

Un modèle simplifié pour l'estimation du bilan hydrique et du rendement de cultures céréalières en milieu semi-aride

Duchemin B.^(1,2), Boulet G.⁽¹⁾, Maisongrande P.⁽¹⁾, BenHadj I.⁽¹⁾, Hadria R.⁽²⁾, Khabba S.⁽²⁾, Chehbouni A.⁽¹⁾, Ezzahar J.⁽²⁾, A. Olioso⁽³⁾

⁽¹⁾ CESBIO – 18 avenue. Edouard Belin, bpi 2801,31401 Toulouse cedex , France

⁽²⁾ FSS – Faculté des Sciences Semlalia, BP. 2390, Marrakech, Maroc

⁽³⁾ INRA Climat, Sol et Environnement, Domaine St Paul, Site Agroparc F-84 914 Avignon Cedex 9

*Corresponding author : Benoît Duchemin

CESBIO, Centre D'Etudes Spatiales de la Biosphère (bpi 2801)

18 avenue. Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9

Tél : 00.33.5.61.55.85.01

Fax : 00.33.5.61.55.85.00

Mèl : duchemin@ird.fr.

Abstract

The FAO-56 method to calculate crop actual evapotranspiration (AET) was adapted and coupled with a model that simulates plant development and growth. The resulting model (SAFYE: Simple Algorithm for Yield and Evapotranspiration estimates) was tested against data collected on four irrigated wheat fields in the semi-arid Marrakech plain. Two sets of parameters were identified, a first one provided by previous wheat experiments and modelling described in the literature, a second one resulting from an additional calibration of some equations that drive the water transfer in the soil-vegetation-atmosphere system. Depending on the field and the parameter set, SAFYE simulates AET with a root mean square error ranging from 0.36 to 1.72 mm/day, while observed and simulated soil moisture always correlates, though moderately. This study show how the accuracy of simulations is improved after calibration (mean AET error of 0.62 mm/day). These performances appear acceptable regarding the low complexity of the SAFYE model, which would facilitate its coupling with remote sensing data for providing decision makers with spatial estimates of crop water needs and actual evapotranspiration in order to improve the management of agricultural water at a regional scale.

I. Introduction

En milieux arides et semi-arides, les enjeux de ce que l'on désigne aujourd'hui par le développement durable rendent nécessaire d'établir un diagnostic de l'utilisation des ressources hydrique et végétale à des échelles spatio-temporelles synoptiques (région, saison). La modélisation est un outil privilégié pour appréhender les problèmes complexes posés par la conduite des agroécosystèmes (Malézieux et al. 2001). L'utilisation conjointe de modèles de cultures et de données de télédétection, régulièrement distribuées dans l'espace et le temps, est une voie de recherche particulièrement dynamique pour la mise en place d'observatoires de la ressource en eau et des systèmes de production agricole à l'échelle régionale (Moulin et al. 1998, Guéris et al. 2001, Boegh et al. 2004, Mo et al. 2005).

La modélisation des agroécosystèmes trouve son origine dans les premiers travaux sur la photosynthèse et la respiration de plantes en conditions optimales de croissance (de Wit et al. 1970, Monteith 1972). Depuis, de nombreux modèles agronomiques ont été développés, comme en témoignent les études comparatives de Jamieson et al. (1998), Olesen et al. (2002), Lipiec et al. (2003) ou Eitzinger et al. (2004). Les modèles n'ont par ailleurs cessé de se complexifier pour intégrer de plus en plus finement les connaissances sur les mécanismes et phénomènes influant sur le bilan agro-environnemental des cultures. Ils permettent de simuler les effets, combinés ou non, de la phénologie des organes végétatifs et reproductifs (Fenner 1998, Lawless et al. 2005), de la nutrition azotée (Lemaire and Gastal 1997, Limami et Améziane 1997, Olesen et al. 2002), des stress thermique (Porter and Gawith 1999) et hydrique (Jones and Tardieu 1998, Debaeke and Aboudrare 2004), de l'induration des sols (Hamza and Anderson 2005, Sadras et al. 2005), ou encore de

l'élévation de la concentration des gaz à effets de serre (van Oijen et al. 2004). La tendance est également à la mise au point de modèles qui prennent en compte explicitement les pratiques agricoles (Boote et al. 1996, Brisson et al. 2003).

L'étude des agroécosystèmes, objets complexes, impose au chercheur qui veut appréhender leur dynamique le respect de leur complexité intrinsèque. Cette « obligation méthodologique » (Legay 1999) pose cependant problème lorsque l'on entreprend des analyses synoptiques avec des modèles conçus pour être utilisés à l'échelle parcellaire (Vossen and Rikjs 1998). La principale difficulté est liée à l'existence d'un grand nombre de paramètres, par exemple 132 paramètres pour le modèle STICS (Ruguet et al. 2002, Brisson et al. 2003). Il est par conséquent nécessaire de recourir à des paramétrisations génériques, déterminées *a priori* et constantes pour une région, ce qui limite la précision des simulations (Wallach et al. 2002). De même, la spatialisation des modèles de cultures pose le problème de la détermination des variables d'entrées, et en particulier de celles associées à la gestion des exploitations (calendriers culturaux, irrigation, fertilisation, travail du sol) qui connaissent de fortes variations spatio-temporelles. A titre d'exemple, l'étude de Mo et al. (2005) repose sur l'hypothèse d'une fertilisation optimale et d'une irrigation uniforme sur une zone d'environ 90 000 km² ; les auteurs concluent que l'amélioration des prévisions du rendement nécessite l'intégration d'informations concernant les pratiques agricoles plus détaillées dans le temps et l'espace.

Les capteurs embarqués sur les satellites d'observation de la terre, qui fournissent régulièrement des données spatialisées, sont une source d'information privilégiée pour les études à l'échelle régionale. A ce titre, les mesures de réflectances acquises dans le domaine de longueur d'onde optique ont été particulièrement utilisées pour la détermination de variables biophysiques des couverts végétaux (Hall et al. 1995 ; Scotford and Miller 2005). Le potentiel opérationnel de ces données pour des applications agronomiques régionales est accru avec la conception de nouvelles missions spatiales autorisant des acquisitions à forte répétitivité temporelle (jour) et à haute résolution spatiale (10 m), comme ROCSAT (Chern et al. 2001) ou RHEA (Dedieu et al. 2003). Cependant, le nombre de variables biophysiques pouvant être déterminées par télédétection optique (voir la synthèse de Guérif et al. 2001 en tableau 1) reste faible par rapport au nombre de paramètres des modèles de cultures. De plus, les paramètres ne sont généralement pas totalement indépendants et plusieurs combinaisons peuvent résulter en des simulations acceptables pour une variable observée, alors que les autres variables simulées peuvent varier fortement et de manière incohérente. Il s'agit du problème d'équifinalité particulièrement étudié par S.W. Franks et K.J. Beven (e.g. Franks et al. 1997, Beven et al. 2001). Dans ce contexte, ces derniers auteurs préconisent la mise en oeuvre de modèles simplifiés, spécifiquement adaptés aux objectifs de l'étude et à la disponibilité des observations. Ces modèles permettent en effet d'obtenir une plus large dynamique spatiale d'un nombre de variables réduit, en comparaison de modèles complexes traitant la zone étudiée d'une manière homogène.

Le modèle que nous présentons dans cette étude a été développé dans cette dernière optique. En plaines arides et semi-arides, une proportion très importante de l'eau mobilisable est classiquement utilisée pour l'irrigation des systèmes de cultures, même si les volumes d'eau sont généralement faibles pour un événement de pluie ou d'irrigation particulier. Dans ces conditions, les termes de drainage profond et de ruissellement de surface sont limités, et l'eau est stockée dans les premiers horizons du sol et majoritairement restituée à l'atmosphère. Le principal terme de perte hydrique d'une parcelle agricole est alors associé aux processus adjoints de transpiration des couverts végétaux et d'évaporation des sols (évapotranspiration). La modélisation intégrée de la dynamique et de l'évapotranspiration des agrosystèmes est par conséquent un outil pertinent pour prévoir les besoins en eau des cultures et planifier les irrigations de manière optimale. Tel est l'objet du modèle SAFYE ('*Simple Algorithm For Yield and Evapotranspiration estimates*'). Le modèle est composé de deux modules qui opèrent au pas de temps journalier : croissance et développement des plantes et bilan hydrique sol-végétation. Le modèle comporte un nombre de paramètres limités (une trentaine environ), ce qui facilite son application à l'échelle régionale. Le module « plante » peut être facilement contrôlé à partir de données de télédétection optique, *via* l'indice de surface foliaire, une de ses variables clefs (Duchemin et al. 2005-a). Dans cet article, le module de bilan hydrique est évalué à partir de données expérimentales acquises sur blé irrigué en plaine de Marrakech/Al Haouz. Les perspectives d'applications sont brièvement évoquées en conclusion.

II. Description du modèle

Le modèle SAFYE repose sur le module de dynamique des cultures présenté dans [Duchemin et al. \(2005-a\)](#). Ce module a été développé avec le souci de prendre en compte les principaux processus de développement et croissance de plantes annuelles tout en limitant le nombre de paramètres nécessaires à leur description, ceci afin de faciliter la procédure de spatialisation. La dynamique de la végétation est appréhendée par la théorie des efficacités de [Monteith \(1972\)](#) pour la photosynthèse et la production de biomasse, complétée par les paramétrisations de [Maas \(1993\)](#) pour la phénologie et l'allocation des assimilats. Seule la partition feuille/non-feuille de la phytomasse produite est reproduite. Le modèle simule les évolutions temporelles de l'indice foliaire vert (observable par télédétection optique) et total, de la phytomasse aérienne sèche et du rendement en grain à partir de formalismes relativement simples (7 équations comportant 14 paramètres).

Dans cette étude, ce premier module est couplé à un second module de transfert hydrique sol-végétation-atmosphère. La simulation de la dynamique du couvert végétal permet d'évaluer « la demande », i.e. les besoins en eau du système sol-plante en terme d'évapotranspiration, tandis que la résolution du bilan hydrique du sol permet de caractériser « l'offre » et en particulier d'appréhender l'état de stress hydrique des plantes (horizon racinaire). Seuls les transferts verticaux sont appréhendés. Le sol est représenté par 2 réservoirs horizontaux « infinis » caractérisés par leurs réserves utiles, l'un superficiel (10 cm), l'autre profond (1 m). Ce dernier est lui-même scindé en deux réservoirs pendant la saison de culture, la partie supérieure représentant le réservoir racinaire. Seule l'eau contenue dans l'horizon superficiel est sujette à évaporation, tandis que l'eau peut-être prélevée dans les 2 premiers horizons pour la transpiration. Le calcul de l'évapotranspiration repose sur la méthode développée par la FAO pour le pilotage des irrigations ([Allen et al. 1998, Allen 2000](#)).

L'organigramme du modèle est présenté en figure 1. Le bilan hydrique est calculé, au pas de temps journalier, pendant une période précisée par l'utilisateur. Il s'applique à 2 ou 3 couches de sols en fonction de la présence ou non de racines, en considérant les horizons par ordre de profondeur croissante. Il comporte 3 étapes: 1) prise en compte de l'évolution du front racinaire au niveau des contenus en eau et des capacités des réservoirs racinaire et profond; 2) calcul des écoulements gravitaires associés aux éventuels excédents d'eau de pluie ou d'irrigation; 3) calculs des flux d'eau diffusifs. Les formalismes utilisés pour ces calculs sont détaillés ci-dessous. Sauf mention contraire, les variables sont exprimées en hauteur d'eau (mm).

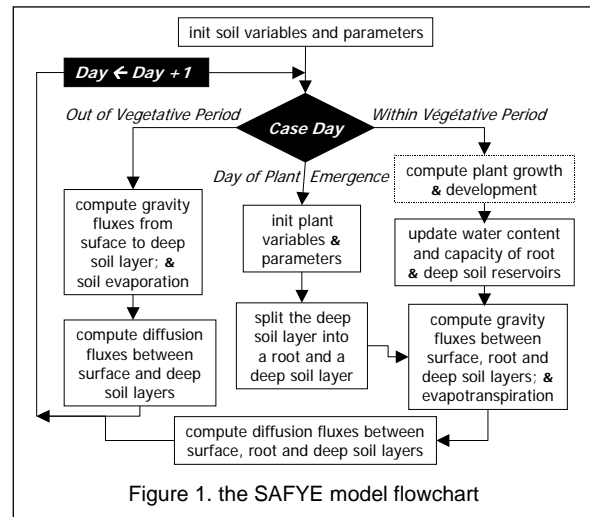


Figure 1. the SAFYE model flowchart

Le bilan hydrique de l'horizon superficiel est donné en équation 1. La mise à jour du contenu en eau du premier horizon de sol (CE_1) fait intervenir d'une part la pluie efficace (PE) et l'irrigation (I), d'autre part l'évaporation (E) et la transpiration (T.fts). La fraction d'eau prélevée dans l'horizon superficiel pour la transpiration (fts) est égale au rapport du contenu en eau du réservoir superficiel sur le contenu en eau des deux premiers réservoirs (superficiel et racinaire). On suppose ici que la plante prélève préférentiellement l'eau là où elle se trouve. Un terme de drainage profond (DP_1 , éq. 2) est calculé si le contenu en eau dépasse la capacité du réservoir (CP_1). La pluie efficace (PE, éq. 3) est une fraction du cumul journalier de pluie (P) fonction de l'indice foliaire total (IFT) d'après la formule de [Deardoff \(1978\)](#), limitée par la demande évaporative (évapotranspiration de référence ET_0).

$$CE_1(j) = CE_1(j-1) + PE(j) + I(j) - E(j) - T(j).fts \quad \text{éq.1}$$

$$DP_1 = \max [CE_1 - CP_1, 0] \quad \text{éq.2}$$

$$PE = P - \max [P \cdot (1 - 0.5^{\frac{IFT}{ET_0}}), ET_0] \quad \text{éq.3}$$

Le calcul de l'évapotranspiration est inspiré de la méthode "dual-crop coefficient" ([Allen et al. 1998, Allen 2000](#)). L'évaporation du sol (éq. 4) est évalué pour la surface non couverte par la végétation (1-COV) en fonction de la demande climatique (ET_0) et de l'humidité relative de l'horizon superficiel (HR_1), cette dernière étant définie comme le rapport entre le contenu et la capacité en eau

du réservoir. L'évaporation est réduite au cours d'un épisode d'assèchement *via* une fonction « β » qui approxime le comportement bilinéaire utilisé par R.G. Allen. La transpiration (éq. 5) est le produit de la demande climatique et d'un coefficient cultural (Kcb). Elle est éventuellement réduite en cas de stress hydrique. La fonction de stress Fs est bilinéaire et varie entre 0 (couvert complètement stressé) et 1 (absence de stress) à partir d'une humidité relative qualifiée de critique. Ce formalisme est classiquement rencontré dans la littérature (e.g. [Allen et al. 1998](#), [Brisson et al. 2003](#)). Il est appliqué à l'humidité relative des horizons superficiel et racinaire, le stress de la plante correspondant au résultat de cette fonction pour l'horizon le plus humide.

$$E = (1-COV) \cdot E_{To} \cdot (1-(1-HR_1)^\beta) \quad \text{éq.4}$$

$$T = Kcb \cdot E_{To} \cdot \max [Fs (HR_1), Fs (HR_2)] \quad \text{éq.5}$$

Pendant la saison de culture, l'horizon racinaire est limité inférieurement par la profondeur effective des racines (PR, en mètre), qui évolue au cours de la période végétative (éq. 6) en fonction d'une vitesse de croissance (Vpr) modulée par la température de l'air (Ta) et le stress hydrique (Fs, déduit de l'éq. 5). Son bilan hydrique (éq. 7 et 8) fait intervenir l'eau transpirée non prélevée dans le réservoir superficiel et le terme de drainage de l'horizon supérieur. Le contenu en eau disponible pour la transpiration (CE₂) est finalement comparé à la capacité du réservoir racinaire (CP₂) pour calculer l'éventuel excédent qui sera drainé vers le réservoir profond (DP₂).

$$PR (j) = PR (j-1) + Ta \cdot Fs \cdot Vpr \quad \text{éq.6}$$

$$CE_2 (j) = CE_2 (j-1) + DP_1 - T(j) \cdot (1-fs) \quad \text{éq.7}$$

$$DP_2 = \max [CTW-TTW, 0] \quad \text{éq.8}$$

L'horizon profond correspond à un réservoir de stockage. Il est connecté à l'horizon racinaire (bilan hydrique en éq. 9B) ou superficiel (bilan hydrique en éq. 9A) en fonction de la présence ou non d'un couvert végétal. L'eau excédentaire (DP₃, éq. 10), calculée en comparant le contenu en eau (CE₃) et la capacité (CP₃) du réservoir profond, est définitivement perdue pour le système sol-plante.

$$CE_3 (j) = CE_3 (j-1) + DP_1 \quad \text{éq.9A}$$

$$CE_3 (j) = CE_3 (j-1) + DP_2 \quad \text{éq.9B}$$

$$DP_3 = \max [CE_3 - CP_3, 0] \quad \text{éq.10}$$

L'écoulement de l'eau excédentaire est de type gravitaire et tous les termes de drainage associés (DP_x) sont appliqués instantanément. En complément, l'application d'une loi de transfert par diffusivité adaptée de [Devonec and Barros \(2002\)](#) permet de finaliser la mise à jour des contenus en eau de chacun des réservoirs (éq. 11). Cette loi propose de calculer les flux hydriques diffusifs Φ_{XY} entre 2 horizons X et Y en fonction de leur gradient d'humidité volumique ($W_X - W_Y$) rapporté à l'humidité à la capacité au champ (W_{CC}). Elle autorise notamment la restitution en fin de saison culturale du stock d'eau éventuellement constitué au cours de celle-ci dans l'horizon profond. Elle est appliquée entre les réservoirs superficiel et profond en l'absence de végétation (éq. 11A), ou dans le cas contraire entre les réservoirs superficiel et racinaire, puis racinaire et profond (éq. 11B et 11C).

$$\Phi_{13} = K_{dif} [(W_1 - W_3) / W_{CC}]^{E_{dif}} \quad \text{éq. 11A}$$

$$\Phi_{12} = K_{dif} [(W_1 - W_2) / W_{CC}]^{E_{dif}} \quad \text{éq. 11B}$$

$$\Phi_{23} = K_{dif} [(W_2 - W_3) / W_{CC}]^{E_{dif}} \quad \text{éq. 11C}$$

III. Mise en oeuvre du modèle

III.1. Données expérimentales

Le modèle est évalué à partir de données acquises sur 4 parcelles de blé dur irrigué pendant 2 saisons agricoles (2002 à 2004). La zone d'étude est située dans la plaine semi-aride du Haouz, à 40 km à l'est de Marrakech. Les campagnes expérimentales, détaillées dans [Duchemin et al. \(2005-b\)](#) et [Hadria et al. \(2005\)](#), ont permis de mesurer l'indice foliaire et l'humidité du sol (mesure gravimétrique et sondes TDR, i.e. Réflectométrie dans le Domaine Temporel), ainsi que les flux radiatif, énergétique et hydrique à l'interface sol-plante-atmosphère. L'évapotranspiration de référence (E_{To} dans les éq. 3 à 5) a été déterminée à partir de données climatiques collectées à proximité des parcelles d'étude par une station météorologique standard.

III.2. Couplage au module plante

Cette étude portant sur l'évaluation du module de bilan hydrique, le module de croissance et développement aérien de la plante est désactivé. Le modèle est forcé par les simulations de l'indice foliaire (IF) présentées par [Duchemin et al. \(2005-a\)](#). Ce forçage intervient directement dans le calcul de l'interception des pluies (éq. 3, faisant intervenir l'indice foliaire total IFT) et indirectement dans le calcul de l'évaporation (détermination du taux de couverture du sol par la végétation COV, en éq. 4) et de la transpiration (détermination du coefficient cultural Kcb, en éq. 5). La relation entre indice foliaire vert (IFV) et Kcb (éq. 12) est discutée dans [Duchemin et al. \(2005-b\)](#). La relation entre IF et COV (éq. 13) a été établie par analyse de photographies hémisphériques (d'après [Welles and Norman 1991](#)).

$$Kcb = Kcb_Max (1 - e^{-0.84 IFV}) \quad \text{éq. 12}$$

$$COV = 0.95 (1 - e^{-0.53 IFV}) . (IFV+IFT) / (2 . IFT) \quad \text{éq. 13}$$

III.3. Paramètres de base du module sol

Le sol a une profondeur totale de 1 m, déterminée à partir des observations de terrain. L'épaisseur de l'horizon superficiel et la profondeur du front racinaire à la levée des plantules ont été respectivement fixées à 10 et 20 cm. La vitesse de croissance de ce dernier a été optimisée pour que la profondeur des racines atteigne la valeur de 50 cm observée au champ en fin de saison culturale.

Les points d'humidités remarquables des sols ont été dans un premier temps inversés d'après la texture (argilo-limoneuse) de ceux-ci, en utilisant les fonctions de pédo-transfert proposées par [Wosten \(1997\)](#). Les humidités sont bornées par les valeurs à la capacité au champ et au point de flétrissement, respectivement évaluées à 0.34 et 0.21 m³/m³. L'humidité minimale de l'horizon superficiel est prise égale à la moitié du point de flétrissement (d'après [Allen et al. 1998](#)). Dans un deuxième temps ces humidités ont été recalées à partir des observations d'humidités de terrain (mesures par gravimétrie) pour éviter la présence de biais systématique entre valeurs simulées et observées. Ceci n'a que très peu d'influence sur la simulation de l'évapotranspiration qui est avant tout contrôlée par la différence entre humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement (définissant la réserve utile). Or, cette différence ne varie généralement que peu ; pour les 4 parcelles d'étude et après recalage, elle est restée identique à celle correspondant aux valeurs initiales (0.34-0.21 = 0.13 m³/m³). Les simulations débutent en fin de saison sèche (au 15/10). Les sols sont alors supposés totalement secs et leurs humidités initialisées aux limites inférieures discutées ci-dessus.

III.4. Détermination des paramètres additionnels

A l'issue de cette première analyse, 5 paramètres restent inconnus : le coefficient de réduction de l'évaporation (β , éq. 4), la valeur maximale du coefficient cultural associé à la transpiration (éq. 5 et 12), le point d'humidité critique déterminant le début de stress des plantes (éq. 5), et les paramètres associés au processus de transferts diffusifs de l'eau entre les différents horizons de sol (éq. 10). Deux jeux de paramètres ont été testés (tableau 1) : le premier est tiré de références bibliographiques, le deuxième est obtenu par étalonnage du modèle. Dans le deuxième cas, le modèle est étalonné en utilisant l'évapotranspiration comme variable cible et la procédure d'optimisation développée par [Vrugt et al. \(2002\)](#). Il s'agit d'une minimisation de l'écart entre évapotranspiration simulée et observée en considérant toutes les données acquises durant une saison de culture. L'étalonnage repose sur les données acquises sur la parcelle dénommée 'C3' dans [Duchemin et al. \(2005-a\)](#) et 'F' dans [Duchemin et al. \(2005-b\)](#). Les 3 autres parcelles sont utilisées pour la validation.

Tableau 1. Paramètres du modèle SAFYE

Description	Symbole	Unité	Valeurs Bibliographiques	Valeurs Etalonnées
Coefficient de réduction de l'évaporation	β	sans unité	1.9 (Allen et al. 1998)	0.98
Coefficient cultural maximal associé à la transpiration du couvert	Kcb_Max	sans unité	1.07 (Duchemin et al. 2005)	0.92
Point d'humidité critique associé au début du stress de la plante		% de la réserve utile [0-1]	0.5 (Allen et al. 1998)	0.4
Coefficient de diffusivité	Kdif	mm/j	0.27 (Devonnec and Barros 2002)	175.15
Exposant de diffusivité	Edif	sans unité	1 (Devonnec and Barros 2002)	3.18

III.5. Exemple de simulation

La figure 2 donne à titre d'exemple les trajectoires des principales variables d'entrées et de sorties du modèle SAFYE sur la parcelle d'étalonnage. Les évolutions temporelles des variables descriptives du couvert végétal (fig. 2b) sont ici imposées par celles de l'indice foliaire vert, lui-même déduit de mesures radiométriques effectuées dans l'optique à l'aide d'un radiomètre de terrain (cf. [Duchemin et al. 2005-b](#)). Le modèle calcule l'évaporation du sol et la transpiration du couvert (fig. 2c) en fonction de l'évapotranspiration de référence (fig. 2c) et des contenus en eau des réservoirs superficiels (fig. 2d) et racinaires (fig. 2e). On notera la complémentarité des capacités des réservoirs racinaire et profond pendant la saison de culture (fig. 2e et 2f), ainsi que les évolutions corrélées des apports d'eau (fig. 2a) et des contenus en eau des différents réservoirs (fig. 2d à 2f).

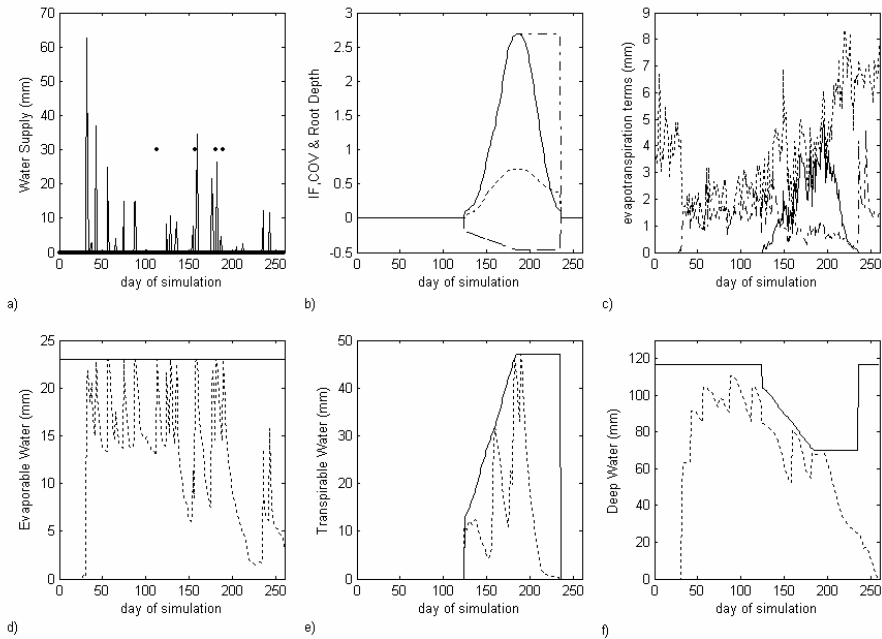


Figure 2. Exemple d'entrées/sorties du modèle SAFYE : a) pluies (barres) et irrigations (points) ; b) profondeur racinaire (---), taux de couverture (- - -), indice foliaire vert (—) et total (- - -) ; c) évaporation de référence (- - -), évaporation (- - -) et transpiration (—) réelles ; d) à f) capacités (—) et contenus (- - -) en eau des réservoirs superficiel (d), racinaire (e) et profond (f).

IV. Evaluation du modèle

Les évolutions temporelles de l'évapotranspiration et des humidités du sol simulées et observées sur la parcelle d'étalonnage sont données en figures 3 (paramètres bibliographiques) et 4 (paramètres étalonnés). Dans les 2 cas, les simulations sont dans la gamme de variation des observations, mais l'amélioration associée à l'étalonnage du modèle est nette. L'utilisation de la valeur bibliographique du coefficient maximal de transpiration entraîne une surestimation de l'évapotranspiration en milieu de saison (comparer les figures 3a et 4a). La relation établie dans [Duchemin et al. \(2005-b\)](#) surestime probablement la valeur de ce coefficient lorsque le couvert végétal est bien établi. D'autre part, l'ajustement des paramètres associés aux transferts diffusifs dans le sol permet de mieux restituer la décroissance de l'évapotranspiration en fin de saison (figures 3a et 4a) ainsi que la dynamique des humidités des horizons superficiel (figures 3b et 4b) et profond (figures 3d et 4d). L'hypothèse de [Devonec and Barros \(2002\)](#), qui considère un flux diffusif proportionnel au gradient d'humidité ($Edif=1$ en éq. 11), semble ne pas être adaptée à notre cas d'étude.

Ces tendances sont confirmées sur les parcelles de validation (tableau 2 et figure 5). La précision des estimations, mesurée par l'erreur quadratique moyenne, varie respectivement de 0.88 à 1.72 mm/j et de 0.36 à 1.06 mm/j lorsque les jeux de paramètres bibliographiques et étalonnés sont utilisés dans les simulations. L'amélioration associée à l'étalonnage est également visible sur tous les autres critères statistiques permettant la comparaison des évapotranspirations simulées et observées: augmentation des efficacités de prévisions et des coefficients de corrélation, diminution des biais (tableau 2) ; pente des droites de régression se rapprochant de 1 (fig. 5). Le gain sur la simulation des évaporations, en cumul sur la période de mesure, est significatif, en particulier pour les parcelles de validation 1 et 2 (tableau 3).

La figure 6 permet en dernier lieu de juger la performance du modèle en terme de restitution des humidités du sol. Les valeurs simulées et observées sont toujours, quoique modérément, corrélées (coefficients de détermination R^2 de 0.38 à 0.57). L'effet de l'étalonnage est en première analyse moins visible que pour les évapotranspirations : on constate une légère amélioration de la corrélation pour les horizons superficiel (fig. 6a et 6b) et racinaire (fig. 6c et 6d), alors qu'apparaît une dégradation pour l'horizon profond (fig. 6e et 6f). Cependant, les dynamiques semblent mieux rendues lorsque le jeu de paramètres étalonné est utilisé (droites de régression se rapprochant de la 1^{ère} bissectrice). Ceci est particulièrement net lorsque l'on procède à l'examen des nuages de points associés à chacune des parcelles sur les simulations des humidités de l'horizon profond (fig. 6e et 6f).

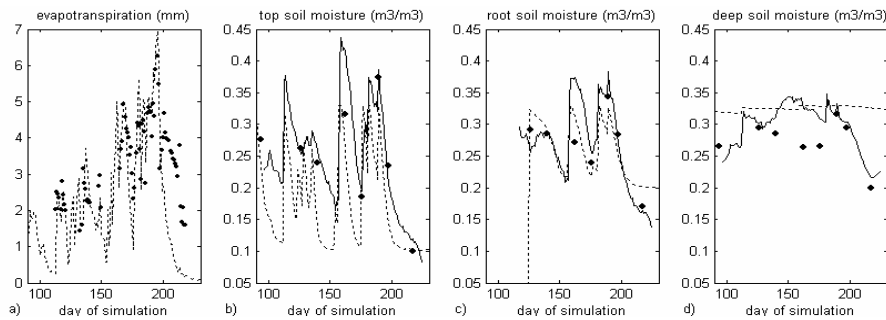


Figure 3. Evolutions temporelles simulées (trait pointillés) et mesurées de l'évapotranspiration (a) et de l'humidité (points = mesures gravimétriques, traits pleins=sondes TDR) des horizons superficiel (b), racinaire (c) et profond (d). La simulation est effectuée sur la parcelle d'étalonnage avec le jeu de paramètres bibliographiques.

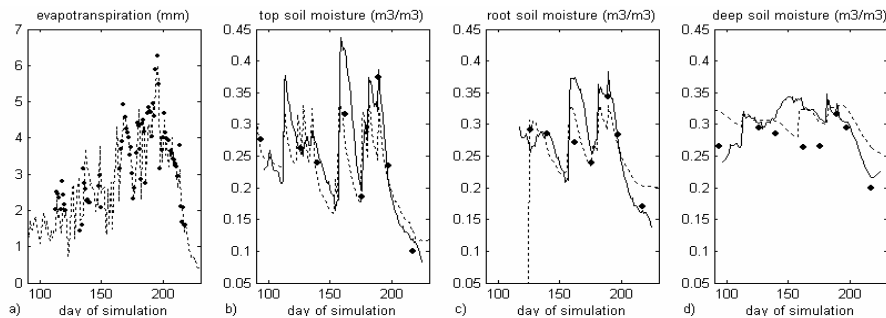


Figure 4. Figure équivalente à la figure 3 pour la simulation effectuée avec le jeu de paramètres étalonnés.

Tableau 2. Statistiques entre évapotranspirations observées et simulées : jeu de paramètres bibliographique versus (vs) étalonné

Parcelle	Nombre d'observations	Période de mesure	Erreur quadratique moyenne (mm/j)	Efficience	Coefficient de corrélation	Biais (mm/j)
Etalonnage	73	Cycle Complet	1.35 vs 0.44	-0.51 vs 0.84	0.85 vs 0.96	-0.59 vs -0.09
Validation 1	147	Cycle Complet	0.88 vs 0.63	0.28 vs 0.64	0.92 vs 0.92	-0.30 vs 0.04
Validation 2	68	Maturité-Sénescence	1.72 vs 1.06	-1.46 vs 0.06	0.66 vs 0.77	-0.46 vs 0.31
Validation 3	44	Maturité	1.01 vs 0.36	-0.05 vs 0.87	0.87 vs 0.97	0.19 vs 0.18

V. Conclusion

Les performances du modèle SAFYE pour simuler le fonctionnement hydrique de parcelles de blé irrigué en milieu semi-aride sont acceptables en regard de la complexité du modèle (pas de temps journalier, description simplifiée des transferts hydriques, nombre de paramétrisations limité). Les perspectives d'application, associées à l'utilisation de données satellite, concernent principalement l'étude de l'irrigation des systèmes cultivés à l'échelle régionale. Elles se déclinent en : 1) La prévision des besoins en eau des cultures, dont la connaissance est indispensable pour une distribution optimale de l'eau d'irrigation ; 2) L'estimation de l'évapotranspiration réelle, et la partition de ce terme entre évaporation du sol et transpiration de la plante, nécessaire pour établir le lien avec la production végétale et mesurer l'efficience des systèmes d'irrigation ; 3) L'évaluation des volumes d'eau mobilisés pour l'irrigation, en discernant leur provenance : eaux des barrages ou eaux souterraines ?

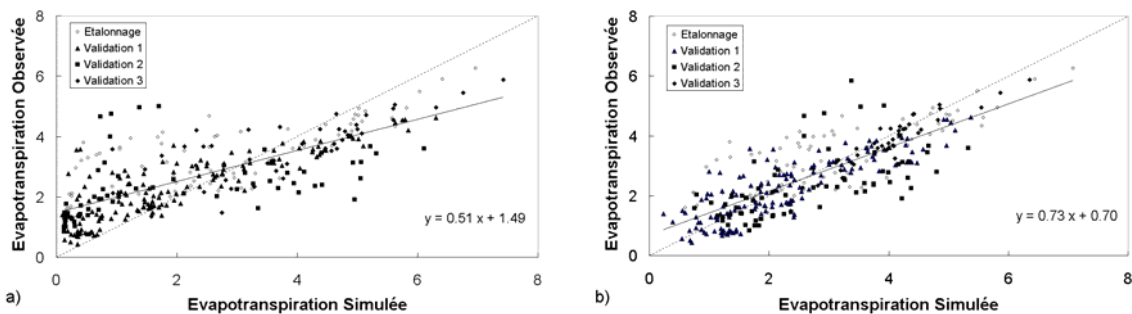


Figure 5. Evapotranspirations simulées et observées sur les 4 parcelles d'étude (en mm/j), pour les jeux de paramètres bibliographiques (a) et étalonnés (b). 1^{ère} bissectrices et droites de régression dérivées des nuages de points (équations associées en bas à droite de chaque graphe) apparaissent respectivement en traits pointillés et pleins.

Tableau 3. Evapotranspiration observées et simulées sur les 4 parcelles d'étude. Les valeurs sont cumulées sur la période de mesure.

	jeu de paramètres bibliographique				jeu de paramètres étalonné				
	Etalonnage	Validation 1	Validation 2	Validation 3	Etalonnage	Validation 1	Validation 2	Validation 3	
Simulation	202.7	284.2	127.8	169.1	Simulation	223.9	335.1	180.7	168.8
Observation	245.5	329.8	159.3	160.8	Observation	245.5	329.8	159.3	160.8
Différence (%)	19.10	14.84	21.95	-5.02	Différence	9.22	-1.60	-12.58	-4.87

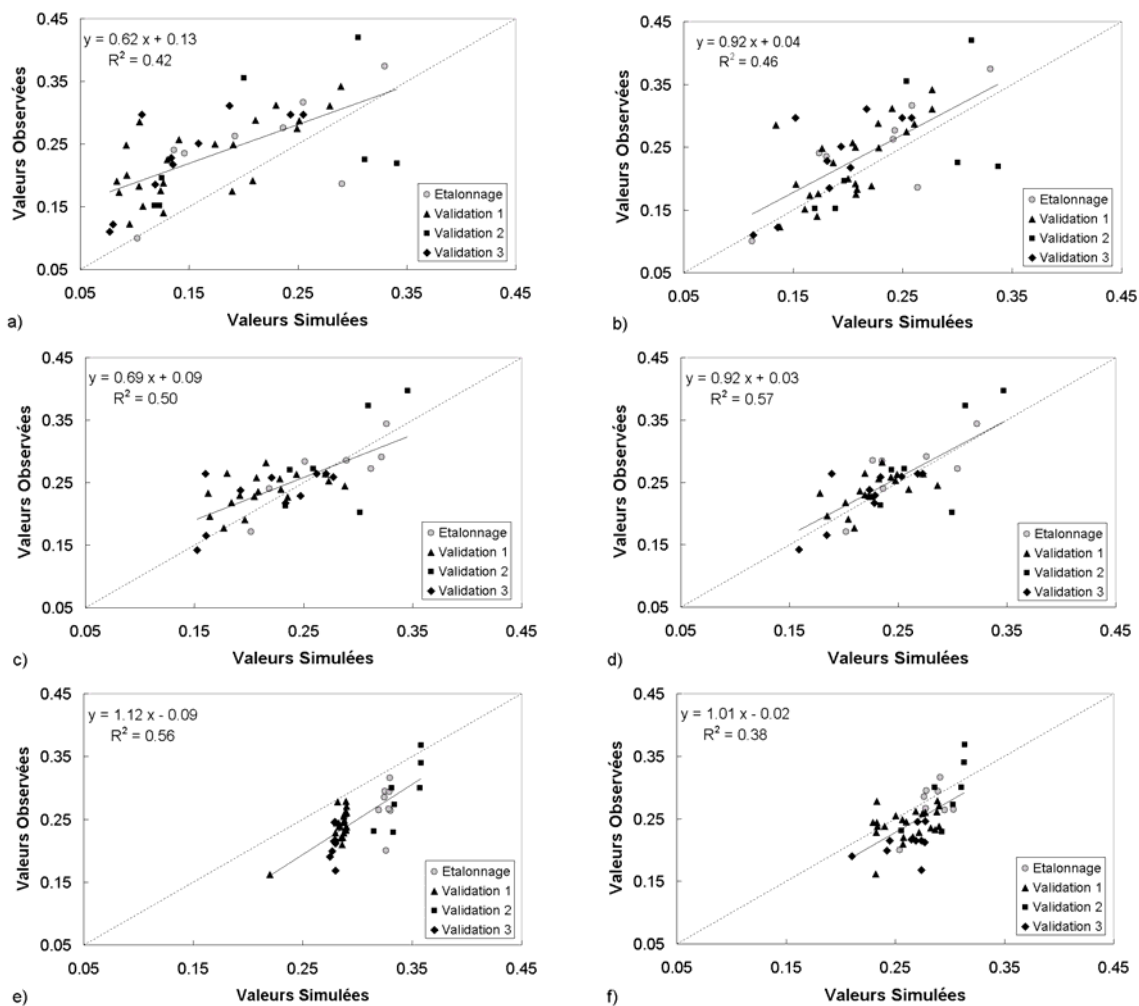


Figure 6. Humidités volumiques simulées et observées sur les quatre parcelles d'étude (en m³/m³). La comparaison porte sur les horizons superficiel (en haut), racinaire (au milieu) et profond (en bas). Les graphes de gauche et de droite correspondent respectivement aux simulations effectuées avec les jeux de paramètres bibliographiques et étalonnés. 1^{ère} bissectrices et droites de régression dérivées des nuages de points apparaissent respectivement en traits pointillés et pleins. Les équations et coefficients de détermination associés aux droites de régression sont mentionnés en haut à gauche de chaque graphe.

Remerciements

Cette étude est conduite dans le cadre du projet SudMed mené conjointement par l'IRD ('Institut de Recherche pour le Développement', www.ird.fr), le CESBIO ('Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère', Toulouse, France, www.cesbio.ups-tlse.fr) et la FSS ('Faculté des Sciences Semlalia', Marrakech, Maroc, www.ucam.ac.ma). Elle a bénéficié de financements du programme Européen IRRIMED (www.irrimed.org). Elle est soutenue par le Programme National de Télédétection Spatiale du CNRS et l'initiative ISIS ('Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT') du CNES. Les auteurs ont apprécié le concours des offices régionaux chargés de la gestion de l'eau en plaine de Marrakech, et en particulier celui de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz. Les auteurs remercient les personnes ayant participé aux expériences de terrain.

Références

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Rome, 300pp.*
- Allen R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology 229:27-41.*
- Beven K., Musy A., C. Higy (2001). Tribune Libre : L'unicité de lieu, d'action et de temps. *Revue des Sciences de l'Eau 14:525-533.*
- Boegh E., Thorsen M., Butts M.B., Hansena S., Christiansen J.S., Abrahamsen P., Hasager C.B., Jensen N.O., Van der Keur P., Refsgaard J.C., Schelde K., Soegaard H., Thomsen A. (2004). Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modelling. *Journal of Hydrology 287:279-299.*
- Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B. (1996). Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal 88:704-716.*
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J.P., H nault C., Maraux F., Seguin B., and Sinoquet H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy 18:309-322.*
- Chern J.-S., Lee L.-C., Wang H.-C., Chu F.-H. (2001). An Introduction to NSPO and ROCSATs Missions. *3rd IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany, April 2-6, 2001.*
- Deardorff J.W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research 83C:1889-1903.*
- Debaeke P., Aboudrare A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy 21:433-446.*
- Dedieu G., Cabot F., Chehbouni A., Duchemin B., Maisongrande P., Boulet G., Pellenq J. (2003). RHEA: a micro-satellite mission for the study and modeling of land surfaces through assimilation techniques. *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, 6-11 April 2003, Nice (France).*
- Devonec E., A.P. Barros (2002). Exploring the transferability of a land-surface hydrology model. *Journal of Hydrology 265:258-282.*
- Duchemin B., Maisongrande P., Boulet G. (2005-a). A Simple Algorithm For Yield estimates (SAFY) using Remotely-Sensed data : Calibration and Evaluation for Semi-Arid Irrigated Winter Wheat. *Submitted to Remote Sensing of Environment.*
- Duchemin B., Hadria R., Erraki S., Boulet G., Maisongrande P., Chehbouni A., Escadafal R., Ezzahar J., Hoedjes J.C.B., Kharrou M.H., Khabba S., Mougnot B., Olioso A., Rodriguez J-C., Simonneaux V. (2005-b). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management, in press.*
- de Wit C.T., Brouwer R., Penning de Vries F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. *Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.*
- Eitzinger J., M. Trnka, J. H sch, Z.  alud, M. Dubrovsk y (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling 171:223-246.*
- Fenner M. (1998). The phenology of growth and reproduction in plants. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Ed. Gustav Fischer Verlag, 1998. Vol. 1/1, pp. 78-91.
- Franks S.W., K.J. Beven, P.F. Quinn, I.R. Wright (1997). On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology 86:63-75.*
- Gu rif M., F. Baret, S. Moulin, A. B gu  (2001). T l d t ction, h t rog n it  parcellaire et gestion spatialis e des interventions techniques. In : *Mod lisation des agro cosyst mes et aide   la d cision*. Collection Rep res,  dition CIRAD-INRA, p. 303-326.

- Hadria R., S. Khabba, A. Lahrouni, B. Duchemin, A. Chehbouni, J. Carriou (2005). Calibration and Validation of the STICS Crop Model for Managing Wheat Irrigation in the Semi-Arid Marrakech/Al Haouz Plain. *Arabian Journal for Science and Engineering*, in press.
- Hall F.G., J.R. Townshend, E.T. Engmann (1995). Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface parameters. *Remote Sensing of Environment* 51:138-156.
- Hamza M.A., W.K. Anderson (2005). Soil compaction in cropping systems : a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82:121-145.
- Jamieson P.D., Porter J.R., Goudriaan J., Ritchie J.T., van Keulen H., Stol W. (1998). A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Research* 55:23-44.
- Jones H.G., F. Tardieu (1998). Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:21-46
- Lawless C., M. A. Semenov and P. D. Jamieson (2005). A wheat canopy model linking leaf area and phenology. *European Journal of Agronomy* 22:19-32.
- Legay J.M. (1999). Quel apprentissage pour l'interdisciplinarité ?. *Natures, sciences, sociétés* 7:3.
- Lemaire G., Gastal F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In : *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, G Lemaire ed., Springer-Verlag, 3-44.
- Limami A. et Améziane R. (1997). Nutrition azotée (NO₃) et distribution du carbone dans la plante. In assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologique, biochimique et moléculaire. *Jean François Morot-Gaudry, INRA éditions, Paris 1997. ISBN 2-7380-0716-3.*
- Lipiec J., J. Arvidsson, E. Murer (2003). Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil & Tillage Research* 73:15-29.
- Maas S.J. (1993). Parametrized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. *Agronomy Journal* 85:348-353.
- Malézieux E., G. Trébouil, M. Jaeger (2001). Modéliser les agroécosystèmes. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. Collection Repères, édition CIRAD-INRA, pp 17-33.*
- Mo X., S. Liu, Z. Lin, Y. Xu, Y. Xiang, T.R. McVicar (2005). Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183:301-322.
- Monteith J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9:747-766.
- Moulin S., Bondeau A., Delécolle R. (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing* 19:1021-1036.
- Olesen J.E., B.M. Pertesen, J. Bernsten, S. Hansen, P.D. Jamieson, A.G. Thomsen (2002). Comparison of methods for simulation effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 16:279-294.
- Porter J.R., M. Gawith (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10:23-36.
- Ruget F., N. Brisson, R. Delécolle, R. Faivre (2002). Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22:133-158.
- Sadras V.O., G.J. O'Leary, D.K. Roget (2005). Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research* 91:131-148.
- Scotford I.M., P.C.H. Miller (2005). Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review. *Biosystems Engineering* 90:235-250. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010.
- van Oijen M, M.F. Dreccer, K.-H. Firsching, B.J. Schnieders (2004). Simple equations for dynamic models of the effects of CO₂ and O₃ on light-use efficiency and growth of crops. *Ecological Modelling* 179:39-60.
- Vossen P., Rikjs D. (1998). Issues related to agrometeorological models when applying them for yield forecasting at a European scale. In. "Agrometeorological applications for regional crop monitoring and production assessment", D. Rijk, J.M. Terres, P. Vossen, European Commission eds. EUR 17735 EN.
- Vrugt J.A., H.V. Gupta, W. Bouten and S. Sorooshian (2002). A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research* 39(8), 1201, 10.1029/2002WR001642.
- Wallach D., B. Goffinet, J-E. Bergez, P. Debaeke, J-N.A.D. Leenhardt (2002). The effect of parameter uncertainty on a model with adjusted parameters. *Agronomie* 22 :159-170.
- Welles J.M., Norman J.M. (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy journal* 83:818-825.
- Wosten J. H. M. (1997). Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: *Soil quality for crop production and ecosystem health*. E.G. Gregorich and M.R. Carter, Elsevier eds, pp. 221-245.