

Rapport de stage

Impact du changement climatique sur le bilan hydrique, comparaison des modèles STICS et SWAT.



Sophie VALLON
Master 1 Sciences de l'Environnement
2012-2013

Tuteur pédagogique : M. Philippe AMIOTTE-SUCHET

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toute l'équipe d'AgroSup Dijon qui m'a accueillie et aidée dans ce travail, avec une mention spéciale pour Madame Marjorie UBERTOSI, enseignante-chercheuse et maître de conférences au sein du pôle EcolDur (équipe Système de Culture) de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Agroécologie de Dijon, qui a assuré mon encadrement et m'a orientée dans mes recherches.

Des remerciements aussi à Madame Carole BECEL, post-doctorante au sein du pôle EcolDur de l'UMR Agroécologie de Dijon, pour la prise en main de STICS et ses conseils sur la modélisation.

Je souhaite également remercier l'équipe enseignante du Master 1 Sciences de l'Environnement, de l'Université de Bourgogne, pour leurs conseils et particulièrement Monsieur Philippe Amiotte-Suchet, enseignant-chercheur et maître de conférences au sein de l'UMR Biogéosciences (Equipe Systèmes, Environnements et Dynamiques Sédimentaires), qui a accepté d'être mon tuteur pédagogique dans le cadre de ce stage.

RESUME

Le projet HYCCARE : « Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau » a pour objectif d'améliorer les connaissances relatives à l'impact du changement climatique, en région Bourgogne. Et ainsi, orienter les politiques publiques dans l'élaboration de stratégies d'adaptation. L'une des actions de ce projet porte sur l'étude de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau d'une dizaine de bassins versants Bourguignons. Ces derniers feront l'objet d'une modélisation climatique dans le but d'étudier leurs écoulements dans la zone non saturée. Le modèle prendra en compte les caractéristiques du sol, du couvert végétal et du climat simulé, à l'échelle de la parcelle et du bassin versant. Les deux modèles pressentis sont STICS et SWAT. Ainsi, ce stage constitue un travail préparatoire à cette modélisation. L'objectif est de comparer les modalités de la prise en compte du bilan hydrique de ces deux modèles afin de déterminer lequel est le plus adapté. Ce rapport repose sur la problématique suivante « **Lequel de STICS ou SWAT, est le modèle le plus pertinent pour simuler l'évolution du bilan hydrique, sous couvert végétal, en Bourgogne, dans le cadre du changement climatique?** ».

Dans le but de répondre à cette dernière, l'équation du bilan hydrique a été mise en forme. Puis, les paramètres d'entrée et de sortie des deux modèles ont été comparés. Et enfin, cette comparaison m'a permis de trancher sur l'adéquation d'utiliser l'un ou l'autre lors de la simulation de l'évolution du bilan hydrique, dans le cadre du changement climatique.

Mots clés : modèle, STICS, SWAT, bilan hydrique, changement climatique.

ABSTRACT

HYCCARE plan, developed in 2012, has two goals: improve knowledge on impacts of climate change on water quantity in Bourgogne, and promote cooperation between scientists from various disciplines and local decision makers. My internship topic is “find the model which simulate the consequences of climate change on water balance, in Bourgogne”. So, I have three main tasks. First, I explain water balance equation, soil water content and fluxes, and its parameters: evaporation, transpiration, runoff, recharge and storage. Then, I compare two hydrological models STICS and SWAT because I have to find which one is the most adapted to analyse relations between soil water, plant behaviour and climatic variables. STICS has been developed since 1996 at INRA whereas SWAT has been promoted at United State Department of Agriculture since 1999. These models are the best way to understand the soil – plant – climate system and its interactions with cultivation techniques. In fact, STICS is a crop field and SWAT is a river basin, scale model developed to predict the impact of climate change, land management practices on water, and sediment over long periods of time. These models are physically based and computationally efficient, use readily available inputs and enable users to study long term impacts. They mainly simulate plant growth and development as well as the water and nitrogen balances. So, I analyse daily time-step, input variables (relating to climate, soil and crop system), output variables (relating to yield and the environment in terms of drainage), conceptual basis, parameterization and formalisations of STICS and SWAT models. Finally, I produce a report where I explain my researches and present my conclusions.

Keywords: model, STICS, SWAT, water balance, climate change.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : Présentation de la structure d'accueil et contexte de l'étude	2
I. Présentation de la structure d'accueil	2
II. Présentation du projet HYCCARE	3
1. Description du projet.....	3
2. Description du premier axe : « Aléa climatique et impact sur la ressource en eau ».....	4
III. Présentation du bilan hydrique et de ses paramètres.....	4
1. Equation du bilan hydrique	4
2. Description des paramètres	5
a. Précipitation, ruissellement de surface et infiltration	5
b. Ecoulement en milieu saturé et non saturé.....	6
c. Réserve utile et variations de stock	7
d. Evapotranspiration	8
e. Remontée capillaire et drainage	9
PARTIE 2 : Matériel et méthode.....	10
I. Matériel.....	10
1. Généralité sur les modèles.....	10
2. Description de STICS et SWAT	10
a. STICS	10
b. SWAT.....	11
II. Méthode	12
PARTIE 3 : Résultats	14
I. Equation du bilan hydrique dans les modèles.....	14
1. STICS	14
a. Drainage	14
b. Ruissellement et état de surface	14
c. Infiltration.....	15
d. Evapotranspiration	16
e. Synthèse.....	19
2. SWAT.....	19
a. Drainage et percolation.....	20
b. Infiltration et ruissellement de surface	20
c. Evapotranspiration.....	21
d. Synthèse	23
II. Les entrées et sorties des modèles	23
1. Données d'entrée.....	23
2. Données de sortie	25
PARTIE 4 : Discussion	27
I. Intérêts et limites des modèles	27
1. Limites.....	27
2. Intérêts	27
II. Quel modèle utiliser ?.....	28
III. Prochaine étape	29
CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES	33

Liste des figures

Figure 1 : Schématisation du projet HYCCARE Bourgogne.....	3
Figure 2 : Schématisation du bilan hydrique.....	5
Figure 3 : Besoin des cultures et évapotranspiration potentielle.....	9
Figure 4 : Schématisation de l'imbrication des échelles spatiales	12
Figure 5 : Description des compartiments du sol	15
Figure 6 : Circulation de l'eau dans le sol.....	15
Figure 7 : Schématisation des réservoirs sur lesquels s'exerce la demande évaporatoire de l'atmosphère.....	16
Figure 8 : Schématisation de la transpiration des plantes	18
Figure 9 : Schématisation des cinq flux verticaux modélisés par SWAT	19
Figure 10: Schématisation des réservoirs sur lesquels s'exerce la demande évaporatoire de l'atmosphère.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison des données d'entrée et de sortie des deux modèles	23
Tableau 2 : Comparaison des paramètres d'entrée et de leur unité pour chaque modèle	25
Tableau 3 : Comparaison des paramètres de sortie et de leur unité pour chaque modèle.....	26

INTRODUCTION

Depuis une soixantaine d'années, une modification du climat est constatée à l'échelle planétaire. Dès les années 1950, les premières prévisions du changement climatique sont émises suite aux travaux de David Keeling (concepteur du premier instrument de mesure de la teneur en CO₂ de l'atmosphère) et Gilbert Plass (inventeur du premier modèle traité par ordinateur simulant l'effet du taux de CO₂ sur les températures). Elles prévoient le doublement de la concentration de CO₂ d'ici le début du 21^{ème} siècle et une élévation de la température moyenne de 2,5°C. Ce constat a conduit à la mise en œuvre de nombreux sommets internationaux ainsi qu'à la constitution, en 1988, du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) afin de travailler sur ce bouleversement climatique global.

Cette problématique mondiale est également traitée à des échelles géographiques plus fines. En effet, l'impact du changement climatique doit être précisé au niveau local et les échanges entre chercheurs et décideurs doivent aboutir à la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. C'est dans ce contexte général que le projet HYCCARE Bourgogne : « HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau », a vu le jour en 2012. Coordonné par Alterre Bourgogne, il propose de relever deux défis d'ici 2015. Le premier concerne la construction de connaissances locales, au niveau de la région, sur le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau. Le second défi est la descente d'échelle afin de préciser les vulnérabilités locales, variables selon les spécificités géographiques et socio-économiques des territoires.

L'une des actions relative au premier objectif porte sur l'étude de l'impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau pour les prochaines décennies. Pour cela, une dizaine de bassins versants feront l'objet d'une modélisation de leurs écoulements. Dans la zone non saturée, un modèle prenant en compte les caractéristiques du sol, du couvert végétal et du climat simulé, à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, sera utilisé. Les deux modèles pressentis sont STICS et SWAT. Ainsi, ce stage constitue un travail préparatoire à cette modélisation. L'objectif est de comparer les modalités de la prise en compte du bilan hydrique de ces modèles afin de déterminer lequel des deux est le plus adapté. En conséquence, la problématique de ce rapport est définie par la question suivante : **« Lequel de STICS ou SWAT, est le modèle le plus pertinent pour simuler l'évolution du bilan hydrique, sous couvert végétal, en Bourgogne, dans le cadre du changement climatique? ».**

Dans le but de répondre à cette dernière, ce rapport est constitué de quatre parties. La première décrit la structure d'accueil ainsi que le contexte de l'étude et expose la partie bibliographique concernant la mise en forme de l'équation du bilan hydrique. La seconde présente le matériel utilisé et la méthode développée. La troisième détaille les résultats obtenus, à savoir, l'analyse de la mise en équation des processus dans ces deux modèles ainsi que la comparaison de leurs paramètres d'entrée et de sortie. Puis, dans la quatrième partie est conduite une discussion sur les intérêts et les limites de STICS et SWAT, ainsi que sur la pertinence d'utiliser l'un ou l'autre de ces modèles pour la simulation de l'évolution du bilan hydrique dans le cadre du changement climatique.

PARTIE 1 : Présentation de la structure d'accueil et contexte de l'étude

I. Présentation de la structure d'accueil

UMR Agroécologie

L'Unité Mixte de Recherche d'Agroécologie (UMR) de Dijon regroupe des équipes de chercheurs appartenant à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Université de Bourgogne, l'Institut national Supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement (AgroSup Dijon) ainsi que du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

L'UMR Agroécologie est constituée de quatre pôles (*Agroécologie Dijon, en ligne*) :

- Le pôle « déterminismes Génétiques et Environnementaux de l'Adaptation des Plantes à des Systèmes de culture Innovants » (GEAPSI) a pour but de caractériser l'adaptation des espèces végétales des agro-systèmes aux contraintes environnementales avec pour objet d'étude des espèces légumineuses et adventices.

- Le pôle « Interactions Plantes-Microorganismes » (IPM) mène des recherches qui s'inscrivent dans une stratégie globale de diminution des intrants.

- Le pôle « Microbiologie Environnementale et Risque Sanitaire » (MERS) aborde la problématique générale du risque infectieux d'origine environnementale.

- Le pôle « Ecologie des Communautés et Durabilité des Systèmes agricoles » (EcolDur) étudie le fonctionnement des agro-écosystèmes afin de concevoir et d'évaluer des systèmes de production durables. Il comprend et prédit l'impact des systèmes de culture à l'échelle de la parcelle et du paysage sur les communautés. Ainsi, il cerne le rôle de ces communautés et de leurs interactions dans le fonctionnement des agro-écosystèmes.

Le pôle EcolDur est lui-même constitué de six équipes dont l'équipe « Système de Culture », dans laquelle j'ai été accueillie.

AgroSup Dijon

AgroSup Dijon, Institut national Supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement, est un établissement public de formation d'ingénieurs dans les domaines de l'agronomie et de l'alimentaire. Il est sous double tutelle du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt ainsi que du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Il fut créé le 1^{er} mars 2009, en application du décret n° 2009-189 du 18 février 2009 (*AgroSup Dijon, en ligne*).

AgroSup Dijon est né de la fusion de :

- l'Établissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (ENESAD, formation d'ingénieurs agronomes),

- l'École Nationale Supérieure de Biologie Appliquée à la Nutrition et à l'Alimentation (ENSBANA, formation d'ingénieurs en agroalimentaire),

Et il abrite :

- l'EDUTER (Institut au service de l'éducation et de la professionnalisation).

AgroSup Dijon a pour missions principales : la formation d'ingénieurs, la recherche, le transfert des connaissances, la formation des agents de l'État ainsi que l'appui au système éducatif dans le cadre de l'institut Eduter.

Il réunit plus de 1500 personnes dont 1030 étudiants et 474 personnels (titulaires et contractuels) dont 103 enseignants-chercheurs.

II. Présentation du projet HYCCARE

1. Description du projet

En 2008, un premier travail a été mené par Alterre Bourgogne (Agence Régionale pour le Développement Soutenable) et ses partenaires : la spatialisation du changement climatique et de ses effets sur la réserve utile des sols a été réalisée. Ce partenariat a permis d'articuler plusieurs modèles pour « rendre lisible le risque » auprès des acteurs régionaux. Cette première phase, effectuée sur deux années (1991 et 2003), a permis de regrouper chercheurs et acteurs, afin de déterminer le champ des actions possibles sur le territoire de la Bourgogne (GICC, 2012). Elle a également donné naissance, en 2012, au projet HYCCARE (HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau). Il est coordonné par Alterre Bourgogne et financé par l'appel à projet 2012 : Gestion des Impacts du Changement Climatique (GICC, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable). Son coût prévisionnel total est de 346 348 € (GICC, 2012). Ce projet rassemble plusieurs organismes et laboratoires, à savoir, les UMR Biogéosciences et Agroécologie, le Laboratoire de recherche sur les Innovations Socio-Techniques et Organisationnelles en agriculture de Dijon (UR 718 LISTO-D), l'UMR Centre d'Economie et Sociologie Appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux (CESAER), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de Bourgogne Franche-Comté.

Ce programme d'étude sur 3 ans, dont l'échéance est fixée en 2015, a pour objectif d'orienter les politiques publiques dans la mise en œuvre de stratégies d'adaptation face au changement climatique. Ce projet s'articule autour de deux axes (figure 1).

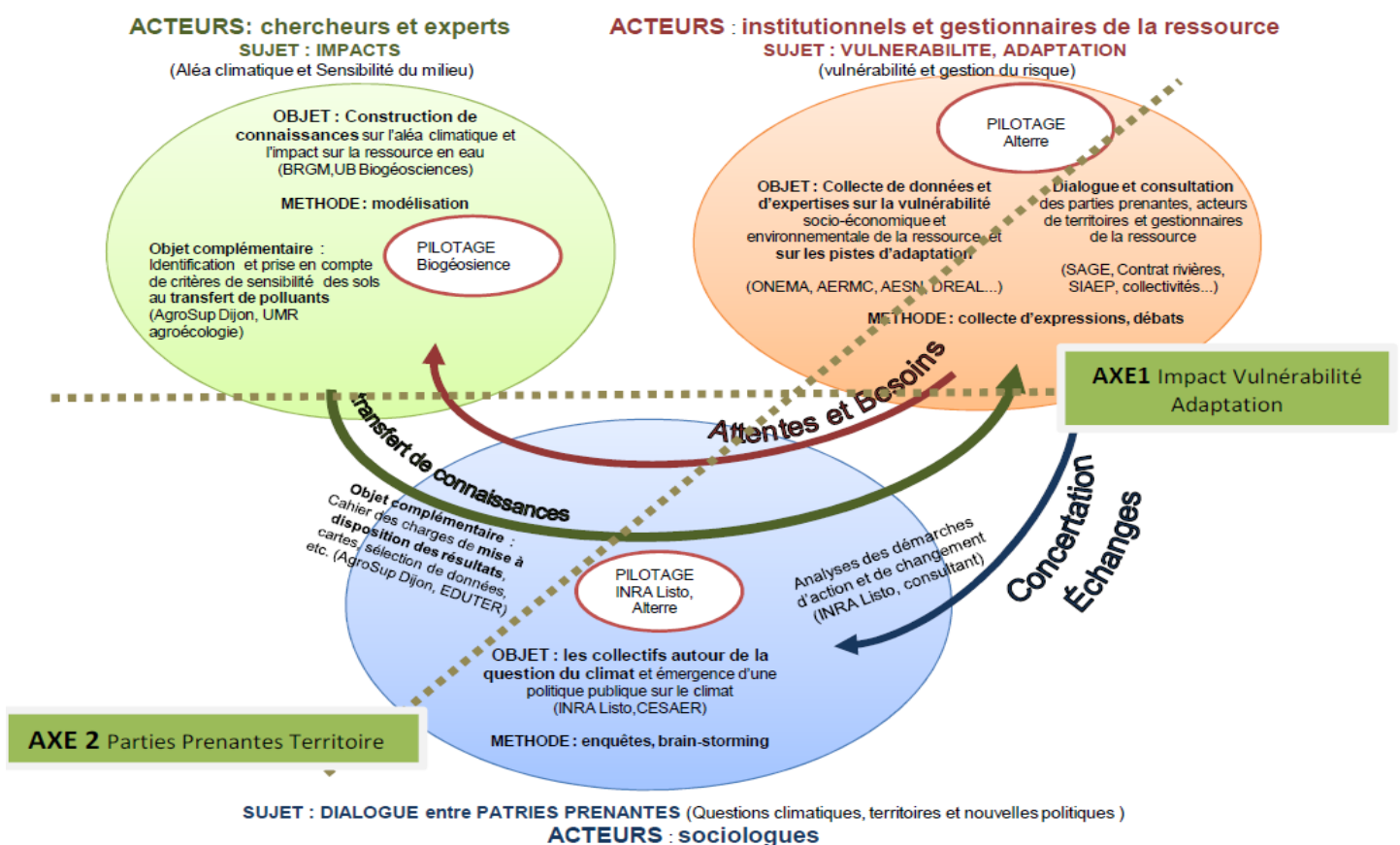


Figure 1 : Schématisation du projet HYCCARE Bourgogne (GICC, 2012)

Le premier axe cherche à approfondir les connaissances relatives à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau d'une dizaine de bassins versants et sur les vulnérabilités qui en découlent. Des simulations climatiques sur le 21^{ème} siècle seront effectuées avec un modèle de climat régional à hautes résolutions spatiales. Leurs sorties serviront de données d'entrée pour des simulations hydrologiques. Les résultats attendus sont :

- Une meilleure connaissance des évolutions probables de l'aléa climatique,
- Une estimation de la sensibilité des bassins versants au travers de l'évolution de la capacité de la ressource à se régénérer.

Le second axe consiste à créer une synergie entre les différents acteurs afin de trouver des modes d'adaptation et de gestion de la ressource. Ceci permettra l'émergence d'une politique publique autour du changement climatique et de son impact (*GICC, 2012*).

2. Description du premier axe : « Aléa climatique et impact sur la ressource en eau »

Cet axe a trois objectifs principaux :

- Améliorer les connaissances autour de l'aléa climatique (évolution du climat et scénarios climatiques),
- Améliorer les connaissances sur l'impact au niveau de l'évolution de la ressource en eau à l'échelle de bassins versants,
- Améliorer les connaissances sur l'impact au niveau de l'évolution de la réserve utile des sols.

C'est sur ce dernier que mon travail porte. En effet, les paramètres gérant le ruissellement, le prélèvement par la végétation, le taux de remplissage de la réserve utile et le transfert d'eau dans les sols non saturés ou saturés sont connus. Ainsi, le bilan hydrique peut être mis en équation et la modélisation de l'évolution de la ressource en eau à l'échelle de bassins versants et de parcelles peut être réalisée. Cette modélisation se basera sur une étude bibliographique, les sorties du modèle climatique régional et les données spatialisées des sols bourguignons. Les résultats attendus permettront d'estimer quels termes du bilan hydrique seront impactés par le changement climatique et dans quelle mesure. Ensuite, une cartographie haute résolution de la vulnérabilité des territoires vis à vis de la réserve utile des sols sera créée. Ces résultats serviront de bases à des études prospectives sur l'adaptation des activités agricoles, sylvicoles et viticoles (*GICC, 2012*).

III. Présentation du bilan hydrique et de ses paramètres

1. Equation du bilan hydrique

Le bilan hydrique vise à déterminer les échanges entre l'atmosphère et le système sol-végétation afin d'évaluer les fluctuations des réserves d'eau disponibles pour les plantes. Les échanges entre le sol et les végétaux se produisent sous la forme de flux (figure 2). A la limite supérieure du sol, les apports d'eau sont liés aux précipitations ou à l'irrigation. Une partie de ces arrivées pénètre dans le sol par infiltration et le reste ruisselle en surface selon la pente. En sens inverse, l'eau retourne à l'atmosphère par évaporation depuis le sol et par transpiration des végétaux : c'est le phénomène d'évapotranspiration. A la limite inférieure du sol, des pertes par drainage et des apports par remontées capillaires sont observables (*A.Musy et al, 1991*).

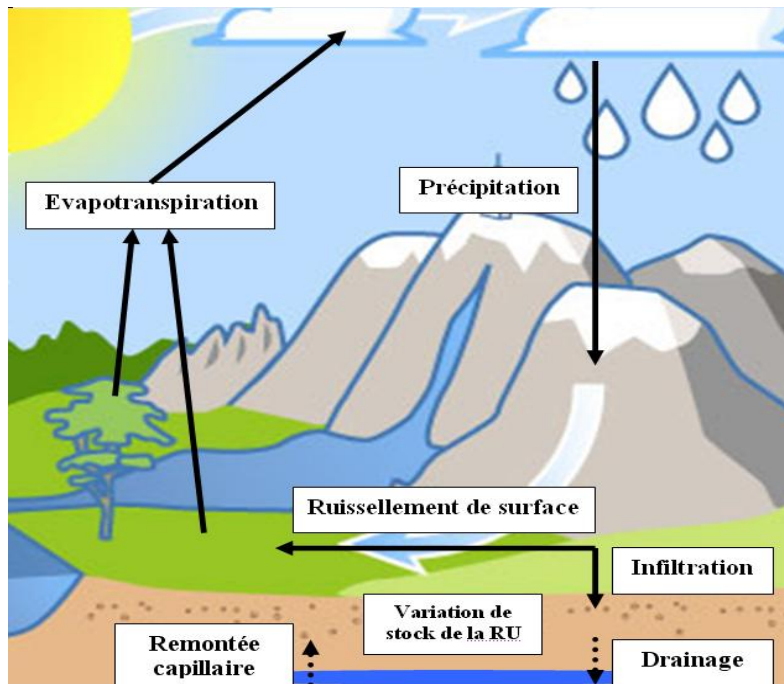


Figure 2 : Schématisation du bilan hydrique (adapté de www.eaupotable.fr, 2013)

Ainsi, l'équation du bilan hydrique, pour un profil de sol sous un couvert végétal, s'écrit sous la forme :

$$P - ETR = R + \Delta S + Dr - Rc$$

Tous les paramètres sont exprimés en mm reçus entre deux dates. P : précipitation, R : ruissellement, ETR : EvapoTranspiration Réelle, ΔS : variation de stock de la réserve utile dans le profil, Dr : drainage et Rc : remontée capillaire.

2. Description des paramètres

a. Précipitation, ruissellement de surface et infiltration

Les apports en eau à la surface du sol proviennent des précipitations ou de l'irrigation. Une partie de ces apports pénètre dans le sol par infiltration alors que le reste ruisselle en surface selon la pente (A.Musy *et al*, 1991). L'infiltration correspond au passage de l'eau à travers la surface du sol vers l'intérieur des horizons de ce dernier. Elle dépend de la structure et de la texture du sol ainsi que des conditions dans lesquelles se déroule le processus (conditions initiales et débit d'alimentation¹). La quantité d'eau maximale absorbée par un sol donné est appelée capacité d'infiltration. Ainsi, l'eau s'infiltre aussi longtemps que le régime d'alimentation en eau à la surface est inférieur à la capacité d'infiltration. Quand la capacité d'infiltration est dépassée, l'eau ruisselle. Le ruissellement est donc la fraction de pluie qui se déplace par gravité à la surface du sol. Il peut être dû à deux phénomènes (S.Weill, 2004) :

- La conséquence de précipitations trop importantes (qui dépassent la capacité d'infiltration du sol),
- La conséquence de la remontée de la nappe (lorsque le sol est saturé en eau et que la surface libre atteint la surface du sol, le ruissellement apparaît).

¹ Quantité d'eau arrivée à la surface du sol.

b. Ecoulement en milieu saturé et non saturé

La description de l'écoulement de l'eau dans le sol repose sur l'association de deux lois :

- La loi de comportement dynamique : elle traduit l'existence d'un régime permanent où les modalités d'écoulement sont indépendantes du temps. Elle permet de déterminer la densité de flux en un point du sol.

- La loi de continuité traduit l'existence d'un régime variable dans lequel les modalités d'écoulement évoluent dans le temps. La description des écoulements en régime variable introduit le principe de conservation de la masse d'eau. Ceci permet de décrire l'écoulement dans le sol sur le plan quantitatif (A.Musy et al, 1991).

Dynamique en milieu saturé

La zone saturée correspond à la partie du sol dans laquelle tous les pores sont remplis d'eau. La limite haute de cette zone est appelée surface libre. La loi de comportement dynamique, établie par Henry Darcy, est utilisée pour calculer les écoulements verticaux et souterrains de l'eau à travers un milieu poreux. Elle donne une relation linéaire entre la densité de flux et la perte de charge (A.Musy et al, 1991) :

$$q = \frac{Q}{S} = K_s * \frac{\Delta H}{L}$$

q : densité de flux (m.s^{-1}), Q : débit total ($\text{m}^3.\text{s}$), S : section de la colonne (m^2), K_s : conductivité hydraulique à saturation (m.s^{-1}), ΔH : différence de charge totale (m) et L : longueur de la colonne (m).

Cette loi s'applique dans des conditions d'écoulement particulières, à savoir : la matrice doit être solide et homogène, le régime d'écoulement doit être permanent, l'écoulement doit être laminaire² et s'effectuer dans une direction unique. Or, dans le sol, la direction de l'écoulement varie. Ainsi, l'expression unidimensionnelle de la loi de Darcy a été généralisée en une équation à trois dimensions soit sous forme vectorielle (1), soit par un vecteur à trois composantes (2) :

$$(1) \vec{q} = -K_s \overrightarrow{\text{grad}}(H) \text{ et } K_s = \frac{(\kappa \rho_w g)}{\eta_w}$$

$\vec{q}$: flux de Darcy (m.s^{-1}), H : charge hydraulique (m), K_s : conductivité hydraulique à saturation (m.s^{-1}), κ : perméabilité intrinsèque du sol (m^2), ρ_w : masse volumique du fluide (kg.m^{-3}), g : accélération de la pesanteur (m.s^{-2}) et η_w : viscosité dynamique du liquide (Pa.s).

$$(2) \begin{aligned} q_x &= -K_s \frac{\partial H}{\partial x} \\ q_y &= -K_s \frac{\partial H}{\partial y} \\ q_z &= -K_s \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned}$$

En milieu saturé, le volume reste saturé, le milieu est indéformable, le fluide est homogène et incompressible, la variation temporelle de masse est nulle, de même que la variation spatiale de la masse volumique de l'eau. Ainsi, l'équation de continuité, qui exprime la conservation de la masse d'eau, s'écrit en milieu saturé (A.Musy et al, 1991) :

$$\text{Div} \vec{q} = 0$$

La combinaison de ces deux équations, donne l'équation générale des écoulements en milieu saturé :

$$\overrightarrow{\text{Div grad}}(H) = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

² Peu de variations spatiale et temporelle.

Dynamique en milieu non saturé

Les écoulements dans la zone non saturée, zone dans laquelle les pores sont partiellement remplis d'eau, sont difficiles à décrire quantitativement car la teneur en eau du sol évolue avec l'écoulement. Les équations régissant les transferts d'eau en milieu non saturé ont été initialement définies dans le cas de sols non saturés indéformables, avec continuité de la phase gazeuse. Cela permet de considérer qu'à tout instant la pression d'air est égale à la pression atmosphérique. Ainsi, les équations de base d'un écoulement en milieu non saturé sont les mêmes que celles utilisées pour un écoulement en milieu saturé. En conséquence, la loi de Darcy reste valable mais le coefficient dépend de la teneur en eau du milieu (θ). La loi de comportement dynamique correspond à la loi de Darcy généralisée et étendue au domaine non saturé (A.Musy et al, 1991) :

$$\vec{q} = K(\theta) \overrightarrow{\text{grad}}(H)$$

L'équation de continuité, qui exprime la conservation de la masse d'eau, est différente en milieu saturé et en milieu non saturé. En effet, dans les sols non saturés, il peut y avoir des inégalités entre le flux entrant et le flux sortant. Ainsi, l'équation de continuité s'écrit :

$$\text{Div} \vec{q} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}$$

La combinaison de ces deux équations donne l'équation générale des écoulements en milieu non saturé, dite équation de Richards (A.Musy et al, 1991) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(-k(\theta) \frac{\partial H}{\partial \theta} \overrightarrow{\text{grad}} \theta) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z}$$

c. Réserve utile et variations de stock

La Réserve Utile (RU) d'un sol correspond à la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement. La capacité au champ est le volume maximal d'eau retenu par les forces de capillarité d'un sol (plus la quantité d'eau dans ce dernier est faible, plus les forces de capillarité sont élevées). Le point de flétrissement correspond à la teneur en eau d'un sol en dessous de laquelle la plante ne peut plus vaincre la tension exercée par les forces de capillarité et satisfaire ses besoins en eau.

La réserve utile dépend de la profondeur d'enracinement de la plante, de la densité apparente, de la texture du sol ainsi que de la teneur en éléments grossiers. Elle est mesurée horizon par horizon, dans la tranche du profil prospectée par les racines. La RU (en mm) se calcule par l'équation suivante (J.Beauchamp, 2006) :

$$RU = \frac{W_{cc} - w_{pfp}}{100} * h * Da$$

W_{cc} : humidité à la capacité au champ (mm), w_{pfp} : humidité au point de flétrissement (mm), Da : densité apparente et h : épaisseur du sol (mm).

La réserve utile est composée de deux fractions : la RFU (Réserve Facilement Utilisable) et la RS (Réserve de Survie). Au-delà de cette dernière, le point de flétrissement permanent est atteint. Le rapport RFU/RU est variable de 1/3 à 2/3 (P.Duchaufour, 2000).

En climat tempéré, la RU s'épuise progressivement pendant la période végétative et se reconstruit en hiver. Les variations de stock de la RU dépendent donc des précipitations et de l'évapotranspiration :

- Lorsque les précipitations sont supérieures à l'EvapoTranspiration Réelle (ETR), la RU se remplit,
- Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETR, la RU ne peut se remplir.

Quand la capacité maximale de la RU est dépassée, une partie de l'eau descend vers la nappe : c'est le phénomène de drainage.

d. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est composée de deux processus se produisant simultanément : l'évaporation et la transpiration. L'évaporation se produit dans une zone de faible épaisseur située sous la surface du sol. La transpiration des végétaux se produit au niveau des parois internes des stomates. Pour trouver les réserves en eau, les plantes agissent par succion³ de la surface du sol jusqu'à la limite inférieure de la zone racinaire. La quantité d'eau transpirée par les plantes dépend principalement de facteurs liés à la météorologie, la disponibilité en eau et la physiologie des végétaux.

Ainsi, lorsque le sol présente un couvert végétal, les échanges par transpiration sont beaucoup plus importants que par évaporation (A.Musy et al, 1991).

Le terme d'évapotranspiration fait intervenir trois notions : l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), l'EvapoTranspiration Maximale (ETM) et l'EvapoTranspiration Réelle (ETR).

Evapotranspiration potentielle

Les valeurs de l'ETM et de l'ETR sont obtenues à partir de l'ETP aussi appelée évapotranspiration de référence. En effet, cette dernière correspond à l'évapotranspiration d'un gazon ras très couvrant (couvert de référence), en alimentation hydrique non limitée. Dans ces conditions, l'ETP dépend seulement des paramètres climatiques locaux (le rayonnement net, la pluviométrie, l'humidité de l'atmosphère, la vitesse du vent). L'ETP peut être calculée par diverses formules comme celle de Turc (1), celle de Penman (2) ou encore celle de Hargreaves (peu utilisée en Europe). La formule de *Turc* est basée sur l'utilisation de paramètres climatiques moyens pour une période donnée, elle est la plus adaptée aux conditions caractéristiques du climat tempéré (A.Musy et al, 1991) :

$$(1) \ ETP = 0.4 * (R_g + 50) * \frac{t}{t + 15}$$

Où l'ETP est calculée pour un pas de temps mensuel (mm), t : température moyenne de la période considérée (°C) et R_g : rayonnement global mensuel ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$).

La formulation de Penman, très utilisée en Europe, est basée sur les échanges énergétiques entre l'atmosphère et le système sol - végétation (A.Musy et al, 1991) :

$$(2) \ ETP = (1/L) * \frac{R_n * (F'T/g)}{1 + (F'T/g)} + E_a * \frac{1}{1 + (F'T/g)}$$

L : chaleur latente d'évaporation de l'eau (MJ.kg^{-1}), R_n : rayonnement net ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), $F'T$: pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température T , g : constante psychrométrique ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$) et E_a : pouvoir évaporant de l'air (k.Pa).

Evapotranspiration maximale

L'ETM est définie pour un climat et une végétation en condition d'eau non limitée. Elle dépend donc des conditions climatiques ainsi que du stade de développement de la couverture végétale. L'ETM représente les besoins en eau des cultures (figure 3). Elle est déterminée par correction de l'ETP grâce à un coefficient cultural (k_c , compris entre 0 et 1). Ce dernier prend en compte l'espèce et le stade phénologique de la culture. L'ETM est calculée par la formule suivante (A.Musy et al, 1991) :

$$ETM = k_c * ETP$$

³ La notion de succion traduit la capacité du système sol-végétation à extraire de la vapeur d'eau.

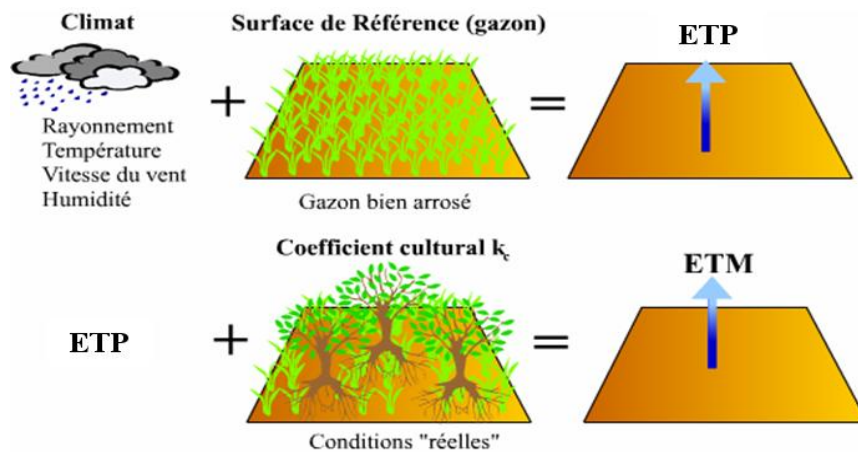


Figure 3 : Besoin des cultures et évapotranspiration potentielle (adapté de Université de Montpellier, en ligne)

La figure 3 illustre le fait que :

- L'ETM est inférieure à l'ETP tant que le couvert végétal n'est pas couvrant,
- L'ETM est supérieure à l'ETP quand la végétation est développée.

Evapotranspiration réelle

L'ETR d'un couvert végétal dépend de l'espèce végétale, de la structure du couvert, du stade phénologique des plantes et du climat local. Effet, en conditions réelles :

- Soit la réserve facilement utilisable (RFU) n'est pas vide et donc la plante dispose de suffisamment d'eau pour combler ses besoins. Dans ce cas, l'ETR est égale à l'ETM.
- Soit la RFU est épuisée : la pluviométrie et le stock d'eau du sol ne permettent pas de couvrir les besoins en eau de la plante. En effet, plus la RFU s'épuise, plus elle est difficile à absorber et l'évapotranspiration de la plante diminue corrélativement. Dans ce cas, l'ETR est inférieure à l'ETM et la plante est en état de stress hydrique (P.Duchaufour, 2000).

Le calcul de l'ETR dépend donc de l'ETM et du coefficient de stress hydrique (k_s) :

$$ETR = k_s * k_c * ETP = k_s * ETM \text{ et } k_s = ETR / ETM.$$

e. Remontée capillaire et drainage

Les remontées capillaires et le drainage correspondent aux mouvements d'eau verticaux ayant lieu au fond du profil de sol et respectivement orientés vers le haut et vers le bas.

Les remontées capillaires correspondent à des mouvements d'eau ascendants des horizons profonds vers les horizons de surface. En effet, en périodes chaudes et sèches, l'évapotranspiration est forte et la teneur en eau du sol diminue en dessous de la capacité au champ. La dessiccation du sol est plus rapide en surface qu'en profondeur, cette différence de potentiel entraîne des remontées d'eau vers la surface afin de compenser ces différences. L'efficacité des remontées capillaires dépend du milieu et de la texture du sol (P.Duchaufour, 2000) :

- en milieu drainé : la remontée est très lente et ne compense pas le dessèchement.
- en présence de nappe d'eau : l'ascension est importante et constitue un appoint essentiel d'alimentation en eau des plantes en saison sèche.

Le drainage correspond à l'écoulement par gravité de l'eau entrant dans le profil de sol. Elle descend jusqu'à la nappe, hors de portée de la zone racinaire. Ce phénomène se produit quand la capacité maximale de la RU est dépassée, c'est-à-dire quand le profil de sol a une humidité supérieure à la capacité au champ.

PARTIE 2 : Matériel et méthode

L'objectif de ce stage est de trouver lequel de STICS ou SWAT, est le modèle le plus adapté pour répondre à la demande formulée dans le cadre du projet HYCCARE, à savoir, caractériser en région Bourgogne l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Il s'agit donc de déterminer quel modèle est le plus approprié pour modéliser les écoulements dans la zone non saturée d'un sol, sous couvert végétal. Ce dernier doit prendre en compte les caractéristiques du sol, du couvert et du climat simulé, à l'échelle de la parcelle et du bassin versant. Ainsi, la problématique de ce rapport se résume par la question suivante « **Lequel de STICS ou SWAT, est le modèle le plus pertinent pour simuler l'évolution du bilan hydrique, sous couvert végétal, en Bourgogne, dans le cadre du changement climatique?** ». Dans le but de répondre à cette dernière, des outils spécifiques ont été utilisés et une méthodologie a été développée.

I. Matériel

1. Généralité sur les modèles

Un modèle est une représentation simplifiée et schématisée d'un phénomène complexe. Il permet la mise en place de scénarios orientant la prise de décisions pour une problématique donnée. Le modèle hydrologique d'un bassin versant présente de manière simplifiée le cycle de l'eau sur ce bassin afin d'expliquer la réaction de ce dernier face aux conditions climatiques et physiques qu'il subit (*J.Renaud, 2004*).

STICS et SWAT sont des modèles analogiques, ils s'opposent aux modèles mécanistes. Les modèles analogiques et les modèles mécanistes sont les deux grandes catégories de modèles estimant le bilan hydrique. Ils se différencient pour les raisons suivantes (*A.Pindard, 2000*) :

- Les modèles mécanistes considèrent que les flux d'eau dans le sol reposent sur des lois physiques ou biologiques, alors que,
- Les modèles analogiques considèrent le sol comme un réservoir d'eau pouvant se remplir (précipitation, irrigation) et se vider (évapotranspiration, drainage). La capacité de stockage (ou réserve utile) est déterminée par les valeurs d'humidité à la capacité au champ et d'humidité au point de flétrissement. Dans les modèles analogiques, se distinguent les modèles où le sol est un horizon unique, et ceux où le sol est constitué d'une succession d'horizons (ils fonctionnent sur le même principe mais tiennent compte des caractéristiques hydrodynamiques de chaque horizon). C'est dans cette dernière catégorie que se classent STICS et SWAT.

2. Description de STICS et SWAT

a. STICS

STICS est développé, depuis 1996, à l'unité de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon avec l'appui de l'unité d'agronomie de l'INRA de Laon. STICS est un modèle dynamique de fonctionnement des cultures, à pas de temps journalier. Ses variables d'entrée sont relatives au climat, au sol et au système de culture. Ses variables de sortie sont relatives à la production agricole, à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la

culture. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle sont définis de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. Les formalisations choisies reposent le plus souvent sur des analogies connues.

STICS a été conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole ou sur l'environnement. Il a aussi été conçu comme un outil de travail et de transfert des connaissances vers des domaines scientifiques connexes (*N.Brisson et al, 2002*).

STICS n'est pas un nouveau modèle car la plupart de ses parties font appel à des formalismes classiques ou issus de modèles existants. Cependant, son originalité réside dans :

- Sa généralité : adaptabilité à de nombreuses cultures.
- Sa robustesse : capacité à simuler des conditions pédoclimatiques variées sans générer de biais importants (au détriment parfois de la précision locale).
- Sa modularité « conceptuelle » : possibilité d'ajouter de nouveaux modules (la volatilisation de l'ammoniac, la fixation symbiotique de l'azote ou le mulch végétal) afin de faciliter les évolutions ultérieures.
- Son interface utilisateur sous Windows (*N.Brisson et al, 2002*).

b. SWAT

SWAT Soil and Water Assessment Tool est un modèle développé par Jeff Arnold pour le United State Department of Agriculture, depuis 1999. Il propose une modélisation hydrologique distribuée⁴ du bassin versant, au pas de temps journalier, mensuel et annuel. Ses variables d'entrée sont relatives au climat, au sol, au système de culture, à la qualité de l'eau et à la morphologie (grâce au Modèle Numérique de Terrain, MNT). Ses variables de sortie sont relatives à la production agricole, à l'environnement et à l'évolution des transferts d'eau, de sédiments et de nutriments dans le bassin versant. Ce modèle hydrologique permet de prédire les effets du changement d'occupation des sols sur la qualité de l'eau et du changement climatique sur le cycle hydrologique d'un bassin versant. Il a été conçu pour de grands bassins versants allant de quelques centaines de km² à plusieurs milliers de km². Il est largement utilisé aux Etats-Unis et dans certains pays européens (*J.Renaud, 2004*).

SWAT peut analyser le bassin versant dans sa globalité ou en le subdivisant en sous bassins contenant des portions homogènes appelées Unités de Réponse Hydrologiques (HRU). Ces trois échelles spatiales sont imbriquées. En effet, l'unité sur laquelle tous les flux sont calculés est l'HRU. Les HRU situées dans un même sous bassin versant alimentent la rivière du sous bassin via les différents flux latéraux qu'elles génèrent. Les différents sous-bassins sont reliés par le réseau hydrographique. La figure 4 illustre cette imbrication d'échelles et précise les principaux paramètres pris en compte par les fonctions de transferts.

⁴ Ces unités sont déterminées par une grille découpant le bassin (une maille équivaut à une unité). Elles sont également regroupées en classe. Le bilan hydrologique est établi pour chaque classe (pour chaque HRU).

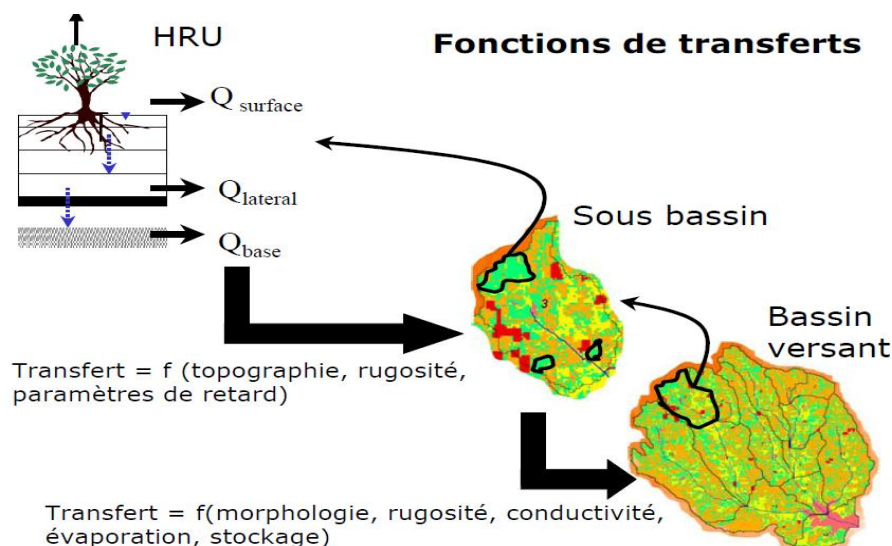


Figure 4 : Schématisation de l'imbrication des échelles spatiales (A.Chaponnière, 2005)

Le traitement morphologique de la zone d'étude est réalisé par le Système d'Information Géographique (SIG) à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Dans un premier temps, le réseau hydrographique est déterminé et des paramètres de surface ainsi que des paramètres climatiques (précipitations journalières, températures : minimum, maximum et moyenne journalière, humidité relative, vitesse du vent et radiation solaire) sont à renseigner. Ensuite, le bassin versant et les sous bassins sont délimités. Pour chaque sous bassin, des paramètres topographiques, climatiques et de surface sont à spécifier. Et enfin, les HRU sont définies suite à la superposition des cartes d'occupation du sol et de sous-sol. Chaque HRU a un comportement hydrologique propre et homogène. Elles correspondent à l'unité spatiale de base de SWAT. Elles se caractérisent par une occupation du sol unique, un type de sol et de sous-sol uniques ainsi qu'une topographie moyenne. C'est à cette échelle spatiale que sont calculés les bilans en eau, en sédiments et en nutriments.

L'hydrologie est modélisée en deux phases : la première est une phase terrestre qui simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration, l'exportation et le transport de sédiments ou d'éléments nutritifs vers le réseau hydrographique. Puis, la seconde est une phase de transport en rivière qui caractérise le déplacement de ces éléments dès leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin (A.Chaponnière, 2005).

Le couplage du modèle avec le SIG permet de gérer des données de type raster et vecteur. SWAT automatise la préparation des données d'entrée et facilite la phase d'intégration, de manipulation ainsi que le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « .Dbase ». Cependant, les fichiers de sortie sont convertis par SWAT en format « ASCII » possédant leurs propres structures (J.Renaud, 2004).

II. Méthode

Pour répondre à la problématique, ma démarche s'est organisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une phase de recherche bibliographique a été nécessaire afin de mettre en forme l'équation du bilan hydrique prenant en compte un couvert végétal. Ainsi, les paramètres gérant le ruissellement, le prélèvement de l'eau par la végétation, le taux de remplissage de la réserve utile et les transferts d'eau dans les sols (non saturés et saturés) ont été déterminés et détaillés (partie 1, chapitre III.2).

Dans un deuxième temps, les paramètres du bilan hydrique ont été classés par ordre d'importance à la vue de la problématique. Toutes les variables ont été traitées cependant les

plus pertinentes dans le cadre du sujet ont été approfondies. Ainsi, les remontées capillaires, le drainage et le ruissellement de surface ont été « survolés » afin de se concentrer sur l'infiltration, l'évaporation ainsi que la transpiration. Voici donc le classement des paramètres du bilan hydrique structurant ce rapport :

- Les remontées capillaires sont des processus complexes non modélisés en détail par SWAT et STICS. Pour ces raisons, ce paramètre ne sera pas approfondi dans ce rapport. En effet, dans SWAT, les remontées capillaires sont simplifiées par l'utilisation d'un temps de drainage de la formation géologique sus-jacente à la nappe libre. En réponse à un déficit en eau de la zone racinaire, de l'eau est puisée à même la nappe de surface. La nappe profonde localisée sous une couche imperméable ne participe pas comme tel au bilan en eau à l'intérieur du bassin versant, sauf si de l'eau d'irrigation est pompée à même cette réserve.

- Le « drainage agricole » peut être pris en compte dans les deux modèles. Il se caractérise par la présence de drains souterrains évacuant rapidement une partie de l'eau libre de la zone racinaire. Ceci permet à la machinerie agricole d'accéder facilement au champ suite à une période estivale pluvieuse. Dans notre cas, nous avons décidé de négliger ce paramètre du fait qu'il ne modifie pas le bilan hydrique. En effet, que les écoulements soient de surface ou souterrains, la quantité d'eau sortie au final reste la même. En revanche, si une modélisation est menée sur un bassin versant agricole très impacté par cette pratique, il faudra utiliser ce paramètre.

- Le ruissellement de surface dépend principalement de l'état de surface du sol, des précipitations et de l'infiltration, de ce fait ce paramètre ne sera pas approfondi.

- L'infiltration est un paramètre important car il est pris en compte lors de la simulation du ruissellement et de l'évapotranspiration. Dans STICS et SWAT, le sol est considéré comme un réservoir d'eau constitué de plusieurs horizons pouvant se remplir et se vider. Le remplissage de ce dernier s'effectue par le haut, c'est-à-dire que les couches supérieures sont alimentées en priorité.

- L'évapotranspiration est le paramètre le plus détaillé car c'est lui qui différencie la modélisation des écoulements de l'eau dans un sol sous couvert végétal de ceux se produisant dans un sol nu. En effet, sur sol nu, seule l'évaporation est prise en compte dans le bilan hydrique alors que sous couvert végétal, il intègre l'évaporation et la transpiration. L'évapotranspiration est un phénomène complexe formalisé de différentes façons suivant les modèles et calculé de plusieurs manières au sein d'un même modèle (partie 3, chapitre I).

Dans un troisième temps, j'ai analysé la mise en équation des processus jouant sur le bilan hydrique dans STICS et SWAT. Puis, j'ai comparé les paramètres d'entrée et de sortie ainsi que les unités de ces derniers (partie 3, chapitre II).

Dans un quatrième temps, tous ces résultats m'ont permis d'alimenter une discussion. En effet, cette dernière expose les intérêts de la modélisation par rapport à des outils plus simples tel que le logiciel Excel. Ensuite, elle explique en quoi un modèle me semble plus pertinent que l'autre à utiliser au regard de la problématique. Et enfin, elle présente la cohérence et les avantages des résultats obtenus avec ce dernier (partie 4).

PARTIE 3 : Résultats

I. Equation du bilan hydrique dans les modèles

1. STICS

Le bilan hydrique (en mm) dans STICS est simulé par une analogie « réservoir » par couches de 1 cm d'épaisseur, à partir des données hydrologiques du sol :

$$\text{Précipitation} = \text{évaporation} + \text{transpiration} + \text{ruissellement} + \text{infiltration} + \text{stockage}^5 + \text{drainage}$$

A la surface du sol, l'eau apportée résulte de la pluie et de l'irrigation. Quand il y a des apports d'eau, STICS calcule les quantités d'eau arrivant au sol après interception d'une partie par le feuillage. L'eau qui persiste sur le feuillage est soumise à la demande évaporatoire de l'atmosphère et s'évapore. Une partie de l'eau arrivant au sol s'infiltré alors que le reste ruisselle en surface. En sens inverse, de l'eau retourne à l'atmosphère par évaporation depuis le sol et par transpiration des végétaux. En effet, STICS calcule les besoins en eau des cultures. Ceci permet de connaître la transpiration des végétaux compte tenu de l'énergie disponible au niveau des plantes et de l'état de l'atmosphère sous la végétation. Quand l'offre en eau est inférieure à la demande, le rapport permet de calculer les indices de stress hydrique qui jouent sur la croissance de la plante (A.Pindard, 2000).

a. Drainage

L'eau drainée (Drat) est la quantité d'eau non récupérée par les cultures et sortant sous la base du profil de sol. Les apports d'eau remplissent d'abord la couche supérieure jusqu'à sa capacité au champ puis le surplus draine en cascade dans les couches inférieures. Ainsi, l'eau en excès par rapport à l'ensemble de la capacité de stockage du sol est affectée au drainage. STICS introduit également le drainage agricole dans sa simulation (J.Tournebize et al, 2004), cependant nous n'en tiendrons pas rigueur (partie 2, chapitre II).

b. Ruissellement et état de surface

STICS différencie le ruissellement lié à un défaut d'infiltration et celui lié à l'état de surface :

- Dans le premier cas, le ruissellement de surface dépend du paramètre d'infiltrabilité journalier (INFIL) défini au niveau de chaque horizon. Lorsque les paramètres d'infiltrabilité journalier de toutes les discontinuités pédologiques sont atteints, l'eau en excès est imputée au ruissellement de surface.

- Dans le second cas, la quantité d'eau journalière ruisselant dépend de l'état de surface du sol. Ce dernier se caractérise par un albédo à l'état sec, un coefficient de ruissellement (RUISOLNU) et par la présence ou non d'une couverture végétale. Le coefficient de ruissellement donne la proportion d'eau ruisselée en fonction des effets de la pente, de la rugosité du sol et de la présence d'une végétation (si un couvert végétal est place, ce coefficient ne prend pas en compte la lame d'eau s'écoulant le long des tiges des plantes car STICS considère que cette lame d'eau s'évapore).

L'eau ruisselée totale est égale à la somme des quantités d'eau obtenues par ces deux processus. STICS suppose ensuite que l'eau ruisselée sort du système (N.Brisson et al, 2002).

⁵ Réserves en eau du sol.

c. Infiltration

Le sol peut être composé au maximum de cinq horizons (figure 5). Chaque horizon possède cinq caractéristiques permanentes : profondeur (ep), réserve utile (RU), humidité au point de flétrissement (HMINF(h)), humidité à la capacité au champ (HCCF(h)) et densité apparente (DAF(h)). Ces horizons sont divisés en couches élémentaires de 1 cm. Ces dernières ont les mêmes caractéristiques permanentes que l'horizon dans lequel elles se situent.

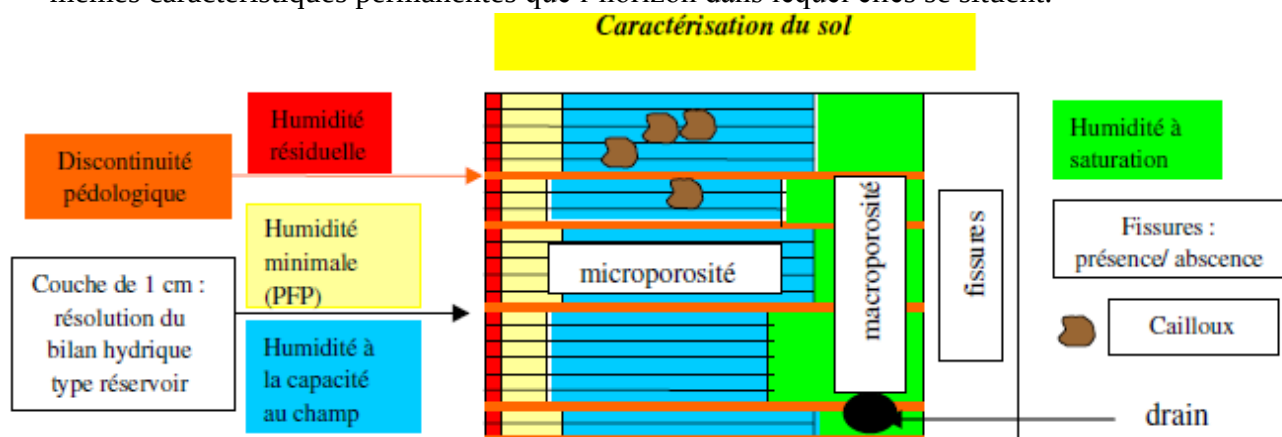


Figure 5 : Description des compartiments du sol (N.Brisson et al, 2002)

Le sol comporte quatre compartiments (N.Brisson et al, 2002):

- La microporosité : le transfert d'eau dans la microporosité est appréhendé par couches élémentaires (figure 6). Elles sont assimilées à des réservoirs dont la teneur en eau maximale correspond à leur capacité au champ. Un apport d'eau remplit d'abord la couche supérieure jusqu'à la capacité au champ puis l'excès d'eau draine en cascade dans les couches inférieures. Lorsque la capacité de stockage du sol est atteinte, c'est-à-dire quand la capacité au champ de toutes les couches est comblée, l'excès d'eau est imputé au drainage à la base du sol (partie 3, chapitre I.1.a).
- La macroporosité : est discrétisée par horizon (figure 6). Entre deux discontinuités, la circulation descendante se fait par débordement d'une couche vers la suivante. Ainsi, quand la macroporosité d'un horizon est remplie, l'eau descend vers l'horizon inférieur puis comble sa microporosité avant de remplir sa macroporosité.
- Les cailloux : en leur présence, la densité apparente et les humidités caractéristiques des horizons sont modifiées en fonction du taux de cailloux.
- Les fissures : sont alimentées par débordement de l'horizon de surface.

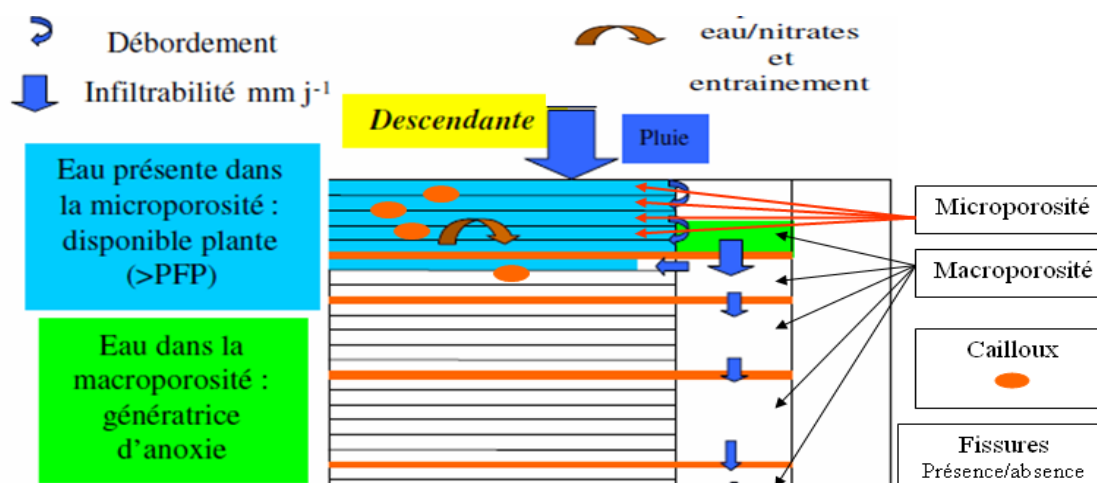


Figure 6 : Circulation de l'eau dans le sol (adapté de N.Brisson et al, 2002)

Les teneurs en eau initiales sont déduites des caractéristiques permanentes des cinq horizons descripteurs du sol. Les valeurs de la réserve en eau du sol sont obtenues en intégrant la teneur en eau d'une couche de sol IZ (HR(IZ)) sur la profondeur de mesure. La quantité d'eau contenue dans la zone racinaire est trouvée en intégrant la différence entre la teneur en eau de la couche de sol IZ et sa teneur en eau au point de flétrissement (HR(IZ)-HMINF(IZ)) sur la profondeur atteinte par le système racinaire (ZRAC). Enfin, la réserve maximale utilisée (RMAXI) correspond à l'intégration de la différence entre l'humidité à la capacité au champ et la plus petite valeur de teneur en eau de la couche IZ (HCCF(IZ)-min(HR(IZ))) sur la profondeur d'enracinement.

d. Evapotranspiration

L'évapotranspiration représente la demande évaporatoire de l'atmosphère. STICS calcule séparément l'évaporation et la transpiration en tenant compte de l'énergie radiative interceptée par la culture (figure 7). L'évaporation d'un jour donné dépend de l'importance de la pluie. La contribution de chaque couche de sol à l'évaporation décroît avec la profondeur jusqu'à une profondeur seuil en dessous de laquelle il n'y a plus d'évaporation (ZESX). La transpiration est répartie dans le sol en fonction des densités racinaires de chaque couche élémentaire. Les longueurs des racines évoluent au cours de la simulation : la progression du front racinaire (ZRAC) dépend de la variété de plante, de la température, de la densité apparente et de l'humidité du sol.

Les valeurs de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes sont obtenues à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

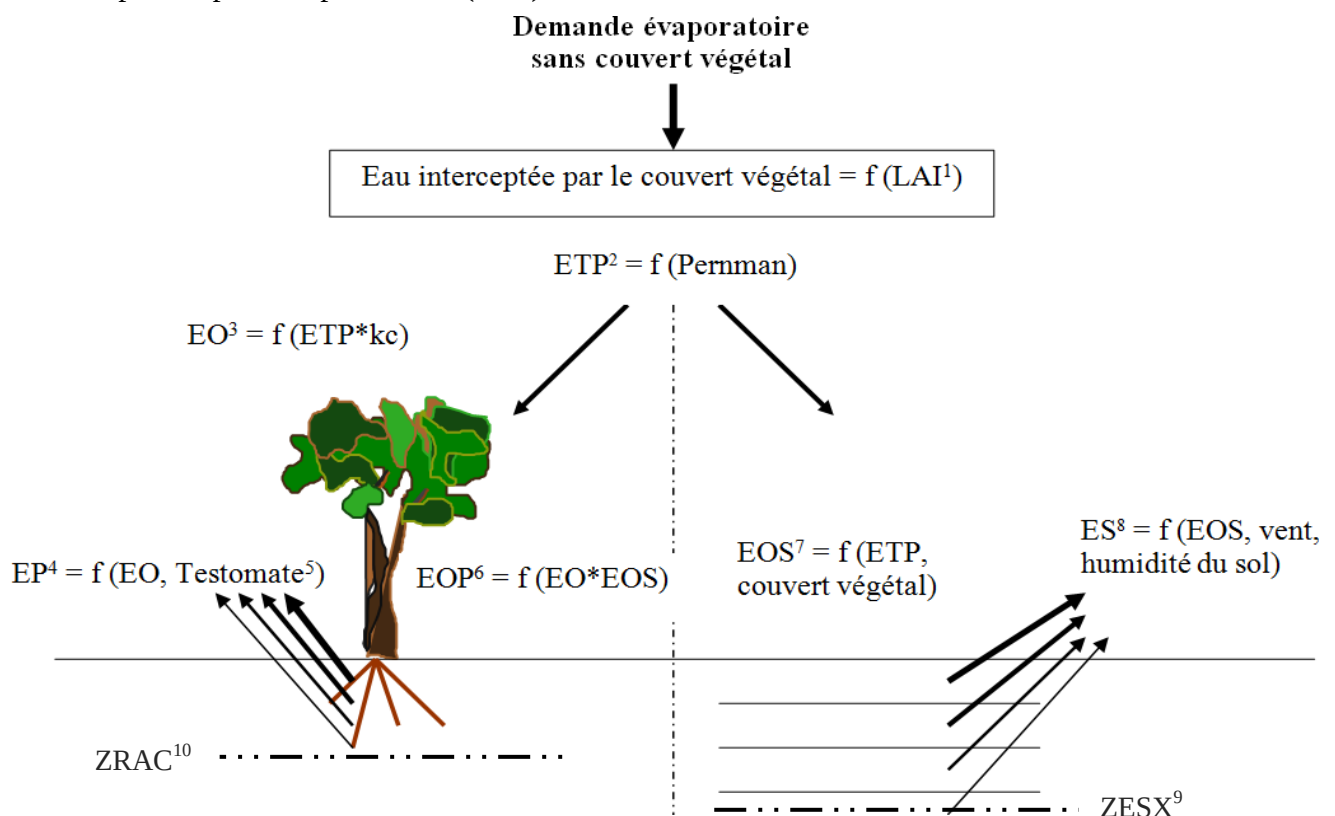


Figure 7 : Schématisation des réservoirs sur lesquels s'exerce la demande évaporatoire de l'atmosphère

1 : indice de surface foliaire, 2 : évapotranspiration potentielle, 3 : évaporation de la culture en condition d'eau non limitée, 4 : transpiration réelle, 5 : seuil dépendant de la profondeur et de la teneur en eau moyenne dans la zone racinaire, 6 : transpiration maximale, 7 : évaporation maximale du sol, 8 : évaporation réelle, 9 : profondeur maximale en dessous de laquelle il n'y a plus d'évaporation, 10 : profondeur atteinte par les racines.

Evapotranspiration potentielle

L'ETP dépend de la demande climatique au niveau des plantes (du vent, de la température et de l'humidité). Le modèle propose trois façons d'estimer l'ETP : celle de Penman, celle de Priestley-Taylor et la méthode résistive. Dans la littérature, le formalisme de Priestley-Taylor est conseillé en région humide car en région sèche il a tendance à sous-estimer l'ETP. L'approche résistive nécessite de nombreux paramètres d'entrée souvent difficiles à obtenir. La formule de Penman reste la référence en matière d'estimation de l'ETP en Europe ; c'est donc celle que nous retiendrons :

$$ETP = (1/L) * \frac{Rn * (F'T / g)}{1 + (F'T / g)} + Ea * \frac{1}{1 + (F'T / g)}$$

ETP (mm.j⁻¹), L : chaleur latente de l'évaporation de l'eau (MJ.kg⁻¹), Rn : rayonnement net (MJ.m⁻².j⁻¹), F'T : pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température T (kPa.°C⁻¹), g : constante psychrométrique (MJ.m⁻².j⁻¹) et Ea : pouvoir évaporant de l'air (k.Pa).

Transpiration

Comme l'illustre la figure 7, l'obtention de la valeur de la transpiration réelle (EP) se fait en trois temps (N.Brisson et al, 2002) :

- Le calcul de l'évaporation de la culture dans le cas où les surfaces de sol et de plante ne sont pas limitées en eau (E0). Deux approches permettent de calculer E0 : l'approche empirique et l'approche résistive. Cette dernière nécessite plus de paramètres d'entrée, c'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la méthode empirique. Cette approche est basée sur la relation ETM = Kc * ETP. Kc est déduit de l'indice de surface foliaire (LAI) et du coefficient cultural maximal (Kmax, correspondant au Kc d'une culture ayant un indice de surface foliaire de 5). L'indice de surface foliaire peut être fourni par l'utilisateur à chaque pas de temps ou calculé par STICS grâce à une courbe de LAI obtenue par une équation d'ajustement non linéaire avec la procédure de HAUS. En effet, l'indice de surface foliaire est le rapport de la surface des feuilles d'une culture à celle du sol qui la porte. Il dépend de la densité de semis, des dates des stades phénologiques, de la température ainsi que des indices de stress hydrique et azoté. L'effet d'une trop forte densité de semis est pris en compte dans le modèle par une diminution de la surface foliaire.

Ainsi, Kc est croissant entre 1 (lorsque LAI = 0) et une valeur maximale Kmax (lorsque LAI >= 5). Le paramètre Kmax est établi, par défaut, à partir de l'ETP Penman. En conséquence, l'évaporation de la culture dans le cas où les surfaces de sol et de plante ne sont pas limitées en eau est obtenue par la relation suivante :

$$EO = ETP \left(1 + \frac{K_{max} - 1}{1 + \exp(-1.5 * LAI - 3)} \right)$$

- Le calcul de la transpiration maximale de la plante (E0P) dépend de la demande climatique au niveau des plantes, de l'état de l'atmosphère sous la végétation et de l'évaporation réelle du sol (ES). La transpiration maximale est obtenue par différence entre l'évaporation de la culture si l'ensemble des surfaces de sol et de plante n'étaient pas limitées en eau (E0) et l'évaporation maximale du sol (EOS). Mais un facteur correctif (faisant intervenir le paramètre beta) est appliqué pour tenir compte des phénomènes liés à l'assèchement du sol en surface :

$$EOP = (EO - EOS) * (beta - (beta - 1) * \frac{ES}{EOS})$$

- Le calcul de la transpiration réelle de la plante (EP) est obtenu à partir de la transpiration maximale (E0P) en tenant compte de l'offre en eau du sol et de la distribution des racines dans le sol. En effet, STICS considère que l'absorption racinaire équivaut à la transpiration foliaire à l'échelle d'une journée. Ainsi, en dessous du seuil « TESTOMATE » (correspondant à la teneur en eau moyenne de la zone racinaire), le rapport transpiration réelle

sur transpiration maximale décroît linéairement entre 1 (pour une teneur en eau correspondant à celle de la RFU) et 0 (pour une teneur en eau égale à celle au point de flétrissement sur toute la zone racinaire). Ainsi, la valeur de la transpiration réelle (e_p) est déduite de cette relation (représentée par la figure 8).

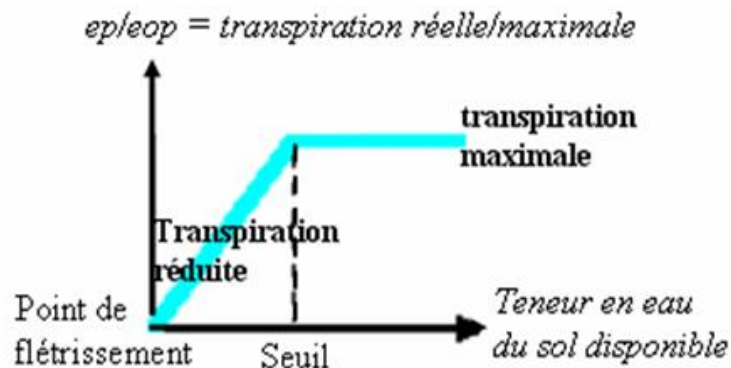


Figure 8 : Schématisation de la transpiration des plantes (N.Brisson et al, 2002)

La valeur seuil « TESTOMATE » est calculée à partir de la demande climatique, du potentiel de fermeture stomatique, de la profondeur racinaire et de la répartition des racines.

Stress hydrique

Quand l'offre en eau est inférieure à la demande, les plantes sont en situation de stress hydrique et leur croissance est freinée. Dans STICS, le rapport transpiration réelle sur transpiration maximale (EP/EOP) permet de calculer deux indices de stress hydrique. L'indice de stress de turgescence (TURFAC) entraîne une limitation de la croissance foliaire et l'indice de stress stomatique (SWFAC) ralentit la photosynthèse et la transpiration (N.Brisson et al, 2002).

Evaporation du sol

L'évaporation journalière (ES) affecte toutes les couches de sol jusqu'à une profondeur maximale (ZESX) entrée par l'utilisateur au début de la simulation. En dessous de cette dernière, il n'y a aucune évaporation. La contribution à l'évaporation de chaque couche décroît avec la profondeur. Le calcul de l'évaporation réelle du sol se fait en deux temps (N.Brisson et al, 2002) :

- Le calcul de l'évaporation maximale du sol (EOS) dépend de la couverture végétale au-dessus du sol (de l'indice de surface foliaire : LAI) et de la proportion de sol couvert par cette végétation (COUVERMULCH) :

$$EOS = ETP \exp(-(EXTIN - 0.2) * LAI) * (1 - COUVERMULCH)$$

ETP : valeur de l'évapotranspiration potentielle (entrée ou calculée par la formule de Penman), EXTIN : coefficient d'interception du rayonnement solaire par la végétation.

- Le calcul de l'évaporation réelle du sol (ES) s'effectue à partir de l'évaporation maximale du sol (EOS) ainsi que du paramètre A dépendant du climat (essentiellement du vent moyen) et du type de sol (de l'eau résiduelle du sol et de la capacité au champ de la couche de surface) :

$$ES = \sqrt{2A * EOS + A^2} - A \text{ et } A = \frac{1}{2} ACLIM * (0.63 - HA) * \frac{5}{3} (HI - HA)$$

ACLIM dépend du vent moyen, HI : humidité volumique à la capacité au champ de la couche de surface et HA : humidité résiduelle estimée à partir de la teneur en argile.

e. Synthèse

La modélisation du bilan hydrique effectuée par le simulateur de culture STICS est établie au pas de temps journalier et à l'échelle d'une parcelle. La simulation du bilan hydrique par ce modèle semble donc complète et adaptée à notre problématique malgré le fait que les remontées capillaires et le drainage soient des paramètres non modélisés en détail.

2. SWAT

Le bilan hydrique de SWAT simule le cycle de l'eau par le biais l'équation suivante, où tous les paramètres sont en mm :

$$\text{Précipitation} = \text{évaporation} + \text{transpiration} + \text{ruissellement} + \text{infiltration} + \text{stockage}^6 + \text{drainage}$$

La variable gouvernant le bilan hydrique est l'humidité du sol. Son suivi permet de déterminer l'ensemble des flux à chaque pas de temps et pour chaque HRU. SWAT ne simule que les flux en zone saturée. Cinq flux verticaux sont ainsi modélisés : l'infiltration, la percolation de l'eau au sein du profil de sol, la transpiration des végétaux, l'évaporation du sol et la recharge profonde alimentant les aquifères (figure 9).

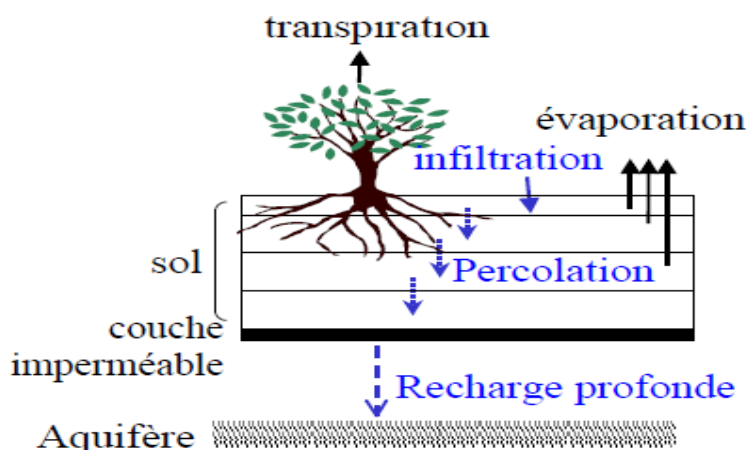


Figure 9 : Schématisation des cinq flux verticaux modélisés par SWAT (A.Chaponnière, 2005)

C'est dans la zone racinaire (réservoir sol ou profil de sol) que se produise la majorité des échanges verticaux. Elle est subdivisée en couches de sol pour inclure l'hétérogénéité entre les différents horizons. La zone vadose sert de transition entre le réservoir de sol et le système de nappes. Le système d'écoulement souterrain est constitué d'une nappe de surface (qui contribue aux apports à la rivière) et d'une nappe profonde (qui ne participe pas aux apports à la rivière). La représentation du système d'écoulement souterrain prend en compte une couche imperméable tout en permettant une recharge de la nappe de surface vers la nappe profonde. Une partie des précipitations est interceptée par le couvert végétal et une autre remplit les dépressions de surface. L'infiltration comble le déficit en eau de la zone racinaire. Lorsque ce déficit est comblé et que la précipitation perdure, un écoulement de surface se produit. Dans le réservoir sol, l'eau infiltrée s'écoule par gravité et amène une redistribution au sein de chacune des couches. Chaque couche du profil retient une quantité d'eau (capacité au champ). Suite à cette redistribution, l'excédent percole et recharge la nappe de surface. La présence de fissures modifie le parcours de l'eau en réduisant l'écoulement de surface. Les macropores permettent

⁶ Réserves en eau dans le sol.

un écoulement vertical dans la couche de sol superficielle et contribuent à une recharge rapide de la nappe de surface (E.Lévesque, 2007).

a. Drainage et percolation

Le sol est considéré comme un empilement de réservoirs dont les caractéristiques diffèrent s'il y a plusieurs horizons au sein du profil. Chaque couche est caractérisée par une profondeur (Sol Z), une conductivité hydraulique à saturation (Sol K), une réserve utile (égale à l'humidité à la capacité au champ SWC moins l'humidité au point de flétrissement Wpfp), une densité apparente (Sol bd) et une teneur en argile (CLAY).

Il y a drainage lorsque dans une couche, le contenu en eau du sol (SW) dépasse l'humidité à la capacité au champ et que la couche inférieure n'est pas saturée. Le flux percolé (Perc) est fonction du volume d'eau excédentaire (SW – SWC), de la conductivité hydraulique à saturation du sol (Sol K) ainsi que de la différence entre l'humidité à saturation (SWsat) et l'humidité à la capacité au champ (A.Chaponnière, 2005) :

$$Q_{perc} = (SW - SWC) * (1 - \exp(-\frac{\Delta t}{TT_{perc}})) \text{ et } TT_{perc} = \frac{(SW_{sat} - SWC)}{SolK}$$

Où Qperc, SW, SWC et SWsat sont en mm.j⁻¹, Sol K en mm.h⁻¹ et Δt : le pas de temps.

L'eau percolant au-delà du réservoir sol part dans la zone vadose avant de recharger la nappe de surface et la nappe profonde.

b. Infiltration et ruissellement de surface

La détermination du ruissellement de surface est directement liée au calcul de l'infiltration. La quantité d'eau infiltrée correspond à l'excès de la précipitation totale journalière moins la hauteur d'eau ruisselant en surface et les pertes initiales (interception et stockage temporaire en surface). L'infiltration est découpée en deux phases : une première pendant laquelle l'infiltration est égale au taux de précipitations suivie d'une seconde où, sous « l'effet piston » de la flaque formée en surface, l'infiltration s'effectue à un taux fonction de la conductivité à saturation, de la succion au front d'humectation, de la porosité du sol et de la quantité déjà infiltrée. Une évaluation simultanée est faite de la quantité d'eau écoulee par gravité vers la couche sous-jacente pour chaque couche de sol.

SWAT propose deux méthodes de calcul : la méthode d'infiltration de Green et Ampt (fondée sur la loi de Darcy et la conservation de la masse) et la méthode du Curve Number :

- La méthode de Green et Ampt s'applique lorsque les pluies sont disponibles à l'échelle infra journalière. Dans cette méthode, l'infiltration est déterminée puis l'excédent ruisselle en surface.

- La méthode empirique du Curve Number (CN) s'applique quand les cumuls journaliers sont disponibles. Elle consiste à évaluer l'écoulement de surface puis l'excès de la précipitation s'infiltré.

Une comparaison des deux méthodes, effectuée par King et al (1999), statue qu'il n'y a pas de net avantage à utiliser une méthode par rapport l'autre lors de simulations de débits annuels, mensuels et journaliers. L'intérêt de la méthode de Green-Ampt est de capter la dynamique de l'infiltration au pas de temps horaire. La méthode du CN permet quant à elle de capter les variations saisonnières (E.Lévesque, 2007). Ainsi, dans le cadre de notre problématique, la seconde méthode semble la plus adaptée :

$$\text{Si } R_j > I_j : \text{SurQ} = \frac{(R_j - I_j)^2}{R_j - I_j + S} = \frac{(R_j - 0.2S)^2}{R_j - 0.8} \text{ avec } I_j = 0.2 * S \text{ et } S = 25.4 * \frac{1000}{CN}$$

SurQ : ruissellement de surface (mm), R_j : précipitation du jour J (mm), I_j : perte initiale du jour J (mm), S : stockage de l'eau par le bassin versant (mm) dépendant du Curve Number. La valeur du CN dépend de la perméabilité du sol et des conditions d'humidité antécédentes. Des abaques permettent de connaître le CN (annexe A) : plus le CN est élevé, plus le ruissellement est important.

c. Evapotranspiration

L'évapotranspiration représente la demande évaporatoire de l'atmosphère. Elle s'exerce en cascade sur les différents réservoirs qu'elle met à contribution selon leur stock d'eau disponible et la facilité à l'extraire. Les précipitations interceptées par le couvert sont évaporées. Si ce stock ne suffit pas à satisfaire la demande climatique, une demande évaporatoire maximale (E₀') s'exerçant sur le sol et la végétation est calculée (E₀' = E₀ – eau interceptée par le couvert) : la végétation répond via un flux de transpiration et le sol via un flux d'évaporation (figure 10).

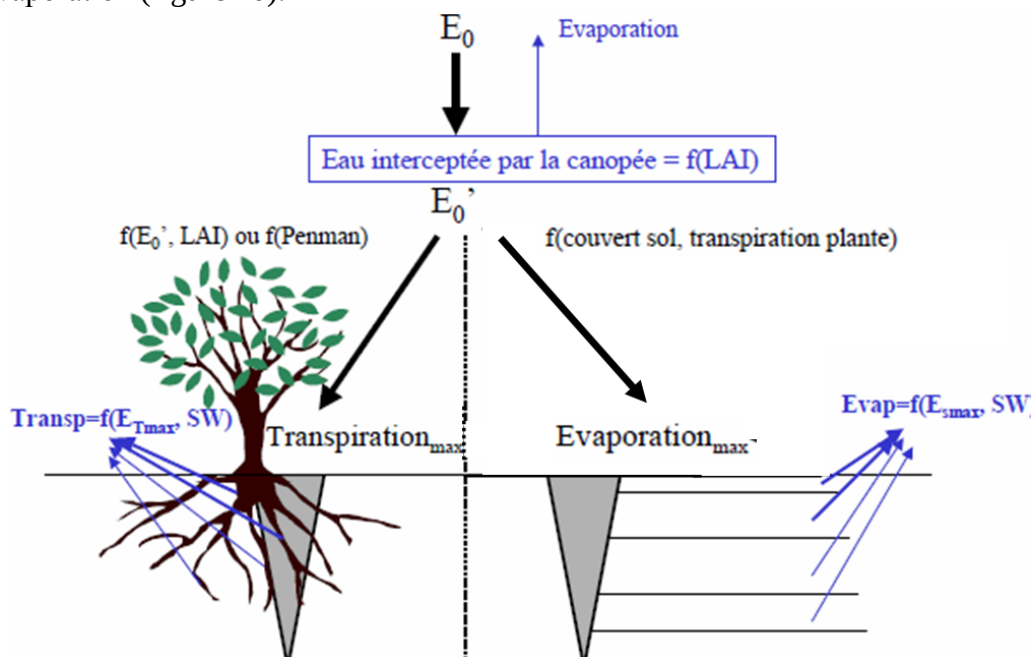


Figure 10: Schématisation des réservoirs sur lesquels s'exerce la demande évaporatoire de l'atmosphère (adapté de A.Chaponnière, 2005)

Evapotranspiration potentielle

La transpiration et l'évaporation du sol sont fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP, correspondant à E₀ dans SWAT). Le modèle propose trois façons d'estimer l'ETP : celle de Hargreaves, celle de Priestley-Taylor et celle de Penman-Monteith. Dans la littérature, le formalisme d'Hargreaves est appliqué pour l'obtention d'estimations moyennes mensuelles de l'ETP, une estimation journalière de l'ETP par cette formule n'est pas fiable. Le formalisme de Priestley-Taylor est conseillé en région humide car en région sèche il sous-estime l'ETP. La formule de Penman-Monteith reste la référence en matière d'estimation de l'ETP en Europe. Cette dernière est semblable à celle de Penman mais une résistance supplémentaire est ajoutée au transfert de la vapeur d'eau pour représenter la résistance du couvert (N.Brisson et al, 2002). C'est donc cette dernière que nous retiendrons :

$$EO = (1/\lambda) * \frac{\Delta * (H_{net} - G + \rho_{air} * Cp * ((e^o z - ez) / ra))}{\Delta + \gamma * ((1 + rc) / ra)} \text{ avec } rc = \frac{rl}{0.5 * LAI}$$

λ : chaleur latente de vaporisation (MJ.kg^{-1}), $E0$: ETP (mm.j^{-1}), $H0$: rayonnement incident ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), T_{mx} , T_{mn} et T_{av} : température maximale, minimale et moyenne du jour ($^{\circ}\text{C}$), α_{pet} : coefficient, Δ : pente de la courbe température-pression de vapeur saturante ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : constante psychrométrique ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), H_{net} : rayonnement net ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), G : flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), ρ_{air} : densité de l'air (kg.m^{-3}), c_p : chaleur spécifique à pression constante ($\text{MJ.kg}^{-1}.\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}$), e^0_z : pression de vapeur saturante de l'air à la hauteur z (kPa), e_z : pression de vapeur d'eau de l'air à la hauteur z (kPa), r_c : résistance de la canopée⁷ (s.m^{-1}), r_a : résistance aérodynamique (s.m^{-1}), r_l : résistance minimale foliaire (s.m^{-1}) et LAI : Indice de surface foliaire.

Transpiration

Le calcul de la transpiration maximale (et) dépend du formalisme adopté pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Dans notre cas, le formalisme de Penman-Monteith a été sélectionné, la formule utilisée pour le calcul de la transpiration maximale est la même que celle employée pour les formalismes d'Hargreaves ou Priestley-Taylor ; cependant, elle considère le couvert véritablement en place et non le couvert référence. Ceci signifie que la résistance minimale foliaire est spécifiée selon le couvert en place et l'indice de surface foliaire (LAI) est calculé via le module de végétation. Ce dernier suppose que le taux de croissance du couvert soit directement lié à l'augmentation de température. Ceci présume qu'il existe pour chaque couvert une température en dessous de laquelle il ne croît pas et un nombre d'unités de chaleur précis pour qu'il atteigne sa maturité. L'interception de l'énergie est estimée comme une fonction du rayonnement et de l'indice de surface foliaire du couvert. La croissance potentielle en biomasse journalière est estimée par le produit de l'énergie interceptée et du paramètre de couvert « RUE » pour convertir l'énergie en biomasse.

Ainsi, la transpiration maximale (et) est obtenue par cette formule (A.Chaponnière, 2005) :

$$\text{Si } 0 \leq \text{LAI} \leq 3 : et = \frac{E'O * \text{LAI}}{3} \text{ alors que si } \text{LAI} > 3.0 : et = E'O$$

La transpiration réelle (ET) est supposée égale à la quantité d'eau prélevée par les racines. Le calcul du prélèvement d'eau est similaire au calcul de l'évaporation du sol : le prélèvement d'eau est fonction de la demande qui s'exerce sur le couvert et décroît avec la profondeur. Par ailleurs, plus le sol est sec moins l'eau est extractible donc les prélèvements sont réduits si la teneur en eau du sol est inférieure à un quart de sa capacité au champ (A.Chaponnière, 2005).

Stress hydrique

Le facteur de stress hydrique est obtenu en comparant les transpirations réelle (ET) et potentielle (ETP), grâce au rapport suivant (A.Chaponnière, 2005) :

$$\text{Stress} = 1 - \frac{ET}{ETP}$$

Ce stress est compris entre 0 et 1. Plus le couvert est stressé, plus le facteur de stress est élevé, ce qui signifie que la demande en eau de la plante est supérieure à l'offre. Cet indice de stress est pris en compte dans la simulation de la croissance des végétaux : plus ce dernier est élevé plus la croissance des plantes est ralentie.

Evaporation du sol

L'évaporation maximale par jour (ES) est fonction de la demande évaporatoire maximale ($E0'$) et de l'indice de couverture de sol, lui-même fonction de la biomasse épigée (Biom).

⁷ Dans la formule de Penman-Monteith, la résistance de la canopée prise en compte pour le calcul de l'ETP est celle d'une luzerne dont le LAI est de 4.1 et la résistance minimale foliaire de 100 s.m^{-1} .

Cette quantité maximale est réactualisée en fonction du flux de transpiration de la végétation : plus la végétation transpire, moins la réponse du sol à la demande est forte (A.Chaponnière, 2005). La demande évaporatoire sur une couche de sol est fonction de la profondeur à laquelle celle-ci se situe et du facteur de distribution (esco). Par couche de sol, la demande est réduite si la teneur en eau (SW) est inférieure à la capacité au champ. Par ailleurs, quelle que soit l'humidité, la quantité maximale d'eau prélevée pour satisfaire la demande est limitée à 80% de la quantité d'eau disponible (teneur en eau du sol - teneur en eau au point de flétrissement).

d. Synthèse

La modélisation du bilan hydrique effectuée par SWAT peut être établie au pas de temps journalier, mensuel ou annuel, et à l'échelle d'une parcelle, d'un sous bassin ou du bassin versant. Comme pour STICS, la modélisation du bilan hydrique semble complète et adaptée à notre problématique malgré le fait que les remontées capillaires et le drainage soient des paramètres non modélisés précisément.

II. Les entrées et sorties des modèles

Les données d'entrée et de sortie, ainsi que les unités de ces dernières varient d'un modèle à l'autre (tableau 1).

	STICS	SWAT
Entrée		
Données	Climatologie, pédologie, caractéristiques des végétaux et techniques culturales ⁸	Climatologie, pédologie, caractéristiques des végétaux, techniques culturales ⁹ , morphologie(MNT), occupation du sol (annexe B) et qualité de l'eau
Sortie		
Données	Agricoles (rendement, indice foliaire, matière sèche, consommation d'intrants) et environnementales (quantité d'azote et d'eau)	Agricoles (croissance des cultures, consommation d'intrants), environnementales (transferts d'eau dans le bief principal, sédimentation, nutriments)
Pas de temps	Journalier (en jours Juliens)	Journalier (en jours Juliens), mensuel (mm/jj), annuel (aaaa)
Format des fichiers	Fichiers textes	Fichiers textes et cartographiques

Tableau 1: Comparaison des données d'entrée et de sortie des deux modèles (N.Brisson et al, 2002 ; M.Winchell et al, 2010 ; J.G.Arnold et al, 2011)

1. Données d'entrée

Dans ces modèles, la caractérisation de la pédologie intervient à différents niveaux. En effet, les propriétés générales des sols influencent le bilan hydrique et la croissance des plantes. J'ai ainsi sélectionné dans ces deux modèles les paramètres les plus pertinents vis à vis de la problématique afin de les comparer. Le tableau 2 présente l'ensemble des propriétés

⁸ Fertilisation, pesticide et labour.

⁹ Fertilisation, pesticide et labour.

pédologiques et physico-chimiques à définir pour l'élaboration du bilan hydrique, pour chaque couche de sol. L'annexe C présente comment renseigner certaines valeurs relatives aux paramètres d'entrée pour chaque modèle. A ces données d'entrée s'ajoutent celles concernant les variables d'initialisation et d'autres paramètres généraux communs à toutes les simulations (annexe D). Elles peuvent être considérées dans l'analyse de sensibilité car elles sont susceptibles d'influencer le cycle hydrologique (processus terrestres) et le cheminement de l'eau dans le bassin (processus fluviaux).

Modèle	STICS		SWAT	
Définition	Nom	Unité	Nom	Unité
CLIMAT				
Composante climatique de A	aclim	mm		
Humidité relative			HMD	mm.j ⁻¹
Pluie moyenne	P	mm.j ⁻¹	PCP	mm.j ⁻¹
ETP	ETP	mm.j ⁻¹	EO	mm.j ⁻¹
Rayonnement moyen	R	MJ.m ⁻² .j ⁻¹	SLR	MJ.m ⁻² .j ⁻¹
Température maximale, minimale, moyenne	T	°C	T	°C
Vent moyen		m.s ⁻¹	WND	m.s ⁻¹
SOL				
Epaisseur des horizons	epc	cm	SOL_Z	mm
Densité apparente (annexe C)	DAF	g.cm ⁻³	SOL_BD	g.cm ⁻³ / mg.m ⁻³
pH	pH	-	pH	-
Teneur en argile	argi	%	CLAY	%
Teneur en limon			SILT	%
Teneur en sable			SAND	%
Texture du sol			TEXTURE	-
Teneur en fragments grossiers (> 2 mm)	cailloux	%	ROCK	%
Teneur en calcaire	calc	%		
Teneur en carbone organique			SOL_CBN	%
Teneur en azote organique	Norg	%		
Sols argileux gonflants	codefente	oui/non		
Disponibilité en eau de l'horizon	h2oreserve	mm eau/mm sol	SOL_AWC	mm eau/mm sol
Humidité à la capacité au champ (annexe C)	HCCF	g eau.g sol ⁻¹	FFCB ¹⁰	-
Humidité au point de flétrissement (annexe C)	HMINF	g eau.g sol ⁻¹		
Conductivité hydraulique à saturation	Ksol	cm.j ⁻¹	SOL_k	mm.h ⁻¹
Infiltrabilité de chaque horizon (annexe C)	infil	mm.j ⁻¹	HYDGRP ¹¹	A, B, C, D
Albedo du sol (Stics : sec, Swat : humide, annexe C)	albedo	-	SOL_ALB	-
Volume de sol craquelé / volume de sol			SOL_CRK	-
Fraction de la porosité où sont exclus les anions			Anion_excl ¹²	-
Facteur d'érosion du sol			USLE_K	-
Rugosité du sol nu	z0solnu	m		
Fraction de la pluie ruisselée sur sol nu ¹³	ruisolnu	entre 0 et 1		
Conductivité électrique du sol			SOL_EC	dS.m ⁻¹

¹⁰ Exprimée sous la forme d'une fraction : disponibilité initiale du sol en eau / humidité à la capacité au champ.

¹¹ Groupes : A (fort taux d'infiltration), B (infiltration modérée), C (infiltration lente), D (infiltration très lente).

¹² Si aucune valeur n'est fournie par l'utilisateur, la valeur par défaut est Anion_excl = 0,5.

¹³ Par rapport à la pluie totale.

Modèle	STICS		SWAT	
Définition	Nom	Unité	Nom	Unité
Coefficient de l'écoulement souterrain « revap »			GW_REVAP	-
Temps de drainage ¹⁴			GW_DELAY	j
Profondeur d'eau de la nappe de surface pour que « revap » soit possible			REVAPMN	-
Profondeur maximale du sol affectée par l'évaporation	zesx	cm		
PLANTE				
Coefficient cultural maximal de la culture	Kmax	-		
Indice de surface foliaire ¹⁵ (stics : initial, Swat : maximal)	Lai0	-	BLAI	-
Résistance foliaire minimale	rsmin	s.m ⁻¹	rl	s.m ⁻¹
Ratio de conversion de l'énergie en biomasse			RUE	(kg/ha)/(Mj/m ²)
Profondeur atteinte par le système racinaire	zrac	cm	SOL_ZMX	mm
Facteur de compensation pour l'évaporation du sol			ESCO ¹⁶	-
Facteur de compensation pour la prise d'eau par la plante			EPCO ¹⁷	-
Proportion de sol couvert par le paillage	couvermulch	-		

Tableau 2 : Comparaison des paramètres d'entrée et de leur unité pour chaque modèle
(N.Brisson et al, 2002 ; M.Winchell et al, 2010 ; J.G.Arnold et al, 2011)

Dans STICS, les fichiers climatiques sont journaliers ou décadaires (une reconstitution des grandeurs journalières est effectuée en affectant à chaque jour de la décade la même valeur). Dans SWAT, les données climatiques sont journalières mais si certains paramètres manquent, SWAT effectue une simulation de ceux-ci à partir des données mensuelles.

2. Données de sortie

Dans ces deux modèles, des fichiers de sortie sont générés à chaque simulation, pour chaque pas de temps. STICS produit plusieurs fichiers textes à l'échelle d'une parcelle :

- Deux fichiers de bilan de simulation : un donnant les informations de base sur toute la période de simulation (annexe E) et un synthétisant toutes les simulations réalisées,
- Deux fichiers dynamiques donnant l'évolution chronologique des variables,
- Un fichier informant sur une des variables sol par centimètre de sol à des dates choisies,
- Un fichier historique renseignant sur la valeur des paramètres actifs lors de la simulation.

SWAT fournit des représentations cartographiques et trois dossiers textes :

- Un contenant les bases de données relatives au projet,
- Un donnant des fichiers relatifs au bassin versant,
- Un contenant les données de sortie détaillées au niveau du bassin (annexe E), du sous bassin et des HRU.

Les représentations cartographiques de SWAT sont limitées : elles sont indisponibles à l'échelle des HRU.

Les données de sortie varient suivant les modèles. Le tableau 3 présente les paramètres de sortie relatifs au bilan hydrique acquis pour chaque modèle, et l'annexe E présente le fichier de bilan de simulation obtenu par ces derniers.

¹⁴ De la formation géologique sous-jacente.

¹⁵ Si l'utilisateur ne dispose d'aucune mesure de LAI pour chaque pas de temps, STICS calcule une courbe de LAI grâce à une équation d'ajustement non linéaire avec la procédure de HAUS et des paramètres imposés.

¹⁶ Si aucune valeur n'est fournie par l'utilisateur, la valeur par défaut est ESCO = 0,95.

¹⁷ Si aucune valeur n'est fournie par l'utilisateur, la valeur par défaut est EPCO = 1.

Modèle	STICS		SWAT	
Définition	Nom	Unité	Nom	Unité
CLIMAT				
Rayonnement net (et incident dans SWAT)	rnet	MJ.m ² .j ⁻¹	Hnet (H0)	MJ.m ² .j ⁻¹
Pression de la vapeur de l'air	tpm	mbars	e	kPa
PLANTE				
Biomasse végétale	masecveg	t.ha ⁻¹	BIOM	kg.ha ⁻¹
Résistance du couvert	rcp	s.m ⁻¹	rc	s.m ⁻¹
Résistance aérodynamique	ra	s.m ⁻¹	ra	s.m ⁻¹
Evaporation maximale par le sol et la plante	eo	mm.j ⁻¹		
Evaporation maximale par la plante	eop	mm.j ⁻¹		
Evaporation maximale par le sol	eos	mm.j ⁻¹		
Evaporation réelle journalière (des réservoirs d'eau pour swat)	esol	mm.j ⁻¹	evaporation	mm.j ⁻¹
Transpiration réelle journalière	ep	mm.j ⁻¹		
Evapotranspiration journalière	et	mm.j ⁻¹	ET	mm.j ⁻¹
Evapotranspiration maximale (= ep + es)	etm	mm.j ⁻¹		
Evapotranspiration potentielle	etpp(n)	mm.j ⁻¹	PET	mm.j ⁻¹
Indice de stress hydrique stomatique	swfac	0 à 1		
Indice de stress hydrique de turgescence	turfac	0 à 1		
Nombre de jour de stress hydrique			W_STRS	j
Seuil de teneur en eau du sol limitant la transpiration	tetstomate	%volum		
SOL ET EAU				
Réserve en eau (dans la zone racinaire pour STICS)	resrac	mm	SW	mm.j ⁻¹
Réserve en eau maximale utilisée	rmaxi	mm		
Fraction de la réserve utile sur l'ensemble du profil (R/RU)	RsurRU	0 à 1		
Quantité d'eau à la capacité au champ			SWC	mm.j ⁻¹
Quantité d'eau présente dans la macroporosité du sol	saturation	mm		
CN ¹⁸ (détermine la teneur en humidité)			CN	-
Quantité d'eau de la nappe de surface retournant dans la zone racinaire			revap	mm.j ⁻¹
Quantité d'eau drainée sous la base du profil de sol	drap	mm.j ⁻¹	Qperc	mm.j ⁻¹
Hauteur de la nappe	Hnappe	cm		
Profondeur de la nappe	profnappe	cm		
Ecoulement latéral			LATQ	mm.j ⁻¹
Ecoulement de l'aquifère dans le cours d'eau principal			GWQ	mm.j ⁻¹
Quantité d'eau rechargeant les aquifères			totalAQrecharge	mm.j ⁻¹
Ruissellement de surface	ruisselsurf	mm	SURQ	mm.j ⁻¹
TRANSFERTS DANS LE BASSIN VERSANT				
Apport en eau par HRU dans le bassin versant			Water Yield	mm.j ⁻¹
Apport en sédiments par HRU dans le bassin versant			SED yield	t.ha ⁻¹
Apport en nutriments par HRU dans le bassin versant			NO ₃ , N, P	kg nutri.ha ⁻¹

Tableau 3 : Comparaison des paramètres de sortie et de leur unité pour chaque modèle
(N.Brisson et al, 2002 ; M.Winchell et al, 2010 ; J.G.Arnold et al, 2011)

¹⁸ Le Curve Number est fonction de la végétation, du sol et des conditions d'humidité antérieures. Des abaques permettent de le déterminer (annexe A).

PARTIE 4 : Discussion

I. Intérêts et limites des modèles

1. Limites

STICS et SWAT sont des modèles analogiques (partie 2, chapitre I.1). Ces derniers ont le défaut de ne pas modéliser précisément les remontées capillaires contrairement aux modèles mécanistes. En effet, les remontées capillaires sont simplifiées par l'utilisation d'un temps de drainage de la formation géologique sus-jacente à la nappe libre. En réponse à un déficit en eau de la zone racinaire, de l'eau est puisée à même la nappe de surface mais la nappe profonde ne participe pas comme tel au bilan en eau à l'intérieur du bassin versant. Ceci est lié au fait que les modèles analogiques requièrent moins de variables d'entrée que les modèles mécanistes. Ils ont donc un domaine de validité moins étendu (*A.Pindard, 2000*).

Les domaines de validité des modèles sont parfois contestés et ne permettent pas certaines combinaisons de milieux et de techniques. Par exemple, STICS ne simule pas la dynamique du phosphore et du potassium dans le système sol-plante car toute diminution des rendements liée à des carences de la plante (en ces éléments) ainsi que les techniques visant à les rectifier sont hors du domaine de validité. De plus, certains phénomènes ne sont pas considérés par les modèles. Par exemple, STICS ne tient pas compte de la résistance à la sécheresse, du sol asphyxiant, ainsi que de la combinaison du stress hydrique avec le stress azoté.

Ensuite, dans majorité des modèles, le nombre de variables de sortie est limité alors que le nombre de variables intermédiaires est important. Cependant, ces dernières ne peuvent pas être considérées comme des variables de sortie car la simplicité des formalismes ne permet pas d'évaluer les variables intermédiaires de la même façon que les variables de sortie. Le risque de confusion apparaît du fait que ces variables intermédiaires sont mesurables (par exemple, l'indice foliaire est une valeur intermédiaire, elle peut être surestimée, mais cela a peu de conséquence sur les variables de sortie qui lui sont liées, à savoir la production de biomasse et l'eau transpirée). Ainsi, les variables intermédiaires diagnostiquent seulement le fonctionnement du modèle (*N.Brisson et al, 2002*).

De plus, dans ces deux modèles, l'ETP est complexe à traiter du fait qu'il s'agit d'une donnée calculée avec différentes formules (dans STICS : formalisme de Penman ou Priestley-Taylor ou approche résistive ; dans SWAT : formalisme de Penman-Monteith ou Priestley-Taylor ou Hargreaves). De plus, dans STICS, la valeur du coefficient cultural maximal (K_{max}) est établie par défaut à partir de l'ETP de Penman, donc si une autre formule est utilisée, il convient de vérifier si les valeurs proposées sont correctes.

Ainsi, la méthode de Penman (ou Penman-Monteith) sera utilisée pour simuler l'ETP en Bourgogne car elle reste la référence en matière d'estimation de l'ETP en Europe et la plus adaptée à notre situation (partie 3, chapitre I.1.e et chapitre I.2.c). De plus, la référence classique donnée par Météo-France est l'ETP Penman décadaire ou journalière (ETP Penman-Monteith) légèrement différente.

2. Intérêts

Malgré les limites présentées par les modèles ainsi que les controverses émises concernant leur domaine de validité, l'utilisation d'un outil de modélisation pour répondre cette

problématique me semble plus avantageuse que l'emploi d'un logiciel de calcul tel qu'Excel. En effet, dans le cadre de mes recherches bibliographiques, j'ai trouvé plusieurs thèses approuvant l'usage de ces modèles lors de la simulation du bilan hydrique en France (à l'image d'*A.Pindard, 2000* pour STICS et de *J.Renaud, 2004* pour SWAT). Ils sont capables de simuler des conditions pédoclimatiques variées sans générer de biais importants. Ces modèles fournissent, en plus du bilan hydrique à l'échelle d'une parcelle ou d'un bassin versant, des données concernant des variables agricoles et environnementales. Cela apporte une vision globale de l'évolution des processus et de leurs interactions sur le territoire analysé. Ils facilitent donc la compréhension de ces phénomènes complexes. De plus, dans le cas de SWAT, l'utilisation conjointe du modèle avec le SIG permet la prise en compte de la variabilité spatiale au sein de la modélisation, et renseigne facilement sur les caractéristiques des variables.

Il est également important de souligner que les modèles analogiques (par rapport aux modèles mécanistes) sont faciles à mettre en œuvre et nécessitent moins de variables d'entrée (*A.Pindard, 2000*). De plus, la saisie informatique des données d'entrée est souvent facilitée : dans ces deux modèles : des fiches techniques¹⁹ sur les plantes les plus communes sont fournies. Elles évitent donc à l'utilisateur de saisir toutes ces informations.

Ainsi, la modélisation présente des risques car les modèles sont des simplifications de la réalité et leurs données de sortie possèdent une marge d'erreur. Ils ne peuvent en aucun cas être considérés comme des « simulateurs de réalité ». Cependant, ils sont des supports fiables et pertinents d'interprétation des phénomènes naturels complexes.

II. Quel modèle utiliser ?

L'objectif de ce travail est de trouver lequel de STICS ou SWAT est le plus cohérent pour appréhender l'impact du climat futur sur une dizaine de bassins versants bourguignons. La simulation modélisera les écoulements dans la zone non saturée, à l'échelle de la parcelle et du bassin versant. L'analyse des résultats issus de la comparaison de ces deux modèles (partie 3) me permet aujourd'hui de dire que STICS est le plus pertinent pour modéliser le bilan hydrique à l'échelle d'une parcelle alors que SWAT est le plus adapté à l'échelle d'un bassin versant.

A l'échelle d'une parcelle, SWAT est limité. En effet, il peut modéliser les processus au niveau du bassin, du sous bassin et d'une parcelle. Cependant, les données de sortie obtenues à l'échelle d'une Unités de Réponse Hydrologiques (HRU) sont réduites. Certaines données d'entrée fournies au niveau d'une HRU ne sont pas disponibles de façon usuelle et les valeurs utilisées pour les simulations sont celles renseignées à l'échelle du sous bassin. C'est le cas de la quantification de l'écoulement hypodermique. Elle fait intervenir deux paramètres géomorphologiques (la pente d'écoulement et la longueur moyenne d'écoulement des affluents). Les informations géomorphologiques utilisées lors de cette évaluation sont celles fournies pour le sous bassin et non pour la HRU. Ainsi, l'hypothèse faite sur ces deux paramètres ne permet pas de capter l'hétérogénéité de la topographie des HRU. C'est pourtant la disposition de ces paramètres qui influence les simulations de l'écoulement hypodermique (*E.Lévesque, 2007*). Ainsi, la quantification de l'écoulement sub-surface à l'échelle d'une HRU peut être erronée.

¹⁹ Elles renseignent sur la croissance des plantes (en conditions idéales) et informent sur l'impact et les conséquences du stress hydrique et azoté sur ces dernières.

A cela s'ajoute le fait, qu'il est difficile dans certains cas de travailler au niveau de la HRU car la mise en graphique des phénomènes hydrologiques à cette échelle est très restreinte. Par exemple, pour 44 HRU et sur une période de 5 ans, le modèle sort environ 80 000 valeurs. Or Excel, qui est le logiciel le plus commun pour traiter ce genre de tâche, n'admet que 65 000 valeurs : il est donc impossible de représenter graphiquement les différents phénomènes affectant ces HRU (*J.Renaud, 2004*).

De plus, les données cartographiques à l'échelle des HRU sont incomplètes car les données de sortie ainsi que les différents phénomènes modélisés n'y sont pas représentés.

A l'échelle d'un bassin versant, STICS est moins compétent que SWAT car il a été conçu pour reproduire les phénomènes affectant une parcelle. Il ne permet pas de modéliser de façon complète les processus de transferts survenant sur un bassin versant. SWAT quant à lui, peut simuler ces derniers car il imbrique les trois échelles spatiales. En effet, l'unité sur laquelle tous les flux sont calculés est l'HRU. Les HRU situées dans un même sous bassin versant alimentent la rivière du sous bassin via les différents flux latéraux qu'elles génèrent. Les différents sous-bassins sont reliés par le réseau hydrographique. Ainsi, la simulation du bilan hydrique faite par SWAT est adaptée à l'échelle du bassin versant (partie 2, chapitre II.b).

Cependant, SWAT a été élaboré pour des bassins de grandes tailles allant de la dizaine de km² à plusieurs milliers de km². De ce fait, il faut être vigilant concernant les données de sortie obtenues pour des bassins de petites tailles. En effet, sur ces derniers, les processus basés sur des équations empiriques peuvent être mal modélisés ; comme l'infiltration et le ruissellement de surface calculés par la méthode du CN ou l'évapotranspiration obtenue par la formulation de Penman-Monteith.

Ces deux modèles semblent tous deux adaptés à la problématique. Seule l'échelle spatiale désirée pour la modélisation est déterminante dans le choix du modèle.

III. Prochaine étape : analyse de faisabilité

Cette première phase de recherche et de comparaison m'a permis de comprendre comment est modélisé le bilan hydrique dans ces deux modèles et quels sont les paramètres influents. Ce travail préparatoire doit être complété d'une phase expérimentale. Ainsi, une analyse de faisabilité sera effectuée durant la deuxième partie de mon stage. Elle portera sur l'étude des performances hydrologiques de STICS et SWAT, à partir de données de terrain. En effet, durant le mois de juillet 2013, je modéliserai, à partir de STICS et SWAT, le bilan hydrique d'une parcelle de l'unité expérimentale du domaine d'Epoisses de l'INRA (située à Bretenière, au sud-est de Dijon). Le bilan hydrique d'une culture de colza ou d'orge (à un stade de développement intermédiaire) sera simulé sur toute la durée d'une rotation. La modélisation se basera sur les données :

- Climatiques reconstituées des 20 dernières années, à l'échelle de la Bourgogne.
- Pédologiques des sols d'Epoisses, dont les teneurs approximatives en argile, sable et limon sont respectivement 40%, 10%, 50% ; et dont les teneurs en eau de la RU et de la RFU sont voisines à 200mm et 100mm. Ces données pédologiques seront à préciser à partir de données de terrain.

Cette seconde phase est nécessaire pour vérifier les performances hydrologiques de STICS et SWAT, et ainsi, valider leur utilisation à l'échelle de la Bourgogne.

CONCLUSION

En vue de déterminer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, le projet HYCCARE a été élaboré. Il prévoit la modélisation des écoulements d'une dizaine de bassins versants bourguignons. Ce stage constitue un travail préparatoire à cette simulation. L'objectif était de déterminer lequel de STICS ou SWAT est le modèle le plus pertinent pour modéliser l'évolution du bilan hydrique sous couvert végétal, en Bourgogne.

Des recherches bibliographiques approfondies m'ont permis de mettre en forme l'équation du bilan hydrique et d'analyser ses paramètres. Ainsi, le ruissellement, le taux de remplissage de la réserve utile, les transferts d'eau dans le sol et les besoins en eau des végétaux ont été détaillés et expliqués (partie 1, chapitre III.2). Ensuite, l'analyse de la mise en équation de ces processus, dans STICS et SWAT, ainsi que la comparaison de leurs paramètres d'entrée et de sortie m'ont permis de répondre à la problématique.

Ainsi, l'utilisation d'un modèle dans le cadre de ce travail me semble plus judicieuse que l'emploi d'un logiciel de calcul tel qu'Excel. En effet, ils fournissent des données de sortie relatives aux variables agricoles et environnementales pour des conditions pédoclimatiques variées. Ils apportent donc une vision globale des processus se déroulant sur un territoire donné ; et facilitent ainsi la compréhension de ces phénomènes complexes.

Lors de la comparaison des modèles, j'ai constaté que le calcul du bilan hydrique effectué par STICS est très similaire à celui réalisé par SWAT (partie 3). En effet, les paramètres pris en compte et les formalismes utilisés pour les modéliser sont semblables pour toutes les variables, hormis pour le ruissellement de surface. De plus, les données d'entrée et de sortie ainsi que leur unité sont globalement analogues.

Suite aux résultats obtenus, le seul élément qui m'a permis de trancher sur la pertinence d'utiliser un modèle par rapport à l'autre est l'échelle de simulation. En effet, STICS est beaucoup plus adapté pour modéliser le bilan hydrique à l'échelle d'une parcelle alors que SWAT est plus cohérent au niveau d'un bassin versant. Etant donné que les simulations prévues dans le projet HYCCARE seront faites pour ces deux échelles, je n'ai pu opter pour l'un ou l'autre.

Une phase expérimentale est aujourd'hui nécessaire pour confirmer cette première phase d'analyse et vérifier les performances hydrologiques de ces deux modèles. Ainsi, la deuxième partie de mon stage portera sur l'étude de faisabilité de STICS et SWAT, à simuler le bilan hydrique en Bourgogne, à partir de données de terrain.

Ensuite, la modélisation des dix bassins versants, prévue en 2014 par le projet HYCCARE, permettra d'approfondir les connaissances relatives à l'impact du changement climatique en Bourgogne. Ces données serviront de bases à des études prospectives sur l'adaptation des activités agricoles, sylvicoles et viticoles.

BIBLIOGRAPHIE

- Affholder F., 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Avignon. 218p.
- Agroécologie Dijon, unité de recherche UMR. Agroécologie-Acceuil [En ligne]. Disponible sur « www6.dijon.inra.fr/umragroecologie ». Consultée le 7 mai 2013.
- AgroSup Dijon. AgroSup Dijon, Institut national Supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement [En ligne]. Disponible sur « www.agrosupdijon.fr ». Consultée le 7 mai 2013.
- Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivaran R., Williams J.R., Haney E.B., Neitsch S.L., 2011. Soil and Water Assessment Tool, input/output file documentation, version 2009. 643p.
- Beauchamp J., L'eau et le sol [En ligne]. Disponible sur : « www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm ». Consultée le 22 avril 2013.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae, 297p.
- Brisson N. et al, 2002. STIC, Notice concepts et formalismes, version 5.0. Copyright INRA. 85p.
- Brisson N. et al, 2002. STIC, version 5.0, Notice entrées-sorties. Copyright INRA. 40p.
- Chaponnière A., 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 233p.
- Duchaufour P., 2000. Introduction à la science du sol. 331p.
- GICC, 2012. HYCCARE Bourgogne ; Réponse à l'Appel à Projet de Recherche. 23p.
- Lane L.J., 1983. Chapitre 19 : Transmission Losses. Dans Soil Conservation Service. National engineering handbook, partie 4: hydrology. U.S. Government SPrinting Office, Washington. P : 19-1-19-21.
- Lévesque, E. 2007. Evaluation de la performance hydrologique du modèle SWAT pour de petits bassins versants agricoles du Québec. Maîtrise en génie civil. Faculté des études supérieures de l'Université Laval. 166p.
- Musy A., Soutter M., 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes, 335p.
- Pindard A., 2000. La relation stress hydrique – rendement du maïs en Bresse : quelle perspective de spatialisation ? Utilisation d'un simulateur de culture (STICS). Mémoire d'Ingénieur d'Agronomie. Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon. 60p.

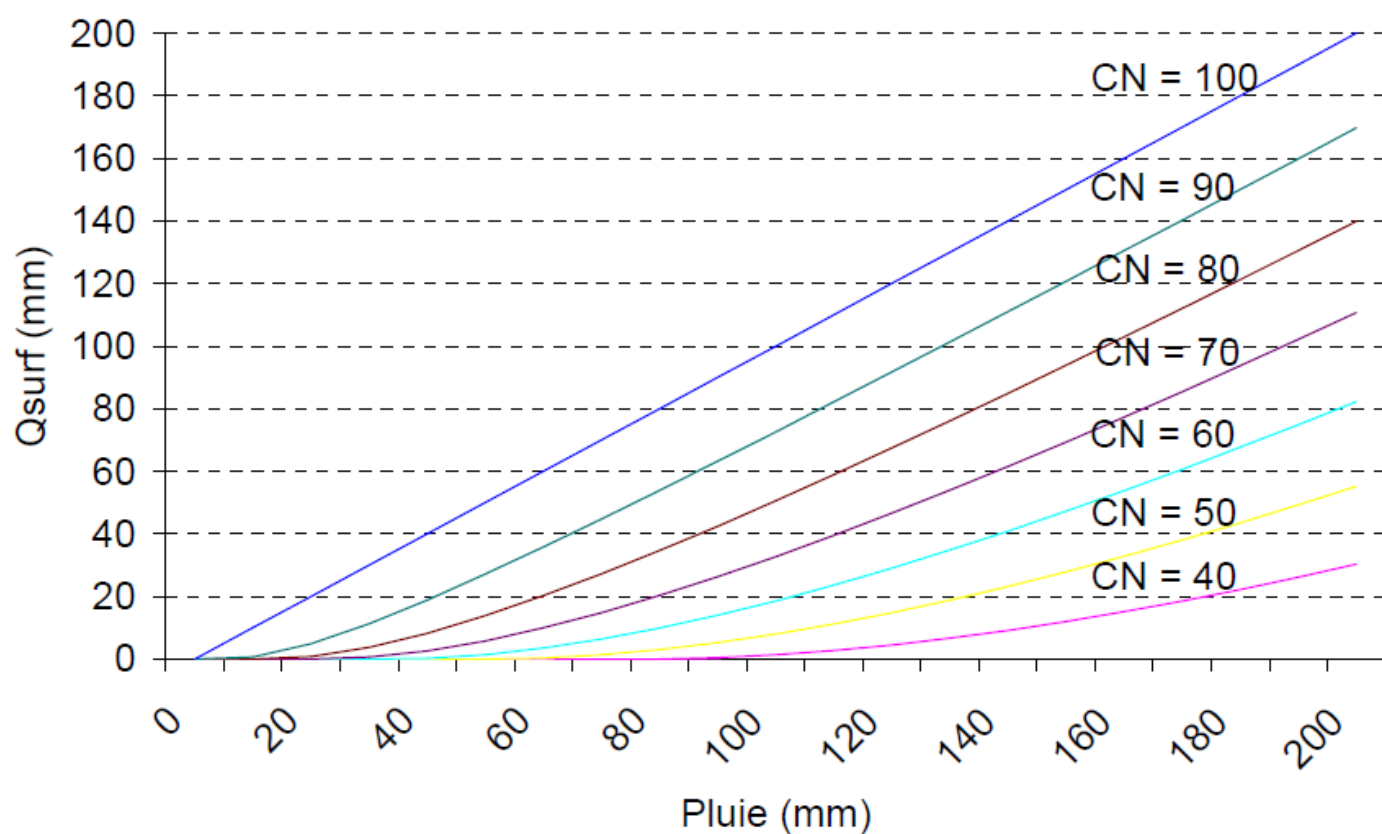
- Renaud J., 2004. Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de phosphore. Rapport de Master SIG. Université Jean Monnet Saint-Etienne. 75p.
- Tournebize J., Kao C., Nikolic N., Zimmer D., 2004. Adaptation of the STICS model to subsurface drained soils. *Agronomie* 24, 305-313.
- Université de Montpellier. Evaporation et interception [En ligne]. Disponible sur : « www.mon.univ-montp2.fr ». Consultée le 29 avril 2013.
- Weill S., 2004. Modélisation hydrodynamique du cycle de l'eau de pluie sur un sol incliné. Rapport de DEA HHGG. Paris VI. 52p.
- Winchell M., Srinivaran R., Di Luzio M., Arnold J., 2010. ArcSWAT interface for SWAT 2009, user's guide. 490p.

ANNEXES

Annexe A : Abaques permettant de trouver la valeur du CN	34
Annexe B : Classes d'occupation du territoire et correspondance dans SWAT.....	35
Annexe C : Aide pour renseigner les dates en jours juliens et les paramètres du sol	36
Annexe D : Paramètres d'entrée de STICS et SWAT	37
Annexe E : Exemples de fichiers de sortie de STICS et SWAT.....	54

Annexe A :
Abaques permettant de trouver la valeur du CN

Représentation de la relation entre la pluie, le ruissellement de surface et la valeur du CN (A.Chaponnière, 2005)



Annexe B :
Classes d'occupation du territoire et correspondance dans SWAT
(M.Winchell *et al*, 2010)

Définition	Code	Signification SWAT
Tissu urbain continu	URHD	Residential-High Density
Tissu urbain discontinu	URMD	Residential-Medium Density
Habitat rural	URLD	Residential-Low Density
Zones industrielles, commerciales et socio collectives	UIDU	Industrial
Réseaux routiers et ferroviaires	UTRN	Transportation
Aéroports	UTRN	Transportation
Extraction de matériaux	UIDU	Industrial
Chantiers et espaces en construction	UIDU	Industrial
Espaces verts urbains	FESC	Tall Fescue
Equipements loisir et sportifs	UCOM	Resort/Recreation
Cultures pluviales	AGRL	Agricultural Land-Generic
Rizières	RICE	Rice
Vergers	ORCD	Orchard
Systèmes cultureux parcellaires complexes	AGRL	Agricultural Land-Generic
Territoires principalement occupés par l'agriculture	AGRL	Agricultural Land-Generic
Territoire agroforestier	FRST	Forest-Mixed
Forêt galerie	FRSD	Forest-Deciduous
Plantation forestière	FRSD	Forest-Deciduous
Sols nus	SWRN	South Western Range + Bare rocks
Prairies marécageuses	WETL	Wetlands-Mixed
Cours et voies d'eau temporaires	WATR	Water
Savane herbeuse	RNGE	Range-Grasses
Savane arbustive	RNGB	Range-Brush
Savane arborée	RNGB	Range-Brush
Plan d'eau artificiel	WATR	Water

Annexe C :

Aide pour renseigner les dates en jours juliens et les paramètres du sol

Tableau de conversion des dates calendaires en jours juliens pour les deux modèles (*N.Brisson et al, 2002*)

jour	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

en italique : +1 en année bissextile

Pour STICS : Paramètres sol, albédo et valeur de q0

Ordre de grandeur des caractéristiques hydriques des sols et de leur densité apparente selon leur texture (*N.Brisson et al, 2002*)

Texture	abbrev.	hcc	hmin	da
Limon moyen sableux	LmS	20.0	8.9	1.46
Limon léger sableux	LlS	13.0	7.0	1.50
Limon léger	Ll	16.6	8.0	1.50
Sable limoneux	SL	12.1	5.0	1.40
Sable argileux	SA	18.6	10.0	1.50
Limon argileux	LA	27.1	12.8	1.40
Argile limoneuse	AL	32.4	19.3	1.40
Argile	A	37.2	24.8	1.45
Argile lourde	Alo	37.7	24.6	1.30

Valeurs de l'albédo (*N.Brisson et al, 2002*)

Sol	% argile	% limon	% sable	% Ca CO3	albédo état sec	source
craie	25	52	24	52	0.31	G. Richard et P. Cellier
sable limoneux	8	20	72	9	0.25	G. Richard et P. Cellier
limon argileux	24	47	29	7	0.18	G. Richard et P. Cellier
limon moyen	12	79	7	3	0.22	G. Richard et P. Cellier
limon moyen avec croûte de battance	12	79	7	3	0.28	G. Richard et P. Cellier
limon moyen	16	79	4	3	0.23	G. Richard et P. Cellier
limon argileux	23	72	5	3	0.22	G. Richard et P. Cellier
sol " moyen "					0.25	Van bavel et Hillel, 1976
argile					0.28	F. Baret
terreau					0.22	F. Baret
galets					0.14	F. Baret

Valeurs de q0, valeur seuil d'évaporation sur sol nu (*N.Brisson et al, 2002*)

Type de sol	q0	source
argi < 5	6	Ritchie, 1972
5< argi < 25	9	Ritchie, 1972
25< argi < 45	12	Ritchie, 1972
argi > 45	6	Ritchie, 1972
argi = 27	22	Brisson et Perrier, 1991
argi = 51	0	Brisson et Perrier, 1991

Pour SWAT : Paramètres sol : groupe d'infiltrabilité (*J.G.Arnold et al, 2011*)

Criteria *	Hydrologic Soil Groups			
	A	B	C	D
Final constant infiltration rate (mm/hr)	7.6-11.4	3.8-7.6	1.3-3.8	0-1.3
Mean permeability: surface layer (mm/hr)	> 254.0	84.0-254.0	8.4-84.0	< 8.4
Mean permeability: most restrictive layer below the surface layer to a depth of 1.0 m (mm/hr)	> 254.0	84.0-254.0	8.4-84.0	< 8.4
Shrink-swell potential: most restrictive layer **	Low	Low	Moderate	High, Very High
Depth to bedrock or cemented pan (mm)	> 1016	> 508	> 508	< 508
DUAL HYDROLOGIC GROUPS	A/D	B/D	C/D	
Mean depth to water table (m)	< 0.61	< 0.61	< 0.61	

* These criteria are guidelines only. They are based on the theory that the minimum permeability occurs within the uppermost 50 cm. If the minimum permeability occurs between a depth of 50 to 100 cm, then the Hydrologic Soil Group is increased one group. For example, C to B. If the minimum permeability occurs below a depth of 100 cm, the Hydrologic Soil Group is based on the permeability above 100 cm, using the rules previously given.

** Shrink-swell potential is assigned to a profile using the following guidelines:

Low: All soils with sand, loamy sand, sandy loam, loam or silt loam horizons that are at least 50 cm thick from the surface without a clay horizon within 100 cm of the surface.

Medium: All soils with clay loam horizons within 50 cm of the surface or soils with clay horizons from 50 to 100 cm beneath the surface.

High: All soils with clay horizons within 50 cm of the surface. Lower the shrink-swell potential one class when kaolinite clay is dominant.

Annexe D :

Paramètres d'entrée de STICS et SWAT

Paramètres d'entrée de STICS (*N.Brisson et al, 2002*)

aangst	coefficient de la relation d'Angstrom pour le rayonnement extra-terrestre	SD	PARAM
abscission	proportion de feuilles sénescentes qui tombe	SD	PARPLT
aclim	composante climatique de A	mm	PARAM
adens	paramètre de compensation entre le nombre de tiges et la densité de plantes	SD	PARPLT
adfol	paramètre d'évolution de la densité foliaire	m ² m ⁻³ /m ² m ⁻²	PARPLT
adil	paramètre de la courbe de dilution critique $[N_{plante}] = \text{adil MS}^{(-\text{bdil})}$	N% MS	PARPLT
adilmax	paramètre de la courbe de dilution maximale $[N_{plante}] = \text{adilmax MS}^{(-\text{bdilmax})}$	N% MS	PARPLT
afpf	paramètre de la logistique définissant la force des puits fruits (croissance indéterminée) : age relatif du fruit où la vitesse de croissance est maximale	SD	PARPLT
afruitpot	nombre maximal de fruits noués par inflorescence et par degré.jour (croissance indéterminée)	nbfruits °CJ-1	PARPLT
ahres	paramètre d'humification des résidus organiques: $\text{hres} = 1 - \text{ahres} * \text{CsurNres} / (\text{bhres} + \text{CsurNres})$	g g-1	PARAM
akres	paramètre de décomposition des résidus organiques: $\text{kres} = \text{akres} + \text{bkres} / \text{CsurNres}$	jour-1	PARAM
albedo	albédo du sol nu sec	SD	PARSOL
albedomulch	albédo du mulch végétal ou du paillage plastique	SD	PARTEC/ PARAM
albedomulch	albédo du mulch (végétal ou plastique)	SD	PARAM
albveg	albédo de la végétation	SD	PARAM
allocamx	allocation maximale journalière d'assimilation vers les fruits	SD	PARPLT
alphaCO2	coefficient de modification de l'efficacité de conversion en cas d'augmentation du CO2 atmosphérique	SD	PARAM
alphapt	paramètre de Priestley-Taylor	*	CLIMAT
altinversion	altitude d'inversion du gradient thermique avec l'altitude	m	PARAM
altisimul	altitude de simulation	m	PARAM
altistation	altitude de la station des données météo d'entrée	m	PARAM
ampfroid	demi-amplitude thermique de l'effet vernalisant	°C	PARPLT
anitcoupe	quantité d'engrais azoté apporté à chaque coupe (cultures fourragères)	kg N ha-1	PARTEC
argi	teneur en argile (après décarbonatation) de la couche de surface	%	PARSOL
awb	paramètre de décomposition des résidus organiques: $\text{CsurNb} = \text{awb} + \text{bwb} / \text{CsurNres}$	SD	PARAM
bangst	coefficient de la relation d'Angstrom pour le rayonnement extra-terrestre	SD	PARAM
bdens	densité minimale à partir de laquelle il y a compétition entre plantes pour la croissance foliaire	plantes m-2	PARPLT
bdil	paramètre de la courbe de dilution critique $[N_{plante}] = \text{adil MS}^{(-\text{bdil})}$	*	PARPLT
bdilmax	paramètre de la courbe de dilution maximale $[N_{plante}] = \text{adilmax MS}^{(-\text{bdilmax})}$	*	PARPLT
belong	paramètre de la courbe d'élongation du coléoptile	degré.jour -1	PARPLT
beta	paramètre d'accroissement de la transpiration maximale en cas de stress hydrique	SD	PARAM
bformnappe	coefficient de forme de nappe (sol drainé)	SD	PARAM
bfpf	paramètre de la logistique définissant la force des puits fruits (croissance indéterminée) : vitesse de croissance maximale en proportion du poids maxi du fruit	*	PARPLT
bhres	paramètre d'humification des résidus organiques: $\text{hres} = 1 -$	g g-1	PARAM

	$ahres * CsurNres / (bhres + CsurNres)$		
biorognem	biomasse minimale de rognage (calcul automatique)	t ha-1	PARTEC
bkres	paramètre de décomposition des résidus organiques: $kres = akres + bkres / CsurNres$	g g-1	PARAM
bwb	paramètre de décomposition des résidus organiques: $CsurNb = awb + bwb / CsurNres$	g g-1	PARAM
cadencerec	cadence de récoltes	jour-1	PARTEC
cailloux	teneur volumique en cailloux par horizon	m3 m-3	PARSOL
calc	teneur en CaCO3 de la couche de surface	%	PARSOL
capiljour	remontées capillaires	mm j-1	PARSOL
celong	paramètre de la courbe d'élongation du coléoptile	SD	PARPLT
cfes	paramètre de décroissance de l'évaporation en fonction de la profondeur	SD	PARAM
cgrain	nombre de grains produits (par g MS/j) pendant la période NBJGRAIN qui précède le stade NDRP	grains gMS -1 jour	PARPLT
cgrainv0	nombre de grains produits lorsque la vitesse de croissance est nulle	grains m-2	PARPLT
cielclair	seuil de fraction d'insolation autorisant l'inversion du gradient thermique	SD	PARAM
CNgrainrec	concentration minimale en azote des grains pour récolte	0-1	PARTEC
CNresmax	valeur minimale observée du rapport C/N des résidus organiques	g g-1	PARAM
CNresmin	valeur minimale observée du rapport C/N des résidus organiques	g g-1	PARAM
CO2	teneur en CO2 de l'atmosphère [entre 330 et 660]	vpm	PARAM
codabri	option de calcul du climat sous abri	code 1/2	PARTEC
codadret	option de calcul du climat de montagne : versant	code 1/2	PARAM
codaltitude	option de calcul du climat en altitude	code 1/2	PARAM
codazofruit	option d'activation de l'effet direct du statut azoté sur le nombre de fruits	code 1/2	PARPLT
codcaleffeuil	option du mode de calcul de l'effeuillage	code 1/2	PARTEC
codcalinflo	option du mode de calcul du nombre d'inflorescence	code 1/2	PARPLT
codcalrogne	option du mode de calcul du rognage	code 1/2	PARTEC
codceuille	option du mode de récolte	code 1/2	PARTEC
codeactimulch	option d'activation de la prise en compte du mulch naturel dans la répartition de l'évaporation du sol	code 1/2	PARAM
codeaumin	option du mode récolte en fonction de la teneur en eau des organes récoltés	code 1/2	PARTEC
codebeso	option calcul des besoins en eau par l'approche k.ETP (1) ou l'approche résistive (2)	code 1/2	PARPLT
codebfroid	option de calcul des besoins en froid	code 1/2	PARPLT
codecailloux	option prise en compte des cailloux dans le bilan hydrique: oui (1), non (0)	code 0/1	PARSOL
codecalcferi	option calcul automatique des fertilisations: oui (2), non (1)	code 1/2	PARTEC
codecalirrig	option calcul automatique des irrigations: oui (2), non (1)	code 1/2	PARTEC
codecaltemp	option calcul de la température de culture: oui (2), non (1)	code 1/2	PARAM
codeclaircie	option d'activation de l'éclaircissage des fruits	code 1/2	PARTEC
codeclchange	option changements climatiques: oui (2), non (1)	code 1/2	PARAM
codecroijuv	option croissance juvénile gérée par le paramètre MSAERO (1) ou par une efficacité de croissance juvénile (2)	code 1/2	PARPLT
codedormance	option de calcul de la dormance	code 1/2	PARPLT
codedrainage	option d'activation des calculs de drainage	code 0/1	PARSOL
codefauche	option de fauche pour les cultures fauchées: oui (1), non (2)	code 1/2	PARTEC
codefente	option création d'un compartiment supplémentaire dans le bilan hydrique pour les sols argileux gonflants: oui (1), non (0)	code 0/1	PARSOL
codeffeuil	option technique d'effeuillage: oui (1), non (2)	code 1/2	PARTEC
codefrmur	code à 1 signifie que la variable CHARGEFRUIT prendra en compte les fruits de la dernière boîte (murs), sinon elle ne prendra en compte que les (N-1)èmes premières boîtes.	code 1/2	PARAM
codegdh	calcul horaire ou journalier de l'unité de développement	code 1/2	PARPLT
codegermin	option de passage par une phase de germination ou un délai au démarrage de la culture (1) ou démarrage direct (2)	code 1/2	PARPLT

codeh2oact	code d'activation de l'effet du stress hydrique sur la plante: oui (1), non (0)	code1/2	PARAM
codehypo	option de passage par une phase de croissance de l'hypocotyle (1) ou plantation d'une plantule (2)	code 1/2	PARPLT
codeindetermin	option de simulation de la croissance des feuilles et des fruits : indéterminée (2) ou déterminée (1)	code 1/2	PARPLT
codeinitprec	réinitialisation des états initiaux en cas d'enchaînement sur une série climatique	code1/2	PARAM
codeinnact	code d'activation du stress azoté sur la plante: oui (1), non (0)	code1/2	PARAM
codeintercept	option de simulation de l'interception de la pluie par le feuillage (1) ou non (2)	code 1/2	PARPLT
codeir	option de calcul du rapport masse grains/biomasse totale : proportionnel au temps (1), proportionnel aux sommes de températures (2)	code 1/2	PARPLT
codelainet	option de calcul du LAI (net ou brut)	code 1/2	PARPLT
codelaitr	choix entre calcul du taux de recouvrement et LAI	code 1/2	PARPLT
codelegume	option légumineuse	code 1/2	PARPLT
codemacropor	"option de simulation de la circulation d'eau dans la macroporosité des sols pour estimer excès d'eau et ruissellement par ""débordement"" : oui(1), non (0)"	code 0/1	PARSOL
codemicheur	option de calcul du microclimat horaire (fichier humidite.sti)	code1/2	PARAM
codeminhum	code pour calcul effet humidité sur la minéralisation	code 1/2	PARAM
codeminopt	option de simulation avec pluie et etp nulles (actif uniquement en sol nu) actif si 1	code1/2	PARAM
codemodfauche	option définissant le mode de fauche: (1) calcul automatique en fonction de l'état phénologique et trophique de la culture, (2) calendrier préétabli en jours, (3) calendrier préétabli en degrés.jours	code 1/2/3	PARTEC
codemulch	typologie des mulchs végétaux : canne de maïs, ...	code 1 à 10	PARAM
codenitrif	option d'activation du calcul de la nitrification	code 1/2	PARSOL
codepaillage	option: aucun paillage (1), paillage végétal (2), paillage plastique recouvrant partiellement le sol (3)	code 1/2/3	PARTEC
codeperenne	plante annuelle ou pérenne	code 1/2	PARPLT
codepergaz	option du calcul des pertes en azote gazeux	code 1/2	PARAM
codepfzrac	activation du frein hydrique sur la croissance racinaire: oui (1), non (2)	code 1/2	PARPLT
codephot	option de photopériodisme de la plante: oui (1), non (2)	code1/2	PARPLT
codeplante	nom codifié de la plante en 3 lettres	*	PARPLT
codeprofmes	option de profondeur pour les stocks d'eau et d'azote	code1/2	PARAM
coderacine	choix du module d'estimation de la croissance racinaire en volume : par profil type (1) ou par la densité vraie (2)	code 1/2	PARPLT
codерemontcap	code d'activation des remontées capillaires	code 0/1	PARSOL
coderes	type de résidus: 1=résidus de culture, 2=résidus de CI, 3=fumier, 4=compost OM, 5=boue SE, 6=vinasse, 7=corne, 8=autre (voir fichier général)	code 1 à 10	PARTEC
coderetflo	option d'action retard du stress hydrique avant le stade DRP: oui (1), non (2)	code 1/2	PARPLT
codernet	option de calcul du rayonnement net	code 1/2/3	PARAM
codesenes	option d'activation du module de calcul de la sénescence en biomasse: oui (1), non (2)	code 1/2	PARPLT
codeSIG	code d'écriture: de tous les fichiers de sortie (0), des fichiers bilan et rapport (1), ou du fichier rapport seul (2)	code 0/1/2	PARAM
codestade	option de forçage d'un ou plusieurs stades de développement: oui (2), non (1)	code 1/2	PARTEC
codesymbiose	option de calcul de la fixation symbiotique	code 1/2	PARPLT
codetaille	option de calcul de la taille	code1/2	PARTEC
codetemp	option mode de calcul du temps thermique pour la plante : avec la température de l'air (1) ou avec la température de culture (2)	code 1/2	PARPLT
codetemp rac	option mode de calcul du temps thermique pour les racines : avec la température de culture (1) ou avec la température du sol (2)	code 1/2	PARPLT
codetesthumN	option pour le calcul automatique des fertilisations	code1/2	PARTEC

codetradtec	description de la structure de plantation en cas d'utilisation des transferts radiatifs: oui (2), non (1)	code1/2	PARTEC
codetransrad	option de simulation de l'interception du rayonnement : loi de Beer (1), transferts radiatifs (2)	code 1/2	PARPLT
codetrempt	option d'effet thermique sur le remplissage des grains: oui (2), non (1)	code 1/2	PARPLT
codetycailloux	code des types de cailloux	code 1 à 10	PARAM
codetypeng	code des types d'engrais	code 1 à 8	PARAM
codetypres	code des types de résidus	code 1 à 8	PARAM
codevar	nom de la variété	SD	PARAM
codgelflo	activation du gel à la floraison	code 1/2	PARPLT
codgeljuv	activation du gel LAI au stade juvénile	code 1/2	PARPLT
codgellev	activation du gel plantule	code 1/2	PARPLT
codgelveg	activation du gel LAI stade adulte	code 1/2	PARPLT
codhauteff	niveau d'effeuillage	code 1/2	PARTEC
codhnappe	mode de calcul de la hauteur de nappe	code 1/2	PARAM
codlocferti	code de localisation de la fertilisation : 1: à la surface du sol, 2 = dans le sol	code 1/2	PARTEC
codlocirrig	code de localisation de l'irrigation : 1=sur-frondaison, 2= sous-frondaison au dessus du sol, 3 = dans le sol	code 1/2/3	PARTEC
codrecolte	type de récolte (moisson ou cueillette)	code 1/2	PARTEC
codrognage	activation du rognage	code 1/2	PARTEC
codtefcroi	option utilisation de températures seuils spécifiques pour le calcul de l'efficacité de croissance (2) ou identiques à celles utilisées pour l'indice foliaire (1)	code 1/2	PARPLT
coefamflax	coefficient multiplicateur du parcours AMFLAX pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coefb	paramètre définissant l'effet radiatif sur l'efficacité de conversion	SD	PARAM
coefdevil	coefficient multiplicateur du rayonnement extérieur pour ETP sous abri froid	SD	PARAM
coefdrpmat	coefficient multiplicateur du parcours DRPMAT pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coefflodrp	coefficient multiplicateur du parcours FLODRP pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coeflaxsen	coefficient multiplicateur du parcours LAXSEN pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coeflevamf	coefficient multiplicateur du parcours LEVAMF pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coeflevdrp	coefficient multiplicateur du parcours LEVDRP pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
coefmshaut	rapport biomasse/hauteur utile de fauche des cultures	t ha-1 m-1	PARPLT
coefrnet	coefficient de rayonnement net du calcul du climat sous abri	*	PARAM
coefsenlan	coefficient multiplicateur du parcours SENLAN pour utiliser la température de culture	SD	PARPLT
concirr	concentration en azote minéral de l'eau d'irrigation	kgN mm-1	PARTEC
concNnodseuil	seuil maximal d'azote dans le sol pour la mise en place des nodules	kg.ha-1.mm-1	PARPLT
concNrac0	seuil de concentration en azote interdisant l'activité des nodules	kg.ha-1.mm-1	PARPLT
concNrac100	seuil de concentration en azote à pleine activité des nodules	kg.ha-1.mm-1	PARPLT
concr	concentration en azote minéral de l'eau de pluie	kgN mm-1	PARAM
concseuil	seuil minimal de concentration du sol en azote nitrique pour activation du lessivage	kgN ha-1 mm-1	PARSOL
contrdamax	contrainte maximale à la pénétration	SD	PARPLT
couvermulch	proportion de sol couvert par le paillage	SD	PARTEC
Crespc	proportion de carbone dans les résidus	SD	PARTEC
croirac	vitesse de croissance du front racinaire	cm degré.j-1	PARPLT
CsurNres	rapport C/N des résidus de culture ou amendements organiques	g g-1	PARTEC
cvent	paramètre du calcul du climat sous abri	SD	PARAM
cwb	rapport C/N minimal de la biomasse microbienne dans la relation: CsurNbio=awb+bwb/CsurNres	g g-1	PARAM

dacohes	paramètre de l'effet contrainte à la pénétration racinaire	g cm-3	PARAM
DAF	tableau des densités apparentes des 5 couches de sol	g cm-3	PARSOL
daseuilbas	seuil de densité apparente du sol en dessous de laquelle la croissance racinaire n'est pas contrainte	g cm-3	PARAM
daseuilhaut	seuil de densité apparente du sol au-dessus de laquelle la croissance n'est plus possible	g cm-3	PARAM
debsenrac	somme de degrés. Jours définissant le début de la sénescence racinaire (durée de vie d'une racine)	degrés.jours	PARPLT
decomposmulch	vitesse de décomposition du paillage végétal	jour-1	PARAM
deneng	potentiel de dénitrification de l'engrais	SD	PARAM
densinitial	tableau des densités racinaires initiales pour les 5 horizons	cm cm-3	USM
densite	densité de semis	plantes.m-2	PARTEC
deshydbase	vitesse d'évolution de la teneur en eau des fruits (>0 ou <0)	% j-1	PARPLT
dessecgrain	vitesse de dessèchement du grain	g eau.g MF-1.°C-1	PARPLT
dessecplt	vitesse de dessèchement de la plante à partir du stade NLAX	g eau.g MF-1.°C-1	PARAM
dfolbas	densité foliaire minimale dans la forme du végétal considérée	m2 feuille m-3	PARPLT
dfolhaut	densité foliaire maximale dans la forme du végétal considérée	m2 feuille m-3	PARPLT
difN	coefficient de diffusion apparente du nitrate dans le sol humide	cm2 jour-1	PARAM
diftherm	diffusivité thermique du sol	cm2s-1	PARAM
distdrain	distance au drain pour le calcul de la hauteur de nappe	cm	PARAM
dlaimax	vitesse maximale de production de surface foliaire nette	m2 feuille plante-1 degré j-1	PARPLT
dlaimaxbrut	vitesse maximale de production de surface foliaire brute	m2 feuille plante-1 degré j-1	PARPLT
dosimx	quantité maximale d'eau d'irrigation autorisée à chaque pas de temps (mode irrigation automatique)	mm jour-1	PARTEC
dosimxN	quantité maximale de fertilisant azoté autorisée à chaque pas de temps (mode fertilisation automatique)	kg N ha-1	PARTEC
draclong	vitesse maximale de production de longueur racinaire	cm racine plante-1 degré.jour-1	PARPLT
dureefruit	durée de croissance d'un fruit de la nouaison à la maturité physiologique	degrés.jours	PARPLT
durvieF	durée de vie d'un cm de feuille adulte	Q10	PARPLT
durvieI	durée de vie d'un cm de feuille jeune en proportion de DURVIEF	SD	PARPLT
durviesupmax	proportion de durée de vie supplémentaire liée à la surfertilisation azotée	SD	PARPLT
eaures	teneur en eau des résidus organiques	% matière fraîche	PARTEC
ecartdrain	écartement entre drains	cm	PARSOL
efcroijuv	efficacité de croissance maximale pendant la phase juvénile (LEV-AMF)	g MJ-1	PARPLT
efcroirepro	efficacité de croissance maximale pendant la phase de remplissage des grains (DRP-MAT)	g MJ-1	PARPLT
efcroiveg	efficacité de croissance maximale pendant la phase végétative (AMF-DRP)	g MJ-1	PARPLT
effeuil	proportion de la production de feuille journalière supprimée par effeuillage	0-1	PARTEC
effirr	coefficient d'efficacité de l'irrigation	SD	PARTEC
effN	coefficient d'efficacité des engrais azotés	SD	PARTEC
elmax	élongation maximale du coléoptile ou de l'hypocotyle à l'obscurité	cm	PARPLT
engamm	proportion d'ammonium dans l'engrais	SD	PARAM

engrais	type d'engrais : 1 =Sulphate.d'ammonium ,2= Nitrate.d'ammonium,3= Nitrate.d'ammonium.et.calc.,4=Ammoniac.anhydre,5= Urée,6= Di-ammonium.phosphate,7= Solution,8= Autre	*	PARTEC
envfruit	proportion enveloppe/pgrainmaxi en masse	SD	PARPLT
epc	épaisseur de chaque horizon de sol (tableau)	cm	PARSOL
epd	épaisseur de mélange de l'azote (2*dispersive)	cm	PARSOL
extin	coefficient d'extinction du PAR dans le couvert végétal	SD	PARPLT
FHUM	paramètre de la fonction teneur en eau du sol sur la vitesse de décomposition des matières organiques	SD	PARAM
FINERT	fraction du stock d'humus inactive pour la minéralisation et l'humification (= MO stable/MO totale)	SD	PARAM
fixmax	fixation symbiotique maximale	kgN ha-1 j-1	PARPLT
FMIN1	paramètre de la constante de vitesse potentielle de minéralisation: $K2=fmin1/(fmin2+argi)/(fmin3+calc)$	10000.jour-1	PARAM
FMIN2	paramètre de la constante de vitesse potentielle de minéralisation: $K2=fmin1/(fmin2+argi)/(fmin3+calc)$	%	PARAM
FMIN3	paramètre de la constante de vitesse potentielle de minéralisation: $K2=fmin1/(fmin2+argi)/(fmin3+calc)$	%	PARAM
forme	forme du profil de densité foliaire du végétal : rectangle (1), triangle (2)	code 1/2	PARPLT
FpHnx	maximum de l'effet pH sur la nitrification	SD	PARAM
FTEM	paramètre de la fonction température sur la vitesse de minéralisation de l'humus	SD	PARAM
FTEM1	paramètre 1 de la fonction température sur la vitesse de décomposition des résidus organiques	°K-1	PARAM
FTEM2	paramètre 2 de la fonction température sur la vitesse de décomposition des résidus organiques	*	PARAM
FTEM3	paramètre 3 de la fonction température sur la vitesse de décomposition des résidus organiques	*	PARAM
FTEM4	paramètre 4 de la fonction température sur la vitesse de décomposition des résidus organiques	*	PARAM
gpreco	numéro du groupe variétal	*	PARTEC
gradtn	gradient thermique en altitude pour les températures minimales	°C m-1	PARAM
gradtninv	gradient thermique en altitude pour les températures minimales au dessous du niveau d'inversion	°C m-1	PARAM
gradtx	gradient thermique en altitude pour les températures maximales	°C m-1	PARAM
h2ofeuiljaune	teneur en eau des feuilles jaunes	g eau g MF -1	PARPLT
h2ofeuilverte	teneur en eau des feuilles vertes	g eau g MF -1	PARPLT
h2ofrvert	teneur en eau des fruits verts (avant dynamique hydrique)	g eau g MF -1	PARPLT
h2ograinmax	teneur en eau maximale des fruits à la récolte	g eau g MF -1	PARTEC
h2ograinmin	teneur en eau minimale des fruits à la récolte	g eau g MF -1	PARTEC
h2oreserve	teneur en eau des réserves	g eau g MF -1	PARPLT
h2otigestruc	teneur en eau des tiges structurales	g eau g MF -1	PARPLT
hautbase	hauteur de base du végétal	m	PARPLT
hautcoupe	hauteur de coupe pour les cultures fourragères (calendriers imposés)	m	PARTEC
hautcoupedefaut	hauteur de coupe pour les cultures fourragères (calendriers calculés)	m	PARTEC
hautmax	hauteur maximale du végétal	m	PARPLT
hautrogne	hauteur de rognage	m	PARTEC
hcccx	humidité à la capacité au champ de chaque type de cailloux (tableau)	% pondéral	PARAM
HCCF	humidité à la capacité au champ de chaque horizon (terre fine) (tableau)	g eau g sol -1	PARSOL
Hinif	tableau des humidités initiales des 5 horizons de sol pour la terre fine% pondéral		USM
HMINF	humidité au point de flétrissement permanent de chaque horizon (terre fine) (tableau)	g eau g sol -1	PARSOL
hminm	humidité minimale pour la minéralisation	g eau g sol -1	PARAM
hminn	humidité minimale pour la nitrification	g eau g sol -1	PARAM
hoptm	humidité optimale pour la minéralisation	g eau g sol -1	PARAM
hoptn	humidité optimale pour la nitrification	g eau g sol -1	PARAM

huilerec	teneur en huile minimale à la récolte	g huile/g MF	PARTEC
humcapil	humidité minimale pour activation des remontées capillaires	g eau g sol -1	PARSOL
hunod	humidité seuil pour la nodulation	mm cm sol-1	PARPLT
iamf	jour julien du stade AMF (accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
idebdorm	jour de l'entrée en dormance	*	PARPLT
idrp	jour julien du stade DRP (début de remplissage des grains), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
ifindorm	jour de sortie de dormance	*	PARPLT
ilan	jour julien du stade LAN (indice foliaire nul), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
ilax	jour julien du stade LAX (indice foliaire maxi), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
ilev	jour julien du stade LEV (levée), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
imat	jour julien du stade MAT (maturité physiologique), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
infil	infiltrabilité à la base de chaque horizon	mm jour-1	PARSOL
inflomax	nombre d'inflorescence maximal par plante	nb pl-1	PARPLT
infrecouv	ulai au stade AMF (point d'inflexion de la croissance du taux de recouvrement)	SD	PARPLT
iniprofil	option de lissage (fonction spline) des profils initiaux de teneur en eau et en azote: oui (1), non (0)	code 0/1	PARAM
inngrain1	inn mini pour absorption nette d'azote maximale	SD	PARPLT
inngrain2	inn maxi pour absorption nette d'azote nulle	SD	PARPLT
INNmin	valeur minimale de INN possible pour la culture	SD	PARPLT
innsen	la fonction innsenes passe par le point (innmin, innsen)	SD	PARPLT
innturgmin	la fonction innsenes passe par le point (innmin, innturgmin)	SD	PARPLT
interrang	largeur de l'interrang	m	PARTEC
iplt	jour julien de la date de semis ou de plantation	*	PARTEC
irec	jour julien du stade REC (récolte), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
irecbutoir	jour julien de récolte butoir (si la plante n'a pas fini son cycle à cette date, la récolte est imposée)	*	PARTEC
irmax	indice de récolte maximal	SD	PARPLT
isen	jour julien du stade SEN (début de sénescence nette), si ce stade est observé (sinon 999)	*	PARTEC
jour	jour julien	*	PARTEC
julappmulch	jour julien d'application du mulch	*	PARTEC
juleclair	jour de l'éclaircie	*	PARTEC
juleffeuil	jour de l'effeuillage	*	PARTEC
julfauche	jour julien de chaque fauche (tableau)	*	PARTEC
julouvre2	jour d'ouverture des ouvrants	*	PARTEC
julouvre3	jour d'ouverture des ouvrants	*	PARTEC
julrogne	jour de rognage	*	PARTEC
jultaille	jour de la taille	*	PARTEC
jultrav	jour julien de travail du sol et/ou d'apport de résidus organiques	*	PARTEC
julvernal	jour julien (entre 1 et 365) d'entrée en vernalisation pour les cultures pérennes	*	PARAM
jvc	nombre de jours vernalisants	*	PARPLT
jvcmini	nombre minimal de jours vernalisants	*	PARAM
kbio	constante de vitesse de mortalité de la biomasse microbienne	jour -1	PARAM
kcouvmlch	"coefficient ""d'extinction"" reliant la quantité de paillys végétal au taux de couverture du sol"	*	PARAM
khaut	"coefficient ""d'extinction"" reliant l'indice foliaire à la hauteur"	*	PARAM
Kmabs1	constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	µmole. cm racine-1	PARAM
Kmabs2	constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	µmole. cm racine-1	PARAM
kmax	coefficient cultural maximal de la culture (= ETM/ETP)	SD	PARPLT

ksol	conductivité hydraulique à saturation pour le transport de l'eau vers les drains	cm j-1	PARSOL
kstemflow	"coefficient d'extinction" reliant LAI et stemflow"	*	PARPLT
ktrou	coefficient d'extinction du PAR à travers le végétal (transferts radiatifs)	*	PARPLT
lai0	indice foliaire initial	m2 m-2	USM
laicomp	LAI à partir duquel commence la compétition inter-plantes	m2 m-2	PARPLT
laidebeff	LAI du début d'effeuillage	m2 m-2	PARTEC
laieffeuil	LAI de fin d'effeuillage	m2 m-2	PARTEC
laiplantule	Indice foliaire LAI de la plantule au moment de la plantation	m2 feuilles m-2 sol	PARPLT
lairesiduel	indice foliaire résiduel après chaque fauche (tableau)	m2 feuilles m-2 sol	PARTEC
largrogne	largeur de rognage	m	PARTEC
latitude	latitude du lieu pour le calcul de la photopériode	degrés	CLIMAT
locferti	profondeur d'apport des engrais (en cas d'apport en profondeur dans le sol)	cm	PARTEC
locirrig	profondeur d'apport de l'eau d'irrigation (en cas d'apport en profondeur dans le sol)	cm	PARTEC
longsperac	longueur spécifique des racines	cm g-1	PARPLT
lvfront	densité racinaire au niveau du front d'enracinement	cm racine.cm-3 sol	PARPLT
lvopt	densité racinaire optimale pour l'extraction de l'eau et l'azote	cm racine.cm-3 sol	PARAM
magrain0	biomasse initiale des grains	g m-2	USM
margerogne	marge de biomasse pour le rognage automatique	t ha-1	PARTEC
masec0	biomasse initiale	t ha-1	USM
masecNmax	biomasse aérienne à partir de laquelle il y a dilution de l'azote (courbes critique et maximale)	t ha-1	PARPLT
masvolcx	masse volumique (apparente) des cailloux	g cm-3	PARAM
mouillabil	rétenion d'eau maximale sur les feuilles	mm LAI-1	PARPLT
mouillabilmulch	rétenion d'eau maximale dans le mulch végétal	mm t-1 ha	PARAM
msaer0	valeur seuil de matière sèche aérienne initiale attribuable à des racines	t ha-1	PRAIRIE
mscoupemini	valeur seuil de matière sèche pour le déclenchement de la fauche	t ha-1	PRAIRIE
msresiduel	matière sèche résiduelle après une fauche	t ha-1	PARTEC
nbceuille	nombre de cueillette	code 1/2	PARTEC
nbfeuilplant	nombre de feuilles initial par plantes à la plantation	nb pl-1	PARPLT
nbfgellev	nombre de feuilles par plantes à la fin du stade plantule (sensibilité au gel)	nb pl-1	PARPLT
nbfrote	nombre d'inflorescence ou de fruits supprimés à l'éclaircie	nb pl-1	PARTEC
nbgmax	nombre maximal de grains	grains m-2	PARPLT
nbgmin	nombre minimal de grains	grains m-2	PARPLT
nbinfo	nombre d'inflorescence imposé	nb pl-1	PARPLT
nbintervention	nombre d'interventions: apports de résidus, irrigations, fertilisations, fauches	SD	PARTEC
nbjgrain	période de latence avant DRP pour la mise en place du nombre de grains	jours	PARPLT
nboite	"nombre de boites" ou "classes d'âge" de fruits pour la croissance des fruits des plantes indéterminées"	SD	PARPLT
NH3ref	concentration en NH3 de l'atmosphère	10 ug.m-3	PARAM
NH4initf	quantité d'azote ammoniacal à l'initialisation	kg N ha-1	USM
Nminres	teneur en N minéral des résidus organiques	% matière fraîche	PARTEC
NO3initf	quantité d'azote nitrique à l'initialisation	kg N ha-1	USM
nometp	code du mode de calcul de l'ETP [pt/pe]	*	CLIMAT
Norg	teneur en azote organique de la couche labourée (supposée constante sur la profondeur profhum)	% pondéral	PARSOL
numsol	numéro du sol dans le fichier PARAM.SOL	*	USM

obstarac	profondeur de sol à laquelle apparaît un obstacle infranchissable à l'enracinement	cm	PARSOL
ombragetx	effet ombrage pour le calcul des modifications de température à l'ubac	°C	PARAM
orgeng	potentiel d'organisation de l'engrais	SD	PARAM
orientrang	orientation des rangs	rd (0=NS)	PARTEC
parazofmorte	paramètre de proportionnalité entre le C/N des feuilles mortes et l'inn	SD	PARPLT
parsurr	coefficient PAR/RG pour le calcul du rayonnement photosynthétiquement actif	*	CLIMAT
pentinflores	paramètre de calcul du nombre d'inflorescences	SD	PARPLT
pentlaimax	paramètre de la logistique du LAI	SD	PARPLT
pentrecouv	paramètre de la logistique du taux de recouvrement	*	PARPLT
pgrainmaxi	poids maximal d'un grain (à 0% d'eau)	g	PARPLT
pH	pH du mélange sol + amendement organique	SD	PARSOL
phiv0	paramètre de calcul du climat sous abri	*	PARAM
pHmaxnit	effet pH sur la nitrification (seuil maxi)	pH	PARAM
pHmaxvol	seuil maxi de pH pour la volatilisation des engrais minéraux	pH	PARAM
pHminnit	effet pH sur la nitrification (seuil mini)	pH	PARAM
pHminvol	seuil mini de pH pour la volatilisation des engrais minéraux	pH	PARAM
phobase	photopériode de base	heures	PARPLT
phosat	photopériode saturante	heures	PARPLT
plastochrone	durée séparant l'émission de deux feuilles sur la tige principale	°C Jour	PARPLT
plNmin	quantité de pluie minimale pour prévoir une fertilisation	mm jour-1	PARAM
pminruis	quantité minimale de pluie pour le déclenchement du ruissellement	mm jour-1	PARAM
profdenit	profondeur de dénitrification	cm	PARAM
profdrain	profondeur des drains	cm	PARSOL
profhum	profondeur maximale du sol sur laquelle se produit la minéralisation d'azote (max.60 cm)	cm	PARSOL
profimper	profondeur de l'imperméable	cm	PARSOL
profmes	profondeur de mesure de la réserve en eau du sol	cm	PARTEC
profnod	profondeur de nodulation	cm	PARPLT
profres	profondeur minimale d'incorporation des résidus	cm	PARTEC
profsem	profondeur de semis	cm	PARTEC
proftrav	profondeur de travail du sol et/ou d'incorporation des résidus organiques (max. 40 cm)	cm	PARTEC
proprac	rapport masse de racines / masse de parties aériennes à la récolte	g.g -1	PARAM
psisto	valeur absolue du potentiel de fermeture stomatique	bars	PARPLT
psiturg	valeur absolue du potentiel de début de diminution de l'expansion cellulaire	bars	PARPLT
q0	paramètre d'évaporation en sol nu (fin de phase I)	mm	PARSOL
q10	Q10 servant au calcul de dormance de Bidabe	SD	PARPLT
qmulch0	quantité de mulch initial	t ha-1	PARTEC
qmulchruis0	quantité de mulch annulant le ruissellement	t ha-1	PARAM
QNplante0	quantité d'azote initiale dans la plante	kg ha-1	USM
QNpltminINN	Quantité minimale d'azote dans la plante pour le calcul de l'inn	kg ha-1	PARAM
qres	quantité de résidus de culture ou d'amendements organiques apportés au sol (matière fraîche)	t MF ha-1	PARTEC
ra	résistance aérodynamique par défaut (utilise au module volatilisation quand on utilise l'approche ETP)	sm-1	PARAM
rapforme	rapport épaisseur/largeur de la forme du végétal (négatif quand base de la forme < sommet)	SD	PARPLT
rapsenturg	définition du seuil d'humidité du sol actif pour le stress de sénescence en proportion du seuil de turgescence	SD	PARPLT
ratiol	indice de stress hydrique en-dessous duquel on déclenche une irrigation en mode automatique (0 en mode manuel)	entre 0 et 1	PARTEC
ratiolN	indice de stress azoté en-dessous duquel on déclenche une fertilisation N en mode automatique (0 en mode manuel)	entre 0 et 1	PARTEC
ratiosen	fraction de biomasse sénescence (par rapport à la biomasse totale)	entre 0 et 1	PARPLT
rayon	rayon moyen des racines	cm	PARAM

rdrain	rayon des drains	cm	PARAM
remobres	proportion de réserve remobilisable chaque jour	SD	PARPLT
resperenne0	réserves initiales	t ha-1	PARPLT
ressuite	nom du type de résidus restitués au sol après la récolte (pour la culture suivante)	pailles, racines, culture, rien	PARTEC
rsmin	résistance stomatique minimale	s m-1	PARPLT
ruisolnu	fraction de la pluie ruisselée (par rapport à la pluie totale) en conditions de sol nu	entre 0 et 1	PARSOL
sdrpnou	parcours de développement entre DRP e NOU (fin de nouaison)	°C jour	PARPLT
sea	surface spécifique des enveloppes des fruits	cm2 g-1	PARPLT
sensanox	sensibilité à l'anoxie (0=insensible)	SD	PARPLT
sensiphot	sensibilité à la photopériode (1=insensible)	SD	PARPLT
sensrsec	sensibilité des racines à la sécheresse du sol (1=insensible)	SD	PARPLT
slavert	SLA maximal des feuilles vertes	cm2 g-1	PARPLT
slavertmin	SLA minimal des feuilles vertes	cm2 g-1	PARPLT
spfrmax	seuil pour calcul du stress trophique sur la mise en place des fruits	SD	PARPLT
spfrmin	seuil pour calcul du stress trophique sur la mise en place des fruits	SD	PARPLT
splaimax	seuil pour calcul du stress trophique sur le LAI	SD	PARPLT
splaimin	seuil pour calcul du stress trophique sur le LAI	SD	PARAM
stade0	stade cultural pris en compte au démarrage de la simulation	*	USM
stadecoupedf	stade de coupe automatique	*	PARTEC
stamflax	cumul d'unités de développement entre les stades AMF et LAX	degrés.jours	PARPLT
stdnofno	parcours de développement entre début et fin de nodulation	degrés.jours	PARPLT
stdordebour	parcours de développement entre levée de dormance et débourrement végétatif	degrés.jours	PARPLT
stdrpd	parcours de développement entre DRP et début de dynamique hydrique	degrés.jours	PARPLT
stdrpmat	cumul d'unités de développement entre les stades DRP et MAT	degrés.jours	PARPLT
stdrpnou	cumul d'unités de développement entre les stades DRP et NOU (fin de nouaison)	degrés.jours	PARPLT
stemflowmax	fraction maximale de la pluie qui s'écoule le long des tiges	entre 0 et 1	PARPLT
stfloodrp	parcours de développement entre FLO et DRP (seulement indicatif)	degrés.jours	PARPLT
stfnofvino	parcours de développement entre fin de nodulation et fin de vie des nodules	degrés.jours	PARPLT
stlaxsen	cumul d'unités de développement entre les stades LAX et SEN	degrés.jours	PARPLT
stlevamf	cumul d'unités de développement entre les stades LEV et AMF	degrés.jours	PARPLT
stlevdno	parcours de développement entre la levée et le début de nodulation	degrés.jours	PARPLT
stlevdrp	cumul d'unités de développement entre les stades LEV et DRP	degrés.jours	PARPLT
stoprac	stade d'arrêt de croissance racinaire (LAX ou SEN)	*	PARPLT
stpltger	cumul d'unités de développement permettant la germination	degrés.jours	PARPLT
stressdev	maximum de retard autorisé lié aux stress	SD	PARPLT
stsenlan	cumul d'unités de développement entre les stades SEN et LAN	degrés.jours	PARPLT
sucrerec	teneur en sucre minimale à la récolte	g sucre/g MF	PARTEC
surfouvre1	proportion de surface des ouvrants le jour 1/ surface de l'abri	SD	PARTEC
surfouvre2	proportion de surface des ouvrants le jour 2/ surface de l'abri	SD	PARTEC
surfouvre3	proportion de surface des ouvrants le jour 3/ surface de l'abri	SD	PARTEC
tauxrecouvkm ax	taux de recouvrement correspondant au coefficient cultural maximal	m2 plante/m2 sol	PARPLT
tauxrecouvma x	taux de recouvrement maximal	m2 plante/m2 sol	PARPLT
tcmax	température maximale de croissance	°C	PARPLT
tcmin	température minimale de croissance	°C	PARPLT
tdebgl	température de début de gel	°C	PARPLT
tdmax	température seuil maximale pour le développement	°C	PARPLT
tdmin	température seuil minimale pour le développement	°C	PARPLT
temax	température seuil maximale pour la croissance en biomasse	°C	PARPLT
temin	température seuil minimale pour la croissance en biomasse	°C	PARPLT
tempdeshyd	augmentation de la déshydratation liée à l'augmentation (Tcult-Tair)	% eau °C-1	PARPLT

tempfauche	cumul d'unités de développement entre deux fauches	degrés.jours	PARTEC
tempnod1	température cardinale pour l'activité des nodules	°C	PARPLT
tempnod2	température cardinale pour l'activité des nodules	°C	PARPLT
tempnod3	température cardinale pour l'activité des nodules	°C	PARPLT
tempnod4	température cardinale pour l'activité des nodules	°C	PARPLT
teopt	température optimale pour la croissance en biomasse	°C	PARPLT
teoptbis	température optimale pour la croissance en biomasse (si plateau entre teopt et teoptbis)	°C	PARPLT
tfroid	température optimale pour la vernalisation	°C	PARPLT
tgelflo10	température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	PARPLT
tgelflo90	température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	PARPLT
tgeljuv10	température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur le LAI (juvénile)	°C	PARPLT
tgeljuv90	température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur le LAI juvénile	°C	PARPLT
tgelle10	température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur plantule	°C	PARPLT
tgelle90	température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur plantule	°C	PARPLT
tgelve10	température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur le LAI (adulte)	°C	PARPLT
tgelve90	température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur le LAI (adulte)	°C	PARPLT
tgmin	température seuil minimale utilisée pour la phase de levée	°C	PARPLT
tigefeuil	proportion tige(structurale)/feuille	SD	PARPLT
tletale	température létale	°C	PARPLT
tmaxremp	température maximale maximale pour le remplissage des grains	°C	PARPLT
tminremp	température minimale minimale pour le remplissage des grains	°C	PARPLT
tnitmax	température cardinale pour la nitrification	°C	PARAM
tnitmin	température cardinale pour la nitrification	°C	PARAM
tnitopt1	température cardinale pour la nitrification	°C	PARAM
tnitopt2	température cardinale pour la nitrification	°C	PARAM
transplastic	coefficient de transmission du plastique	SD	PARTEC
TREF	température de référence pour les paramètres de minéralisation du sol	°C	PARAM
tustressmin	seuil de stress (min(turfac,inns)) à partir duquel il y a un effet sur le LAI (sénescence supplémentaire par rapport à la sénescence naturelle)	SD	PARPLT
typecailloux	type de cailloux : 1=calcaires B1, 2=calcaires B2, 3=calcaires L, 4=caillasses L, 5=graviers m, 6=silex, 7=granits a, 8=calcaires J, 9=autre1, 10=autre2 (voir fichier général)	SD	PARSOL
typemulch	type de mulch : 1=cannes de maïs, 2= autre (voir fichier général)	entre 0 et 10	PARTEC
typsol	type de sol	*	PARSOL
udlaimax	ulai à partir duquel la vitesse d'émission foliaire diminue	SD	PARPLT
Vabs2	vitesse d'absorption pour laquelle les pertes sont diminuées par 2	kg/ha/jour	PARAM
vitirazo	vitesse d'augmentation de l'indice de récolte azote	g grain g plante -1 jour-1	PARPLT
vitircarb	vitesse d'augmentation de l'indice de récolte carbone	g grain g plante -1 jour-1	PARPLT
vitircarbT	"vitesse ""thermique"" d'augmentation de l'indice de récolte carbone"	g grain g plante-1 degré.jour-1	PARPLT
vitno	vitesse d'installation des nodules en proportion de fixmax par degré.jour	nb degrés.jour-1	PARPLT
vitprophuile	vitesse d'augmentation de l'indice de récolte huile	g huile g matière sèche j-1	PARPLT
vitpropsucre	vitesse d'augmentation de l'indice de récolte sucre	g sucre g matière sèche j-1	PARPLT
vlaimax	ULAI au point d'inflexion de la fonction DELTAI=f(ULAI)	SD	PARAM
Vmax1	vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	µmole cm-1 h-1	PARAM

Vmax2	vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	$\mu\text{mole cm}^{-1}\text{ h}^{-1}$	PARPLT
voleng	volatilisation maximale de l'engrais	SD	PARAM
vpotdenit	vitesse potentielle de dénitrification	$\text{kg NO}_3/\text{ha/jour/c m sol}$	PARAM
Wh	rapport N/C de l'humus	g g^{-1}	PARAM
Xorgmax	quantité maximale d'azote organisé provenant des engrais minéraux	kg.ha^{-1}	PARAM
yres	rendement d'assimilation du carbone par la microflore décomposant les résidus organiques	g g^{-1}	PARAM
z0solnu	rugosité du sol nu	m	PARAM
zesx	profondeur maximale du sol affectée par l'évaporation du sol	cm	PARAM
zlabour	profondeur de labour	cm	PARTEC
zpente	profondeur du niveau où la densité racinaire est réduite de moitié par rapport à la surface pour le profil de référence	cm	PARPLT
zprlim	profondeur maximale du profil racinaire pour le profil de référence	cm	PARPLT
zr	hauteur de référence de mesure des données météo	m	PARAM
zrac0	profondeur du front racinaire initiale	cm	USM

Paramètres d'entrée de SWAT (M. Winchell et al, 2010)

Les paramètres d'entrée relatifs au sol :

Les paramètres d'entrée concernant l'application de fertilisants :

Les paramètres d'entrée concernant le couvert végétal et la croissance des plantes :

Land Cover/Plant Growth Database Edit

Crop types

- Agricultural Land-Close-grown
- Agricultural Land-Generic
- Agricultural Land-Row Crops
- Alamo Switchgrass
- Alfalfa
- Almonds
- Alsike Clover
- Altai Wildrye
- Apple
- Asparagus
- Bananas
- Bell Pepper
- Bermudagrass
- Big Bluestem
- Broccoli
- Cabbage
- Cantaloupe
- Carrot
- Cauliflower
- Celery
- Coffee
- Corn
- Corn Silage
- Cowpeas
- Crested Wheatgrass
- Cucumber
- Durum Wheat
- Eastern Gamagrass
- Eggplant
- Eragrostis Teff
- Field Peas
- Flax
- Forest-Deciduous
- Forest-Evergreen
- Forest-Mixed
- Garden or Canning Peas
- Grain Sorghum
- Grass
- Green Beans
- Hay
- Head Lettuce
- Honey Mesquite
- Honeydew Melon
- Indiangrass
- Italian (Annual) Ryegrass
- Johnsongrass
- Kentucky Bluegrass

Crop type Parameters

Crop Name: _____ CPNM (4 character): _____

IDC: _____ ☐ Crop is fertilized

BIO_E [(kg/ha)/(MJ/m²)] HVSTI [(kg/ha)/(kg/ha)] BLAI (m²/m²)

FRGRW1 (fraction) LAIMX1 (fraction) CHTMX (m) RDMX (m)

FRGRW2 (fraction) LAIMX2 (fraction) DLAI (heat units/heat units)

T_OPT (C) T_BASE (C) CNYLD(kg N/kg seed) CPYLD(kg P/kg)

BN1 (kg N/kg biomass) BN2 (kg N/kg biomass) BN3 (kg N/kg biomass)

BP1 (kg P/kg biomass) BP2 (kg P/kg biomass) BP3 (kg P/kg biomass)

WSYF [(kg/ha)/(kg/ha)] USLE_C GSI (m/s) VPDPR (kPa)

FRGMAX (fraction) WAVP (rate) CO2HI (uL/L) BIOEHI (ratio)

RSDCO_PL (fraction) ALAI_MIN (m²/m²) BIO_LEAF (fraction)

MAT_YRS (years) BMX_TREES (tons/ha) EXT_COEF BM_DIEOFF

Hydrological Parameters

OV_N SCS Runoff Curve Numbers

Manning's N (roughness) A B C D LU

Buttons: Add New, Save Edits, Cancel Edits, Delete, Default, Exit

Les paramètres d'entrée relatifs à l'application de pesticides :

Pesticides Database Edit

Pesticides

- 2,4,5-T Amine
- 2,4-D Acid
- 2,4-D amine
- 2,4-DB Ester
- 2,4-DB Sodium/amine
- 3-CPA Sodium Salt
- AC 263,499
- Acephate
- Acifluorfen
- Alachlor
- Aldicarb
- Aldicarb Sulfone
- Aldicarb Sulfoxide
- Aldrin
- Ametryn
- Amidochlor
- Aminocarb
- Amitraz
- Amitrole

Pesticide Parameters

Pesticide Name: _____

Product Name (17 character): _____

SKOC [(mg/kg)/(mg/L)] WOF (fraction)

HLIFE_F (days) HLIFE_S (days)

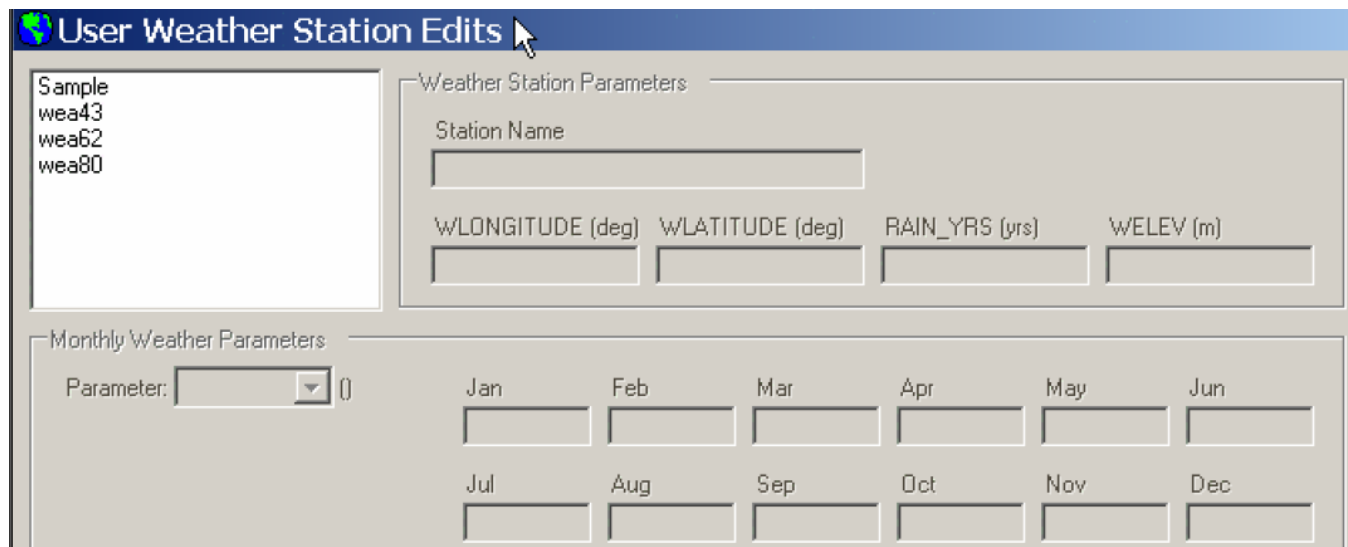
AP_EF (fraction) WSOL (mg/L)

Buttons: Add New, Cancel Edits, Save Edits, Delete, Default, Exit

Les paramètres d'entrée concernant le labour :

Les paramètres d'entrée relatifs aux aires urbaines :

Les paramètres d'entrée concernant les données climatiques :



User Weather Station Edits

Sample
wea43
wea62
wea80

Weather Station Parameters

Station Name

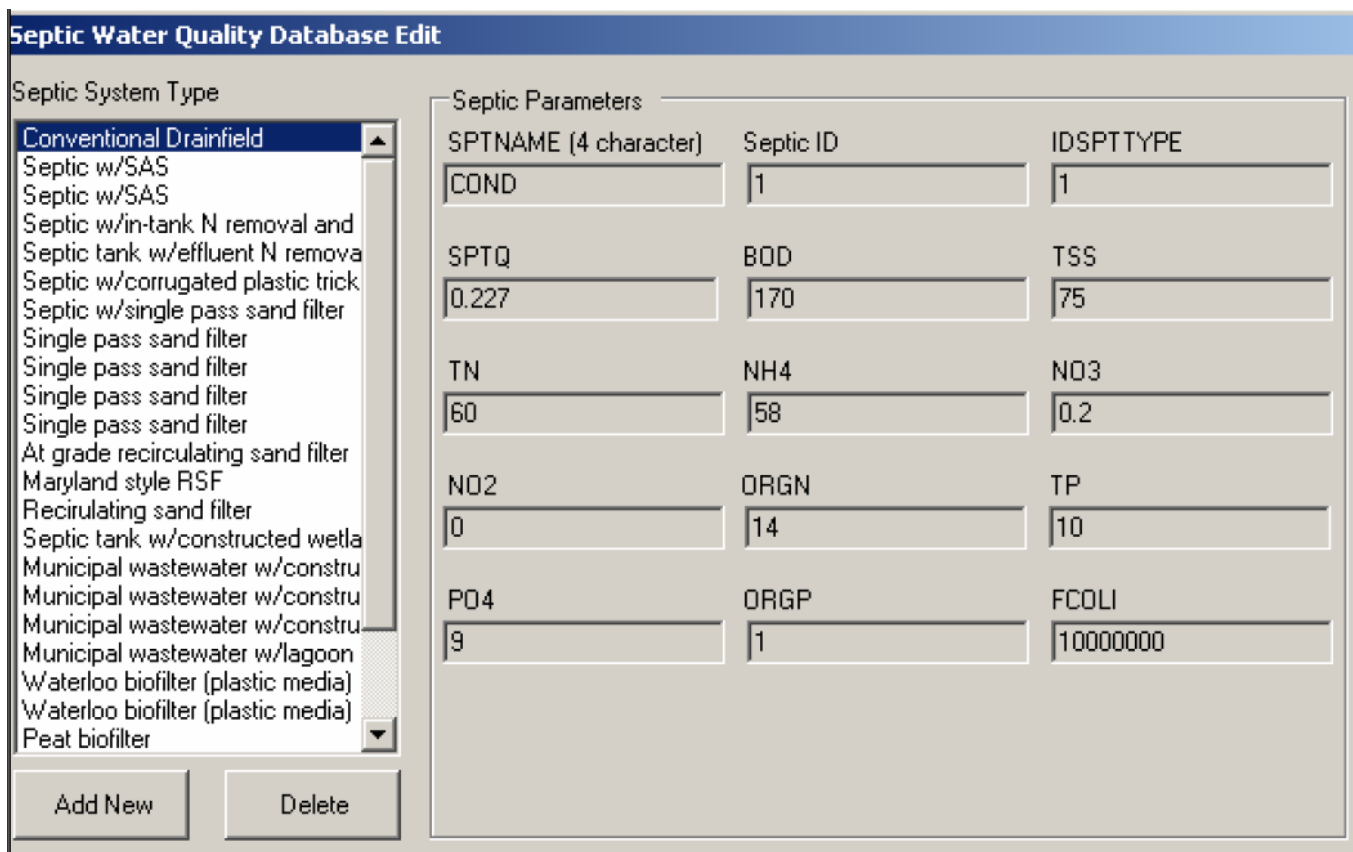
WLONGITUDE (deg) WLATITUDE (deg) RAIN_YRS (yrs) WELEV (m)

Monthly Weather Parameters

Parameter: 0

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec

Les paramètres d'entrée relatifs à la qualité de l'eau :



Septic Water Quality Database Edit

Septic System Type

Conventional Drainfield

Septic w/SAS
Septic w/SAS
Septic w/in-tank N removal and
Septic tank w/effluent N remova
Septic w/corrugated plastic trick
Septic w/single pass sand filter
Single pass sand filter
Single pass sand filter
Single pass sand filter
Single pass sand filter
At grade recirculating sand filter
Maryland style RSF
Recirculating sand filter
Septic tank w/constructed wetla
Municipal wastewater w/constru
Municipal wastewater w/constru
Municipal wastewater w/constru
Municipal wastewater w/lagoon
Waterloo biofilter (plastic media)
Waterloo biofilter (plastic media)
Peat biofilter

Septic Parameters

SPTNAME (4 character)	Septic ID	IDSPTTYPE
COND	1	1
SPTQ	BOD	TSS
0.227	170	75
TN	NH4	NO3
60	58	0.2
NO2	ORGN	TP
0	14	10
PO4	ORGP	FCOLI
9	1	10000000

Add New Delete

Annexe E :

Exemples de fichiers de sortie de STICS et SWAT

Exemple de fichier de sortie de STICS (*N.Brisson et al, 2002*)

Bilan de la simulation STICS 5.0, modèle culture

1. DONNEES d'ENTREE

```
Fichier climatique           : climblej.94
Fichier techniques culturales : ble.tec
Fichier plante              : ..\ble.plt          Variété :Talent
Valeurs initiales du sol    : solble
    Eau (% sol sec)      NO3 (kg/ha)      NH4 (kg/ha)
        3.0                3.1                .0
        5.0                2.9                .0
       12.0                4.0                .0
       12.0                .0                 .0
       12.0                .0                 .0
```

```
Début de simulation : 17-oct-1994      jour 290
Fin de simulation   : 1-dec-1995      jour 335      (ou 700)
```

Irrigation: Nombre d'arrosages= 5

date des arrosages	dose (mm)
-----	-----
10-may-1995	22.
7-jun-1995	16.
17-jun-1995	21.
25-jun-1995	21.
30-jun-1995	29.
Quantité totale apportée: 109. mm	

Fertilisation: Nombre d'apports= 3

date des apports N	dose (kg N/ha)
-----	-----
21-feb-1995	60.
23-mar-1995	120.
27-apr-1995	120.
Quantité totale apportée: 300.	

Résidus organiques et/ou travail du sol

Résidus de type 1 jour 297 sur 22.cm MF= 2.0 t/ha C/N= 60.

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

```
type           : plante de jours longs
unité de développement : vernalo-photo-thermique
température considérée : température de culture
```

stade	date	unités	unités cumulées
depuis le semis	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----
sowing	24-oct-1994	0.	0.
stades végétatifs			
lev calcul.	3-nov-1994	59.	59.

amf calcul.	26-mar-1995	247.	306.
lax calcul.	8-may-1995	268.	575.
lan calcul.	20-jul-1995	1098.	1673.
stades remplissage			
flo calcul.	28-may-1995	753.	753.
drp calcul.	28-may-1995	0.	753.
mat calcul.	11-jul-1995	723.	1476.
rec calcul.	1-aug-1995	477.	1952.

durée du cycle 280 jours
 Mode de récolte : moisson
 Récolte en fonction de la teneur en eau

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Le : 1-aug-1995

Biomasse aérienne récolte (0 % eau)	=	23.25 t/ha
Rendement grains,fruits (0 % eau)	=	9.02 t/ha
Rendement grains,fruits (14.% eau)	=	10.46 t/ha
Nombre de grains,fruits	=	23258. /m2
Indice de récolte	=	.39
Densité de plantes	=	311.0 /m2
Poids du grain,fruit (14.% eau)	=	.045 g
Vit. de croissance (phase latence)	=	26.27 mg/m2/j
Nombre de feuilles émises	=	12
Nombre de jours échaudants ou froids	=	2

Biomasse aérienne sénescence (0 % eau)= 1.63t/ha

Quantité N dans la culture	=	259. kg/ha
Quantité N dans les grains,fruits	=	200. kg/ha
Teneur en N plante entière	=	1.11 % MS
Teneur en N grains,fruits	=	1.82 % MS
Efficiencia de l'engrais (CRU)	=	.91

Composition de la matière fraîche des grains/fruits

Teneur en matière sèche	=	86.31 % MF
Teneur en azote	=	1.57 % MF
Teneur en sucre	=	.00 % MF
Teneur en huile	=	.00 % MF

Résidus pour la culture suivante : pailles
 quantité = 15.4 t/ha C/N =102.

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM	=	487. mm
Somme ETR	=	487. mm
Somme ES	=	215. mm
Somme TR	=	272. mm
Somme P	=	651. mm
Réserve en eau maximale utilisée	=	110. mm
Front racinaire maxi à	=	120. cm

Indices moyens de STRESS :		swfac	turfac	inns	tcult-tair	
exofac						
phase végétative	(lev-drp)	1.00	1.00	1.00	.02	.00
phase reproductrice	(drp-mat)	1.00	.99	.92	.05	.00

dégats de gel du feuillage : avant AMF 1.83 après AMF .00
dégats de gel des fleurs ou fruits .00

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (411 jours)

Jours normalisés à 15.°C Humus: 274. Résidus: 174.

	ENTREES		SORTIES
EAU (mm)			
pluie	697.	évaporation	343.
irrigation	109.	transpiration	272.
remontées	0.	ruissellement	0.
		infiltration profonde	32.
		drainage agricole	0.
		interception feuille	0.
		interception mulch	0.
		irrigat non efficace	0.
Stock eau initial	194.	Stock eau final	354.
-----		-----	
TOTAL	1001.	TOTAL	1001.

AZOTE (kg/ha)			
pluie	14.	exportation culture	196.
irrigation	0.	restitution culture	64.
engrais	300.	lixiviation	0.
fixation symbiot.	0.	organisation engrais	60.
minéralis. humus	111.	volat+dénit. engrais	9.
minéralis. résidus	-12.	volat. amendements	0.
		dénitrification	0.
N plante initial	0.	lixiviation drains	0.
NO3 sol initial	10.	NO3 sol final	97.
NH4 sol initial	0.	NH4 sol final	0.
-----		-----	
TOTAL	423.	TOTAL	425.

Exemple de fichier de sortie de SWAT (M.Winchell et al, 2010)

output.std - Notepad

File Edit Format View Help

```

SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT interface AV
Number of years in run: 2
Area of watershed: 419.170 km2
SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT interface AV
Annual summary for watershed in year 1 of simulation

```

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	Sw (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC nutrient/ha	N SOLUBLE	P
1	31.18	0.20	0.02	0.00	0.00	0.00	129.18	19.35	66.68	0.20	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
2	84.19	12.02	0.15	0.00	0.00	0.00	166.50	34.21	77.04	11.97	1.06	0.06	0.02	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00
3	83.25	9.40	0.18	0.13	0.95	0.00	188.00	51.73	121.66	9.57	0.95	0.03	0.01	0.21	0.00	1.22	0.00	0.00
4	62.53	4.79	0.11	0.80	1.64	0.00	186.97	58.36	164.94	5.57	0.39	0.01	0.00	0.38	11.23	0.51	0.00	0.00
5	64.23	12.59	0.13	0.99	1.23	0.00	156.06	83.88	199.56	13.61	0.07	0.03	0.00	0.14	45.98	0.11	0.00	0.00
6	93.51	9.86	0.17	1.24	1.58	0.00	101.32	138.85	237.24	11.11	0.00	0.02	0.00	0.09	6.67	0.01	0.00	0.00
7	90.14	0.87	0.14	0.71	0.00	0.00	45.84	146.63	237.44	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00
8	61.69	0.16	0.12	0.25	0.00	0.00	20.14	90.03	237.68	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00
9	78.39	3.10	0.17	0.09	0.00	0.00	27.84	69.07	209.56	3.31	0.00	0.01	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00
10	40.69	0.05	0.09	0.04	0.00	0.00	31.34	38.76	164.48	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
11	125.39	5.22	0.26	0.01	0.00	0.00	107.83	42.09	100.07	5.27	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
12	125.10	12.91	0.24	0.12	2.90	0.00	189.36	25.92	54.88	13.02	0.02	0.13	0.01	0.21	0.00	0.05	0.01	0.01
1977	940.27	71.18	1.77	4.37	8.30	0.00	189.36	798.891871.23	75.97	2.52	0.34	0.06	1.04	66.17	3.40	0.02	0.02	0.02

```

SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT interface AV
Annual summary for watershed in year 2 of simulation

```

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	Sw (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC nutrient/ha	N SOLUBLE	P
1	116.25	33.05	0.34	3.48	18.46	0.00	216.18	36.77	67.52	36.58	0.19	0.26	0.01	3.85	0.00	0.34	0.02	0.02
2	57.11	24.00	0.13	9.27	12.49	0.00	212.44	24.83	69.39	33.28	0.11	0.27	0.01	2.44	1.07	0.21	0.02	0.02
3	68.00	22.22	0.08	10.37	4.15	0.00	208.12	46.61	193.01	32.60	0.72	0.21	0.00	0.23	3.71	1.08	0.01	0.01
4	178.51	88.12	0.24	8.91	18.29	0.00	208.51	70.14	185.21	97.11	2.27	0.32	0.00	1.70	13.07	3.28	0.03	0.03
5	56.11	14.77	0.11	9.60	0.24	0.00	166.60	85.91	199.93	24.40	0.05	0.04	0.00	0.00	5.50	0.08	0.01	0.01
6	126.58	39.56	0.20	6.46	5.45	0.00	139.84	109.09	222.26	46.04	0.20	0.09	0.00	0.00	1.96	0.31	0.01	0.01
7	111.84	20.04	0.18	4.33	1.30	0.00	106.64	124.98	245.61	24.47	0.03	0.04	0.00	0.00	1.62	0.04	0.00	0.00
8	31.88	0.26	0.08	1.51	0.00	0.00	51.17	90.71	253.50	1.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00
9	83.03	8.29	0.11	0.51	0.00	0.00	77.34	50.38	215.82	8.86	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01
10	33.42	0.57	0.11	0.21	0.00	0.00	75.50	36.50	157.62	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
11	79.10	4.48	0.15	0.15	0.60	0.00	110.36	38.93	115.92	4.67	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
12	121.07	26.01	0.22	0.54	3.85	0.00	172.77	26.68	60.29	26.62	0.55	0.08	0.01	0.04	0.00	0.80	0.01	0.01
1978	1062.88	281.38	1.93	55.33	64.83	0.00	172.77	741.521986.08	337.35	4.16	1.39	0.04	8.27	27.69	6.23	0.11	0.11	0.11