

L'amélioration de l'estimation de l'évapotranspiration au sein d'un modèle de type SVAT, au travers de l'assimilation de données de l'humidité superficielle, de la température de surface ainsi que de l'évapotranspiration : quelles stratégies adopter dans une perspective d'utilisation de données satellites ?

A.Tavernier¹, L.Jarlan¹, S.Er-Raki², G.Bigéard¹, S.Khabba³, Saaidi A.⁴, M. Le Page¹, J.Chirouze¹, G.Boulet¹

*1 CESBIO, Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère, 18 Avenue Edouard Belin, BPI 2801, 31401 Toulouse
CEDEX 9, France*

2 LP2M2E, Faculté des Sciences et Techniques, Av.Abdelkarim Elkhatabi B.P 549, Marrakech, Maroc

3 FSSM, Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Avenue Prince Moulay Abdellah, BP2390, Marrakech, Morocco

*4 DMN, Direction de la Météorologie Nationale, Centre des Applications Climatologiques, Ain Chock, Face Préfecture
Hay Hassani, Casablanca, Morocco*

*adrien.tavernier@ird.fr, lionel.jarlan@cesbio.cnes.fr, s.erraki@gmail.com, guillaume.bigéard@cesbio.cnes.fr,
khabba@uca.ma, saaidister@gmail.com, michel.lepage@cesbio.cnes.fr, jonas.chirouze@cesbio.cnes.fr,
gilles.boulet@ird.fr*

Résumé

Cette étude présente une stratégie visant à améliorer les estimations de l'évapotranspiration dans les zones semi-arides à l'aide de l'assimilation de données dans un modèle de type SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfert), le modèle ISBA (Interactions Sol Biosphère Atmosphère). Dans la perspective d'utiliser des observations issues de la télédétection, l'objectif de ce travail est d'identifier les meilleures combinaisons possibles de données (humidité superficielle / température du sol / évapotranspiration), de répétitivité temporelle d'acquisition (journalière / tous les 3 jours / hebdomadaire / bi-mensuelles / mensuelle) ainsi que le type de techniques d'assimilation de données (méthode variationnelle simplifiée / filtre de Kalman étendu) afin d'améliorer les estimations de l'évapotranspiration. Dans cette étude préliminaire, des données synthétiques se référant à un site expérimental de cultures de blé situé dans la plaine du Haouz, dans le bassin du Tensift près de Marrakech au Maroc ont été utilisées (de Janvier à Mai 2003). Les résultats montrent que pour améliorer l'évapotranspiration au travers de l'analyse de l'humidité racinaire, l'humidité superficielle est l'observation la plus pertinente à utiliser dans le processus d'assimilation (environ 40% d'amélioration de la RMSE (Root Mean Square Error) relative à l'évapotranspiration). Les différentes combinaisons d'observations améliorent les résultats, mais pas de manière significative (quelques % d'amélioration de la RMSE relative à l'évapotranspiration vis-à-vis des observations considérées seules). L'assimilation est très efficace pour de courtes fenêtres d'assimilation. Il est également montré que la propagation de la matrice d'erreur de background faite par le filtre de Kalman étendu n'ajoute pas d'information significative vis-à-vis d'une matrice constante utilisée dans la méthode variationnelle simplifiée.

Mots clefs : Agriculture / Assimilation de données / Climat semi-aride / Evapotranspiration / ISBA / SVAT / Télédétection

1. Introduction

Au Maghreb et dans les pays du Moyen-Orient, la demande croissante en eau [1] associée à la croissance de la population et aux sécheresses plus fréquentes suite au réchauffement climatique [2] pourraient exacerber la pression sur les ressources hydriques dans un proche avenir. L'agriculture est, de loin, le plus grand consommateur d'eau et une quantité importante de ce précieux liquide pourrait être économisée en raison de l'inefficacité des techniques traditionnelles d'irrigation, largement utilisées dans les zones semi- arides.

Le contexte de cette étude est relié aux pratiques d'agriculture irriguée dans la plaine du Haouz, au sein du bassin du Tensift, près de Marrakech au Maroc. L'irrigation agricole représente plus de 85% de la consommation en eau et devant la demande croissante les pompages sont de plus en plus fréquents, entraînant ainsi une baisse du niveau piézométrique de la nappe [3]. Les décideurs sont conscients de ce problème et des études ont été menées depuis 2001 à travers le projet SudMed afin de trouver des solutions à cette situation [4] en tentant d'améliorer la gestion de l'irrigation. Un suivi précis de l'évapotranspiration, un terme clé dans le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, est crucial afin de promouvoir des techniques économisatrice d'eau. Des outils simples basés sur la méthode FAO 56 (Food and Agriculture Organization) et contrôlés par imagerie satellite ont été développés afin d'optimiser les plannings d'irrigation au travers d'une estimations de l'évapotranspiration [5] [6]. Au-delà de ces études appliquées et très opérationnelles, d'autres, plus théoriques, peuvent être effectuées en utilisant des modèles plus complexes et plus physiques. En particulier, les modèles de type SVAT offrent la possibilité de s'intéresser aux processus intermédiaires qui régissent l'évapotranspiration et, ainsi, de faire appel à un vaste panel d'observations issues de la télédétection. L'utopie serait que ce type de modèles, plus physiques, fonctionnent sur de grandes surfaces et prévoient la consommation en eau des cultures. L'un des défis les plus importants pour ce type de modélisation est d'associer le modèle à un schéma d'assimilation de données permettant d'éviter que les sorties ne s'éloignent trop de la réalité.

Les modèles de type SVAT se basent sur un bilan énergétique et un bilan de matière (incluant l'eau) dans le continuum sol-végétation-atmosphère et permettent de prévoir, entre autres, l'évolution de l'évapotranspiration. L'assimilation de données est une technique permettant d'améliorer la prédiction des différentes variables d'état des modèles SVAT en minimisant la différence entre une observation et les prédictions du modèle. Dans notre cas relatif à l'amélioration de l'évapotranspiration, les observations utilisables sont la température, l'humidité de surface et même l'évapotranspiration elle-même. Ces observations peuvent être obtenues à partir de données satellites seules ou combinée à de la modélisation. L'assimilation de données effectuée grâce à des observations de type satellitaire a déjà été utilisée dans le but d'améliorer l'humidité de la zone racinaire [7] [8] [9] ou les flux de carbone et d'évapotranspiration [10]. Les objectifs de cette étude sont: (1) l'amélioration des prévisions de l'évapotranspiration dans le modèle ISBA en suggérant la meilleure combinaison d'observations au sein de la plate-forme d'assimilation de données. Les observations relatives à l'humidité superficielle, la température de surface ainsi qu'à l'évapotranspiration seront testées. (2) la détermination de l'efficacité des différentes techniques d'assimilation utilisées (méthode variationnelle simplifiée / filtre de Kalman étendu). (3) la détermination de la fenêtre temporelle (journalière / tous les 3 jours / hebdomadaire / bi-mensuelle / mensuelle) la plus performante.

Dans le but d'optimiser l'assimilation de données ou même avant de lancer une mission spatiale, ces considérations permettent de suggérer des stratégies en fonction des données disponibles.

La partie 2 est consacrée aux présentations du site expérimental, du modèle ISBA et des techniques d'assimilation de données. La partie 3 présente la construction des données synthétiques et l'estimation des erreurs background, de modèle et d'observations. La partie 4 est consacrée à la présentation des résultats préliminaires. Les conclusions et perspectives sont présentées dans la partie 5.

2. Donnée et Méthodes

2.1 Site d'étude

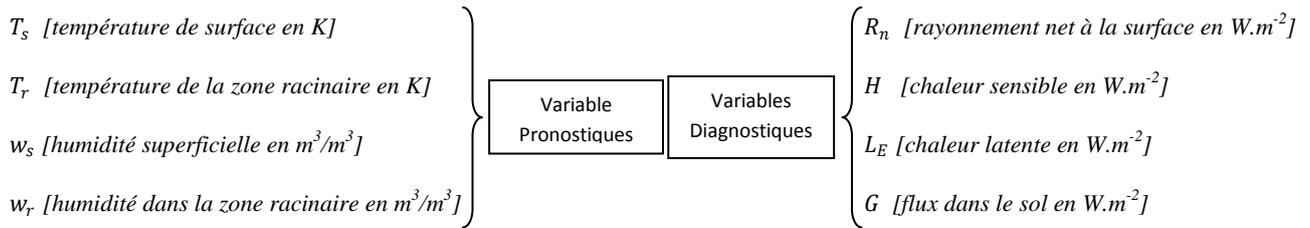
Le site d'étude se trouve au Maroc dans la plaine du Haouz, à 40 km à l'est de Marrakech dans une zone irriguée principalement composée de céréales (31 ° 68'N, 7 ° 38 'O) et présentant un sol de texture fine (limoneuse à argileuse). Durant la saison 2002/2003, plusieurs stations bio-météorologiques ont été installées sur un champ de blé dur de 4 ha au cycle de vie court, propice à la zone climatique concernée (semis le 11 Janvier et récolte réalisée au début du mois de mai). En effet, le climat dans les environs de Marrakech est de type méditerranéen semi-aride avec environ 250 mm de précipitations de pluie annuels. Afin de répondre aux besoins des cultures en eau, qui sont autour de 1600 mm par an, l'ORMVAH (Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz) gère le programme d'irrigation à travers un réseau de canaux directement relié aux barrages de la région. Le calendrier est défini avant le début de la saison agricole selon le niveau des barrages de la période.

Les acquisitions semi-horaires des stations bio-météorologiques concernent la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, les précipitations, la teneur en eau à différentes profondeurs du sol et les flux de chaleur sensible et de chaleur latente obtenus grâce à un système d'Eddy-Covariance. Une description plus détaillée du site expérimental peut être consultée dans [11] et de plus amples informations sur le système d'Eddy-Covariance peuvent être trouvées dans [12]. Ces mesures automatiques sont complétées par des mesures bimensuelles de LAI en utilisant un appareil photographique équipé d'un objectif hémisphérique. Les irrigations sont obtenues via le suivi réalisé par les offices locaux dépendant directement de l'ORMVAH.

2.2 Le modèle ISBA

Le modèle ISBA [13] [14] a été implémenté dans SURFEX (SURFaces EXternalisées) une plate forme développée par le CNRM (Centre National de la Recherches Météorologiques) afin de fournir les conditions aux limites des surfaces continentales ou océaniques dans les modèles météorologiques et climatiques de Météo-France.

Les équations physiques du modèle ISBA sont basées sur l'approche force-restore [15] qui implique un phénomène de relaxation des variables physiques au cours du temps. Dans ISBA, un seul bilan énergétique est résolu pour le système sol-végétation atmosphère. Les variables pronostiques se réfèrent à la température et la teneur en eau pour chaque couche (2 couches dans notre étude : surface et zone racinaire). Les variables diagnostiques correspondent aux différents flux.



L'évolution de l'évapotranspiration peut-être détaillée grâce aux équations suivantes

$$L_E = LE_g + LE_v \quad (1)$$

avec L ($J.kg^{-1}$) la chaleur latente de vaporisation, E_g ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) l'évaporation du sol et E_v ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) l'évaporation de la végétation.

L'évaporation de la végétation est principalement dominée par le terme de transpiration de la plante E_{tr} ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)

$$E_{tr} = L\rho_w veg \frac{1 - \delta}{R_a + \frac{R_{smin}}{LAI} * \frac{1}{F_1 F_2 F_3 F_4}} (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (2)$$

avec L ($J.kg^{-1}$) la chaleur latente de vaporisation présente dans (1), ρ_w ($kg.m^{-3}$) la densité volumique de l'eau, veg (*sans dimension*) la fraction de végétation recouvrant le sol, δ (*sans dimension*) la fraction du feuillage recouverte d'eau, $q_{sat}(T_s)$ (kg/kg), l'humidité spécifique à saturation, q_a (kg/kg), l'humidité spécifique atmosphérique, R_a ($s.m^{-1}$) la résistance aérodynamique de l'air, R_{smin} ($s.m^{-1}$), la résistance de surface minimale, LAI (m^2/m^2) la surface de végétation par m^2 de sol et F_1, F_2, F_3 et F_4 (*sans dimension*) des fonctions de stress.

Plus particulièrement

$$F_2 = \frac{w_r - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \quad (3)$$

Avec w_r ($m^3.m^{-3}$), l'humidité dans la zone racinaire, w_{fc} ($m^3.m^{-3}$) la capacité au champs et w_{wilt} ($m^3.m^{-3}$), le point de flétrissement.

La variable la plus pertinente pour l'analyse de l'évapotranspiration L_E ($W.m^{-2}$) (équation (1)) est la teneur en eau dans la zone racinaire w_r ($m^3.m^{-3}$) qui est directement liée au flux de chaleur latente au travers d'une fonction de stress F_2 (*sans dimension*) (équation (3)). La plante extraie en effet de l'eau depuis la zone racinaire afin de transpirer. Si le contenu en eau de la zone racinaire descend sous le point de flétrissement w_{wilt} ($m^3.m^{-3}$), la plante stresse, les stomates se ferment et la transpiration est nulle, ce qui, en contexte de zone semi-aride peut survenir même avec un système d'irrigation.

Dans une perspective d'assimilation de données, il est impossible d'analyser directement l'évapotranspiration L_E ($W.m^{-2}$) car cette variable est une variable diagnostique. La stratégie de cette étude est donc d'analyser la variable prognostique la plus proche de l'évapotranspiration L_E ($W.m^{-2}$), c'est-à-dire d'analyser l'humidité de la zone racinaire w_r ($m^3.m^{-3}$).

L'ensemble des équations du modèle ISBA sont disponibles dans [13] [14].

2.3 Techniques d'assimilation de données

Le but de l'assimilation de données est d'associer les représentations dynamiques du modèle aux observations disponibles en tenant compte des erreurs du modèle et des erreurs instrumentales. Une caractéristique de l'assimilation de données est d'analyser une variable d'état qui n'est pas directement observable, par une autre, observable, et reliée dynamiquement à la première.

Dans cette étude, deux méthodes différentes ont été utilisées : le 2DVAR (méthode variationnelle simplifiée) et l'ExKF (filtre de Kalman étendu). La première (2DVAR) est une méthode variationnelle qui corrige l'état initial sur une fenêtre d'assimilation donnée grâce à l'information disponible à la fin de cette fenêtre d'assimilation. La seconde technique d'assimilation est une méthode séquentielle. La correction est effectuée lorsque l'observation est disponible.

L'équation principale d'analyse au temps t pour une fenêtre d'assimilation δt relie le vecteur des variables à analyser x_t^a à une estimation a priori (qui est usuellement pris comme l'estimation du modèle avant analyse x_t^m), à la différence entre les observations disponibles au temps $t+\delta t$ $y_{t+\delta t}$ et l'estimation du modèle x_t^m transposée au sein du domaine des observations grâce à l'opérateur H . Cette différence est pondérée par le gain K .

$$x_t^a = x_t^m + K_t (y_{t+\delta t} - H_t x_t^m) \quad (4) \quad (2DVAR)$$

$$x_{t+\delta t}^a = x_{t+\delta t}^m + K_{t+\delta t} (y_{t+\delta t} - H_{t+\delta t} x_{t+\delta t}^m) \quad (4') \quad (ExKF)$$

Dans le cas du 2DVAR, l'opérateur H est calculé grâce à une linéarisation numérique (méthode des différences finies). Pour l'ExKF, pour lequel les variables utilisées comme observations nécessitent d'être analysées, les membres de l'opérateur sont égaux à 1 si la variable associée est une observation, à 0 sinon.

Le gain K est exprimé comme suit et permet, d'une part, de pondérer la différence entre les observations et la transposition du modèle au sein du domaine des observations $y - Hx$ par une connaissance sur l'erreur de background

$\varepsilon_B = x_t^a - X_t^T$ (différence entre l'état analysé et l'état vrai du système X_t^T) au sein de la matrice B (covariance de ε_B) et l'erreur d'observation $\varepsilon_{obs} = y_{t+\delta t} - H_t X_t^T$ (différence entre les observations et la transposition de l'état vrai X_t^T du système depuis l'espace du modèle vers l'espace des observations) au sein de la matrice R (covariance de ε_{obs}) et, d'autre part, de transposer cette différence $y - Hx$ du domaine des observations au domaine du modèle:

$$K_t = B_t H_t^T (H_t B_t H_t^T + R_t)^{-1} \quad (5)$$

Dans le cadre du 2DVAR la matrice d'erreur background B est fixe au cours du temps alors que pour l'ExKF, elle est propagée au cours du temps grâce à une linéarisation du comportement du modèle M (matrice jacobienne du modèle), et à une estimation de l'erreur modèle Q .

$$B_t = M_{t-\delta t} B_{t-\delta t} M_{t-\delta t}^T + Q_t \quad (6)$$

La section 3.2 porte sur l'initialisation des matrices R , B et Q .

Des informations complémentaires sur les différentes méthodes d'assimilation peuvent être trouvées dans [7].

3. Initialisation du modèle et de la plate forme d'assimilation

3.1 Expériences jumelles

La calibration des paramètres inhérents au modèle est une des étapes préliminaires très importante et souvent primordiale en ce qui concerne les modèle de type SVAT. Cependant, cette étude ne porte pas sur la calibration mais sur l'assimilation de données. Pour s'affranchir de cette étape de calibration, un ensemble de données synthétique est crée en utilisant la base de données ECOCLIMAP [16] avec un LAI (Leaf Area Index) forcé.

Un premier run est effectuée à partir duquel sont extraites les observations synthétiques: ce premier run correponds à la modélisation de référence. Un deuxième run est ensuite construit en perturbant les entrées du modèle grâce à un bruit gaussien pour les entrées "continues" (rayonnement incident, température de l'air, vitesse du vent...) et grâce à un décalage et à une perturbation aléatoire pour les entrées ponctuelles (précipitations et irrigations).

3.2 Matrices de covariance

Pour une méthode d'assimilation de données, il est nécessaire de bénéficier d'informations sur les erreurs modèles et sur les erreur d'observations au travers des matrices R , B et Q . L'estimation de ces erreurs, en particulier l'erreurs modèle et l'erreur background, fait partie des tâches les plus ardues de l'initialisation d'un schéma d'assimilation de données [17].

Dans cette étude la matrice R est supposée diagonale (pas de lien entre les erreurs d'observation des différentes variables utilisées comme observations) et ces valeurs sont données par celles rencontrées dans la littérature et concernant l'utilisation direct de la télédétection. Les références sont indiquées entre crochets.

$$\sigma_{w_s}^R = 0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad [18] \quad / \quad \sigma_{w_r}^R = 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad [19] \quad / \quad \sigma_{T_s}^R = 3 \text{ K} \quad [20] \quad / \quad \sigma_{L_E}^R = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad [21]$$

L'erreur modèle est supposée égale à l'erreur background $Q = B$. De même que pour R , B est supposée diagonale. B est estimée grâce à une méthode de type Monte Carlo. A chaque pas de temps relatif à une fenêtre d'assimilation, l'erreur background est calculée grâce à la statistique d'un ensemble initialement perturbé vis-à-vis d'une valeur de référence puis propagé et finalement comparé à l'observation disponible en fin de fenêtre. Les résultats (non illustrés) montrent que l'erreur de background est relativement stationnaire et indépendante de la fenêtre considérée.

$$\sigma_{w_s}^B = 0.043 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad / \quad \sigma_{w_r}^B = 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad / \quad \sigma_{T_s}^B = 2.8 \text{ K} \quad / \quad \sigma_{L_E}^B = 75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

4. Résultats et discussion

La stratégie de cette étude est d'analyser l'humidité de la zone racinaire w_r ($m^3.m^{-3}$) en utilisant des observations pouvant être obtenues grâce à la télédétection (w_s ($m^3.m^{-3}$) / T_s (K) / L_E ($W.m^{-2}$)), ceci, afin d'améliorer l'évapotranspiration L_E ($W.m^{-2}$).

L'ensemble des résultats est résumé par la Figure 1.

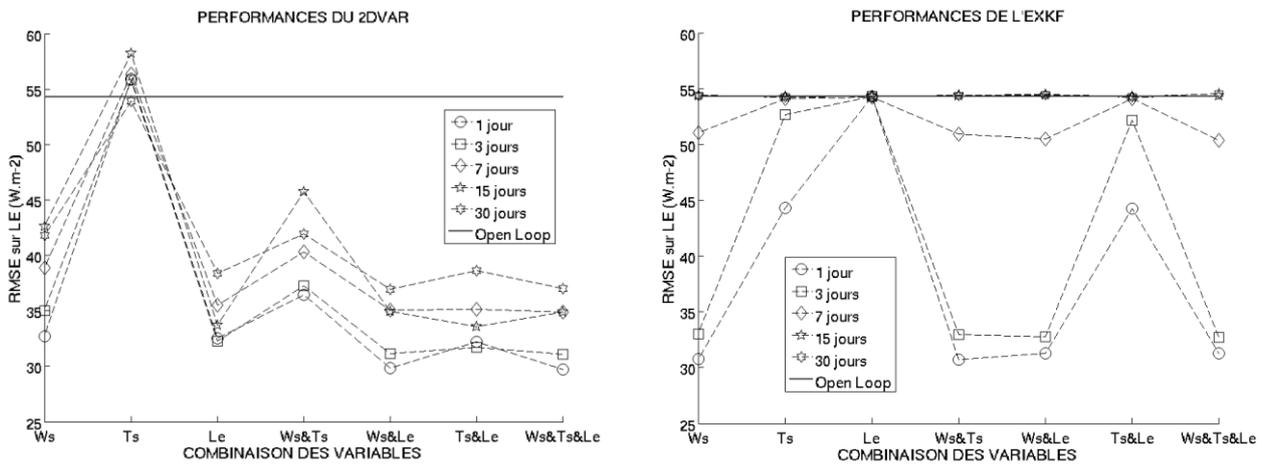


Figure 1: Performances de l'assimilation pour les différents types de combinaisons de variables et de fenêtres d'assimilation possibles 2DVAR (gauche) / ExKF (droite)

Du point de vue de la fenêtre d'assimilation, plus les observations sont disponibles fréquemment et plus l'assimilation est efficace, exceptée pour l'assimilation bimensuelle. L'équivalence est presque de mise pour les fenêtres à 1 et 3 jours (différence moyenne vis-à-vis de la RMSE relative à l'évapotranspiration inférieure à 5 %). Dans le cas de l'ExKF, les assimilations sur plus de 7 jours sont inefficaces. Ceci est dû à la linéarisation de la matrice M (matrice jacobienne du modèle) et à la propagation de B . En effet, plus la fenêtre d'assimilation est longue et moins l'approximation linéaire est valable. Par exemple, plus la fenêtre d'assimilation est grande et plus il est probable de tomber sur un événement pluvieux ou une irrigation, phénomènes qui vont entraîner des non linéarité dans la dynamique des variables relatives à l'humidité du sol.

Dans le cadre des différentes combinaisons de variables, le 2DVAR est plus performant via l'association des trois variables w_s ($m^3.m^{-3}$), T_s (K), et L_E ($W.m^{-2}$) simultanément (la RMSE relative à l'évapotranspiration décroît de 54.26 $W.m^{-2}$ pour l'Open Loop (run sans assimilation) à 29.74 $W.m^{-2}$, ce qui représente une amélioration de 45 %). Cependant l'amélioration vis-à-vis des assimilations de w_s ($m^3.m^{-3}$) ou L_E ($W.m^{-2}$) considérés seules est faible (quelques %). L'assimilation par T_s (K) est inefficace dans le cadre du 2DVAR alors qu'elle est possible pour l'ExKF. Ceci est lié au fait que l'assimilation dans le cas du 2DVAR corrige en début de fenêtre (equation (4)) alors que l'ExKF corrige en fin de fenêtre (equation (4)'). T_s (K) étant une variable à l'évolution rapide, l'information est plus facilement perdue dans le cadre du 2DVAR. Pour l'ExKF, c'est l'assimilation de L_E ($W.m^{-2}$), seule, qui est inefficace. Ceci s'explique par le fait que L_E ($W.m^{-2}$) est une variable diagnostique et que la matrice Q est diagonale. Le terme du gain K relatif à w_r ($m^3.m^{-3}$) est alors nul et w_r ($m^3.m^{-3}$) n'est pas corrigée. Ainsi, pour l'ExKF, les meilleures combinaisons possibles sont trouvées pour une assimilation de w_s ($m^3.m^{-3}$) et T_s (K) dans le cadre d'une fenêtre d'assimilation de 1 jour (amélioration de 47 %) et des trois variables simultanément dans le cadre de fenêtre d'assimilation de 3 et 7 jours (amélioration respective de 40 % et de 7 %). Le choix des meilleures combinaisons possibles prouvent que la majeure partie de l'information relative à l'humidité de la zone racinaire w_r ($m^3.m^{-3}$) est située dans l'humidité superficielle w_s ($m^3.m^{-3}$).

L'information supplémentaire apportée par l'ExKF au travers de la propagation de l'erreur de background (equation (6)) est faible voir inexistante (amélioration moyenne de quelques %).

5. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était de déterminer la meilleure combinaison de variables (humidité superficielle / température de surface / évapotranspiration) , de répétitivité temporelle d'acquisition des observations (journalière / tous les 3 jours / hebdomadaire / bimensuel / mensuel) et la meilleure technique d'assimilation (2DVAR / ExKF) afin de mieux contraindre les estimations de l'évapotranspiration au sein d'une modélisation de type SVAT. Dans le cas d'un champ de blé irrigué et pour le modèle ISBA, cette étude préliminaire montre que:

- l'amélioration de l'évapotranspiration à travers l'analyse de l'humidité de la zone racinaire nécessite d'inclure des observations de l'humidité superficielle afin d'obtenir des résultats significatifs (amélioration de 40% en moyenne)
- Les combinaisons entre les différentes variables améliorent généralement l'assimilation, mais pas de manière significative (quelques % d'amélioration)
- plus la fenêtre d'assimilation est courte et plus l'assimilation est performante.

Les méthodes comme le 2DVAR et l'ExKF sont fortement dépendantes de la linéarisation des opérateurs. Ainsi, l'implémentation d'une méthode de type Monte-Carlo comme l'EnKF (filtre de Kalman d'ensemble) [22] pourrait s'avérer utile dans le cadre de comportement fortement non linéaire. A terme, l'objectif serait de travailler avec des données réelles et non pas synthétiques. Au cours de la phase de test précédant cette étude, il a été mis en évidence (non illustré) que la base de données ECOCLIMAP [14] ne permettait pas une paramétrisation satisfaisante sur les sites d'étude disponibles. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude de sensibilité des différents paramètres, puis de les calibrer. Un travail actuellement en cours porte sur une étude de sensibilité multicritère [23]. Enfin, toutes ces démarches devront être appliquées sur de grandes échelles spatiales et non plus sur des spots, nécessitant ainsi l'utilisation de fonctions lissantes intégrant l'information spatiale d'un pixel à un autre [24].

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du LMI TREMA (Laboratoire Mixte International Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride <http://trema.ucam.ac.ma>) et a été partiellement financé par le projet MISTRAL (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales). Les auteurs souhaitent remercier Stéphanie Faroux du CNRM qui a toujours répondu présente afin de résoudre les problèmes techniques inhérents à SURFEX.

Références

[1] Plan Bleu. Des solutions durables pour l'eau en Méditerranée : gérer la rareté et améliorer la qualité. Rapport relatif à l'objectif cible n°2 (MED 1-2), 2012, p 29

[2] GIEC, 2007b. Fourth Assessment Report : Physical basis, published online 17 November 2007, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_en.pdf

[3] Abourida, A., Razoki, B., Errouane, S., Leduc, C, Prost, J.P, "Impact de l'irrigation sur la piézométrie du secteur N'fis au Haouz Central de Marrakech", Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, IAHS Publication 278, 389-395, 2003

- [4] Chehbouni, A., Escadafal, R., Boulet, G., Simonneaux, V., Dedieu, G., Mougenot, B., Khabba, S., Kharrou, M.H., Maisongrande, P., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Hoedjes, J., Hadria, H., Abourida, A., Cheggour, A., Raibi, F., Boudhar, A., Benhadj, A., Hanich, L., Benkaddour, A., Guemouria, N., Chehbouni, A.H., Lahrouni, A., Olioso, A., Jacob, F., Williams, D.G., Sobrino, J.A. "An integrated modeling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Programme", *International Journal of Remote Sensing* 29, 2008
- [5] Lepage, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, L., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., Chehbouni, A., "An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco", *Water Resource Management* 26, 2012
- [6] Er-Raki, S., Chehbouni, A., Hoedjes, J., Ezzahar, J., Duchemin, B., Jacob, F., "Improvement of FAO-56 method for olive orchards through sequential assimilation of thermal infrared-based estimates of ET", *Agricultural Water Management* 95 (3), 309-321, 2008
- [7] Sabater, J.M., Jarlan, L., Calvet, J.C., Bouyssel, F., "From near-surface to root-zone soil moisture using different assimilation techniques", *Journal of Hydrometeorology* 8 (2), 194-206, 2006
- [8] Barbu, A.L., Calvet, J.C., Mahfouf, J.F., Alberget, C., Lafont, S., "Assimilation of soil wetness index and leaf area index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study", *Biogeosciences* 8, 1971-1986, 2011
- [9] Crow, T.W., Kustas, W.P., Prueger, J.H., "Monitoring root-zone soil moisture through the assimilation of a thermal remote sensing-based soil moisture proxy into a water balance model", *Remote Sensing of Environment* 112, 1268-1281, 2008
- [10] Jarlan, L., Balsamo, G., Lafont, S., Beljaars, A., Calvet, J.C., Mougin, E., "Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: Application to West Africa", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113, 2008
- [11] Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R., "Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region", *Agricultural Water Management* 87, 41-54, 2007
- [12] Duchemin, B., Hadria, R., Er-Raki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.C., Simonneaux, V., "Monitoring wheat phenology and irrigation in central Morocco: on the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficient, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices", *Agricultural Water Management* 79, 1-27, 2006
- [13] Noilhan, J., Planton, S., "A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models", *Monthly Weather Review* 117 (3), 536-549, 1989
- [14] Noilhan, J., Mahfouf, J.F., "The ISBA land surface parameterization scheme", *Global and Planetary Change* 13 (1-4), 145-159, 1996
- [15] Bhumralkar, C.M., "Parameterization of the planetary boundary layer in atmospheric general circulation models", *Reviews of Geophysics and Space Physics* 14, 215-226, 1976
- [16] Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.L., Masson, V., Martin, E., Le Moigne, P., "ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1-km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models", *Geoscientific Model Development Discussions* 5 (4); 3573-3620, 2012
- [17] Dee, D.P., "On line estimation of error covariance parameters for atmospheric data assimilation", *Monthly Weather Review* 123, 1128-1145, 1994

- [18] Wagner, W., Blösch, G., Pampaloni, P., Calvet, J.C, Bizzari, B., Wigneron, J.P, Kerr, Y., "Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications", *Nordic Hydrology* 38, 1-20, 2007
- [19] Ceballos, A., Scipal, K., Wagner, W., Martinez Fernandez, J., "Validation of ERS scatterometer-derived soil moisture data in the central part of the Duero Basin, Spain", *Hydrological Processes* 19, 1549-1566, 2005
- [20] Dash, P., Gottschke, F., Olesen, F., Fischer, H., "Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data : theory and practice", *International Journal of Remote Sensing* 23 (13), 2563-2594, 2002
- [21] Kalma, J.D., McVicar, T.R, McCabe, M.F., "Estimating land surface evaporation : a review of methods using remotely sensed surface temperature data", *Surveys in Geophysics* 29 (4-5), 421-469, 2008
- [22] Evensen, G., "The ensemble kalman filter: theoretical formulation and practical implementation", *Ocean Dynamics* 53 (4), 343-367, 2003
- [23] Bastidas, L.A., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Shuttleworth, W.J., Yang, Z.L., "Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods", *Journal of Geophysical Research* 104, 19481-19490, 1999
- [24] Han, X., Li, X., Hendricks Franssen, H.J, Vereecken, H., Montzka, C., "Spatial horizontal correlation characteristics in the land data assimilation of soil moisture"; *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 1349-1363, 2012