

Abstract

Irrigated agriculture is an important pressure on water resources, consuming more than 70% of the mobilized freshwater resources at global scale. However, the information on irrigation, which is crucial for the sustainability of water resources in agricultural regions, is often unavailable. Therefore, monitoring and quantifying the crop water budget over extended areas is critical.

This PhD thesis aims to integrate optical/thermal remote sensing data into a simplified crop water balance model for monitoring the water budget of irrigated agricultural areas. For this purpose, an innovative and stepwise approach is developed to estimate simultaneously the irrigation, the evapotranspiration (ET) and the root-zone soil moisture (RZSM) at crop field scale (100 m resolution) on a daily basis.

In a first step, a feasibility study is carried out using in situ optical/thermal measurements collected over a winter wheat field of the Haouz plain, Morocco. A crop water stress coefficient (Ks) derived from the land surface temperature (LST) and vegetation index (NDVI) is first translated into RZSM diagnostic estimates, which is then used to estimate irrigation amounts and dates along the season. Next, the retrieved irrigations allow forcing the dual crop coefficient FAO-56 model (FAO- 2Kc) to re-analyze the daily ET and RZSM. The re-analyzed RZSM is significantly improved with respect to RZSM diagnostic estimates, reaching the same accuracy as that obtained by using actual irrigations (RMSE = $0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ and $R^2 = 0.7$). However, the approach needs to be tested using satellite data in order to demonstrate its real applicability.

The next step consists in adapting the previous approach to spatially integrated but temporally sparse Landsat NDVI/LST data. For this purpose, a contextual method is first used to derive Landsat-derived estimates (crop coefficients and RZSM), which are used to re-initialize a FAO-based model and propagate this information daily throughout the season. Then, the retrieved pixel-scale irrigations are aggregated to the crop field-scale. The approach is applied to three agricultural areas (12 km by 12 km) in the semi-arid region of Haouz Plain, and validated over five winter wheat fields with different irrigation techniques (drip-, flood- and no-irrigation). The results show that the seasonal irrigation amounts over all the sites and seasons is accurately estimated (RMSE = 44 mm and $R = 0.95$), regardless of the irrigation techniques. Acceptable errors (RMSE = 27 mm and $R = 0.52$) are obtained for irrigations cumulated over 15 days, but poor agreements at daily to weekly scales are found in terms of irrigation. However, the daily RZSM and ET are accurately estimated using the retrieved irrigation and are very close to those estimated using actual irrigations (overall RMSE equal to $0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ and 0.83 mm.d^{-1} for RZSM and ET, respectively).

In a final step, an operational LST disaggregation method based on NDVI/LST and Landsat/MODIS relationships is implemented for enhancing the spatio-temporal resolution of LST as input to the irrigation retrieval approach. The disaggregation

method is tested over an arid region of Chile and our study area in the Haouz Plain. Combining both disaggregated LST and Landsat LST data sets, thanks to the increase in the temporal frequency of LST data, results in a better detection of irrigation events and amounts. The overall RMSE of cumulated irrigation at different time scales is decreased from 46 to 34 mm, while the R is increased from 0.50 to 0.64. Consistently, the RZSM estimated using the disaggregated LST in addition to Landsat LST as input is improved by 26% and 14% in terms of RMSE and R, respectively.

Keywords: remote sensing optical/thermal, irrigation, root-zone soil moisture, evapotranspiration, water balance model.

Résumé

L'agriculture est une pression importante sur les ressources en eau, consommant plus de 70% de l'eau douce mobilisée à l'échelle mondiale. Cependant, les informations sur l'irrigation, pourtant cruciales pour assurer une durabilité de la ressource, sont souvent indisponibles. Par conséquent, il est essentiel d'estimer les différents termes du bilan d'eau des cultures à grande échelle.

Cette thèse vise à intégrer les données de télédétection optique/thermique dans un modèle simplifié de bilan d'eau des cultures pour le suivi du bilan d'eau des zones agricoles irriguées. Une approche innovante est développée pour estimer simultanément l'irrigation, l'évapotranspiration (ET) et l'humidité en zone racinaire (RZSM) journalières à l'échelle de parcelle (ou à 100 m de résolution).

Dans une première partie, une étude de faisabilité est réalisée à l'aide de mesures optiques/thermiques in situ collectées sur une parcelle de blé d'hiver dans la plaine du Haouz, au Maroc. En pratique, un coefficient de stress hydrique (K_s) dérivé de la température de surface (LST) et d'un indice de végétation (NDVI) est d'abord traduit en une première approximation de RZSM, qui est utilisée pour estimer les quantités et les dates d'irrigation au cours de la saison. Les irrigations obtenues permettent ensuite de forcer le modèle FAO-56 à coefficient cultural double (FAO-2Kc) et de fournir des ré-analyses ET et RZSM journalières. La RZSM ré-analysée est significativement améliorée par rapport aux premières estimations de RZSM, atteignant la même précision que celle obtenue en utilisant les irrigations réelles (RMSE=0,03 m^3m^{-3} et $R^2=0,7$). Toutefois, l'approche doit encore être testée avec des données satellitaires afin de démontrer son applicabilité dans le cas réel.

La deuxième partie consiste à adapter l'approche précédente aux données optiques/thermiques Landsat à faible fréquence temporelle. Une méthode contextuelle est utilisée pour obtenir des estimations dérivées de Landsat (coefficients de culture et RZSM), qui sont utilisées pour réinitialiser un modèle basé sur le FAO-2Kc et propager ces informations à l'échelle journalière tout au long de la saison. Ensuite, les irrigations obtenues à l'échelle des pixels sont agrégées à la parcelle pour ré-analyser l'ET et la RZSM journalières. L'approche est appliquée sur trois zones agricoles (12 km x 12 km) de la région semi-aride de la plaine du Haouz et validée sur cinq parcelles de blé d'hiver avec différentes techniques d'irrigation (goutte à goutte, gravitaire et sans irrigation). Les résultats montrent que l'irrigation saisonnière sur l'ensemble des sites et des saisons est estimée avec une bonne précision (RMSE=44 mm et $R=0,95$), et ce quelque soit la technique d'irrigation. Des erreurs acceptables (RMSE=27 mm et $R=0,52$) sont obtenues pour des irrigations cumulées sur 15 jours, mais les erreurs sont beaucoup plus importants à l'échelle journalière et hebdomadaire. Cependant, les RZSM et ET journalières sont estimées avec précision à l'aide de des irrigations inversées et sont même très proches de celles estimées à l'aide des irrigations réelles (RMSE=0,04 m^3m^{-3} pour RZSM et RSME=0,83 mm.d⁻¹ pour ET).

Dans la troisième partie, une méthode opérationnelle de désagrégation des données de LST basée sur les relations NDVI/LST et Landsat/MODIS est mise en œuvre pour améliorer la résolution spatio-temporelle de la LST utilisée en entrée de l'approche d'estimation de l'irrigation. La méthode de désagrégation est testée sur une région aride du Chili et sur notre zone d'étude dans la plaine du Haouz. La combinaison des données de LST Landsat et des données de LST désagrégées permet, grâce au gain en résolution temporelle, une meilleure détection des événements et des quantités d'irrigation. Le RMSE global de l'irrigation cumulée à différentes échelles de temps est réduite de 46 à 34 mm, tandis que le R passe de 0,50 à 0,64. La RZSM estimée à partir du jeu de LST désagrégée en plus des observations Landsat est améliorée de 26% et 14% en termes de RMSE et de R, respectivement.

Mots-clés : télédétection optique/thermique, irrigation, humidité en zone racinaire, évapotranspiration, modèle de bilan hydrique.