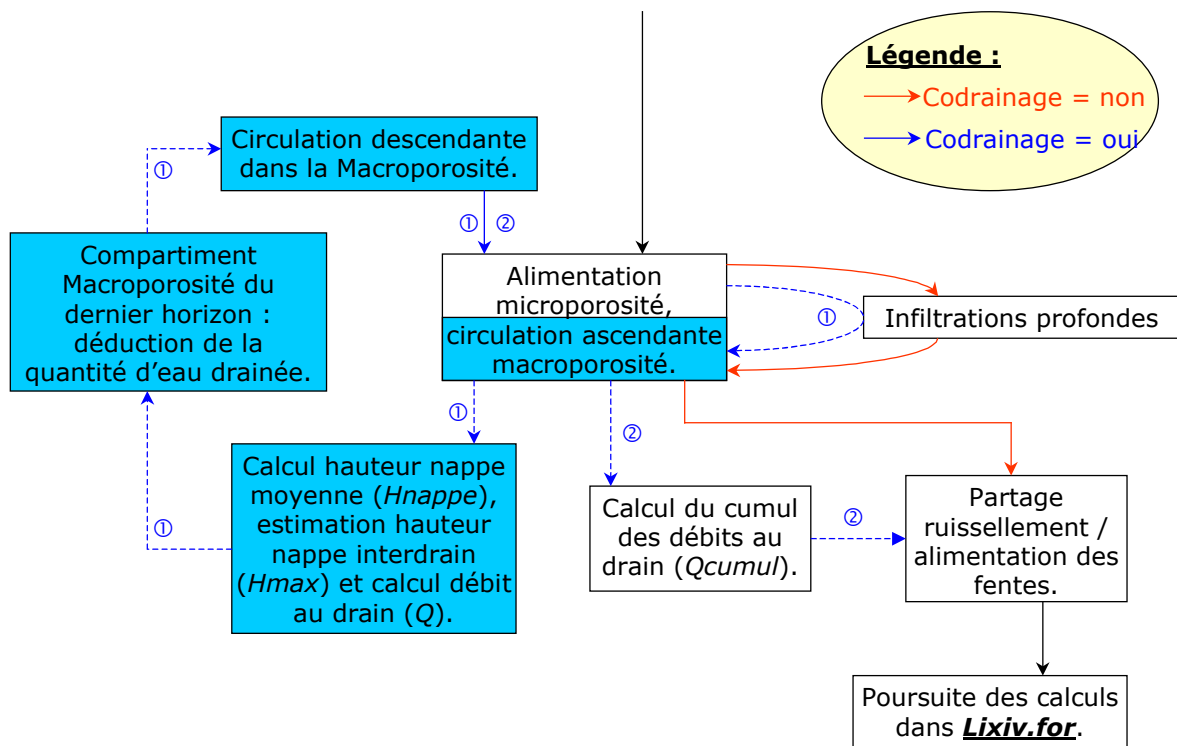


Figure 2. Organisation du calcul dans le sous-programme *Lixiv.FOR* (les flèches numérotées indiquent l'ordre de calcul et la variable *Codrainage* signale s'il y a ou non du drainage agricole).

2. Résultats

Le nouveau bilan hydrique de STICS modifié a été testé sur 2 sites expérimentaux, Arrou (28) et La Jaillière (44) sur lesquels les paramètres sont connus et où des données de validation sont disponibles. Afin de faciliter cette 1^{ère} approche, nous avons travaillé exclusivement en conditions de sol nu. Pour le ruissellement, aucune modification n'a été introduite. Le calage du modèle s'est effectué à partir des données de paramètres observés sur le terrain (K , densité apparente du sol, etc.). La figure 3 présente les résultats de simulation obtenus sur le site d'Arrou (hiver 1982~1983).

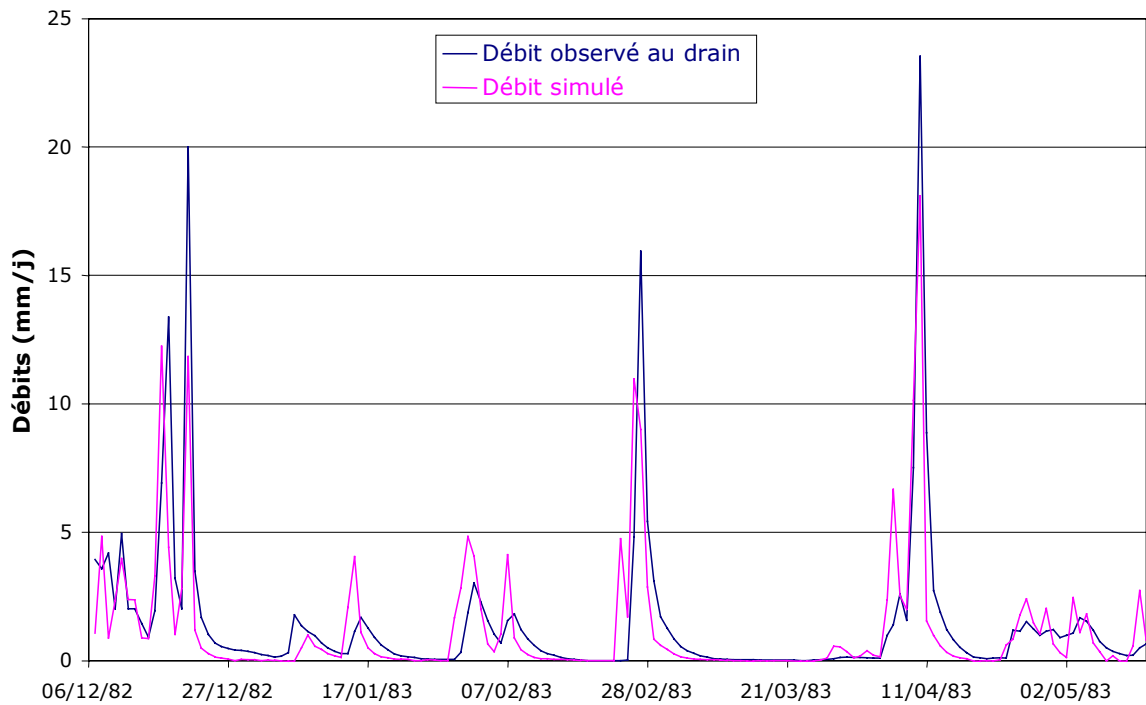


Figure 3. Résultat de simulation du drainage agricole par STICS en parcelle (site d'Arrou) : hiver 1982~1983.

Nous avons également suivi l'évolution du ruissellement généré par STICS, la gestion du ruissellement est convenable : il se produit à partir d'une quantité minimale de pluie tombée au sol définie par le paramètre $p_{minruis}$ (mm). Ce paramètre a été calé sur les données observées à La Jaillière : 5 mm. La figure 4 présente les résultats de simulation obtenus sur le site de La Jaillière durant la saison des hautes eaux 1993~1994.

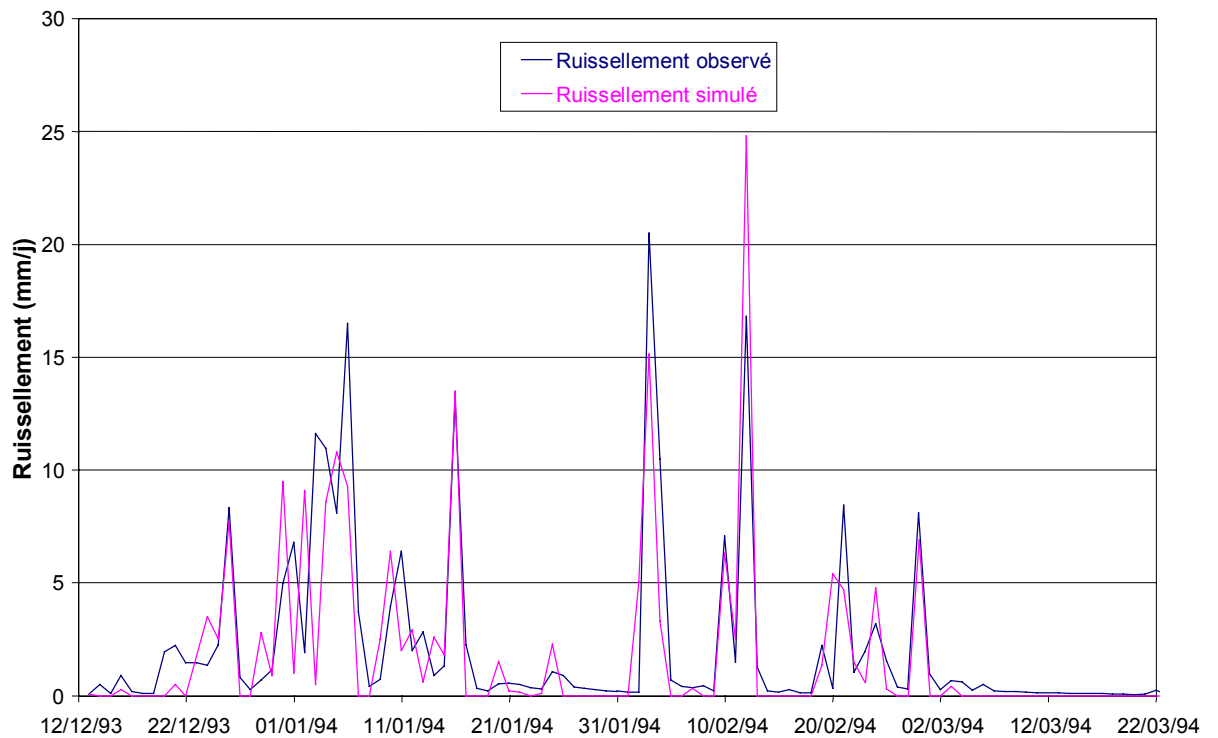


Figure 4. Résultat de simulation d'un ruissellement par STICS en parcelle (site de La Jaillière) : hiver 1993~1994.

3. Simplification du calcul dans STICS

Le pas de temps de calcul dans STICS étant journalier, nous avons tenu à voir si le 2^{ème} terme dans le calcul du débit au drain (contribution de la recharge nette arrivant à la nappe : expression 6) n'était pas négligeable. Pour ce faire, nous avons fait une étude concernant l'influence du pas de temps sur le calcul du débit. Nous avons utilisé un modèle numérique résolvant l'équation de Boussinesq développé au Cemagref : le modèle HydroWin (Bouarfa et Zimmer, 2000) calcule systématiquement les 3 composantes du débit (résolution de l'équation 1). HydroWin a modélisé le débit au drain pour différents pas de temps (1 heure, 4 h, 8 h, 16 h, 24 h et 48 h). Nous avons effectué les mêmes calculs avec SIDRA où les débits de sortie au drain étaient donnés tantôt par le calcul de l'équation 4 (prise en compte des deux composants), tantôt par le calcul de l'équation 4 réduit au seul composant J(H) :

$$Q = J(H) = \frac{K \cdot H_{\max}^2}{L^2} \quad (7)$$

Les deux modèles ont calculé les débits pour deux types de systèmes dynamiques : système "nerveux" ($\sigma = 1,25$) et système "lent" ($\sigma = 0,05$). Les débits issus des calculs de SIDRA ont été comparé à ceux issus d'HydroWin à l'aide du critère de Nash, pour chaque pas de temps et pour chaque type de système. Les résultats sont présentés dans les figures 5 et 6. Nous avons constaté que dans le cas de systèmes "lents" (Fig. 5) la contribution de la recharge nette était négligeable, quel que soit le pas de temps de calcul, puisque le débit fournit par l'expression 7 donne des résultats plus proches de ceux obtenus avec l'expression complète d'HydroWin (critères de Nash plus élevés). De même, pour les systèmes "nerveux" (Fig. 6), les deux types de calculs sont très proches quel que soit le pas de temps (critère de Nash situé entre 0,97 et 1). Pour ce qui nous concerne (pas de temps de 24 h dans STICS), les 2 types de calculs conviennent, c'est pourquoi nous avons décidé de simplifier le calcul du débit dans STICS en utilisant non plus l'expression 6, mais plutôt l'expression 7 : les résultats obtenus sont effectivement identiques.

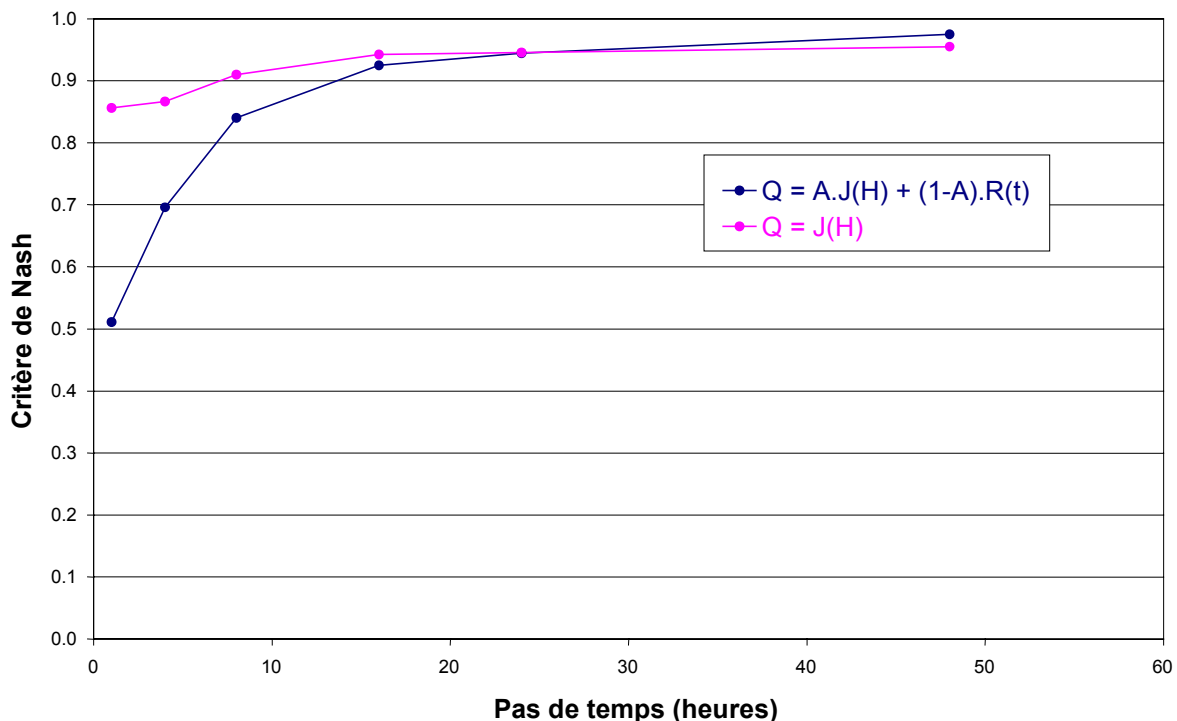


Figure 5. Comparaison des 2 types de calcul de SIDRA avec le calcul d'HydroWin à l'aide du critère de Nash pour chaque pas de temps (système à dynamique dite "lente").

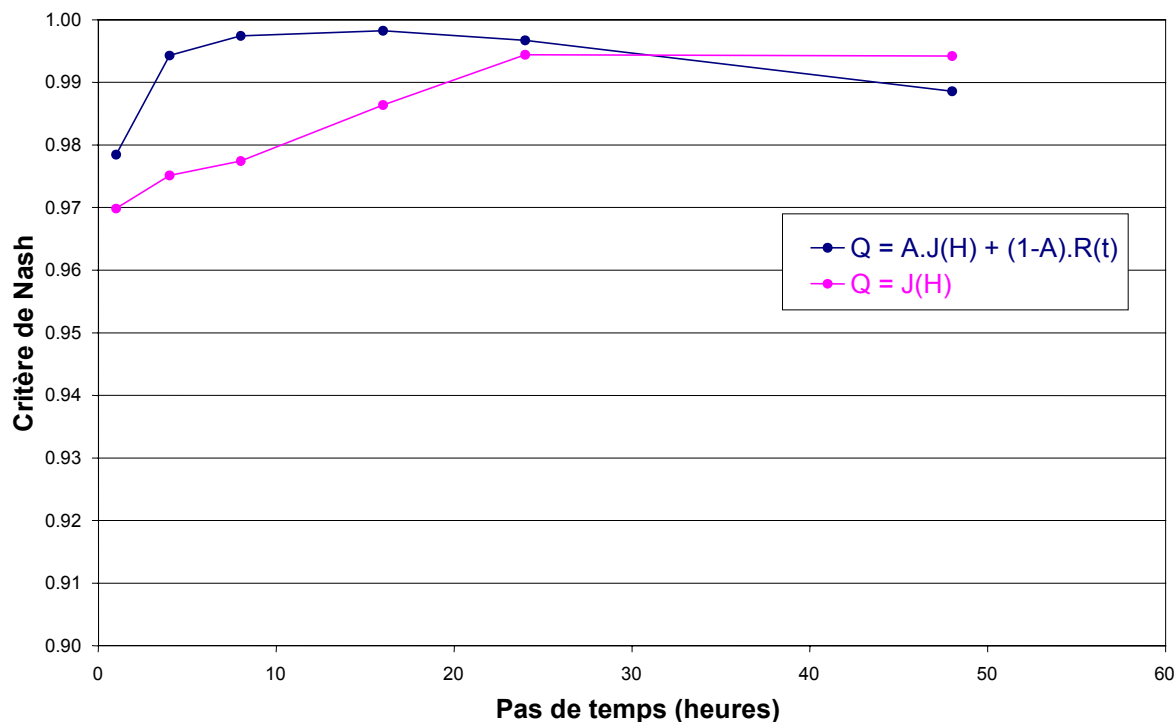


Figure 6. Comparaison des 2 types de calcul de SIDRA avec le calcul d'HydroWin à l'aide du critère de Nash pour chaque pas de temps (système à dynamique dite " nerveuse ").

4. Conclusion

Pour ce qui est de la gestion du bilan hydrique, l'incorporation d'une fonction de drainage souterrain agricole dans STICS donne de bons résultats malgré le fait que ce modèle fonctionne sur le pas de temps journalier ce qui ne correspond pas aux constantes de temps des systèmes drainants. STICS est un modèle qui possède un large spectre d'application puisqu'il est adapté à de nombreux types de sols et de cultures. Le module de drainage lui permet d'élargir son champ d'application en s'adaptant à tous les types de milieu. STICS est un outil de simulation des bilans nitriques et azotés des cultures et peut en ce sens largement contribuer à prédire les flux de nitrates émis par les bassins les plus contributifs à la pollution azotée dans le BVRE de l'Orgeval (Mélarchez et Goins). De plus, le couplage de STICS avec MODCOU (Cabon, 1993 ; Geng, 1988 & Ledoux, 1980) permettrait à ce dernier de simuler plus précisément la contribution des bassins ruraux amont drainés dans la constitution de la qualité de l'eau.

5. Références

- Arlot M.-P. (1999). Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin ? Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 446 p.
- Bouarfa S. & Zimmer D. (2000). Water-table shapes and drain flow rates in shallow drainage systems. *Journal of Hydrology*, **235** (2000), pp 264-275.
- Billen G., Garnier J. & Le Guern G. (1998). SENEQUE 1.3, notice de présentation, Programme PIREN-Seine, UMR Sisyphe.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J. M. & Delécolle R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**, pp 311-346.

Cabon F. (1993). Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-eau-plante ; du lysimètre au bassin hydrologique. Thèse de Doctorat Thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

Geng Q.Z. (1988). Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique. Thèse de Doctorat Thesis, Ecole des Mines de Paris.

Ledoux E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de Docteur-Ingénieur Thesis, Ecole des Mines de Paris, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

Lesaffre B. & Zimmer D. (1988). Subsurface drainage peak flows in shallow soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, **114** (3), pp 387-406.